

Beitrag zur Automatisierung und
Digitalisierung im primären Rohstoffbereich

—
Entwicklung eines Konzeptes für die
Materialstromcharakterisierung im
Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus

Sunny Schoone

**Beitrag zur Automatisierung und Digitalisierung im primären
Rohstoffbereich**

-

**Entwicklung eines Konzeptes für die Materialstromcharakterisierung im
Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus**

Von der Fakultät für
Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

Sunny Schoone, M.Sc.

aus Stralsund

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Tag der mündlichen Prüfung: 21.06.2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

**ASRE - AACHENER SCHRIFTEN ZUR ROHSTOFF- UND ENTSORGUNGSTECHNIK
DES INSTITUTE FOR ADVANCED MINING TECHNOLOGIES**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen

AMT - Institute for Advanced Mining Technologies der RWTH Aachen

Wüllnerstraße 2 • D-52056 Aachen

Tel.: +49 241 80 95680

Internet: www.amt.rwth-aachen.de • E-Mail: info@amt.rwth-aachen.de

1. Auflage Aachen:

Verlag R. Zillekens, 2024

Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik, Band 110

ISBN: 978-3-941277-53-3

© 2024 Sunny Schoone

Verlag R. Zillekens

Rainweg 19 • 52224 Stolberg

Tel.: +49 2408 958216 • Fax: +49 2408 958217

E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Gesamterstellung

Druckservice Zillekens

Rainweg 19 • 52224 Stolberg

Tel.: +49 2408 958216 • Fax: +49 2408 958217

Internet: www.druckservice-zillekens.de • E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Bibliografische Information der deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen Nationalbibliografie.

Detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

D82 (Diss. RWTH Aachen University, 2024)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand größtenteils im Zeitraum von 2017 bis 2021 während meiner Tätigkeiten am Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen.

Somit gebührt mein außerordentlicher Dank Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, die mir während meiner Zeit am Institut nicht nur Vertrauen und Freiraum für meine vielfältigen Tätigkeiten und bei der Anfertigung dieser Arbeit gewährt hat, sondern im Weiteren mir auch jederzeit mit Rat und Tat und als persönlicher Mentor zu Seite stand. Auch möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba für die jahrelange gute und produktive Zusammenarbeit und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langenfeld für die Übernahme des Korreferats bedanken.

Im Weiteren gebührt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus der mir seit 2015 die Chance gegeben hat, mich an Ihm und im Institut zu erproben. Auch in dieser Zeit hatte ich das Glück mit Dr.-Ing. Tobias Vraetz, Dr.-Ing. Christian Niestroj-Cäsar, Dr.-Ing. Tobias Hartmann und vielen mehr zusammenzuarbeiten und zu lernen.

Mein besonderer Dank geht an meine Kollegen und Freunde - Sebastian Wiele, ohne den diese Arbeit niemals möglich gewesen wäre, Maximilian Getz, der immer ein offenes Ohr und Zeit für Diskussionen hatte und Alexandra Radl, die mich in schweren Zeiten immer mit Nervenahrung versorgt hat. Ich hatte noch eine Vielzahl an weiteren Begleitern, die ich leider nicht alle einzeln nennen kann, und ein großes Team aus studentischen Hilfskräften, die mich tatkräftig unterstützt haben. Ebenso möchte ich Frau Renate Roßenthal für Ihr stets offenes Ohr und Ihre unendliche Geduld mit mir danken.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, Mario und Dr.-Phil. Heike Schoone, und natürlich meinem Bruder Kevin Schoone für die immerwährende Unterstützung in allen Lebenslagen und all die Möglichkeiten, die ich hatte, bedanken. Nicht auszulassen an dieser Stelle ist insbesondere Max Rohn und eine Vielzahl immer treuer Freunde, die mich immer motiviert oder auch zur rechten Zeit abgelenkt haben. Dies trifft auch auf Nadine Schlenker zu, die mir viele Jahre tapfer zur Seite stand.

Euch allen und vielen mehr gebührt mehr als nur mein Dank, denn diese Arbeit ist in einer Teamleistung entstanden. Es ist und wird mir immer eine Ehre sein ein Teil davon gewesen zu sein. Vielen Dank.

Erlangen, im Juni 2024

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

vii

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen Tiefseebergbau	7
2.1	Einführung in den Tiefseebergbau und Abgrenzung	7
2.2	Grundlagen des Tiefseebergbaus	10
2.2.1	Chemisch-physikalische Struktur und biologischer Aufbau	10
2.2.2	Geologische Verfügbarkeit von polymetallischen Knollen	11
2.2.3	Wirtschaftliche Bedeutung	13
2.2.4	Umweltverträglichkeit des Tiefseebergbaus	15
2.3	Technologische Umsetzung Tiefseebergbau	17
2.3.1	Abbaukonzept polymetallischer Knollen-Lagerstätten	18
2.3.2	Prozess- und Materialströme in der MBM	21
2.4	Hydraulische Förderstromtechnik und Feststofftransport	22
2.4.1	Hydraulische Förderstromtechnik	22
2.4.2	Grundlagen der Strömungsfördertechnik	23
2.4.3	Verhalten von Feststoffen in der Strömungsfördertechnik	23
2.4.4	Strömungsfördertechnik in Rohrsystemen	28
2.5	Anforderungen und Forschungsfrage	32
3	Technologien zur Charakterisierung im Tiefseebergbau	37
3.1	Datenerfassung mittels Sensortechnologien	37
3.2	Sensortechnologische Stoffstromerfassung und -charakterisierung	39
3.2.1	Verfahren zur Inline-Prozessanalytik	40
3.2.2	Vergleich Verfahren zur Inline-Prozessanalytik	42
3.3	Anwendungen der Inline-Prozessanalytik zur Materialcharakterisierung	43
3.4	Bewertung existierender Ansätze	45
4	Acoustic Emission und Datenanalyse	47
4.1	Abgrenzung und Ontologie	47
4.2	Entstehung des Acoustic Emission Effektes	49
4.2.1	Verhalten von Körperschallwellen in Festkörpern	49
4.2.2	Auftretende Signaldämpfung von Körperschallwellen	54
4.2.3	Einfluss von Grenzschichtübergängen auf Körperschallwellen	55
4.3	Acoustic Emission Messtechnik	58
4.3.1	Funktionsprinzip AE-Sensor	60

4.3.2	Die Messdatenerfassung	61
4.4	Analyse der Messdaten	62
4.4.1	Vorgehen bei der Intervallanalyse	62
4.4.2	Vorgehen der Burstdetektion	64
4.4.3	Vorgehen der Frequenzanalyse	66
5	Übertragungsverhalten von Acoustic Emission bei Materialschicht- übergängen	69
5.1	Versuchsaufbau der Plattentests im Technikum	70
5.1.1	Vorstellung der Testverfahren	71
5.1.2	Versuchsdurchführung Testkonzept Signalgenerator	73
5.2	Ergebnisse der Plattentests	74
5.2.1	Versuchsdurchführung Realkornuntersuchungen	78
5.2.2	Ergebnisse der Realkornuntersuchungen	80
5.2.3	Einfluss von Druck auf den Einsatz der AE-Technologie	82
5.3	Umsetzung der AE-Technologie für den Tiefseebergbau	82
6	Konzeptentwicklung zur Analyse mehrphasiger Materialströme	85
6.1	Charakterisierung hydraulischer Massenströme mittels AE	86
6.2	Semi-/homogene Phase einer hydraulischen Massenströmung	87
6.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung im Technikum	87
6.2.2	Analyse einer homogenen hydraulischen Massenströmung	89
6.2.3	Abhängigkeit der AE-Aktivitäten mit der Rohrreibung	90
6.2.4	Relevanz der Ergebnisse	95
6.3	Feststellung der Differenzierbarkeit der Realkörner	96
6.3.1	Einzeluntersuchungen Realkörner	96
6.3.2	Alternative Datenanalyse mittels Korrelationsanalyse	99
6.3.3	Parametrisierung der Stoßphänomene	101
6.4	Resultierendes Datennutzungskonzept	102
7	Kritische Würdigung des Gesamtkonzeptes	105
7.1	Bewertung im Hinblick auf die Anforderungen	105
7.1.1	Einsatzfähigkeit Tiefseeumgebung	106
7.1.2	Exkurs - Dissipation an Grenschichtübergängen	107
7.1.3	Konstruktive Anforderungen an die Messtechnik	108
7.1.4	Erfüllung Messanforderung	109
7.1.5	Prozesstechnische Anforderungen	109
7.2	Bewertung im Hinblick auf die Forschungsfragen	111
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Abbildungsverzeichnis	119
	Tabellenverzeichnis	121
	Literaturverzeichnis	123

Abkürzungsverzeichnis

AE	Acoustic Emission
AET	Acoustic Emission Technologie
ADW	A/D-Wandler
AMT	Advanced Mining Technologies
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BUS	Tiefseebergbauunterstützungsschiff
CCD	Karbonatausgleichzone
CCZ	Clarion-Clipperton Zone
CMS	Condition Monitoring System
DCB	D/C-Box
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DSM	Deep Sea Mining
EU	Europäische Union
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
HDT	Hit Definition Time
HLT	Hit Lockout Time
IMB	Internationale Meeresbodenbehörde
IMR	Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie
ISO	Internationale Organisation für Normung
MBM	Meeresboden Bergbau Maschine
MFM	Material Fatigue Monitoring
MSR	Messen, Steuern, Regeln
NDT	Non-Destructive Testing
NI	National Instruments
P-Welle	Longitudinalwelle
q-q	Quantil-Quantil-Darstellung
RUV	Remote Underwater Vehicle
RMS	Root-Main-Square
R-Welle	Rayleighwelle
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S-Welle	Scherwelle
SRÜ	Seerechtsübereinkommen
UMP	Umweltmanagementplan
VTS	Transport-/Fördersystem
ZIOB	Zentrales Indisches Ozeanbecken

1 Einleitung

Zu Beginn einer jeden industriellen Wertschöpfungskette steht die primäre Rohstoffversorgung. Dies trifft insbesondere auf Industrienationen/-regionen und somit auch auf die Europäische Union (EU) zu. Als einer der führenden Industriestandorte und Exportzentren weltweit, ist die EU auf eine sichere Rohstoffversorgung angewiesen und stellt gleichzeitig einen der größten Rohstoffkonsumenten weltweit dar. Damit einhergehend kommt auch die Verpflichtung, dass zukünftig dieser Rohstoffkonsum verantwortungsvoll, effizient und nachhaltig gedeckt wird. Das wurde eigenverantwortlich sowohl im Green Deal 2018 als auch im sogenannten "Lieferkettengesetz und der Nachhaltigkeitsstrategie der EU festgesetzt. [1] [2] [3] [4]

Die in jüngerer Vergangenheit steigenden Metallpreise, inklusive eines immer breiteren Bedarfspektrums an Rohstoffen, führen unter anderem zu Versorgungsengpässen der Wirtschaft und rücken bis dato nicht erschlossene Lagerstätten in den Fokus der primären Rohstoffgewinnung. Hierzu zählen unter anderem die auf dem Meeresboden disponiblen polymetallischen Rohstoffvorkommen, die in den Bereich des Meeresbergbaus fallen. Im Speziellen ist hier der Tiefseebergbau (engl. Deep Sea Mining (DSM)), ab einer Wassertiefe von 200 m hervorzuheben [5]. Die Literatur beschreibt in [6], [7] und [1] umfangreich das wirtschaftliche Potenzial und den steigenden Bedarf an dieser neuen Form der Rohstoffgewinnung. Die Internationale Meeresbodenbehörde (IMB) vergab daraufhin zeitlich begrenzt an Staaten eine Vielzahl von Hoheitsverträgen über Teilabschnitte des Meeresbodens, Explorationsverträge und Handlungsgebiete für die Forschung. Mit der Verabschiedung des rechtlichen und ordnungspolitischen Rahmens für die Exploration und mögliche Rohstoffgewinnung in der Tiefsee, wird die Entwicklung eines kommerziell genutzten Tiefseebergbaus ermöglicht. [8] [9]

Die geologische Lage und Zusammensetzung dieser Rohstoffvorkommen impliziert bezüglich ihrer Erschließung eine Reihe von Problemstellungen, die in europäischen Forschungsprojekten behandelt werden [10] [11]. Aufgrund der maritimen Umgebung und der großen Wassertiefe wird eine auf dem Meeresgrund agierende Meeresboden Bergbau Maschine (MBM) zur Gewinnung der Rohstoffe entwickelt. Während der Gewinnung sollen die hydraulischen Massenströme innerhalb des MBM sensortechnologisch erfasst werden. Eine darauf folgende Charakterisierung der erfassten Daten zielt darauf ab, Informationen zu erheben, die dazu beitragen, dass eine hohe Prozesssicherheit und -optimierung während der

Gewinnung und des Transportes der Wertminerale gegeben ist. Aufgrund der besonderen Arbeitsumstände in der Tiefsee gibt es nur eine begrenzte Anzahl von messtechnisch erfassbaren Größen und den dazu adäquaten Messtechniken. Somit ergibt sich die in dieser Arbeit behandelte Problemstellungen, die Umsetzung einer sensortechnologischen Lösung zur Erfassung und Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen innerhalb des MBM. [11]

Zur Lösung dieser Problemstellung wurde vom Institut für Advanced Mining Technologies (AMT) der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen der Ansatz eines körperschall basierten Messverfahrens, hier insbesondere der Acoustic Emission (AE) Technologie, gewählt. Bekannt ist der technologische Ansatz aus dem Bereich der Inline-Stoffstromcharakterisierung eines trockenen Materialstromes auf Förderbändern und soll zukünftig für die Inline-Materialstromerfassung und Charakterisierung in rohrgestützten hydraulischen Massenströmen genutzt werden. In einer dieser Arbeit vorgelagerten Machbarkeitsstudie wurde der prinzipielle Einsatz der Acoustic Emission Technologie (AET) für eine sensortechnologische Anwendung in der polymetallischen Knollengewinnung im Laborumfeld in Grundzügen untersucht und in diesem Umfang erfolgreich bestätigt. [10] [12]

Zur Anwendung der AET in einem realen Arbeitsumfeld musste ein breites Spektrum von neuen Anforderungen und Problemstellungen betrachtet werden. Die unter anderem große geplante Distanz zur Gewinnungsmaschine (bis zu 6000 m), die Salzwasseratmosphäre und die durch hohen Druck belastete Arbeitsumgebung in der Tiefsee (bis zu 6000 m Tiefe ca. 600 bar Druck) stellen allgemein erhöhte und neue Anforderungen an die genutzten Materialien, Maschinen und Techniken dar. Ergänzt wird dieser neue technische Anspruch durch eine geforderte unabdingbare Prozesssicherheit, um einen optimierten und fehlerfreien Prozessablauf gewährleisten zu können. Dieser Anspruch stellt auch neue und erhöhte Anforderung an eine Massenstrom-/Materialcharakterisierung. Daher war die bis dato als Stand der Forschung zu bezeichnende Umsetzung einer AET Anwendung nicht mehr realisierbar. [10] [12]

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Innerhalb des für den Tiefseebergbau vorgesehenen Abbaufahrzeuges sollen erste Aufbereitungsschritte des Förderstroms durchgeführt werden. Ein Sedimentabscheider (Seperator) soll den mehrphasigen Eingangs-Massenstrom bestehend aus Wasser, Sedimenten und polymetallischen Knollen in einen Zielförderstrom aus möglichst reinem Wasser und polymetallischen Knollen aufbereiten. Zur Überprüfung dieses primären Aufbereitungsaggregats sollen sensortechnologisch die im Abbaufahrzeug vorhandenen hydraulischen Massenströme erfasst und bezogen auf die Anwesenheit der unterschiedlichen Phasen charakterisiert werden. Hauptziel hierbei ist sensortechnisch zu erfassen, ob der resultierende Hauptförderstrom nahezu

ausschließlich aus den beiden Phasen Wasser und polymetallischen Knollen besteht.

Somit muss eine den Anforderungen entsprechende Form der Prozessanalytik und die dafür passende Sensortechnologie ausgewählt werden. Die Anwendung der Messtechnik und die Sicherstellung der physikalischen Datenaufnahme muss sich der speziellen Arbeitsumgebung, der vorhandenen Wasser- und Druckatmosphäre, den abbautechnischen prozessorientierten Anforderungen und der Integration in das Gesamtkonzept der polymetallischen Gewinnung stellen. Somit wird eine spezielle Sensoreinhausung genutzt, die den Umgebungsanforderungen entspricht. Die abzuleitende Fragestellung bezieht sich darauf, ob die benötigten und vorausgesetzten Dimensionen einer Sensoreinhausung und die genutzten Materialien für die Nutzung in der Tiefsee noch eine erfolgreiche und qualitativ den Anforderungen entsprechende Messung und eine darauf aufbauende Datennutzung ermöglicht. Hierbei müssen die Körperschall/AE erzeugenden Effekte erneut betrachtet und untersucht werden. Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Fragestellung, wie sich die elastischen Körperwellen translatorisch beim Grenzflächenübergang zwischen unterschiedlichen genutzten Festkörpern und Materialien verhalten. Diese Untersuchung soll den erfolgreichen Einsatz der Technologie in der Tiefsee gewährleisten.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse muss, in Abwägung der Anforderungen an ein in der polymetallischen Knollengewinnung in der Tiefsee angewendetes Sensorsystem, ein Konzept für die Nutzung des Sensorsystems erarbeitet werden. Hierzu müssen mechanische, sensor-, hardware- und softwaretechnische Anforderungen in Einklang gebracht werden. Aufgrund der großen Distanz zur Messtechnik sollte das Konzept eine stabile, automatische und remotefähige Messtechnik beinhalten. Dabei besteht auch der Anspruch, ein Echtzeit (engl. Real-Time) Datentransfer über eine große Distanz zu ermöglichen. Ergänzend dazu soll aufgrund der besonderen Einsatzsituation ein modularer Ansatz gewählt werden, um im weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsverlauf dieses neuen Arbeitsumfeldes der primären Rohstoffgewinnung Optimierungen am Messsystem zu ermöglichen. Das soll einen Transfer für weitere Anwendungen der hydraulischen rohrgestützten mehrphasigen Stoffstromcharakterisierung ermöglichen.

Für die erfolgreiche Charakterisierung eines mehrphasigen hydraulischen Massenstromes muss das Vorhandensein von Quellmechanismen für die Entstehung von Körperschall-/AE-Wellen nachgewiesen werden. Dabei wird auch die Interaktion mit und der resultierende Einfluss auf die Rohrwand untersucht. In dem vorliegenden Fall setzt sich der Massenstrom aus homogenen und inhomogenen Phasen sowie Grobkörnern zusammen. Somit werden erst die Quellmechanismen der jeweiligen Phase untersucht. Darauf aufbauend wird ein Konzept für die Weiterverarbeitung der aufgenommen Daten erstellt, um sie anschließend in mehreren Phasen zu analysieren. Ziel ist es hierbei, die übergeordnete Messaufgabe zu erfüllen und den

aufgenommenen hydraulischen Massenstrom bei der polymetallischen Knollengewinnung bezüglich der vorherrschenden Phasen zu charakterisieren.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Tiefseebergbau ist ein wiederkehrendes Themenfeld und hat in den letzten Jahren wieder deutlich an Relevanz gewonnen. Somit wird in Kapitel 2 auf die politischen, ökonomischen und ökologischen Treiber innerhalb dieses Themenfeldes unter Bezug des primären Rohstoffsektors eingegangen. Ein Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Beschreibung der geologischen Umgebung der Lagerstätten polymetallischer Knollen und dem wirtschaftlichen Potential. In diesem Zuge wird der biologisch/chemische Aufbau von polymetallischen Knollen beleuchtet. Dabei werden mögliche auf die Umwelt bezogene Problemstellungen eines kommerziellen Abbaus dargelegt. Aufbauend darauf wird das Konzept der Gewinnung und Förderung von polymetallischen Knollen skizziert und der Stand der Technik bezüglich der technologischen Umsetzung einer Förderung dieser Rohstoffe beschrieben. Für die Eingrenzung des Forschungsbereiches wird auf die MBM und die innerhalb der Maschine ablaufenden Förderprozesse eingegangen. Dabei werden die dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsfragen definiert und die Anforderungen zusammengefasst.

Basierend auf dem Anforderungsprofil der sensortechnischen Anwendung werden im Stand der Technik in Kapitel 3 die aktuellen Möglichkeiten und der prozesstechnische Nutzen von prozessanalytischen hochgradig spezialisierten und gleichzeitig robusten Sensorsystemen in Inline-Anwendungen innerhalb der Rohstoffindustrie beleuchtet. Die technische Herleitung befasst sich darauf aufbauend mit Sensortechnologien die eine Inline-Prozessanalyse ermöglichen und grenzt die physikalischen Wirkmechanismen voneinander ab. Dabei werden in der Literatur schon beschriebene und umgesetzte Systeme miteinander verglichen. Unter Betrachtung des in Kapitel 2.5 dargelegte Anforderungsprofil wird das für den Einsatz in der Tiefsee vorgesehene Sensorsystem ausgewählt.

Kapitel 4 greift die ausgewählte Sensortechnologie auf und geht weiterführend auf die Entstehung und das Wirkprinzip von Körperwellen im hochfrequenten Bereich, der AE, ein. Die Einflussfaktoren auf die Entstehung und die Transmission des AE-Signals durch Festkörper ist hierbei eine relevante Thematik. Auch wird die Erfassung und Digitalisierung der Signale durch die angewendete Messtechnik thematisiert. In diesem Zuge werden die angewandten Datenverarbeitungswerkzeuge und Analysemöglichkeiten der AE-Signale beschrieben.

Im Rahmen mehrerer Grundlagenversuche werden in Kapitel 5 die für die Übertragung von der Körperschallwelle bis zum Messaufnehmer besten Materialkombinationen von in der Tiefsee einsetzbaren Metallen mittels standardisierten DIN-Testverfahren überprüft. So soll

eine möglichst qualitativ hochwertige Wellenübertragung ermöglicht werden. Abschließend wird das Ergebnis in eine Gehäuseumsetzung für die Nutzung der AET in der Tiefsee integriert und das Gesamtkonzept der mechanischen Anwendung aufgezeigt.

In Kapitel 6 wird die Erfüllung der Messaufgabe erarbeitet. Dabei wird der rohrgestützte hydraulische Massenstrom auf die Anwesenheit und Bestandteile von Körperschall/AE untersucht. Gesondert werden hierbei die Entstehungsmechanismen von Körperschall-/AE-Wellen beim hydraulischen Feststofftransport hergeleitet. Darauf aufbauend wird der hydraulische Massenstrom in der polymetallischen Knollengewinnung durch ein MBM sowohl in seine physikalischen, als auch in seine dazu äquivalenten AE-Signalbestandteile zerlegt und zugeordnet. Die Zuordnung wird durch mehrere Grundlagenversuche validiert und das Ergebnis in einem Datennutzungskonzept zusammengeführt.

Abschließend werden in Kapitel 7 sowohl die in dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse bezogen auf die aufgestellten Forschungsfragen und Anforderungen abgeglichen, als auch kritisch bewertet. Hierbei wird auf weitere Entwicklungsschritte und Einsatzmöglichkeiten eingegangen. Zuletzt werden in Kapitel 8 die Inhalte der Arbeit zusammengefasst und mit einem Ausblick diese Arbeit abgeschlossen.

2 Grundlagen Tiefseebergbau

Im Folgenden werden grundlegende Begriffe und Thematiken, die dieser Arbeit und der Bearbeitung der Problemstellung zu Grunde liegen, behandelt. Hierbei wird gesondert auf das besondere Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus, der Förderstromtechnik und den speziellen Anforderungen an ein in diesem Umfeld arbeitendes Sensorsystem eingegangen, um abschließend die Forschungsfragen abzuleiten und zu definieren.

2.1 Einführung in den Tiefseebergbau und Abgrenzung

Die Erde ist zu ca. 73 % von Wasser bedeckt und der maritime Bereich hat in der menschlichen Historie zum einen geschichtlich und zum anderen auch als Rohstoffquelle einen bedeutenden Stellenwert. Trotz des großen Flächenanteils und das vorhandene Potential der Wasserhemisphäre, wurde in der Vergangenheit hauptsächlich auf den Kontinentalschelf als Rohstoffquelle für die Fischerei, Gas-/Ölförderung und Diamantengewinnung zurückgegriffen. [13]

Im Laufe der letzten 200 Jahre wurde durch die Entwicklung neuer technologischer Möglichkeiten die Nutzung der Freiwasserzone deutlich erweitert. Hierbei stellten unter anderem zwei Faktoren einen steigenden Einfluss dar. Zum einen erhöhte sich die Menge der interkontinentalen Wasserwege, um der voranschreitenden Globalisierung und dem damit verbundenen Welthandel gerecht zu werden. Zum anderen stieg die Nachfrage an fossilen Rohstoffen wie Öl und Gas aber auch an Produkten der Fischerei. Somit wurde die Freiwasserzone immer weiter wirtschaftlich erschlossen. Erschwerend kommt in der jüngeren Geschichte der Menschheit ein steigender Bedarf an metallischen Rohstoffen durch eine sich technologisch weiterentwickelnde Industrie hinzu. Mit dem technologischen Fortschritt steigerte sich nicht nur die benötigte Masse einzelner, sondern auch die Anzahl unterschiedlicher erforderlicher Rohstoffe. Aufgrund von sinkenden terrestrischen Reserven wurde dem großen wasserbedeckten Flächenanteil der Erde ein großes Potenzial für die Rohstoffgewinnung zugeschrieben. [7] [13]

Die Anwesenheit von polymetallischen Knollen auf dem Meeresgrund wurde erstmals 1872-1876 während der H.M.S. Challenger Expedition nachgewiesen. Ziel dieser Expedition

war es, die Zusammensetzung und die Art und Weise der Bildung von Meeresablagerungen im Allgemeinen und ihrer Verteilung auf dem Meeresgrund zu untersuchen. Somit war es die erste Expedition, die nicht der Entdeckung neuen Lebensraums und/oder der Landvermessung gewidmet war, sondern nur für den Zweck der Meeresbodenexploration konzipiert war. Bei der Sammlung von Proben aus der Tiefsee wurden die ersten polymetallischen Knollen gefunden und untersucht. Während der Untersuchungen waren die Lagerstätten noch gänzlich unbekannt. Folglich wurden durch diese Funde erste geologische Formationen und Lagerstätten entdeckt. [14]

Ungefähr 100 Jahre später folgten Untersuchungen von metallhaltigen Schlämmen im Roten Meer [15] und die Entdeckung von aktiven hydrothermalen Quellen auf dem Galapagos-Insel-Riss im Jahre 1977 [16]. Mit immer wieder auftretenden Entdeckungen polymetallischer Lagerstätten und einer 1965 durchgeführten Schätzung der Verfügbarkeit von Rohstoffen in der Tiefsee mit dem Ergebnis, dass die enthaltenen Metalle für die Menschheit tausende von Jahre ausreichen würde, wuchs auch das politische und wirtschaftliche Interesse deutlich an dieser Form der Rohstoffquelle. [17]

Spätestens die umfangreichere Erforschung der im Pazifischen Ozean liegenden Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) in den 1970er und 1980er Jahren führte dazu, dass Tiefseelagerstätten als Rohstoffquelle in Betracht gezogen wurden. Verstärkt wurde dies durch die Untersuchung der Machbarkeit einer Förderung von polymetallischen Knollen in mehreren Pilotversuchen. Durch weitere Forschungen und Explorationen wurde dies bestätigt und führt dazu, dass eine Umsetzung des Tiefseebergbaus aktiv in Betracht gezogen wird. [7]

Die Rohstoffgewinnung im Kontext der Weltmeere umfasst eine Vielzahl von unterschiedlichen Zielrohstoffen und Umsetzungen. Analog zum Begriff Tiefseebergbau wird die Rohstoffförderung in der Tiefsee gemeint. Im allgemeinen Sprachgebrauch ist mit Tiefsee der lichtlose Bereich der Meere definiert. Dies trifft zumeist ab einer Tiefe von 200 *m* und somit auf circa 80 % der mit Wasser bedeckten Erdoberfläche zu. In Abbildung 2.1 ist eine hypsographische Kurve der Erde dargestellt. Sie veranschaulicht die Verteilung der Höhenstufe gegenüber der terrestrischen Fläche der Erde. Im linken Teil der Grafik wird der prozentuale Anteil des jeweiligen Höhenbereichs, bezogen auf die gesamte Erdoberfläche, aufgetragen. [13]

Eine weitere Abgrenzung des Tiefseebergbaus kann über die Form der Rohstoffgewinnung und somit über die jeweils abgezielte Lagerstättenart getroffen werden. In dem Bereich des Meeresbergbaus fallen auch die Förderung von Öl und Gas, Sand und Kies, die Fischerei und die Rohstoffgewinnung im Kontinentalshelf (Küstenbergbau) [7]. Der Tiefseebergbau hingegen bezieht sich auf polymetallische Lagerstätten am Meeresboden. Hierbei stehen drei Lagerstättenformen im Hauptfokus:

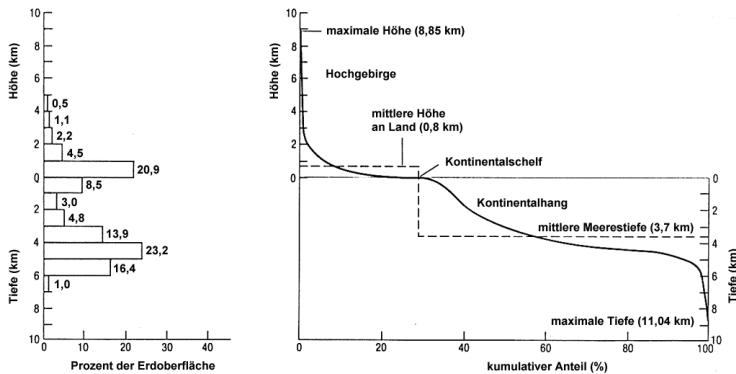


Abbildung 2.1: Hypsographische Kurve und Häufigkeit der Höhen- und Tiefenstufen der Erde. (Nach [13])

Kobaltkrusten bestehen aus mineralischen Ablagerungen, die sich an den seitlichen Hängen submariner Gebirgszüge und Seeberge ablagern. Sie entstehen durch die Anreicherung von im Wasser gelösten Mineralien/Spurenelementen und enthalten vor allem Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel sowie Platin und Seltene Erden Elemente. Kobaltkrusten gibt es insbesondere im Westpazifik in Tiefen von 1000 m bis 3000 m. [7]

Massivsulfide sind an Austrittsstellen heißer Quellen am Meeresboden aufzufinden. Kaltes Meereswasser dringt in Meeresbodenspalten mehrere Kilometer tief ein. In magmatischen Kammern erhitzt dieses Wasser wieder und löst metallhaltige Mineralien aus den umliegenden Gesteinen. Durch die Erwärmung steigt das Wasser und kühlt sich erneut ab, sobald es wieder mit dem Meereswasser in Kontakt kommt. Bei diesem abkühlenden Vorgang bildet sich ein Feststoff-Niederschlag, der auf den Meeresboden absinkt, sich ablagert und so massive Erzvorkommen ausbildet. Je nach Region enthalten die Massivsulfide unterschiedliche Anteile an Kupfer, Zink, Blei, Gold und Silber sowie an zahlreichen wichtigen Spurenmetallen wie Indium, Germanium, Tellur oder Selen. [7]

Polymetallische Knollen sind mineralische Agglomerationen, die bis zu 30 cm Durchmesser erreichen können und die weitreichende Regionen des Meeresbodens im Pazifik sowie im Indischen Ozean bedecken. [7]

Die vorliegende Arbeit wird sich ausschließlich mit der Gewinnung von polymetallischen Knollen beschäftigen und somit bezieht sich der Begriff Tiefseebergbau im weiteren Verlauf auf die Gewinnung polymetallischer Knollen.

2.2 Grundlagen des Tiefseebergbaus

Zur Abschätzung und zum Verständnis der Potenziale von polymetallischen Tiefseelagerstätten werden die chemisch-physikalische Struktur und die geologische Verfügbarkeit der Lagerstätten folgend dargestellt. Das daraus resultierende wirtschaftliche Potential der Tiefseelagerstätten stellt auch den Haupttreiber für die Umsetzung einer kommerziellen Gewinnung dar.

2.2.1 Chemisch-physikalische Struktur und biologischer Aufbau

Polymetallische Knollen werden als eine Ablagerung von im Wasser gelösten Metallverbindungen beschrieben [7]. Der Wachstumsprozess kann dabei in zwei unterschiedlichen Vorgänge unterschieden werden, dem hydrogenetischen und diagenetischen Wachstum, wie in Abbildung 2.2 dargestellt. [6]

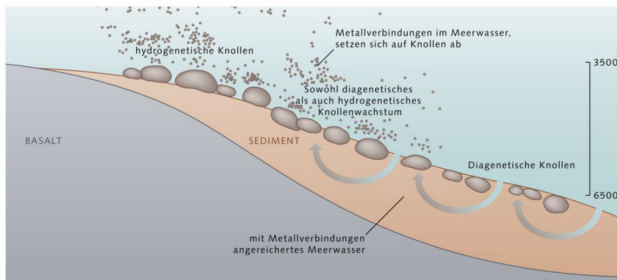


Abbildung 2.2: Darstellung von hydrogenetischen und diagenetischen Knollen-Wachstum. (Nach [6])

Das hydrogenetische Wachstum beschreibt die Bildung von polymetallischen Knollen durch die Anreicherung von im Freiwasser gelösten Mangan-Sauerstoffverbindungen. Diese entstehen durch vulkanische Aktivitäten auf dem Meeresgrund. Dahingegen ist das diagenetische Wachstum eine Agglomeration von sich im Porenwasser des Sediments befindlichen Metallverbindungen. Zumeist bilden sich Manganknollen durch eine Kombination von hydro- und diagenetischem Wachstum aus. [7] [18]

In der Literatur wird häufig die Existenz eines Bakteriums, welches eine gesonderte Proteinschicht (S-Layer) ausbildet, als die Grundlage für das Initiieren des Wachstums von polymetallischen Knollen beschrieben [19]. Dieser, auch Bio-Samen genannte Komplex ermöglicht die schichtweise Ablagerung von im Freiwasser oder Sedimentboden gelösten Mineralien,

Metallen und Spurenelementen. Der detaillierte chemische Aufbau von polymetallischen Knollen kann der Literatur (vgl. [19] [20]) entnommen werden. [19]

Die Geschwindigkeit des Wachstums ist abhängig von der vorhandenen Startkonzentration der im Wasser gelösten Spurenelemente. Die durchschnittliche Wachstumsgeschwindigkeit beträgt 1 mm bis 10 mm pro eine Million Jahre. Die beschriebenen Wachstumsvorgänge sind in allen Weltmeeren gleichermaßen aufzufinden. Somit sind polymetallische Knollen-Lagerstätten, basierend auf dem Wachstumsmechanismen auf oder innerhalb der obersten Sedimentbodenschicht, auf dem Meeresgrund aufzufinden und können dort durch den Tiefseebergbau gefördert werden. [19]

Die sich während des Wachstums anhaftenden metallischen Spurenelemente geben den polymetallischen Knollen zum einen ihren Namen und zum anderen führt ein schichtweises Wachstum zur Ausbildung von unterschiedlich großen Knollen. Dabei kann es zu Agglomerationen mehrerer kleinerer polymetallischer Knollen kommen. Das sphärische Wachstum wird durch das Rollverhalten auf dem Meeresgrund, der Bioturbation, erzeugt. [19]

Durch dieses Wachstumsverhalten und den variablen Wachstumsvorgängen kann einer polymetallischen Knolle schwer eine definierte mineralogische Grundeigenschaft wie Dichte, Spaltbarkeit, Gewicht oder Masse zugeordnet werden. Nach von Wijk ist alleinig eine poröse Eigenschaft den polymetallischen Knollen zuzuordnen. [21]

2.2.2 Geologische Verfügbarkeit von polymetallischen Knollen

Aufgrund der beschriebenen Wachstumsvorgänge sind Vorkommen von polymetallischen Knollen auf den Meeresböden aller Weltmeere aufzufinden. Globalpolitisch steigt das Interesse an den Lagerstätten die sich außerhalb territorialer Hoheitsgebiete, den ausschließlichen Wirtschaftszonen (AWZ, engl. Exclusive Economics Zone, EEZ) und somit in den Freiwasserzonen befinden [22]. Hierbei sind die Knollen in Tiefen von ungefähr 350 m im Indischen Ozean bis zu 6500 m in der Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) im Pazifik aufzufinden. Bei der Beschreibung der geologischen Verfügbarkeit wird folgend nicht in hydrogenetische und diagenetische Lagerstätten unterschieden.

Abbildung 2.3 zeigt eine Erdkarte, in der sowohl die AWZs, als auch die vier wichtigsten Regionen von polymetallischen Knollenlagerstätten in den Freiwasserzonen der Weltmeere eingezeichnet sind. Diese vier Zonen weisen gleichzeitig auch das größte wirtschaftliche Potenzial auf.

Die **CLARION-CLIPPERTON-ZONE (CCZ)** ist die Region mit dem derzeit größten bekannten zusammenhängenden Vorkommen von polymetallischen Knollen, welches sich über eine Fläche von etwa 4 bis 9 Millionen km^2 , was in etwa der Fläche der Europäischen Union

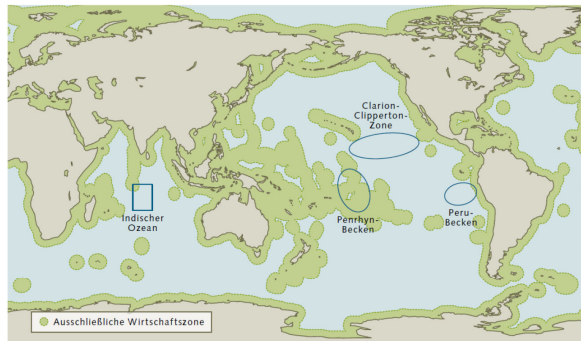


Abbildung 2.3: Hauptvorkommen von polymetallischen Knollen mit der Beschränkung auf die für einen industriellen Abbau fokussierten Bereiche inklusive der vorhandenen AWZs. (Nach [7])

entspricht, erstreckt [9]. Die CCZ befindet sich nördlich des Äquators im zentralpazifischen Ozean, ungefähr zwischen Hawaii und Mexiko (Abbildung 2.3). Wirtschaftlich interessante Felder können in einen Bereich von mehreren tausend Quadratkilometer zusammengefasst werden. Dabei liegt die Verteilung der Knollen in der CCZ zwischen 0 und 30 kg/m^2 mit einem Durchschnitt von 15 kg/m^2 [23]. Die Gesamtmenge an polymetallischen Knollen wird innerhalb der CCZ auf ca. 21 Milliarden Tonnen geschätzt. [7]

Das **PERU-BECKEN** befindet sich etwa 3000 km vor der Küste Perus und umfasst etwa die Hälfte der Größe der CCZ (Abbildung 2.3). Die durchschnittliche Verteilung der Knollen beträgt 10 kg/m^2 , mit einer maximalen Abundanz von 50 kg/m^2 [7]. Diese ist hauptsächlich in der Nähe der Karbonatausgleichstiefe (CCD) in 4250 m Wassertiefe aufzufinden [24]. Polymetallische Knollen des Peru-Beckens weisen im Vergleich zur CCZ Nickel- und Molybdänanteile auf, deutlich niedrigere Kupfer- und Kobaltgehalte, aber höhere Lithiumgehalte und ein höheres Mangan/Eisen-Verhältnis. [24]

Das **PENRHYN-BECKEN** liegt im Süd-West Pazifik und umfasst eine Fläche von ungefähr zwei Millionen km^2 . Dieses Becken befindet sich ausschließlich in der Wirtschaftszone der Cook-Inseln. (Abbildung 2.3). Der Meeresboden dieser Ebene ist in der Regel tiefer als 4700 m und die Sedimente sind hauptsächlich zusammengesetzt aus zeolithreichen, pelagisch-braunen Tonen, die geringe Mengen von vulkanischen Glas, Eisen- und Manganoxide, Phosphatkomponente, sowie biogenes Karbonat und stellenweise Kieselsäure enthalten [25] [18]. Dadurch ist das Gebiet charakterisiert durch eine niedrige Sedimentationsrate und einem geringeren Anteil von organischem Material. Hinzu kommt eine intensive Bodenströmung. Offensichtlich sind diese Umweltbedingungen über einen langen Zeitraum konstant geblieben. Dargelegt wird

das durch anhaltende oxische Bedingungen am Meeresboden und in der Sedimentstruktur, die zu Bildung von langsam wachsenden (durchschnittlich 1,9 mm/mio. Jahre) hydrogenetischen Ferromangan-Knollen mit einem ausgeglichenen Mangan/Eisen-Verhältnis führen [18].

Im **Zentralen INDISCHEN OZEANBECKEN (ZIOB)** sind wirtschaftlich interessante zusammenhängende Knollenfelder in einer Wassertiefe zwischen 3000 m und 6000 m aufzufinden. Innerhalb des Ozeanbeckens mit einer Fläche von etwa 700.000 km² befindet sich ein ca. 300.000 km² umfassendes Knollenfeld. [26]. Die gesamte Menge der polymetallischen Knollen in der ZIOB belaufen sich auf etwa 1400 Millionen Tonnen mit einer durchschnittlichen Abundanz von 4,5 kg/m². In der ZIOB ist die Knollendichte jedoch variabler und inhomogener als in den vorheriger genannten Regionen. [26]

Aufgrund der Größe und den umfangreichen Vorkommen an polymetallischen Knollen, stellt die CCZ derzeit die interessanteste Lagerstätte dar.

2.2.3 Wirtschaftliche Bedeutung

In der Literatur wird durch Rahn, Sharma, Volkmann und dem World Ocean Review (vgl. [5] [20] [27] [7]) vollumfänglich die wirtschaftliche Bedeutung der polymetallischen Lagerstätten beschrieben und im Folgenden auszugsweise betrachtet.

Tabelle 2.1 zeigt eine beispielhafte Aufstellung der Menge an chemisch-/metallischen Bestandteilen in den polymetallischen Knollen der CCZ im Vergleich mit den terrestrischen Reserven und Ressourcen.

Tabelle 2.1: Auszug der Metallgehalte polymetallischer Knollen im Vergleich in Millionen Tonnen, in Anlehnung an [7]

Element	CCZ	Terrestrische Reserve	Terrestrische Ressource
Mangan (Mn)	5992	620	5200
Nickel (Ni)	274	80	150
Molybdän (Mo)	12	10	19
Thallium (Ti)	4,2	0,0004	0,0007
Lithium (Li)	2,8	13	14
Kobalt (CO)	44	7,5	13
Arsen (AS)	1,4	1	1,6
Tellur (Te)	0,08	0,02	0,05

Diese beispielhafte Aufführung von kritischen metallischen Elementen zeigt die wirtschaftliche und globalpolitische Bedeutung von Tiefseelagerstätten in den Freiwasserzonen auf. Selbst die singuläre Betrachtung der in der CCZ lokalisierten Lagerstättenpotenziale ist größer, als die Gesamtheit aller terrestrischen Ressourcen. Dies trifft beispielsweise besonders auf die Metalle Mangan, Nickel, Kobalt, Arsen und Thallium aber auch Tellur zu. Das große wirtschaftliche Potenzial der polymetallischen Lagerstätten und ihre politisch neutrale geologische Lage in den Freiwasserzonen der Weltmeere ermöglicht einen Zugang zu geopolitisch-kritischen Rohstoffen von Staaten und Weltregionen, wie der Europäischen Union, die von Rohstoffimporten abhängig sind. Die Ermöglichung eines Lizenzerwerbs bei der IMB auf Teilregionen (vgl. Abbildung 2.4) der Tiefseelagerstätten hätte somit einen deutlichen Einfluss auf die vorherrschenden Rohstoffmärkte und die aktuelle geopolitische Situation.

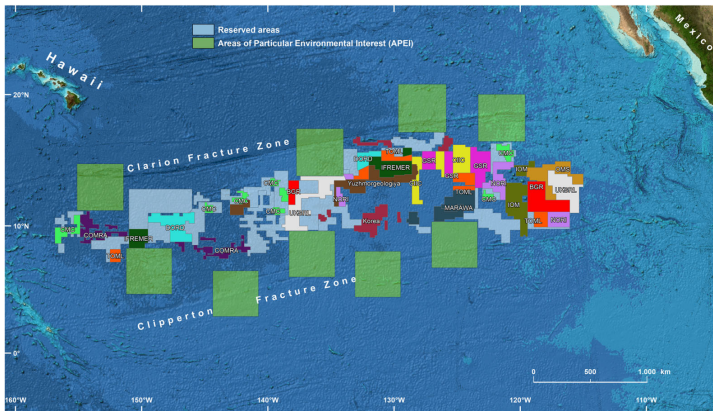


Abbildung 2.4: Aufteilung der Lizenzgebiete der CCZ an internationale Staaten - dargestellt durch unterschiedliche Farben und Buchstabencode. (Nach [8])

Die derzeitigen Lizenzgebiete und die dazugehörigen jeweiligen staatlichen Institute, dargestellt durch die Flächen in unterschiedlichen Farben und dem Buchstabencode (bspw. rot für BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) zeigt Abbildung 2.4 auf. Durch eine zukünftige Förderung in diesen Lizenzgebieten können Import-Länder, wie Deutschland, rohstoffpolitisch unabhängiger werden. So können einerseits Monopole auf Rohstoffvorkommen verkleinert und andererseits kritische Vorkommen, wie zum Beispiel der Kobaltabbau in der Demokratischen Republik Kongo, diversifiziert werden. Das kann einen Beitrag zu einem faireren und menschenwürdigeren Rohstoffhandel leisten. [5] [28]

So lässt sich auch das gesteigerte Interesse und die umfangreichen Tätigkeiten wie Lizenzkauf, Exploration und Forschung der Mitgliedstaaten der EU begründen. Aufgrund des Spannungsfeldes aus politischen, technologischen, umwelttechnischen und physikalischen Herausforderungen stellt der Tiefseebergbau ein einzigartiges Arbeitsumfeld dar. Damit eine europäisch vorangetriebene Realisierung des Tiefseebergbaus möglich ist, muss dieser im Einklang mit der Nachhaltigkeit umgesetzt werden.

2.2.4 Umweltverträglichkeit des Tiefseebergbaus

Gegenüber dem wirtschaftlichen Potenzial der polymetallischen Tiefseelagerstätten, sind die möglichen Auswirkungen eines geplanten, zukünftigen Abbaus von maritimen mineralischen Rohstoffen auf die Meeresumwelt zu stellen. Aus Sicht des globalen Umweltschutzes stellt der Tiefseebergbau eine zusätzliche Herausforderung und Belastung für die Meeresbiologie dar.

Daher müssen Aktivitäten in diesem Bereich im Kontext der Nachhaltigkeit und somit im Dreieck von Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft betrachtet werden. Unterteilt in die Bereiche der Meeresoberfläche, Wassersäule und des Meeresbodens können folgende Einflüsse hervorgehoben werden. [29]

Meeresoberfläche

- Luft-/Wasserverschmutzung
- Geräuschemissionen
- Kollisionsgefahr und vermehrter Schiffsverkehr
- Durch Schattenwurf Beeinflussung der Primärproduktion
- Lichtemissionen

Wassersäule

- Verbreitung von Sedimentwolken
- Geräuschemissionen
- Negative Einflüsse durch Materialentladung
- Bioakkumulation von toxischen Metallen

Meeresboden

- Höhere Sterblichkeit von Bodenorganismen
- Bedeckung von Organismen durch Sedimentwolken
- Zerstörung und Veränderung der Bodenfauna
- Entstehung von toxischen Effekten durch Freisetzung von Kontaminanten [29]

Abhängig von den Spezifika der tatsächlich genutzten Tiefseebergbautechnologie sind Auswirkungen vor allem auf die Bodenfauna zu erwarten, die bisher nur ansatzweise erforscht sind. Trotzdem wird auf dem derzeitigen Wissensstand eine großräumige Auswirkung auf die Biosphäre der Tiefsee prognostiziert. Dazu zählen hauptsächlich Sedimentwolken am Meeresboden und Beeinträchtigungen der Nahrungskette durch die Einleitung von Reststoffen [29]. Hinzu kommt die Freisetzung von Schadstoffen durch die eingesetzten Maschinen auf dem Meeresboden und durch den Einsatz der Förderplattformen in der Freiwasserzone. Die IMB ist gemäß Artikel 145 und 209 des Seerechtsübereinkommens (SRÜ) einem nachhaltigen marinen Umwelt- und Biodiversitätsschutz verpflichtet. Die Notwendigkeit des Umweltschutzes wird entsprechend in allen Bestimmungen, Richtlinien und Empfehlungen der IMB hervorgehoben. [30] [31]

Mögliche Umweltauswirkungen des Abbaus sind nach den mineralischen Rohstofftypen zu unterscheiden. Bei polymetallischen Knollen ist die Abbaufäche mit geschätzten 200 km^2 pro Jahr vergleichsweise groß. Versuche auf dem Meeresboden zur Beeinträchtigung des Ökosystems im interindustriellen Maßstab haben gezeigt, dass sich eine funktionstüchtige Fauna auf den gestörten Flächen mit annähernd der gleichen Diversität wie zuvor, nach etwa 5 bis 10 Jahren entwickeln kann. Jedoch ist grundsätzlich mit einer angepassten Artenzusammensetzung und -verteilung zu rechnen. Organismen, die auf dem Hartsubstrat der Knollen leben oder deren Lebensweise durch diese beeinflusst wird, werden sich in den abgebauten Bereichen nicht wieder ansiedeln können. [31] [29]

Die Erholung ausgeglichener Lebensgemeinschaften in industriellen Abbaugebieten wird entscheidend von der Distanz zu den ungestörten Flächen abhängen. In einem „patch work“ von Abbaufächen ist diese Distanz wesentlich geringer, als in einer einzigen großen Abbaufäche. Zudem werden feine Sedimentpartikel durch die Kollektoren aufgewirbelt und in Form von Sedimentwolken im Meer verteilt. Experimente am Meeresboden der Tiefsee und Modellierungsansätze haben gezeigt, dass sich diese Trübe im Umkreis von ca. 2 km größtenteils wieder absetzt. [29]

Für alle polymetallischen Rohstofftypen der Tiefsee wird vorausgesetzt, dass eine Beeinträchtigung der Umwelt durch einen möglichen Abbau mit Hilfe eines umfangreichen Umweltmanagementplans (UMP) so gering wie möglich gehalten wird. Ein erster Schritt dazu ist die Entwicklung einer umweltschonenden Abbautechnik, die für polymetallische Knollen zum Teil am weitesten fortgeschritten ist. Eine Schonung der Umwelt kann nach Schneider (vgl. [29]) erreicht werden durch:

- einen möglichst geringen Druck des Kollektors auf den Meeresboden
- eine geringe Eindringtiefe des Knollen-Aufnahmesystems in das Sediment
- die Reduzierung der bodennah entstehenden Sedimentwolken durch technische Gegen-

maßnahmen, die eine schnelle Absetzung des aufgewirbelten feinkörnigen Sediments bewirken

- einen möglichst geringen Transport von Sedimenten und Gesteinsabrieb zur Förderplattform an der Meeresoberfläche, um deren Rückführung zu minimieren, wie z.B. durch eine frühzeitige Sedimentabscheidung im Gewinnungsprozess
- die bodennahe Rückleitung dieser feinkörnigen Rückstände

Vertragliche Vereinbarungen mit der IMB sehen vor, dass jeder Vertragsnehmer schon während der 15-jährigen Explorationsphase Umwelt-Referenzdaten sammelt. Auf Grundlage dieser Daten sollen die Auswirkungen möglicher zukünftiger Abbauproduktivitäten noch vor dem Eingriff in den Lebensraum Tiefsee abgeschätzt und beurteilt werden. Der wichtigste Bestandteil dieser Umweltuntersuchungen sind Informationen über die Artenzusammensetzung und Besiedlungsdichte der Bodenfauna. Die Umwelt- und Biodiversitätsdaten der mittlerweile 15 Lizenznehmer/Antragsteller der polymetallischen Knollenfelder im Pazifik sollen soweit, wie möglich, standardisiert werden und in einen UMP für diese sehr nachgefragte Zone einfließen. Auf der Grundlage dieses Plans wurden in der CCZ 9, jeweils 160.000 km^2 große, Meereschutzgebiete eingerichtet. Diese umfassen zusammen etwa 30 % der Gesamtfläche. Innerhalb dieser Schutzgebiete wird kein Abbau stattfinden. Ein zentraler Bestandteil bei der Entscheidung über jeden zukünftigen Abbau wird die Vorlage einer Umweltverträglichkeitsstudie sein. Sofern ernsthafte Gründe in konkreten Fällen schwere Schäden für die Meeresumwelt befürchten lassen, ist die Rechts- und Fachkommission befugt, dem Rat der IMB zu empfehlen diese Teilbereiche von der Rohstoffgewinnung auszuschließen. [29]

Die umwelttechnischen Anforderungen an die Umsetzung einer möglichen polymetallischen Knollengewinnung haben somit einen Einfluss auf die Forschung und Entwicklung zukünftig eingesetzter Technologien im Tiefseebergbau. So soll erreicht werden, dass ein möglichst nachhaltiger Abbau von Tiefseelagerstätten gewährleistet ist. Folgend wird auf die besonderen technischen Anforderungen des Tiefseebergbaus expliziter eingegangen.

2.3 Technologische Umsetzung Tiefseebergbau

Global und historisch betrachtet beschreibt die Literatur (vgl. [20] [32] [17] [33]) eine Vielzahl von Forschungsansätzen und Projekten, um eine polymetallische Knollenförderung zu realisieren. Die technologischen Konzepte dieser Vorhaben sind zumeist miteinander vergleichbar. Hauptmerkmale sind hierbei eine abgezielte Produktionskapazität von 2 Mio. Tonnen Knollen/Jahr in Wassertiefen von bis zu 6000 m, einer in situ Bearbeitung der polymetallischen Knollen und einer automatisierten inkludierten Prozesssicherheit. [27] [10] [11]

2.3.1 Abbaukonzept polymetallischer Knollen-Lagerstätten

Die Umsetzung einer polymetallischen Knollengewinnung unterliegt ergänzend zu den Anforderungen der Umweltanalysen weiteren technischen Einflussfaktoren. Innerhalb unterschiedlicher Studien, Forschungsprojekte und auch wirtschaftlicher Aktivitäten entstand ein umfangreicher Anforderungskatalog für im Tiefseebergbau eingesetzte Maschinen und Technologien, die in die Entwicklung des Konzeptes zur Gewinnung von Tiefseelagerstätten eingeflossen sind. Hierbei ist insbesondere das von der EU geförderte Forschungsprojekt BlueMining (Zuschussvereinbarung Nummer 604500) zu nennen, welches unterschiedliche Aspekte einer kommerziellen Umsetzung des Tiefseebergbaus betrachtet. Innerhalb des Projektes wurden die umwelttechnischen, wirtschaftlichen und technologischen Anforderungen in die Entwicklung eines ganzheitlichen Abbaukonzeptes zur polymetallischen Knollengewinnung zusammengeführt. Abbildung 2.5 stellt hierbei ein allgemeingültiges Konzept eines gesamtheitlichen Systems zur Gewinnung von Tiefseelagerstätten dar. [27] [34] [20] [32]

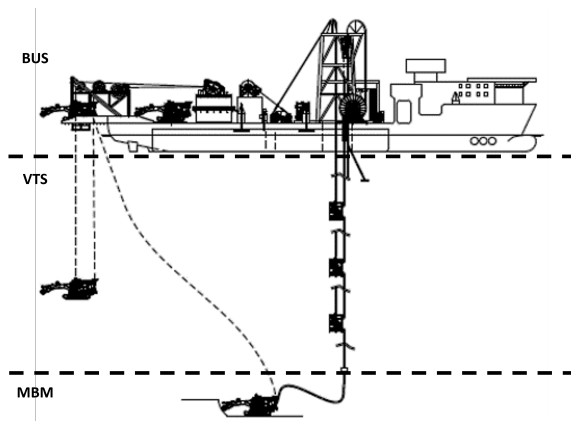


Abbildung 2.5: Darstellung eines typischen Tiefseeabbausystems für polymetallische Knollen. (Nach [34])

Zur vereinfachten Darstellung und Beschreibung ist es üblich, ein Tiefseebergbau-Fördersystem in mehrere Teilsysteme unterteilt zu betrachten. So können die jeweilige Komplexität besser erfasst und Anforderungen/Risiken einfacher identifiziert werden. In der realen Anwendung müssen die Schnittstellen der jeweiligen Teilsysteme neutral interagieren können, um ein funktionierendes ganzheitliches System darzustellen [34]. Allgemein stellt das Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus aufgeteilt in die Segmente Meeresoberfläche, die Wassersäule und Meeresboden den folgenden Problemstellungen dar. [20]

Meeresoberfläche

- weite Transportwege
- maritime Bedingungen
- Salzwasser
- Extremwetterlagen
- schwere Erreichbarkeit
- schwierige Punktfixierung der eingesetzten Schiffe und Maschinen

Wassersäule

- hohe Tiefen
- langer Förderweg
- bei steigender Wassersäule - steigender Druck
- Meeresströmungen
- hohe Flexibilität des Förderstrangs
- sensible Biosphäre
- Salzwasser

Meeresboden

- schwierige und wechselnde Geologie
- Sedimentbewegung
- große Tiefe - hoher Druck
- sensible Biosphäre
- hohe Flexibilität

Diese hier exemplarisch dargestellten Einflussparameter auf den Tiefseebergbau, kombiniert mit den umwelttechnischen Anforderungen an ein in der Tiefsee agierendes System, stellen einen umfangreichen Anforderungskatalog auf. Um die einzelne Bedeutung jedes Parameters besser darzustellen, wird das Gesamtsystem in der Literatur (vgl. [27] [34] [20]) in weitere technische Teilsysteme unterteilt. Das in Abbildung 2.5 dargestellte Gesamtfördersystems wird in ein Tiefseebergbauunterstützungsschiff (BUS), ein vertikales Transport-/Fördersystem (VTS) und eine Meeresboden Bergbau Maschine (MBM) aufgegliedert. [27] [20] [34]

Ein wichtiger Punkt der Gewinnung ist das BUS. Hier ist sowohl die Steuerung, die elektrische Versorgung als auch die Datenaufbereitung/-verwertung der MBM lokalisiert. Auch werden hier die gewonnenen Materialströme aufgenommen und mineralogisch aufbereitet (entwässert), um sie abschließend an ein Transportschiff für den Abtransport zum Festland zu übergeben. Von dieser Abbauplattform wird auch die MBM abgesetzt und mit Strom und der benötigten Datenverbindung versorgt. Somit ist das zweite Hauptsegment dieses Konzeptes das bis zu mehr als 6000 m lange VTS. Das Fördersystem (Rohr- und Kabelverbindung zwischen

BUS und MBM) besteht aus mehreren flexiblen und steifen Segmenten. Unterteilt werden diese Segmente durch große Durchgangspumpen, um den Förderstrom von der MBM zu dem BUS mit einer geplanten Fördermenge von ca. 260 t/h gewährleisten zu können. [27]

Das dritte Hauptsegment des Konzeptes ist die MBM, welche die polymetallischen Knollen vom Meeresboden aufnimmt, einen ersten mineralogischen Aufbereitungsschritt, die Sedimentabscheidung, durchführt und den abgezielten Förderstrom an das VTS übergibt. Das raupengestützte Fahrzeug (vgl. Abbildung 2.6) besteht aus drei Hauptkomponenten. Dem Fahrwerk, welches aus 2 paarweise angeordneten Einzelraupen besteht, dem Hauptaufbau des Fahrzeuges und dem System zur Knollenaufnahme, dem eigentlichen Kollektor. [10] [27]

Im Hauptaufbau des Fahrzeuges sind die Verbindungen zur Förderplattform, die Steuerung, der Antrieb, Pumpen und auch ein Sedimentabscheider für die polymetallischen Knollen verbaut. Es wurden zwei unterschiedliche Kollektoren (Verfahren zur Aufnahme polymetallischer Knollen) getestet. Zum einen ein mechanisches und zum anderen ein hydraulisches System. Das endgültige Design beschreibt einen hydraulischen Kollektor. [10] [27]

Der an der Vorderseite des Fahrzeuges installierte Knollenkollektor basiert auf dem Wirkprinzip des Coanda-Effekts und soll einen Meereswasserstrom nutzen, um die Knollen aus dem Meeresboden zu heben und zu erodieren. Von dem Kollektor aufgenommenes Sediment und Wasser werden über einen Diffusor, der an der Rückseite des Fahrzeuges montiert ist, zurückgeführt. Das Fahrzeug wird vom Hauptaufbau aus mit Hilfe einer zentralen Kabelverbindung betrieben. Das Versorgungskabel dient zum Anheben des Fahrzeuges während des Starts und der Bergung, versorgt das Fahrzeug mit Energie und ermöglicht den Datentransfer zwischen dem Fahrzeug und dem Bedienpersonal. [10]

Die bis dato durchgeführte technische Entwicklung befasste sich hauptsächlich mit der Fahrzeugtechnik, Fahrzeugsteuerung und der Orientierung/Lokalisierung der MBM, um die grundlegende Umsetzung des Gesamtsystems voran zu treiben. Alle weiteren technischen Spezifikationen des MBM können der Literatur entnommen werden (vgl. [10] [11]). Verbliebene offene Entwicklungsthemen sind hierbei die prozesstechnische Nutzung zur Gewinnung von polymetallischen Knollen und Aufbereitung des mehrphasigen Gewinnungsmassenstroms (Wasser, Sedimente und Wertmineral - polymetallische Knollen) innerhalb der MBM, die Übergabe an die VTS und die sensorgestützte Überwachung der Massenströme innerhalb der MBM. [10]

2.3.2 Prozess- und Materialströme in der MBM

Für die Prozesssteuerung sollen alle in Abbildung 2.6 dargestellten Volumenströme in der MBM erfasst und bestmöglich bilanziert werden.

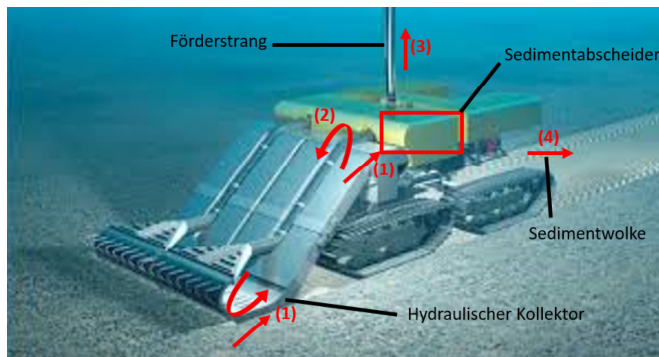


Abbildung 2.6: Grobe Skizze der in der MBM vorhandenen mehrphasigen hydraulischen Materialströme. (Nach [10])

Die Erfassung der Prozessparameter des Materialstroms soll unter anderem dazu verwendet werden die Auslegung des Gesamtsystems und die Produktion zu optimieren. Die Überwachung der Materialstrominhalte und Kontrolle der Performanz des Sedimentabscheiders sind hier Kernpunkte, um das übergeordnete Ziel, die Dispersion von Schwebstoffen zu begrenzen, zu erreichen. Zur Sicherstellung dieser Ziele muss auch während des Betriebes eine optimierte Prozessführung des Förderstroms sichergestellt werden. Hierfür musste die offene Fragestellung der sensortechnologisch gestützten Überwachung der Materialströme umgesetzt werden. Der Transport von Suspensionen und mehrphasigen Massenströmen findet im Regelfall innerhalb geschlossener Rohrleitungen und Rohrleitungssysteme unter gewissen Druckbedingungen statt. Der sich hinter dem Materialtransport verbergende physikalische Wirkmechanismus wird in der Fachliteratur der Strömungsmechanik und der Strömungsfördertechnik zugeordnet. [35] [36] [37] [20]

Adaptiert für den Tiefseebergbau wird die Nutzung der hydraulischen Förderstromtechnik aus unterschiedlichen Einsatzgebieten, wie beispielsweise dem Transport von Kohle, Erzen, Metallen und mineralischen Rohstoffen. Im Kontext dieser Arbeit sind aufgrund einiger beispielhafter, in der Literatur beschriebener Parallelen wie Einsatzgebiet, Abbauform, Umsetzung, physikalischer Materialeigenschaften und vorhandener Phasengemische besonders die Förderung von Kiesen und Sanden durch Saugbagger (engl. Dredging) hervorzuheben. [35] [36] [37] [20]

2.4 Hydraulische Förderstromtechnik und Feststofftransport

Die polymetallische Knollengewinnung basiert auf der hydraulischen Förderstromtechnik und dem daraus resultierenden kontinuierlichen hydraulischen Feststofftransport. Als Transport-Fluid wird das in der Tiefsee vorhandene Meerwasser genutzt, welches den Transport der Wertmaterialien ermöglicht. Der hydraulische (sowie pneumatische) Feststofftransport wird in der Literatur den kontinuierlichen Förderverfahren zugeordnet. Hierbei wird durch ein fließendes Medium ein Stoff bzw. Stoffgemisch transportiert. Im Regelfall, sowie im Tiefseebergbau, handelt es sich dabei um Mehrphasenströmungen, die sich aus einer kontinuierlichen Phase und einer oder mehrerer dispersen Phasen zusammensetzen. [35] [38]

2.4.1 Hydraulische Förderstromtechnik

Die Strömungsmechanik umfasst in mehreren Teilgebieten die Bewegungen und physikalischen Vorgänge in Fluiden, von denen zwei in dieser Arbeit kombiniert werden. [39]

- Durchströmung von Medien - Betrachtung des Innenraums und die in diesem Raum wirkenden Kräfte.
- Umströmen von Körpern - Kernthematik ist das Strömungsfeld und die resultierende Krafteinwirkung auf einen Körper innerhalb der Strömung. [39]

Bei der Betrachtung der Strömungsfördertechnik ist die Auswahl und Charakterisierung des Fördermediums, der fluiden Phase, entscheidend. Innerhalb des Fachbereichs der Strömungslehre bietet die Literatur hierzu umfassende Einblicke und ermöglicht praxisnahe Darstellungen der Strömungsverhältnisse durch geeignete Modelle und Berechnungen. Der Transport von Feststoffen in einer Strömung erfordert dabei eine Anpassung der Modelle im Hinblick auf die vorhandenen Feststoffparameter. Für eine ausführliche Betrachtung der Strömungslehre über das in dieser Arbeit beschriebene Anwendungsgebiet hinaus, ist in der Literatur [40] [41] [42] und [43] möglich.

Der in dieser Arbeit thematisierte Tiefseebergbau nutzt das Wasser aus der Tiefsee als Prozesswasser und dementsprechend basieren die folgenden Ausführungen auf einer Betrachtung von Wasser als Fördermedium und die strömungsmechanischen Eigenschaften von flüssigen Fluiden. Eine weitere Grundvoraussetzung in diesem Zusammenhang ist die gerichtete Wirkung ausreichend großer Strömungskräfte, wie sie im beschriebenen Abbaukonzept (vgl. Kapitel 2.3.1) gegeben sind. [36]

2.4.2 Grundlagen der Strömungsfördertechnik

Unter bestimmten Voraussetzungen sind laut Weber Strömungen in der Lage Feststoffe mitzuführen [44]. Dieser in der Literatur dargestellte Vorteil ermöglichte die Entwicklung des Fachgebietes der Strömungsfördertechnik. Unter Einhaltung mehrerer physikalischer Einflussfaktoren werden die Bewegungswiderstände von Festkörpern überwunden und es kann ein für den Transport erwünschtes Fluid-Feststoffgemisch entstehen. [45] [44]

Die Literatur unterteilt (vgl. [39] [46]) innerhalb der Strömungsfördertechnik Fluid-Feststoffgemische in heterogene und homogene Suspensionen. Ausschlaggebendes Charakteristikum ist hierbei die Korngröße der Feststoffe. Bei einer Korngröße kleiner als $0,1\text{ mm}$ ist ein Gemisch als homogen definiert und kann folglich analog zu einem einphasigen Strömungsverhalten betrachtet werden. Bei dieser Korngröße sollte keine Entmischung des homogenen Wasser-Feststoffgemisches auftreten. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass sich das Strömungsverhalten der Suspension konvergierend und analog zu reinen Flüssigkeiten verhält. [45] [44]

Bei einer mittleren Korngrößenverteilung von über $0,1\text{ mm}$ werden Strömungen als zweiphasig betrachtet. Somit kann während des Transportes eine teilweise oder vollständige Entmischung des Flüssigkeits-Feststoffgemisches vorhanden sein, was zu einem differenzierten Strömungsverhalten führt. [45]

Im Rahmen dieser Arbeit werden mehrphasige Strömungen betrachtet, die sowohl auf einer homogenen, einer inhomogenen (heterogenen) Strömung und/oder einer Vermischung dieser basieren. Hinzu kommen noch Grobkörner, die einen weiteren Teilaspekt der inhomogenen Strömung darstellen. Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung müssen diese unterschiedlichen Dimensionen der mehrphasigen Strömung differenziert werden.

2.4.3 Verhalten von Feststoffen in der Strömungsfördertechnik

Bei der Nutzung von Strömungsförderanlagen, werden die zu transportierenden Feststoffe vollständig mit dem Strömungsmedium Wasser umschlossen. Durch das Anströmen eines Feststoffes bildet die Flüssigkeit einen Druck auf den Feststoff aus und resultiert in einer relativen Strömungskraft. Die Relativität dieser Kraft bildet sich über die Differenz aus Strömungsgeschwindigkeit und Festkörpergeschwindigkeit. Die relative Anströmung des Festkörpers ist maximal, wenn sich dieser in der Ruhephase befindet und sinkt bei steigender Geschwindigkeit des Festkörpers. Bei identischer Geschwindigkeit ist die aus der Anströmung resultierende Strömungskraft gleich der Widerstandskraft und somit gleich null. [44]

Um die Interaktion zwischen der Rohrströmung und dem Feststoffpartikel abzubilden

wird an der Kontaktschicht zwischen dem Feststoffpartikel und der Strömung eine laminare Grenzschicht als Ausgangspunkt definiert. Über die teilchenbezogene Reynoldszahl Re_s (vgl. Formel 2.1) wird der durch Reibung auftretende Anstieg der kinematischen Energie und somit der Druck auf den Feststoff beschrieben. [44]

$$Re_s = \frac{(v_f - v_s) \cdot d_s}{\vartheta_f} \quad (2.1)$$

mit: v_s Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Festkörper Querschnittsfläche $[m/s]$
 v_f Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit $[m/s]$
 ϑ_f Kinematische Viskosität der Flüssigkeit $[m^2/s]$
 Re_s Teilchenbezogene Reynoldszahl $[-]$
 d_s Durchmesser Festkörper $[mm]$

Durch den Druckanstieg wird die Grenzschicht des Feststoffes aufgelöst. Gleichzeitig entsteht auf der in Strömungsrichtung liegenden Seite des Partikels eine Todwasserzone. In dieser Todwasserzone herrscht eine deutliche negative Druckdifferenz zur Realströmung. Die differenzierte Verteilung des Druckes führt mit der Reibkraft zur resultierenden Widerstandskraft W , wie in Formel 2.2 beschrieben. [44]

$$W = c_w \cdot (Re_s) * A_s \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot (v_f - v_s)^2 \quad (2.2)$$

mit: A_s Querschnittsfläche der Festkörpers $[mm^2]$
 ρ_f Dichte der Flüssigkeit $[kg/m^3]$
 c_w Widerstandsbeiwert $[-]$
 W Widerstandskraft $[N]$

Dabei ist die Widerstandskraft W abhängig von der Widerstandszahl c_w . Diese wird ebenfalls über die Reynoldszahl Re bestimmt (vgl. Formel 2.3). [44]

$$c_w = \frac{21}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re_s} + 0,28} \quad (2.3)$$

mit: Re Reynoldszahl $[-]$

Die mathematische Herleitung des benötigten Druckes zur Aufnahme von Feststoffen in eine Strömung ist nur für ideale sphärische Körper repräsentativ und legt nur eine allgemeine

Grundlage. Aufgrund des in dieser Arbeit behandelten Anwendungsbereiches werden nicht ideale Körper von Strömungen aufgenommen. Bei heterogenen sphärischen Körpern wird ein Schlupf in die Betrachtung aufgenommen. Aufgrund der nicht idealen Körpereigenschaften wirkt die Anströmung nicht optimal und kleine Relativbewegungen (Schlupf-, Dreh- und Schwingbewegungen) des Feststoffpartikels bilden sich aus. Somit kann sich zwischen der Strömung und dem Feststoffpartikel keine einheitliche Geschwindigkeit ausbilden. Der entstehende Schlupf aus dauerhaften und inkonstanten Differenzen zwischen der Flüssigkeitsgeschwindigkeit und der Festkörpergeschwindigkeit verhindert die Bildung einer laminaren Strömung weitestgehend. Basierend auf den hergeleiteten Wechselwirkungskräften resultieren drei Hauptaspekte der Interaktion von Feststoffen in Rohrströmungen. Bei einer detaillierten Darstellung sind die unterschiedlichen vorhandenen Feststoffparameter und die darauf basierenden Massenkräfte zu berücksichtigen. [36] [44]

- Feststoffpartikel und Fluid
- Feststoffpartikel und Rohrwand
- Feststoffpartikel und Feststoffpartikel

Buhrke nutzt die Einzelkorndarstellung (vgl. Abbildung 2.7) analog zur der in der Literatur beschriebenen Einzelpunktdarstellung der Stromfadentheorie (vgl. [46]), um in einer horizontalen Rohrströmung die wirkenden Kräfte visualisieren zu können. In Strömungsrichtung wirkt dabei die Druckkraft F_P infolge des Reibungsdruckverlustes der Strömung. [36]

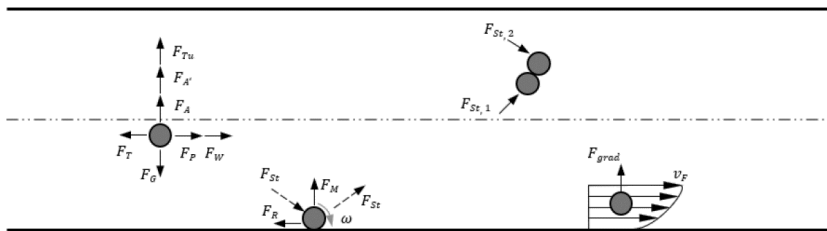


Abbildung 2.7: Wirkende Kräfte in einer Rohrströmung. (Nach [36]).

Im Weiteren bestehen die relevanten Massenkräfte aus der Schwerkraft F_G , die senkrecht zur Strömung nach unten wirkt und der Trägheitskraft F_T , die geradlinig entgegen der Strömungsrichtung wirkt. Durch einen häufig geringen Betrag ist die Corioliskraft zu vernachlässigen. Konträr dazu zu betrachten ist die Zentrifugalkraft, die besonders bei gekrümmten Partikelbahnen von Bedeutung ist. Durch die Anwesenheit eines Beschleunigungsfeldes entstehen Druckdifferenzen in einer Strömung. Dadurch bilden sich Druckkräfte aus, die entgegengesetzt zu dem Beschleunigungsfeld wirken. Diese Druckkraft wird als statische

Auftriebskraft F_A bezeichnet und wirkt im Schwerfeld entgegen der Schwerkraft unter Berücksichtigung der Fluidsdichte. [36] [47]

Weitere Auftriebskräfte wirken auf die Partikel infolge einer meist unsymmetrischen Umströmung, die auf das Strömungsprofil, die Partikelform oder eine Partikelrotation zurückzuführen sind. Durch die resultierende unsymmetrische Druckverteilung an der Partikeloberfläche wirken, senkrecht zur Anströmungsrichtung, dynamische Auftriebskräfte. In einer horizontalen Rohrströmung wird die statische Auftriebskraft durch die umströmungsbedingte dynamische Auftriebskraft erweitert. Die dynamische Auftriebskraft setzt sich aus der erweiterten Auftriebskraft $F_{A'}$, resultierend aus einer Zwangslage der Feststoffe in einer Strömung infolge von Stoßwechselwirkungen, und der im Bereich der Rohrwand entstehenden Querkraften zusammen. Als Antwort auf die einseitig angreifende Reibungskraft F_R erfolgt eine Partikelrotation mit der Winkelgeschwindigkeit ω . [47]

Die resultierende Querkraft kann als Magnus-Kraft F_M bezeichnet werden. Eine zweite Querkraft ist auf die Partikelbewegung im wandnahen Strömungsfeld zurückzuführen. Durch das Schergefälle in der Grenzschicht werden wandnahe Partikel asymmetrisch umströmt, wodurch die Querkraft F_{grad} entsteht, die von der Wand weggerichtet wirkt. Sowohl die dynamische, als auch die statische Auftriebskraft wirken der Schwerkraft und damit dem Absinken der Feststoffe in der Strömung entgegen. Diese auch als tragende Kräfte definierbaren Einflussfaktoren werden durch eine auf Turbulenzen basierende, in der Strömung entstehende Turbulenzkraft F_{Tu} erweitert. Abschließend nimmt eine Stoßkraft F_{St} , entstehend durch die Interaktion zwischen Feststoff und Rohrwand, einen Einfluss auf die in der Strömung befindlichen Partikel. [36] [47]

Ausgehend von den wirkenden Kräften erfolgt die Bewegung der Partikel in der Strömung in horizontaler und vertikaler Richtung. Die vertikale Bewegungskomponente ist ein wesentlicher Auslöser für das Auftreten von Kontakten der in der Strömung vorhandenen Feststoff-Partikel mit der Rohrwand. Die Partikelbewegung erfolgt infolge der beschriebenen Einflussfaktoren und wird in Abbildung 2.8 schematisch dargestellt. [48]

Die resultierende Förderstrecke z ist abhängig von der vorherrschenden Turbulenz in der Strömung und somit direkt von der Fluidgeschwindigkeit v_f . Um eine Sinkbewegung der Partikel (vgl. Abbildung 2.8 (a)) zu verhindern, ist die Krafteinwirkung durch vorherrschende turbulente Verhältnisse und somit die Turbulenzkraft F_{Tu} erforderlich. Die Krafteinwirkung als turbulenter Impulsstrom kann zu periodischen Richtungswechseln (vgl. Abbildung 2.8 (b)) führen. Dennoch kann durch das Einwirken der Impulsströme auf die Partikel das Absinken nicht gänzlich verhindert werden. Ein schwebender Transport ohne Höhenverlust ist somit für Einzelpartikel nicht realisierbar und somit ist ein Rohrkontakt der Einzelpartikel gewährleistet. [48]

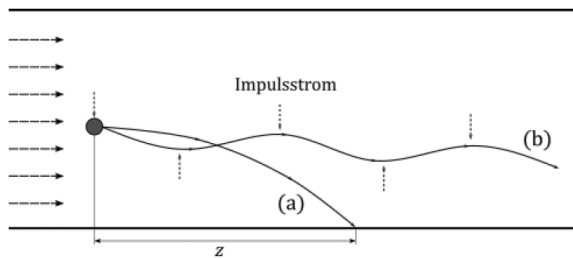


Abbildung 2.8: Partikelbewegung bei differenten Strömungszuständen. (Nach [48])

In der Literatur ist festgehalten, dass in intensiven turbulenten Strömungen, wie sie im hydraulischen Transport häufig vorliegen, der schwebende Transport von Partikelagglomerationen hingegen möglich ist. Diesem Umstand zugrunde liegt der Zusammenhang der Konzentrationsverteilung körniger Feststoffe in offenen Strömungskanälen [42]. Wird ein Gleichgewichtszustand zwischen aufsteigenden und absinkenden Feststoffpartikel erreicht kann ein schwebender Transport realisiert werden. Dieser kann aber bei vorherrschenden Turbulenz der Strömung und der kurzen Strömungswege innerhalb der MBM vernachlässigt werden. [48] [42]

Ein weiterer konstruktiver Einfluss auf die Turbulenz innerhalb einer Rohrströmung sind Rohrbögen. Durch diese Ablenkungen wirken sich Fliehkräfte auf die Feststoffpartikel aus. Als Folge werden die Feststoffpartikel durch die Fliehkraft der Strömung gegen die Wand bewegt (vgl. Abbildung 2.9). [48] [42]

Beim Auftreffen der Feststoffpartikel auf die Rohrrinnenwand treten Stoßvorgänge auf. Die so entstandenen Kräfte bewegen die Feststoffpartikel wieder zurück in die Strömungsrichtung, wie zuvor beschrieben. [35]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Transport heterogener Gemische lediglich in einem turbulenten Umfeld möglich ist. Insbesondere bei horizontalen Förderanlagen für heterogene Gemische wirkt die Schwerkraft senkrecht zur Strömungsrichtung. Als Folge sinken die zu transportierenden Feststoffpartikel zur Rohrsohle ab. Die Auftriebskraft wirkt diesem Absinken entgegen. Die zugehörige Querkraft (auch Magnus-Kraft) ist strömungsunabhängig und somit auf jeden Ort der vertikalen Strömung übertragbar. Prall-, Stoß- und Rotationsbewegungen sind hingegen strömungsabhängig und steigen in der Häufigkeit und Intensität mit steigender Strömungsgeschwindigkeit an. [45] [44]

Bestätigt werden diese Annahmen in der Literatur durch Materialverschleiß- und Transportuntersuchungen vertikaler Massenstromtransporte im Zusammenhang mit dem polymetallischen Knollentransport. [21] [49]

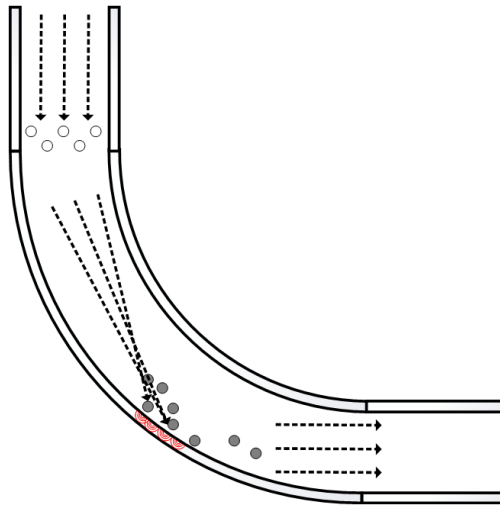


Abbildung 2.9: Resultierendes Bewegungsverhalten von Festkörpern in einer Rohrkrümmung. (Nach [48])

2.4.4 Strömungsfördertechnik in Rohrsystemen

Die zuvor durchgeführte Betrachtung des Feststoffverhaltens in Rohrströmungen stellt die Funktionssicherheit der Strömungsfördertechnik dar. Ein weiterer zu betrachtender Aspekt in einer Rohrströmung ist die entstehende Randfläche der Strömung (der Stromfadenhülle), die eine dauerhafte Kontaktfläche zur Rohrwand ausbildet. Dieser Kontakt innerhalb eines Rohrsystems hat einen direkten Einfluss auf die Strömung. Durch Reibung entsteht ein Widerstand entgegen der Strömungsrichtung, was in einem Druckverlust in Fließrichtung resultiert. In der Literatur werden diese Einflussfaktoren über zwei Herangehensweisen in eine Betrachtung einbezogen [39] [50]:

- Die Lagrange'sche Methode - Das in der Strömung befindliche Fluid wird als Punkthaufen angesehen, um einzelne Teilchen im Fluid betrachten zu können. Für jedes vorhandene Teilchen wird ein Lagevektor erstellt, der sich als Funktion der Anfangslage mit der Lageveränderung über die Zeit darstellt. [39]
- Die Euler'sche Methode - In diesem Fall werden vorgestellte Strömungsgrößen von einem festen Punkt aus betrachtet. [39]

Die Lagrange'sche Methode setzt für den praktischen Gebrauch mindestens einen mobilen Messpunkt voraus. Da dies nicht immer realisierbar ist, wird für die Betrachtung von

Strömungen die allgemeinere Euler'sche Methode gewählt. Diese Methode stellt demnach die Herangehensweise für die Betrachtung der in dieser Arbeit vorhandenen und untersuchten Strömungsverhältnissen dar. Die mathematischen Grundgleichungen, wie das Massenerhaltungsgesetz, die Stromfadentheorie, die Euler'sche Gleichung, die Bernoulli'sche Gleichung und die Kontinuitätsgleichung werden als bekannt vorausgesetzt und können in der Literatur (vgl. [46] [51] [44] [50]) nachvollzogen werden. Durch die Herleitung und Integration der Bestandteile ergibt sich folgende Gleichung. [39]

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 + g \cdot h = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot c_2^2 + g \cdot h + \delta p \quad (2.4)$$

mit

$$\delta p = \sum c_2^2 \cdot \lambda \cdot \frac{\rho \cdot L}{2 \cdot D} + \sum c_2^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \zeta \quad (2.5)$$

mit: ρ Dichte der Flüssigkeit [kg/m^3]

c Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

λ Rohrreibungszahl $[-]$

ζ Rohrverlustbeiwert $[-]$

δp Druckverlust [N/m^2]

D Durchmesser [m]

p Druck [Pa]

h Höhe [m]

L Länge [m]

Ein Druckverlust durch Reibung ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit c , sowie der Dichte ρ und der Mantelfläche der Rohre. Insbesondere die Reibung ist der Aspekt der Interaktion des Strömungsfadens zur Rohrwand, welcher in Körperschall und Wärme resultiert. Ein Indikator für die resultierende Reibung ist die Rohrreibungszahl. Somit werden die Parameter mit der Rohrreibungszahl λ und den weiteren Verlusten ζ addiert. [50] [44]

$$\lambda = \frac{\Delta p_v}{\frac{1}{2} \rho v^{-2}} \cdot \frac{D}{L} \quad (2.6)$$

Da die Rohrreibungszahl λ stark abhängig von der Turbulenz oder der Laminarität einer Rohrströmung ist, wird die dimensionslose Kennzahl, die Reynoldszahl Re , in die Betrachtung

aufgenommen. Eine Reynoldszahl Re unter 2.030 beschreibt eine laminare Strömung und bedeutet eine geringere resultierende Reibung. Durch die parallele Schichtung der Wassermoleküle zur Hauptströmungsrichtung findet dabei ein Austausch lediglich auf Molekularbasis statt. Etwaige Störungen der Strömungen sind quasi nicht vorhanden. Resultierend bedeuten diese Eigenschaften, dass die Flüssigkeitsmoleküle hauptsächlich Kräfte in die Strömungsrichtung übertragen. [44]

Ergibt sich aus der Berechnung der Reynoldszahl Re ein Wert über 2.030 ist von einer turbulenten Strömung auszugehen. Daraus resultiert eine Bewegung, in der sich die Flüssigkeitsmoleküle nicht mehr nur parallel in die Hauptströmungsrichtung, sondern in alle Strömungsrichtungen orientieren. Daher stellt sich die Strömungsfront gleichförmiger als bei einer laminaren Strömung dar. Hierbei nehmen entstandene Störungen in Form von Verwirbelungen, längs oder quer der Strömungsrichtung über die Zeit oder die Distanz nicht ab. Die Differenzierung zwischen einer laminaren und einer turbulenten Strömung wird in der Literatur (vgl. [44]) durch dimensionslose Ähnlichkeitsparameter über die Zeit vorgenommen. Dieser Wert setzt sich aus dem Produkt der Fließgeschwindigkeit v_f der Flüssigkeit und dem Durchmesser d_i des Rohres dividiert durch die kinematische Viskosität ϑ zusammen. Dabei wird aufgezeigt, dass die kinematische Viskosität ϑ der Quotient aus der dynamischen Viskosität η_f des Mediums und der Dichte ρ_f des Mediums ist. [44]

$$Re = \frac{v_f \cdot d_i}{\vartheta} \quad (2.7)$$

mit

$$\vartheta = \frac{\eta_f}{\rho_f} \quad (2.8)$$

mit: v_f Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit [m/s]
 ϑ Kinematische Viskosität [m^2/s]
 η_f Dynamische Viskosität [$Pa \cdot s$]
 d_i Rohrinne Durchmesser [m]
 ρ_f Dichte der Flüssigkeit [kg/m^3]

Um folglich darauf aufbauend die Rohrreibungszahl zu berechnen gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. [44]

- Rohrreibung bei laminaren Strömungen - Hagen-Poiseuille-Gesetz
- Rohrreibung bei turbulenten Strömungen - Colebrook-White- und Haaland-Gleichung

Bei laminaren Strömungen hängt die Rohrreibungszahl direkt mit der Reynoldszahl Re zusammen. Aufgrund der Gegebenheiten innerhalb der MBM (turbulente Strömung) wird hier nicht weiter auf die laminare Strömung eingegangen. Bei den Fällen der turbulenten Strömung wird anhand des Auftretens einer viskosen Unterschicht zwischen Strömung und Rohrwand unterschieden. Durch die Anhaftung kleinster Fluidteilchen in den unterschiedlichen rauen Segmenten der Rohrwand unter Einfluss gesonderter Haftbedingungen bildet sich eine nicht turbulente Schicht aus. [36] [44]

Querströmungen werden durch die Rohrwand verhindert. Deshalb bildet sich in unmittelbarer Umgebung zur Wand eine sogenannte laminare Unterschicht, die auch als viskose Unterschicht bezeichnet wird. Um die unterschiedlichen Rautiefen absolut mit in die Betrachtung aufzunehmen wird diese gemittelt. [36] [44]

Dafür wird eine relative Rauheit ε benutzt, die ein prozentualer Indikator ist, wie viel Prozent des Rohrdurchmessers durch Rauheiten belastet wird. [36] [44]

$$\varepsilon = \frac{d}{k} \quad (2.9)$$

mit: ε Relative Rauigkeit [—]
 d Durchmesser [m]
 k Rauheit [μm]

Zur Berechnung der Rohrreibungszahl gibt es zwei Gleichungen. Mit der **Impliziten Colebrook-White-Gleichung** kann iterativ abhängig von der relativen Rauigkeit eine Rohrreibungszahl ermittelt werden. [36] [52]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{tur}}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_{tur}}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right) \quad (2.10)$$

Um bei dem iterativen Auflösen der Gleichung einen Startwert zu definieren kann die **Explizite Haaland-Gleichung** hinzugezogen werden. [53]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{tur,0}}} = -1,8 \cdot \log_{10} \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7} \right)^{1,11} \right) \quad (2.11)$$

Mittels der Haaland-Gleichung kann ein initiativer Wert in die rechte Seite der Colebrook-White-Gleichung eingesetzt werden. Dadurch ergibt sich für $\frac{1}{\sqrt{\lambda_{tur}}}$ auf der linken Seite ein

angenäherter Wert. Anschließend kann in einer weiteren Iteration dieser Wert wieder eingesetzt werden. Die Literatur beschreibt, dass sich nach 2 Iterationen zumeist eine hinreichend genaue Rohrreibungszahl λ_{tur} beschreiben lässt. Zur Vereinfachung können bei bekannten Grenzbereichen oder Extrema wie einem hydraulisch glatten Rohr, einem hydraulisch rauen Rohr oder einem Übergang zu einem hydraulisch rauen Rohr mathematische Vereinfachungen genutzt werden (vgl. [36]). [53] [54]

Durch die so hergeleitete Rohrreibungszahl kann der Druckverlust durch die Interaktion von Strömung zur Rohrwand berechnet werden (vgl. [53] [54] [36] [44]). Somit wurden die in der Förderstromtechnik entstehenden Phänomene exemplarisch dargestellt, die für den Stoß und die Reibung sowohl der Feststoffe, als auch der Strömung in einem Rohr an sich verantwortlich sind. Diese Grundlage wird zu einem späteren Zeitpunkt für die messtechnische Erfassung des Materialstroms und der Charakterisierung in die Einzelkomponenten des mehrphasigen Gemisches wieder aufgenommen.

2.5 Anforderungen und Forschungsfrage

In Kapitel 2.3.2 wurde der technische Aufbau und die Prozess- und Materialströme der in der polymetallischen Knollengewinnung aktiven MBM dargestellt. Eine bis dato nicht bearbeitete und ungelöste Fragestellung ist, wie sensorteknisch Daten über die Materialströme innerhalb der MBM erfasst und ausgewertet werden können. Mittels Analyse dieser Daten soll der Materialstrom charakterisiert werden, um prozesstechnische und sicherheitsrelevante Informationen während der polymetallischen Knollengewinnung nutzen zu können. Das trägt zur Erreichung der in Kapitel 2.2.4 und 2.3.2 aufgeführten Ziele bei.

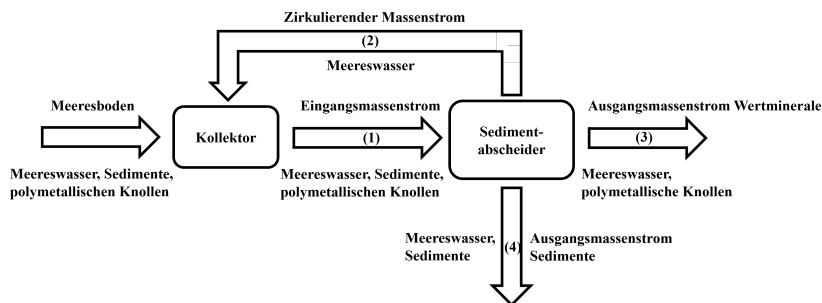


Abbildung 2.10: Verfahrensmodell der hydraulischen Massenströme und ihre Zusammensetzung.

Dabei wird ein Hauptaugenmerk auf die in der MBM vorhandenen hydraulischen Massenströme gelegt, wie in Abbildung 2.10 dargestellt. Expliziter sind hierbei die folgend aufgeführten hydraulischen Massenströme zu betrachten.

- Eingangsmassenstrom - durch den Kollektor in die MBM eingehender hydraulischer Massenstrom (vgl. Abbildung 2.10 (1))
- Zirkulationsmassenstrom - in der MBM zirkulierender hydraulischer Massenstrom (Abbildung 2.10 (2))
- Ausgangsmassenstrom Wertminerale - von der MBM an das Fördersystem (VTS) weitergeleiteter hydraulischer Massenstrom (Abbildung 2.10 (3))
- Ausgangsmassenstrom Sedimente - hydraulischer Massenstrom, der durch einen Diffusor die MBM verlässt und zum Meeresboden abgeleitet wird (Abbildung 2.10 (4))

Die Zusammensetzung der mehrphasigen hydraulischen Massenströme wird hauptsächlich von der Arbeitsweise unterschiedlicher Maschinenkomponenten beeinflusst.

- Kollektor - Aufnahme von Meereswasser, Meeresboden-Sedimenten und polymetallischen Knollen
- Sedimentabscheider - Aufbereitungsaggregat zur Abtrennung der Sedimente von polymetallischen Knollen des vom Kollektor aufgenommenen Eingangsmassenstroms. Erzeugung des Zirkulationsmassenstroms sowie der beiden Ausgangsmassenströme

Der durch den Kollektor (Coanda-Effekt) aufgenommene Eingangsmassenstrom setzt sich aus Meereswasser, Sedimenten und polymetallischen Knollen zusammen und wird in den Sedimentabscheider geleitet. Dieses Aufbereitungsaggregat verlangsamt den hydraulische Massenstrom und mittels Schwerkraftabscheidung werden die Feinfraktionen von den Grobfraktionen getrennt.

Durch die höhere Dichte und das größere Gewicht sinken die polymetallischen Knollen auf den Boden, wohingegen die Sedimente im oberen Teil des Sedimentabscheiders verbleiben. Die aufschwimmende Feinfraktion wird durch den Ausgangsmassenstrom an den Diffusor übergeben und somit an den Meeresboden abgeleitet. Der Prozesswassermassenstrom für den Kollektor zur Erzeugung des Coanda-Effekts wird rezirkuliert.

Damit die Gewinnung von polymetallischen Knollen möglichst umweltschonend und gleichzeitig auch prozesstechnisch effizient gestaltet werden kann, muss der Ausgangsmassenstrom Wertmineral, der dem VTS überführt wird, aus einem möglichst sedimentfreien Meereswasser- und polymetallischen Knollen-Massenstrom bestehen. Durch die bodennahe Rückführung der Sedimente wird die Entstehung von Sedimentwolken während des Abbaus verringert und somit die Meeresboden-Biosphäre einer geringeren Belastung ausgesetzt.

Im Weiteren führt die Sedimentabscheidung auch zu einer Energieeinsparung durch das geringere Hebevolumen des Transportsystemes zum BUS. Hinzu kommt ein verringerter Verschleiß des VTS (Pumpstationen und Rohre) und einer geringeren Gefahr eines auf Sedimentagglomerationen basierenden Kollapses des VTS. Abschließend kann durch das geringere Hebevolumen an Feststoffen die Ladekapazität des BUS und der Transportschiffe deutlich verringert werden, was zu weiteren logistischen Optimierungen und somit auch zu Energie- und Ressourceneinsparungen führt.

Aufgrund der großen Distanz zum BUS und der hohen Wassertiefe ist eine menschliche visuelle Kontrolle der Funktionsweise des Sedimentabscheiders nicht möglich. Daher sollen eine oder mehrere Sensortechnologien zum Einsatz kommen, um eine sensorgestützte Kontrolle zu ermöglichen. Es wurde sich für den Versuch entschieden, die vorherrschenden Massenströme in der MBM und insbesondere den Ausgangsmassenstrom Wertmineral sensortechnisch zu erfassen.

Über die Charakterisierung dieses Zielmassenstroms mit der idealen Zusammensetzung aus sedimentfreien Meereswasser und polymetallischen Knollen kann bei einer Veränderung der Zusammensetzung ein direkter Rückschluss auf den Erfolg der Sedimentabscheidung und der insgesamt Funktionsweise der ablaufenden Prozesse in der MBM geschlossen werden. Somit soll die Prozesssicherheit und der Umweltschutz beim Abbau von polymetallischen Knollen in der Tiefsee unterstützt werden.

Die hier vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konzeptentwicklung einer innovativen sensortechnischen Lösung für die beschriebene Problemstellung und den Einsatz in der MBM während der Gewinnung und Förderung von polymetallischen Knollen in der Tiefsee und soll dabei folgenden Forschungsfragen beantworten.

- Welche Sensortechnologie und messtechnische Umsetzung kann erfolgreich in der Tiefsee bei der polymetallischen Knollengewinnung umgesetzt werden?
- Kann ein mehrphasiger hydraulischer Massenstrom erfolgreich datentechnisch erfasst werden?
- Können durch eine Datenanalyse unterschiedliche Zusammensetzungen des Massenstroms erkannt und charakterisiert werden?
- Können erfolgreich Grobkörner detektiert werden?

Zur Lösung dieser Forschungsfragen müssen eine Vielzahl von technischen und datenanalytischen Anforderungen (vgl. Tabelle 2.2) erfüllt werden.

Tabelle 2.2: Anforderungen an ein Messsystem zum Einsatz in der Tiefsee zur Erfassung und Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen

Anforderungs- bereich	Rahmenbedingungen	Anforderungen an die Entwick- lung
Tiefseeumgebung	Salzwasserresistent	Korissionsbeständige Werkstoffe
	Wassertiefe (bis zu 6000 m)	Druckresistent (600 bar), niedrige Temperaturen (1-4 °C)
	Robust gegen mechanische Einflüsse durch die Bewegung der MBM	Stoß- und Vibrationsresistenz
	Umweltverträglichkeit	Schadstofffreie Materialien
Konstruktive Anforderungen	Platzmangel	Miniaturisierte, modulare Anwendung
	Im Gesamtkonzept der MBM integrierbar	IT-Infrastruktur der MBM integrierbar, geringer Strombedarf, Inline-Applikation notwendig
	Flexible und stabile Applikation des Sensorsystems	Hohe Verfügbarkeit der Datenaufnahme
Messanforderungen	Skalierbarkeit	Modularität der Software, Modularität der Hardware
	Automatisierte Anwendung	Automatisierte Datenaufnahme, Datenverarbeitung
	Remotezugriff	Remote-Zugriff auf Software, Datenverarbeitung, IPC und Speicherinheit
Prozesstechnische Anforderung	Messaufgabe Charakterisierung der homogenen Phase der hydraulischen Massenströmung	Detektion eines mehrphasigen hydraulischen Massenstroms, qualitativ hochwertige Datenaufnahme

Das Lösungskonzept zielt darauf ab, dass die genutzte Sensortechnologie in dieser neuen und anspruchsvollen Arbeitsumgebung des Tiefseebergbaus eingesetzt werden kann und stabil eine echtzeitorientierte Materialcharakterisierung der hydraulischen Massenströme gewährleistet (vgl. Anforderungen an ein Messsystem in Tabelle 2.2). So soll ein Beitrag zur Erreichung der in Kapitel 2.3.2 aufgestellten Ziele und dem Umweltschutz geleistet werden.

3 Technologien zur Charakterisierung im Tiefseebergbau

Im terrestrischen Bergbau findet nach Bartnizki und O'Neil eine Entwicklung, analog zur Industrie 4.0, hin zum Bergbau 4.0 statt. Diese Entwicklung stellt an die primäre Rohstoffgewinnung neue und erschwerende Anforderungen an Abbaukonzepte, eingesetzte Maschinen und Technologien. Das impliziert unter anderem auch das Bestreben, die menschliche Anwesenheit in der primären Rohstoffgewinnung vor Ort zu vermeiden. Zum einen, um die Sicherheit des Menschen innerhalb bergbaulicher Aktivitäten gewährleisten zu können und zum anderen weil die menschliche Anwesenheit unter gewissen Umständen nicht umsetzbar ist. Das trifft auch auf den Tiefseebergbau zu. Durch die Gegebenheiten der Tiefsee ist ein Einsatz von Menschen vor Ort für eine sensitive Kontrolle und Steuerung der eingesetzten Maschinen nicht möglich. Dies führt dazu, dass die in Kapitel 2.5 aufgeführten Anforderungen an eine polymetallische Knollengewinnung nur durch eine größtmögliche Automatisierung und darauf aufbauende Digitalisierung ermöglicht wird. [55]

Der Einsatz von sensortechnologischen Lösungen, sowohl für den terrestrischen Bergbau 4.0, als auch für den Tiefseebergbau, ist somit eine notwendige Grundlage der Datenerhebung, um dieses Ziel zu erreichen. Für das zu entwickelnde Konzept wird im Folgenden auf den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Einsatzmöglichkeiten von Sensortechnologien als Messtechnik und der jeweilige Nutzen zur hydraulischen Materialstromcharakterisierung eingegangen. Dabei werden unterschiedliche Messkonzepte und angewandte Technologien miteinander verglichen. Basierend auf den Anforderungen des Tiefseebergbaus an ein Messkonzept zur Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen werden die Vorteile und Limitation zusammengetragen und vergleichbare Anwendungen in der Literatur betrachtet. [56] [57]

3.1 Datenerfassung mittels Sensortechnologien

Die Digitalisierung von physikalischen Prozessgrößen mit Hilfe von Sensortechnologien legt die zwingend notwendige Grundlage für die Teilbereiche der Automatisierung. Prozesse werden nach dem Deutschen Institut für Normung (DIN) EN ISO 10628 definiert als:

„Abläufe, mit welchen Materie, Energie oder Information umgeformt bzw. transportiert werden.“ [58]

Die über einen Prozess gesammelten Daten und Informationen sollen die Entwicklung von wissensbasierten und/oder regelbasierten Systemen ermöglichen [58]. Diese Systeme werden in rückwärts gerichtete Verfahren (reaktive Verfahren), dem Abgleich eines Soll-Ist-Wertes und der so ermöglichten Lenkung eines Prozesses und vorwärts gerichtete Verfahren (proaktive Verfahren), dem Abgleich von Plan-Werten mit erwarteten Werten, unterschieden. Um in veränderlichen Prozessen auf die jeweiligen Abweichungen reagieren zu können, müssen Regeln aufgestellt werden, wie die jeweilige Abweichung zu beheben ist. [59] [58]

Das so benötigte Vorgehen des Informationserwerbs wird unter anderem in die Teilbereiche der Prozessmesstechnik und Prozessanalytik aufgeteilt. [59] [60]

Prozessmesstechnik

Die Prozessmesstechnik befasst sich mit der Erfassung von Prozesskenngrößen, wie beispielsweise Temperatur oder Druck, und stellt somit die Erfassung eines Prozesses dar. Diese Univariate und somit eindimensionalen Messgrößen gehören zum Teilbereich des Messen, Steuern und Regels (MSR) und können alleine nicht den vollständigen Vorgang eines Prozesses erfassen. Hierfür sind Multivariate, somit eine mehrdimensionale und komplexe Informationsbeschaffung, wie in der Prozessanalytik von Nöten. [61] [60]

Prozessanalytik

Die Prozessanalytik verfolgt das Ziel der Verknüpfung einer Vielzahl univariater Messgrößen, um die zuvor genannte komplexe Informationsbeschaffung zu ermöglichen. Zur Erreichung dieses Ziels wird sich den Methoden der analytischen Chemie bedient [59]. Zwei Möglichkeiten der Definition werden vom Arbeitskreis Prozessanalytik der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) angeboten:

"Gegenstand der Prozessanalytik sind chemische, physikalische, biologische und mathematische Techniken und Methoden zur zeitnahen Erfassung kritischer Parameter von chemischen, physikalischen, biologischen und Umweltprozessen.“ [62]

"Ziel der Prozessanalytik ist die Bereitstellung von relevanten Informationen und Daten für die Prozessoptimierung, -automatisierung, -steuerung und -regelung zur Gewährleistung einer konstanten Produktqualität in sicheren, umweltverträglichen und kostengünstigen Prozessen.“ [62]

Demnach werden komplexe Informationen in angestrebter Echtzeit erfasst und mit modernen Analysemethoden ausgewertet und bewertet. Dieses Vorgehen stellt eine hohe Anforderung an eine inter- und transdisziplinäre Arbeitsweise und umfasst Disziplinen wie die Analytik, Informatik, Elektronik und Verfahrenstechnik. [59]

Diese konzeptionelle Darstellung der prozessanalytischen Ziele lassen sich auch in den Bereich des primären Rohstoffsektors übertragen. Durch die Applikation geeigneter Sensorensysteme können bergbauliche Prozesse kontrolliert, optimiert und gesteuert werden. Dies trifft gesondert auch auf die Erfassung und Analytik aller Stoffströme und stoffstromverändernden Prozesse im Tiefseebergbau zu.

3.2 Sensortechnologische Stoffstromerfassung und -charakterisierung

Die Ziele der Prozessanalytik sind nur durch den Einsatz verschiedener Sensortechnologien umsetzbar. Nach Vraetz, basierend auf Kurth und Peuker, ist die Charakterisierung von Stoffströmen mittels unterschiedlicher Sensortechnologien eine wesentliche Grundlage zur Prozesskontrolle eines bergbaulichen Produktionsbetriebs sowie des Tiefseebergbaus. Vraetz geht dabei auch auf die unterschiedlichen Umsetzungsmöglichkeiten der Prozessanalytik ein. Beschrieben wird auch, dass in Folge einer Gewinnung Rohstoffe selten spezifischen Eigenschaften, wie Reinheit oder Korngröße, unterliegen, die eine direkte Weiterverarbeitung und/oder einen Transport zu nachfolgenden Prozessen ermöglichen. [12] [63] [64]

Aus diesem Grund durchlaufen Rohstoffe nach dem Gewinnungsprozess zunächst unterschiedliche Aufbereitungsprozesse, wie beispielsweise einem Aufschluss durch Zerkleinerung oder eine Erhöhung des Reinheitsgrades durch Klassierung oder Sortierung. So werden die im Prozess befindlichen Rohstoffe stufenweise entlang einer Prozesskette den Wunscheigenschaften näher gebracht. Bei Betrachtung des gesamtheitlichen Gewinnungsprozesses spielen somit eine Vielzahl von Wertschöpfungs- und Prozessketten eine wichtige Rolle. Die unterschiedlichen autonomen Teilsysteme definieren damit klare Systemgrenzen mit einem definierten Ziel und Regelwerk. [63] [64]

Innerhalb dieser Teilsysteme werden Massenströme mit dem vordefinierten Ziel und Regelwerk bearbeitet, um den Massenstrom an das folgende Teilsystem zu übergeben. Somit agieren einzelne Prozesse innerhalb der Förderkette nicht nur isoliert, sondern sind oftmals miteinander verbunden und interagieren. Geringe Änderungen eines Teilsystems der übergeordneten Prozesskette können bereits positive oder negative technische und/oder wirtschaftliche Folgen herbeiführen. [63] [64] [65]

Regulierende Kenngrößen der einzelnen Teilsysteme sind die sensorisch erfassten Ein- und Ausgangsgrößen eines Teilprozesses. Das bildet die zuvor beschriebene Grundlage einer Prozessanalytik ab. Ziel ist daher der Schutz, das Konstanthalten und/oder eine mögliche Optimierung eines Teilprozesses und daraus resultierend auch des Gesamtprozesses (vgl. Kapitel

3). In der primären Rohstoffindustrie ist eine der wichtigsten Informationen die Zusammensetzung des Stoffstroms. Das Wissen über die jeweiligen Bestandteile eines Materialstroms ermöglicht die Erfassung des aktuellen Zustandes und/oder einer Veränderung. Falls erforderlich ist so ein Eingreifen in das Teilsystem, um die regulierenden Kenngrößen einzuhalten, möglich. [63] [64]

Hinzu kommt, dass subjektive menschliche Erfahrungen, Kontrolle und Einflüsse durch die sensorische Erfassung minimiert und/oder substituiert werden, da eine Handlungsentscheidung anhand von quantitativen Messgrößen und Kennwerten vorgenommen wird. Somit kann das maschinelle Einsatzgebiet auf eine Arbeitsumgebung erweitert werden, welches menschliche Anwesenheit nur bedingt ermöglicht oder vollkommen ausschließt. [59] [63]

Übertragen auf den Arbeitsbereich des Tiefseebergbaus und der daraus resultierenden Unzugänglichkeit zu den Prozessströmen (vgl. Kapitel 2.3.1) in der Gewinnung von polymetallischen Knollen ist die Anwendung von Off-/Atline- und Online-Analysen nicht umsetzbar (vgl. Vraetz [12]). Somit wird im Folgenden die Umsetzung einer Inline-Analyse betrachtet.

3.2.1 Verfahren zur Inline-Prozessanalytik

Nienhaus und Vraetz beschreiben die Implementierung von Inline-Verfahren, die eine nahezu kontinuierliche Prozesskontrolle ermöglichen und dabei die Verbindung zwischen dem erwarteten Lagerstättenmodell, der Gewinnung und Förderung sowie der anschließenden Weiterverarbeitung in Aufbereitungsprozessen darstellen. Die Integration geeigneter Verfahren zur Charakterisierung von Materialströmen ermöglichen eine Korrelation zwischen theoretischem Lagerstättenmodell (Prognose) und tatsächlichem Förderstrom. Die Nutzung der Informationen aus der Charakterisierung ist zugleich eine wesentliche Voraussetzung zur gezielten Steuerung von Aufbereitungsparametern in nachgeschalteten Prozessschritten oder bei der Disposition unterschiedlicher Massenstromkomponenten. [12] [66]

Die Applikation eines Inline-Messsystems kann je nach Messverfahren an unterschiedlichen oder sehr klar definierten Stellen entlang des Förderwegs möglich sein. Je nach Anforderung an das jeweilige Messkonzept und physikalische Messprinzip befinden sich die Messstellen innerhalb der Förderung an Stellen, die entweder einen sehr vergleichmäßigten oder einen durchmischten Förderstrom darstellen. Hierfür typische Messpunkte befinden sich in Förderstrom-Übergabepunkten oder längeren Transportstrecken. [63]

Damit auf eine Änderung der Eigenschaften möglichst frühzeitig reagiert werden kann, sollte die Integration von Messsystemen möglichst nahe an der Gewinnungsstelle oder rechtzeitig vor möglichen steuerbaren Prozessschritten integriert sein. Im Weiteren ist zur digitalen Abbildung des kontinuierlichen Prozesses über Leitgrößen eine sich wiederholende

Materialcharakterisierung entlang des gesamten Förderwegs durch mehrere Messstellen zur Informationsgewinnung empfehlenswert [63]. Nienhaus zeigt auf, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden für die sensortechnische Inline-Analytik in der primären Rohstoffindustrie zur Verfügung stehen. Hierbei werden Messverfahren basierend auf Strahlungen und Körperschall differenziert. [66]

Eine Vielzahl der in der Rohstoffindustrie eingesetzten Sensorsysteme zur Charakterisierung eines Materialstroms basieren auf der **Analyse von elektromagnetischen Strahlen**. Elektromagnetische Wellen setzen sich aus wechselseitig induzierten elektrischen und magnetischen Feldern zusammen. In der Charakterisierung von Rohstoffen emittieren einzelne Festkörper durch ihre spezifischen Eigenschaften unterschiedliche Strahlungsformen. Diese werden zur Analyse genutzt [66]. Unterschieden wird dabei die resultierende Transmission und somit die den Festkörper durchdringenden elektromagnetischen Wellen und Reflexionen. Wellen und Reflexionen verhalten sich bei Kontakt mit der Festkörperoberfläche diametral zueinander. Sensortechnologisch wird entweder die Reflexion oder Transmission erfasst (oder kombiniert) und so ein Rückschluss auf die zu charakterisierenden Feststoffe ermöglicht. Darüber hinaus werden weitere Strahlungsformen (Absorption, Remission und Lumineszenz) für die sensortechnische Charakterisierung von Stoffströmen genutzt. [12] [66]

Die Funktionsweise, das physikalische Prinzip sowie Methoden zur Datenanalyse elektromagnetischer Verfahren werden tiefer in der Literatur erläutert (vgl. [67]). Mögliche Applikationen und Anwendungsbeispiele für die Prozesskontrolle im Rohstoffsektor mittels der genannten Verfahren sind in [68] und [69] ausführlich beschrieben. Auch wird in [66] auf die Anforderungen elektromagnetischer Verfahren und Systeme weiter eingegangen.

Mit elektromagnetischen Verfahren zur Charakterisierung unterschiedlicher Massenströme wurden in der Rohstoffindustrie positive Erfahrungen gesammelt. Der Einsatz von speziell entwickelten Messsystemen ermöglicht eine umfangreiche kontakt- und zerstörungsfreie Prüfung der zu analysierenden Schüttgüter. Dabei kann nicht nur eine umfangreiche Informationsdichte erfasst werden, sondern einige Verfahren ermöglichen sogar eine Analyse der chemische Zusammensetzungen innerhalb des Prüfkörpers. Dabei kann durch unterschiedliche Umsetzungskonzepte dieser Sensorsysteme sogar über ein Einzelkorn hinaus mehrere Prüfkörper gleichzeitig oder ein ganzer Massenstrom erfasst werden. [66]

Neben elektromagnetischen Verfahren können **Analysen auf der Basis von Körperschall** als eine weitere Möglichkeit der Inline-Charakterisierung von Materialströmen genutzt werden. Diese aus dem Anwendungsbereich der Zustandsüberwachung von Maschinen (engl. Condition Monitoring, CM) und der Materialzustandsüberwachung (engl. Material Fatigue Monitoring, MFM) adaptierten Verfahren gehören zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren (engl. Non-Destructive Testing, NDT) und in der Literatur wird schon eine umfangreiche

Anzahl von Anwendungen beschrieben [70] [71] [72] [73] [74]. Dieses Verfahren basiert auf dem Erfassen von frei gewordener innerer potentieller Energie. Somit muss für die Nutzung von Körperschall keine externe Energie in den Festkörper eingeleitet werden. Zum anderen sind Körperschallwellen in der Lage sich über dynamisch ablaufende Prozesse zu verändern und können somit einen Rückschluss auf die strukturelle Integrität eines Körpers ermöglichen. [75] [76]

Ein weiteres Charakteristikum ist, dass die Ausbreitung von Körperschallwellen prinzipiell ungerichtet ist und sich sphärisch wellenförmig ausbreitet. Somit kann ein Körperschallsensor räumlich frei in der Richtung zu der Quelle positioniert werden. Die freie räumliche Positionierung und der nur begrenzt benötigte oberflächliche Zugang sind weitere Vorteile. Diese Charakteristika führen zu einer dauerhaft umsetzbaren Prüfmethode für Festkörper, Gefäße und andere Drucksysteme. Somit folgen keine Ausfallzeiten oder Eingriff in ablaufende Prozesse. [77] [78]

3.2.2 Vergleich Verfahren zur Inline-Prozessanalytik

Bezogen auf die Inline-Analytik von hydraulischen Massenströmen können aufgrund des genutzten Transportmediums Wasser eine gewisse Anzahl an Technologien als potenzielle Anwendungsmöglichkeiten ausgeschlossen werden. Auch werden die Umsetzungsmöglichkeiten dieser Technologien für eine Anwendung in der Tiefsee durch das Arbeitsumfeld und den in Kapitel 2.5 beschriebenen Anforderungen an die im Tiefseebergbau genutzten Technologien eingeschränkt oder stellen Ausschlusskriterien dar. Tabelle 3.1 fasst die jeweiligen Anforderungen möglicher Sensorsysteme zusammen.

Tabelle 3.1: Relative Bewertung strahlen- und schallbasierter Sensortechnologien.

Anforderung / Technologie	Strahlenbasiert	Schallbasiert
Energiebedarf	hoch	sehr gering
Benötigte Schutzmaßnahmen	hoch	sehr gering
Größe der Anwendung	mittel - sehr groß	minimal
Detaildichte der Informationen	sehr hoch	derzeitig mittel
Geschultes Personal	ja	nein
Komplexität der Applikation	hoch	gering
Anforderung Datenanalyse	gering	sehr hoch

Die schallbasierten Verfahren zur Inline-Analytik können beim derzeitigen Stand der Technik vom Detaillierungsgrad der Einzelkornuntersuchung nicht in direkte Konkurrenz zu den elektromagnetischen Verfahren gesetzt werden. Demgegenüber stehen die umfangreichen Anforderungen solcher Messsysteme, welche mögliche Applikationen einschränken. Im Kontext des Tiefseebergbaus sind hohe Anforderungen an Platz, Gewicht und Energiebedarf Ausschlusskriterien für sensortechnische Anwendungen. Hinzu kommt die hydraulische, räumlich geschlossene Gewinnung der polymetallischen Knollen und der somit schwere Zugang der Messsysteme zum Materialstrom. Die Arbeitsumgebung der Tiefsee stellt durch das Vorhandensein von Wasser und hohem Druck ein Ausschlusskriterium für eine Vielzahl von elektromagnetischen Sensortechnologien dar.

Die Sensoren der schallbasierten Verfahren ermöglichen eine Miniaturisierung, welche in einem minimalen Platzbedarf, einem geringen Energiebedarf, einer hohen Sicherheit, einer einfachen und flexiblen Applikation resultiert. Dadurch kann eine kostengünstige und widerstandsfähige Möglichkeit der Umsetzung einer Inline-Analytik realisiert werden. Bezogen auf die komplexen und anspruchsvollen Anforderungen der Rohstoffgewinnung finden schallbasierte Verfahren vermehrt Anwendung. Die genannten Vorteile qualifizieren schallbasierte Verfahren auch zu einem Einsatz im Tiefseebergbau, da die in Kapitel 2.3.1 genannten Anforderungen erfolgreich in Einklang mit den Anforderungen von schallbasierten Verfahren zu bringen sind. Dementsprechend wird im Folgenden nicht weiter auf eine Inline-Stoffstromcharakterisierung mittels elektromagnetischer Verfahren eingegangen. [70]

3.3 Anwendungen der Inline-Prozessanalytik zur Materialcharakterisierung

Die grundsätzliche Anwendung einer schallbasierten Sensortechnologie in der Rohstoffindustrie wird in [12] [78] [77] beschrieben. Insbesondere die Nutzung dieser Sensortechnologie zur Erfassung und Charakterisierung von Massenströmen wird immer wieder angestrebt. Adaptionen und realisierte Anwendungen werden nachfolgend vorgestellt. [79] [80]

Körperschall - Akustischer Geo-Scanner - Der akustische Geo-Scanner basiert auf der Nutzung von konventionellem Körperschall. Diese Anwendung wurde innerhalb eines öffentlich geförderten Forschungsprojektes entwickelt, um Lockergestein und Trennflächen über charakteristische Körperschallschwingungen zu differenzieren. Die auf einem piezoelektrischen Effekt basierenden Körperschallsensoren wurden für die Anwendung direkt in das Gewinnungsgerät, hier die Baggerschaufel, integriert. Durch den äußeren Einfluss differierender Materialien werden unterschiedliche Strukturschwingungen innerhalb der Schaufel detektiert.

Durch die kontinuierliche Informationsgewinnung soll eine dauerhafte und zeitnahe Aktualisierung des Lagerstättenmodells ermöglicht werden. Anwendung findet dieses Verfahren sowohl im Braunkohleabbau, als auch in der Nassgewinnung von Kies und Sand. [81] [82] [83] Darüber hinaus wird der Geo-Scanner zur Ermittlung unterschiedlicher Korngrößenverteilungen genutzt. [84] [85]

AE - Charakterisierung von Gesteinsschichten in der Bohr-/Schneidtechnik - In der schneidenden Gewinnung und der Bohrtechnik gibt es das Bestreben, schon frühestmöglich eine Einschätzung des gelösten oder durchbohrten Materials zu geben. Somit können schon beim ersten Verfahrensschritt der primären Rohstoffgewinnung erste Informationen über die Rohstoffe und Wertminerale gesammelt und frühzeitig für die nachgelagerten Prozessschritte genutzt werden. In einer Vielzahl von Forschungsprojekten wurde an dieser Thematik gearbeitet. [86] [87] [88]

AE - Charakterisierung von Gips und Anhydrit - Innerhalb eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über das AiF (Forschungsnetzwerk Mittelstand) geförderten Projektes (Entwicklung eines Online-Messsystems zur Materialstromcharakterisierung in Aufbereitungsanlagen der Gipsindustrie, Fördernummer 19534 N / 2) wurde ein Online-Messsystem zur Materialstromcharakterisierung in Aufbereitungsanlagen der Gipsindustrie auf Basis der AET entwickelt. Hintergrund für den Bedarf eines solchen Systems war die notwendige Qualitätssicherung der Produkte in Betrieben der primären Rohstoffindustrie. Dabei ist eine möglichst genaue Kenntnis der Zusammensetzung des geförderten Massenstromes, in diesem Falle der Anteile von Gips und Anhydrit im Massenstrom, eine für den Verarbeitungsprozess entscheidende Information. Ziel des erfolgreich umgesetzten Projektes war deshalb die Realisierung eines in den Aufbereitungsprozess integrierbaren, echtzeitfähigen Messsystems zur Inline-Charakterisierung der Stoffströme. [89] [90]

AE - Charakterisierung von Flint und Mergel - In Zusammenarbeit mit der Schwenk Zement KG wurde innerhalb eines gemeinsamen Projektes eine AE gestützte Stoffstromcharakterisierung umgesetzt. Im Gewinnungsprozess wird im Steinbruch Kalkstein, Flint und Mergel abgebaut. In auf den Abbau folgenden Verarbeitungsprozessen stellt ein hoher Anteil an Flint im Materialstrom eine Störgröße dar. Mittels der umgesetzten Stoffstromcharakterisierung konnte der Materialstrom charakterisiert und nachfolgend Optimierungsschritte abgeleitet werden. [12]

AE - Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen - Im Rahmen des Blue Nodules Projektes wurde am AMT ein Konzept zur Charakterisierung des Stoffstroms mittels AET für die Tiefsee entwickelt. Hierbei wurde eine prinzipielle Machbarkeit der Charakterisierung von hydraulischen rohrgestützten Massenströmen nachgewiesen. [12] [91]

3.4 Bewertung existierender Ansätze

Anhand der in der Literatur beschriebenen und umgesetzten Projekte/Anwendungen kann darauf geschlossen werden, dass die Anwendung von Körperschall basierten Sensorsystemen eine Möglichkeit für eine Materialstromcharakterisierung bietet.

Explizit für die Nutzung schallbasierter Verfahren zur Erfassung feuchten/hydraulischen Massenströmen lieferte Tudeszki mit seinen Versuchen im Körperschallbereich erste Erfolge. Die Datenaufnahme wurde jedoch mittels eines Aufnehmers (Metallstab) umgesetzt. Dieser Aufnehmer wurde in den offenen Massenstrom eingebracht. Diese messtechnische Umsetzung, die verfolgte Messaufgabe und auch die Resultate entsprechen nicht den Anforderungen der polymetallischen Knollengewinnung in der Tiefsee. [81] [84]

Bei der Nutzung eines Körperschall-Sensors innerhalb der Bohr-/Schneidtechnik konnte bewiesen werden, dass diese Technologie trotz einer nicht direkten Ortsnähe zur Messstelle und einer Vielzahl von Störgrößen und Einflussparametern performante Ergebnisse liefern kann. Der generelle Aufbau, die Zielstellung und die Messaufgabe innerhalb dieser Versuche sind aber nicht miteinander vergleichbar. [87] [88]

Die Anwendungen zur Charakterisierung von trockenen Materialströmen ähneln in der Messaufgabe, der Komplexität, der Datenanalyse und der qualitativen hohen Anforderung an die Materialstromcharakterisierung der vorliegenden Aufgabenstellung. Die Ergebnisse dieser Projekte geben einen guten Hinweis auf die Leistungsfähigkeit schallbasierter Messverfahren, insbesondere im hochfrequenten Bereich (der AE) zur Stoffstromcharakterisierung. In diesem Fall differieren die Arbeitsumgebungen und die mechanische Umsetzung der Messtechnik zum einen und zum anderen werden hier trockene Materialströme auf Bändern betrachtet. [90] [12]

Die Untersuchungen innerhalb des Blue Nodules Projektes haben einen vielversprechenden Indikator für eine Umsetzbarkeit der skizzierten Aufgabenstellung geliefert. Nichtsdestotrotz wurde hier im sehr vereinfachten Labormaßstab mit idealen Versuchskörpern gearbeitet. Dabei lag der Hauptfokus auf dem Nachweis von differierenden AE-Signalmustern. Sowohl die messtechnische Umsetzung, als auch die Versuchsumsetzung und Komplexität der Messaufgabe entsprachen nicht der Entwicklung eines Gesamtkonzeptes. [12] [91]

Zusammenfassend kann das Fazit gezogen werden, dass aus den gegebenen Ansätzen und Umsetzungen Teilbereiche der hier vorliegenden Aufgabenstellung nur teilweise betrachtet wurden. Diese Teilaspekte geben einen positiven Hinweis auf eine vielversprechende Umsetzung eines auf Körperschall basierten Sensorsystems, insbesondere der AE, zur Umsetzung einer Charakterisierung von hydraulischen rohrgestützten Massenströmen in der polymetallischen Knollengewinnung.

Jedoch wurde in keinem der in der Literatur dargestellten Ansätze eine ganzheitliche Betrachtung der in Kapitel 2.5 aufgestellten Messaufgabe umgesetzt. Diese beschriebene Kombination von Anforderungen an die messtechnische und auch datenanalytische Umsetzung für die dedizierte Anwendung der Materialstromcharakterisierung in geschlossenen Rohren von hydraulischen Massenströmen im Arbeitsumfeld der polymetallischen Knollengewinnung in der Tiefsee wurde bis dato nicht umgesetzt.

4 Acoustic Emission und Datenanalyse

Der Einsatz von Sensortechnologien im primären Rohstoffbereich und besonders die Entwicklung neuartiger Verfahren zur Charakterisierung von hydraulischen Stoffströmen erfordert ein Verständnis über die anwendungsbezogenen Grundlagen der verwendeten Technologie. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die AET, eine spezielle Form des Körperschalls, beginnend mit der Einführung und Erklärung einer eindeutigen Terminologie.

4.1 Abgrenzung und Ontologie

Das physikalische Phänomen der Schallemission bezeichnet das Auftreten von transienten elastischen Wellen innerhalb eines Festkörpers oder Werkstoffes (vgl. Kapitel 3.2.1). Eine Abgrenzung zu vergleichbaren Phänomen des Körperschalls wird über den gemessenen Frequenzbereich und über den Quellmechanismus vorgenommen [92]. Bei der Betrachtung von Körperschall beginnt der Frequenzbereich bei 2-50 *Hz* und endet im Bereich von 10-20 *kHz* [93]. Dahingegen liegt der gemessene Frequenzbereich der AE bei 20 *kHz* bis 2 *MHz* [92]. Somit ist zwar ein sich überschneidender Frequenzbereich vorhanden, aber die AE deckt nach oben hin ein deutlich größeres Spektrum ab.

Trotz des Umstandes, dass die Entstehung von AE in einem Grenzbereich zwischen zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfmethoden anzusiedeln ist, wird die AE als zerstörungsfrei definiert [92]. Die AET unterscheidet sich von den meisten anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren in zwei wesentlichen Aspekten. Zum einen basiert die Sensortechnologie auf dem Erfassen von frei gewordener innerer potentieller Energie. Somit muss für die Nutzung von AE keine externe Energie in den Festkörper eingeleitet werden. Zum anderen sind AE-Wellen in der Lage, sich über dynamisch ablaufende Prozesse zu verändern und können somit einen Rückschluss auf die strukturelle Integrität eines Körpers ermöglichen. [75] [76]

Ein weiteres Charakteristikum ist, dass die Ausbreitung von AE Wellen prinzipiell ungerichtet ist und sich sphärisch wellenförmig ausbreitet. Somit kann ein AE-Sensor räumlich frei in der Richtung zu der AE-Quelle positioniert werden. Die freie räumliche Positionierung und der nur begrenzt benötigte oberflächliche Zugang sind weitere Vorteile. Diese Charakteristika

führen zu einer dauerhaft umsetzbaren Prüfmethode für Festkörper, Gefäße und andere Drucksysteme. Somit folgen keine Ausfallzeiten oder Eingriff in ablaufende Prozesse. [77] [78]

Die AET wird in der Literatur auch durch die Nutzung einer definierten Terminologie von vergleichbaren physikalischen Phänomenen abgegrenzt. Die ehemalige vom Deutschen Institut für Normung e.V. herausgegebene DIN-Norm wurde überarbeitet und als DIN EN 13554 (Europäische Norm) und ISO Norm 12716 erneut veröffentlicht. Diese Normen wurden gesondert für die Nutzung an industriellen Konstruktionen, Bauteilen und unterschiedlich belasteten Werkstoffen in einer rauen Umgebung aufgestellt. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Begriffe, auf die sich auch diese Arbeit beruft, werden in der Arbeit von Vraetz dargestellt [12]. [94] [92] [95]

Im Weiteren unterscheiden die beiden Normen in transiente und kontinuierliche AE-Signale. Bei transienten AE-Signalen, auch Bursts genannt, ist der Beginn sowie das Ende des Ereignisses deutlich von einem kontinuierlichen, prozessabhängigen Rauschen zu unterscheiden (vgl. Abbildung 4.1). [92] [95] [73]

Zudem grenzt sich das transiente Signal durch seine Maximalamplitude und einen charakteristischen Schwingungsverlauf vom Rauschen ab. Bezogen auf die gesamte Dauer eines transienten Signals ist eine relativ kurze Anstiegszeit (Dauer bis zur maximalen Spannungsamplitude) im Verhältnis zur Abklingzeit (Abfall der Spannungsamplitude auf das Niveau des Rauschens) typisch. Kontinuierliche AE-Signale, beispielsweise prozessabhängiges Rauschen, besitzen keine detektierbaren Start- und Endpunkte. [92] [95]

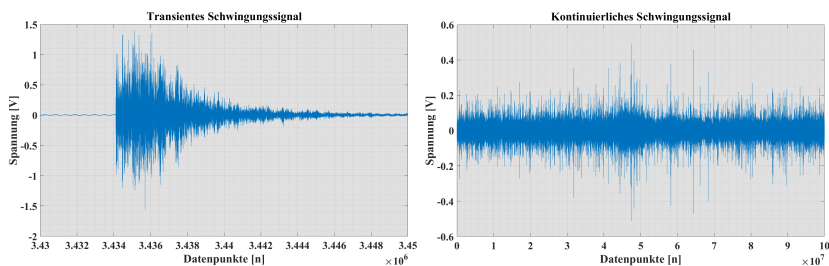


Abbildung 4.1: Gegenüberstellung eines transienten und eines kontinuierlichen Schwingungssignals.

4.2 Entstehung des Acoustic Emission Effektes

In der Literatur ist Schall als mechanische Schwingung in einem elastischen Medium definiert. Dies trifft sowohl auf Festkörper, als auch auf Flüssigkeiten und Gase zu. Somit ist ohne die Anwesenheit von Materie keine Existenz von Schall und somit auch keine Schallübertragung möglich. Eine Besonderheit für die Ausbreitung von Schall ist, dass keine Materie transportiert wird. Es werden Atome, bzw. Teilchen des jeweiligen Ausbreitungsmediums in einem Punkt in Schwingung versetzt und diese übertragen ihre Bewegung relativ auf die umliegenden Atome bzw. Teilchen. [96]

Für diese Arbeit ist nur die Ausbreitung von Schallwellen in Festkörpern relevant. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Schallwellen (hier AE) und ihr Dämpfungsverhalten in Festkörpern.

In der Literatur (vgl. [72] [71] [73] [75]) werden eine Vielzahl an Quellen für die Entstehung von AE beschrieben. Diese werden in den Dissertationen von Vraetz [12] und Boos [77] umfangreich basierend auf den Normen DIN 13554 und DIN EN 1330-9 zusammengefasst. [92] [95] Es kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptquellen für die Entstehung von AE-Wellen im Tiefseebergbau auf Reibung und Stoß (vgl. Kapitel 2.4) basieren.

4.2.1 Verhalten von Körperschallwellen in Festkörpern

In Festkörpern breiten sich Schallwellen in unterschiedlichen Wellenarten aus. Longitudinal-, Transversal-, Rayleigh- und Lambwellen werden hinsichtlich ihrer Schwingungsrichtung bezogen auf die Ausbreitungsrichtung und Ebene der Ausbreitung unterschieden. Ein wichtiger Faktor für die Unterscheidung der jeweiligen Wellenform ist die Schallgeschwindigkeit c_S . Zur Untersuchung der unterschiedlichen Wellenformen ist dieser Faktor vorteilhaft, weil er weitestgehend frequenzunabhängig ist, aber eine Abhängigkeit von materialspezifischen Faktoren sowie äußeren Einflüssen (bspw. statischer Druck und Temperatur) auf das Ausbreitungsmedium aufweist. [96]

Longitudinalwelle - Diese auch Kompressions- oder Druckwelle (P-Welle) genannte Wellenform ist den Körperwellen untergliedert. Die Schwingungsrichtung der Teilchen bzw. Atome ist bei dieser Wellenform analog zur der Ausbreitungsrichtung der Welle. Charakteristisch ist somit, dass Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung gleichgerichtet zueinander sind. Hierbei ist eine Ausbreitung im festen, flüssigen und gasförmigen Medium möglich. Die folgende Abbildung 4.2 stellt grafisch dieses Charakteristikum dar. [97]

Die longitudinale Schallgeschwindigkeit c_L (vgl. Formel 4.1) in einem Werkstoff wird ausschließlich durch materialspezifische Faktoren bestimmt. Hierzu zählen die Massendichte

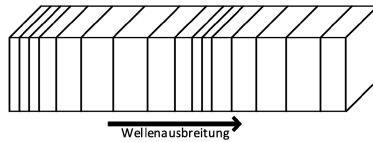


Abbildung 4.2: Grafische Darstellung der Longitudinalwelle. (Nach [98]).

ρ , der Elastizitätsmodul E und die Querkontraktionszahl μ , auch Poissonzahl genannt. Die geometrische Abmessung sowie die eingehende Frequenz haben keinen Einfluss auf die longitudinale Schallgeschwindigkeit. [99]

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (4.1)$$

mit: c_L Longitudinale Schallgeschwindigkeit [m/s]
 μ Querkontraktionszahl/Poissonzahl $[-]$
 E Elastizitätsmodul [N/m^2]
 ρ Massendichte [kg/m^3]

Transversalwelle - Eine weitere Körperwelle stellt die Transversalwelle, auch Scherwelle (S-Welle) genannt, dar. Bei dieser Wellenform befindet sich die Bewegungsrichtung der Atome bzw. Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Daraus entsteht das in Abbildung 4.3 dargestellte Ausbreitungsverhalten.

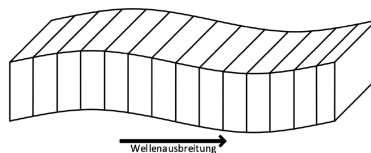


Abbildung 4.3: Grafische Darstellung der Transversalwelle. (Nach [98]).

Analog zu den Longitudinalwellen verhalten sich Transversalwellen auch materialspezifisch. Daher wird für die Berechnung der transversalen Schallgeschwindigkeit c_T (vgl. Formel 4.2) die Faktoren ρ , μ und erneut der Elastizitätsmodul E bzw. der Gleitmodul G benötigt (vgl. Formel 4.3). [99]

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.2)$$

mit

$$G = E \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (4.3)$$

mit: c_T Transversale Schallgeschwindigkeit [m/s]
 G Gleitmodul [N/m^2]

Aufgrund der Abhängigkeit zum Gleitmodul ist eine Ausbreitung von Transversalwellen in Gasen und Flüssigkeiten nicht möglich, da in diesen Medien der G gleich 0 ist. Somit können sich Transversalwellen nur in Festkörpern ausbilden [79]. Auch ist zu beachten, dass c_L größer c_T ist. Beispielsweise breitet sich die Longitudinalwelle in metallischen Festkörpern unter der Annahme einer durchschnittlichen Poissonszahl μ von 0,33 annähernd doppelt so schnell aus wie die Transversalwelle (vgl. Formel 4.4). [99]

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2 \cdot (1 - \mu)}} \quad (4.4)$$

mit: c_L Longitudinale Schallgeschwindigkeit [m/s]
 c_T Transversale Schallgeschwindigkeit [m/s]
 μ Querkontraktionszahl [—]

Rayleighwelle - In dem Moment, in dem eine mechanische Schwingung in einem bestimmten Winkel auf ein festes Medium oder eine Medium-Grenzfläche trifft, transformiert sich die Transversalwelle zu einer Oberflächenwelle, auch Rayleighwelle (R-Welle) genannt. Abbildung 4.4 beschreibt grafisch die Ausbreitung der R-Welle. An der Medium-Oberfläche breitet sich diese Wellenart mit einer elliptischen Teilchenbewegung sowie mit einer Eindringtiefe von etwa 1 bis 3 Wellenlängen aus. Bei Poissonszahlen gängiger Materialien ist diese Wellenform bei einer ungefähren Eindringtiefe von einer Wellenlänge 20 - 30 % langsamer als die P- und S-Welle. [79]

Analog zu den Körperwellen ist auch die Rayleighwellengeschwindigkeit c_R von materialspezifischen Eigenschaften beeinflusst. c_R entspricht somit, abhängig von der Poissonzahl μ ,

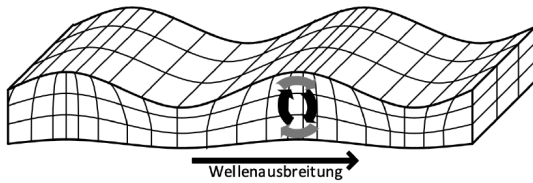


Abbildung 4.4: Grafische Darstellung der Rayleighwelle. (Nach [98]).

etwa dem 0,87 - 0,96 fachen von c_T [79]. c_R lässt sich folglich annäherungsweise bestimmen (vgl. Formel 4.5). [99]

$$c_R \approx c_T = \frac{(0,874 + 1,12 \cdot \mu)}{1 + \mu} \quad (4.5)$$

mit: c_R Rayleighwellengeschwindigkeit [m/s]

Lambwellen - auch Plattenwellen genannt, treten ausschließlich in Platten oder Blechen auf, die eine Dicke von 5 mm nicht überschreiten. Charakteristisch für diese Wellenart ist eine elliptische Teilchenbewegung an beiden Oberflächen der Platte resultierend aus der symmetrischen Form (auch Dehnwelle; engl. extensional wave) und der unsymmetrischen Form (auch Biegewelle; engl. flexural wave) der Lambwelle. [100]

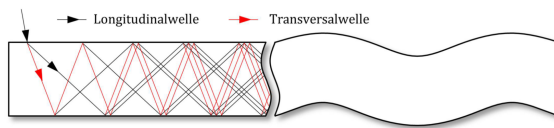


Abbildung 4.5: Ausbreitung der Lambwelle. (Nach [100]).

Lambwellen (vgl. Abbildung 4.5) entstehen durch eine Überlagerung mehrfacher Reflexionen von P- und S-Wellen die sich innerhalb einer dünnen Platte konvergierend ausbreiten [97] [100]. Idealisiert kann dies durch eine Platte in einem Vakuum mit einer schräg einfallenden mechanischen Schwingung beschrieben werden (vgl. Abbildung 4.5). Aufgrund des Reflexionsfaktors $R = 1$ bei einem Grenzschichtübergang einer Platte zu einem Vakuum kommt es zu der konvergierenden Reflexion der P- als auch S-Wellen innerhalb einer Platte. Aufgrund dieser Entstehung werden Lambwellen den geführten Ultraschallwellen zugerechnet.

Die Lambwelle wurde von Horace Lamb [101] erstmalig beschrieben und darauf aufbauend in der Literatur (vgl. [102] [103] [104] [105]) umfangreich mathematisch hergeleitet. [100]

Eine weitere bedeutende Eigenschaft von Lambwellen ist, dass die Phasengeschwindigkeiten der verschiedenen Moden von der Frequenz und von der Plattendicke abhängig sind. Diese frequenzabhängige Eigenschaft wird üblicherweise in Dispersionsdiagrammen dargestellt. Für diese Arbeit wurde das Simulationsprogramm Dispersions Calculator, bereitgestellt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, genutzt [106]. Innerhalb dieser Simulations-Software können alle Einflussparameter exakt definiert werden, um so die Ausbreitung für die Lambwelle, das Verhalten der jeweiligen Moden und auch die kalkulierte Dämpfung über die Wegstrecke darstellen zu können. Diese Simulationen bilden die Basis für die in den Grundlagenversuchen durchgeführten Plattentests.

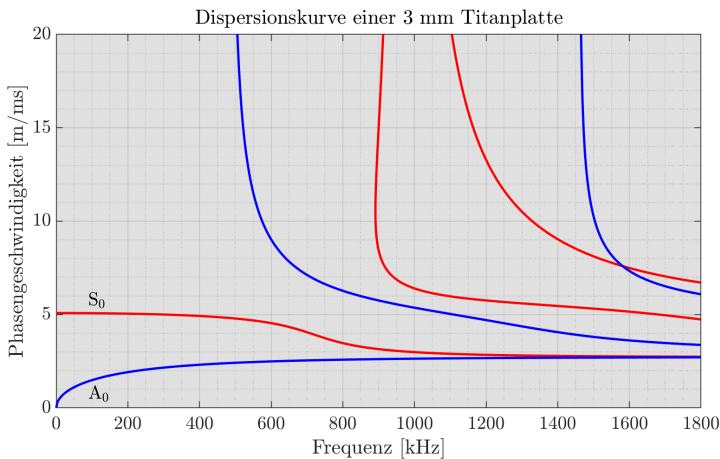


Abbildung 4.6: Grafische Darstellung eines Dispersionsdiagramm.

Aus dem Dispersionsdiagramm (vgl. Abbildung 4.6) ist ersichtlich, dass mit steigender Frequenz die Anzahl der symmetrischen und antisymmetrischen Moden zunimmt. Folglich erhöht sich auch die Anzahl der Moden, die gleichzeitig in der Platte vorherrschen und sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten.

Die Beschreibung der einzelnen im Themenbereich des Körperschalls vorhandenen Wellen-Formen und die jeweiligen Einflussfaktoren zeigen auf, dass die Körperschallwellen unterschiedlichsten Einflussfaktoren ausgesetzt sind, die zu einer Dämpfung führen können. Im nachfolgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Dämpfungen dargelegt.

4.2.2 Auftretende Signaldämpfung von Körperschallwellen

Als Signaldämpfung wird eine Reduzierung der Amplitude einer Körperschallwelle oder des resultierenden messtechnisch erfassten Körperschallsignals über die Laufzeit und Distanz in einem gleichmäßigen Übertragungsmedium bezeichnet. Häufig resultiert dieser Effekt in einem Energieverlust. [79] [72]

Unterschieden wird hierbei in eine dissipative Dämpfung, eine geometrische Dämpfung, die Dispersion und die Streuung. Insbesondere bei der Detektion von Körperschallsignalen über eine größere Distanz, inhomogene Materialien oder Materialübergängen hinweg, ist die Signaldämpfung eine relevante Einflussgröße. [79] [72]

Eine **dissipative Dämpfung** beschreibt den Energieverlust eines Körperschallsignals durch nicht ideale elastische Werkstoffe. Durch plastische Verformungen, innerer Reibung oder die Entstehung von Rissen im Werkstoff wird die vorhandene kinetische Energie in Wärme umgewandelt. Die exponentielle Funktion $e^{\psi d}$ beschreibt diese Art der Dämpfung. ψ stellt hierbei die frequenz- und materialabhängige Konstante dar, wohingegen d die Distanz zwischen Signalquelle und Sensor darstellt. [79] [107] [77]

Die **geometrische Dämpfung** hingegen beschreibt die Verluste bezogen auf die zu überbrückende Distanz d der Körperschallwellen zwischen der Schall-/Signalquelle und dem Sensor. Mit steigendem d steigt auch die geometrische Dämpfung. Innerhalb der geometrischen Dämpfung ist eine Unterscheidung zwischen Oberflächen- und Raumwellen zu treffen. Körperwellen breiten sich dreidimensional kugelförmig aus, wohingegen Oberflächenwellen eine zweidimensional kreisförmige Ausbreitung aufweisen.

Steigt die für die kugelförmige Ausbreitung der Raumwelle verfügbare Fläche um a^2 , zieht das eine Reduzierung der Energiedichte und somit der Wellen-Amplituden von $\frac{1}{a^2}$ nach sich. Bei der sich zweidimensional ausbreitenden Oberflächenwelle beträgt der Energieverlust lediglich $\frac{1}{\sqrt{a}}$. Dementsprechend verliert die Oberflächenwelle aufgrund der geringeren Ausbreitungsfläche weniger Energie über die Distanz, als die Raumwelle. [79] [107] [96]

Die Dämpfung über die **Dispersion** entsteht auf der Basis der Anwesenheit divergierender Frequenzkomponenten in einer elastischen Welle. Dementsprechend haben unterschiedliche Frequenzen einen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Körperwellen im Medium. Analog zu der Streuung hat die Dispersion einen Einfluss auf die Laufzeit über d hin zum Sensor. [107] [79]

Die **Streuung** beschreibt das Phänomen der Dämpfung wenn die Körperschallwelle auf innere Einschlüsse im Medium, Korngrenzen in metallischen Werkstoffen oder Fasern in Verbundstoffen trifft. Kommt es zu einem Kontakt wird die Welle vollständig oder teilweise, wie in Abbildung 4.7 aufgezeigt, reflektiert. Neben dem Energieverlust verursacht die Streuung

im Weiteren unterschiedliche, sich überlagernde Laufzeiten der Körperschallwellen bei der Überwindung von d . [107] [96]

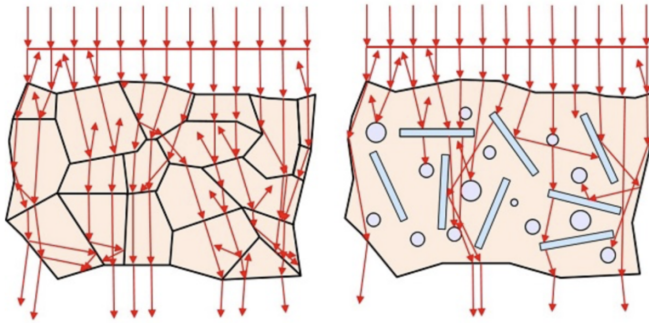


Abbildung 4.7: Einfluss von Materialeigenschaften auf die Körperschallwelle bei einem senkrechten Einfall. (Nach [97]).

Diese Formen der Dämpfung haben alle einen Einfluss auf die Übertragung und messtechnische Erfassung der Körperschallwellen. Dies kann dazu führen, dass wichtige Informationen für die Interpretation von den im Verlaufe einer Messung erfassten Signal verschwinden, sich überlagern oder geschwächt werden. [77]

Für die Realisierung eines schallbasierten Messverfahrens (AET) nimmt die Streuung aufgrund von vorhandenen Grenzschichtübergängen oder miteinander agierenden Materialien eine gesonderte Stellung ein und wird im Folgenden genauer beleuchtet.

4.2.3 Einfluss von Grenzschichtübergängen auf Körperschallwellen

Trifft eine Schallwelle unter einem Winkel von 90° auf einen Grenzschichtübergang von zwei unterschiedlichen Materialien, d.h. eine Grenze zweier divergierender Materialien mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit c_i und Dichte ρ_i , wird ein Teil des Schalldrucks senkrecht reflektiert. Der übrige Schalldruck passiert das Medium (vgl. Abbildung 4.8). Der Reflexionsfaktor R und der Transmissionsfaktor T beeinflussen hierbei maßgeblich das Verhalten der Schallwelle in der Grenzschicht.

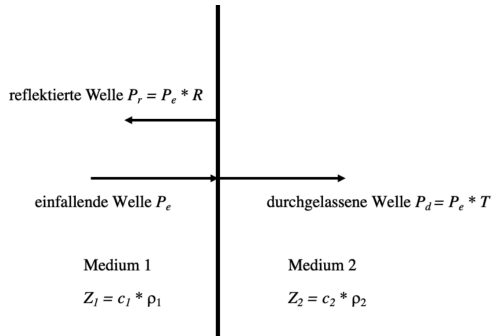


Abbildung 4.8: Idealisiertes Grenzschichtverhalten bei einem senkrechten Einfall. (Nach [97])

Bei diesem Fall beschreibt der Reflexionsfaktor den reflektierten Anteil der Welle. Der durch die Grenzschicht transmittierende Anteil der Welle wird Transmissionsfaktor genannt. Innerhalb dieses Phänomens beschreibt Z , bestehend aus der Schallgeschwindigkeit c_i und der spezifischen Dichte ρ_i des jeweiligen Materials, den Schallwiderstand. [97]

Die Anordnung der Medien und Größen von Z_1 und Z_2 können einen positiven oder negativen Einfluss auf R haben und führen zu einem T größer oder kleiner gleich dem Grenzwert 1. Bei einem identischen Schallwellenwiderstand ($Z_1 = Z_2$ bei gleichen Materialien), ist $T = 1$ und somit kann der Schall unbehindert die Grenzfläche überschreiten und es findet keine Reflexion ($R = 0$) statt. [97]

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.6)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4.7)$$

$$Z_i = c_i \cdot \rho_i \quad (4.8)$$

$$1 + R = T \quad (4.9)$$

mit: R Reflexionsfaktor $[-]$

T Transmissionsfaktor $[-]$

c_i Schallgeschwindigkeit $[m/s]$

Z Schallwiderstand $[Ns/m^3]$

ρ_i Dichte $[kg/m^3]$

Mit einem Rechenbeispiel, basierend auf den Formeln 4.6, soll im folgenden das Reflexions- und Transmissionsverhalten beim Grenzschnittübergang zwischen unterschiedlichen Materialien dargelegt werden. Tabelle 4.1 führt die für die Berechnung verwendeten Werte auf.

Tabelle 4.1: Dichte und spezifische Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle der genutzten Materialien.

Material	Dichte ρ [kg/m^3]	Schallgeschwindigkeit Longitudinalwelle c_L [m/s]
Luft (Standardbedingungen)	1,184	330
Aluminium (legierungsabhängig)	2700 – 2800	6250 – 6350
Kupfer	8900	4660
Stahl	7800	5850
Edelstahl (legierungsabhängig)	7670 – 8030	5660 – 7390

Hierbei wird der Reflexionsfaktor R an einem Grenzschnittübergang Stahl zu Luft berechnet, um einen mit Luft gefüllten Fehlerraum eines Gusswerkstücks aus Stahl zu simulieren.

$$Z_{\text{Stahl}} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5850 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 45630000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \quad (4.10)$$

$$Z_{\text{Luft}} = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 330 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 391 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \quad (4.11)$$

$$R_{\text{Stahl/Luft}} = \frac{(391 - 45630000) \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}}{(391 + 45630000) \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}} = -0,9999 \quad (4.12)$$

Das Ergebnis $-0,9999$ entspricht einem R -Faktor von 99,99%. Somit wird annähernd die gesamte Schallwelle reflektiert. Bei einem Auftreffen einer Körperschallwelle senkrecht auf mehrere parallele Grenzschnittübergänge, vervielfacht sich der beschriebene Effekt und es entsteht eine mehrfache Hin- und Her-Reflexion der Schallwelle. Das führt dazu, dass die Transmission (in positiver x -Richtung) sowie die Reflexion (in negativer x -Richtung) in mehreren Phasen mit abnehmender Intensität abläuft [108]. Dieses Phänomen, als Dreischichten-Problem bekannt, resultiert aus der mathematisch begründeten rekursiven Abfolge des Signaltransfers durch parallele Schichten bei mindestens zwei Grenzschnittübergängen. Für T eines in x -Richtung positiv wirkenden Körperschallsignals bedeutet das, dass der n -te Vorgang ab dem Grenzschnittübergang vom $(n-1)$ -ten Vorgang in negativer x -Richtung abhängig ist. [108]

Diese Faktoren sind bei der Umsetzung einer auf AE basierenden sensortechnologischen Anwendung zu beachten. Das grundlegende physikalische Verhalten der AE kann einen Einfluss auf den Erfolg und die Qualität der Messung und somit auf die aufgenommenen Daten nehmen.

4.3 Acoustic Emission Messtechnik

Die entstandenen AE-Signale werden durch einen AE-Sensor erfasst und mittels einer dazu-gehörigen Messkette verarbeitet. Eine vollständige AE-Messkette besteht im Allgemeinen aus einem Sensor, einem Verstärker (inklusive Filterung), einer Decoupling Box, einem A/D-Wandler und einer Auswerte-/Speichereinheit. Der allgemeine Aufbau und die innerhalb dieser Arbeit genutzten Teilkomponenten können Abbildung 4.9 entnommen werden.

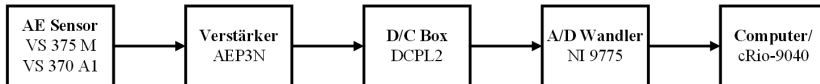


Abbildung 4.9: Skizze der genutzten AE-Messkette inklusive Einzelkomponenten.

Die in einem Festkörper entstehenden Wellen werden durch die Resonanzantwort des Sensors aufgenommen. Im Verstärker wird das elektrische Rohsignal verstärkt. Die D/C Box entkoppelt das Signal und sorgt für die Energieversorgung der Messkette. Darauf folgt ein A/D-Wandler, der das wert- und zeitkontinuierliche Signal durch Quantisierung und Diskretisierung in ein digitales Signal überführt. Der A/D Wandler (vgl. Abbildung 4.9) konvertiert die analogen Eingangssignale in digitale Daten. Zur Analog-Digital-Wandlung ist eine definierte Zeitspanne (Abtastintervall T_s) notwendig. [78]

Die in der Messtechnik als Abtastfrequenz f_s bezeichnete Größe errechnet sich durch die Kehrwertbildung des Abtastintervalls [109]. Damit eine Sinusschwingung aus einem digitalisierten Signal wieder verlustfrei und vollständig rekonstruiert werden kann, muss gemäß dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem die Abtastfrequenz f_s mindestens doppelt so groß wie die im Messsignal enthaltene maximale Frequenz f_{max} gewählt werden. Zusammenfassend ergibt sich in [110] und [109] ein formelmäßiger Zusammenhang. Abschließend folgt die Auswerte-/Speichereinheit. [77] [80]

Die Einsatzumgebung des Tiefseebergbaus stellt, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, gesonderte Anforderungen an Messsysteme, die in dieser Umgebung arbeiten sollen. Dies trifft auch auf die Messtechnik der AE-gestützten Inline-Analytik zu. Dementsprechend wurden die einzelnen Komponenten mit Hilfe einer eigenständig konstruierten 3D-Messbox platzsparend und modular aufgebaut. Abbildung 4.10 zeigt das finale System.

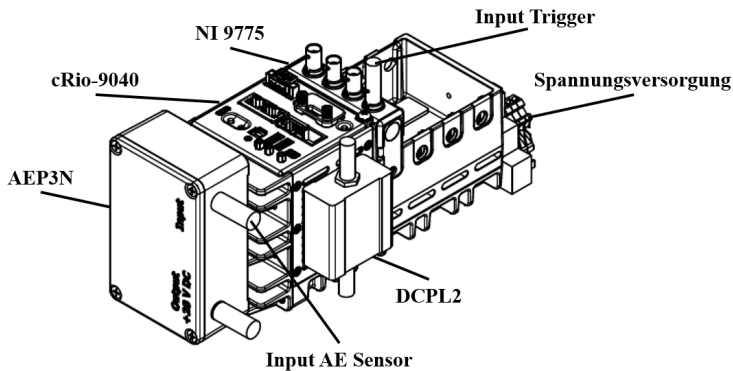


Abbildung 4.10: Skizze der genutzten Messtechnik.

Dieses modulare System wurde möglichst platzsparend und flexibel anpassbar umgesetzt. Durch die Integration der so umgesetzten Messtechnik in einen im Zuge der Arbeit entworfenen (Abbildung 4.11) und von der Firma Jatec angefertigten Drucktank wird der Einsatz dieser sensiblen Technologie für die Tiefsee ermöglicht.

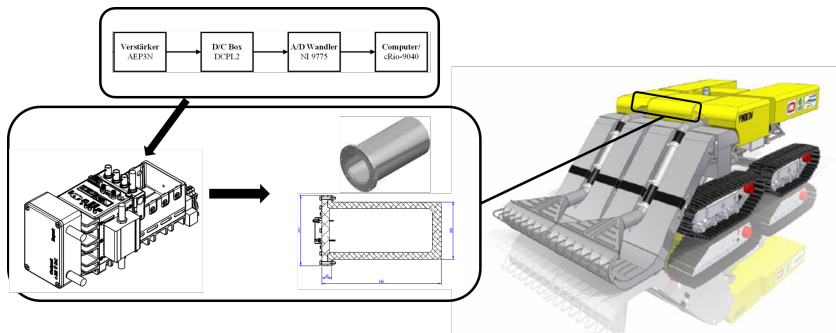


Abbildung 4.11: Skizze der genutzten Messtechnik und Integration in die MBM. (Angelehnt an [11])

Der Drucktank mit der Messtechnik wird zentral innerhalb der MBM verbaut und mit der sonstigen elektronischen Technik der MBM verbunden. So ist ein Austausch der AE-Daten und der Anschluss an die elektrische Versorgung mit dem zentralen System möglich. Auch kann die Messbox direkt mit den AE-Sensoren verbunden werden. Hierzu werden druckfeste, tiefseefähige Steckverbindungen und Kabel genutzt.

4.3.1 Funktionsprinzip AE-Sensor

AE-Sensoren gibt es in einer umfangreichen Anzahl an Ausführungen. Dabei wird je nach Anwendungsfall eine Vielzahl unterschiedlicher Einflusskriterien für die Auswahl bewertet [111]. Innerhalb dieser Arbeit sind die Auswahlkriterien durch den Anwendungsfall eingeschränkt (vgl. Kapitel 2.3.1). Durch die Anforderungen des speziellen Einsatzortes an die Größe, Empfindlichkeit, Oberflächeninteraktion sowie der Umwelt- und Materialverträglichkeit wurden die Sensoren VS375-M und VS370-A1 der Firma Vallen genutzt. [112] [113]

Hinzu kommt, dass die gewählten Sensoren bei vorgelagerten oder ergänzenden Untersuchungen baugleich waren und somit Synergien erzeugt werden. Übergeordnet werden AE-Sensoren in ihrem Funktionsprinzip unterschieden. Neben den für diese Arbeit genutzten piezoelektrischen Sensoren (vgl. Abbildung 4.12) werden in der Literatur noch weitere Ausführungen, wie laser- und faseroptische Sensoren, beschrieben. [73]

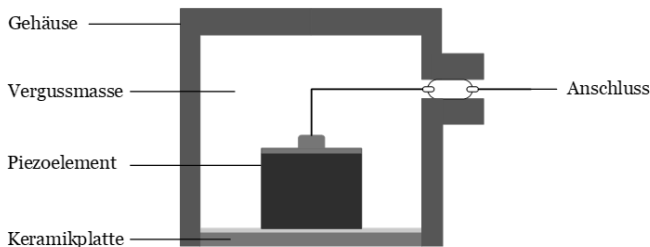


Abbildung 4.12: Skizze eines piezoelektrischen AE-Sensor.

Die Funktionsweise der Piezoelektrizität basiert darauf, dass durch das Auftreffen von elastischen Wellen auf die keramische Verschleißplatte im Inneren des Sensors eine Kraft auf das integrierte piezoelektrische Element ausgeübt wird (vgl. Abbildung 4.12). Die Kraft resultiert in einer Auslenkung des Kristallgitters im pm -Bereich und führt damit zur einer lokalen Deformation des Kristallgitters. Als Folge der Deformation entsteht eine Ladungsverschiebung, deren Differenz als elektrische Spannung erfasst werden kann [114]. Bei äußerst empfindlichen Sensoren sorgen bereits Bewegungen von $0,1\ pm$ für Signalspannungen im μV -Bereich. Piezoelektrische AE-Sensoren arbeiten üblicherweise im Bereich ihrer Eigenfrequenz. [78]

Aus diesem Grund ist bei der Wahl des Sensors und seiner Empfindlichkeit die spezifische Frequenzgangkurve zu berücksichtigen, um eine qualitativ hochwertige Erfassung charakteristischer AE-Signale zu gewährleisten [73]. Die Frequenzgangkurve jedes Sensors wird durch eine Kalibrierung bei einer Belastung von $1\ \mu bar$ ermittelt und in Form von Bode-Diagrammen dokumentiert. [73]

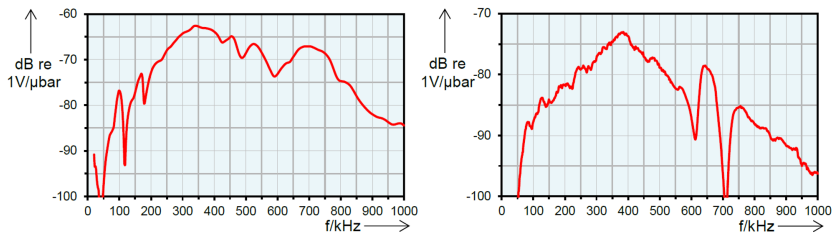


Abbildung 4.13: Bode-Diagramme der eingesetzten AE-Sensoren. links: VS375-M; rechts: VS370-A1. (Nach [112] [113])

In Abbildung 4.13 werden die Bode-Diagramme der eingesetzten Sensoren exemplarisch dargestellt. Dabei wird die Amplitude über die angeregte Frequenz aufgetragen. Der vom Hersteller empfohlene Frequenzbereich der Sensoren liegt zwischen 250 und 700 kHz. Dabei beträgt der optimale Frequenzbereich des VS375-M 375 kHz und des VS370-A1 370 kHz. Die Grundlagenversuche wurden mit dem VS375-M durchgeführt, um auf die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen aufzubauen und der VS370-A1 ergänzt diese Untersuchungen, da aufgrund des Einsatzes in der Tiefsee ein miniaturisierter Sensor genutzt werden muss und dieser im Frequenzbereich dem VS375-M am ehesten entspricht. [112] [113]

In der Literatur wird beschrieben, dass bei der Applikation eines AE-Sensors die Messstelle gereinigt und mechanisch bearbeitet werden soll, um eine möglichst verlustfreie Wellenübertragung zu gewährleisten. Bernet beschreibt umfangreich die Einflussparameter auf eine AE-Messstelle und wie eine optimale Kopplung zwischen einem Sensor und einem Messkörper umzusetzen ist. Dabei spielt auch die Nutzung eines Kopplungsmittel zur Verbesserung der Signalübertragung eine Rolle. Bernet nimmt hierfür umfangreiche Untersuchungen vor und beschreibt das auf Betonit basierende Koppelmedium Kroon Oil Copper+Plus als eine valide Möglichkeit. Dementsprechend wird innerhalb dieser Arbeit die Auswahl und Anwendung wie in [78] beschrieben umgesetzt. [115] [78] [116]

4.3.2 Die Messdatenerfassung

Trotz der erhöhten Sensibilität von piezoelektrischen Sensoren erfordert die weitere Erfassung und Verarbeitung eine Verstärkung im *mV*-Bereich. Eine Verstärkung kann direkt in den Sensor verbaut werden oder ist wie im zuvor beschriebenen Fall (vgl. Kapitel 4.3) als ein eigener Bestandteil der Messkette umsetzbar. Die Verstärkung ist in diesem Fall einstellbar und die Umrechnung wird in der Literatur mittels einer logarithmischen Funktion beschrieben. [95]

In der Realität werden Signale aber nicht vollständig verzerrungsfrei in einem Frequenzbereich übertragen und eine ideale Filterung ist daher nicht möglich (vgl. [117]). Zur Sicherstellung der verlustfreien Rekonstruktion ist demnach eine Überabtastung, beispielsweise mit 10-facher Abtastfrequenz, sinnvoll. Bezogen auf die Frequenzgangkurve (vgl. Abbildung 4.13) eines AE-Sensors sind zur Aufnahme von AE-Daten A/D Wandler mit entsprechend hohen Abtastraten notwendig. Für die durchgeführten Versuchsreihen wurden Analogeingangsmodule des Typs NI 9775 der Firma National Instruments eingesetzt. Diese Module können vier Kanäle mit einer maximalen Abtaste von 1 MHz und einer Auflösung von 14 bit simultan abtasten [118]. Als Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) wird der cRio-9040 Mikrocontroller ebenfalls von der Firma National Instruments genutzt.

4.4 Analyse der Messdaten

Bei der Anwendung von AE zur Inline-Analytik von kontinuierlichen Prozessen entstehen über das aufgezeichnete Zeitsignal und einer Abtaste von 1 MHz eine umfangreiche Anzahl an Datenpunkten. Hinzu kommt, dass bei der Nutzung für die Charakterisierung von trockenen und besonders von hydraulischen Massenströmen eine große Anzahl von Schallemissionsereignissen vorhanden sind. Aufgrund der großen Datenmengen und der Vielzahl an möglichen relevanten Datenpunkten ist eine manuelle Auswertung der Daten aufwendig oder unmöglich.

Daraus folgt, dass eine weitestgehend automatisierte Methode zur Auswertung der Messdaten umgesetzt werden muss. Im Folgenden werden verschiedene Methoden und Möglichkeiten der Datenverarbeitung im Fachbereich der statistischen Signalauswertung von kontinuierlichen Schwingungssignalen und von Einzelphänomen vorgestellt. [89] [12]

4.4.1 Vorgehen bei der Intervallanalyse

Die Intervallanalyse ist ein Basis-Verfahren zur Analyse von kontinuierlichen AE-Signalen. Ein wichtiges Merkmal dabei ist, dass die genutzte Intervallgröße über die durchschnittliche Burstdauer hinaus geht. Das Vorgehen bei der Intervallanalyse ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

Das AE-Signal wird in gleichbleibende Intervalle I über den gesamten Verlauf des Signals aufgeteilt. Somit werden I_n Intervalle erstellt. Für das jeweilige Intervall werden Kennwerte berechnet und in Ergebnismatrizen festgehalten. Die Intervallgröße ist von unterschiedlichen Faktoren wie zum Beispiel Häufigkeit von spezifischen oder unspezifischen Ereignissen,

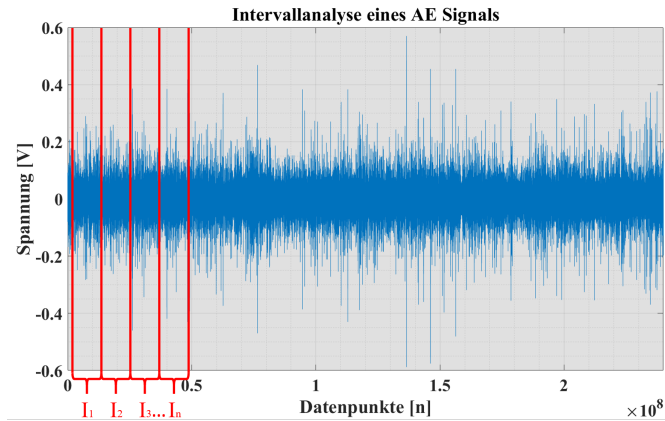


Abbildung 4.14: Beispielhafte Durchführung der Intervallanalyse.

zeitlicher Wechsel von unterschiedlichen Zuständen und Rechenkapazität der Auswerteeinheit abhängig.

Innerhalb der statistischen Analyse, wie sie auch bei der Intervallanalyse vorliegt, besteht die Möglichkeit zur Analyse des AE-Signals eine Vielzahl an Parameter zu berechnen, die in darauf folgenden Schritten zu einer weiteren Analyse genutzt werden. Die unterschiedlichen Kennwerte werden über eine durch die Intervallanalyse definierte Anzahl n an Datenpunkten und über alle Intervalle berechnet. Dabei wird in eine gleitende und blockweise Berechnung unterschieden. Bei einer genutzten Abtastrate des AE-Signals von $f_s = 1\text{MHz}$ ergeben sich Fenstergrößen von 10.000 bis 100.000 Datenpunkten. Die folgend dargestellten und genutzten Kennwerte entsprechen dem Stand der Technik für die Auswertung von AE-Signalen in der Materialstromcharakterisierung und werden in der ausgewerteten Literatur umfangreich dargestellt. [110] [119] [77] [91] [12]

- Maximum
- Root-Main-Square (RMS)
- Standardabweichung
- Kurtosis-Wert
- Crest-Wert
- Variance
- Peak-to-Peak
- MARSE

4.4.2 Vorgehen der Burstdetektion

Die Burstanalyse kann in zwei Varianten erfolgen - mit oder ohne erweiterter Kennwertberechnung. Weniger komplex ist die Variante ohne erweiterte Kennwertberechnung. Hier werden lediglich die Bursts detektiert und die Maximalamplitude bestimmt. Im Ergebnis kann für einen gesamten Versuch der Verlauf der Maximalamplitude und die Anzahl der Bursts pro Zeiteinheit (Ereignisdichte) über die Zeit dargestellt werden. Auch kann die Burstanzahl als absolute Summenhäufigkeit über die Zeit ausgewertet werden. [78]

Im Gegensatz zur Intervallanalyse sind bei der Burstanalyse mit erweiterter Kennwertberechnung die untersuchten Intervalle durch Burstbeginn und -ende definiert (vgl. Abbildung 4.15). Durch unterschiedliche lange Bursts, ergeben sich unterschiedlich lange statt gleichlange Intervalle für die Berechnung von Kennwerten. [78]

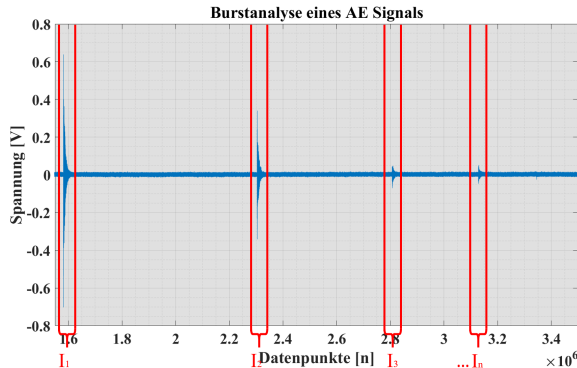


Abbildung 4.15: Beispielhafte Durchführung der Burstdetektion.

Zur Durchführung der erweiterten Burstanalyse müssen im ersten Schritt die Bursts inklusive deren Start- und Endpunkte detektiert und damit die Auswerteintervalle definiert werden. Es gibt verschiedene Verfahren zur Burstdetektion. Die Grundlage zu dieser Arbeit legen die von Bernet und Boos entwickelten, genutzten und beschriebenen Verfahren. [78] [77]

- Grenzwertdetektion
- Fensterdetektion
- Frequenzbereichsdetektion
- Kantendetektion
- adaptive Kantendetektion

Grenzwertdetektion - Die Grenzwertdetektion ist das am häufigsten genutzte und bezogen auf den Rechenaufwand einfachste Verfahren. Hierbei wird im zeitlichen AE-Signal nach Bereichen gesucht, die sich vom Prozessrauschen abheben. Hierzu wird ein Grenzwert definiert, der als Marker für die Identifizierung von transienten Signalen genutzt wird. Darauf folgend wird der Burst in die in der Literatur (vgl. [120] [78]) beschriebenen Zeitintervalle Hit Definition Time (HDT) (Dauer des Bursts) und Hit Lockout Time (HLT) (zeitliche Distanz bis ein neuer Burst erkannt werden kann) unterteilt. Aufbauend darauf können unterschiedliche Parameter des transienten Signals bestimmt werden. [120] [78]

Fensterdetektion - Innerhalb der Fensterdetektion wird sich einer Sonderform der Intervallanalyse bedient. Über das kontinuierliche Signal gleitet ein Fenster mit im Vorhinein definierter Größe. Innerhalb dieser Fenster werden die Messwerte auf Maxima untersucht. Bestimmte lokale Maxima, werden mit den Maxima des vorherigen und des folgenden Fensters verglichen. Wenn das lokale Maxima mindestens gleich groß ist wie in den benachbarten Fenstern werden die Werte mit einem Grenzwert abgeglichen. Sollte dieser überschritten werden, gilt der Fensterbereich als detektiert. Darauf folgend werden Anfang und Ende des vermeintlich erkannten Bursts über einen Grenzwertabgleich festgelegt. Aufgrund dessen, dass der Umfang des transienten Signals so nur abgeschätzt werden kann, ist diese Form der Bursterkennung nicht in jedem Anwendungsfall sinnvoll. [78] [77]

Frequenzbereichsdetektion - Die Bestimmung von Bursts über die Frequenzbereichsdetektion basiert auf der deutlichen Differenz im Amplitudenspektrum von Bursts zu dem Prozessrauschen. Für die Nutzung dieses Verfahrens können bis zu drei Frequenzbereiche definiert werden, die im Folgenden als Grenzwerte fungieren. Somit wird das AE-Signal erneut durch ein Intervallfenster abgetastet und in jedem Fenster wird das vorhandene Amplitudenspektrum berechnet. Übersteigt das berechnete Amplitudenspektrum die Grenzwerte wird in dem jeweiligen Fenster ein Burst definiert. Anfang und Ende des Bursts werden über die Intervalllänge bestimmt und dementsprechend kann es zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung kommen. [78]

Kantendetektion - Ein weiteres von Boos entwickeltes Verfahren zur Bursterkennung ist die Kantendetektion [77]. Die Kantendetektion basiert darauf, dass sich Bursts im zeitlichen AE-Signal vom Grundrauschen zumeist unterscheiden. Hinzu kommt, dass Bursts häufig einen deutlichen Amplitudenanstieg aufweisen. Dieser Amplitudenanstieg soll erneut durch ein gleitendes Fenster detektiert werden. Innerhalb jedes so definierten Intervalls wird die Steigung der Messwerte berechnet. Übersteigt die Steigung einen vordefinierten Grenzwert wird das Vorhandensein eines Bursts definiert. [77]

Adaptive Kantendetektion - Basierend auf der Kantendetektion von Boos hat Bernet die adaptive Kantendetektion entwickelt [78]. Dieses weiterentwickelte Verfahren optimiert

in drei Schritten (1. Detektion möglicher Burst, 2. Bestimmung Burstanfang, 3. Bestimmung Burstende) die zuvor beschriebene Kantendetektion. Dadurch sollen Bursts ohne vorgelagerte Parametrisierung und deutlich genauer aus dem zeitlichen AE-Signal extrahiert werden. [78]

Auf der Grundlage dieser Möglichkeiten wurde eine auf den Anwendungsfall angepasste Umsetzung der Burstdetektion angewandt. Innerhalb der Grundlagenversuche wurden im großen Umfang transiente AE-Signale untersucht. Diese Einzelphänomene wurden über eine Grenzwert Burstdetektion lokalisiert und aus dem kontinuierlichen Schwingungssignal isoliert. Der isolierte Burst wird durch eine zweite Grenzwertdetektion erneut überprüft und bei Überschreitung des Grenzwertes bestätigt, oder bei Widerlegung verworfen.

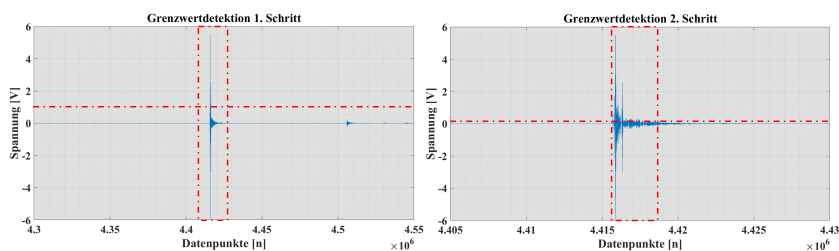


Abbildung 4.16: Beispielhafte Durchführung der angewendeten Burstdetektion.

Über den bestätigten Burst wird ein 2. definiertes Fenster gelegt (vgl. Abbildung 4.16), um möglichst genau das transiente Signal extrahieren zu können. Die weiteren Verfahrensschritte, wie die in Kapitel 4.4.1 erhobenen statistischen Parameter, beziehen sich dann nur auf das normierte, im Fenster vorhandene transiente Signal.

4.4.3 Vorgehen der Frequenzanalyse

Die Analyse von AE-Signalen lässt neben der statistischen Analyse durch die zuvor beschriebenen Kennwerte eine frequenzbasierte Analyse zu. Dabei kann das AE-Signal in den Zeit- und Frequenzbereich aufgelöst werden. So wird eine detaillierte Analyse und die Erfassung rascher zeitlicher Veränderungen spektraler Verteilungen möglich. Insbesondere trifft das auf die Analyse von Signalen mit verschiedenen Wellenarten bzw. Mischwellen (Lambwellen) zu. Darüber können Informationen über das im AE-Signal angeregte Frequenzspektrum erzeugt und Rückschlüsse auf die Energiedichte zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb spezifischer Frequenzen gezogen werden. [121]

Eine Möglichkeit der Überführung des zeitdiskreten Schwingungssignales in die vorhandenen Frequenzanteile ist die Berechnung einer diskreten Fourier Transformation (DFT).

Dabei kann eine Weiterentwicklung der klassischen Fourier Transformation, die Fast Fourier Transformation (FFT), genutzt werden. [122]

Für die Nutzung der Fourier Transformation müssen zwei grundsätzliche Annahmen getroffen werden. Zum einen wird angenommen, dass die Darstellung eines periodischen Signals (Frequenz f_0) als eine Linearkombination gleichmäßiger Sinus- und Cosinusfunktionen möglich ist. Zum anderen wird vorausgesetzt, dass das vorhandene Signal in begrenzt viele Teilintervalle zerteilt werden kann und einen dauerhaften monotonen Signalverlauf aufweist. [122] [77]

Schlussendlich wird so die Anzahl der Datenpunkte n in n Spektrallinien umgewandelt. Der formeltechnische Nachweis dieses Algorithmus ist in [122] und [77] durchgeführt. Die Überführung in Spektrallinien ist exemplarisch in Abbildung 4.17 dargestellt.

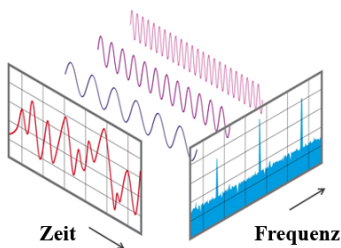


Abbildung 4.17: Beispielhafte Darstellung eines Schwingungssignals im Zeit- und Frequenzbereich. (Nach [123])

Die Besonderheit der schnellen Transformation ist, dass die Anzahl der abgetasteten Werte pro Schrittweite (vergleichbar mit Intervallen) immer weiter halbiert werden kann bis folglich nur noch zwei Werte verbleiben. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die Anzahl der Elemente innerhalb einer Schrittweite einem ganzzahligen Vielfachen von 2 entsprechen. Durch dieses Vorgehen kommt es zu einer Verringerung des Rechen- und somit des Zeitaufwandes. [124]

Die Berechnung der FFT über das in einem Fenster definierte transiente AE-Signal ermöglicht neben der Analyse des Frequenzmusters die Nutzung weiterer Kennwerte zur Analyse der Messdaten. Hierbei handelt es sich um

- angeregte Frequenzen
- Schwerpunktwellenlänge (engl. Spectral Centroid)
- Schwerpunktwellenlänge der maximalen Magnitude

Schwerpunktwellenlänge - Die Schwerpunktwellenlänge wird genutzt um das angeregte Frequenzspektrum zu charakterisieren. Durch die Berechnung dieses Parameters wird das arithmetische Mittel der Wellenlänge in einem definierten Intervall dargestellt. Dieser Kennwert wird über das gesamte, im Intervall abgegrenzte, Frequenzspektrum erhoben. [125]

Schwerpunktwellenlänge der Maximalamplitude - Analog zu dem Vorgehen zur Berechnung der Schwerpunktwellenlänge wird die Schwerpunktwellenlänge des maximal angeregten Frequenzbandes berechnet. Hierfür wird das Intervall nicht über den gesamten ausgeschnittenen Burst gelegt, sondern nur über die maximal angeregten Frequenzen. So können die am intensivsten angeregten Frequenzen des jeweiligen Bursts gesondert dargestellt werden und das arithmetische Mittel dieser wird als Kennwert für die Analyse der Versuche genutzt.

Die dargestellten Möglichkeiten der Datenverarbeitung und Analyse für AE-Signale werden im Folgenden bei der Auswertung und Interpretation der Praxisversuche genutzt. Es wird bei den Darstellungen exemplarisch auf einzelne beispielhafte Ergebnisse zurückgegriffen, die aber stellvertretend für die vollständige Auswertung genutzt werden können.

5 Übertragungsverhalten von Acoustic Emission bei Materialschichtübergängen

Die Nutzung der AET in der Tiefsee kombiniert die Anforderungen der Inline-Anwendung eines Messverfahrens, die Entscheidung für eine passive Körperschall-Sensortechnologie und die physikalischen Besonderheiten des Arbeitsumfeldes des Tiefseebergbaus. Zur Erfüllung der in Kapitel 2.5 definierten Anforderungen muss ein spezielles Sensorgehäuse bei der Anwendung der AE-Messtechnik genutzt werden. Anders als bei vergleichbaren Umsetzungen der AET (vgl. [78] [12] [66]) ist bei der vorliegenden Anwendung eine weitere Materialschicht zwischen Sensor und Körperschallquelle vorhanden.

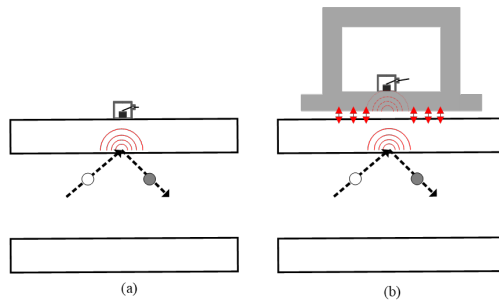


Abbildung 5.1: Problemstellung bei der Anwendung eines Sensorgehäuses für die Tiefsee (b) im Vergleich zur standardisierten Anwendung (a).

In Abbildung 5.1 ist der Unterschied zwischen einer häufig in der Literatur beschriebenen Anwendung einer körperschallbasierten Sensortechnologie (a) und der hinzukommenden Materialschicht (b) bei der Anwendung mit Sensorgehäuse für die Tiefsee aufgezeigt. Diese Besonderheit muss bezüglich der Einflussnahme auf die Anwendung der Messtechnik gesondert betrachtet werden.

Für die Konstruktion und Erarbeitung einer bestmöglichen AE-Messstelle für den Einsatz in der Tiefsee wurde ein standardisierter DIN-Norm Test durchgeführt [126]. Dabei wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen, für die Konstruktion in Frage kommenden Materialien in der Form von Platten untersucht und auf ihre Eignung getestet. Hierfür wurde mittels eines

definierten induzierten Signals eine Körperwelle erzeugt. Ziel war es, das translatorische Verhalten und die Dämpfung der Körperwelle (vgl. Kapitel 4.2.3) in den jeweils genutzten Platten zu untersuchen.

In einem weiteren Schritt wurden ausgewählte Platten für ein 2-Schicht-Modell kombiniert, um die Grenzschnittübergänge, die bei der Konstruktion einer AE-Messstelle für die Tiefsee entstehen, erneut auf das Verhalten der Körperwelle und den dissipativen Einfluss des Grenzschnittüberganges zu untersuchen. Validiert werden die Ergebnisse über Realkornuntersuchungen innerhalb eines Kugelfalltest (DIN-Norm Tests [127]), um sich der Realanwendung anzunähern. Als Ergebnis soll eine Materialkombination, die eine bestmögliche AE-Messstelle für den Einsatz definiert und ein Konzept für die Umsetzung der Messstelle aufgezeigt werden.

5.1 Versuchsaufbau der Plattentests im Technikum

Die Versuche zur Ermittlung der materialspezifischen Dämpfung der Prüfplatten bzw. der Grenzschnittübergänge und probenkörperspezifischen AE-Wellen wurden in den Räumlichkeiten der Zentralwerkstatt der Fachgruppe für Rohstoffe- und Entsorgungstechniken der RWTH Aachen durchgeführt. Das Versuchsfeld weist eine konstante Temperatur von 18 °C auf. Der Versuchsstand wurde erhöht errichtet und insgesamt stand eine Fläche von 1600x1200 mm zur Verfügung. Die Platten wurden auf 4 Auflagern positioniert, um ein widerstandsloses Schwingen zu ermöglichen.

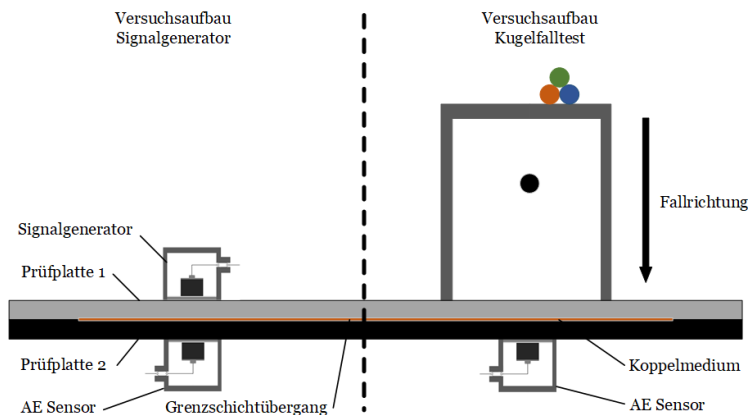


Abbildung 5.2: Grafische Darstellung der Plattentests.

Das linke Segment des in Abbildung 5.2 dargestellten Aufbaus, stellt den Signalgenerator Test und die rechte Seite den Kugelfallversuch dar. Bei der Versuchsdurchführung der Plattentests mit einer Kombination von zwei Prüfplatten wird die Kopplung durch das Auftragen von Kupferpaste (Kroon Oil Copper+Plus, vgl. Kapitel 4.3.1) unterstützt. Für das Ausgleichen von Unebenheiten und zur besseren Signalübertragung werden jeweils 10 ml im Zentrum der beiden Kontaktseiten der jeweiligen Plattenkombination aufgebracht.

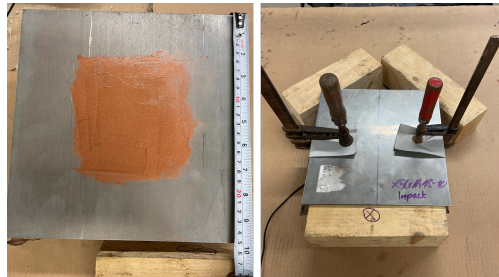


Abbildung 5.3: Aufbau der Plattentests.

Mittels Schraubzwingen wurde zentral an den Außenkanten der Prüfplatten eine Anpresskraft von 800 - 1000 N je Schraubzwinge erbracht. Zur genauen Orientierung und der Gewährleistung der gleichbleibenden Reproduzierbarkeit wurden definierte Markierungsmuster aufgetragen.

5.1.1 Vorstellung der Testverfahren

Quantitative wissenschaftliche Testverfahren sind auf eine Standardisierung sowie Kalibrierung angewiesen. Dabei ist eine Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung zwingend notwendig. Eine aus der DIN EN 1330-9 bekannte Quelle für künstliche AE-Signale stellt der Hsu-Nielsen-Test (auch Bleistiftminenbruchtest) dar. Bei diesem Testverfahren zerbricht eine definierte Bleistiftmine ($d = 0,5\text{mm}$, $l = 3\text{mm}$ und $H = 2H$) auf der Oberfläche des Prüfobjektes. Dabei wird ruckartig eine Verzerrungsenergie freigesetzt [126]. Durch die manuelle Handhabung des Bleistiftminenbruchs kann es bei der wiederholten Durchführung dieses Testverfahrens zu minimalen Abweichungen kommen. Das kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen und stellt so eine unsichere Variable innerhalb dieses Testverfahrens dar. [124]

Zur Validierung der Ergebnisse aus dem Hsu-Nielsen-Test wird auf zwei weitere in der Literatur beschriebene Verfahren bei der Durchführung der Grundlagenversuche zurückgegriffen. Im Folgenden wird auf den Signalgenerator- und Kugelfalltest eingegangen.

Testkonzept Signalgenerator - Die Erzeugung von künstlichen reproduzierbaren AE-Signalen basiert auf dem piezoelektrischen Prinzip. Der im Projekt genutzte AE-Sensor kann als Signalempfänger oder Signalgeber genutzt werden. Der Signalgenerator erzeugt ein definiertes elektrisches Signal, das durch einen angeschlossenen AE-Sensor von einem elektrischen Signal in eine mechanische Körperwelle übertragen und in den Prüfkörper induziert wird. Die induzierte Welle durchläuft den Prüfkörper und wird durch eine AE-Messstelle, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, erfasst. Für die Durchführung der Versuche wurde ein Waveform Generator 33500B von KEYSIGHT genutzt. Neben kontinuierlichen Signalen, wie einer Sinus- oder Rechteckschwingung, können auch einzelne transiente Signalphänomene erzeugt werden [128]. Innerhalb der hier dargelegten Versuchsdurchführung wurden ausschließlich einzelne Bursts erzeugt, um den Kontakt eines einzelnen Materials mit der zu untersuchenden Prüfplatte zu simulieren. Der Signalgenerator erzeugt eine kurzzeitige elektrische Spannung U , die mittels angeschlossenen piezoelektrischen Elements in ein AE-Eingangssignal umgewandelt wird. Dabei können unterschiedliche Einstellungen am Signalgenerator wie Frequenz f , Amplitude i und Burst-Periodendauer p vorgenommen werden. Durch die Möglichkeit das induzierte Eingangssignal definieren zu können, ist die auf den Prüfkörper einwirkende elastische Körperwelle bekannt. Die Differenz zwischen dem bekannten Eingangssignal und dem aufgenommenen Ausgangssignal kann folglich empirisch bestimmt werden. Aus der Differenz sollen Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Mechanismen der Signaldämpfung (Kapitel 4.2.3), insbesondere auf die material- und grenzschichtspezifische Dämpfung, getroffen werden.

Testkonzept Kugelfallversuch - Eine weitere genormte Methode, um künstliche transiente AE-Signale zu generieren, ist der Kugelfallversuch [78]. Hierbei werden, in Anlehnung an DIN 52338 und DIN 17368, vordefinierte Prüfkörper mittels einer speziellen Fallvorrichtung (vgl. Abbildung 5.2) aus einer konstanten Höhe auf eine definierte Prüfstelle der zu untersuchenden Platte fallen gelassen [127] [129]. Beim Aufprall des Prüfkörpers auf die Prüfplatte werden mittels des resultierenden Stoßvorganges (vgl. Kapitel 4.2) mikro- und makroskopische Risse sowie elastische und plastische Verformungen erzeugt. Verformungen bewirken im Prüfkörper eine Veränderung der Struktur, die in einer spezifischen transienten Körperwelle resultieren und folgend von der AE-Messtechnik auf der Prüfplatte erfasst werden kann. [71]

Die Kugelfallversuche sollen auf den Signalgenerator Test aufbauen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Testverfahren zu ermöglichen. Für diesen Zweck wurden alle Versuche mit einer idealen sphärischen Stahlkugel referenziert, die vergleichbare AE-Signale wie der Signalgenerator Test erzeugt. Dafür wurde die Kugelfallvorrichtung in einer Höhe von 54 cm befestigt. Aus dieser Höhe haben die Versuche mit den idealen sphärischen Stahlkugeln und den idealen Signalgenerator Tests die geringsten Abweichungen des Energieeintrages in

die Prüfplatte ergeben.

5.1.2 Versuchsdurchführung Testkonzept Signalgenerator

Zur Herausarbeitung der Dissipation an den Grenzschnittübergängen und somit dem Einfluss auf eine AE-Messstelle, wurden eine Vielzahl von Testplatten aus unterschiedlichen Materialien, die als eine mögliche Kontaktplatte in einem Förderrohr und für ein in der Tiefsee einsetzbares Sensorgehäuse nutzbar sind, untersucht. Hierzu zählen unterschiedliche Plastik-, Aluminium-, Stahl-, Edelstahl- und Titanmaterialien.

In vorgelagerten Testreihen und Forschungsarbeiten (in Anlehnung an [130] [131] [132]) wurde eine umfangreiche Simulation und Untersuchung dieser Plattenmöglichkeiten durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen wurde eine grobe Vorauswahl der für diese Arbeit genutzten Materialien getroffen. Diese sind folgend in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Materialien der Prüfplatten. (Nach [133] [134] [135] [136])

Material	Basis	Additive	HB	$\rho \frac{kg}{dm^3}$	$Rm \frac{N}{mm^2}$	$E \frac{N}{mm^2}$	μ
AlMg3	Al	Mg, Fe, Si, Mn, Cr, Zn, Ti, Cu	52	2,66	190-240	70000	0,3
V4A	Fe	Cr, Ni, Mo, Ti, Mn, Si, S	200	7,9	650	200	0,3
TitanGrade Ti 2		N, Fe, H	150	4,51	390	105	0,3
X5CrNi18-Fe 10		Cr, Ni, P, S	215	7,9	500-700	165-200	0,3

AlMg3 - Legierung zeichnet sich durch mittlere Festigkeit, gute Umformbarkeit und Schweißbarkeit, sowie gute Korrosionsbeständigkeit insbesondere gegen Meerwasser aus. Sie kann überall dort eingesetzt werden, wo keine besonderen Anforderungen an die mechanische Festigkeit gestellt werden. Hauptanwendungsgebiete sind der Behälter- und Apparatebau, der Maschinenbau, die chemische und die Lebensmittelindustrie sowie der Verpackungsmaschinenbau. [134]

V4A - gehört zu denn austenitischen Stählen. Im Gegensatz zu den häufig genutzten Duplex-Stählen (ferritisch-austenitisch) zeichnen sich die austenitischen Stähle vor allem durch ihre amagnetischen Eigenschaften aus. Durch das Verhindern von magnetischer oder elektrostatischer Aufladung kann dieser Werkstoff für Spezialanwendungen genutzt werden. Diese Eigenschaft hat eine positive Auswirkung auf die Umsetzung einer AE-Messstelle.

Ein weiterer Vorteil ist die hohe Beständigkeit gegen Wasser und der Korrosionsschutz, was zu einer hohen biologischen Sicherheit führt. Deshalb wird der Werkstoff unter anderem in der Medizintechnik, Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie in der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion eingesetzt. Häufig lösen rostfreie Stähle mit niedrigerer Kohlenstofflegierung titanstabilisierte Stähle wie V4A aber aufgrund der guten Verarbeitbarkeit, des hohen Korrosionsschutzes und der Unempfindlichkeit für extreme Temperaturen ab. [136]

TitanGrade2 - ist ein technisch reines Titanmaterial mit sehr guten mechanischen Eigenschaften und einer hohen Korrosionsbeständigkeit. Reintitan hat eine sehr gute Beständigkeit gegen Salzwasser sowie gegen verschiedene korrosive Medien. Aufgrund der hohen Affinität des Titans mit Sauerstoff zu reagieren, bildet sich auf der Oberfläche des Titans eine widerstandsfähige und fest anhaftende Oxidschicht. TitanGrade2 zeichnet sich durch sein geringes spezifisches Gewicht und gute mechanische Eigenschaften aus. [133]

X5CrNi18-10 - ist ein relativ weicher, nickelhaltiger, nicht ferromagnetischer austenitischer Stahl. Um das Material rostfrei und zunderfest zu halten, enthält es mindestens 13 % Chrom. Darüber hinaus hat der Werkstoff einen geringen Kohlenstoffgehalt und ist sehr korrosionsbeständig gegenüber natürlichen Umwelteinflüssen wie Wasser. Der Werkstoff hält hohen Temperaturbelastungen stand und ist leicht zu verarbeiten. Nach der Verarbeitung durch Schweißen sollte der Einsatz in Verbindung mit Wasser jedoch vermieden werden, was den konstruktiven Einsatz dieses Werkstoffs einschränkt. [135]

Für den idealisierten Signalgenerator Test wurde ein Burst mit einer Intensität von 7 V, einem Zyklus von $n = 2$, einer Frequenz von $f = 1\text{MHz}$ sowie einer Periodendauer von 10s in die Prüfplatte induziert. Jeder Signalgenerator Test wurde $n = 25$ Mal wiederholt. Diese Parametrisierung wurde auch für die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Simulation des Verhaltens von Lambwellen genutzt.

5.2 Ergebnisse der Plattentests

Aufgrund des empirischen Vorgehens bei der Versuchsdurchführung und Datenanalyse und der somit entstandenen großen Anzahl an Ergebnissen wird folgend ein Beispiel der Analyseergebnisse und des Vorgehens vorgestellt und darauf aufbauend auf die Gesamtergebnisse eingegangen.

Abbildung 5.4 visualisiert beispielhaft die Ergebnisse für die Versuchsdurchführung mit der Grundplatte AlMg3 und den 4 möglichen Kombinationen. Dabei werden jeweils die im Zeitsignal lokalisierten Bursts für die Erhebung der statistischen Kennwerte aufgezeigt und das angeregte Frequenzband der jeweiligen Bursts durch die FFT dargestellt. Für eine bessere

Visualisierung wurde über den Verlauf des Frequenzbandes eine Hüllkurve gelegt und für die Vergleichbarkeit der Spectral centroid eingefügt.

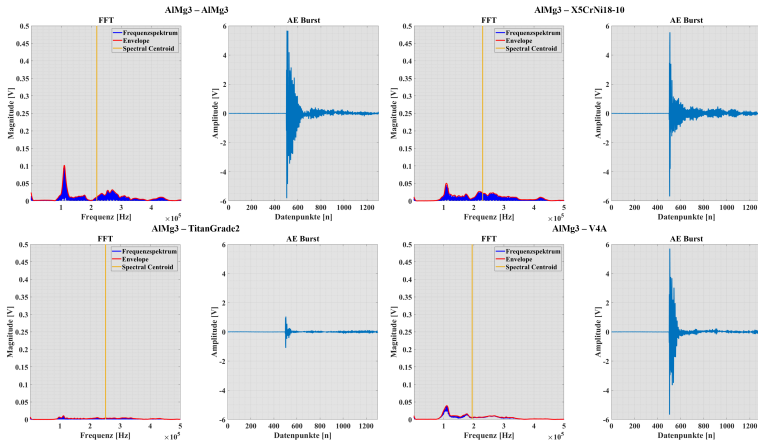


Abbildung 5.4: Beispielhaftes Ergebnis der Plattentests.

Schon bei dieser einfachen Visualisierung der Ergebnisse der Datenanalyse können Unterschiede sowohl im angeregten Frequenzband, als auch in der Intensität der angeregten Frequenzen erkannt werden. Für die Analyse und Interpretation aller Versuchsergebnisse wurden 4 ausschlaggebende Faktoren festgelegt (vgl. Abbildung 5.5).

Zum einen wurde der erreichte **Maximalwert** des erfassten AE-Signales mit dem Eingangssignal abgeglichen und innerhalb der Versuchsreihen verglichen. Dies ist ein Indikator für die Dämpfung der Wellenenergie durch die vorhandene Grenzschrift. Zum anderen wurde der Maximalwert nicht nur im statistischen Zeitintervall, sondern auch in dem durch die FFT übertragenden Frequenzbereich mittels **maximale Magnitude** betrachtet.

Des Weiteren wird die **Frequenz der Magnitude** genutzt und verglichen. Als vierter Indikator wird die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Kombinationen über die **Varianz des angeregten Frequenzbereiches** bei der Aufnahme der AE-Wellen genutzt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass je geringer die Varianz ist, desto stabiler ist der translatorische Übergang der Wellen durch den Grenzschriftübergang und somit die zu erwarteten Messergebnisse bei der Anwendung konstanter sind.

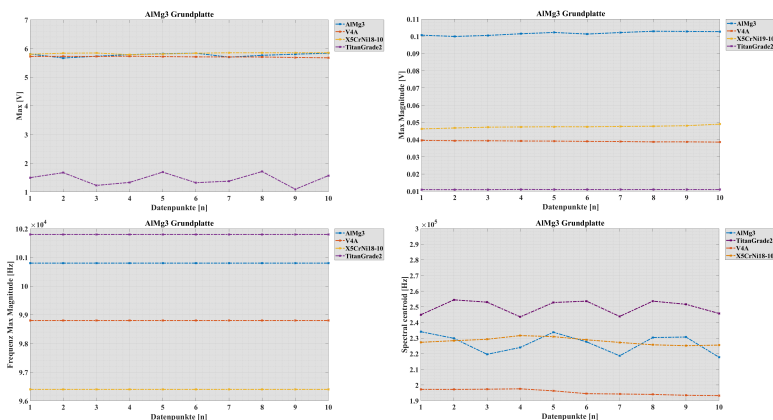


Abbildung 5.5: Analyseergebnisse des Plattentests am Beispiel AlMg3.

In Abbildung 5.5 sind die 4 beschriebenen Parameter für die Analyse der AlMg3 Platte als Grundplatte dargestellt. Es werden die jeweiligen Parameter der Prüfplattenmaterialien über die dargestellten Datenpunkte aufgezeigt. Anhand dieses Beispiels der Analyse ist zu erkennen, dass sich bei 3 von 4 Materialien die Maximalwerte (oben links) in einem ähnlichen Bereich befinden und eine Dämpfung von ungefähr 1 V durch den Grenzschichtübergang erfahren. TitanGrade2 hingegen wird um mehr als 4 V durch den Grenzschichtübergang gedämpft.

Der Verlauf der maximalen Magnitude (oben rechts) hingegen unterscheidet sich klarer zwischen den genutzten Materialien. Aber auch innerhalb dieses betrachteten Parameters erreicht die Kombination mit TitanGrade2 die geringsten Werte. Dahingegen scheint die Frequenzänderung bei auftretender Dissipation beim Übergang zwischen AlMg3 und TitanGrade2 am geringsten zu sein, da die Frequenz der Magnitude (unten links) am höchsten ist. Abschließend ist der Durchschnittswert des durch den Burst angeregten Frequenzbandes (Spectral centroid - unten rechts) dargestellt. Dieser wird auf die Varianz untersucht und hierbei empfiehlt sich die Kombination zwischen AlMg3 und V4A.

Das dem grafischen Beispiel der Analyse zugrunde liegende Vorgehen wurde auf alle möglichen Materialkombinationen angewendet. Zur Vereinfachung wurden in der folgenden Tabelle 5.2 die Ergebnisse des Maximalwertes, der maximalen Magnitude und der angeregten Frequenz der maximalen Magnitude als Durchschnittswert aufgeführt.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Plattentests.

Materialkombination	Max [V]	Max Magnitude [V]	Frequenz Magnitude [Hz]
AlMg3 AlMg3	5,7749	0,1019	100800
AlMg3 TitanGrade2	1,4502	0,011	99440
AlMg3 V4A	5,7099	0,039	98800
AlMg3 X5CrNi18-10	5,8312	0,0475	96400
TitanGrade2 TitanGrade2	1,6221	0,0249	101800
TitanGrade2 AlMg3	3,2246	0,0165	95400
TitanGrade2 V4A	5,6889	0,0466	97800
TitanGrade2 X5CrNi18-10	1,5018	0,0265	99600
V4A V4A	0,8645	0,0193	105800
V4A AlMg3	5,0311	0,0294	105000
V4A TitanGrade2	5,7758	0,0335	99440
V4A X5CrNi18-10	3,7441	0,0293	104000
X5CrNi18-10 X5CrNi18-10	3,2861	0,1114	97600
X5CrNi18-10 AlMg3	4,8996	0,0769	98436
X5CrNi18-10 V4A	0,7511	0,0118	101000
X5CrNi18-10 TitanGrade2	0,7617	0,0129	105200

Bei der Betrachtung aller Ergebnisse gibt es einige Material-Kombinationen, bei denen die Dämpfung der erreichten Maximalwerte unter 2 V liegt. Die Kombinationen aus zwei AlMg3 Materialschichten, aber auch aus AlMg3 - V4A, AlMg3 -X5CrNi18-10, Titangrade2 - V4A, V4A - AlMg3 und V4A - TitanGrade2 sind vielversprechende Optionen. Diese Kombinationen lieferten die höchsten Ergebniswerte (Max, Max Magnitude, Frequenz Magnitude - vgl. Tabelle 5.2). Schlussendlich wird die Varianz des angeregten Frequenzbereiches der Versuchsdurchführung (vgl. Abbildung 5.6) genutzt, um die besten Materialkombination zu validieren.

In Abbildung 5.6 wird mittels einer Box-Plot Darstellung die Verteilung der gemittelten angeregten Frequenzen (Spectral centroid) für die jeweiligen Materialkombinationen dargestellt.

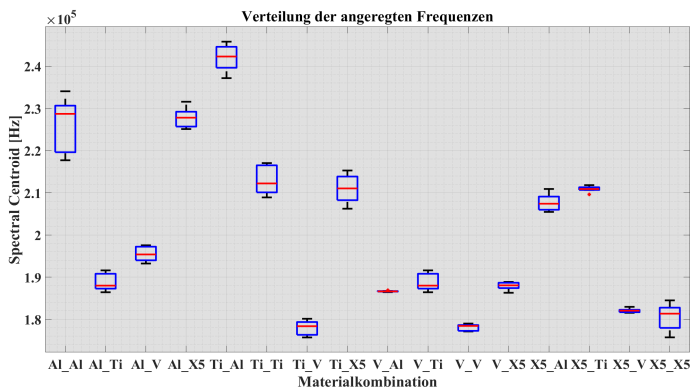


Abbildung 5.6: Verteilung der angeregten Frequenzbereiche im Box-Plot.

Hierbei weisen die Kombinationen aus X5CrNi18-10 - V4A, X5CrNi18-10 - TitanGrade2, V4A - X5CrNi18-10 und V4A - V4A die geringste Varianz auf. Bei dieser Validierung weist die Kombination von zwei AlMg3 Platten eine große Varianz mit dem Vorhandensein von deutlichen Extremwerten auf, was für einen Einsatz unter Realbedingungen zu deutlichen Messfehlern führen kann. Die zuvor als positiv bewerteten Materialkombinationen zeigen auch eine vergleichsweise geringe Varianz der Ergebnisse auf. Hervorzuheben sind hierbei die Kombination aus V4A und AlMg3 mit einer sehr geringen Varianz und die Kombination AlMg3 - V4A mit einer insgesamt vergleichsweise geringen Varianz und einer engen stabilen Abweichung um den Median. Auch bei der Dämpfung der Körperwellen weisen diese beiden Kombinationen vergleichbare Eigenschaften auf und kommen bezogen auf die Signalübertragung, Dissipation und der Grenzschichtübergänge beide in Frage.

Das hier dargestellte Ergebnis soll in einem weiteren Versuch validiert werden. Hierfür wurde der Kugelfallversuch genutzt (vgl. Kapitel 5.1.1). Um sich der Realanwendung anzunähern, wurden für die Versuchsdurchführung Realkörner genutzt und die hier vorausgewählten Plattenkombinationen erneut untersucht. Ziel ist die Festlegung der endgültig genutzten Materialkombination für den Einsatz in der Tiefsee.

5.2.1 Versuchsdurchführung Realkornuntersuchungen

Zur Durchführung dieser Untersuchungen wurden künstlich mit unterschiedlichen idealen und nicht idealen Versuchskörpern auf Stoß basierende AE-Signale erzeugt und analysiert. Die Untersuchungen werden mittels des Testkonzeptes Kugelfallversuch durchgeführt. Die

innerhalb dieser Versuche genutzten Platten bauen auf den zuvor erarbeiteten Ergebnissen auf. Zur Erreichung einer möglichst großen Vergleichbarkeit zu den Untersuchungen in Kapitel 5.1 wurden die Platten zuvor ausgemessen und markiert. Tabelle 5.3 und Abbildung 5.7 geben einen Überblick über die genutzten Probenkörper innerhalb der Realkornuntersuchungen.

Tabelle 5.3: Materialien der Probenkörper.

Material	Dichte $\rho \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Stahlkugel	7,75
Anhydrit	2,9
Bimsstein	0,5
Polymetallische Knollen	2,1

Die Versuchskörper werden sowohl mit gleichen Gewichten, als auch mit gleichen Körpergröße untersucht. Dabei soll eine variable Durchmischung von unterschiedlichen Grobkörpern in der inhomogenen Phase simuliert werden.

Die ausgewählten **Stahlkugeln** werden genutzt, um zum einen eine Vergleichbarkeit zu den vorgelagerten Plattentests und dem standardisierten Signalgenerator Test zu gewährleisten, da die 20 mm Referenzkugel einen durchschnittlichen Burst mit einer 7 V Amplitude erzielt. Zum anderen kann so ein metallischer Störkörper simuliert werden, der sich von den Realkörnern in Form und Art unterscheidet.

Die **Anhydrit** - Körner sollen innerhalb der Versuchsreihen Festkörper simulieren, die von den polymetallischen Knollen im abgezielten Massenstrom differenziert werden müssen und einen Störkörper darstellen.

Bimsstein - soll einen weiteren Störkörper darstellen, welcher im Vergleich eine geringe Dichte aufweist (vgl. Tabelle 5.3).

Die **polymetallischen Knollen** - stellen die Zielgröße der Untersuchungen dar. Diese sollen innerhalb der späteren Untersuchungen von den anderen genutzten Materialien differenziert werden.

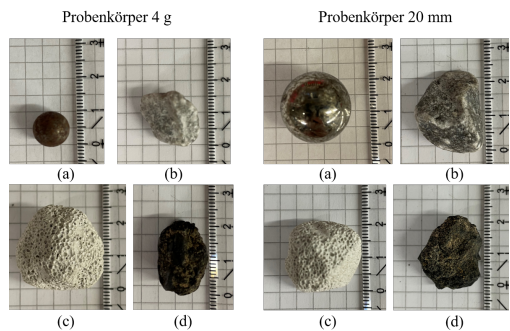


Abbildung 5.7: Übersicht der Probenkörper a - Stahlkugel, b - Anhydrit, c - Bimsstein, d - polymetallische Knollen.

Die gesamte Versuchsreihe wird in aufeinander aufbauende Teil-Segmente aufgeteilt. Zu Beginn werden die Ergebnisse aus dem Signalgenerator Test (vgl. Kapitel 5.2) mit dem Kugelfallversuch validiert. Darauf aufbauend werden die 20 mm und 4 g Probenkörper innerhalb zweier eigener Versuchsreihen untersucht. Über alle Untersuchungen hinweg wurde der jeweilige Kugelfallversuch $n = 25$ Mal wiederholt.

5.2.2 Ergebnisse der Realkornuntersuchungen

Aufgrund der Vielzahl der gemachten Untersuchungen wird im Folgenden exemplarisch, aber stellvertretend für die gesamte Versuchsreihe, die Validierung durch eine Stahlkugel aufgezeigt. Dabei wurden die 4 vielversprechendsten Materialkombination AlMg3 - AlMg3, AlMg3 - V4A, TitanGrade2 - V4A und V4A - TitanGrade2 genutzt. Tabelle 5.4 fasst die Ergebnisse der Validierungsversuche exemplarisch zusammen.

Tabelle 5.4: Mittelwerte der Validierungs-Ergebnisse einer Stahlkugel.

Materialkombination	Max [V]	Max Magnitude [V]	Frequenz Magnitude [Hz]
AlMg3 AlMg3	6,3028	0,4475	120520
AlMg3 V4A	6,2057	0,2912	120100
TitanGrade2 V4A	6,2047	0,2710	92164
V4A TitanGrade2	5,8312	0,3275	96400

Setzt man die Ergebnisse aus den Signalgenerator Versuchen (vgl. Kapitel 5.2, Tabelle

5.2) mit den Ergebnisse aus Tabelle 5.4 in den Zusammenhang, kann eine geringfügige Abweichung vom Kugelfalltest zum Signalgenerator Test festgestellt werden. Beim Kugelfalltest mit einem idealen sphärischen Probenkörper aus Stahl sinkt die vorhandene Dämpfung beim Grenzschnittübergang zwischen den Versuchsmaterialien. Im Schnitt werden die Körperwellen mit 0,4 V mehr über die Grenzschnittübergänge hinweg übertragen. Diese geringere Dissipation kann einen positiven Einfluss auf die Signalweiterverarbeitung und die Analyse haben.

Ein weiteres Leistungsmerkmal der Übertragung der AE-Welle ist als Verteilung der angeregten Frequenzbereiche beschrieben worden. Über diesen Kennwert soll eingeschätzt werden, inwieweit die erfassten Signale reproduzierbar sind. Je geringer diese Verteilung ist, umso eher kann davon ausgegangen werden, dass die aufgenommen Signale wirklich probenkörperspezifisch sind. Das hat zur Folge, dass eine stabilere Charakterisierung der inhomogenen Phase bei der späteren Anwendung sicher gestellt werden kann. Abbildung 5.8 zeigt die Verteilung der angeregten Frequenzbereiche über alle Validierungsversuche hinweg in einer Box-Plot Darstellung auf.

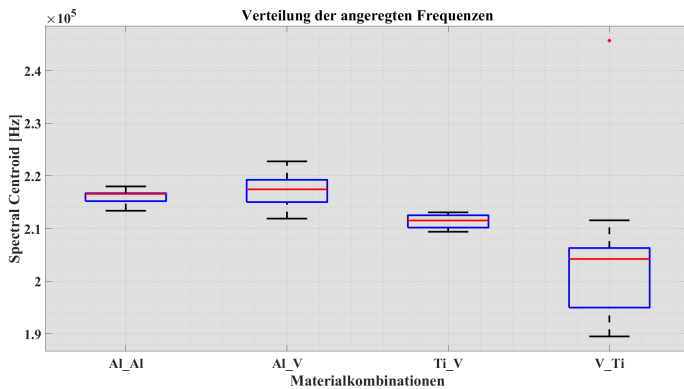


Abbildung 5.8: Verteilung der angeregten Frequenzbereiche im Box-Plot.

Die Ergebnisse zeigen eine vorteilhafte Veränderung der Varianz der angeregten Frequenzbereiche im Vergleich zum Signalgenerator Test auf. Bei mehreren Versuchsdurchführungen mit einem Realkörper werden häufiger die gleichen Frequenzbereiche angeregt. Es bestätigt die Materialauswahl aus Kapitel 5.2 für das Messkonzept und stellt eine wiederholbare charakteristische Signalanregung eines spezifischen Probenmaterials dar.

Auf dieser dargestellten Grundlage kann davon ausgegangen werden, dass die ausgewählte Materialkombination auch für den Einsatz des in Kapitel 5.3 beschriebenen Konzeptes der

Sensorapplikation in der Realanwendung zur Detektion und Charakterisierung von mehrphasigen hydraulischen rohrgestützten Massenströmen in der polymetallischen Knollengewinnung nutzbar ist.

5.2.3 Einfluss von Druck auf den Einsatz der AE-Technologie

Die Umsetzung der AET in der Tiefsee zur Materialcharakterisierung hydraulischer Massenströme muss nicht nur bei der mechanischen Auslegung des Equipments den Einfluss von Druck untersuchen, sondern auch eine Einflussnahme auf die zu untersuchenden Körperschallwellen in Betracht ziehen. Dieser Arbeit liegen, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, einige selbst durchgeführte oder in der Literatur beschriebene vorgelagerte Forschungsarbeiten zu Grunde. Vraetz (vgl. [12]) und Schoone (vgl. [137]) führten Untersuchungen in diesem Themenbereich durch.

Dabei wurde ein hydraulischer Massenstrom mit idealen Probenkörpern und polymetallischen Knollen angereichert. Dieser Massenstrom wurde in ein Rohrsystem geleitet. Das Rohrsystem befand sich in einer Druckkammer in der bis zu 600 bar Druck aufgebaut werden konnte. Mittels einer AE-Messstelle in einer metallischen Rohrumlenkung innerhalb des Rohrsystems wurde der hydraulische Massenstrom detektiert. Ziel dieser Untersuchungen war, den Einfluss einer Druckumgebung wie in der Tiefsee auf den Einsatz der AET zu untersuchen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Druckumgebung einen dämpfenden Einfluss auf die Übertragung der AE-Wellen hat. Trotz des dämpfenden Einflusses konnten die Probenkörper im hydraulischen Massenstrom erfolgreich erfasst und auch charakterisiert werden. Durch eine größere gewählte Verstärkung des Signals innerhalb der Messkette konnte dem dämpfenden Einfluss des Drucks entgegen gewirkt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen (vgl. [12], [10], [137]) wurden bei der Messkonzept-Entwicklung in Betracht gezogen.

5.3 Umsetzung der AE-Technologie für den Tiefseebergbau

Innerhalb der Analyse haben sich zwei Material-Kombinationen für eine vorteilhafte Umsetzung einer AE-Messstelle hervor getan. Für die Realisierung eines Konzeptes wurde sich schlussendlich für die Verbindung AlMg3 - V4A entschieden. Hierbei besteht das Rohrsegment aus AlMg3 und das Sensorgehäuse aus V4A. Vorteil dieser Verbindung ist unter anderem, dass durch ein 3 mm dickes AlMg3 Rohrsegment das Gesamtgewicht der MBM nicht großartig erhöht wird. Außerdem unterliegt das Rohrsegment nicht dem Einfluss des durch die

Wassersäule entstehenden Druckes, weshalb keine besonderen konstruktiven Anforderungen an die Härte gestellt werden müssen.

Dahingegen unterliegt das Sensorgehäuse durch die Integration des AE-Sensors und des so entstehenden Hohlkörpers einem Druckeinfluss von bis zu 600 bar. Um die Abmessungen des Sensorgehäuses kleinstmöglich zu halten, empfiehlt sich hier das deutlich widerstandsfähigere Material V4A (vgl. Kapitel 5.1.2).

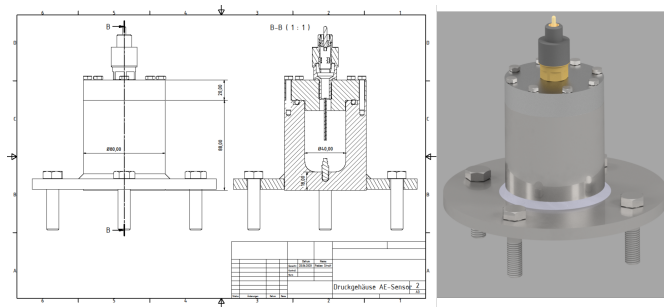


Abbildung 5.9: Konstruktion des Sensorgehäuses.

Abbildung 5.9 visualisiert die resultierende Lösung und das endgültige Konzept des Sensorgehäuses für die Umsetzung einer AE-Messung für die Materialcharakterisierung in der Tiefsee für Tiefen bis zu 6000 m. Für das Konzept des Sensorgehäuses wurde für die Ankopplung eine Flanschverbindung mit Flachkopfschrauben gewählt, um den Materialfluss innerhalb der Rohrströmung nicht zu stören. Die einfache Wartung und flexible Applikation ist somit gewährleistet. Des Weiteren wurde ein Rundprofil gewählt, um eine größtmögliche Druckresistenz zu ermöglichen. Die Abmessungen und die Materialmächtigkeiten wurden durch eine iterative Simulation und Belastungssimulation, basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM), mittels Inventor durchgeführt.

Abbildung 5.10 gibt visuell das Ergebnis der FEM Analyse für die Haupt- und die Scherspannungen wieder. Bezogen auf die durch Druck (hier 600 bar) entstehenden Hauptspannungen ist zu sehen, dass sowohl die Steckverbindung als auch die Verbindung zwischen dem Volumenkörper und dem Flanschring die größten Spannungen aufweisen. Einem Versagen wurde mittels genügendem Sicherheitsfaktor (3 bis 12) entgegengewirkt. Dies trifft auch auf die Schraubenverbindungen zu, die der größten Belastung durch Scherspannungen unterliegen.

In Kombination mit dem in Kapitel 4.3 dargestellten, erweiterten und für den Einsatz in der Tiefsee eingetauchten Messsystems ergibt sich eine vollständige, in der Tiefsee einsetzbare

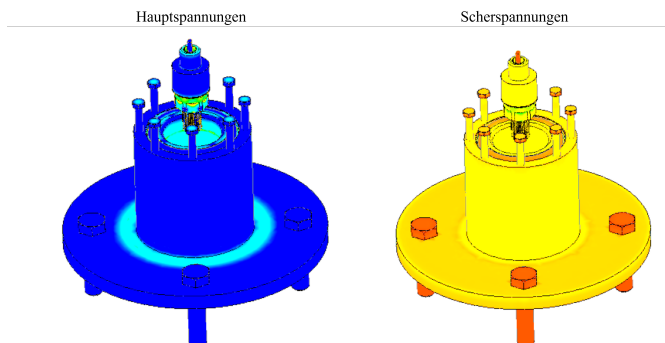


Abbildung 5.10: FEM Belastungsanalyse des Sensorgehäuses.

Auslegung der AE-Messtechnik, welche die Gesamtheit der aufgestellten Anforderungen erfüllt. Die Auslegung gewährleistet eine stabile und konstante Nutzung des Messsystems. Durch die unterschiedlichen durchgeführten Untersuchungen wird eine qualitativ hochwertige Datenaufnahme gewährleistet.

Im Weiteren ist die Möglichkeit gegeben vor Ort eine Analyse der Messdaten in den Mikrocontroller zu integrieren. Durch eine vorintegrierte Messdatenauswertung kann das Datenvolumen der zu übertragenden Daten soweit verringert werden, dass eine Übertragung über eine Distanz von 6000 *m* möglich ist. Die integrierte Messdatenauswertung muss gemäß eines Datennutzungskonzeptes parametrisiert werden.

6 Konzeptentwicklung zur Analyse mehrphasiger Materialströme

Für die Detektion und Charakterisierung der in der MBM des Tiefseebergbaus vorhandenen Materialströmungen, wurde unter dem Aspekt der Inline-Analytik sich für den Einsatz der AET entschieden (vgl. Kapitel 3.2.2). Die theoretisch physikalische Grundlage für den Einsatz dieser Sensortechnologie ist die Anwesenheit von elastischen Schallemissionen (auch Körperschall) in der Rohrwand aufgrund von auftretenden Impuls- und/oder Reibungskräften. Diese wurden in Kapitel 2 und 5 sowohl durch die theoretischen Grundlagen, als auch durch das mechanische Anwendungskonzept für die AET innerhalb des Tiefseebergbaus beschrieben und experimentell überprüft.

Aufgrund des in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Bewegungsverhaltens von Feststoffpartikeln in Rohrströmungen entstehen Kontaktflächen oder -punkte zwischen den Feststoffpartikeln und der Rohrwand. Bei der Betrachtung der Kontakte sind zwei physikalische Hauptphänomene, der Stoß und die Reibung, zu beobachten (vgl. Abbildung 6.1). [59]

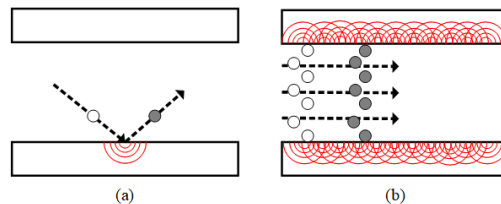


Abbildung 6.1: Grafische Darstellung von Körperschallquellen in einer Rohrströmung - (a) Stoß und (b) Reibung. (Nach [59])

In Abbildung 6.1 (a) dient eine Stoßbelastung als Impulsquelle, wie diese bei turbulenten hydraulischen Transportvorgängen besonders zwischen Feststoffpartikeln untereinander und mit der Rohrwand auftreten. Dies tritt verstärkt auf Rohrkrümmungen zu. Die Schallwellenquelle in (b) basiert auf dem immer wiederkehrenden/dauerhaften Kontakt an der Grenzfläche der Stromfadenhülle und der Rohrwand und ist als Rohrreibung definiert. Dieses Phänomen tritt bei einer Rohrströmung konstant auf [59] [138]. Im Folgenden werden diese beiden physikalischen Phänomene nochmals intensiver betrachtet.

Körperschallquelle Stoß - Bei Stoßvorgängen zwischen zwei Festkörpern wird innerhalb kurzer Zeit Kraft aufeinander ausgeübt. Festkörper können in Folge dessen ihren Bewegungszustand, aber auch ihre Form und Zusammensetzung ändern. Dabei kann es zu elastischen oder plastischen Verformungen kommen. Durch den Stoß zweier Festkörper kann eine Impulskraft entstehen, die wiederum elastische Wellen in einem Körper freisetzen kann. Diese elastischen Wellen werden auch als Körperschall klassifiziert. [71]

Die mathematische Herleitung der bei einem Stoß entstehenden Impulskraft kann umfangreich der Literatur (vgl. [73] [71] [139] [140] [141] [142]) entnommen werden und wurde für die Entstehung von Körperschallwellen auch spezifisch von Vraetz in [12] beschrieben und hergeleitet. Auf dieser Basis wird innerhalb dieser Arbeit das Auftreten von Körperschalleinzelphänomenen beim hydraulischen Transport von inhomogenen Strömungen, insbesondere der Grobkornphase, als vorausgesetzt angenommen.

Körperschallquelle Rohrreibung - Rohrreibung entsteht beim Durchfließen einer homo- und/ oder inhomogenen Strömung durch ein Rohr. Die Rohrreibung tritt hierbei an den Innenwänden des Rohres auf und basiert auf dem physikalischen Phänomen der Reibung (vgl. [143]). Die Rohrreibung beschreibt dabei Reibungsverluste, die innerhalb einer Rohrleitung entstehen. Für die Rohrreibung repräsentativ ist die Rohrreibungszahl, die in Kapitel 2.4.4 beschrieben wurde [144] [52]. Aufgrund dessen, dass bei nahezu jeder Rohrströmung Rohrreibung vorhanden ist, wird diese beim hydraulischen Transport von homogenen und inhomogenen Strömungen ebenfalls angenommen.

Beide physikalischen Phänomene einer inhomogenen hydraulischen Rohrströmung werden im folgenden den jeweiligen Phasen zugeordnet und analytisch betrachtet.

6.1 Charakterisierung hydraulischer Massenströme mittels AE

Das zu erarbeitende Datennutzungskonzept impliziert eine Vielzahl von Fragestellungen (vgl. Kapitel 2.5) in unterschiedlichen Teilbereichen, die für eine erfolgreiche Erarbeitung bearbeitet werden müssen. Somit wurde eine Vielzahl zu dieser Arbeit vorgelagerten und/oder ergänzenden Untersuchungen schon durchgeführt und in der Literatur beschrieben.

- Erfassung und Differenzierung unterschiedlicher idealer sphärischer Körper in einem homogenen hydraulischen Massenstrom durch die Analyse von AE-Signalen in [12] [145]
- Erfassung und Einfluss von vertikalen Rohrströmungen auf die AE basierte Erfassung und Analyse von hydraulischen Massenströmen in [137]

- Erfassung und Einfluss von unterschiedlichen Druckzuständen auf die AE basierte Erfassung und Analyse von hydraulischen Massenströmen in [12]
- Erfassung sandbeladener hydraulischer Massenströme mittels AET in [91]

Aufbauend auf die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zur Erarbeitung des Messprinzips werden in dieser Arbeit zwei weitere Themenbereiche ergänzt und untersucht, um die aufgestellten Anforderungen an das Messsystem und die Datenanalyse zu komplementieren.

- Untersuchung des Prozessgrundrauschens zur Differenzierung einer homogenen Phase des hydraulischen Massenstromes von der inhomogenen Phase
- Untersuchung und Differenzierung einzelner Bestandteile einer inhomogenen Phase in einem hydraulischen Massenstrom

Im Folgenden wird auf die beiden Untersuchungen, die Durchführung und resultierenden Ergebnisse eingegangen.

6.2 Semi-/homogene Phase einer hydraulischen Massenströmung

Für die Untersuchung des Einflusses des Prozessgrundrauschens einer vorherrschenden homogenen Phase wurden Grundlagentests an einem Rohrprüfstand durchgeführt. Diesem Basiszustand der Strömung wurden definierte Materialien hinzugefügt, um unterschiedliche zweiphasige Materialströme zu erzeugen. In weiteren Untersuchungen wurden gezielt Versuchsmaterialien den zweiphasigen Massenstrom hinzugefügt, um so eine mehrphasige Strömung zu erzeugen.

6.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung im Technikum

Für die Versuchsdurchführung wurde ein Versuchsstand im Technikum des AMTs auf der Basis der zuvor beschriebenen physikalischen Eigenschaften von mehrphasigen hydraulischen Massenströmungen konzipiert und umgesetzt (vgl. Abbildung 6.2, vgl. [91]). Das geschlossene Pump-Rohr-Kreislauf-System sollte mittels definierter Anordnung der jeweiligen Rohrstrecken sicherstellen, dass in den metallischen Rohrbogenabschnitten eine Kontaktstelle zwischen den Komponenten des hydraulischen Massenstroms und der Rohrrinnenwand entsteht. Die Versuche zur Massenstromcharakterisierung wurden mit Wasser als Trägermedium durchgeführt.

In einem offenen 1000 l Wasserbehälter (2) wird der Wasserkreislauf durch eine Auras P 40 ND A Abwasserpumpe (Förderleistung von $120 \text{ m}^3/\text{s} - 33 \text{ l/s}$) initiiert. Die technischen

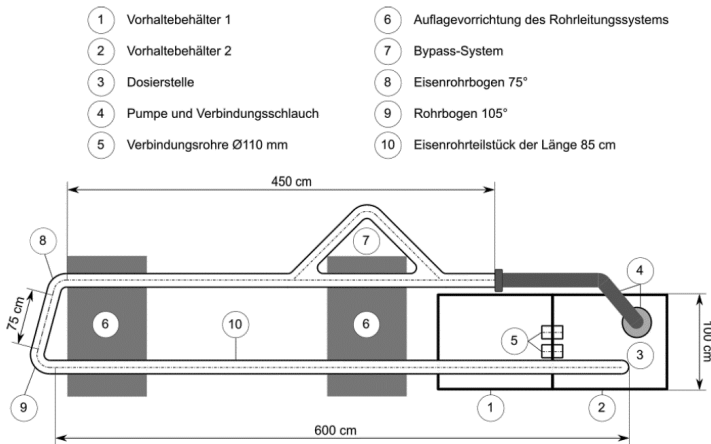


Abbildung 6.2: Grafische Darstellung des Rohrprüfstandes. (Nach [91])

Parameter und die Pumpenkennlinie können dem Produktdatenblatt (vgl. [146]) entnommen werden. Die Pumpe erzeugt einen turbulenten Wasserstrom und fließt über ein flexibles Rohr (4) in das System. Im darauffolgenden Segment (7) können durch ein Klappensystem Einzelproben in den hydraulischen Massenstrom eingetragen werden. Über ein längeres Rohr wird der hydraulische Massenstrom zu dem 75° Metallrohrbogen (8), an dem ein AE-Sensor befestigt ist, geführt. Die Umlenkung im Rohrsystem erhöht aufgrund der dort auftretenden physikalischen Effekte (vgl. 2.4.3) die turbulente Strömung.

Die wirkenden Fliehkräfte und die Trägheit der im Stoffstrom transportierten Komponenten stellen sicher, dass die Probe in ständigen Kontakt mit der Innenfläche des gebogenen Rohres kommt. Der AE-Sensor wurde an der Außenfläche des Rohres kurz hinter dem Scheitelpunkt der Krümmung befestigt. Für das Erzeugen eines Referenzwertes wurde an einem 2. metallischen Rohrsegment (10) eine zusätzliche AE-Messstelle installiert. Der messtechnische Aufbau gleicht dem zuvor vorgestellten Versuchsaufbau.

Der den Untersuchungen zugrunde liegende Transport mit klarem Wasser stellt eine homogene Strömung dar. Ebenso ist der Transport mit einer Suspension die auf Wasser und Feinsanden wie Millisil basiert, welches aufgrund der vorliegenden mittleren Korngröße von $40\ \mu\text{m}$ bis $65\ \mu\text{m}$ ein Substitut zu Tiefseeboden-Sanden darstellt, als homogene Strömung zu charakterisieren. Der Transport mit größeren Sedimentbestandteilen über $0,1\ \text{mm}$ und Festkörpern mit einer mittleren Korngröße von $10\ \text{mm}$ bis $50\ \text{mm}$ hingegen entspricht den heterogenen Strömungen. [45] [147]

Die Versuchsdurchführung wurde in 15 Teilsegmente unterteilt, um 15 annähernd konstante Betriebszustände zu erzeugen. Über die gesamte Dauer des Versuches wurden die AE-Signale kontinuierlich gemessen. Im ersten Segment wurde nur Prozesswasser, stellvertretend für einen einphasigen homogenen hydraulischen Massenstrom durch den Prüfstand gepumpt. Dieser Zustand stellt eine Referenzgröße und somit den Basiszustand des Kreislauf-Systems dar. Nach 15 min wurden 25 kg Quarzsand über eine Zeit von 2 min in den offenen Wasserbehälter dem System zugeführt und so eine Suspension und der 1. Betriebszustand erzeugt.

Nach weiteren 15 min Laufzeit des Betriebszustandes wurden erneut 25 kg Sand zugegeben und so der 2. Betriebszustand erzeugt, welcher ebenfalls 15 min aufrecht erhalten wurde. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis eine Gesamtmasse von 300 kg Sand in das Kreislaufsystem eingebracht worden war und somit 13 Betriebszustände simuliert wurden. Für 2 weitere Teilsegmente wurden jeweils 50 kg eingefüllt. Bei einer kumulierten Masse von 400 kg eingefülltem Sand wurden die Versuche gestoppt. Insgesamt wurde der Versuch $n = 10$ Mal durchgeführt. Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse stehen stellvertretend für die gesamte Versuchsdurchführung.

Aufgrund der Größe des Wasserbehälters kam es während der Versuchsdurchführung zu leichten Defiziten bei der Durchmischung der Suspensionen. Das führte zu kleineren Absetzungen am Boden des Behälters. Somit wurden bei der Versuchsdurchführung innerhalb jedes Betriebszustandes 5 Proben des Materialflusses am Rohrausgang entnommen. Über das Gewicht und das Volumen jeder Probe wurde die Feststoffdichte und damit der Sandgehalt und die Trübedichte bestimmt. Die Feststoffdichte wurde durch Subtraktion der Dichte von Wasser bei einer Raumtemperatur von 25 °C von der Mischungsichte bestimmt. Für die Versuchsdurchführung wurde Quarzsand mit einem Mittelkorn von 0,1 - 1 mm und einer Dichte von 2,65 g/cm³, genutzt. [148]

6.2.2 Analyse einer homogenen hydraulischen Massenströmung

Zur Ergebnisdarstellung wurden aus dem dauerhaft aufgenommen AE-Signal die jeweiligen Betriebszustände herausgeschnitten und im Vergleich dargestellt. Durch eine Intervallanalyse (1 s) wurden innerhalb der jeweiligen Betriebszustände die RMS-Werte bestimmt. In Abbildung 6.3 wird das Ergebnis in einem Box-Plot der RMS-Werte in V über die 15 Belastungszustände aufgezeigt.

Bei der Betrachtung des ersten Box-Plots bei 0 g/l ist erkennbar, dass eine Detektierung eines hydraulischen Massenstroms mittels der AET möglich ist. Im zweiten Betriebszustand mit 17,75 g/l ist ein Anstieg der RMS-Werte erkennbar und analog dazu ein Anstieg der Ener-

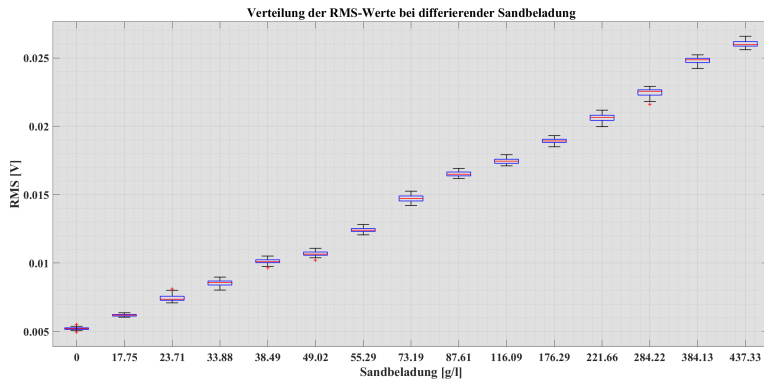


Abbildung 6.3: Verteilung der RMS-Werte der einzelnen Betriebszustände als Box-Plot.

gie im AE-Signal vorhanden. Dies gibt ein Beispiel für die Machbarkeit der Unterscheidung zwischen einem reinem Wasserstrom und einer Suspension.

Auch in allen darauffolgenden Betriebszuständen steigt bei zunehmender Feststoffbelastung im hydraulischen Massenstrom der Energiegehalt des AE-Signals. Ebenfalls ist in Abbildung 6.3 zu erkennen, dass die ermittelten RMS-Werte der jeweiligen Betriebszustände konstant um einen Mittelwert liegen und somit wenige Überschneidungen der Extremwerte zwischen den einzelnen Betriebszuständen vorhanden sind. Für die Untersuchung der Machbarkeit einer Unterscheidung verschiedener Sandbeladungen eines hydraulischen Massenstromes wurde nachgewiesen, dass ein disperser hydraulischer Massenstrom mit steigender Feststoffbeladung eine Erhöhung der Intensität von erzeugten AE-Aktivitäten nach sich zieht. Für eine Anwendung im Tiefseebergbau und der hydraulischen Förderung von Rohstoffen bedeutet dieses Ergebnis, dass eine prinzipielle Machbarkeit einer möglichen Materialstromcharakterisierung mittels der AET bei einem wie hier beschriebenen Aufbau möglich ist.

6.2.3 Abhängigkeit der AE-Aktivitäten mit der Rohrreibung

Die zuvor dargestellten Ergebnisse geben einen Hinweis auf die Abhängigkeit von der Rohrreibung eines hydraulischen Massenstroms zum Effektivwert (RMS) des AE-Signals. Eine Hypothese für die Auslegung eines Datennutzungskonzeptes der aufgenommenen AE-Signale eines hydraulischen Massenstroms ist, dass die homogene Phase in ihrer RMS-Aktivität (energetischer Effektivwert) als Grundwert basierend auf den physikalischen Grundgrößen durch die Rohrreibungszahl (abhängig von der mechanischen Umsetzung) berechnet werden

kann (vgl. [39]). Ziel dieser Betrachtung ist es, einen Referenzwert (Grundzustand) für eine hydraulische Massenströmung innerhalb des AE-Signals zu definieren, um Veränderungen in der Zusammensetzung des hydraulischen Massenstroms erfassen zu können.

Die folgenden Herleitungen und Berechnungen basieren auf den in Kapitel 2.4.2 dargestellten Grundlagen und Formeln. Zunächst wurde die kinematische Viskosität des vorliegenden Wasser-Sand-Gemisches mit Hilfe der in Gleichung 6.1 angegebenen Einstein-Formel ermittelt. Die kinematische Viskosität von Wasser wurde durch die in der Tabelle 6.1 angegebenen Ergebnisse der Temperaturmessungen in einem klaren Wasserstrom und der Sandbeladung des Gemischs mit Hilfe von Tabellen bestimmt.

$$\vartheta_z = \vartheta_w \cdot (1 + 2,5 \cdot C_z) \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } \vartheta_z & \text{ Kinematische Viskosität Gemisch } [m^2/s] \\ \vartheta_w & \text{ Kinematische Viskosität Wasser } [m^2/s] \\ C_z & \text{ Feststoffkonzentration} \end{aligned}$$

Ausgehend von Gleichung 6.1 zur Bestimmung der kinematischen Viskosität des Gemisches wurde die Reynoldszahl (vgl. Formel 6.2) berechnet. Die Gemischgeschwindigkeit wird über die Versuchsphasen hinweg als konstant mit einem Wert von $3,4 \text{ m/s}$ angenommen. Der relevante Rohrdurchmesser betrug $0,11 \text{ m}$.

$$R_e = \frac{v_M \cdot d}{\vartheta_z} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } v_M & \text{ Gemischgeschwindigkeit } [m/s] \\ R_e & \text{ Reynoldszahl } [-] \\ d & \text{ Durchmesser } [m] \end{aligned}$$

Für die endgültige Berechnung einer Rohrreibungszahl wird prinzipiell die Colebrook-White-Gleichung (vgl. Formel 2.10) genutzt. Hier wird wie in der Literatur (vgl. [36] [53] [54]) die Haaland-Gleichung (vgl. Formel 2.11) zur Definition des Startpunktes für die iterative Berechnung angewendet. Dieses Vorgehen ist für turbulente Strömungen in voll durchströmten Rohren oder Kanälen, wie es im vorliegenden Versuchsaufbau der Fall ist, geeignet [53]. Der Reibungsfaktor wird benötigt, um den Druckabfall oder den Druckverlust aufgrund der Wandrauigkeit zu berechnen. Exakt dieser Wert soll mit den während des Versuches entstandenen RMS-Werten in Zusammenhang gesetzt werden. Die berechneten Reibungsfaktoren sind in Tabelle 6.1 dargestellt. [53]

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Berechnung der Rohrreibungszahl $[\lambda]$.

Betriebs- zustand	Wasser- temperatur °C	Sand- beladung g/l	Kinematische Viskosität ν_{Wasser}	Kinematische Viskosität $\nu_{\text{Suspension}}$	$[\lambda]$
B01	20,93	0,00	9,79E-07	9,79E-07	0,0258
B02	22,23	17,75	9,56E-07	4,34E-05	0,0358
B03	23,56	23,71	9,13E-07	5,50E-05	0,0376
B04	24,93	33,88	8,92E-07	7,64E-05	0,0405
B05	26,10	38,49	8,72E-07	8,48E-05	0,0416
B06	27,40	49,02	8,53E-07	1,05E-04	0,0439
B07	28,60	55,29	8,17E-07	1,13E-04	0,0448
B08	29,70	73,19	8,00E-07	1,47E-04	0,0481
B09	30,63	87,61	7,84E-07	1,72E-04	0,0503
B10	31,23	116,09	7,84E-07	2,28E-04	0,0548
B11	31,80	176,29	7,68E-07	3,39E-04	0,0623
B12	32,33	221,66	7,68E-07	4,26E-04	0,0674
B13	32,83	284,22	7,52E-07	5,35E-04	0,0731
B14	33,20	384,13	7,52E-07	7,23E-04	0,0819
B15	33,50	437,33	7,37E-07	8,07E-04	0,0856

Basierend auf diesen berechneten λ -Werten wurde zur visuellen Überprüfung der Plausibilität die Feststoffbeladung des 2-phasigen Massenstroms gegen die Sandbeladung aufgetragen (vgl. Abbildung 6.4). Dabei stellt jeder Punkt im Graph einen der 15 Betriebszustände dar. Wie in Tabelle 6.1 und in Abbildung 6.4 aufgeführt, steigt bei zunehmendem Sandgehalt in der Suspension auch die Rohrreibungszahl λ . Diese hohe Korrelation bestätigt den zuvor mathematisch hergeleiteten Zusammenhang zwischen der Feststoffbelastung in einem gemischten homogenen hydraulischen Massenstrom und der Rohrreibungszahl λ auch experimentell.

Darauf aufbauend soll dieser Zusammenhang auch mittels der Analyse des aufgenommenen AE-Signals überprüft werden. Dementsprechend wurden die gesamten AE-Daten des Versuches ausgewertet, um diesen Zusammenhang auch über die errechneten AE-Kennwerte zu bestätigen.

In Abbildung 6.5 werden die Ergebnisse der Analyse beispielhaft für den errechneten AE-Parameter RMS an der Messstelle (8) (vgl. Abbildung 6.2) in der Rohrkrümmung dargestellt. In Abbildung 6.5 wird jeweils der RMS-Wert (y-Achse links) und die Rohrreibungszahl (y-Achse rechts) aufgetragen. Dabei steht jeder Messpunkt repräsentativ für einen Betriebszustand.

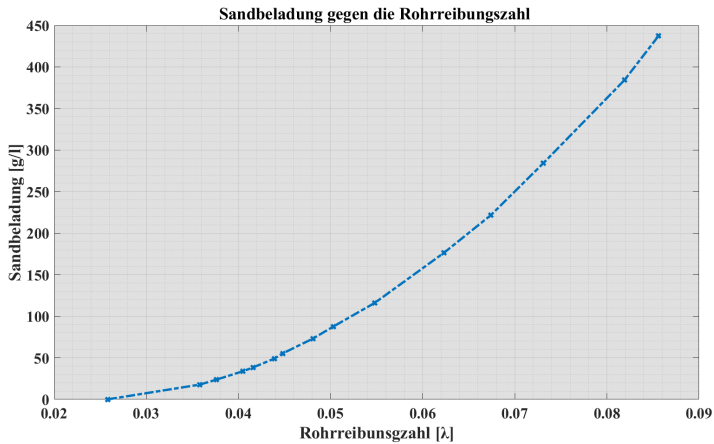


Abbildung 6.4: Zusammenhang zwischen Sandbeladung und Rohrreibungszahl.

Bei der Betrachtung der in Abbildung 6.5 aufgetragenen RMS-Werte gegenüber der Sandbeladung wird deutlich, dass die RMS-Werte bei steigender Sandbeladung ebenfalls ansteigen. Das lässt die Vermutung zu, dass eine steigende Sandbeladung des hydraulischen Massenstroms ein energetisch höheres AE-Signal erzeugt, was auf zunehmenden physikalischen Kontakt (Reibung) zwischen Feststoffpartikeln im Massenstrom und der Rohrwand zurückgeführt werden kann. Diese Vermutung kann durch den Verlauf der Rohrreibungszahl λ , die wie zuvor beschrieben in einem direkten Zusammenhang zwischen Feststoffmassengehalt im hydraulischen Massenstrom und der Rohrreibung steht, belegt werden.

Bei der Betrachtung der Kurvenverläufe über die jeweiligen Betriebszustände hinweg zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der beiden Kennwerte. Zur Überprüfung dieses Zusammenhangs wurde eine Pearson-Korrelation durchgeführt, um intervallskalierte Merkmale linear in ihrer Beziehung zueinander zu untersuchen. So soll eine mögliche Abhängigkeit der Kennwertverläufe zueinander quantifiziert werden.

In einer Quantil-Quantil-Darstellung (q-q) (vgl. Abbildung 6.6) soll bestimmt werden, ob die beiden Datensätze einer gemeinsamen Verteilung entstammen. Die hier aufgezeigte Ergebnisdarstellung impliziert gleichzeitig das Ergebnis einer linearen Korrelation (Pearson), welche als Zahl oben links im Diagramm dargestellt ist.

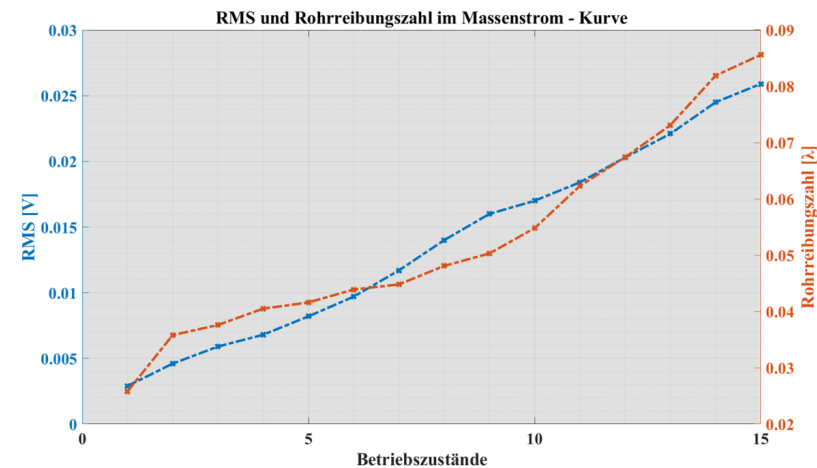


Abbildung 6.5: Exemplarisches Ergebnis anhand RMS und Rohrreibungszahl in der Kurve.

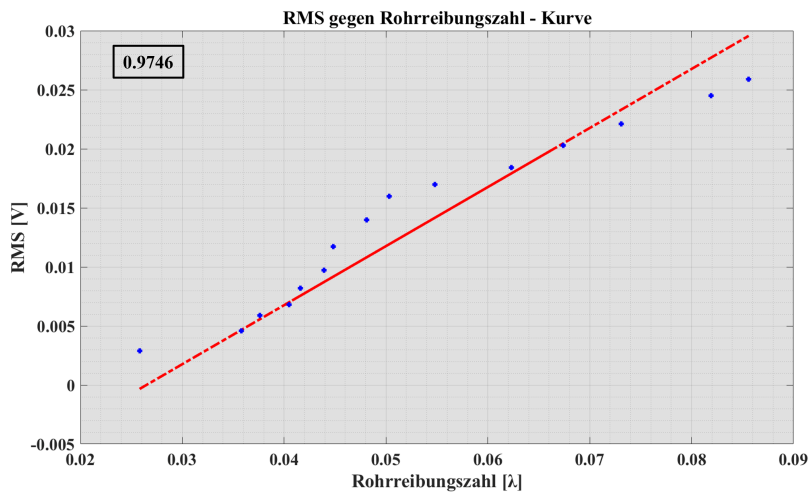


Abbildung 6.6: Exemplarische Quantil-Quantil-Darstellung der Ergebnisse; RMS und Rohrreibungszahl in der Kurve.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Korrelation in der Messstelle (8) (RMS-Werte gegen Rohrreibungszahl $\lambda - 0,9746$) wird eine deutliche Abhängigkeit dieser Werte-Verläufe zueinander aufgezeigt. Das bestätigt den Zusammenhang zwischen der vorhandenen Feststoffbeladung in einem hydraulischen Massenstrom, der mathematisch ermittelten Rohrreibungszahl λ und der effektiven Energie (RMS) des aufgenommen AE-Signals.

6.2.4 Relevanz der Ergebnisse

Die in Kapitel 6.2.3 aufgestellte Hypothese, dass über die Rohrreibungszahl der Grundzustand eines homogenen hydraulischen Massenstroms bezüglich des RMS-Werteverlaufs bei der AE-Signalanalyse definiert werden kann, konnte bei der Ergebnisdarstellung bekräftigt werden. Eine beschriebene Anforderung war die sensorbasierte Kontrolle des Ausgangsmassenstroms Wertminerale aus der MBM hin auf die Zusammensetzung bestehend aus den Zielgrößen reinem Wasser und polymetallischer Knollen. Die Umsetzung kann durch die Analyse des AE-Signales (RMS-Wertes) durchgeführt werden. Ausgehend vom Grundzustand der Rohrreibung (Rohrreibungszahl λ) von reinem Wasser kann über den Anstieg der AE-Signale ein Rückschluss über eine sich verändernde Rohrreibung getroffen werden.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein Anstieg des RMS-Wertes über den Grenzwert der Rohrreibung von klarem Wasser hinaus, einen direkten Hinweis auf die Anwesenheit von Feststoffpartikeln in der homogenen Phase im Ausgangsmassenstrom Wertminerale gibt. Dadurch, dass der RMS-Wert einen Rückschluss auf die Rohrreibung und somit auf den Grad der Beladung des Transportfluides (Wasser) mit feinen Feststoffen (Sedimente) ermöglicht, kann detektiert werden, ob und wie viel Massenanteil in dem homogenen hydraulischen Massenstrom Festkörperteilchen (Korngröße kleiner als $0,1\text{ mm}$) ist. Der zumeist aus Korngrößen von $0,6\text{ }\mu\text{m}$ bestehende Sedimentboden ist somit dieser Fraktion zuzuordnen. Dies kann genutzt werden, um den qualitativen Erfolg der Sedimentabscheidung in der MBM zu überwachen und somit die in Kapitel 2.5 aufgestellte Anforderung an das Messsystem zu erfüllen. Im Weiteren kann über den RMS-Wert eine Trennung zwischen der homogenen und der inhomogenen Phase durchgeführt werden. Durch das konstante Reibungsverhalten eines hydraulischen Massenstromes an der Rohrwand entsteht ein zu der vorherrschenden Reibung korrelierender RMS-Werteverlauf.

Somit kann über die mathematische Bestimmung der Rohrreibungszahl λ der Kennwertverlauf der RMS-Werte und somit des Prozessgrundrauschens bestimmt werden. Das führt dazu, dass Einzelphänomene, die durch Stoß entstehen und repräsentativ für inhomogene Bestandteile im hydraulischen Massenstrom sind, vom Prozessgrundrauschen durch die Analyse des RMS-Wertes im AE-Signalverlauf getrennt werden können. So kann der homogene und der inhomogene Bestandteil der hydraulischen Massenströmung innerhalb der Analyse des

AE-Signals getrennt voneinander betrachtet werden. Diese Annahme bildet die Grundlage für die weiteren Untersuchungen der inhomogenen Phase eines hydraulischen Massenstroms.

6.3 Feststellung der Differenzierbarkeit der Realkörner

Bei der Unterteilung des mehrphasigen Massenstroms wurde neben einer homogenen Phase auch eine Grobkornphase (inhomogene Phase) identifiziert. Eine Zielgröße bei der gesamtheitlichen Betrachtung der Gewinnung von polymetallischen Knollen durch die MBM ist ein möglichst reiner Massenstrom bestehend aus Wasser und polymetallischen Knollen. Somit ist das Erfassen von Grobkörnern im Materialstrom, insbesondere von polymetallischen Knollen, und die Möglichkeit der Differenzierung der unterschiedlichen Fraktionen eine Grundvoraussetzung für den Einsatz der AET. Die inhomogenen Bestandteile der hydraulischen Massenströmung erzeugen, wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, Schallemissionen durch das physikalische Phänomen Stoß. Mittels AET wird die resultierende elastische Körperwelle (vgl. Kapitel 4.2) erfasst und kann daraufhin analysiert werden (vgl. Kapitel 4.2).

Unter der Betrachtung des in dieser Arbeit beschriebenen gesonderten Anwendungsfalls (vgl. Kapitel 5.3) muss die Umsetzbarkeit der Erfassung der aus dem Stoß resultierenden elastischen Körperschallwellen durch die AET überprüft werden. Darauf aufbauend soll ein Datennutzungskonzept für die Differenzierung von unterschiedlichen Probenkörpern erarbeitet werden. Für die Versuchsdurchführung werden die gleichen Probenkörper, wie, in Kapitel 5.2.1 beschrieben, genutzt.

Die Versuchsdaten werden in drei unterschiedliche Phasen unterteilt. Innerhalb der ersten Phase werden die Messdaten in zwei Versuchsgruppen (gleiches Gewicht g , gleiche Größe mm) aufgeteilt. Die zur Verfügung stehenden Metadaten werden ebenfalls in die Analyse einbezogen. In der zweiten Phase werden die Versuchsgruppen durchmischt, aber die Metadaten-Strukturen über die Versuchskörper werden beibehalten. In der dritten Phase wird der realitätsnahe Anwendungsfall simuliert, indem alle Versuchsgruppen ohne Metainformationen analysiert werden.

6.3.1 Einzeluntersuchungen Realkörner

Für diese Untersuchung werden exemplarisch in Abbildung 6.7 die Ergebnisse der RMS-Werte, je als ein aggregierter Datenpunkt für 10 Versuchsdurchführungen dargestellt. Neben den jeweiligen Datenpunkten wurde auch der Verlauf des arithmetischen Mittels als gestrichelte Linie eingetragen. Die Daten wurden während eines Versuchsdurchlaufs der 4 unterschiedlichen

Realkörner innerhalb der 4 g (gleiches Gewicht - oben) und der 20 mm (gleiche Volumina - unten) Klasse erfasst.

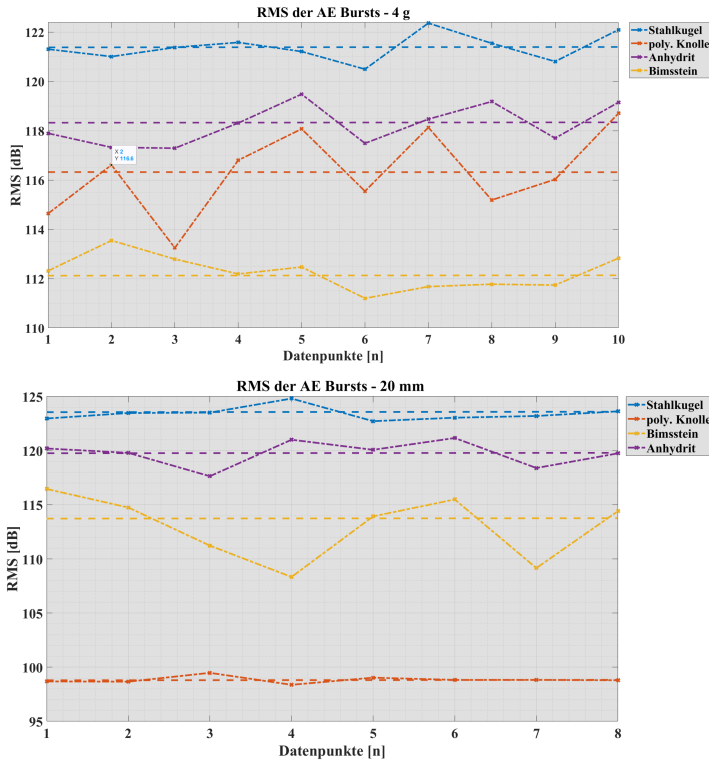


Abbildung 6.7: Teilergebnisse der Realkornuntersuchungen - 4 g oben und 20 mm unten.

Bei der Bewertung der jeweils zu einem Messpunkt aggregierten Datenpunkte können bei unterschiedlichen Materialien unterschiedliche Kennwertverläufe sowohl in der 4 g als auch in der 20 mm Klasse beschrieben werden. Hierbei ist auffällig, dass je größer die physikalische Differenz (Dichte) zwischen den genutzten Probenmaterialien ist, desto eindeutiger unterscheiden sich die Kennwertverläufe. Visualisiert wird dies an der Referenzkugel Stahl und dem Vergleich zu Anhydrit und/oder Bimsstein. Dies trifft auch auf den Vergleich zwischen Anhydrit und Bimsstein zu.

Bezieht man die polymetallischen Knollen mit ein, kann das zuvor beschriebene Bild nur bedingt bestätigt werden, da es teilweise zu Überschneidungen der Ergebniswerte zwischen

zwei Materialien kommt. Eine eindeutige Differenzierung kann erst über die Betrachtung des arithmetischen Mittels durchgeführt werden. Für eine vereinfachte Ergebnisdarstellung werden die errechneten Mittelwerte einer Auswahl an Parametern bezogen auf gesamte Versuchsreihe in Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2: Gemittelte Teilergebnisse der Einzelkornuntersuchungen.

Material	RMS [dB]	MARSE	Max Magnitude [V]	Frequenz Magnitude [Hz]
Stahlkugel 4 g	121,3790	0,0047	0,1861	120590
poly. Knolle 4 g	116,3446	0,0019	0,1123	124760
Bimsstein 4 g	112,2539	0,0016	0,0757	123940
Anhydrit 4 g	118,3241	0,0016	0,0757	124220
Stahlkugel 20 mm	120,5813	0,0058	0,311	119780
poly. Knolle 20 mm	107,6133	0,0013	0,074	114480
Bimsstein 20 mm	113,7372	0,0013	0,079	124500
Anhydrit 20 mm	116,8790	0,0027	0,150	119625

Durch die spezifische Zusammensetzung von polymetallischen Knollen (vgl. Kapitel 2.2.1), kann der Kurvenverlauf in Abbildung 6.7 erklärt werden. Durch polymetallische Zusammensetzung ergeben polymetallische Knollen kein klares Materialgefüge oder klar definierte Härte- und Dichte-Werte und sind somit durch Zufall geprägt. Stuft man polymetallische Knollen übergeordnet ein, liegen die materialspezifischen Parameter nah am Probenmaterial Bimsstein. Dies zeigt sich auch durch die in Tabelle 6.2 dargestellten Ergebnisse. Trotzdem scheint über die Wiederholung von Versuchen, also einer statistischen Analyse, eine Unterscheidung möglich zu sein. Auch gibt dieses dargestellte Ergebnis einen Hinweis darauf, dass vielleicht die Kombination unterschiedlicher Kennwerte ein klareres Ergebnis liefern könnte. Eine relevante Beobachtung während der Datenanalyse war, dass beim Vergleich eines Parameters der einen Analyse mit dem gleichen Parameter der zweiten Versuchsdurchführung nicht zwangsläufig Unterschiede erkennbar sind. Werden alle Kennwerte betrachtet, gibt es aber sowohl innerhalb der Versuche, als auch im Vergleich zwischen den Versuchen Unterschiede. Dies lässt die Vermutung zu, dass eine singuläre Betrachtung eines Parameters nicht ausreichend ist, um eine komplexe Materialstromzusammensetzung charakterisieren zu können. Insbesondere bei einem realen Anwendungsfall mit ungeordneter Vermischung von unterschiedlichen Größen-Bestandteilen und Materialarten wird eine einfache Kennwertbetrachtung die Anforderungen an das Datennutzungskonzept nicht erfüllen.

6.3.2 Alternative Datenanalyse mittels Korrelationsanalyse

Bei der Auswertung großer Datenmengen kann es vorkommen, dass ein einfacher Vergleich der entwickelten Merkmale und Kennwerte nicht zu einer mehrdimensionalen Mustererkennung führt. Diese Mustererkennung kann durch verschiedene Algorithmen des maschinellen Lernens (engl. Machine Learning) aufgebaut werden. Die angewandten Berechnungsmodelle erzeugen klassenübergreifende Muster, die durch deterministische, mathematische Modelle nicht erreicht werden können. Dieses Vorgehen wird in der Literatur (vgl. [149] [150] [151] [152]) ausführlich beschrieben. Themenspezifische Herleitungen können aus Vraetz (vgl. [12]) entnommen werden. [149] [150]

Für die weitere Auswertung wurde sich für eine Kennwertkombination der jeweiligen Klassen und Materialien mittels eines Fine Tree Algorithmus (vgl. [149] [153]) durchgeführt. Die Gesamtanalyse baut auf mehreren Schritten auf. Zunächst werden die jeweiligen Materialien und Klassen separat untersucht. Im zweiten Schritt werden die Materialien einer Klasse jeweils analysiert. Im letzten Schritt werden alle Materialien und Klassen durchmischt analysiert, um einen komplexen mehrphasigen Massenstrom nachzustellen. Exemplarisch für den ersten Schritt wird die Ergebnismatrix der Kennwerte des jeweiligen Materials genutzt, um insgesamt eine Klassifizierung innerhalb der Klassen 4 g und 20 mm durchzuführen. Das Ergebnis wird in Abbildung 6.8 dargestellt.

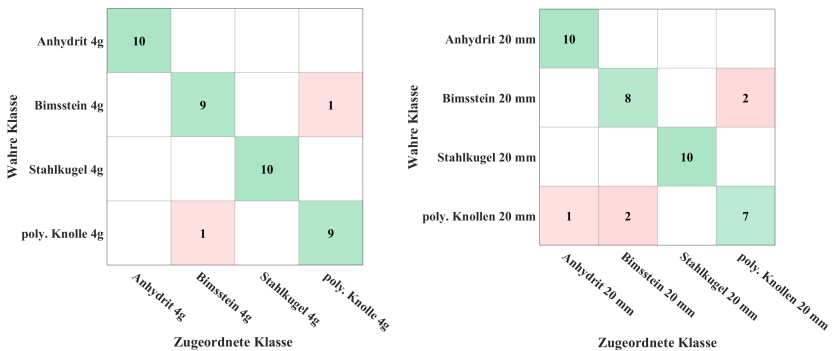


Abbildung 6.8: Klassifizierung der Realkornuntersuchungen; links 4 g, rechts 20 mm.

Dabei wird ein Ausschnitt der Versuche von 10 Realkörnern dargestellt. Innerhalb der Klasse 4 g hat nur eine fehlerhafte Zuordnung zwischen Bimsstein und polymetallischen Knollen stattgefunden und innerhalb der 20 mm Klasse sind es analog 2 Fehler und eine zusätzliche falsche Zuordnung zwischen Anhydrit und polymetallischen Knollen. Somit scheint bei einer

getrennten Analyse der Klassen eine kombinierte Betrachtung der errechneten Parameter eine Zuordnung der jeweiligen Materialien zu ermöglichen. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurden die Messdaten zu einer Analyse mit den jeweiligen Klassen zusammengefasst. Abbildung 6.9 zeigt das Ergebnis der Zuordnung der Materialien basierend auf der Kombination der Kennwerte erneut über den Fine Tree Algorithmus.

Wahre Klasse	Anhydrit 20 mm	7	1	1				1	
	Anhydrit 4g	1	9						
	Bimsstein 20 mm			4	2			3	1
	Bimsstein 4g			1	8				1
	Stahlkugel 20 mm					10			
	Stahlkugel 4g						10		
	poly. Knolle 4g	2		4	1			3	
	poly. Knollen 20 mm	2	1	1				1	5
		Anhydrit 20 mm Anhydrit 4g Bimsstein 20 mm Bimsstein 4g Stahlkugel 20 mm Stahlkugel 4g poly. Knolle 4g poly. Knollen 20 mm							
		Zugeordnete Klasse							

Abbildung 6.9: Klassifizierung der gesamten Realkornuntersuchungen mit Unterscheidung der Materialklassen 4 g und 20 mm.

Wie auch in der vorherigen Analyse findet eine vollständige Zuordnung des Materials Stahlkugel statt. Dabei konnten auch die Materialgrößen richtig zugeordnet werden. Die Analyse durch die Kennwertkombinationen führt auch zu einer fast vollständigen Zuordnung der Materialien Anhydrit und Bimsstein. Innerhalb dieser Klassen gab es leichte Zuordnungsfehler zwischen den unterschiedlichen Korngrößen der jeweiligen Materialien, dennoch wurde sie dem richtigen Material zugeordnet.

Bei der Analyse der polymetallischen Knollen ergibt sich ein leicht anderes Bild. Hier kam es nur zu einer richtigen Zuordnung von ungefähr 50 %. Die häufigsten Fehler traten hierbei bei der Unterscheidung von polymetallischen Knollen mit einem Gewicht von 4 g und Bimsstein mit einem Durchmesser von 20 mm auf. Trotzdem wurde der Ansatz als zufriedenstellend bewertet und in einer letzten Analyse weiter untersucht.

6.3.3 Parametrisierung der Stoßphänomene

Aufgrund der Realsituation, dass der Input-Massenstrom innerhalb des in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsfalls unbekannt ist, wird abschließend eine Analyse der Messdaten ohne eine Klassifizierung durchgeführt. Somit wurden alle Klassen und Materialien bei der Analyse zufällig betrachtet. Hinzu kommt, dass auch die Labels der jeweiligen Klassen der Analyse nicht mehr zu Verfügung gestellt wurden. [153]

Ergänzend dazu wurde unter dem Gesichtspunkt der Entwicklung eines Konzeptes zur Anwendung der AET zur Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen in der Tiefsee eine Kennwertoptimierung durchgeführt. Dabei werden alle Kombinationen von Kennwerten qualitativ auf ihren Einfluss auf den Erfolg der Analyse untersucht. Dabei sollen die Kennwerte mit dem größten Einfluss lokalisiert und somit das Ergebnis der Analyse verbessert werden. Hinzu kommt, dass eine Reduzierung der errechneten Kennwerte sich positiv auf die benötigte Rechendauer einer genutzten Auswertesoftware auswirkt. Für die Berechnung der Zuordnung wurden schlussendlich von den zu Beginn 15 Kennwerten nur noch 3 genutzt. Mit der Kombination der RMS, MARSE und der Varianz konnten die besten Ergebnisse erzielt werden. Abbildung 6.10 zeigt das Ergebnis der letzten Analyse unter Einbeziehung der vorher durchgeführten kennwertbasierten Optimierung.

Wahre Klasse	Anhydrit	17			3
	Bimsstein		11		9
	Stahlkugel	1		19	
	poly. Knolle	3	8		9
		Anhydrit	Bimsstein	Stahlkugel	poly. Knolle
		Zugeordnete Klasse			

Abbildung 6.10: Klassifizierung der gesamten Realkornuntersuchungen ohne Unterscheidung der Materialklassen 4 g und 20 mm.

Bei dieser Darstellung bestätigt sich die zuvor schon zu erkennende Tendenz, dass die Klassifizierung der Materialien Stahlkugel (1 Falschzuordnung) und Anhydrit (3 Falschzuordnungen) sehr gut umsetzbar ist. Hinzu kommt, dass eine Stahlkugel als Anhydrit verortet

wurde und somit der deutlichen dichteren und härteren Fraktion zugerechnet wurde. Somit können die Materialien, die eine materialspezifische Differenz zu den deutlich weicheren Materialien Bimsstein und polymetallische Knollen haben, auch dementsprechend abgegrenzt werden.

Dahingegen findet eine häufige Fehlzuordnung bei der Differenzierung von polymetallischen Knollen und Bimsstein statt. Diese sich ähnelnden Materialien (Dichte, Struktur) werden zu ungefähr 50 % der jeweils anderen Klasse zugeordnet. Besonders bei diesen beiden Materialien wird die hier umgesetzte kennwertbasierte Zuordnung unzureichend durchgeführt und ist somit für die Detailnutzung nicht anwendbar.

6.4 Resultierendes Datennutzungskonzept

Zwei Hauptziele sollen mit dem Datennutzungskonzept erreicht werden. Zum einen soll die Messaufgabe erfolgreich erfüllt werden und zum anderen muss innerhalb des Messkonzeptes eine Datenreduktion stattfinden, um eine Übertragung der relevanten Informationen zum Operator im BUS zu ermöglichen. Die gesamte Umsetzung der Analyse soll im Industrie-Computer (CompactRio) innerhalb des Messkonzeptes integriert werden (vgl. Kapitel 4.3). Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen ist das in Abbildung 6.11 dargestellte schrittweise Vorgehen der Datennutzung und Auswertung entwickelt worden.

Nach der Zwischenspeicherung der über den AE-Sensor erfassten Rohdaten, kann der Datensatz für ein vordefiniertes Zeitfenster über einen vordefinierten Grenzwert (Rohrreibungszahl überführt in den Effektivwert RMS) in zwei Datensätze aufgeteilt werden. Der erste Teil des Datensatzes steht repräsentativ für die homogene Phase des mehrphasigen hydraulischen Massenstromes. Durch dieses auch als Prozessgrundrauschen bezeichnete Datenset können mittels Analyse des Effektivwerts (RMS) über die Rohrreibungszahl Rückschlüsse auf das Mengenverhältnis an Feinst-Feststoffen in der homogenen Phase im hydraulischen Massenstrom gezogen werden. So kann im Massenstrom die Belastung durch Sedimente untersucht werden.

Der zweite Teil des Datensatzes stellt die inhomogene Phase des hydraulischen Massenstromes und somit die Grobkörner dar. Dieser Teil des Datensatzes muss noch weiteren Datenverarbeitungsschritten unterzogen werden, um die relevanten Informationen zu extrahieren. In einem ersten Schritt können über die adaptive Burstdetektion die transienten Einzelphänomene aus dem kontinuierlichen Signal extrahiert werden. Die extrahierten Signale werden mittels Kennwert-Kombination untersucht. Nach der vordefinierten Kennwertzuordnung und der Klassifizierung der transienten Phänomene kann ein Rückschluss auf die Zusammensetzung der inhomogenen Phase des hydraulischen Massenstromes ermöglicht werden.

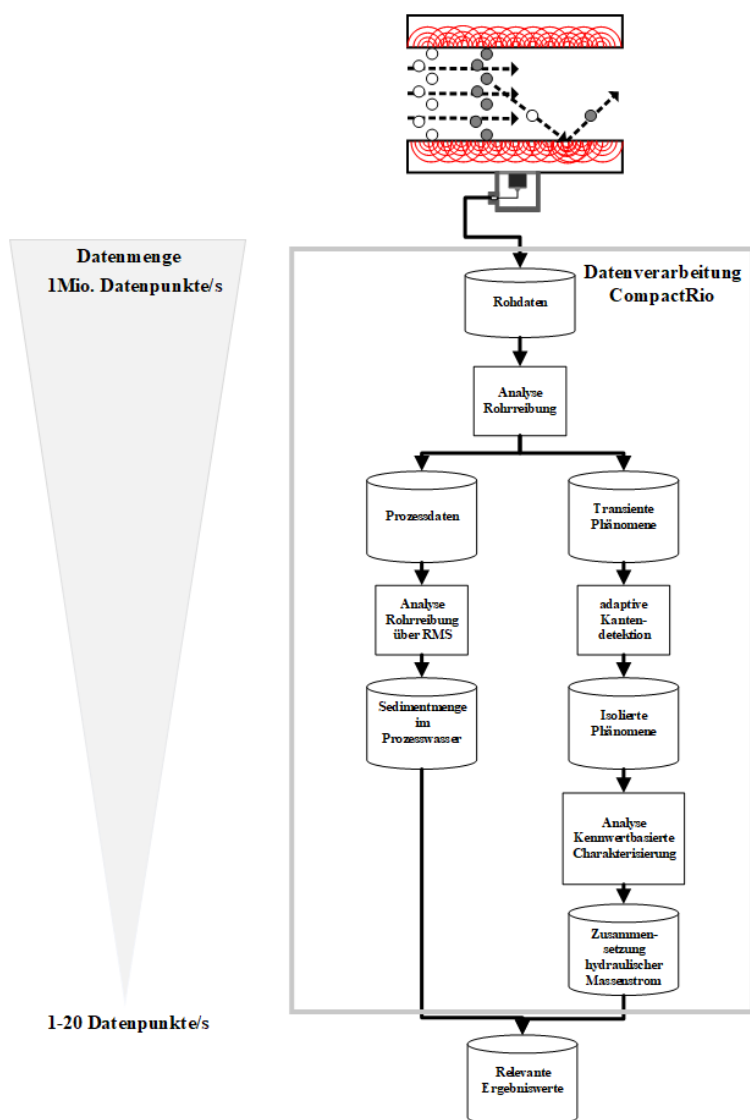


Abbildung 6.11: Übersicht über das Datennutzungskonzept im CompactRio nach der Datenerhebung.

Über den gesamten Ablauf der Datenauswertung wird die Datenpunktdichte von 1 Mio. Messpunkte pro Sekunde auf die für die Messaufgabe relevanten Kennwerte reduziert. Durch diese Reduktion der Messdaten ist die Übertragung der Datenpunkte zum Operator im BUS über eine bis zu 6000 m lange Kabelleitung möglich [10]. Die Frequenz, in der die relevanten Kennwerte aggregiert und einem Kontrollsystem zur Verfügung gestellt werden, hängt von zwei Limitierungsfaktoren ab. Zum einen von der Rechenleistung der gewählten CPU-Einheit und zum anderen von der durch die Gesamt-Prozesssteuerung definierten Echtzeit. Diese Faktoren müssen bei der finalen Implementierung des Messsystems beachtet werden.

7 Kritische Würdigung des Gesamtkonzeptes

Die Tiefsee ist ein vollständig neues Arbeitsumfeld für die primäre Rohstoffgewinnung. Die technologische Realisierung des Tiefseebergbaus bedarf einer Vielzahl von Neuentwicklungen und Transfer von Technologien und Konzepten, um zum einen die Gewinnung der Rohstoffe zu ermöglichen und zum anderen auch umwelttechnisch minimalinvasiv zu arbeiten.

Die beiden Hauptanforderungen gliedern sich auf in den Erhalt einer sicheren Rohstoffversorgung und die Anforderung der Nachhaltigkeit. Somit müssen von Beginn an die umfangreichen Anforderungen beider Thematiken betrachtet werden, um ein bestmögliches System für die kommerzielle Umsetzung des Tiefseebergbaus zu entwickeln.

Bezogen auf den Inhalt dieser Arbeit wurde innerhalb der Herleitung zum Themenbereich Tiefseebergbau und der Darlegung der Problemstellung eine Vielzahl von Anforderungen aufgestellt, die in den Teilbereichen der Analytik und Auswahl der Sensortechnologie, des Messkonzeptes und Datennutzungskonzeptes detailliert und ergänzt wurden.

Im Folgenden sollen die jeweiligen erarbeiteten und dargestellten Ergebnisse bewertet und kritisch diskutiert werden. Abschließend werden die aufgestellten Forschungsfragen und erarbeiteten Antworten resümiert.

7.1 Bewertung im Hinblick auf die Anforderungen

Zur Bewertung des Gesamterfolges der in dieser Arbeit beschriebenen konzeptionellen Entwicklung wird in Tabelle 7.1 eine Gesamtübersicht über die in Kapitel 2.5 aufgestellten Anforderungen und die erreichten Ergebnisse gegenübergestellt und miteinander abgeglichen.

Tabelle 7.1: Erfüllungsgrad der Anforderungen an ein Messsystem zum Einsatz in der Tiefsee zur Erfassung und Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen

Anforderungsbereich	Rahmenbedingungen	Anforderungen an die Entwicklung	Erfüllt ja/nein
Tiefseeumgebung	Salzwasserresistent	Korisionsbeständige Werkstoffe	ja
	Wassertiefe (bis zu 6000 m)	Druckresistent (600 bar), niedrige Temperaturen (1-4 °C)	ja
	Robust gegen mechanische Einflüsse durch die Bewegung der MBM	Stoß- und Vibrationsresistenz	ja
	Umweltverträglichkeit	Schadstofffreie Materialien	ja
Konstruktive Anforderungen	Platzmangel	Miniaturisierte, modulare Anwendung	ja
	In das Gesamtkonzept der MBM integrierbar	IT-Infrastruktur MBM integrierbar, geringer Strombedarf, Inline-Applikation notwendig	ja
	Flexible und stabile Applikation des Sensorsystems	Hohe Verfügbarkeit der Datenaufnahme	ja - Feldtest fehlt
Messanforderungen	Skalierbarkeit	Modularität der Software, Modularität der Hardware	ja
	Automatisierte Anwendung	Automatisierte Datenaufnahme, Datenverarbeitung	ja
	Remotezugriff	Remote-Zugriff auf Software, Datenverarbeitung, IPC und Speichereinheit	ja
Prozesstechnische Anforderung	Messaufgabe Charakterisierung der homogenen Phase der hydraulischen Massenströmung	Detektion eines mehrphasigen hydraulischen Massenstroms, qualitativ hochwertige Datenaufnahme	ja - Feldtest fehlt

7.1.1 Einsatzfähigkeit Tiefseeumgebung

Für die technologische Umsetzung und Anwendung der AET für eine Nutzung im Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus musste ein innovativer Ansatz gewählt werden. In einem iterativen Prozess, basierend auf dem Stand der Technik, Recherchen, Fachgesprächen und Labor-

/Feldtests, wurde das hier beschriebene (vgl. Kapitel 5.3) Endkonzept entwickelt.

Basierend auf einer FEM-Analyse wurden die beschriebenen druckresistenten (bis zu 6000 m Wassertiefe) Gehäuse konstruiert und umgesetzt. Die genutzten Materialien sind korrosionsbeständig (Salzwasser) und umweltverträglich. Für die Kabelverbindungen wurden extra für diesen Einsatz spezifische für die Tiefsee geeignete Kabel und Steckverbindungen genutzt und auf ein Minimum reduziert.

Im Weiteren wurde bei den Applikationen auf eine Flansch-Verbindung gesetzt. Diese ist flexibel, stabil und kann genügend Anpressdruck für den Einsatz der Sensoren erzeugen. Die gesamte mechanische Umsetzung ist für einen Temperaturbereich von -20 bis 55 °C geeignet. Somit wurden alle spezifischen Anforderungen an ein in der Tiefsee angewendetes System erfüllt.

Das aktuelle Konzept kann für einen kommerziellen Gebrauch weiter optimiert werden. In dieser Arbeit wird Labormesstechnik genutzt und in den Tiefseebergbau transferiert. Für den Breitengebrauch sollte Industriegesstechnik genutzt werden, was in Folge die Spezifikationen der mechanischen Anwendung positiv beeinflussen kann. Zum Beispiel können druckresistente Sensoren auf eine Einhausung verzichten. Eine integrierte Messtechnik (wie zum Beispiel ein im Sensor verbauter Verstärker) könnte zu weiteren Platzeinsparungen führen.

Messtechnik, die unempfindlich gegen Flüssigkeiten ist, kann in ihrer Einhausung mit dieser Flüssigkeit geflutet werden, um einen Druckausgleich zur Außenatmosphäre im Einsatzgebiet herzustellen und weitere Material- und Gewichtseinsparungen zu erzielen. Die Anforderungen an Umweltverträglichkeit sollten auch zukünftig bei der Auswahl der genutzten Materialien berücksichtigt werden, um einen möglichst umfangreichen Umweltschutz gewährleisten zu können.

7.1.2 Exkurs - Dissipation an Grenzschichtübergängen

Die Untersuchung der Dissipation an Grenzschichtübergängen von AE-Wellen war eine gesonderte, in diesem Zusammenhang untersuchte Fragestellung. Für die Konstruktion eines tiefseefähigen Sensorgehäuses musste sichergestellt werden, dass die ausgewählten Materialien eine qualitativ hochwertige Übertragung von durch AE-Phänomene erzeugte Körperschallwellen hin zum AE-Sensor sicherstellen.

Hierfür wurden mehrere tiefseefähige Materialien auf ihr Übertragungsverhalten getestet. Über zwei Prüfverfahren (Signalgeneratortest und Kugelfalltest, vgl. Kapitel 5) konnte eine Materialkombination erarbeitet werden, die den Anforderungen für eine AE-Messung zur Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen in der MBM genügt.

Insbesondere innerhalb der Testreihen mit Realkörnern konnten dabei Erkenntnisse gesammelt werden, die Raum für weitere Optimierungen geben. Innerhalb dieser Arbeit wurde hauptsächlich die Dichte, das Volumen und das Gewicht als Unterscheidungskriterien der Realkörner genutzt. Zum einen ist aufgefallen, dass sich die Anwendung der Realkörner zur Erzeugung von AE-Phänomenen durch Stoß (Kugelfalltestversuch) im Vergleich zu dem Signalgeneratortest positiv auf die Entstehung (Energie) einer AE-Welle und zum anderen positiv auf die Varianz der erzeugten AE-Phänomene auswirkt.

Dies lässt die Vermutung zu, dass nicht nur die hier betrachteten physikalischen Parameter einen Einfluss auf die durch Stoß erzeugten AE-Phänomene haben. Eine erweiterte Untersuchung beispielsweise von Härte, Struktur und Spaltbarkeit/Porosität kann weitere Informationen über Zusammenhänge zwischen auf Stoß basierender Energieübertragung in Form von AE-Wellen liefern. Darüber hinaus könnte über weitreichende Untersuchungen der Einflussparameter und der materialspezifischen Muster bei der Entstehung von AE-Wellen eine Datenbank erarbeitet werden. Diese allgemeingültige Datenbank könnte als Grundlage/Ausgangspunkt für die Differenzierung unterschiedlicher Materialien genutzt werden. So könnte die Auslegung der Datenanalytik für unterschiedliche Anwendungsfälle der AET vorab parametrisiert und somit vereinfacht werden. Dies kann einen allgemeinen Mehrwert für die Nutzung der AET für die Charakterisierung von Materialien und Materialströmen in der Rohstoffindustrie und in der allgemeinen Anwendung liefern.

7.1.3 Konstruktive Anforderungen an die Messtechnik

Die Entwicklung des Konzeptes wurde zusammen mit einem Systemhersteller für den kommerziellen Tiefseebergbau umgesetzt. Aus dieser Zusammenarbeit definierten sich auch die konstruktiven Anforderungen an die Mess- und Sensortechnik. Erfüllt wurden diese durch den Einsatz eines cRio-9040 Mikrocontrollers als Kern der Messtechnik. Diese SPS benötigt mit 24 V nur eine geringfügige Spannung und wird von der MBM versorgt. Für den Datenaustausch wird ein einzelnes Netzkabel an das Gesamtsystem der MBM angebunden. Im Weiteren kann die Messdatenaufnahme autonom durch ein analoges Triggersignal (5 V - 10 V), zum Beispiel gespeist von der Aktivierung der Förderpumpe innerhalb der MBM, gesteuert werden. Auch kann der genutzte Mikrocontroller auf 3 Sensoren bei dem derzeitigen Datennutzungskonzept durch das analoge Eingangsmodul des Typs NI 9775 erweitert werden.

Die Einsatzfähigkeit wurde durch eine Vielzahl von Leistungstests, wie einem einjährigen Dauertest sowie ergänzend durch Vibrationstests validiert. Jedoch wurde die Messtechnik insgesamt nicht in einem vollständigen Feldtest genutzt und somit ist der Leistungstest für die kommerzielle Anwendung noch ausstehend.

Genau in diesem Bereich können gegebenenfalls noch Optimierungen notwendig sein. Zum einen können durch die Weiterentwicklung der MBM zu einem kommerziell nutzbaren Abbau-Fahrzeug die konstruktiven Anforderungen erweitert oder geändert werden. Auch kann die Leistungsfähigkeit der SPS weiter durch die Optimierung des Datennutzungskonzeptes gesteigert werden. Dies kann aber auch durch das Voranschreiten von technischen Entwicklungen in der Leistungsfähigkeit von Prozessoren und Platinen geschehen. Von Beginn an wurden sich ändernde konstruktive Anforderungen durch den modularen Aufbau in das Gesamtkonzept berücksichtigt.

7.1.4 Erfüllung Messanforderung

Das Messkonzept zielt auf eine Inline-Applikation der Sensortechnologie ab. Dies impliziert eine Sensor-Applikation direkt auf dem zu charakterisierenden Materialstrom, eine ortsnahe Datenanalytik und eine Echtzeit Bereitstellung der benötigten Informationen zur Steuerung des Abbaus der polymetallischen Wertstoffe in der Tiefsee.

Durch die Nutzung der AET ist die Inline-Applikation sichergestellt und kann je nach Bedarf angepasst werden. Im Weiteren findet die Datenaufnahme, -verarbeitung und -analyse ortsnah auf der in der Messkette implementierten SPS statt. Hierfür wurde die Datenverarbeitung und -analyse in modulare Softwarepaketen realisiert, um flexibel auf sich ändernde Anforderungen in der schrittweisen Datenverarbeitung und Informationsbereitstellung reagieren zu können.

Die derzeitige Umsetzung hat die bekannten Anforderungen erfüllt und sich als ausreichend leistungsfähig bewiesen. Nichtsdestotrotz können sich Anforderungen im weiteren Entwicklungsverlauf des Tiefseebergbaus verschieben, was zu einer notwendigen Überarbeitung des hier entwickelten Konzeptes führt. Somit sind Optimierungspotentiale vorhanden, die aber durch den Aufbau der Messkette und des Datennutzungskonzeptes inklusive der genutzten Softwarekomponenten umsetzbar sind.

7.1.5 Prozesstechnische Anforderungen

Mit Betrachtung der Tabelle 7.1 kann zusammengefasst werden, dass eine Vielzahl der zuvor aufgestellten Anforderungen von dem entwickelten Messkonzept erfüllt werden konnte. Sowohl die Anwendbarkeit der AET für die beschriebene Messaufgabe im Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus, als auch die Differenzierung zwischen den homogenen und inhomogenen Bestandteilen eines hydraulischen Massenstromes konnte aufgezeigt werden. Im Weiteren wurde eine Charakterisierung der Zusammensetzung der homogenen Phase der hydraulischen

schen Massenströmung erfolgreich umgesetzt. Eine über die Rohrreibungszahl festgelegte Grenzwertanalyse ermöglicht die Detektion von feinen Feststoffen (Sedimente) kleiner 1 cm. So kann der vorgelagerte Sedimentabscheider in seiner Funktionalität erfolgreich durch die Charakterisierung der Zusammensetzung des homogenen Bestandteils der hydraulischen Massenströmung kontrolliert werden und die Soll-Größen mit den Ist-Größen abgleichen. So ist die Einhaltung der Grenzwerte für den Transport von Sedimenten zum BUS kontrollierbar. Dies kann die Prozesssicherheit und die Einhaltung von Vorgaben für die Förderung sicherstellen.

Die Charakterisierung der Bestandteile der inhomogenen Phase der hydraulischen Massenströmung stellte eine weitere Anforderung dar. Hierbei sind die erreichten Möglichkeiten des Messprinzips differenziert zu betrachten. Die Detektion der inhomogenen Phase konnte erfolgreich umgesetzt werden und durch das spezielle Vorgehen der Burstdetektion im Rohsignal detektiert werden. Ebenso ist eine Charakterisierung unterschiedlicher Bestandteile im Massenstrom, basierend auf der Analyse der extrahierten transienten Phänomene, durchführbar.

Über die algorithmenbasierte Kennwertkombination könnten die untersuchten Materialien Stahl, Anhydrit und Bimsstein mit großem Erfolg differenziert werden. Bei Hinzunahme der polymetallischen Knollen wird die erfolgreiche Differenzierung jedoch erschwert. Besonders bei der Materialcharakterisierung von Bimsstein und polymetallischen Knollen weist die Analyse Ungenauigkeiten auf. Somit konnte eine detailgetreue Zuordnung aller einzelner Komponenten einer komplexen inhomogenen Phase eines hydraulischen Massenstroms nicht zu Genüge umgesetzt werden. Dieser geminderte Erfolg der vollständigen Charakterisierung der untersuchten Materialien kann auf die polymetallische Zusammensetzung der Knollen zurückgeführt werden.

Durch den inhomogenen Aufbau kann die Dichte der polymetallischen Knollen innerhalb einer Knolle variieren. Dementsprechend ist mit der hier vorhandenen Datengrundlage nur begrenzt ein vollständiges Profil der polymetallischen Knollen im AE-Signal erstellbar. Somit kann es bei der Auswertung und Zuordnung von polymetallischen Knollen zu Verwechslungen mit physikalisch vergleichbaren Materialien (hier Bimsstein und polymetallische Knollen) kommen.

Bei der Implementierung des Datennutzungskonzeptes in die Realanwendung kann basierend auf der Laufzeit und der größeren Anzahl an verfügbaren Daten, eine Optimierung stattfinden. Hierfür können, wie von Vraetz beschrieben (vgl. [12]), innovative Konzepte der Datenanalyse, wie das maschinelle Lernen, angewendet werden. Die von Vraetz beschriebenen Konzepte und die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen weisen auf einen erfolgreichen Einsatz der AET zur vollständigen und nahezu fehlerfreien Charakterisierung der Grobkornphase einer mehrphasigen hydraulischen Massenströmung hin.

7.2 Bewertung im Hinblick auf die Forschungsfragen

Im Kontext der Rohstoffgewinnung ist eine steigende Nachfrage nach Sensortechnologien als Grundlage für die Digitalisierung des primären Rohstoffsektors festzustellen. Somit wird in einer Vielzahl von Projekten an einer Implementierung von neuartigen sensortechnologischen Anwendungen in der Rohstoffgewinnung geforscht. Ein eigener Themenbereich in diesem Zusammenhang ist die Materialstromcharakterisierung und insbesondere die in dieser Arbeit behandelte rohrgestützte hydraulische Materialstromcharakterisierung im Arbeitsumfeld des Tiefseebergbaus. Für diese Anwendung wurde bis dato noch keine sensortechnisch gestützte Materialstromcharakterisierung umgesetzt.

Welche Sensortechnologie und messtechnische Umsetzung kann erfolgreich für die Anwendung in der Tiefsee bei der polymetallischen Knollengewinnung umgesetzt werden? - Basierend auf einer Analyse des Stands der Technik und vergleichbarer terrestrischer Anwendungen wurde sich für eine auf Körperschall basierende, aber spezifizierte, Sensortechnik (AE) entschieden. Die AET ist eine inlineapplizierbare passive Sensortechnologie, die miniaturisiert anwendbar ist. Für eine Anwendung in der Tiefsee wurden erfolgreich die physikalischen Anforderungen mittels eines tiefseefähigen Sensorgehäuses umgesetzt und umfangreich getestet. Somit ist ein prinzipieller Einsatz der AET physikalisch in der Tiefsee möglich. Das entwickelte und eingesetzte Sensorsystem basiert auf Equipment was für den Einsatz im Labor oder geschützten Umgebungen ausgelegt ist. Nach dem erfolgreichen Test in der Tiefsee können durch industriell gestützte Weiterentwicklungen Optimierungen und auch eine Standardisierung an der Hardware vorgenommen werden. Dies bezieht sich auf einen wasser- und druckresistenten Sensor aus spezifischen tiefseetauglichen Materialien, die ein Sensorgehäuse überflüssig und eine Applikation einfacher und flexibler gestalten. Somit kann ein Transfer in andere Anwendungen (Saugbaggerei, Küstenbergbau und genereller hydraulischer Massentransport) umgesetzt werden.

Kann ein mehrphasiger hydraulischer Massenstrom erfolgreich datentechnisch erfasst werden? - Die Prozessführung innerhalb der MBM basiert auf zwei Hauptsegmenten. Zum einen auf der mittels Coanda-Effekt umgesetzten Feststoff-Aufnahme und zum anderen auf der Sedimentabscheidung innerhalb der MBM. Hierbei ist eine Hauptanforderung die möglichst optimierte Aufnahme von polymetallischen Knollen und die Trennung der polymetallischen Knollen von mit aufgenommenen Sedimenten, um einen Zielmassenstrom aus Wertmineralien und klarem Wasser an den Förderstrom (VTS) zu übergeben. Zur Überwachung dieser Prozessführung muss das eingesetzte Sensorsystem in der Lage sein, einen hydraulischen Massenstrom qualitativ erfolgreich zu detektieren. Diese Anforderung konnte während der Entwicklung und Überprüfung von unterschiedlichen eingesetzten Materialien für die Umsetzung der Messstelle erfolgreich erfüllt werden. Hierbei wurden mögliche dissipative

Einflüsse der eingesetzten Materialien und die entstehenden Materialschichtübergänge, aber auch der Einfluss von Druck auf die Messstelle, untersucht. Insgesamt kann die Detektion von Massenströmen durch die entwickelte Anwendung als erfolgreich bewertet werden. Eine in diesem Zusammenhang fehlende Untersuchung ist der Einfluss von Störgeräuschen durch den Einsatz im Realumfeld im Zusammenhang mit der MBM. Vibrationen durch laufende Pumpen, das Fahrwerk, Eigenbewegungen von MBM Segmenten, die Aufnahme von Materialien und weitere äußere Einflüsse bei der Gewinnung von polymetallischen Knollen, konnte durch den fehlenden Feld-Einsatz in der Tiefsee nicht überprüft werden. Dies muss bei einer Weiterentwicklung der Sensortechnologie in Betracht gezogen werden.

Können durch eine Datenanalyse unterschiedliche Zusammensetzungen des Massenstroms erkannt und charakterisiert werden? - Wie zuvor beschrieben, stellt nicht nur die qualitative Detektierung des hydraulischen Massenstroms eine Anforderung dar. Im Weiteren müssen zur Überwachung der Prozessführung auch unterschiedliche und sich verändernde Zusammensetzungen des hydraulischen Massenstroms festgestellt und charakterisiert werden. Diese Anforderung konnte mittels Datenverarbeitung und -analyse erfolgreich umgesetzt werden. Ergänzend mit der mathematischen Berechnung der vorhandenen Rohrreibung kann so ein Grundzustand einer homogenen Strömung (klares Wasser) definiert werden. Von diesem Grundzustand aus ist dann über die Analyse des RMS eine Änderung in der Zusammensetzung der Strömung detektierbar. In diesem Zusammenhang ist der Rückschluss möglich, dass bei steigendem RMS-Wert der Anteil an Feinpartikeln in der hydraulischen Massenströmung ebenfalls ansteigt. Somit korreliert der Energiegehalt (RMS) des AE-Signals mit der Reibung zwischen hydraulischem Massenstrom und Rohrwand (Rohrreibung). Dieser Erfolg muss in einem weiteren Schritt noch in den Zusammenhang mit den prozesstechnischen Grenzwerten des kommerziellen Tiefseebergbaus gebracht werden. Dies ist über eine einfache Anpassung in der Analyse-Software und im Nachhinein bei der praktischen Anwendung parametrisierbar.

Können erfolgreich Grobkörner detektiert werden? - Abschließend muss für eine erfolgreiche Anwendung noch der inhomogene Anteil der hydraulischen Strömung detektiert und charakterisiert werden. Somit soll zum einen festgestellt werden, ob sich polymetallische Knollen (Wertminerale) im Zielmassenstrom befinden und zum anderen ob auch unerwünschte Bestandteile in der Materialströmung vorhanden sind. Unter Laborbedingungen konnte dies mit unterschiedlichen Materialkörnern erfolgreich nachgewiesen werden.

Die im Labor untersuchten Materialien entsprachen nicht vollumfänglich den in der Tiefsee anwesenden Komponenten. Bis auf polymetallische Knollen konnte die Charakterisierung nur qualitativ durchgeführt werden. Trotzdem lässt der im Labor erreichte Erfolg den Rückschluss auf eine erfolgreiche Anwendung unter Realbedingungen zu, welche bei einem Feld-Einsatz validiert werden muss.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Tiefseebergbau stellt eine wichtige Komponente für eine sichere und stabilere Rohstoffversorgung von morgen dar. Durch umfangreiche Vorkommen an polymetallischen Rohstoffen kann der immerwährende steigende Bedarf der globalen Industrie auch zukünftig gedeckt werden. Insbesondere polymetallische Knollen sind durch ihre Lage in den Freiwasserzonen der großen Weltmeere hervorzuheben. Durch eine neutrale Verwaltung der IMB können so von Rohstoffimporten abhängige Wirtschaftsregionen, wie beispielsweise die EU, ihre Lieferketten zum einen resilienter gestalten und zum anderen diversifizieren. Der Abbau von Lagerstätten in der Tiefsee birgt nicht nur politische und ökologische, sondern auch unbekannte technische Herausforderungen.

Innerhalb dieser Arbeit wurde eine Aufgabenstellung aus dem Bereich der polymetallischen Knollengewinnung im Themenkomplex Tiefseebergbau bearbeitet. An eine Realisierung der polymetallischen Knollengewinnung werden eine Vielzahl von Anforderungen gestellt, die unter anderem aufgrund der Tiefseenumgebung nur mittels innovativer Technologien umsetzbar sind. Hierzu gehört die Detektion und Charakterisierung von mehrphasigen hydraulischen rohrgestützten Massenströmen innerhalb der MBM. Mit Hilfe einer für diesen Einsatz konzipierten Sensortechnologie sollen diese spezifischen Anforderungen erfüllt werden. In dieser Arbeit wurde sich mit der Konzeptionierung eines solchen Messsystems, aufgeteilt in die physikalische Anwendung der Messtechnik in der Tiefsee, die softwarebasierte Verarbeitung sowie die Analyse der aufgenommenen Daten (Datennutzungskonzept), befasst.

Einleitend wurde das Themenfeld abgegrenzt und der Tiefseebergbau, die wirtschaftlichen Treiber und die limitierenden Faktoren der polymetallischen Knollengewinnung beschrieben. Dabei wurde auf wirtschaftliche Potenziale und die biologischen, physikalischen und geologischen Besonderheiten eingegangen. Anhand eines beispielhaften Konzeptes für die kommerzielle Umsetzung der polymetallischen Knollengewinnung in der Tiefsee wurden technische und umweltbezogene Anforderungen aufgezeigt und definiert. Expliziter wurde dabei auf die in der MBM vorhandenen Massenströme und das Förderkonzept eingegangen. Das Förderkonzept basiert auf der Strömungsfördertechnik, deren Grundlagen in diesem Zusammenhang, spezifiziert auf das Verhalten von unterschiedlichen Phasen einer inhomogenen hydraulischen rohrgestützten Massenströmung, beschrieben wurden. Abgeschlossen wurde mit der Definition der Anforderungen an ein in der Tiefsee arbeitendes Sensorsystem und den

in dieser Arbeit behandelten Forschungsfragen.

In der Rohstoffindustrie finden immer mehr unterschiedliche Sensortechnologien Anwendung und bilden den aktuellen Stand der Technik ab. Sie werden unter anderem genutzt, um eine höhere Transparenz von ablaufenden Prozessen zu erzeugen, eine optimierte Prozessführung zu unterstützen oder die Anwesenheit von Menschen in direkter Nähe zu bergbaulichen Prozessen zu verringern. Über die Unterscheidung zwischen Prozessmesstechnik und -analytik wurden unterschiedliche Konzepte zur sensortechnischen Stoffstromerfassung dargelegt. Die Vor- und Nachteile der übergeordneten Gruppen zur Umsetzung einer Inline-Prozessanalytik (Verfahren basierend auf Elektromagnetik oder Körperschall) führten zu der Entscheidung ein spezielles auf Körperschall basierendes Verfahren, die AET, für die Entwicklung des Messsystems für den Einsatz in der Tiefsee zu nutzen. Über den Vergleich mit schon umgesetzten Anwendungen zur Materialcharakterisierung im Bergbau wurde herausgearbeitet, dass für die definierten Fragestellungen noch kein umgesetztes System vorhanden ist.

Die so ausgewählte AET wird darauf folgend abgegrenzt und in ihre grundlegenden Wirkmechanismen zerlegt. Dabei wird auf die Entstehung von AE-Phänomenen und das Verhalten von AE-Wellen in Festkörpern mit einem Hauptaugenmerk auf dissipative Einflüsse, insbesondere bei Grenzschichtübergängen, eingegangen. Um diese AE-Phänomene sensortechnisch erfassen zu können, wird die genutzte Messtechnik konzipiert. Darauf aufbauend werden die zur Datenauswertung genutzten unterschiedlichen Möglichkeiten der Analyse beschrieben.

Die ersten Grundlagenversuche wurden der konstruktiven Umsetzung einer AET-Messung in der Tiefsee gewidmet. Für die Entwicklung eines tiefseefähigen Sensorgehäuses zur Inline-Anwendung wurde sich explizit mit dem Einfluss der Dissipation von AE-Wellen bei Grenzschichtübergängen zwischen abweichenden Materialien auseinandergesetzt. In zwei unterschiedlichen Messverfahren (Signalgeneratortest und Kugelfalltest) wurde experimentell eine Materialkombination herausgearbeitet, die sich qualitativ bestmöglich auf einen Grenzschichtübergang von AE-Wellen in diesem Anwendungsfall auswirkt. Die genutzten Materialien wurden durch vorgelagerte Untersuchungen und durch das Anforderungsprofil der Tiefsee ausgewählt und begrenzt. Abschließend wurde das resultierende Sensorgehäuse mittels einer FEM-Analyse für den Einsatz in der Tiefsee überprüft und als nutzbar definiert.

Die Hauptfragestellung wurde in mehreren aufeinander aufbauenden Laboruntersuchungen bearbeitet. Um eine Charakterisierung der unterschiedlichen Phasen einer inhomogenen Strömung umsetzen zu können, wurden Versuche mit homogenen oder teilhomogenen Strömungen und mit inhomogenen (Grobkornphase) Strömungen durchgeführt und deren Ergebnisse analysiert. Dabei wurde eine Korrelation zwischen dem Massenanteil an Fein-/Feinstfraktionen mit dem RMS Wert (Energiewert) des aufgenommenen AE-Signals festgestellt. Dieser Zusammenhang wurde sowohl mathematisch, als auch experimentell über

die Rohrreibung nachgewiesen. Dies resultiert in der Möglichkeit homogene Phasen einer komplexen Strömung im AE-Signal von den inhomogenen, insbesondere der Grobkornphase, zu trennen. Das erleichtert zum einen die Charakterisierung der Bestandteile der Grobkörner im Massenstrom, ermöglicht aber zum anderen auch die Überwachung der Funktionsweise des Aufbereitungsaggregats (Sedimentabscheider) in der MBM. So können sich verändernde Zustände des Fördermassenstroms, bezogen auf den Anteil von Sedimenten im Massenstrom, detektiert werden. Dies trägt zur Erreichung des prozesstechnischen Ziels, der Erzeugung eines Fördermassenstroms nahezu vollständig bestehend aus Wasser und polymetallischen Knollen zur Verringerung des Hebevolumens des VTS, bei.

Darauf aufbauend wurde schrittweise die Grobkornphase im inhomogenen Massenstrom charakterisiert. Hierfür wurden in der Dichte unterschiedliche Materialien genutzt und in zwei Gewichts- und Voluminaklassen aufgeteilt. Je größer die Differenz der physikalischen Eigenschaften zwischen den Probenkörpern war, desto einfacher war eine Charakterisierung durch die Datenanalyse der AE-Daten umsetzbar. Insbesondere die mineralogisch nicht klar definierbaren polymetallischen Knollen stellten die Datenanalyse vor Herausforderungen. Somit konnte hinlänglich nachgewiesen werden, dass das Vorgehen zur Beantwortung der Fragestellung, der Charakterisierung einer komplexen Grobkornphase, anwendbar ist, aber im Detailgrad zur vollständigen Umsetzung der Charakterisierung noch weitere Untersuchungen folgen müssen.

Die daran anschließende kritische Würdigung der Ergebnisse vergleicht abschließend die aufgestellten Anforderungen und Forschungsfragen mit den erarbeiteten Ergebnissen. Insgesamt wurde das Messkonzept zwar durch Simulationen und Belastungstests für seinen Einsatz im Tiefseebergbau validiert, aber für eine Anwendung im kommerziellen Tiefseebergbau müssen noch Optimierungen auf Basis von Langzeiterfahrungen am System vorgenommen werden. Zum einen kann an der Miniaturisierung der sensortechnologischen Anwendung weitergearbeitet werden und zum anderen sollte ein weiterer Transfer der in dieser Arbeit genutzten Messtechnik auf industriell erprobte und für die Anwendung im maritimen Bereich ausgelegte Komponenten vorangetrieben werden. Es kann dabei über weitere Varianten der Sensorapplikation nachgedacht werden.

Durch eine schrittweise Verarbeitung und Analyse der aufgenommenen AE-Daten kann die definierte Messaufgabe konzeptionell bewältigt werden. Zusammenfassend wurde eine erfolgreiche Charakterisierung von unterschiedlichen Phasen eines mehrphasigen hydraulischen Massenstroms erzielt und teilweise eine qualitative Charakterisierung von unterschiedlichen Komponenten der Grobkornphase des Massenstroms umgesetzt. Insgesamt konnte eine überwiegende Zahl der aufgestellten Anforderungen erfüllt werden. Kritisch zu bewerten sind in diesem Zusammenhang zwei Aspekte. Erstens wurden alle in dieser Arbeit aufgeführten

Untersuchungen im Laborumfeld durchgeführt und müssen in einem weiteren Verlauf bei der Entwicklung der polymetallischen Knollengewinnung in der Realumgebung validiert werden.

Zweitens wurde nur zur Beantwortung der Forschungsfrage eine ausreichende qualitative Umsetzung der Charakterisierung der Grobkornphase im mehrphasigen hydraulischen Massenstrom erreicht. Die innerhalb der Versuchsauswertung entwickelten und erzielten Ergebnisse können als vielversprechend bewertet werden und auch vergleichbare Anwendungen aus dem Stand der Technik unterstützen diese These. Trotzdem sind für die real-orientierte Anwendung Optimierungen notwendig. Somit muss das Datennutzungskonzept innerhalb von Tests in der Realumgebung validiert und möglicherweise überarbeitet werden. Über die gesamte Arbeit hinweg, basierend auf der analysierten Literatur und den gemachten mathematischen und experimentellen Untersuchungen, konnte aufgezeigt werden, dass die AET für die Messaufgabe einsetzbar ist und sowohl die Anforderungen erfüllen, als auch die Forschungsfragen beantworten kann.

Diese Entwicklung, unterstützt und vorangetrieben durch das innovative und besondere Forschungsfeld (Extrembergbau - Tiefseebergbau), kann in naher Zukunft auch in eine direkte Nutzung und in andere Anwendungen überführt werden. Für den Einsatz dieser Sensortechnologie und des Konzeptes zur Anwendung für die Inline-Analyse von hydraulischen mehrphasigen Massenströmen kommen Themenbereiche wie die Nassgewinnung von Rohstoffen (Nassbaggern), die Überwachung von hydraulischem Versatz im Bergbau oder die Qualitätskontrolle von hydraulischen Produktströmen (bsp. Kupfergranulat, Sandproduktion) in Frage. Abstrahiert kann auch über einen Transfer in die Metallurgie (bsp. Rohrreaktoren in Recyclingprozessen), Chemie (bsp. die Herstellung von Kunststoffgranulat) oder die Lebensmittelherstellung nachgedacht werden. Im Weiteren können die Anwendungsgebiete auch durch das Themenfeld der Pneumatik und dem darauf basierenden Feststofftransport erweitert und ein zu dieser Arbeit analoges Konzept angewendet werden.

Unabhängig von dem vorliegenden Anwendungsfall wurden materialspezifische Muster bei der Entstehung von AE-Wellen durch Stoß erkannt. Im Umkehrschluss deutet das darauf hin, dass durch eine grundsätzliche Untersuchung dieser Muster, also der unterschiedlichen Materialspezifika und Einflussfaktoren auf die Entstehung von AE-Wellen, eine Datenbank aufgebaut werden kann, die als Grundlage für die Auslegung einer Datenanalytik für die Differenzierung von Materialien bei unterschiedlichen Anwendungsfällen dient. Die Auslegung der AET und der Datenanalytik könnten für den jeweiligen spezifischen Anwendungsfall deutlich verringert und präzisiert werden. Das würde einen allgemeingültigen Beitrag für den Einsatz der AET für die Materialcharakterisierung liefern.

Dementsprechend wurde in dieser Arbeit ein wichtiger Beitrag für die technologische

Entwicklung von Sensortechnologien in der Rohstoffindustrie geleistet. Der Einsatz von Sensortechnologien ermöglicht schlussendlich eine weitere Optimierung von bergbaulichen Prozessen, Rohstoffgewinnung ohne menschlichen Zugang und ein Transfer der Industrie auf das nächste technologische Level.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Hypsographische Kurve und Häufigkeit der Höhen- und Tiefenstufen der Erde.	9
2.2	Darstellung von hydrogenetischen und diagenetischen Knollen-Wachstum . . .	10
2.3	Hauptvorkommen von polymetallischen Knollen mit der Beschränkung auf die für einen industriellen Abbau fokussierten Bereiche inklusive der vorhandenen AWZs.	12
2.4	Aufteilung der Lizenzgebiete der CCZ an internationale Staaten - dargestellt durch unterschiedliche Farben und Buchstabencode.	14
2.5	Darstellung eines typischen Tiefseeabbausystems für polymetallische Knollen.	18
2.6	Grobe Skizze der in der MBM vorhandenen mehrphasigen hydraulischen Materialströme.	21
2.7	Wirkende Kräfte in einer Rohrströmung.	25
2.8	Partikelbewegung bei differenten Strömungszuständen.	27
2.9	Resultierendes Bewegungsverhalten von Festkörpern in einer Rohrkrümmung.	28
2.10	Verfahrensmodell der hydraulischen Massenströme und ihre Zusammensetzung.	32
4.1	Gegenüberstellung eines transienten und eines kontinuierlichen Schwingungssignals.	48
4.2	Grafische Darstellung der Longitudinalwelle.	50
4.3	Grafische Darstellung der Transversalwelle.	50
4.4	Grafische Darstellung der Rayleighwelle.	52
4.5	Ausbreitung der Lambwelle.	52
4.6	Grafische Darstellung eines Dispersionsdiagramm.	53
4.7	Einfluss von Materialeigenschaften auf die Körperschallwelle bei einem senkrechten Einfall.	55
4.8	Idealisiertes Grenzschichtverhalten bei einem senkrechten Einfall.	56
4.9	Skizze der genutzten AE-Messkette inklusive Einzelkomponenten.	58
4.10	Skizze der genutzten Messtechnik.	59
4.11	Skizze der genutzten Messtechnik und Integration in die MBM.	59
4.12	Skizze eines piezoelektrischen AE-Sensor.	60
4.13	Bode-Diagramme der eingesetzten AE-Sensoren. links: VS375-M; rechts: VS370-A1	61
4.14	Beispielhafte Durchführung der Intervallanalyse.	63
4.15	Beispielhafte Durchführung der Burstdetektion.	64
4.16	Beispielhafte Durchführung der angewendeten Burstdetektion.	66
4.17	Beispielhafte Darstellung eines Schwingungssignals im Zeit- und Frequenzbereich.	67
5.1	Problemstellung bei der Anwendung eines Sensorgehäuses für die Tiefsee (b) im Vergleich zur standardisierten Anwendung (a).	69

5.2	Grafische Darstellung der Plattentests.	70
5.3	Aufbau der Plattentests.	71
5.4	Beispielhaftes Ergebnis der Plattentests.	75
5.5	Analyseergebnisse des Plattentests am Beispiel AlMg3.	76
5.6	Verteilung der angeregten Frequenzbereiche im Box-Plot.	78
5.7	Übersicht der Probenkörper a - Stahlkugel, b - Anhydrit, c - Bimsstein, d - polymetallische Knollen.	80
5.8	Verteilung der angeregten Frequenzbereiche im Box-Plot.	81
5.9	Konstruktion des Sensorgehäuses.	83
5.10	FEM Belastungsanalyse des Sensorgehäuses.	84
6.1	Grafische Darstellung von Körperschallquellen in einer Rohrströmung - (a) Stoß und (b) Reibung.	85
6.2	Grafische Darstellung des Rohrprüfstandes. (Nach [91])	88
6.3	Verteilung der RMS-Werte der einzelnen Betriebszustände als Box-Plot. . . .	90
6.4	Zusammenhang zwischen Sandbeladung und Rohrreibungszahl.	93
6.5	Exemplarisches Ergebnis anhand RMS und Rohrreibungszahl in der Kurve. .	94
6.6	Exemplarische Quantil-Quantil-Darstellung der Ergebnisse; RMS und Rohrreibungszahl in der Kurve.	94
6.7	Teilergebnisse der Realkornuntersuchungen - 4 g oben und 20 mm unten. . .	97
6.8	Klassifizierung der Realkornuntersuchungen; links 4 g, rechts 20 mm. . . .	99
6.9	Klassifizierung der gesamten Realkornuntersuchungen mit Unterscheidung der Materialklassen 4 g und 20 mm.	100
6.10	Klassifizierung der gesamten Realkornuntersuchungen ohne Unterscheidung der Materialklassen 4 g und 20 mm.	101
6.11	Übersicht über das Datennutzungskonzept im CompactRio nach der Datenerhebung.	103

Tabellenverzeichnis

2.1	Auszug der Metallgehalte polymetallischer Knollen im Vergleich in Millionen Tonnen, in Anlehnung an [7]	13
2.2	Anforderungen an ein Messsystem zum Einsatz in der Tiefsee zur Erfassung und Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen	35
3.1	Relative Bewertung strahlen- und schallbasierter Sensortechnologien.	42
4.1	Dichte und spezifische Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle der genutzten Materialien.	57
5.1	Materialien der Prüfplatten. (Nach [133] [134] [135] [136])	73
5.2	Ergebnisse der Plattentests.	77
5.3	Materialien der Probenkörper.	79
5.4	Mittelwerte der Validierungs-Ergebnisse einer Stahlkugel.	80
6.1	Ergebnisse der Berechnung der Rohrreibungszahl $[\lambda]$	92
6.2	Gemittelte Teilergebnisse der Einzelkornuntersuchungen.	98
7.1	Erfüllungsgrad der Anforderungen an ein Messsystem zum Einsatz in der Tiefsee zur Erfassung und Charakterisierung von hydraulischen Massenströmen	106

Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen*. Berlin, 2019 www.bmwi.de
- [2] C. WIEGAND ; S. GOSPODINOVA ; K. KOLANKO ; F. MICCOLI: *Gerechte und nachhaltige Wirtschaft: Kommission legt Unternehmensregeln für Achtung der Menschenrechte und der Umwelt in globalen Wertschöpfungsketten fest*. Brüssel, 2022
- [3] BUNDESTAG: *Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten*. 2021
- [4] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *The European Green Deal: COM(2019)640final*. 2019
- [5] M. RAHN: *Deep-sea mining of seafloor massive sulfides and seafloor manganese nodules: deposit modelling and market potentia*. Aachen, RWTH Aachen, Doktorarbeit, 2019
- [6] F. MARSCHEIDER-WEIDEMANN ; S. LANGKAU ; T. HUMMEN ; L. ERDMANN ; L. A. TERCERO ESPINOZA ; G. ANGERER ; M. MARWEDE ; S. BENECKE: *DERA Rohstoffinformationen*. Bd. 28: *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016: Auftragsstudie*. Datenstand: März 2016. Berlin : Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2016. – ISBN 9783943566727
- [7] N. GELPKE ; M. VISBECK: *World ocean review: Rohstoffe aus dem Meer - Chancen und Risiken*. Hamburg : maribus gGmbH, 2014. – ISBN 978–3–86648–220–3
- [8] INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY: *Regulations on Prospecting and Exploration for Polymetallic Nodules in the Area*. <https://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Regs/PN-en.pdf>
- [9] INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY: *ISA technical study*. Bd. 6: *A geological model of polymetallic nodule deposits in the Clarion-Clipperton Fracture Zone*. Kingston, Jamaica : Internat. Seabed Authority, 2010. – ISBN 9789769526822
- [10] EUROPÄISCHE UNION: *Breakthrough Solution for the Sustainable Harvesting and Processing of Deep Sea Polymetallic Nodules (Blue Nodules): Projektnummer: 688975 (Horizon 2020)*. <https://blue-nodules.eu/>. Version: 2016
- [11] EUROPÄISCHE UNION: *Hydraulic Collector for Polymetallic Nodules from Deepsea (Blue Harvesting): Projektnummer: (EIT Raw Materials)*. 2019
- [12] T. VRAETZ: *Entwicklung und Anwendung eines innovativen Konzepts zur Inline-Charakterisierung von Stoffgemischen in kontinuierlichen Massenströmen mittels der Acoustic Emission Technologie: Dissertation*. Aachen, 2018. – ISBN 978–3–941277–36–6

- [13] H.-G. GIERLOFF-EMDEN: *Geographie des Meeres: Ozeane und Küsten*. Berlin : Walter de Gruyter, 1980. – ISBN 3-11-002124-2
- [14] J. MURRAY: VOYAGE OF H.M.S. CHALLENGER: During the years 1873-76. (1891)
- [15] H. BACKER ; M. SCHOELL: New Deep-sea Brines and Metalliferous Sediments in the Red Sea. In: *Nature Physical Science* (1972), Nr. 240
- [16] J. B. CORLISS ; J. DYMOND ; L. I. GORDON ; J. M. EDMOND ; R. P. HERZEN ; R. D. BALLARD ; K. GREEN ; D. WILLIAMS ; A. BAINBRIDGE ; K. CRANE ; T. H. VAN ANDEL: Submarine thermal springs on the galapagos rift. In: *Science (New York, N.Y.)* 203 (1979), Nr. 4385, S. 1073–1083. <http://dx.doi.org/10.1126/science.203.4385.1073>. – DOI 10.1126/science.203.4385.1073. – ISSN 0036–8075
- [17] J. L. MERO: The Mineral Resources of the Sea. In: *Elsevier* (1965)
- [18] J. R. HEIN ; F. SPINARDI ; N. OKAMOTO ; K. MIZELL ; D. THORBURN ; A. TAWAKE: Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ. In: *Ore Geol Rev* (2015), Nr. 68, S. 97–116
- [19] X. WANG ; W. E. G. MÜLLER: Marine biominerals: perspectives and challenges for polymetallic nodules and crusts. In: *Trends in biotechnology* 27 (2009), Nr. 6, S. 375–383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.03.004>. – DOI 10.1016/j.tibtech.2009.03.004. – ISSN 0167–7799
- [20] R. SHARMA: *Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations*. Cham : Springer International Publishing, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>. – ISBN 978-3-319-52556-3
- [21] J. VAN WIJK: *Vertical hydraulic transport for Deep Sea Mining*. Delft, TU Delft, Dissertation, 2016
- [22] L. GRÜNDLING: *DIE 200-SEEMEILEN-WIRTSCHAFTSZONE - ENTSTEHUNG EINES NEUEN REGIMES DES MEERESVÖLKERRECHTS*. Berlin, 1983
- [23] E. BAKER ; Y. BEAUDOIN: *Deep sea minerals: manganese nodules, a physical, biological, environmental and technical review*. 2013
- [24] U. VON STACKELBERG: Growth history of manganese nodules and crusts of the Peru Basin. In: *Manganese mineralization: geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits* (1997), Nr. 119, S. pp 153–176
- [25] D. S. CRONAN ; G. ROTHWELL ; I. CROUDACE: An ITRAX geochemical study of ferromanganiferous sediments from the Penrhyn Basin, South Pacific Ocean. In: *Mar Georesour Geotechnol* 2010, Nr. 28, S. 207–221
- [26] R. MUKHOPADHYAY ; A. K. GHOSH ; S. D. IYER: The Indian Ocean nodule field. Geology and resource potential. In: *andbook of exploration and environmental geochemistry* (2008), Nr. 10, S. 292
- [27] S. VOLKMANN: *Blue Mining - Planning the Mining of Seafloor Manganese Nodules*, RWTH Aachen, Dissertation, 2018

- [28] P. SCHÜTTE: *Kobalt - Information zur Nachhaltigkeit*. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kobalt.pdf
- [29] J. SCHNEIDER: Tiefsee-Bergbau auf Manganknollen vor dem Hintergrund globaler Versorgungs- und Umwelt-Probleme. In: *Naturwissenschaften* (1988), Nr. 75, S. 423–431
- [30] U. JENISCH: Renaissance des Meeresbodens: mineralische Rohstoffe und Seerecht. In: *NordÖr Zeitschrift für öffentliches Recht in Norddeutschland* (2010), Nr. Teil 1: Heft 10/2020, S. 373–382
- [31] U. JENISCH: Tiefseebergbau – Lizenzvergabe und Umweltschutz. In: *Natur und Recht* 35 (2013), Nr. 12, S. 841–854. <http://dx.doi.org/10.1007/s10357-013-2554-7>. – DOI 10.1007/s10357-013-2554-7. – ISSN 0172–1631
- [32] JIN S. CHUNG: Deep-Ocean Mining: Technologies for Manganese Nodules and Crusts. In: *International Journal of Offshore and Polar Engineering* (1996), Nr. 6
- [33] T. YAMAZAKI ; T. BROCKETT: History of deep-ocean mining. In: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering* (2017)
- [34] M. GRIMA ; R. A. C. VAN GELDER ; J. HEEREN ; S. N. VERICHEV ; J. M. VAN WIJK: INTO THE DEEP: A RISK BASED APPROACH FOR RESEARCH TO DEEPSEA MINING. In: *CEDA Dredging Days 2011: Dredging and Beyond* (2011)
- [35] H. PFEIFER: *Grundlagen der Fördertechnik*. 5., verbesserte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1989 (Viewegs Fachbücher der Technik). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-90132-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-90132-3>. – ISBN 978–3–322–90132–3
- [36] H. BUHRKE ; H. J. KECKE ; H. RICHTER: *Strömungsförderer: Hydraulischer und pneumatischer Transport in Rohrleitungen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1989. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-87219-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-87219-7>. – ISBN 978–3–322–87219–7
- [37] V. PATZOLD ; G. GRUHN ; C. DREBENSTEDT: *Der Nassabbau: Erkundung, Gewinnung, Aufbereitung, Bewertung*. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2008. – ISBN 978–3–540–49692–2
- [38] W. MÜLLER: *Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten*. 2. Aufl., [elektronische Ressource]. München : Oldenbourg, 2014 (De Gruyter Studium). <http://dx.doi.org/10.1524/9783110343564>. <http://dx.doi.org/10.1524/9783110343564>. – ISBN 9783110343564
- [39] E. TRUCKENBRODT: *Fluidmechanik 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide*. 4., ergänzte Auflage 1996., [Nachdruck]. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 (Klassiker der Technik). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-79018-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-79018-1>. – ISBN 978–3–540–79018–1
- [40] H. HERWIG: *Strömungsmechanik: Eine Einführung in die Physik und die mathematische Modellierung von Strömungen ; mit 48 Tabellen*. 2., neu bearbeitete und

- erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-32443-7>. – ISBN 978-3540324416
- [41] H. E. SIEKMANN ; P. U. THAMSEN: *Strömungslehre: Grundlagen*. 2., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-73727-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-73727-8>. – ISBN 978-3-540-73727-8
- [42] H. OERTEL ; M. BÖHLE ; L. PRANDTL: *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre: Grundlagen und Phänomene*. 13., überarb. Aufl. 2012. Wiesbaden and s.l. : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2315-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2315-1>. – ISBN 978-3-8348-2315-1
- [43] D. SUREK ; S. STEMPIN: *Angewandte Strömungsmechanik: Für Praxis und Studium*. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8351-9094-8>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8351-9094-8>. – ISBN 978-3-8351-9094-8
- [44] M. WEBER ; Y. DEDEGIL: *Strömungs-Fördertechnik*. Mainz : Krausskopf, 1974 (Buchreihe fördern und heben). – ISBN 9783783000849
- [45] H. BUHRKE ; H. J. KECKE ; H. RICHTER: *Strömungsförderer: Hydraulischer und pneumatischer Transport in Rohrleitungen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1989. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-87219-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-87219-7>. – ISBN 978-3-322-87219-7
- [46] H. SIGLOCH: *Technische Fluidmechanik*. 10., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54467-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54467-9>. – ISBN 978-3662544662
- [47] M. STIESS: *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 3., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978/3-540-32552-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978/3-540-32552-9>. – ISBN 9783540325529
- [48] H. BRAUER ; H. SCHMIDT-TRAUB: Hydraulischer Transport körniger Feststoffe durch Rohrleitungen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 44 (1972), Nr. 19, S. 1137–1140. <http://dx.doi.org/10.1002/cite.330441909>. – DOI 10.1002/cite.330441909. – ISSN 0009286X
- [49] J. V. WIJK ; S. HAALBOOM ; E. D. HOOG ; H. D. STIGTER ; M. SMIT: Impact fragmentation of polymetallic nodules under deep ocean pressure conditions. In: *Minerals Engineering* 134 (2019), S. 250–260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.015>. – DOI 10.1016/j.mineng.2019.02.015. – ISSN 08926875
- [50] J. ZIEREP ; K. BÜHLER: *Grundzüge der Strömungslehre: Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide : mit 202 Abbildungen und zahlreichen Übungen*. 11., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20473-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20473-0>. – ISBN 978-3658204723

- [51] W. WAGNER: *Rohrleitungstechnik*. 11th ed. s.l. : Vogel Business Media, 2012 (Kamprath-Reihe). <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=1651440>. – ISBN 978–3–8343–3283–7
- [52] L. MOODY ; AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (Hrsg.): *Friction Factors for Pipe Flows*. Princeton,
- [53] S. E. HAALAND: Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow. In: *Journal of Fluids Engineering* 105 (1983), Nr. 1, S. 89–90. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3240948>. – DOI 10.1115/1.3240948. – ISSN 0098–2202
- [54] D. BRKIĆ: Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction. In: *Journal of Petroleum Science and Engineering* 77 (2011), Nr. 1, S. 34–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.02.006>. – DOI 10.1016/j.petrol.2011.02.006. – ISSN 09204105
- [55] P. HOPWOOD ; DELOITTE (Hrsg.): *Tracking the Trends - 2018*. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/us-er-ttt-report-2018.pdf>
- [56] T. BARTNITZKI: Forschung für den Bergbau 4.0. (2015)
- [57] O'NEILL, Ormond: Digitalisierung im Bergbau - Industrie 4.0. In: *Mining Report* (2017)
- [58] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN EN ISO 10628-1: Schemata für die chemische und petrochemische Industrie - Teil 1: Spezifikation der Schemata*. Berlin, 2015
- [59] R. W. KESSLER: *Prozessanalytik: Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis*. Weinheim : Wiley-VCH, 2006. <http://dx.doi.org/10.1002/3527608990>. <http://dx.doi.org/10.1002/3527608990>. – ISBN 9783527311965
- [60] PROCK J.: *Einführung in die Prozeßmeßtechnik*. Stuttgart : Teubner, 1997. – ISBN 9783519061984
- [61] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN 66201: Prozeßrechnungssysteme: Begriffe*. Berlin, 1981
- [62] GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER ; FACHGRUPPER ANALYTISCHE CHEMIE (Hrsg.): *Arbeitsrichtlinien des Arbeitskreises Prozessanalytik der GDCh*. Berlin,
- [63] H. KURTH: *Real Time On-Belt Elemental Analysis for Advanced Process Control in Iron Ore*. Brazil, 01.09.2013 - 04.09.2013 (Technical contribution to the 43rd Ironmaking and Raw Materials Seminar)
- [64] U. PEUKER ; A. KWAE ; U. TEIPEL: *Aufbereitungstechnik: Aktuelle verfahrenstechnische Fragestellungen für die Aufbereitung von mineralischen, nachwachsenden und sekundären Rohstoffen ; Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppen "Zerkleinern/-Klassieren", "Grenzflächenbestimmte Systeme", "Mechanische Flüssigkeitsabtrennung"*. Hannover and Frankfurt a. Main : Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2012 <https://edocs.tib.eu/files/e01fn13/734909241.pdf>. – ISBN 9783897461314

- [65] M. SCHINDLER (Hrsg.) ; S. SCHOONE (Hrsg.) ; E. CLAUSEN (Hrsg.): *ADAPTIVE 2020: Towards an Evolving Software Ecosystem in the Mining Industry*. Wilmington, DE, USA : IARIA, 2020 <http://www.thinkmind.org/index.php?view=instance&instance=ADAPTIVE+2020>. – ISBN 978–1–61208–781–8
- [66] K. NIENHAUS (Hrsg.): *Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung*. Bd. 50: *Sensor technologies: Impulses for the raw materials industry*. Aachen : Shaker, 2014. – ISBN 978–3–8440–2563–7
- [67] M. GAFT ; R. REISFELD ; G. PANCZER: *Modern Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials*. 2nd ed. 2015. Cham : Springer International Publishing, 2015 (Springer Mineralogy). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24765-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24765-6>. – ISBN 978–3–319–24763–2
- [68] M. GAFT ; L. NAGLI ; Y. GROISMAN ; A. BARISHNIKOV: Industrial online raw materials analyzer based on laser-induced breakdown spectroscopy. In: *Applied spectroscopy* 68 (2014), Nr. 9, S. 1004–1015. <http://dx.doi.org/10.1366/13-07382>. – DOI 10.1366/13–07382
- [69] K. NIENHAUS ; H. WOTRUBA ; D. BOOS ; S. KLÖSGES ; T. VRAETZ ; K. NEUBERT: Combining Acoustic Emission and Vibration Technologies Harbors Huge Potential for Material Characterization. In: *Chemical Engineering & Technology* (2015), Nr. 12. <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.201400531>. – DOI 10.1002/ceat.201400531. – ISSN 09307516
- [70] *Kompodium Schallemissionsprüfung Acoustic Emission Testing: Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung*. 2018
- [71] J. KAISER: *Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. München, TU München, Dissertation, 1950
- [72] C. GROSSE: *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall*, Stuttgart, Univ., Diss., 1996, http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1064/pdf/1996_Diss_Grosse.pdf
- [73] C. GROSSE (Hrsg.): *Acoustic emission testing: [basics for research - applications in civil engineering]*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2008. – ISBN 9783540698951
- [74] F. A. LEAMAN WEIFFENBACH: *Contributions to the diagnosis and prognosis of ring Gear faults of planetary gearboxes using acoustic emissions*. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2020
- [75] R. MILLER: *Nondestructive Testing Handbook - Acoustic Emission Testing (ID 906)*. 1987
- [76] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 12714: Acoustic emission inspection — Secondary calibration of acoustic emission sensors*. 1999
- [77] F. D. BOOS: *Acoustic emission bei der Maschinen- und Prozessüberwachung: Neue Analysemethoden und Anwendungsgebiete*. Aachen, RWTH, Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2015
- [78] C. BERNET: *Ein Beitrag zur Analyse von Schallemissionssignalen*. Aachen, RWTH, Dissertation, 2018

- [79] M. MÖSER ; W. KROPP: *Körperschall - Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen*. Heidelberg : Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–40336–4
- [80] H. VALLEN: *ZfP - kompakt und verständlich*. Bd. 6: *Die Schallemissionsprüfung*. Wuppertal : Castell-Verl., 2003. – ISBN 9783934255081
- [81] H. TUDESHKI: Entwicklung eines akustischen Geo-Scanners zur Detektion von Lockergesteinen und Trennflächen. (2017). <http://www.bergbau.tu-clausthal.de>
- [82] H. TUDESHKI ; H. HERTEL: Development of an acoustic method for real-time detection of loose rock and boundary layers for selective mining technology. In: *Aggregates International* (2008)
- [83] H. TUDESHKI ; TUDESHKI, Hosseini (Hrsg.): *Advanced Mining Solutions: AMS Online*. https://www.advanced-mining.com/images/upload/ams_200904_en.pdf
- [84] H. AMROLLAHI: *Determining grain size distribution of pneumatically conveyed granular media using the passive acoustic measurement method*, Technische Universität Clausthal, Dissertation
- [85] T. PRETZ: *Schriftenreihe der GDMB, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik*. Bd. 128: *Sensor based sorting 2012: A joint conference of RWTH Aachen ... and GDMB ...*, April, 17 - 19, 2012 in Aachen. Clausthal-Zellerfeld : GDMB-Informationsges, 2012. – ISBN 978–3–940276–44–5
- [86] C. BÜSCHGENS: *Einfluss von Schnittparametern auf Schneidkraft und Acoustic Emission am Schneidkantenmeißel*. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2017
- [87] M. PHILIPP: *Ein Beitrag zur sensorunterstützten Steuerung schneidender Gesteinslöseverfahren*. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2018
- [88] B. SPÄTH ; M. PHILIPP ; T. BARTNITZKI ; PROCEEDING OF REAL TIME MINING - INTERNATIONAL RAW MATERIALS EXTRACTION INNOVATION CONFERENCE (Hrsg.): *Machine performance and acoustic fingerprints of cutting and drilling*. Amsterdam,
- [89] ARBEITSGEMEINSCHAFT INDUSTRIELLER FORSCHUNGSVEREINIGUNGEN: *Entwicklung eines Online-Messsystems zur Materialstromcharakterisierung in Aufbereitungsanlagen der Gipsindustrie*. <https://igf.aif.de/innovationsfoerderung/industrielle-gemeinschaftsforschung>
- [90] G. DEVRIM ; M. GERHARD ; C. ELISABETH ; K. NIENHAUS ; H. WOTRUBA: Online measurements of material flow compositions using acoustic emission: Case of gypsum and anhydrite. In: *Minerals Engineering* 172 (2021), S. 107131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107131>. – DOI 10.1016/j.mineng.2021.107131. – ISSN 08926875
- [91] S. SCHOONE ; M. GETZ ; E. CLAUSEN: Erfassung und Differenzierung sandbeladener hydraulischer Massenströme mittels Acoustic Emission-Technologie. In: *Mining Report* (2021), Nr. No.3, S. 247–257
- [92] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN EN 13554: Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung*. Berlin, 2011
- [93] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN 45635: Geräuschmessungen an Maschinen*

- [94] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 12716: Acoustic emission inspection — Vocabulary*. 2001
- [95] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN EN 1330-8: Terminologie*. 1994
- [96] V. DEUTSCH ; M. PLATTE ; M. VOGT: *Ultraschallprüfung: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. reprint von 1997. Berlin : Springer, 1997 (VDI-Buch). – ISBN 9783642638640
- [97] K. SCHIEBOLD: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Sichtprüfung ; mit ... 11 Tabellen*. 1. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44667-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44667-6>. – ISBN 978-3-662-44667-6
- [98] B. A. BOLT: *Nuclear Explosions and earthquakes: The parted veil*. San Francisco : Freeman, 1976 (A Series of books in geology). – ISBN 0-7167-0276-2
- [99] R. BÖTTCHER ; L. SPIESS ; DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E.V. (Hrsg.): *Bestimmung von Werkstoffkennwerten mit Ultraschallverfahren: ist der ‚Goldbarren‘ echt?* <https://www.ndt.net/article/dgzfp2014/papers/p50.pdf>
- [100] D. SCHMIDT: *Modenselektive Übertragung von Lambwellen in Faserverbundstrukturen*. Braunschweig I Wiesbaden, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2014. <https://core.ac.uk/download/pdf/31011864.pdf>
- [101] H. LAMB: On waves in an elastic plate. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 93 (1917), Nr. 648, S. 114–128. <http://dx.doi.org/10.1098/RSPA.1917.0008>. – DOI 10.1098/RSPA.1917.0008. – ISSN 0950-1207
- [102] I. A. VIKTOROV: *Rayleigh and Lamb waves*. New York : Plenum Press, 1967 (Ultrasonic technology)
- [103] J. D. ACHENBACH: *North Holland series in applied mathematics and mechanics*. Bd. 16: *Wave propagation in elastic solids*. 7. impr. Amsterdam : Elsevier, 1999. – ISBN 9780720403251
- [104] K. GRAFF: *Wave Motion in Elastic Solids*. Reprint. Originally publ.: Oxford: Clarendon Press, 1975. New York : Dover Publ, 1991 <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1894353>. – ISBN 9780486667454
- [105] J. L. ROSE: *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2004 <http://www.loc.gov/catdir/description/cam029/98045447.html>. – ISBN 9780521548892
- [106] A. HUBER ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (Hrsg.): *Dispersion Calculator*. https://www.dlr.de/zlp/desktopdefault.aspx/tabid-14332/24874_read-61142/. Version: 2021
- [107] R. K. MILLER (Hrsg.) ; P. MOORE (Hrsg.) ; R. C. MACMASTER (Hrsg.): *Non-destructive testing handbook*. Bd. / Robert C. McMaster, ed. American Society for Nondestructive Testing; American Society for Metals ; Vol. 6: *Acoustic emission testing*.

3. ed. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 2005. – ISBN 1–57117–106–1
- [108] R. LERCH ; G. M. SESSLER ; D. WOLF: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49833-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-49833-9>. – ISBN 978–3–540–49833–9
- [109] E. SCHRÜFER ; L. REINDL ; B. ZAGAR: *Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen ; mit 38 Tabellen und 34 Beispielen*. 11., aktualisierte Auflage. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2014. – ISBN 9783446441880
- [110] R. PARTHIER: *Messtechnik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13598-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13598-0>. – ISBN 978–3–658–13597–3
- [111] ASTM INTERNATIONAL: *E1316 - 18a: Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. 2015
- [112] VALLEN SYSTEME GMBH ; VALLEN SYSTEME GMBH (Hrsg.): *AE-Sensor Data Sheet: VS375-M*. <https://www.vallen.de/>
- [113] VALLEN SYSTEME GMBH ; VALLEN SYSTEME GMBH (Hrsg.): *AE-Sensor Data Sheet: VS370-A* <https://www.vallen.de/>
- [114] J. TICHÝ ; J. ERHART ; E. KITTINGER ; J. PÍVRATSKÁ: *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*. 1. Aufl. s.l. : Springer-Verlag, 2010 <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10406598>. – ISBN 978 3 540 43966 0
- [115] ASTM INTERNATIONAL: *ASTM E650-E650M: Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors*. 2017
- [116] KROON OIL B.V. ; KROON OIL B.V. (Hrsg.): *PI-095004-copper-plus: Produktinformation*. 2021
- [117] J.-R. OHM ; H. D. LÜKE: *Signalübertragung: Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme*. 11., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-10200-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-10200-4>. – ISBN 9783642101991
- [118] NATIONAL INSTRUMENTS ; NATIONAL INSTRUMENTS (Hrsg.): *Datasheet: Ni 9775*. <https://www.apexwaves.com/modular-systems/national-instruments/c-series/Ni-9775>
- [119] M. TRAUTH: *MATLAB® Recipes for Earth Sciences*. 4th ed. 2015. Berlin, Heidelberg and s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-46244-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-46244-7>. – ISBN 9783662462430
- [120] UNNORSSON, Runar: Hit Detection and Determination in AE Bursts. Version: 2013. <http://dx.doi.org/10.5772/54754>. In: W. SIKORSKI (Hrsg.): *Acoustic Emission*

- *Research and Applications*. InTech, 2013. – DOI 10.5772/54754. – ISBN 978–953–51–1015–6
- [121] D. BADER ; K. AUGSBURG ; P. HOLSTEIN ; B. WENDER: *Eine flexible akustische Messmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Problemen*: Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2006 u.d.T.: Bader, Daniel: *Entwicklung einer flexiblen akustischen Messmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Qualitätsproblemen*. Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2007. – ISBN 978–3–939473–09–1
- [122] R. HOFFMANN ; M. WOLFF: *Intelligente Signalverarbeitung 1: Signalanalyse*. 2. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45323-0>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45323-0>. – ISBN 978–3–662–45323–0
- [123] NTi AUDIO ; NTi AUDIO (Hrsg.): *Fast Fourier Transformation FFT - Grundlagen*. <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/fast-fourier-transformation-fft>. Version: 2021
- [124] J. WACHSMUTH: *Analyse der Schallemissionssignale aus Ermüdungsrisswachstum und Korrosionsprozessen*. Berlin, TU Berlin, Dissertation, 2016. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:b43-354823>
- [125] N. SULAIMAN ; M. N. TAIB ; S. LIAS ; Z. MURAT ; S. A. M. ARIS ; N. H. A. HAMID: EEG-based Stress Features Using Spectral Centroids Technique and k-Nearest Neighbor Classifier. In: *13th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, IEEE, 2011. – ISBN 978–1–61284–705–4, S. 69–74
- [126] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN EN 1330-9*. Berlin, 2017
- [127] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN EN 17368*. Berlin, 2020
- [128] KEYSIGHT TECHNOLOGIES: *33500B Series: Waveform Generators*. 2017
- [129] DEUTSCHE INDUSTRIENORM: *DIN 52338*. Berlin, 2016
- [130] F. LAUMEN: *Dämpfung von Acoustic Emission Signalen beim Grenschichtübergang divergierender Materialien*. Aachen, RWTH, Bachelorarbeit, 2021
- [131] F. GRAES: *Umsetzung einer optimierten Acoustic Emission Messung in der polymetalischen Knollengewinnung in der Tiefsee*. Aachen, RWTH, Bachelorarbeit, 2021
- [132] M. KÄFER ; S. SCHOONE ; E. CLAUSEN ; RDB E.V. (Hrsg.): *Einblick in die Forschungslandschaft des Institute for Advanced Mining Technologies*. Essen, 2021
- [133] METALCOR GMBH ; METALCOR GMBH (Hrsg.): *Datenblatt: Titan-Grade 2 (3.7035)*. <http://www.metalcor.de/datenblatt/122/>. Version: 2021
- [134] AMCO METALL-SERVICE GMBH ; AMCO METALL-SERVICE GMBH (Hrsg.): *Technisches Datenblatt EN AW-5754 (AlMg3)*. <https://amco-metall.de>
- [135] THYSSENKRUPP GMBH ; THYSSENKRUPP GMBH (Hrsg.): *Werkstoffdatenblatt Edelstahl 1.4301*. https://de.materials4me.com/media/pdf/ef/e6/6c/Werkstoffdatenblatt_zum_Werkstoff_1-4301.pdf. Version: 2021

- [136] LOTTER KUMMETAT STAHL ; LOTTER KUMMETAT STAHL (Hrsg.): *Datenlatt Werkstoffgruppe 1.4571*. <http://www.kummetat.de/download/14571.pdf>. Version: 2021
- [137] S. SCHOONE: *Vergleich von Analysemethoden zur Charakterisierung des hydraulischen Transports von Manganknollen basierend auf der Acoustic Emission Technologie*. Aachen, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2017
- [138] G. Z. SINAMBARI ; S. SENTPALI ; F. KUNZ: *Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. 5., völlig überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (SpringerLink). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05072-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05072-6>. – ISBN 978–3–658–05072–6
- [139] H. HERTZ: Ueber die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)* 1882 (1882), Nr. 92, S. 156–171. <http://dx.doi.org/10.1515/crll.1882.92.156>. – DOI 10.1515/crll.1882.92.156. – ISSN 0075–4102
- [140] G. C. MCLASKEY ; S. D. GLASER: Hertzian impact: experimental study of the force pulse and resulting stress waves. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 128 (2010), Nr. 3, S. 1087–1096. <http://dx.doi.org/10.1121/1.3466847>. – DOI 10.1121/1.3466847
- [141] K. L. JOHNSON: *Contact mechanics*. 9. print. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2003. – ISBN 978–0521347969
- [142] S. C. HUNTER: Energy absorbed by elastic waves during impact. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 5 (1957), Nr. 3, S. 162–171. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096\(57\)90002-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096(57)90002-9). – DOI 10.1016/0022–5096(57)90002–9. – ISSN 00225096
- [143] S. HARTMANN: *Technische Mechanik*. Erste Auflage. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015 <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=981400>. – ISBN 978–3–527–33699–9
- [144] W. KALIDE: *Einführung in die technische Strömungslehre ; mit Tabellen, 61 durchgerechneten Beispielen und 40 Übungsaufgaben mit Lösungsangabe*. 7., durchges. Aufl. München : Hanser, 1990 (Studienbücher der technischen Wissenschaften). – ISBN 3–446–15892–8
- [145] W. FRENZ (Hrsg.) ; A. PREUSSE (Hrsg.): *Yearbook of Sustainable Smart Mining and Energy 2021: Technical, Economic and Legal Framework*. 1. Aachen : Springer, 2021. – ISBN 978–3–030–84314–4
- [146] AURAS PUMPEN GMBH & CO.KG ; AURAS PUMPEN GMBH & CO.KG (Hrsg.): *Auras Pumpen Bedienungsanleitung*. <http://www.auras-pumpen.de/wp-content/uploads/2016/07/Auras-Pumpen-Bedienungsanleitung-DE.pdf>. Version: 2014
- [147] MINERALS ENGINEERS ; QUARZWERKE FRECHEN (Hrsg.): *MILLISIL*.

- <http://www.hpfminerals.kr/images/uploads/Datenblaeter/Silica/1201-MILLISIL-SMF-HPF.pdf>
- [148] QUARZWERKE FRECHEN ; QUARZWERKE FRECHEN (Hrsg.): *Produktübersicht*. https://www.quarzwerke.com/fileadmin/quarzwerke/pdf/HPF_Broschueren/HPF_Produktuebersicht.pdf. Version: 2017
- [149] C. M. BISHOP: *Pattern recognition and machine learning*. New York : Springer, 2006 (Information Science and Statistics). – ISBN 978–0387–31073–2
- [150] T. HASTIE ; R. TIBSHIRANI ; J. H. FRIEDMAN: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Second edition, corrected at 12th printing. New York and Ann Arbor : Springer and ProQuest eBook Central, 2017 (Springer series in statistics). <https://permalink.obvsg.at/AC16166268>. – ISBN 978–0–387–84857–0
- [151] R. O. DUDA ; P. E. HART ; D. G. STORK: *Pattern Classification*. – ISBN 978–0–471–05669–3
- [152] MATHWORKS ; MATHWORKS, INC. (Hrsg.): *Machine Learning*. <https://de.mathworks.com/solutions/machine-learning.html>. Version: 2024
- [153] MATHWORKS ; MATHWORKS, INC. (Hrsg.): *Statistics and Machine Learning Toolbox - User's Guide*. <https://de.mathworks.com/products/statistics.html>. Version: 2023

Kurzzusammenfassung

Der Tiefseebergbau kann dabei unterstützen den heutigen und zukünftig steigenden Bedarf an Rohstoffen sicherzustellen. Ein Fokus liegt hierbei auf der kommerziellen Umsetzung der polymetallischen Knollengewinnung, die eine Vielzahl von kritischen Hochleistungsmetallen der Industrie zur Verfügung stellen würde. Innerhalb dieser Arbeit wurde eine Aufgabenstellung aus dem Bereich der polymetallischen Knollengewinnung im Themenkomplex Tiefseebergbau bearbeitet. An eine Realisierung der polymetallischen Knollengewinnung werden eine Vielzahl von Anforderungen gestellt, die unter anderem aufgrund der Tiefseeumgebung nur mittels innovativer Technologien umsetzbar sind. Hierzu gehört die Detektion und Charakterisierung von mehrphasigen hydraulischen rohrgestützten Massenströmen innerhalb der Meeres Boden Bergbau Maschine. Mit Hilfe einer für diesen Einsatz konzipierten Sensortechnologie soll diese spezifische Anforderung erfüllt werden.

Durch die genauere Betrachtung des Themenfeldes Tiefseebergbau, werden die wirtschaftlichen Treiber und limitierenden Faktoren der polymetallischen Knollengewinnung aufgezeigt. Das impliziert auch vorhandene Potenziale und die biologischen, physikalischen und geologischen Besonderheiten. Die geplante technologische, auf den Grundlagen der Strömungsfördertechnik basierende, Gewinnung von polymetallischen Knollenlagerstätten inkludiert umwelt- und prozesstechnische Einflussfaktoren, die ein breites Spektrum an Anforderungen definiert. Insbesondere die Erfassung und Charakterisierung von rohrgestützten mehrphasigen Materialströmen während der Gewinnung kann einen Beitrag zur sicheren und optimierten Prozessführung gewährleisten und die Anforderungen an ein solches System werden über die resultierenden Forschungsfragen an die Entwicklung herausgearbeitet.

Über einen Abgleich mit den Möglichkeiten der Prozessanalytik und dem aktuellen Stand der Technik für die Charakterisierung von mehrphasigen Materialströmen wurde ein Inline-Messsystem, dass auf einem gesonderten Phänomen des Körperschalls (Acoustic Emission) basiert, ausgewählt. Solch ein Messsystem ist bis dato in diesem Zusammenhang noch nicht umgesetzt worden.

Eine für die Umsetzung zu behandelnde Fragestellung ist, wie sich die gegebenen physikalischen und mechanischen Anforderungen des Tiefseebergbaus auf das umzusetzende Sensorsystem auswirken. Die Applikation des Sensors innerhalb eines Sensorgehäuses ist hierbei eine untypische Umsetzung und impliziert eine zu untersuchende translatorische

Einflusskomponente auf die Acoustic Emission Technologie. Die durch Simulationen und Belastungstests auf die Anforderungen ausgelegten einzelnen Segmente der Messkette wurden durch mehrere Laborversuche auf ihre Eignung validiert und es konnte eine geeignete physikalische Anwendung der Messtechnik erarbeitet werden.

Mittels Inline-Anwendung der Acoustic Emission Technologie kann eine große Messdatenmenge erfasst werden. Um die Fragestellung der Materialcharakterisierung eines rohrgestützten mehrphasigen Materialstroms zu beantworten, wurde ein gesondertes Datennutzungskonzept innerhalb mehrerer Laboruntersuchungen entwickelt. Dieses Vorgehen ermöglicht die getrennte Aufnahme von konstanten durch Reibung erzeugte Signalverläufe und durch Stoß entstehende Einzelfänomene der inhomogenen Bestandteile der Strömung. Dabei werden unterschiedliche Belastungen der konstanten homogenen Phase mit Meeresbodenfeinstsedimenten (homogene Phase) in den mathematischen Zusammenhang mit der entstehenden Rohrreibung gesetzt. So konnten die unterschiedlichen homogenen Phasen in den Sensordaten differenziert werden. Grobkörner (inhomogene Phase) werden in einer schrittweise ablaufenden Datenanalyse ebenfalls charakterisiert. Hierbei kam es zu qualitativen Einschränkungen, die durch Weiterentwicklungen des Datennutzungskonzeptes behoben werden können.

Insgesamt konnte bei der Zusammenführung des Messkonzeptes mit dem Datennutzungskonzept eine überwiegende Zahl der aufgestellten Anforderungen erfüllt werden. Kritisch zu bewerten ist in diesem Zusammenhang der Aspekt der Realanwendung. Alle in dieser Arbeit aufgeführten Untersuchungen wurden im Laborumfeld durchgeführt und müssen in einem weiteren Verlauf der Entwicklungen der polymetallischen Knollengewinnung in der Realumgebung validiert werden.

Durch Entwicklungen in besonderen Forschungsfeldern wie dem Extrembergbau - Tiefseebergbau, werden innovative Technologien entwickelt, die zu einer erweiterten Anwendung führen können. Somit kann das entwickelte Konzept in verwandten Gewinnungs- oder Transportverfahren unter Anpassungen angewandt werden. Hierzu zählt der Einsatz zur Inline-Analyse von hydraulischen mehrphasigen Massenströmen in Themenbereichen wie der Nassgewinnung von Rohstoffen (Nassbaggern, Lithiumbergbau), die Überwachung von hydraulischem Versatz im Bergbau oder der Qualitätskontrolle von hydraulischen Produktströmen (bsp. Kupfergranulat, Sandproduktion) und der Überwachung von rohrgestützten flüssigen Transportströmen (Kuperbergbau, Gas, Öl). Somit wurde ein Beitrag für den Einsatz von innovativen Sensortechnologien zur Materialstromcharakterisierung in der Rohstoffindustrie erarbeitet.

Abstract

Deep-sea mining can help to secure the current and future increasing demand for raw materials. One focus here is on the commercial realisation of polymetallic nodule extraction, which would make a large number of critical high-performance metals available to industry. Within this thesis, a task from the field of polymetallic nodule extraction was dealt with in the area of deep-sea mining. The realisation of polymetallic nodule extraction is subject to a large number of requirements that can only be implemented using innovative technologies due to the deep-sea environment. This includes the detection and characterisation of multiphase hydraulic pipe-supported mass flows within the seabed mining machine. This specific requirement is to be met with the help of a sensor technology designed for this application.

By taking a closer look at the topic of deep-sea mining, the economic drivers and limiting factors of polymetallic nodule extraction are highlighted. This also implies existing potentials and the biological, physical and geological characteristics. The planned technological extraction of polymetallic nodule deposits, which is based on the principles of flow conveyance technology, includes environmental and process-related influencing factors that define a broad spectrum of requirements. In particular, the recording and characterisation of pipe-supported multiphase material flows during extraction can contribute to safe and optimised process control and the requirements for such a system are worked out via the resulting research question for development.

Comparing the possibilities of process analysis and the current state of the art for the characterisation of multiphase material flows, an inline measurement system based on a separate phenomenon of structure-borne sound (acoustic emission) was selected. Such a measurement system has not yet been realised in this context.

One question to be addressed for the implementation is how the given physical and mechanical requirements of deep-sea mining affect the sensor system to be implemented. The application of the sensor within a sensor housing is an atypical realisation and implies a translational influence component on the acoustic emission technology to be investigated. The individual segments of the measurement chain, which were designed to meet the requirements using simulations and load tests, were validated for their suitability in several laboratory tests and a suitable physical application of the measurement technology was developed.

A large amount of measurement data can be recorded using inline application of acoustic

emission technology. In order to answer the question of material characterisation of a pipe-supported multiphase material flow, a separate data utilisation concept was developed within several laboratory tests. This approach enables the separate recording of constant signal curves generated by friction and individual phenomena of the inhomogeneous components of the flow caused by impact. Different loads on the constant homogeneous phase with seabed fine sediments (homogeneous phase) are mathematically related to the resulting pipe friction. This allowed the different homogeneous phases to be differentiated in the sensor data. Coarse grains (inhomogeneous phase) are also characterised in a step-by-step data analysis. This resulted in qualitative limitations, which can be remedied by further developing the data utilisation concept.

Overall, the combination of the measurement concept with the data utilisation concept fulfilled the majority of the requirements. In this context, the aspect of real application must be critically evaluated. All of the investigations listed in this paper were carried out in a laboratory environment and must be validated in a real environment in the further course of the development of polymetallic nodule extraction.

Through research in special research fields such as extreme mining - deep sea mining, innovative technologies are developed that can also lead to an extended application. This means that the developed concept can be used in related extraction or transport processes with adaptations. This includes the use for inline analysis of hydraulic multiphase mass flows in areas such as the wet extraction of raw materials (dredging, lithium mining), the monitoring of hydraulic displacement in mining or the quality control of hydraulic product flows (e.g. copper granulate, sand production) and the monitoring of pipe-supported liquid transport flows (copper mining, gas, oil). In this way, a contribution was made to the use of innovative sensor technologies for material flow characterisation in the raw materials industry.

Schriftenreihe des Instituts für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie

ABAR Aachener Beiträge zur Angewandten Rechnerntechnik

- Band 1 Weidemann J. (1992).
Rechnerunterstützte Maschinenüberwachung als Instrument der vorausschauenden Instandhaltung in Walzwerken am Beispiel von Profilwalzgerüsten;
ISBN: 3-86073-051-7
- Band 2 Cerv, H. (1992).
Softwarekonzept zur Analyse und echtzeitfähigen Simulation des dynamischen Verhaltens elektromechanisch gekoppelter Antriebe;
ISBN: 3-86073-058-4
- Band 3 Ruhnau, S. (1992).
Automatisierung des Darstellungsprozesses bei der Variantenkonstruktion von Gewindebohrwerkzeugen unter Verwendung einer graphischen Programmiersprache am Beispiel eines mittelständischen Zulieferunternehmens der Montanindustrie;
ISBN: 3-86073-067-3
- Band 4 Schniering, B. (1993).
Entwicklung und Umsetzung einer praxisorientierten CIM-Strategie als Informationssystem für kleine Unternehmen der Präzisionswerkzeugindustrie am Beispiel eines indirekten Zulieferunternehmens der Montanindustrie;
ISBN: 3-86073-153-X
- Band 5 Streichfuss, M. (1993).
Maschinendiagnose an dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-154-8
- Band 6 Friedhelm, K. (1993).
Konzeption eines Informationssystems für bergmännische und markscheiderische Planung und Dokumentation;
ISBN: 3-86073-166-3
- Band 7 Borstell, D. (1993).
Entwicklung eines Softwarekonzeptes für die rechnergestützte maschinentechnische Detailplanung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-163-7
- Band 8 Linnartz, A. (1993).
Integration von Zustandsdiagnose u. Instandhaltungsplanung, -steuerung und -analyse für dieselgetriebene Transportfahrzeuge im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-290-0

- Band 9 Müller, T. (1994).
Zustandsüberwachung und Verfügbarkeitsprognose in Großanlagen der Stahlindustrie;
ISBN: 3-86073-291-9
- Band 10 Kessler, H.-W. (1994).
Entwicklung und Untersuchung eines Diagnosesystems zur Wälzlagerüberwachung hydrodynamischer Getriebe;
ISBN: 3-86073-292-7
- Band 11 Peschers, H. (1994).
Funktionalität und Aufbau eines Leitsystems zur Verbesserung der Materiallogistik von Steinkohlenbergwerken;
ISBN: 3-86073-293-5
- Band 12 Dumoulin, L. (1995).
Die berührungslose, digitale Messung von Drehmoment und Drehzahl;
ISBN: 3-86073-294-3
- Band 13 Broderius, T. (1995).
Konzeption eines objektbasierten Programmsystems zur markscheiderischen Bearbeitung und Abbauplanung plattenförmiger Lagerstätten;
ISBN: 3-86073-295-1
- Band 14 Geropp, B. (1995).
Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse;
ISBN: 3-86073-296-X
- Band 15 Plaster, A. (1996).
Weiterentwicklung des wettertechnischen CAE-Arbeitsplatzes für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-297-8
- Band 16 Ahrens, M. (1996).
Entwicklung eines Konzeptes zur Auslegung und zeitoptimalen Berechnung metallischer Zylinderkopfdichtungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode;
ISBN: 3-86073-298-6
- Band 17 Zhang, M. (1996).
Messstellenreduktion an elektromechanischen Antriebssträngen mittels prozessgeführter digitaler Simulation - ein Beitrag zur Maschinenüberwachung und vorausschauenden Instandhaltung;
ISBN: 3-86073-299-4
- Band 18 Mackel, J. (1996).
Die anwendungsorientierte Elastizitätsberechnung von Walzgerüsten unterschiedlicher Bauart;
ISBN: 3-86073-530-6
- Band 19 Seeliger, A. (1996).
AKIDA - Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 30.-31. Mai 1996 in Aachen;
ISBN: 3-86073-531-4
- Band 20 Staniullo, H.-J. (1996).

-
- Ein Beitrag zur Entwicklung eines graphikorientierten Informationssystems für die maschinen-technische Betriebsmitteleinsatzplanung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-532-2
- Band 21 Tao, X. (1997).
Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Ermittlung des Brennraumdruckverlaufs aus der Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle;
ISBN: 3-86073-533-0
- Band 22 Petit, E. (1997).
Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nassaufbereitung von Bauschutt;
ISBN: 3-86073-534-9
- Band 23 Levin, C. (1997).
Konzeption und Realisierung eines rechnergestützten Planungs- und Informationssystems für die Projektplanung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-535-7
- Band 24 Kaub, R. (1997).
Konzeption und Realisierung eines Informationssystems zur Dokumentation und Vorhersage der Ausgasung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-536-5
- Band 25 Schumacher, T. (1998).
Konzeption und Entwicklung eines integrierten maschinentechnischen Planungs- und Informationssystems für Rohstoffgewinnungsbetriebe;
ISBN: 3-86073-537-3
- Band 26 Rensmann, F. (1998).
Entwicklung einer kleinbauenden Gruben-Diesellokomotive mit optimiertem hydraulischen Antriebssystem unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-538-1
- Band 27 Asch, A. (1998).
Technische Diagnose am stoßaufgeladenen Dieselmotor mit Hilfe leistungskorrelierter Meßgrößen;
ISBN: 3-86073-539-X
- Band 28 Koch, S. (1998).
Schwingungssimulation industrieller Antriebe mit Drehfeldmaschinen großer Leistung;
ISBN: 3-86073-700-7
- Band 29 Wischnewski, R. (1998).
Entwicklung eines modularen, wissensbasierten Systems zur Diagnose von dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im Deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-701-5
- Band 30 Seeliger, A. (1998).
AKIDA - 2. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 3.-4. Juni 1998 in Aachen;
ISBN: 3-86073-531-4
- Band 31 Burgwinkel, P. (1998).

- Das Transportleitsystem TLS - ein zentrales Planungs-, Steuerungs- und Überwachungssystem zur Verbesserung der Materiallogistik von Steinkohlenbergwerken;
ISBN: 3-86073-703-1
- Band 32 Lange, C. (1998).
Die Entwicklung eines Planungs- und Informationssystems für die bergmännische Planung im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-704-X
- Band 33 Tao, X. (1997).
Konzeption einer Regelung zur automatischen Kohleninjektion in Drehstromlichtbogenöfen;
ISBN: 3-86073-705-8
- Band 34 Georges, D. (1999).
Konzeption, Entwicklung und Einsatz eines Überwachungssystems zur Erkennung und Vermeidung von qualitätsmindernden Störschwingungen an Kaltwalzgerüsten;
ISBN: 3-86073-706-6
- Band 35 Lorbach, J. (1999).
Konzeption und Implementierung eines objekt-orientierten Datenmodells zur integrierten Nutzung von Prozessdaten für den Bereich Wittertechnik;
ISBN: 3-86073-707-4
- Band 36 Reimers, J. (1999).
Konzeption eines Rohrleitungsplanungssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-708-2
- Band 37 Arefzadeh, S. (1999).
Klassifizierung der Belastung von Walzanlagen mittels Softcomputing-Methoden als Grundlage zur Stichplan- und Restlebensdaueroptimierung;
ISBN: 3-86073-709-0
- Band 38 Bauer, B. (2000).
Körperschallanalyse von Verzahnungen im Rahmen der zustandsorientierten Instandhaltung;
ISBN: 3-86073-670-1
- Band 39 Baumann, S. (2000).
Entwicklung eines Diagnosesystems für hydrostatische Antriebe von dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86073-671-X
- Band 40 Mandelartz, J. (2000).
Der Sekundäraluminium-Stoffstrom in Deutschland unter transporttechnischen und logistischen Gesichtspunkten;
ISBN: 3-86073-672-8
- Band 41 Schneider, S. (2000).
Methode zur Zustandsüberwachung von Kreuzgelenkwellen in den Hauptantrieben von Walzgerüsten;
ISBN: 3-86073-673-6
- Band 42 Quacken, G. (2000).
Bestimmung von produktspezifischen, störungsbedingten Qualitätskosten bei der Maschinen-diagnose;

ISBN: 3-86073-674-4

- Band 43 Türk, M. (2001).
Optimierung des Walzprozesses und der Anlagenauslastung durch moderne Diagnoseverfahren und vernetzte Überwachungssysteme;
ISBN: 3-86073-675-2
- Band 44 Teschers, R. (2001).
Konzeption und Entwicklung eines Gesamtinformationssystems in einem interdisziplinären Forschungsprogramm am Beispiel eines Arbeitsbereichs;
ISBN: 3-86073-676-0
- Band 45 Shan, J. (2001).
Zustandsdiagnose von Planetengetrieben bei stationärem und instationärem Betrieb mit Hilfe der Schwingungsanalyse;
ISBN: 3-86073-677-9
- Band 46 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2002).
AKIDA - 4. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 6.-7. November 2002 in Aachen;
ISBN: 3-86073-677-9
- Band 47 Lorbach, J. (1999).
Entwicklung und Erprobung eines neuartigen integrierten Informations-, Kommunikations- und Automatisierungssystems für den Untertagebau;
ISBN: 3-86073-679-5
- Band 48 Nahrath, T. (2003).
Untersuchung zur Erfassung des Säulendurchmessers bei der Düsenstrahlinjektion zur Baugrundfestigung;
ISBN: 3-89653-981-7
- Band 49 Heim, G. K. (2003).
Grenzen und Möglichkeiten einer EDV-Unterstützung gruppenbezogener Planungsarbeit am Beispiel bergbaulicher Produktionsbetriebe;
ISBN: 3-86130-210-1
- Band 50 Vollmer, A. (2003).
Technische und organisatorische Lösungen zur Einführung von Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystemen;
ISBN: 3-86130-192-X
- Band 51 Markhöfer, J. (2003).
Konzeption und Realisierung eines modellgestützten Instrumentariums zur Optimierung der Transportlogistik für den primären und sekundären Kupferstoffstrom;
ISBN: 3-86130-196-2
- Band 52 Hoppe, H. (2003).
Konzeption und Entwicklung eines technischen Berichtssystems zur weltweiten Anlagenüberwachung am Beispiel von Gutbett-Walzenmühlen;
ISBN: 3-86130-211-X
- Band 53 Weyres, S. (2003).
Mobile Computing in der Instandhaltung - Realisierung medienbruchfreier Arbeitsabläufe;

ISBN: 3-86130-212-8

- Band 54 Schaaf, C. (2003).
Entwicklung eines Reportgenerators zur prozessoptimierten Messsignalauswertung an Walzanlagen;
ISBN: 3-86130-213-6
- Band 55 Reitz, K. (2004).
Betrachtung der Körperschallemission von Wälzlagern zur Verfeinerung der Zustandsdiagnose;
ISBN: 3-86130-214-4
- Band 56 Gantevoort, T. (2004).
Integration der Körperschalldiagnose in das kommunikations- und informationstechnische System des deutschen Untertagebergbaus;
ISBN: 3-86130-215-2
- Band 57 Janser, S. (2004).
Modellierung einer Redistributionslogistik metallhaltiger Gebrauchsgüter am Beispiel von Elektronikaltgeräten;
ISBN: 3-86130-216-0
- Band 58 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2004).
AKIDA - 5. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 9.-10. November 2004;
ISBN: 3-86130-217-9
- Band 59 Schumacher, G. (2004).
Entwicklung und Erprobung eines nassmechanischen Bauschuttsortierers;
ISBN: 3-86130-218-7
- Band 60 Küpper, T. M. E. (2005).
Konzeption und Entwicklung eines intranetbasierten Informationssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 3-86130-219-5
- Band 61 Aguilar, C. A. (2005).
Konzeption und Implementierung einer komponentenbasierten Softwareentwicklungsplattform für raumbezogene internetfähige Informationssysteme;
ISBN: 3-86130-220-9

ASRE Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik

- Band 62 Balke, A. (2006).
Lebenszyklusrechnung von IPS-Systemen in der Auswahl-, Einführungs- und Betriebsphase;
ISBN-10: 3-9810344-2-2; ISBN-13: 978-3-9810344-2-4
- Band 63 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2006).
AKIDA - 6. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung -
Tagungsband des Kolloquiums vom 14.-15. November 2006 in Aachen;
ISBN-10: 3-9810344-3-0; ISBN-13: 978-3-9810344-3-1
- Band 64 Charlier, F. (2006).
Neuentwicklung eines schlagwettergeschützten Dieselmotors der Leistungsklasse bis 100kW
mit Abgasturbolader;
ISBN-10: 3-9810344-4-9; ISBN-13: 978-3-9810344-4-8
- Band 65 Bencze, A. (2007).
Entwicklung eines miniaturisierten Drehmomentmesssystems - μ -ETC;
ISBN: 978-3-9810344-5-5
- Band 66 Brümmer, G. (2008).
Konzeption, Entwicklung und Einführung eines grafikbasierten Qualitätssicherungs-Systems
für den mobilen Einsatz;
ISBN: 978-3-9810344-7-9
- Band 67 Steinhusen, C. (2008).
Konzept zur Überwachung elektronischer Komponenten in Windenergieanlagen mit Hilfe
konditionierter Simulation und begleitender Messung;
ISBN: 978-3-9810344-9-3
- Band 68 Meßner, A. (2008).
Verfahren zur Schadensdetektion bei langsam oszillierenden Kreuzgelenkwellenlagerungen in
Walzwerksantrieben;
ISBN: 978-3-941277-00-7
- Band 69 Lachmann, J. M. (2008).
Entwicklung eines simulationsgestützten Condition-Monitoring-Systems zur Onlineüberwa-
chung des mechanischen Antriebsstranges von Multimegawattwindenergieanlagen;
ISBN: 978-3-941277-01-4
- Band 70 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2008).
AKIDA - 7. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung -
Tagungsband des Kolloquiums vom 18.-19. November 2008 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-02-1
- Band 71 Buttgerit D. A. (2009).
Konzeption und Entwicklung eines WLAN-basierten Kommunikations- und Informationssys-
tems für den deutschen Steinkohlenbergbau;
ISBN: 978-3-941277-04-5

- Band 72 Molina Vicuña, C. (2010).
Contributions to the analysis of vibrations and acoustic emissions for the condition monitoring of epicyclic gearboxes;
ISBN: 978-3-941277-06-9
- Band 73 Nienhaus, K., Burgwinkel, P. (2010).
AKIDA - 8. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 17.-18. November 2010 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-08-3
- Band 74 Neye, E. (2010).
Integration von Informationstechnologie und Grubengebäude bei der Betriebsmittelplanung von Steinkohlebergwerken;
ISBN: 978-3-941277-09-0
- Band 75 Vreydal, D. (2011).
Entwicklung und Einsatz numerischer Simulationsmodelle zur Restlebensdauerabschätzung bei Antriebssträngen von Hubwindensystemen unter Nutzung eines zweiparametrischen Kollektivverfahrens;
ISBN: 978-3-941277-10-6
- Band 76 Mavroudis, F. (2011).
Infrarotsensorik zur Grenzschiefterkennung - Entwicklung und Einsatz eines bildgebenden Infrarotsystems bei der Automatisierung von Walzenladern im Untertagebergbau;
ISBN: 978-3-941277-12-0
- Band 77 Becker, S. (2011).
Weiterentwicklung und Erprobung eines Kollisionsschutzsystems für Personen und Fahrzeuge im Untertagebergbau;
ISBN: 978-3-941277-13-7
- Band 78 Gaastra, M. (2012).
Online-Elementanalyse in der Rohstoffgewinnung - Entwicklung und Konzeptionierung von Anwendungen der laserinduzierten Plasmaspektroskopie zur Echtzeitbestimmung mineralischer Rohstoffe am Beispiel unter- und übertägiger Gewinnungsgeräte;
ISBN: 978-3-941277-14-4
- Band 79 Vintila, C. R. (2012).
Entwicklung und Erprobung eines internetfähigen komponentenbasierten Informationssystems zur Echtzeitüberwachung von Schienenfahrzeugen;
ISBN: 978-3-941277-15-1
- Band 80 Vijayakumar, N. (2012).
Computer based Prototype of Heavy Duty Drive Systems by Electromechanical Co-simulation;
ISBN: 978-3-941277-16-8
- Band 81 Nienhaus, K., Burgwinkel, P. (2012).
AKIDA - 9. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 14.-15. November 2012 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-17-5

-
- Band 82 Baltes, R. (2013).
Entwicklung und Erprobung eines dieselelektrischen Hybridantriebes;
ISBN: 978-3-941277-18-2
- Band 83 Hahn, M. H. (2013).
Abbildendes Radarsystem für die Rohstoffindustrie;
ISBN: 978-3-941277-19-9
- Band 84 Nienhaus, K., Burgwinkel, P. (2014).
AKIDA - 10. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung -
Tagungsband des Kolloquiums vom 19.-20. November 2014 in Aachen;
ISBN: 978-3-941277-21-2
- Band 85 Zingsheim, J. M. (2015).
Inertiale Navigation für die Rohstoffindustrie;
ISBN: 978-3-941277-23-6
- Band 86 Bitzen, S. (2015).
Konzeption und Entwicklung eines 3D-Modell-basierten Prozessüberwachungssystems für die
Rohstoffgewinnung;
ISBN: 978-3-941277-24-3
- Band 87 Boos, F. D. (2015).
Acoustic Emission bei der Maschinen- und Prozessüberwachung - Neue Analysemethoden und
Anwendungsgebiete;
ISBN: 978-3-941277-25-0
- Band 88 Gárate Peñaranda, K. A. (2016).
Pattern Recognition, Classification and Diagnosis of Acoustic Emission Signals in Applications
for Mining;
ISBN: 978-3-941277-26-7
- Band 89 Schütz, M. (2016).
Konzeptentwurf und Erprobung eines Messsystems zur verbesserten Bestimmung der Ablege-
reife von Rundstahlgliederketten;
ISBN: 978-3-941277-28-1
- Band 90 Berg, J. (2016).
Entwicklung und prototypischer Einsatz eines Infrarotkameranystems für Automatisierungslö-
sungen im Rohstoffsektor;
ISBN: 978-3-941277-29-8
- Band 91 Neumann, K. W. (2016).
Ultra-Wideband-Technologie für den Einsatz im Schwermaschinenbau;
ISBN: 978-3-941277-30-4
- Band 92 Röllinger, D. M. (2017).
Beitrag zur Zustandsüberwachung von oszillierenden Wälzlagern am Beispiel von Windenergie
Pitchlagern;
ISBN: 978-3-941277-31-1

- Band 93 Büschgens, C. (2017).
Einfluss von Schnittparametern auf Schneidkraft und Acoustic Emission am Schneidkantenmeißel;
ISBN: 978-3-941277-33-5
- Band 94 Fietz, N. B. (2018).
Konzept für die explosionsgeschützte Materialanalyse von Staub-Wasser-Gemischen;
ISBN: 978-3-941277-34-2
- Band 95 Klein, C. I. (2018).
Ein Beitrag zur schwingungsbasierten Zustandüberwachung mit kostengünstigen Systemen;
ISBN: 978-3-941277-35-9
- Band 96 Vraetz, T. (2018).
Entwicklung und Anwendung eines innovativen Konzepts zur Inline-Charakterisierung von Stoffgemischen in kontinuierlichen Massenströmen mittels Acoustic Emission Technologie;
ISBN: 978-3-941277-36-6
- Band 97 Hilbert, M. (2018).
Investigation of the Gear Mesh vibrations of Planetary Gearboxes Considering phase modulation and Internal measurements;
ISBN: 978-3-941277-37-3
- Band 98 Philipp, M. (2018).
Ein Beitrag zur sensorunterstützten Steuerung schneidender Gesteinslöseverfahren;
ISBN: 978-3-941277-38-0
- Band 99 Bernet, C. (2018).
Ein Beitrag zur Analyse von Schallemissionssignalen;
ISBN: 978-3-941277-39-7
- Band 100 Niestroj, C. (2019).
Performance and Potential eines untertägigen Lokalisierungssystems auf Basis der Ultrawideband Funktechnologie;
ISBN: 978-3-941277-41-0
- Band 101 Leaman Weiffenbach, F. A. (2019).
Contribution to the diagnosis and prognosis of ring gear faults of planetary gearboxes using acoustic emissions;
ISBN: 978-3-941277-42-7
- Band 102 Philipp, B. (2020).
Entwicklung und Validierung eines Konzeptes zur Gesteinscharakterisierung mittels Infrarotthermographie;
ISBN: 978-3-941277-43-4
- Band 103 Niedringhaus, K. C. (2020).
Entwicklung eines Condition-Monitoring-Systems auf Basis einer Belastungsanalyse am Beispiel eines Beraubers;
ISBN: 978-3-941277-45-8
- Band 104 Hartmann, T. (2021).
Ein Beitrag zur untertägigen Navigation von mobilen Maschinen;
ISBN: 978-3-941277-46-5

- Band 105 Kianfar, A. (2022).
Ultra-wideband based positioning systems for harsh mining environment;
ISBN: 978-3-941277-47-2
- Band 106 Uth, F. (2022).
Entwicklung und Bewertung des Einsatzpotentials eines untertägigen Lokalisierungssystems
für Personen basierend auf Ultra-Breitband Funktechnologie;
ISBN: 978-3-941277-48-9
- Band 107 Wiele, S. (2023).
Entwicklung eines Stereo-Thermographie Systems als Beitrag zum maschinellen Sehen in der
Rohstoffgewinnung;
ISBN: 978-3-941277-49-6
- Band 108 Radl, A. (2023).
Entwicklung eines Konzeptes zur sensorbasierten Löserdetektion während des schlagenden
Beraubens;
ISBN: 978-3-941277-51-9
- Band 109 Storoschewich, V. (2024).
Entwicklung und Erprobung eines thermographischen Ansatzes zur Kunstharzerkennung bei
der Installation von Gebirgsankern;
ISBN: 978-3-941277-52-6

Der Tiefseebergbau kann dabei unterstützen den heutigen und zukünftig steigenden Bedarf an Rohstoffen sicherzustellen. Im Fokus liegt hier die kommerzielle Gewinnung von polymetallischen Knollen, die eine Vielzahl von kritischen Hochleistungsmetallen der Industrie zur Verfügung stellen würde. Dabei müssen die wirtschaftlichen und limitierenden Faktoren der polymetallischen Knollengewinnung, was auch vorhandene Potenziale und die biologischen, physikalischen und geologischen Besonderheiten impliziert, mit in Betracht gezogen werden. Die geplante technologische, auf den Grundlagen der Strömungsfördertechnik basierende Gewinnung von polymetallischen Knollenlagerstätten stellt eine Vielzahl von zu lösenden Problemstellungen auf. Insbesondere die sensortechnologische Erfassung und Charakterisierung von rohrgestützten mehrphasigen Materialströmen während der Gewinnung, kann einen Beitrag zur sicheren und optimierten Prozessführung gewährleisten und ist bis dato noch nicht zufriedenstellend gelöst.

Innerhalb dieser Arbeit wird ein Konzept zur Erfassung und Charakterisierung von mehrphasigen Materialströmen mittels eines Inline-Messsystem, dass auf einem gesonderten Phänomen des Körperschalls (engl. Acoustic Emission) basiert, erarbeitet. Neben dem Stand der Forschung zur Charakterisierung von Rohstoffen werden die Grundlagen der verwendeten Technologie erläutert. Darüber hinaus werden im Technikumsmaßstab eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt, um einen mechanischen Einsatz der Messtechnik in der Tiefsee und dabei die notwendige Qualität der aufgenommenen Messdaten für die Datenanalyse zu gewährleisten. Fokussiert wurde im Weiteren die Entwicklung eines Datennutzungskonzeptes zur Materialcharakterisierung eines rohrgestützten mehrphasigen Materialstroms. Das so erarbeitete Konzept wird bezogen auf die aufgestellten Anforderungen bewertet. Abgeschlossen wird die Arbeit mit der Zusammenfassung der relevanten Ergebnisse und einem Ausblick in die zukünftigen Arbeitsbereiche.