

Absolute Positionierung unter Tage mittels transientelektromagnetischer Felder

Stephan Malecki, Ralph-Uwe Börner, und Klaus Spitzer

Institut für Geophysik und Geoinformatik, TU Bergakademie Freiberg

ZUSAMMENFASSUNG:

Die dreidimensionale Positionsbestimmung unter Tage ist eine in der bergbautechnischen Praxis häufig gestellte Aufgabe. Die derzeit gebräuchlichen Verfahren basieren überwiegend auf zahlreichen relativen Messungen zwischen Festpunkten an der Erdoberfläche und dem zu bestimmenden Punkt unter Tage.

Das hier vorgestellte Verfahren ist ein im geodätischen Sinn absolutes Verfahren. Die Punktbestimmung erfolgt direkt mit Hilfe der Festpunkte über Tage und dem unbekanntem Punkt unter Tage. Relative Messungen zu benachbarten Punkten sind nicht notwendig.

Die Grundlage des Verfahrens bildet die zeitliche Erfassung transienter elektromagnetischer Felder an einem zu bestimmenden Punkt unter Tage. Die Quellen dieser Felder sind gleichstromdurchflossene Drahtschleifen an der Erdoberfläche, die näherungsweise magnetische Dipole darstellen. Nach Abschalten des Stromes zerfällt das statische Magnetfeld und induziert elektrische Ströme in der leitfähigen Erde. Das transiente Magnetfeld wird unter Tage an einem Punkt für verschiedene Senderpositionen aufgezeichnet. Mit Hilfe eines Inversionsalgorithmus werden letztlich die dreidimensionalen Koordinaten des Messpunktes bestimmt.

ABSTRACT:

Three-dimensional positioning in mines and caves is a common challenge. The methods currently used are based on numerous relative measurements.

The method presented here is an absolute procedure in a geodesic sense. The coordinates of the unknown point are directly calculated using the surface points and the point underground. Relative measurements to neighboring points are not necessary.

The localization procedure is based on recording transient electromagnetic fields underground. They are generated at the surface using direct-current carrying wire loops, which approximately represent magnetic dipoles. After shutoff the static magnetic field decays and induces electric currents in the conductive Earth. The transient electromagnetic field is

recorded at an unknown point in the subsurface for different source positions. Finally, the three-dimensional coordinates of this point are reconstructed using an inversion algorithm.

1 Einleitung

Anfang der 90er Jahre erfuhr das Vermessungswesen durch die Einführung des GPS einen immensen Innovationsschub. Die dreidimensionale Punktbestimmung in der angewandten Ingenieurgeodäsie ist seit dem kein zeitraubendes und aufwändiges Verfahren mehr. Durch den Ausbau verschiedener Systeme wie GPS, GLONASS, Galileo und Beidou können auch unter zunehmend komplexeren Bedingungen (Abschattungen, Mehrwegeausbreitung) Genauigkeiten erzielt werden, die den täglichen vermessungstechnischen Ansprüchen genügen.

Diese komfortable Lösung des Positionierungsproblems ist ausschließlich an der Erdoberfläche gegeben, da unter Tage das GPS-Signal nicht empfangen werden kann. Im Bergbau existieren weiterhin die bewährten und aufwändigen Methoden der relativen Punktbestimmung mittels Polygonierung, Nivellement und Lotung.

Dennoch gewinnt die dreidimensionale Punktbestimmung unter Tage stetig an Bedeutung. Viele Prozesse, die zukünftig überwacht werden sollen, beispielsweise wechselnde Standorte von Förder- und Transportanlagen, sowie die Bewegungen von Maschinen unter Tage können derzeit nur sehr beschränkt an speziellen Monitorpunkten kontrolliert werden. Eine schnelle Punktbestimmung oder gar eine Navigation unter Tage ist bisher nur sehr eingeschränkt möglich.

Das vorgestellte Verfahren ist ein im geodätischen Sinn absolutes Verfahren. Das Referenzkoordinatensystem über Tage wird direkt auf den unbekanntem Punkt unter Tage übertragen. Die Unabhängigkeit dieses Systems von Festpunkten unter Tage ermöglicht zudem eine Positionsbestimmung in gänzlich unbekanntem Gebiet wie beispielsweise im Altbergbau oder in Höhlensystemen.

2 Modellbeschreibung und Messprinzip

Das System besteht aus mehreren Sendern (Tx) an der Erdoberfläche und einem Empfänger (Rx) unter Tage.

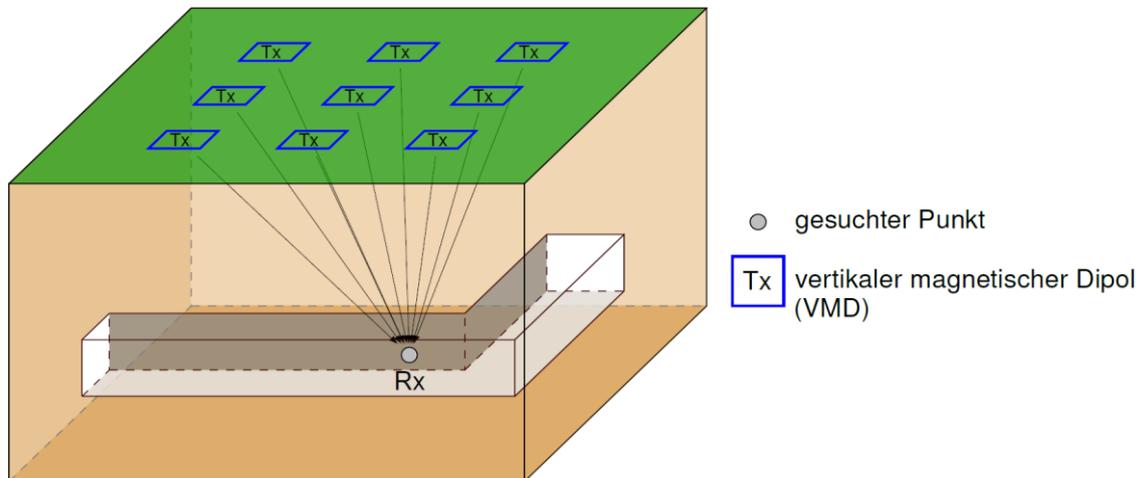


Abb. 1: Skizze zum Verfahren: Die vertikalen magnetischen Dipole (VMD) liegen als quadratische Drahtschleife an der Erdoberfläche und der Messpunkt Rx befindet sich in einem Hohlraum unter Tage. Die Pfeile zwischen Sender und Empfänger veranschaulichen die Ausbreitung des transienten elektromagnetischen Feldes im Sinne eines Strahls ohne Anspruch auf physikalische Plausibilität.

In einer geschlossenen Drahtschleife über Tage (Tx) fließt ein Gleichstrom, der ein statisches Magnetfeld (Primärfeld) aufbaut. Das plötzliche Abschalten des Gleichstromes lässt dieses Magnetfeld zusammenbrechen, wobei ein Stromsystem im Untergrund induziert wird. Dieses Stromsystem erzeugt ein sekundäres Magnetfeld, dessen Änderung am Empfänger unter Tage (Rx) gemessen werden kann.

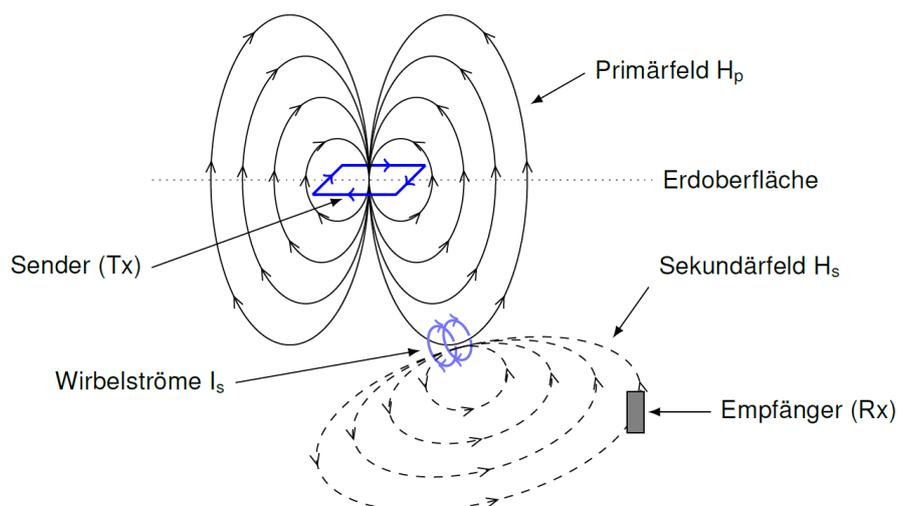


Abb. 2: Prinzip der TEM-Messung

Aus den Messdaten, der Kenntnis über die räumliche Verteilung der Sender über Tage und einer groben Annahme zum Leitfähigkeitsmodell kann in einem Inversionsalgorithmus die Position des Empfängers berechnet werden. Im Verlauf der Inversion werden sowohl die Position als auch das Leitfähigkeitsmodell qualitativ angepasst, wobei der Schwerpunkt auf der Berechnung der Position liegt.

3 Ergebnisse

Um den Aufwand für die Testmessung zu minimieren, wurde über Tage ein Sender (VMD) in einer Auslage von 100m x 100m ausgelegt und die transienten elektromagnetischen Felder an mehreren geodätisch bekannten Punkten unter Tage gemessen.

Die Aufgabe bestand in der Bestimmung des VMD-Zentrums über Tage. Diese Umkehrung ist auf Grund der Reziprozität des Problems möglich.

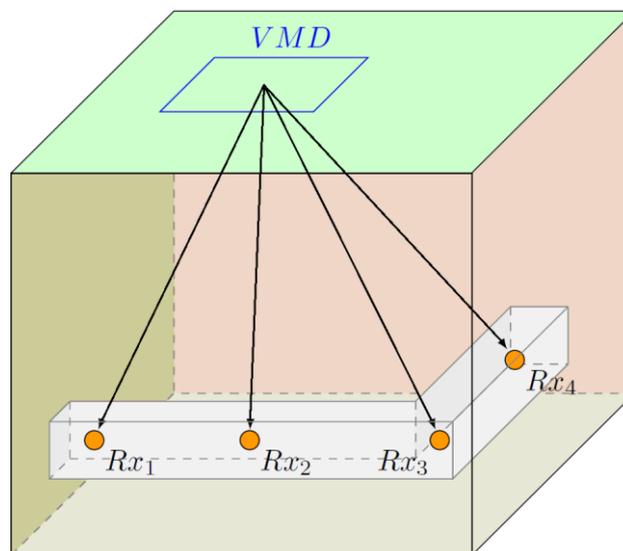


Abb. 3: Umkehrung des Mess- und Berechnungsverfahrens

Die hohe Redundanz des Problems erlaubt zusätzlich zu den gebräuchlichen Fehlermaßen des mittleren Punktfehlers und der Helmertschen Fehlerellipse die Angabe einer Konfidenzellipse. Eine vertiefte Darstellung der Methode im Zusammenhang mit der Positionierung unter Tage findet sich bei Malecki et al. (2013).

Das berechnete Zentrum für den VMD über Tage lag 5,71 m vom tatsächlichen Zentrum entfernt. Die Fehlerbetrachtung ergab einen mittleren Punktfehler von 8,98 m. (vgl. Abb. 4)

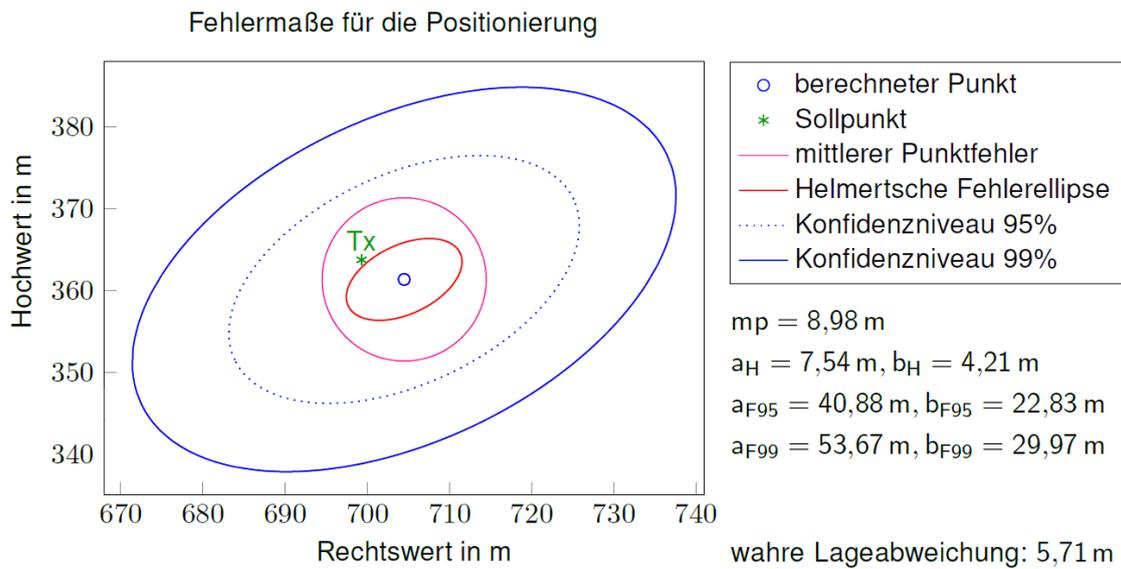


Abb. 4: Ergebnis der Positionierung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Schon mit der ersten Testmessung konnte gezeigt werden, dass eine sichere Positionsbestimmung unter Tage mittels transientelektromagnetischer Verfahren möglich ist. Der Berechnungsalgorithmus erwies sich als robust und zuverlässig. Die deutliche Überbestimmung des Systems trägt zu einer sicheren Fehleraussage bei.

Aus einer Tiefe von 150 m konnte eine Positionierung mit einem tatsächlichen Lagefehler von 5,71 m durchgeführt werden. Die Fehlerberechnung weist einen mittleren Punktfehler von $m_p = 8,98 \text{ m}$ aus und schließt den wahren Punkt mit ein.

Der Vorteil der Methode besteht vor allem in der schnellen und direkten Punktbestimmung. Auch sind navigationsähnliche Lösungen denkbar. Gleichwohl kann das System die bisherigen geodätischen Verfahren nicht ersetzen.

Durch ein verbessertes Messverfahren wird es zukünftig möglich sein a priori Fehlerschätzungen der Messgrößen in die Ausgleichung einzuführen. Dies wird vermutlich zu einer weiteren Steigerung der Positionierungsgenauigkeit beitragen.

LITERATURVERZEICHNIS

Malecki, Stephan, Börner, Ralph-Uwe und Spitzer, Klaus (2013). "Messungen zur 3-D Positionsbestimmung einer Dipolquelle über dem Forschungs- und Lehrbergwerk "Reiche Zeche"". In: 25. Schmucker-Weidelt-Kolloquium für Elektromagnetische Tiefenforschung, S. 52–59.