

Numerische Simulation von Metalldetektordaten in 2D und 3D

J. Lange, T. Hanstein und S. L. Helwig

Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln

Zusammenfassung

Die numerische Simulation des Metalldetektor-Signals hilft die auftretenden elektromagnetischen Vorgänge besser zu verstehen und erlaubt die Modellierung komplexerer Geometrien, als dies mit analytischen Methoden möglich ist. Der Vergleich beider Methoden für eine Kugel zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten Spannungen in 2D und 3D. Die gezeigten Beispiele veranschaulichen die Unterschiede für Kugel und Zylinder, diskutieren den Effekt der Gegeninduktion und eines Isolators und geben einen Ausblick auf weitere Möglichkeiten der Modellierung hinsichtlich dreidimensionaler Simulationen von Minenattrappen.

Einleitung

Als Hinterlassenschaften bewaffneter Konflikte gefährden Landminen in vielen Ländern die Bevölkerung. Die rasche und vollständige Beseitigung der weltweit etwa 100 Millionen vergrabenen Landminen ist eine große technische Herausforderung. Eines der dabei am häufigsten eingesetzten Geräte ist gegenwärtig der Metalldetektor. Die verwendeten Geräte funktionieren nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion, ähnlich den TDEM- und FDEM-Systemen in der Geophysik. Der geringe Metallanteil des Zündmechanismus¹ ist ausreichend, einen Alarm auszulösen und ermöglicht so das Auffinden der wenige Zentimeter unter der Erdoberfläche verborgenen Landminen. Das vom Metalldetektor ausgegebene akustische Signal liefert jedoch keine Information über Tiefe, Form oder

Materialeigenschaften des gefundenen Objektes. Eine Unterscheidung der Landminen von anderen im Boden vorliegenden metallischen Teilen, wie Patronenhülsen oder Schrott ist daher nicht möglich und eine hohe Fehlalarmrate ist so die Folge. Das BMBF-Projekt „HuMin/MD - Minensuche mit Metalldetektoren: Entwicklungspotentiale bei Datenanalyse und Messtechnik“ hat zum Ziel diese Fehlalarmrate zu mindern, indem mit verschiedenen Ansätzen möglichst viele Informationen über den Störkörper aus dem Detektorsignal gewonnen werden. Der Ansatz der Kölner Arbeitsgruppe ist die Simulation und Inversion der Metalldetektordaten. Für die Inversion werden schnelle analytische Simulationen benutzt, bisher jedoch nur für Kugeln und Ringe. Für die Simulation von komplexeren, für Landminen typischen Geometrien werden numerische Simulationen

mit der kommerziellen Software FEMLAB durchgeführt. Sie erlauben es, verschiedene physikalische Fragen zu untersuchen wie die nach der Gegeninduktion zwischen den Metallteilen oder dem Effekt eines Nichtleiters um das Metall. Zudem lassen sich so unabhängige Datensätze für die Inversion gewinnen. FEMLAB löst beliebige partielle Differentialgleichungen auf einem Finite-Elemente-Gitter in 2D und 3D. Wegen der geringen Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder im Metall bedarf es bei der Berechnung vor allem einer sehr hohen Diskretisierung des Modellraums im Körper.

Simulationen in 2D mit Axialsymmetrie

Zunächst werden Modellierungen im Zeitbereich für rotationsymmetrische Körper im Boden unter zwei koinzidenten Spulen

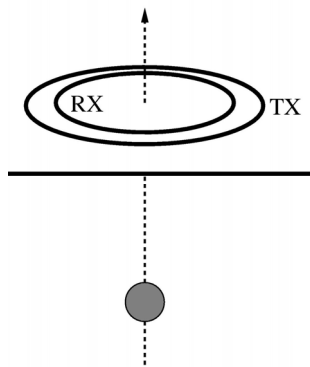


Abbildung 1: Die Kugel befindet sich auf der Sender- und Empfängerspulenachse.

Gezeigt (Abbildung 1 und 2). Das Sendesignal entspricht einer Stufenfunktion. Unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie

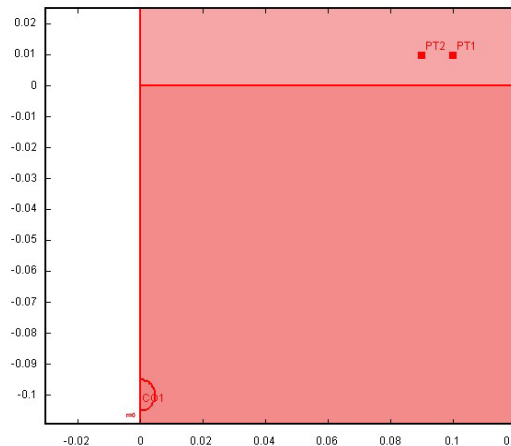


Abbildung 2: Modelraum. Durch die Anwendung der Randbedingung der Rotations-symmetrie (vertikale Rotationsachse bei 0) wird die 2D-Geometrie in eine 3D-Geometrie überführt. Die Skala beschreibt die vertikalen und horizontalen Maße in m.

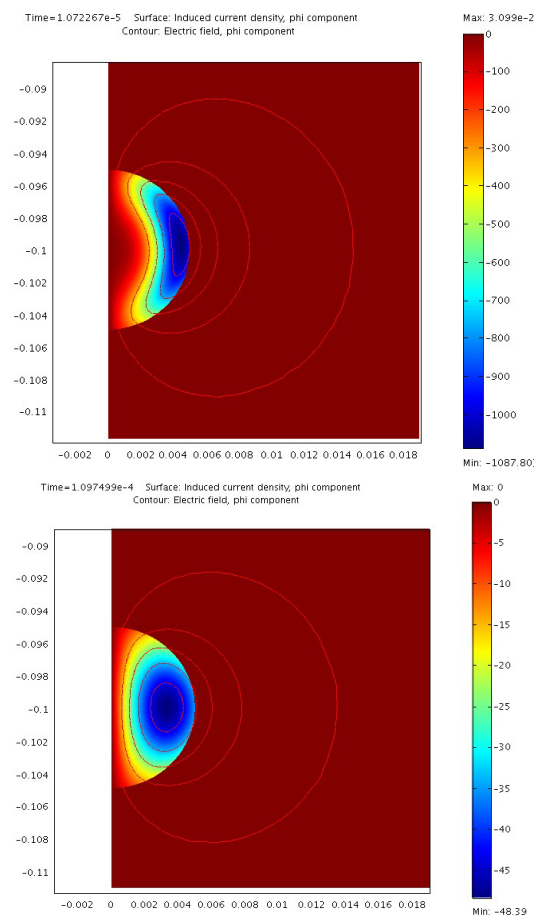


Abbildung 3: Induzierte Stromdichte in A/m^2 und elektrische Felder in der Kugel bei 10 und 100 μs . Die Achsen beschreiben die vertikalen und horizontalen Abmessungen in m.

kann das Modell in ein 2D-Modell überführt und der Rechenaufwand so deutlich verringert werden. Der Modellraum sollte mindestens doppelt so groß sein wie die maximale Diffusionstiefe. In diesem Fall sind dies 200 m. Als Randbedingung wurde gewählt, dass das magnetische Potential auf dem Rand verschwindet.

Abbildung 3 zeigt die induzierten Stromdichten und elektrischen Felder 10 und 100 μs nach abschalten des Stroms. Deutlich zu erkennen ist das tiefere Eindringen des Stromsystems zu späteren Zeiten.

Vergleich der Simulationsergebnisse mit der analytischen Lösung

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Ergebnisse wurden die in der Empfängerspule induzierten Spannungen mit den Ergebnissen der analytischen Lösungen verglichen. Der Zeitbereich wurde etwas größer als der für Metalldetektoren typische Messbereich von 10 μs – 1 ms gewählt. Die Beispiele in Abbildung 4 zeigen das simulierte und analytisch berechnete Signal einer magnetischen und einer unmagnetischen Metallkugel mit 1 cm Durchmesser in 15 cm Tiefe im leitfähigen Halbraum, sowie das ungestörte Bodensignal. Man erkennt eine gute Übereinstimmung zwischen den Lösungen.

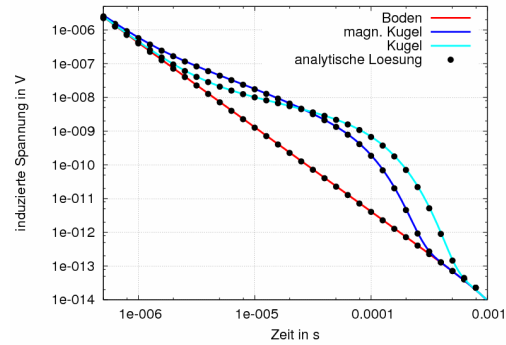


Abbildung 4: Vergleich der in der Empfängerspule induzierten Spannungen der analytischen und der numerischen Modellierungen.

Die hohe Genauigkeit wird zu frühen Zeiten durch eine feine Diskretisierung der Kugel und zu späten Zeiten durch eine große Anzahl von Zeitpunkten pro Dekade erreicht.

Simulation von Landminen ähnlichen Modellen

Die Simulation komplexerer Modelle ermöglicht es bestimmte Annahmen zu überprüfen. Die in Landminen verbauten Metallteile stehen in der Regel nicht in direktem Kontakt mit dem Erdboden. Um sie herum sind ein

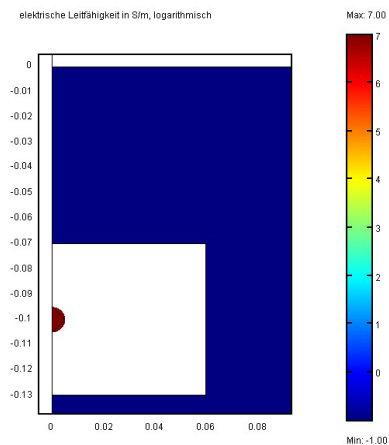


Abbildung 4: Modell einer Kugel im elektrisch nicht leitenden Gehäuse. Die Farbskala beschreibt den Logarithmus der Leitfähigkeit in S/m.

Gehäuse und eine Sprengstoff-füllung, die elektrisch isolieren. In den analytischen Modellen werden Gehäuse und Sprengstoff vernachlässigt, zudem wird die galvanische Kopplung zwischen Metallteil und Boden nicht berücksichtigt. Durch die Modellierung einer Kugel im nicht leitenden Zylinder (Abbildung 4)

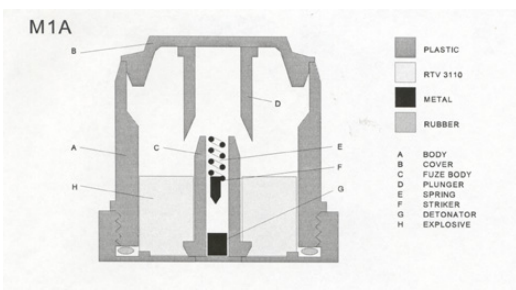


Abbildung 5: Skizze der Minenattrappe M1A

können diese Annahmen überprüft werden. Die in Abbildung 6 gezeigten Ergebnisse zeigen, dass beide Annahmen gerechtfertigt sind. Unabhängig davon ob ein nichtleitendes Gehäuse

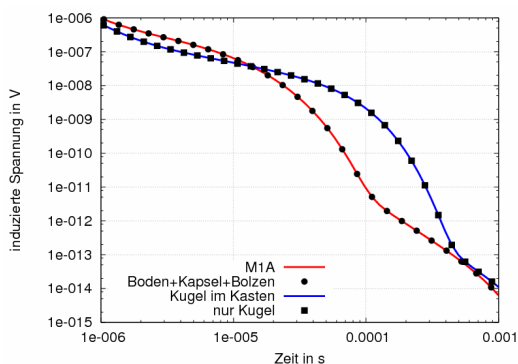


Abbildung 6: Induzierte Spannungen für die im Text besprochenen Modelle.

um die Kugel herum ist oder nicht erhält man identische Spannungen. Das zweite in Abbildung 6 dargestellte Beispiel zeigt eine Simulation der Minensurrogate M1A. Das Signal ist

wegen der kleineren Teile deutlich geringer.

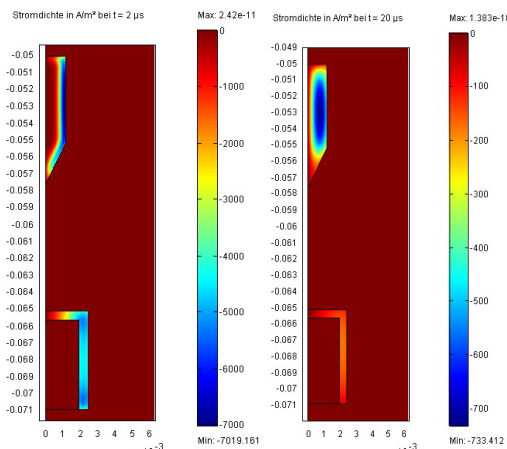


Abbildung 7: Induzierte Stromdichte im Schlagbolzen und in der Zündkapsel bei 2 und 20 µs. Die Einheiten der Ordinate und Abszisse sind Meter.

Zusätzlich zur Modellierung der gesamten Mine wurden Schlagbolzen und Zündkapsel einzeln simuliert und die Ergebnisse addiert. Da sie mit den für die gemeinsame Simulation erhaltenen Spannungen übereinstimmen, spielt hier die Gegeninduktion keine Rolle. Die induzierten Stromdichten zeigt Abbildung 7. Die Feder konnte aufgrund der Symmetriebeschränkung nicht modelliert werden.

3D Simulationen im Frequenzbereich

3D Simulationen sind bei FEMLAB bisher nur für eine harmonische Anregung möglich. Gezeigt werden Modellierungen für die Metalldetektor typischen Frequenzen, 2,4 kHz und 19,2 kHz. Der Modellraum ist 2 m x 2 m x 4 m groß. Die Sendespule entspricht der Empfängerspule

($R = 15 \text{ cm}$). Die induzierten Spannungen werden durch Flächenintegration der zeitlichen Ableitung des magnetischen Flusses berechnet. Um die nur

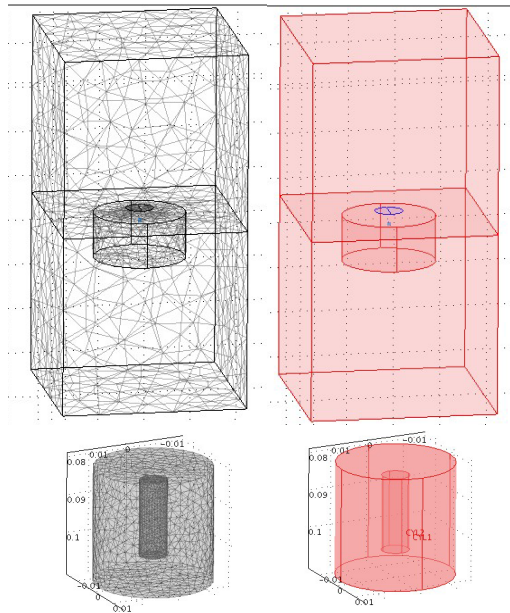


Abbildung 8: Modellraum und Gitter für die gekoppelten Geometrien. Der eingebettete Zylinder ist im großen Modellraum blau dargestellt. Die Einheiten der Achsenbeschriftungen ist Meter.

wenige Zentimeter großen Metallteile in einem möglichst großen Modellraum diskretisieren zu können, wurden zwei Modellräume miteinander gekoppelt. Abbildung 8 zeigt beide Modellräume und die Gitter. In dem größeren Modellraum wurde ein 3 cm hoher Zylinder mit 1,5 cm Radius eingefügt (Abb. 8 oben). In einem zweiten ebenso großen zylindrischen Modellraum (Abb. 8 unten) können nun sehr kleine Teile ausreichend fein durch finite Elemente diskretisiert werden. Beide Modellräume werden über die Bedingung gleicher magnetischer und elektrischer Potentiale auf der Zylinderober-

fläche miteinander gekoppelt. Durch diese Form der Modellraumteilung ist gewährleistet, dass die Metallteile für verschiedene Positionen im Raum das gleiche Gitter benutzen und so die Daten für ein Profil von vergleichbarer Qualität sind.

Profile über eine Kugel und einen Zylinder

Für die Inversionsverfahren werden synthetische Daten für verschiedene Positionen zwischen Objekt und Detektor benötigt. Die Beispiele zeigen Daten für ein Profil über eine Kugel mit 5,1 mm Radius und einen Zylinder mit 2 cm Höhe und 2,97 mm Radius. Beide Objekte

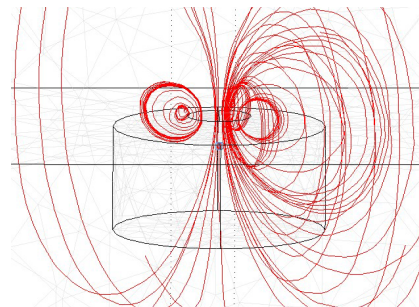


Abbildung 9: Magnetische Flussdichte in Realteil.

befinden sich mit ihrem Mittelpunkt 13,35 cm tief unter der Spule. Simulationen mit 2D-Axialsymmetrie ergeben für beide Körper direkt unter der Spule gleich große induzierte Spannungen bei 19,2 kHz. Bei 2,4 kHz sind die durch die Kugel hervorgerufenen Spannungen größer. Zum Vergleich werden jeweils die analytisch berechneten Werte für die Kugel gezeigt.

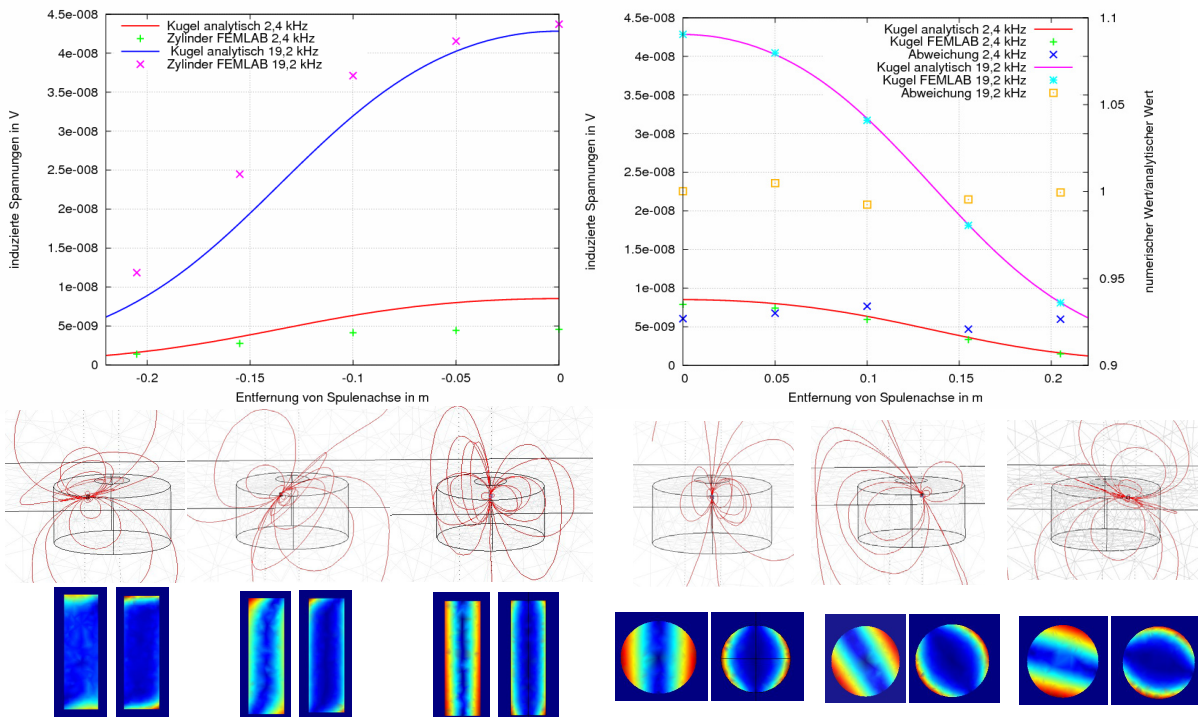


Abb. 10: Profil über eine Kugel und einen Zylinder für 2,4 und 19,2 kHz. Oben: Induzierten Spannungen im Vergleich zu den analytischen berechneten Werten. Mitte: Imaginärteil der magn. Flussdichte. Unten: induzierte Stromdichte im Objekt (rot: hohe, blau: niedrige) für 2,4 kHz (je links) und 19,2 kHz (je rechts) an den Positionen 0 cm, 10 cm und 20,5 cm.

Ausblick

Ziel ist es möglichst genaue Simulationen typischer Metallanordnungen in Minen zu berechnen. Anhand dieser kann untersucht werden wie die aus der Inversion erhaltenen Ergebnisse zu interpretieren und welche Bauteile der Mine wesentlich für die Signalbildung sind. Wegen der kleinen Abmessungen, wie zum Beispiel bei der dünnen Wand einer Zündkapsel, sind jedoch wesentlich mehr und deutlich kleinere Gitterelemente nötig. Bei dem in Abbildung 11 gezeigten Beispiel kommt es wegen einer zu geringen Elementdichte bei einer Achsensymmetrischen Anordnung zu unsymmetrischen Stromsystemen.

Eine Verbesserung kann durch einen besseren Gittergenerator oder höhere Rechnerkapazitäten erreicht werden. Eventuell kann sich sogar durch neuere Gittergeneratoren die Notwendigkeit der Modellraumzerlegung erübrigen und so die Anzahl der Freiheitsgrade weiter minimiert werden.

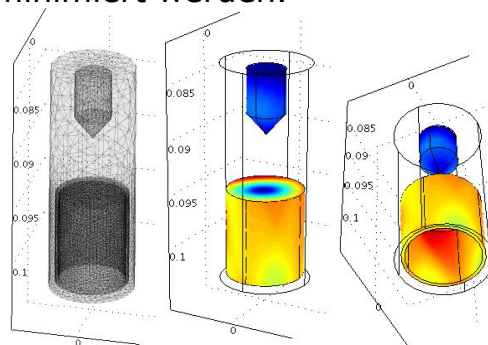


Abbildung 11: Gitter und induzierte Stromdichte für eine Simulation der Minenattrappe M1A. Die Achsenbeschriftung ist Meter.