

# Simulation von Metalldetektoren zur Detektion von Landminen

T. Hanstein, J. Lange, S. L. Helwig, A. Donat, A. Hördt, B. Tezkan

## Einleitung

Das Räumen von Landminen ist weltweit ein sehr aktuelles Problem. Zur Detektion werden zur Zeit verschiedene Verfahren eingesetzt und erprobt. Routinemäßig ist die Verwendung von Metalldetektoren, die ein akustisches Signal abgeben, wenn man sich einem gutleitenden Objekt nähert. Da aber der Metallanteil bei modernen Minen immer geringer wird, werden die zu messenden Signale immer schwächer und der Einfluss des Bodens gewinnt an Bedeutung. Ein zusätzliches Problem ist, dass in einem zu räumenden Gebiet eine Vielzahl anderer Metallgegenstände verstreut sind. Dies führt zu einer hohen Fehlalarmrate. Zur Zeit läuft ein Verbundvorhaben, vom BMBF gefördert, zur Reduktion dieser hohen Fehlalarmrate. In dieser Studie werden verschiedene Typen von Metalldetektoren simuliert.

## Metalldetektoren im Frequenzbereich

Metalldetektoren sind aktive induktive Systeme, die im niederfrequenten Bereich arbeiten und aus einer oder mehreren Spulen bestehen. Zur Messung wird ein zeitlich veränderlicher Strom generiert, der ein zeitlich variierendes Magnetfeld erzeugt. Dieses magnetische Primärfeld induziert in einem metallischen Objekt Ströme, die wiederum ein sekundäres Magnetfeld hervorrufen.

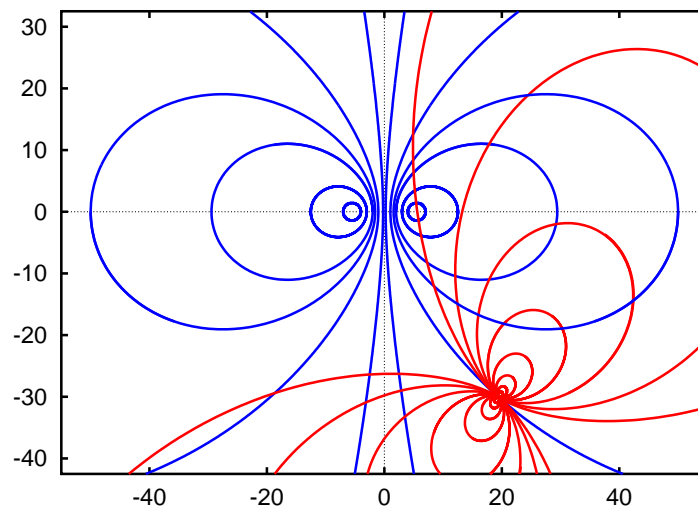


Abbildung 1: Das durch die Sendespule erzeugte Primärfeld erzeugt in der Kugel ein Sekundärfeld.

Das Metall-objekt wird durch eine Kugel bzw. eine Kugel-schale approximiert. Ist das äußere anregende Primärfeld um die Kugel herum nahezu homogen, kann das induzierte Sekundärfeld als magnetische Dipolquelle interpretiert werden. Das magnetische Dipolmoment dieser Quelle ist das Produkt aus dem anliegenden Magnetfeld und einem Reflektionsfaktor  $D(\omega)$ , der eine Funktion der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität, sowie des inneren und äußeren Radius einer Kugelschale ist. Die induzierten Ströme im Metall fließen nach der Lenzschen Regel so, dass der magnetische Dipol dem äußeren Feld entgegen wirkt. Die Permeabilität im Metall dagegen verstärkt das anliegende Feld. Das hier simulierte Objekt ist eine Eisenkugel mit 28,5 mm Durchmesser, einer Leitfähigkeit von  $10^7$  S/m und einer relativen Permeabilität von  $\mu_r=1$  oder 100.

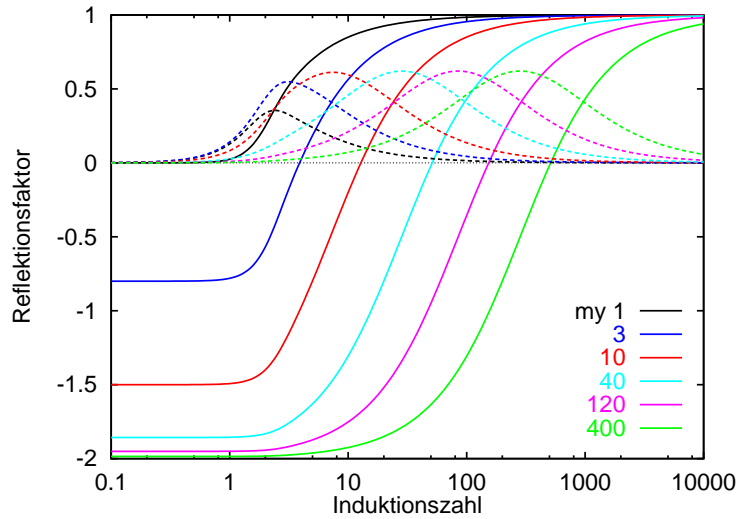


Abbildung 2: Real- und Imaginärteil (gestrichelt) des Reflexionsfaktors der Kugel für verschiedene Permeabilitäten.

### Minex 2FD

Als erstes Beispiel eines Metalldetektors wird das Minex 2FD von Förster simuliert. Die Empfängerspule besteht aus zwei Halbkreisen die entgegengesetzt gewickelt sind, so dass die Differenz des magnetischen Flusses in den beiden Spulen gemessen wird. Hierdurch wird das sehr starke Primärfeld des Senders kompensiert. Diese Konfiguration ermöglicht eine sehr genaue Lokalisierung des Objektes, da beim Überqueren des Objektes ein Vorzeichenwechsel im Signal sichtbar ist.

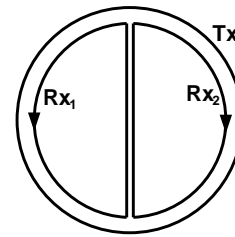


Abbildung 3: Die Spulenanordnung beim Minex 2FD.

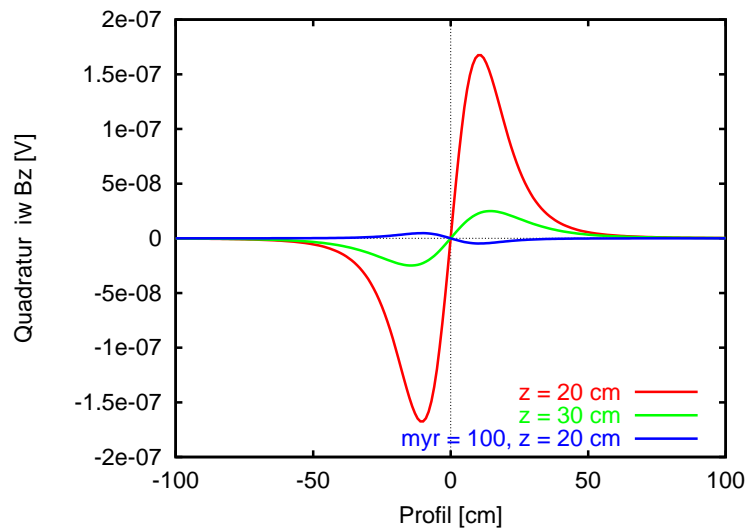


Abbildung 4: Simuliertes Profil des Minex 2FD 20 cm und 30 cm über einer Kugel im Vollraum bei 19,2 kHz. Die blaue Line zeigt wie sich das Signal für eine magnetisch permeable Kugel verändert.

### GEM3

Eine andere Methode das Primärfeld zu unterdrücken, ist der Einsatz von Kompensationsspulen. Als Simulationsbeispiel dient das GEM3 von Geophex. Hier wird am Empfänger das Magnetfeld der äußeren Senderspule durch eine zweite kleinere Senderspule mit einem negativen Strom unterdrückt. Bei einer idealen Kompensation ist der Ort am Empfänger feldfrei.

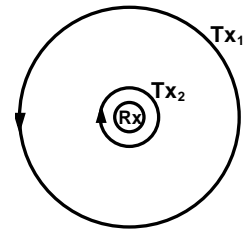


Abbildung 5: Die Spulenordnung beim Geophex GEM3.

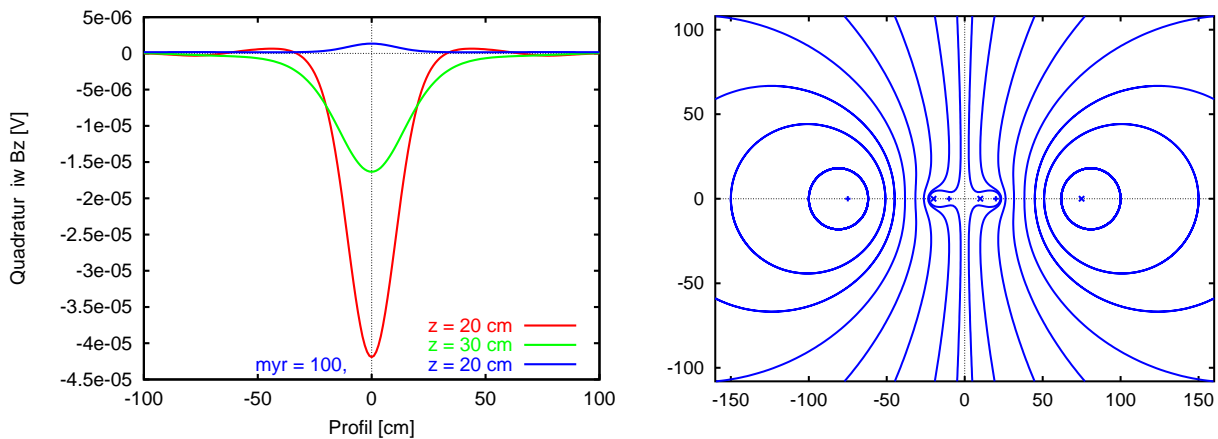


Abbildung 6: links: Simuliertes Profil des Geophex GEM3 20 cm und 30 cm über einer Kugel im Vollraum bei 19,2 kHz. Die blaue Linie zeigt wie sich das Signal für eine magnetisch permeable Kugel verändert. rechts: Durch die Kompensationsspule ist der Ort der Empfängerspule feldfrei.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass eine ideale Kompensation selbst bei der Vorwärtsrechnung nicht zu erreichen ist. Im Lufthalraum sollte kein Beitrag in der Quadratur des Signals vorhanden sein. Ein kleiner Fehler macht sich hier durch einen linearen Anstieg mit der Frequenz bemerkbar. Rechnungen im Lufthalraum zeigen, dass numerische Integration und analytische Lösung bis auf die vierte Stelle hinter dem Komma übereinstimmen. In der Praxis werden die Probleme größer sein.

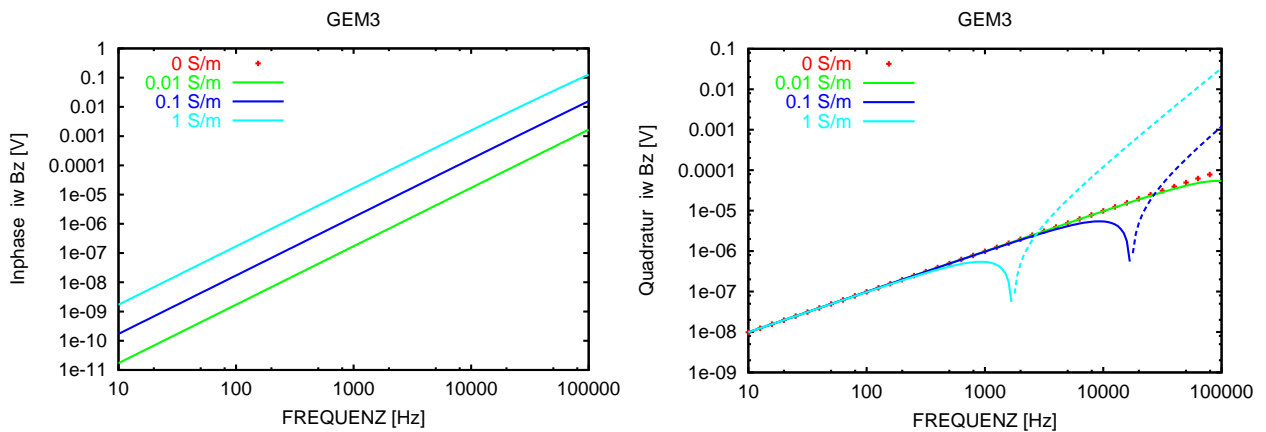


Abbildung 7: Inphase und Quadratur des Empfangssignals über einem homogenen Halbraum mit verschiedenen Leitfähigkeiten.

Die Leitfähigkeit des Untergrundes hat einen Einfluss auf das Messsignal und die Kompensation. Der mit dem Sendesignal in Phase schwingende Anteil zeigt ein Frequenzverhalten, das direkt proportional zur Leitfähigkeit ist. Bei dem um 90 Grad verschobene Quadratur-Anteil ist der Einfluss nur bei hohen Frequenzen sichtbar und zeigt einen Vorzeichenwechsel.

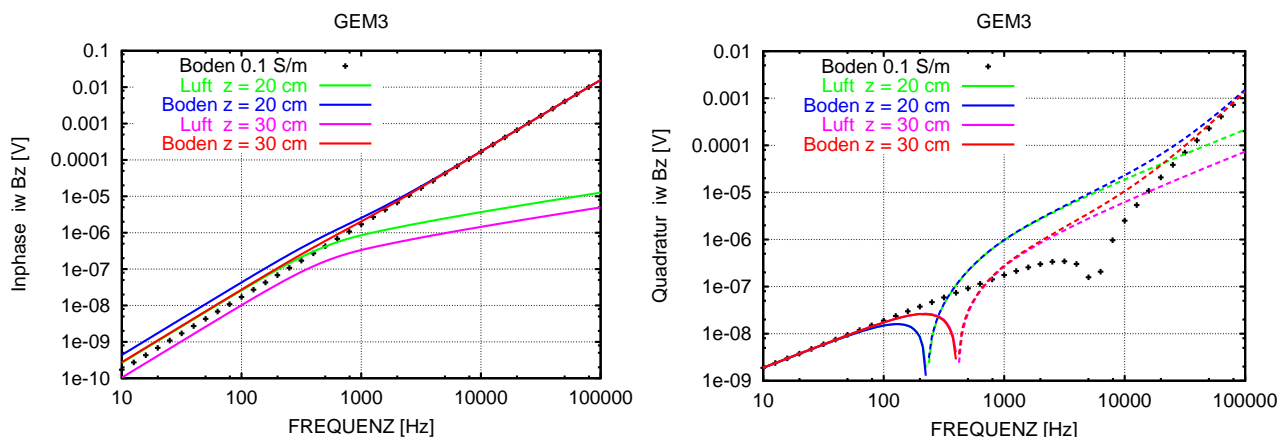


Abbildung 8: Inphase und Quadratur des Empfangssignals über einer Kugel im homogenen Halbraum mit verschiedenen Leitfähigkeiten.

Modellierungen mit einer vergrabenen Eisenkugel in 20 und 30 cm Tiefe zeigen, dass die Kugel detektiert wird, wenn die Umgebung nicht leitend ist. Die Situation ändert sich bei einem leitfähigen Untergrund. Im Kilohertzbereich werden die Sekundärfelder der Kugel überlagert durch die stärkeren Beiträge der Primärfelder des Bodens. Bei der Quadratur sind aber noch Unterschiede sichtbar.

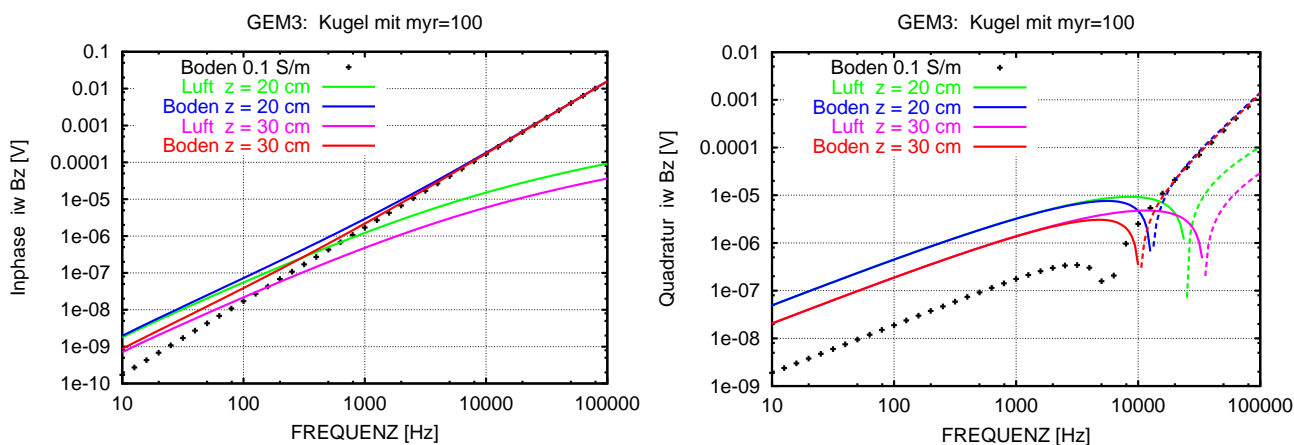


Abbildung 9: Inphase und Quadratur des Empfangssignals über einer magnetischen Kugel im homogenen Halbraum mit verschiedenen Leitfähigkeiten.

Hat die hier verwendete Eisenkugel eine relative Permeabilität von 100, so ist das Objekt nur schwer detektierbar, da die EM und die magnetischen Beiträge entgegenwirken. Bei den gezeigten Profildarstellungen wurde eine Frequenz von 19,2 kHz verwendet.

## Metalldetektoren im Zeitbereich

In der Praxis werden auch Metalldetektoren mit einer pulsformigen Senderanregung verwendet. Hier wird der Sendestrom ein- und ausgeschaltet. Bei einer solchen Messung im Zeitbereich werden Transienten aufgezeichnet. Der Vorteil hier ist, dass es keinen direkten Primäranteil des Senders gibt und somit keine Kom-

pensationsspulen benötigt werden. Die Sender-Empfänger Geometrie zeigt nur Unterschiede zu sehr frühen Zeiten. In dem Spätzeitbereich, der für die Messung relevant ist, hat die Geometrie keinen Einfluss auf das Signal.

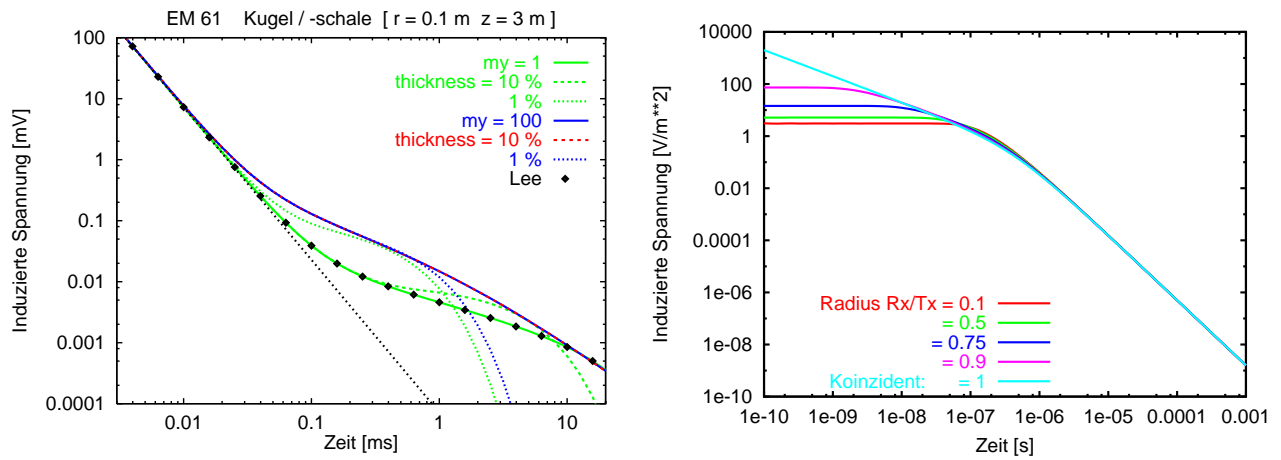


Abbildung 10: rechts: Simulierter Transient über einer Kugel und verschieden dicken Kugelschalen für zwei Permeabilitäten. links: Simulierte Transienten für verschiedene Empfängerspulenradien.

Das EM61 mit einer koinzidenten Spulenanordnung wird häufig bei der Kampfmittelräumung eingesetzt. Die induzierten Ströme in den Metallobjekten, hier mit verschiedenen Eigenschaften modelliert, klingen langsamer ab als in der leitenden Umgebung. Es sind kaum Unterschiede bei einer Vollkugel und einer dünnen Kugelschale mit hoher Leitfähigkeit und Permeabilität zu beobachten, was bedeutet, dass die Ströme im Außenbereich der Kugel fließen.

### Böden mit magnetischer Viskosität

Während bei Metallen die relative Permeabilität sehr große Werte annehmen kann, sind die Werte für natürliche Böden nahezu 1 und haben keinen Einfluss auf die elektromagnetische Induktion. Die Situation ändert sich aber drastisch bei magnetisch viskosen Verhalten. Dieser Effekt ist auch als Superparamagnetismus bekannt.

Er macht sich bemerkbar durch eine frequenzabhängige magnetische Suszeptibilität. Dieser Effekt kann bei eisenreichen Böden mit hohem Hämatit- und Magnetit-Anteil auftreten. Er wird erklärt durch Relaxati-

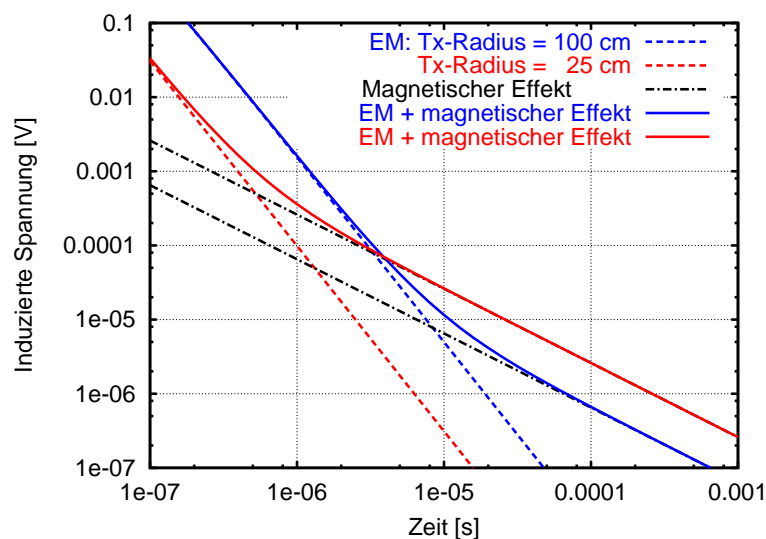


Abbildung 11: Simulierte Tansienten mit und ohne (gestrichelt) superparamagnetischem Effekt für zwei verschiedene Spulengrößen. Die allein durch die magnetische Viskosität induzierten Spannungen sind schwarz dargestellt.

onsprozesse der Magnetisierung. Die Magnetisierung kann durch eine logarithmische Gleichverteilung von Zerfallskonstanten in dem Bereich beschrieben werden. Für die Modellierung wurden die Grenzen  $\tau_1 = 10^{-8}$  und  $\tau_2 = 10^{13}$  gewählt. Beim Einschalten eines äußeren Magnetfeldes  $H_0$  nimmt die zeitliche Änderung der Magnetisierung folgende Form an (Billings et al., 2003):

$$\frac{d}{dt}M(t) = H_0\chi_0 \frac{1}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \left( \frac{e^{-t/\tau_2}}{t} - \frac{e^{-t/\tau_1}}{t} \right) \sim \frac{1}{t} \quad (1)$$

Die induzierte Spannung ist dazu proportional und klingt mit  $t^{-1}$  ab. Auch wenn die Suszeptibilität nur sehr kleine Werte ( $\chi_0 = 0,01$ ) annimmt wird zu späten Zeiten dieser Effekt dominieren, da die elektromagnetischen Felder mit  $t^{-2,5}$  zerfallen. Bei den kleinräumigen Sender-Empfänger-Konfigurationen, wie sie bei Metalldetektoren vorkommen, hat die magnetische Viskosität die größte Auswirkung. Die elektromagnetischen Felder klingen schneller ab und die Magnetfeldstärke im Zentrum des Senders ist am stärksten.

## Literaturangaben

Billings, S. D., Pasion, L. R., Oldenburg, D. W., und Foley, J., 2003, The influence of magnetic viscosity on electromagnetic sensors; EUDEM-SCOT2 2003, International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO.