

# Ein Verfahren zur Rekonstruktion eines Bohrlochverlaufs mittels transientelektromagnetischer Felder

S.Malecki, M. Bär und K. Spitzer  
Institut für Geophysik und Geoinformatik, TU Bergakademie Freiberg

**Schlagwörter:** Elektromagnetik, Bohrlochgeophysik, Positionierung, Orientierung, Fehlerrechnung

## 1 Einleitung

Bei Messungen in Bohrlöchern und den späteren Inversionen fehlen vereinzelt Informationen zum Verlauf des Bohrlochs unter Tage. Vielfach wird dann das Bohrloch vereinfachend als ideal senkrecht angenommen. Dies kann zu Fehlern bei Oberflächen-zu-Bohrloch- oder Bohrloch-zu-Bohrloch-Messungen führen, da die Empfängerkoordinaten in der Lage  $(x, y)$  nur unzureichend bekannt sind. Mit dem im Folgenden vorgestellten Verfahren wird eine Möglichkeit aufgezeigt diese Koordinaten unter Angabe einer Genauigkeit mit Hilfe von Bohrloch-TEM-Messungen zu bestimmen.

Im Sommer 2018 wurden in Brooks, Alberta, Kanada TEM-Messungen für das Monitoring einer CO<sub>2</sub>-Verpressung durchgeführt. Auch für dieses Bohrloch lagen keine Informationen zum Verlauf unter Tage vor, so dass es für die Berechnungen zum Monitoring mangels weiterer Informationen zunächst als ideal senkrecht angenommen werden musste. Aufbauend auf einem Verfahren zur Bestimmung eines Einzelpunktes (vgl. Malecki et al. [2020]) wurden die TEM-Messlokationen im Bohrloch und damit dessen Verlauf bestimmt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Beschreibung des Messaufbaus

Das zu untersuchende Bohrloch befindet sich in der kanadischen Steppenlandschaft südwestlich von Brooks. Die Gegend ist überwiegend flach und eben. In weiterer Entfernung verlaufen eine Fernverkehrsstraße (539) und zwei moderat befahrene Straßen (Range Rd. 163 und Township Rd. 174). Das Gebiet ist in elektromagnetischer Hinsicht besonders störungsarm, was sich auch in der hohen Qualität der Daten spiegelt.

Die vier quadratischen Drahtschleifen mit einer Kantenlänge von 100 m sind konzentrisch um den Kopf des Bohrloches angeordnet (vgl. Abb. 1). Bis in eine Teufe von ca. 50 m ist das Bohrloch stahlverrohrt, so dass erst ab 60 m TEM-Daten vorliegen.

Das Bohrloch gehört zur FRS (Field Research Station) der CMC (Carbon Management Canada Research Institutes Inc.). Die Messungen wurden im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen dem Institut für Geophysik und Geoinformatik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg und den CMC durchgeführt (CMC-Projekt C394). Ziel des Projektes waren Untersuchungen zur quantitativen Überwachung von CO<sub>2</sub>-Verpressungen im Boden mittels transientelektromagnetischer Verfahren (vgl. Bär [2021], Lawton et al. [2017]). Die Messungen von wurden durch die DFG gefördert (Projekt Sp 356/15-1).

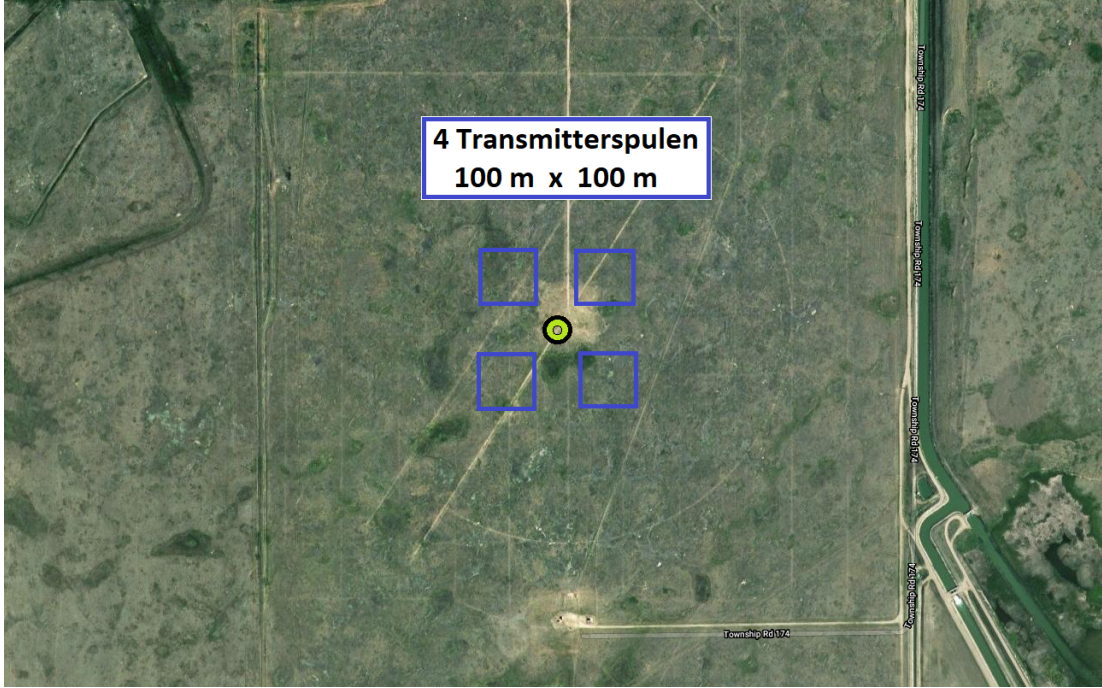


Abb. 1: Übersicht zur Spulenanordnung im Messgebiet in Brooks, Kanada

## 2.2 Inversion

In einer Inversion wird mit den aus der Messung gewonnenen Daten (Transienten) die Position der Bohrlochsonde für jede angesprochene Teufe berechnet. Diese Berechnungen sind vollkommen unabhängig voneinander.

Mit dem Vorwärtsoperator  $F(\mathbf{m})$  werden für ein 1D-Modell (geschichteter Halbraum) die entsprechenden Transienten berechnet (vgl. Scheunert et al. [2013]). Im Modellvektor  $\mathbf{m}$  sind die Modellparameter Position  $(x, y, z)$  und die spezifischen Schichtwiderstände  $\rho_i, i = 1, 2 \dots n$  und die zugehörigen Schichtdicken  $d_j, j = 1, 2 \dots n - 1$  mit  $i, j \in \mathbb{N}$  gespeichert.

Ziel der Inversion ist das Datenresiduum  $F(\mathbf{m}) - \mathbf{d}$  zu minimieren. Dies gelingt mittels einer Linearisierung. Wird das Ergebnis der Linearisierung Null gesetzt und nach  $\Delta\mathbf{m}$  abgeleitet, erhält man die Rekursion

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + (\mathbf{J}^\top \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^\top \Delta\mathbf{d}, \quad (1)$$

mit dem Datenresiduum  $\Delta\mathbf{d} = F(\mathbf{m}) - \mathbf{d}$  und der Jacobimatrix  $\mathbf{J}$ , die die Ableitungen des Vorwärtsoperators nach den Modellparametern enthält.

## 2.3 Datentransformation

Die gemessenen Transienten streuen über mehrere Dekaden (vgl. Abb. 2). Zusätzlich sind die Beträge in der Jacobimatrix  $\mathbf{J}$  sehr klein, so dass beim Quadrieren (bspw.  $\mathbf{J}^\top \mathbf{J}$ ) die Maschinengenauigkeit unterschritten werden kann. Zur Kompression der Dynamik des Messsignals wird die Transformation

$$\mathbf{d} \Rightarrow \operatorname{asinh}(\mathbf{d}/\epsilon), \quad (2)$$

angewandt, wobei  $\mathbf{d}$  der Datenvektor und  $\epsilon$  ein Skalierungsfaktor sind. Der Faktor  $\epsilon$  ist frei wählbar. Im vorgestellten Fall beträgt  $\epsilon = 10^{-14}$ . Das Ergebnis der Transformation ist beispielhaft in Abb. 3 dargestellt.

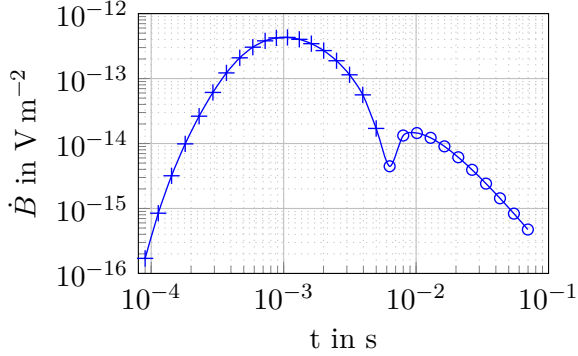


Abb. 2: Daten (Transient)

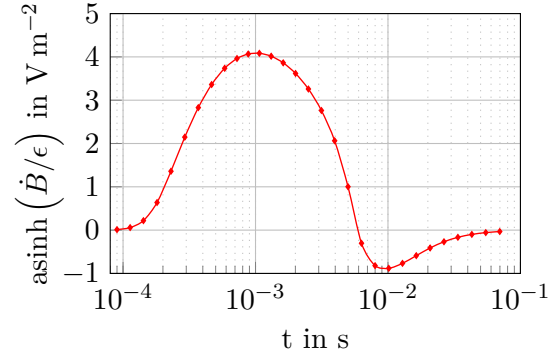


Abb. 3: transformierte Daten

## 2.4 Fehlerschätzung

Ausgangspunkt für die Parameterschätzung in Abschnitt 2.2 sind fehlerbehaftete Daten. Diese und auch die an dieser Stelle nur beispielhaft benannten Fehler in den Annahmen zum Leitfähigkeitsmodell, in der Vermessung der Eckpunkte der Tx-Schleifen bzw. des Bohrlochkopfes und in der Spannungsmessung im Messgerät selbst, beeinflussen das Ergebnis der Parameterschätzung. Es wird eine Möglichkeit vorgestellt, mit der sich dem jeweiligen Parameter eine empirische Standardabweichung zuordnen lässt.

Für die Berechnung der empirischen Standardabweichung werden der Vektor der Verbesserungen

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}\Delta\mathbf{m} - \Delta\mathbf{d} \quad (3)$$

sowie die Anzahl der Überbestimmungen (Redundanz)

$$r = \text{Spur}(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^n R_{i,i}, \quad (4)$$

die aus der Redundanzmatrix

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} - \mathbf{J} \left[ (\mathbf{J}^\top \mathbf{J})^{-1} \right] \mathbf{J}^\top \quad (5)$$

hervorgeht, benötigt. Die Matrix  $\mathbf{I}$  ist die Einheitsmatrix. Mittels (3) und (4) ergibt sich die empirische Standardabweichung

$$s_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^\top \mathbf{v}}{r}}. \quad (6)$$

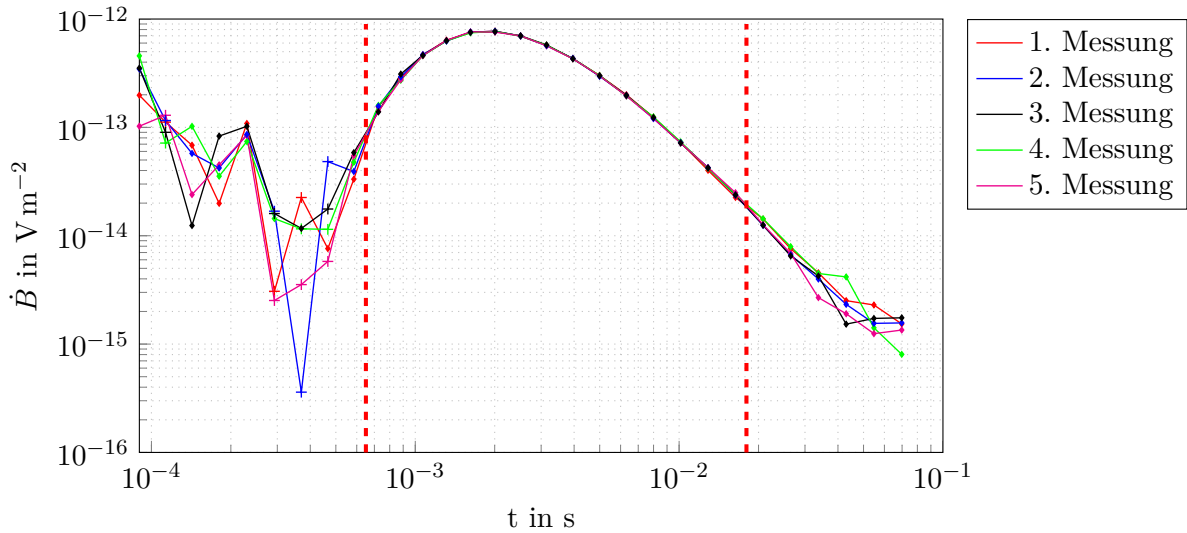
Die Kofaktorenmatrix der Modellparameter

$$\mathbf{C}_{mm} = s_0^2 (\mathbf{J}^\top \mathbf{J})^{-1} \quad (7)$$

enthält auf ihrer Hauptdiagonalen die Varianzen und den Nebendiagonalen die Kovarianzen der jeweiligen Modellparameter (siehe auch Niemeier [2008]).

## 2.5 Datenvorbehandlung

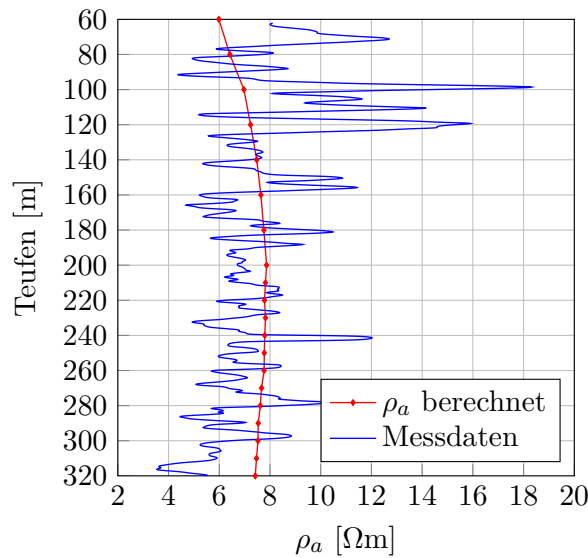
Für jeden Tx wurden auf jeder Teufe fünf Messungen durchgeführt. Aus den fehlerbehafteten und verrauschten Daten konnten durch statistische Verfahren Bereiche, die nicht zur Verbesserung des Ergebnisses beitragen, ermittelt werden (vgl. Abb. 4). Auch konnten in der Datenrevision einzelne Transienten, die offensichtliche Fehlmessungen gewesen sind, identifiziert werden.



**Abb. 4:** Durch statistische Verfahren werden für jeden Datensatz die Grenzen der zugelassenen Messwerte (hier innerhalb der roten Linien) festgelegt.

## 3 Bohrlochrekonstruktion

Für die Inversion sind zunächst qualifizierte Startwerte zu suchen. Das Leitfähigkeitsmodell für die Berechnung des Bohrlochverlaufs ist bewusst einfach gehalten. Es besteht anfangs nur aus einem homogenen Halbraum. Für die Berechnung des Startwertes für diese Hintergrundleitfähigkeit wird angenommen, dass das Bohrloch senkrecht ist. Über eine Inversion, bei der die Teufen zunächst bekannt sind, kann eine homogene Hintergrundleitfähigkeit für jede Teufe berechnet werden. Diese stimmen gut mit den Bohrlochwiderstandslogs überein (vgl. Abb. 5).

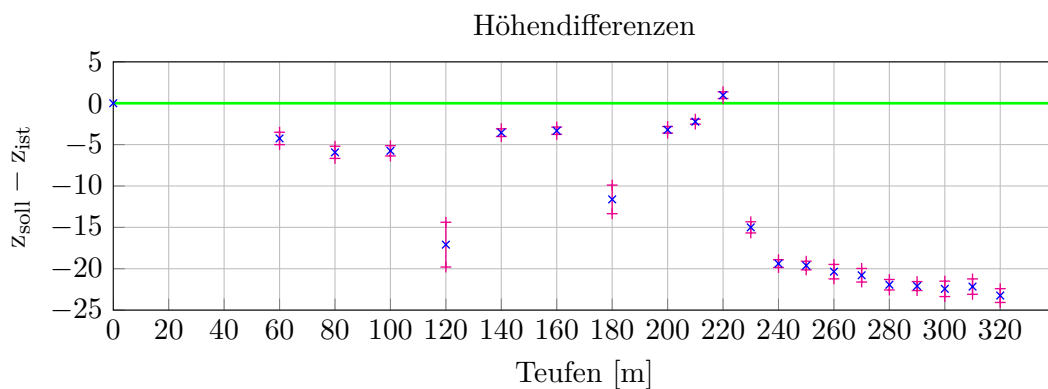


**Abb. 5:** Startwert für die Inversion: Leitfähigkeit.

Für jede Teufe werden nun unabhängig von einander jeweils die Parameter  $x, y, z, \rho$  geschätzt. Als Startwerte zur Parameterschätzung gelten stets für

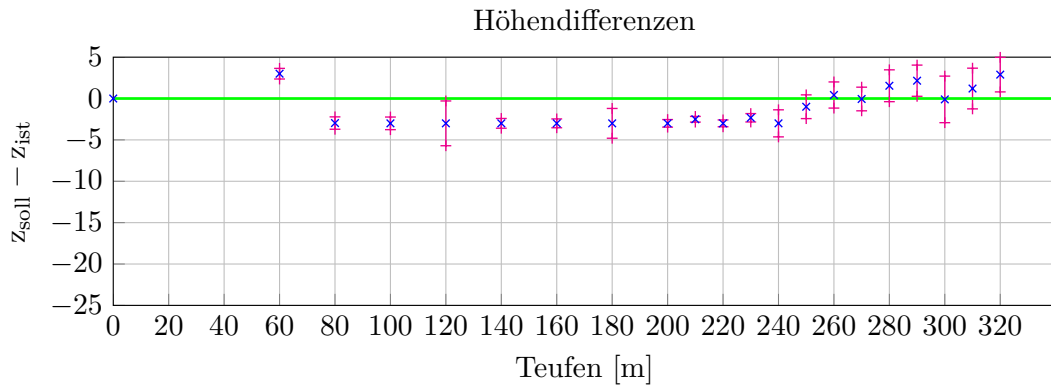
- die Lage ( $x, y$ ) die Koordinate an der Oberfläche,
- die Teufe ( $z$ ) die Ablesung des Wirecounters und
- den spezifischen Widerstand  $\rho$  der oben benannte Schätzwert der Hintergrundleitfähigkeit.

Beim Betrachten des Soll-Ist-Vergleiches der berechneten Teufen fällt auf, dass sprunghafte Änderungen der Abweichung zur Sollhöhe auftreten (vgl. Abb. 6).



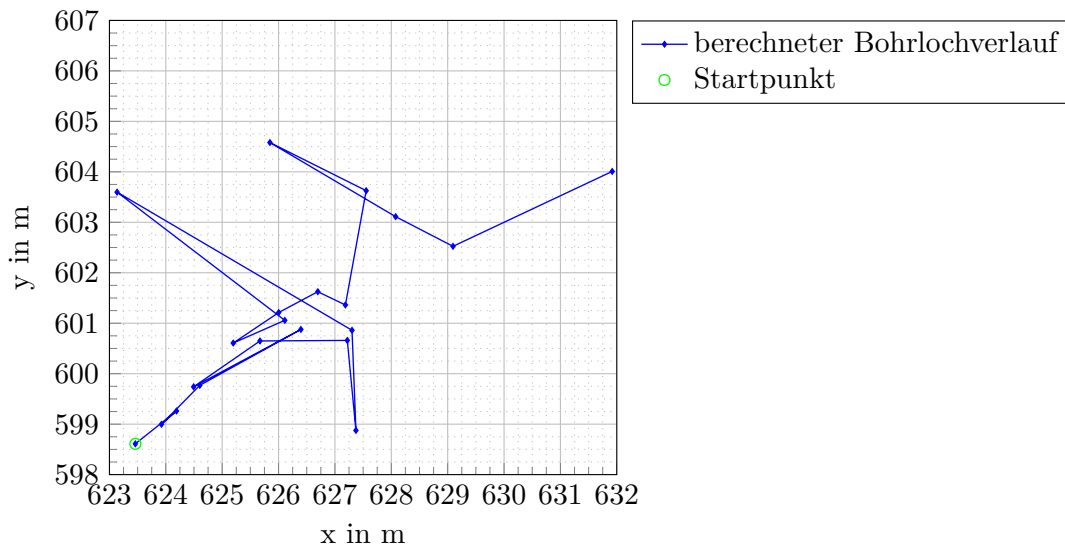
**Abb. 6:** Vergleich Soll (grün) - Ist (blau) für die  $z$ -Koordinate mit der jeweiligen empirischen Standardabweichung (rot)

Der Sprung bei 230 m wird durch Einführen einer besser leitfähigen Schicht (Mächtigkeit 5 m) auf dieser Teufe beseitigt. In einem zweiten Schritt war zu sehen, dass diese Maßnahme auch bei 290 m erforderlich ist. Im Ergebnis ist ein deutlich verbessertes Ergebnis für die Höhenbestimmung in Abb. 7 ablesbar.



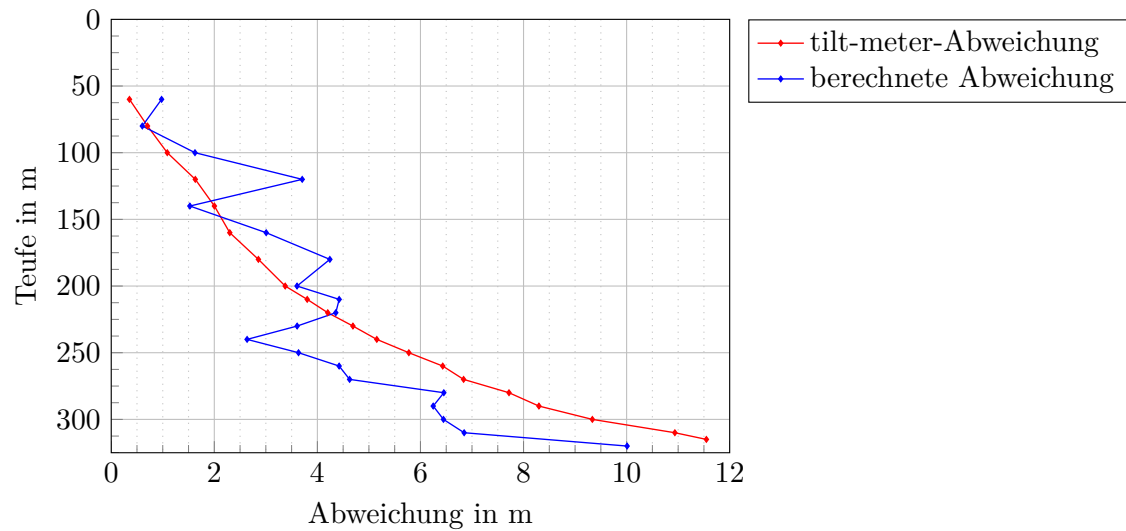
**Abb. 7:** Im erneuten Vergleich Soll (grün) - Ist (blau) ist eine deutliche Verbesserung gegenüber Abb. 6 zu erkennen.

Das Ergebnis in der Lage sieht auf den ersten Blick wenig glatt aus (vgl. Abb. 8). Der Trend ist dennoch klar erkennbar. In weiteren Untersuchungen ist bereits ein Verfahren gefunden worden, dass unter Berücksichtigung der vorhergehenden und nachfolgenden Ergebnisse eine Glättung vornimmt. Die ursprünglichen Messdaten werden dabei einbezogen. Zum aktuellen Zeitpunkt ist es noch nicht implementiert.



**Abb. 8:** Verlauf des Bohrloches in der Lage  $(x, y)$

Wird die Vertikalabweichung aufsummiert und mit den Messdaten aus dem Tiltmeter verglichen, erscheint die Berechnung des Bohrlochverlaufes plausibel (vgl. Abb. 9).



**Abb. 9:** Vertikalabweichung im Vergleich zwischen berechnetem Verlauf und den Daten aus dem Tiltmeter.

## 4 Zusammenfassung

Am Beispiel der TEM-Messungen in Bohrloch des CO<sub>2</sub>-Monitorings konnte gezeigt werden, dass die Bestimmung des Bohrlochverlaufes grundsätzlich möglich ist. Zukünftig ist für die Angabe des Verlaufes die Implementation eines Glättungsalgorithmus sinnvoll. Weiterhin können a priori Information über die Leitfähigkeitsstruktur zu einer Verbesserung des Positionierungsergebnisses beitragen.

## References

- M. Bär. *Classification and repeatability studies of transient electromagnetic measurements with respect to the development of CO<sub>2</sub>-monitoring techniques*. Dissertation, 2021.
- D. C. Lawton, K. G. Osadetz, A. Saeedfar, and M. Macquet. Monitoring technology innovation at the CaMI Field Research Station, Brooks, Alberta. *Calgary: CMC*, 2017.
- S. Malecki, R. Börner, and K. Spitzer. A new method for absolute underground positioning based on transient electromagnetics. *Geophysical Journal International*, 221(1):87–96, 2020.
- W. Niemeier. *Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden*. Walter de Gruyter, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage edition, 2008.
- M. Scheunert, R.-U. Börner, and B. Siemon. EM fields of a VMD calculated at arbitrary points within a layered half-space. *25. Schmucker-Weidelt-Kolloquium*, pages 5–20, 2013.