



HiTEM

Steckbrief der Begleitforschung r⁴-INTRA zur Abschätzung der Verbreitungspotenziale von den Forschungsergebnissen der Primärrohstoff-Verbundprojekte der BMBF Fördermaßnahme r⁴, den Beiträgen zur Senkung der Kosten und der Steigerung der Erfolgsaussichten bei der Exploration sowie den ökologischen Potenzialen

Projekttitle

Hochsensitives Messinstrument für die transiente Elektromagnetik zur Exploration von tiefliegenden Mineralienvorkommen

Koordination

supracon AG

Dr.-Ing. Jens Kobow

Projektpartner

- Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V.
- GRM-services Oy, Suomi, Finnland (assoziiert)
- BroadBand Geophysics (Pty) Ltd, Südafrika (assoziiert)

Laufzeit und Fördervolumen

01.05.2016 – 30.10.2019; 604.800 €

Projektziele (Verfahren / Technologien / Methoden)

Geophysikalische Technologieentwicklung für die Erkundung von sulfidischen Lagerstätten mit Tiefenerstreckung auch unterhalb von 500 m mittels hochsensitiven TEM-Empfängern (transiente, Zeitbereichs- oder Pulselektromagnetik) auch in gestörten, urbanen Gebieten. Basierend auf supraleitenden **Quanteninterferenz-Detektoren** (SQUID-Magnetfeldsensoren) und robuster *ac bias* Elektronik soll mittels bodengestützter Technologie der Untergrund erkundet werden. Ziel ist eine signifikante Rauschreduktion im Bereich niedriger Frequenzen < 10 Hz sowie die Entwicklung neuer Inversions- und Interpretationsverfahren.

Zielgruppe

Explorationsdienstleister. Über die Entwicklung einer alternativen Technologie kann der SQUID Markt diversifiziert und somit auch für KMUs lukrativer werden.

Aktuelle Verbreitung der entwickelten Methodik / Technologie

TEM ist ein weltweit verbreitetes und genutztes elektromagnetisches (EM) Verfahren zur Tiefenerkundung elektrisch leitfähiger geologischer Strukturen. Bisher werden vor allem Induktionsspulen eingesetzt, die aber insbesondere für niedrige Frequenzen (also große Eindringtiefen von EM-Wellen) nicht empfindlich genug sind. Zudem kommen Fluxgates und optisch gepumpten Magnetometer zum Einsatz, die zwar kostengünstiger aber nicht ausreichend empfindlich für die TEM sind. Einen Ausweg bieten Instrumente, welche flüssiges Helium zur Kühlung verwenden (logistisch problematisch und teuer), da die Genauigkeit hier sehr hoch ist. Die Low T_c SQUID (=LTS) Systeme wurden bis vor Kurzem exklusiv von Anglo American und Partnerfirmen angewendet (z.B. bei der Auffindung der Nickellagerstätte Sakatti, Lappland (FIN)).

Die entwickelten High T_c SQUID (HTS System) nutzen flüssigen Stickstoff zur Kühlung und sollen über die Projektarbeiten in einen ähnlichen Genauigkeitsbereich mit sehr geringem Rauschen gebracht werden, so dass für Europa erstmals ein mit LTS SQUID vergleichbares System auf der Basis von HTS SQUID entwickelt, erforscht und zur



Anwendung gebracht wird. SQUIDs als reine Magnetfeldsensoren bieten neben einem größeren Dynamikbereich verschiedene Vorteile in der Erzmineralexploration gegenüber der Hauptkonkurrenz aus Induktionsspulen, wie

- (1) SQUID-Instrumente ermöglichen eine große Eindringtiefe, welche z.B. für tiefreichende leitfähige Deckschichten (z.B. Sedimentbecken) vorteilhaft sind,
- (2) Magnetfeldresponse eines tief liegenden hochleitfähigen Leiters ist besser als einer kleinen oberflächennahen Leitfähigkeitsanomalie,
- (3) Deutlich bessere Detektierbarkeit eines Targets, welches mit einer leitfähigen Struktur überdeckt ist (hier vor allem bei niedrigen Frequenzen = späten Zeiten), u.v.m.

Ähnliche Argumente gelten auch für andere aktive EM-Verfahren insbesondere im luftgestützten Einsatz (siehe auch DESMEX).

Beeinflusste Wertschöpfungsstufen

Hauptsächlich Reconnaissance und Prospektion bei entsprechenden geologischen Vorarbeiten (Kartierungen), die einen Hinweis auf mögliche tiefliegende Vererzungen geben (bis zur Auswahl des Zielgebietes/Identifizierung möglicher Ressourcen). Darüber hinaus unterstützend in der Übersichts-Exploration (insb. bei Lagerstätten in großen Tiefen).

Zielrohstoffe Projekt

Sulfidische Erze, keine konkreten Zielrohstoffe

Zielrohstoffe - Übertragbarkeit

Alle sulfidisch gebundenen Erze

Lagerstättentyp Projekt

Sulfidische Erzlagerstätten, kein konkreter Lagerstättentyp

Lagerstättentyp - Übertragbarkeit

Die Verfahren sind nicht elementsensitiv, sondern bilden die elektrische Leitfähigkeit im Untergrund ab. Insofern kann die Technologie auf alle Lagerstättentypen angewandt werden, die durch anomale elektrische Leitfähigkeiten charakterisiert sind (alle sulfidischen, hydrothermal gebildeten Lagerstätten – VMS, SEDEX, Skarne, Porphyre, orogenisches Au). Der geophysikalische Nachweis kann nur in Form einer Hauptvererzung nachgewiesen werden. Die Technologie ist auch für die Identifizierung von tiefliegenden Aquiferen geeignet sowie zur Kartierung tiefliegender geologischer Formationen.

Regionale Verteilung der Lagerstätten (Deutschland / Europa / Welt)

Hydrothermal gebildete Lagerstätten (z.B. VMS, SEDEX, Skarne, Porphyre) sind weltweit anzutreffen. VMS-Lagerstätten wurden an Meeresbodenspreizungen vulkanogen gebildet. Sie sind meist relativ klein, haben aber insb. in größeren Tiefen einen ausreichenden Metallgehalt.

Deutschland

Rammelsberg (Harz) als Beispiel für eine SEDEX-Lagerstätte. Klassische Lagerstättendistrikte wie das Erzgebirge/Vogtland, Harz, Schwarzwald, Rheinisches Schiefergebirge; unter großer (>2.000 m) Sedimentbedeckung auch das Norddeutsche Becken

Europa

u.a. Tschechien (Erzgebirge), Portugal, UK (Cornwall), Skandinavien, (Frankreich, Spanien)



Welt

Potenzielle Lagerstätten sind weltweit zu erwarten. Aktuell explorierte Gebiete mit großen Reserven liegen in China, Südostasien, den zentralen Anden und Brasilien aber auch Südafrika und Kanada. Weiterhin an der Westküste Nordamerikas, an der Ostküste Australiens und in Ostrussland

Zielregion Projekt

Tests in Deutschland und Finnland.

Zielregion - Übertragbarkeit

Weltweiter Einsatz möglich.

Maßstab der aktuell entwickelten Technologie

Demonstrationsmaßstab, der mit wenigen Weiterentwicklungen (insb. in der Rauschunterdrückung) in den industriellen Maßstab überführt werden könnte.

Notwendige Investitionen für einen industriellen Einsatz der Technologie

Nicht bekannt.

Regionale Anwendungspotenziale (Deutschland / Europa / Welt)

Allgemein

Die vollständige Substitution bestehender Technologien (Spulen / Fluxgates) wird nicht möglich sein, da diese insbesondere oberflächennah im Verhältnis zwischen Datenqualität und Kosten auf der Anwendungsseite gegenüber den SQUID-Systemen Vorteile haben. Im Bereich tiefliegender und leitfähig überdeckter Targets wird jedoch die weitest gehende Technologieablösung erwartet. Daraus wird abgeleitet, dass für den Bereich der TEM ein Marktanteil von ca. 25% erschlossen werden kann. Nächstes Ziel ist die Überführung der Technologie in luftgestützte Erkundungsinstrumente = aktive luftgestützte EM-Systeme vor dem Hintergrund, dass der Markt luftgestützter Instrumente in den letzten Jahren deutlich angestiegen ist. Zudem trägt die Diversifikation der Applikationsfelder zu einer deutlich breiteren Vermarktung der Technologie bei. Weitere Felder sind z.B. die Exploration von Grundwasserressourcen oder hydrothermalen Reservoirs. Eine Weiterentwicklung in Richtung von HTS-Gradiometern ist durchaus möglich, aus heutiger Sicht aber nicht vordringlich.

Deutschland

Die Suche nach tiefliegenden hydrothermal gebildeten Lagerstätten könnte in Deutschland systematisch ausgeführt werden. Der Markt hierfür ist allerdings sehr klein und die Erfolgsaussichten sind nur schwer abzuschätzen.

Europa

Europaweit ergeben sich große Anwendungspotenziale bei zahlreichen Explorationsvorhaben. Die Wahrscheinlichkeit von tiefliegenden, bisher unentdeckten Lagerstätten ist hoch.

Welt

Auch weltweit ist das Anwendungspotenzial groß. Bisher ist Anglo American der exklusive Anwender der LTS-Instrumente. Die HiTEM-Technologie wird deutlich mehr Nutzern die Vorteile der SQUID-Technologie eröffnen, zumal die Verfügbarkeit von flüssigem Stickstoff gut ist. Die Wahrscheinlichkeit von tiefliegenden, bisher unentdeckten Lagerstätten ist hoch.

Hemmnisse bei der Verbreitung (Deutschland / Europa / Welt)

Allgemein

Bisher konnte noch nicht nachgewiesen werden, dass die Technik eine Lagerstätte auch tatsächlich detektieren kann. Jedoch werden im Ausland verstärkt HTS-Systeme auf Basis von *dc bias* kommerziell eingesetzt. Die Nachfrage



für die Durchführung von Fallstudien in Deutschland ist sehr niedrig. Im Rahmen einer derartigen Fallstudie könnte auch geprüft werden, ob die anomale geophysikalische Signatur von bekannten Lagerstätten groß genug ist.

Deutschland, Europa, Welt

Erfolgreiche Fallstudien unter Einsatz der Technologie nötig, die aber dank zerstörungsfreier und umweltschonender Exploration erfolgsversprechend sind.

Beiträge zur Senkung der Kosten bei der Exploration

Die auf SQUID-Magnetfeldsensoren basierende Technologie ermöglicht den einfacheren Zugang von sehr tiefen Rohstoffquellen (*Exploration under Cover*), unterstützen eine bessere Abschätzung der Ressourcen aufgrund der Bestimmung der Tiefenerstreckung und tragen erheblich zum umweltfreundlicheren Abbau aufgrund der Kenntnis der 3D-Erstreckung und genauere Minenplanung bei. Kosteneinsparungen aufgrund schnellerer Messdatenerfassung sind nur mit *airborne* Verfahren möglich.

Bohrungen zur Verifizierung und Bestimmung der Erzgehalte können zielgerichteter und erfolgreicher abgeteuft und somit Kosten deutlich reduziert werden. Jeder eingesparte Bohrmeter spart 15 – 80 US\$ ein (Hartman und Mutmansky 2002).

Beiträge zur Steigerung der Erfolgsaussichten bei der Exploration

Nach einer frühen Studie von Wellmer (1982) lässt sich die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden von unbekanntem Lagerstätten in größerer Tiefe theoretisch abschätzen. Hierfür wird angenommen, dass bei steil stehenden, an der Oberfläche aufgeschlossenen Lagerstätten im Durchschnitt die Hälfte des Erzkörpers bereits erodiert ist (Abbildung 1). Für die durchschnittliche Tiefe x der Lagerstätte bedeutet das $x/2$. Wellmer (1982) leitet von unterschiedlichen Lagerstätten in den USA und Kanada eine durchschnittliche Lagerstättentiefe von 400 m ($=x/2 \rightarrow x=800$ m) ab. Da nur bisher unbekannte Lagerstätten in die Berechnung zur Steigerung der Erfolgsaussichten einfließen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, eine neue Lagerstätte anzutreffen, linear mit der Tiefe (Wahrscheinlichkeit = Explorationstiefe ET / durchschnittliche Lagerstättentiefe x ; Abbildung 2). Daraus abgeleitet ergibt sich bei einer ET von 800 m die gleiche Wahrscheinlichkeit eine neue, nicht bekannte Lagerstätte anzutreffen wie an der Oberfläche. Bei der von HiTEM realisierten Tiefe von 500 bis 1.000 m beträgt die Wahrscheinlichkeit somit 60 bis 125 %.

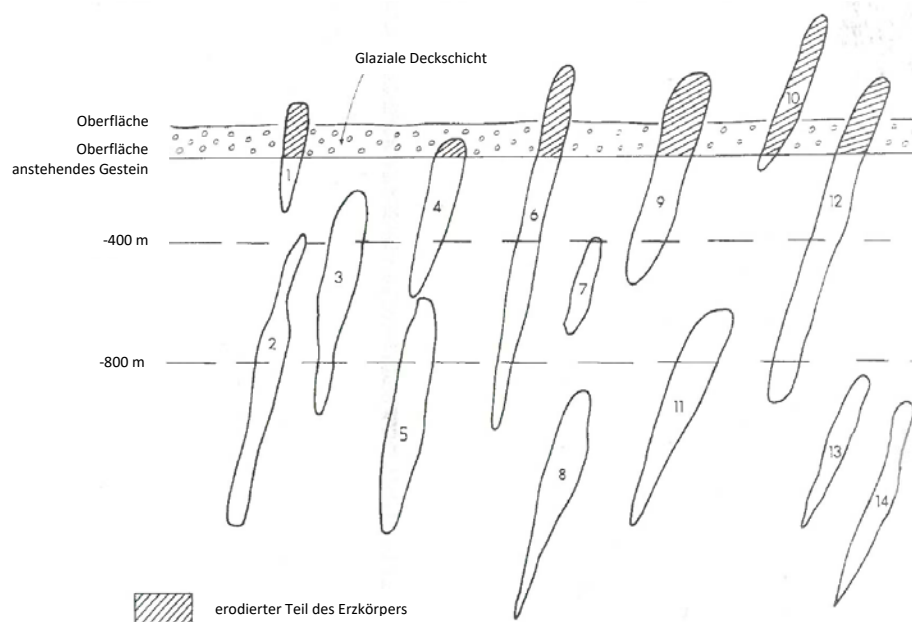


Abbildung 1: Modell für steil einfallende Erzkörper. Verändert nach Wellmer (1982)

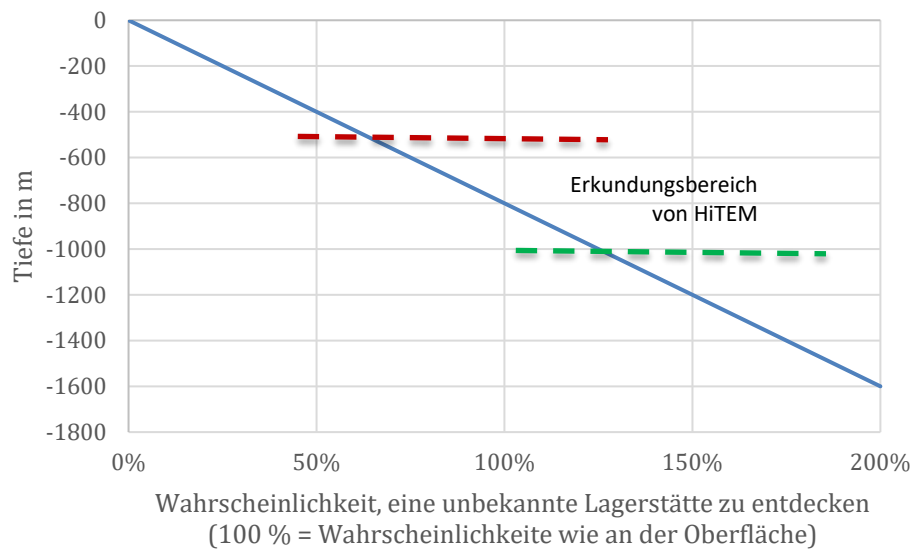


Abbildung 2: Wahrscheinlichkeit, eine von der Oberfläche noch nicht bekannte Lagerstätte zu entdecken. 100 % entspricht der gleichen Wahrscheinlichkeit die an der Oberfläche gegeben ist. Berechnungen basierend auf Modell von Wellmer (1982).

Diese Berechnung beruht allerdings auf variablen Annahmen und kann nur als Näherung betrachtet werden. Zudem muss die geophysikalische Erkundung weiterhin mit geochemischen und geologischen Modellen ergänzt werden.

Generell lässt sich festhalten, dass insb. in traditionellen Bergbauländern mit aktueller und/oder historischer Gewinnung die oberflächennahen Lagerstätten größtenteils bekannt sind. Vor diesem Hintergrund stellen Erkundungsmethoden mit einer hohen Eindringtiefe ein unabdingbares Instrument zum Auffinden neuer Lagerstätten dar.

Die theoretische Wahrscheinlichkeit für das Auffinden einer bauwürdigen Lagerstätte lässt sich nach Slaby und Wilke (2006) mit

$$p_e = p_{geo} * p_{pr} * p_{ex}$$

berechnen, wobei

- p_{geo} = Wahrscheinlichkeit für das geologische Vorhandensein des Vorkommens
- p_{pr} = Wahrscheinlichkeit dafür, dass das geologisch vorhandene Vorkommen auch gefunden wird
- p_{ex} = Wahrscheinlichkeit dafür, dass das gefundene Vorkommen auch abbauwürdig ist.

Hierbei handelt es sich um statistisch voneinander unabhängige Wahrscheinlichkeiten. Bei Explorationsprojekten in denen geophysikalische Techniken eingesetzt werden, kann man davon ausgegangen werden, dass das geologische Vorhandensein des Vorkommens über Modelle bereits ausführlich untersucht wurde und die Wahrscheinlichkeit bei 50 % (p_{geo}) liegt. Über die Methode von HiTEM steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das geologisch vorhandene Vorkommen auch gefunden wird erheblich an (theoretische Annahme: $p_{pr} = 0,5$ anstatt 0,05-0,1), während die Wahrscheinlichkeit, dass das gefundene Vorkommen auch bauwürdig ist ($p_{ex} = 0,1$), gleichbleibt. Die theoretischen Gesamterfolgsaussichten, dass das untersuchte Vorkommen in Produktion geht, würden somit um das 5-fache von 0,5 % auf 2,5% steigen.

Beiträge zur Versorgungssicherheit in Deutschland

Über die verbesserte Methodik können neue, tiefliegende Lagerstätten in Deutschland in den Fokus einer möglichen Gewinnung rücken. Während die Steigerung der Erfolgsaussichten beispielhaft quantifiziert werden können, sind



mögliche Beiträge zur Steigerung der Versorgungssicherheit rein spekulativ. Neben Vorkommen in Deutschland wird das Auffinden von Lagerstätten in größerer Tiefe weltweit über die HiTEM-Technologie wahrscheinlicher. Das könnte über eine Diversifizierung des Rohstoffmarktes indirekt einen positiven Einfluss auf die Versorgungssicherheit in Deutschland haben.

Ökologische Bilanzierung der Projektarbeiten und Beiträge zur Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität

Dank der detaillierten, nicht-invasiven geophysikalischen Erkundung können Bohrungen zur Verifizierung und Bestimmung der Erzgehalte zielgerichteter abgeteuft und somit generell deutlich reduziert werden.

Literatur

BGR. Fachinformationssystem Rohstoffe. 2020, unveröffentlicht

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. *Introductory mining engineering*. John Wiley & Sons, 2002.

SLABY, D.; WILKE, F. L. Bergwirtschaftslehre Teil II-Wirtschaftslehre der Bergbauunternehmen und Bergbaubetriebe. *Verlag der TU Bergakademie*, 2006.

WELLMER, F.-W. New genetic and geochemical concepts as guides to mineral exploration. In: *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Internationales Rohstoff-Symposium*. 3. 1982. S. 22-23.