

Nachdruck aus:

Mitteilungen – Bund Deutscher Feuerwerker und Wehrtechniker e.V. Heft 2, März 2007.

## **„Hochempfindliche“ Magnetometer in der Kampfmittelbeseitigung: Was ist notwendig und sinnvoll?**

Frank Dietsch, Prof. Dr. Dr. Kord Ernstson, Klaus Ebinger

### **Einleitung**

Mit der Technischen Verwaltungsvorschrift Kampfmittelbeseitigung für NRW (TVV NRW) und den Arbeitshilfen Kampfmittelräumung (AH KMR) werden erstmalig technische Spezifikationen für die in der Kampfmittelortung eingesetzten Magnetometer vorgegeben. Was dabei auf den ersten Blick besonders positiv auffällt: Die im Gegensatz zu vielen anderen Publikationen und internationalen Ausschreibungen verwendeten Reichweitenangaben auf bestimmte Kampfmittel – bei Magnetometern vorzugsweise 250 und 500 kg Bomben – sind durch definierte messtechnische Kenngrößen (Auflösung, Genauigkeit, Messbereich etc.) ersetzt worden. Damit wurde ein wichtiger Schritt für mehr Transparenz und Vergleichbarkeit der gerätetechnischen Ausrüstung sowie für qualitätssichernde Maßnahmen in der Kampfmittelbeseitigung getan.

In diesem Zusammenhang taucht in der Kampfmittelbeseitigung immer wieder die Frage auf, ob man mit Magnetometern höherer Auflösung die Kampfmittel nicht besser, tiefer und vor allem sicherer detektieren könne. Während in der TVV NRW „lediglich“ eine Auflösung von 0,1 nT für Differenz-Fluxgate-Magnetometer (D-FGM) gefordert wird, wird in der AH KMR besonders auf die optisch gepumpten Totalfeld-Magnetometer (TFM) mit kleineren Schwellenwerten (von bis zu 0,0025 nT) verwiesen und festgestellt, dass diese in der Kampfmittelbeseitigung weniger häufig anzutreffen sind, obwohl sie eine besonders hohe Empfindlichkeit aufweisen würden.

Daraus ergibt sich folgende interessante wie berechtigte Frage:

Welche Auflösung bzw. Schwellenwerte für Magnetometer in der Kampfmittelbeseitigung sind eigentlich notwendig und sinnvoll?

Dieser Artikel beleuchtet den Einfluss verschiedener Faktoren auf die magnetische Detektion von Störkörpern, die bei der Beantwortung dieser Frage berücksichtigt werden müssen.

### **Einflussfaktor magnetische Signatur**

Die Magnetik in der Kampfmittelbeseitigung nutzt lokale Verzerrungen (Anomalien) des Erdmagnetfeldes, die durch ferromagnetische Störkörper verursacht werden, zu deren Ortung. Dabei spielt die Magnetisierung für die zu messende Anomalie eine wesentliche Rolle.

Es treten zwei Arten der Magnetisierung auf: Die **induzierte Magnetisierung**, die durch das anliegende Magnetfeld der Erde in magnetisierbaren Körpern erzeugt wird. Sie ist bei bekanntem induzierendem Feld über die magnetische Suszeptibilität ein Materialparameter. Unter vereinfachten Annahmen (z.B. für ein homogen magnetisiertes Rotationsellipsoid) lässt sich das Störfeld eines solchen Körpers analytisch berechnen.

Die **remanente Magnetisierung** ist eine dem Störkörper aufgeprägte Magnetisierung; sie ist das Ergebnis der magnetischen Vorgeschichte des Störkörpers und nicht im Voraus kalkulierbar.

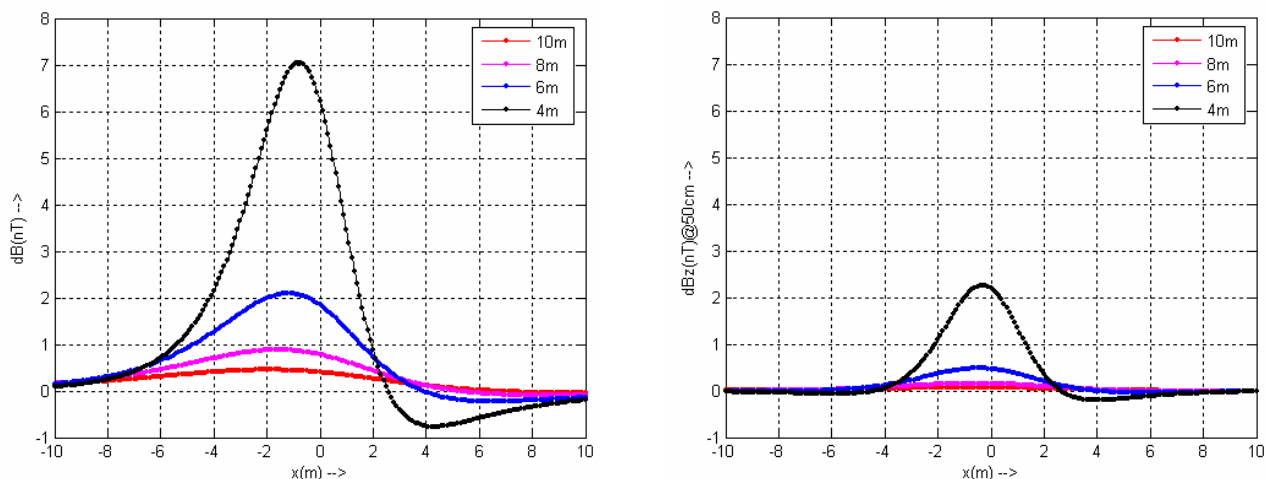
Beide Magnetisierungsanteile addieren sich vektoriell (effektive Magnetisierung). Je nach Orientierung der beiden Magnetisierungsvektoren kann die effektive Magnetisierung größer und damit die Detektierbarkeit günstiger sein; umgekehrt kann aber durch ungünstige Lage beider Magnetisierungsanteile die effektive Magnetisierung kleiner und damit die Detektierbarkeit erschwert werden. Allein diese Betrachtungen zeigen, dass bei der magnetischen Ortung eine alleinige Betrachtung der Empfindlichkeit bzw. Schwellenwerte von Magnetometern nicht ausreichend sein kann.

### Einflussfaktor Magnetometertyp

Totalfeld-Magnetometer (TFM) messen den Betrag des magnetischen Feldvektors, unabhängig von seiner Richtung. Zur Eliminierung der zeitlichen Schwankungen des Erdmagnetfeldes aus den Meßdaten ist der Einsatz eines weiteren Totalfeld-Magnetometers als Referenzstation notwendig. Bei der Differenzbildung kann man gleichzeitig durch Abzug eines konstanten Betrages eine Zentrierung der Totalfeldwerte erzielen, so dass durch Störkörper im Untergrund erzeugte Anomalien mit einem definierten Nullniveau entstehen.

Differenz-Fluxgate-Magnetometer (D-FGM) messen die vertikale Differenz der Vertikalkomponente des Magnetfeldes. Durch die Differenzbildung werden die zeitlichen Schwankungen bereits aus dem Messsignal eliminiert und - für kleinräumige Anomalien - näherungsweise auch eine Zentrierung auf ein Nullniveau erreicht. Das Ergebnis einer Messung mit einem D-FGM entspricht je nach Länge des Basisabstandes entweder dem vertikalen Gradienten des Magnetfeldes (Basisabstand infinitesimal klein) oder der Vertikalkomponente des Magnetfeldes (Basisabstand unendlich groß).

Die gemessene Signalamplitude der magnetischen Anomalie des Störkörpers fällt bei Messungen mit einem Totalfeld-Magnetometer (TFM) mit der dritten Potenz des Abstandes ab, während sie bei Messungen mit einem D-FGM mit einer Potenz zwischen 3 und 4 – je nach Größe des Basisabstandes – abfällt. Das TFM scheint also bei tiefer liegenden Störkörpern tatsächlich empfindlicher zu sein als ein DFGM. Abbildung 1 zeigt berechnete Profilverläufe für einen theoretischen, magnetischen Dipol in verschiedenen Tiefen, simuliert jeweils für Messungen mit einem TFM und einem D-FGM.



**Abbildung 1 Profilverläufe für Messungen mit einem Totalfeld-Magnetometer (links) und einem Differenz-Vektor-Magnetometer (rechts) für einen magnetischen Dipol in verschiedenen Tiefen**

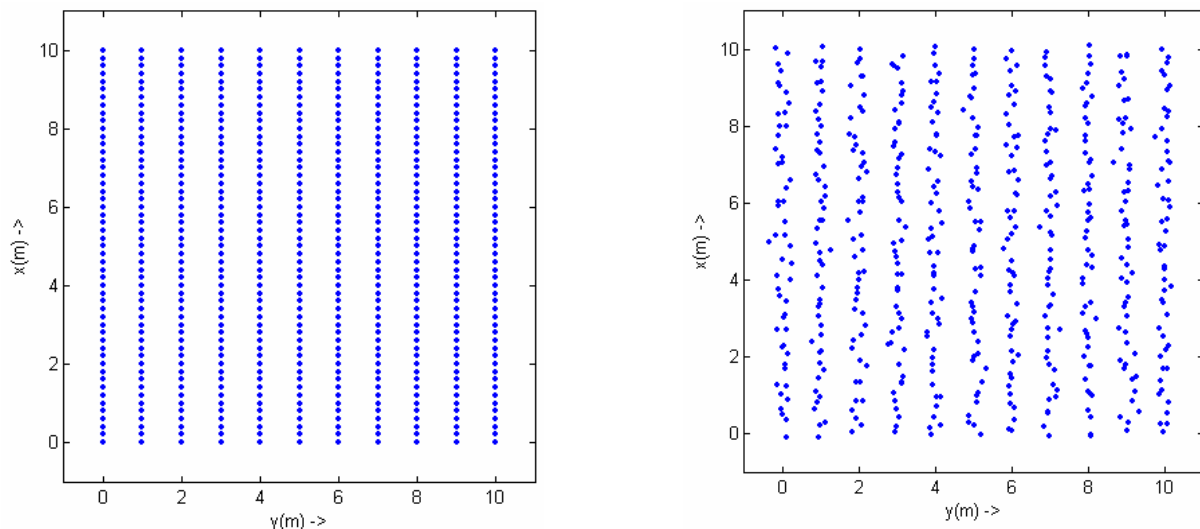
### Einflussfaktor umgebendes Medium

Das umgebende Medium (Boden und das einbettende Gestein) ist praktisch nie magnetisch neutral und homogen. Das gilt auch für einen geologisch völlig unberührten Untergrund, bei dem allein der Wechsel von Sand zu Ton Schwankungen der magnetischen Totalintensität um viele nT hervorrufen kann. Enthält der Sand Schwerminerale wie z.B. Magnetit, können die Schwankungen um ein Vielfaches höher sein. Noch schwieriger werden die Bedingungen, wenn stark magnetisierte Gesteine (z.B. Basaltgerölle in jungen Ablagerungen deutscher Mittelgebirge, stark magnetithaltige Amphibolit- und Serpentiniterölle in eiszeitlichen oder nacheiszeitlichen Sedimenten des Voralpengebietes) einen Rauschpegel lokaler Anomalien von einigen 100 bis zu einigen 1.000 nT hervorrufen. Solche extremen Rauschpegel durch stark magnetisierte Gesteine sind unter anderem auch ein Grund, warum zunehmend die aktive elektromagnetische Ortung an Bedeutung gewinnt. Des Weiteren verursachen anthropogene magnetische Störkörper im Boden (Metallschrott, Schlacken, Splitter etc.) zusätzliche Störsignaturen, die den Rauschpegel weiter erhöhen.

Anmerkung: In der Praxis kann man versuchen, einem oberflächennahen Störpegel mit einer Vergrößerung des Magnetometerabstandes zum Boden zu begegnen oder bei dichter Vermessung mit Digitalsystemen Filterverfahren (Tiefpassfilterung, analytische Fortsetzung nach oben) einzusetzen. Es versteht sich von selbst, dass bei tiefer liegenden Quellen des Störpegels ein solches Verfahren schnell an seine Grenzen gerät.

### **Einflussfaktor Verortungsgenauigkeit**

Für die Verortung der Messdaten bei der Datenaufzeichnung werden entweder auf konventionelle Weise Maßbänder oder moderne Vermessungssysteme wie Tachymeter und GPS-Empfänger als Hilfsmittel eingesetzt: Ziel ist, eine möglichst genaue und reproduzierbare Ortszuordnung der Messdaten während der Datenaufzeichnung zu erreichen. Bei Verwendung von Maßbändern wird die zu untersuchende Fläche in parallel verlaufenden Spuren nacheinander mäandrierend abgearbeitet, so dass am Ende ein Messraster wie in Abbildung 2 (links) dargestellt entsteht.



**Abbildung 2** Theoretisches Messraster einer Datenaufzeichnung (links), tatsächliches Messraster (rechts)

Tatsächlich treten jedoch bei der Datenverortung Positionsabweichungen sowohl in der Horizontalen (Abb. 2, rechts) als auch in der Vertikalen auf, deren Größenordnungen vor allem von der Beschaffenheit der zu untersuchenden Fläche und der persönlichen Sorgfalt des Sondengängers abhängen.

Diese Verortungsfehler schränken zum einen die erreichbare Messgenauigkeit weiter ein (ein Messwert wird nicht exakt seinem Ort zugeordnet), zum anderen bewirken sie einen zusätzlichen Rauschanteil im Datensatz (der tatsächliche Ort einer Messung ist jetzt selbst auch eine stochastische Größe).

Die absolute Größe dieses Messfehlers hängt in erster Linie vom räumlichen magnetischen Gradienten am Messort ab. Für das ungestörte Magnetfeld der Erde beträgt er z.B. in unseren Breiten in der Vertikalen 2,5 nT/100 m und in der Horizontalen 4,4 nT/km. Würde man die mit optisch gepumpten Magnetometern erzielbare Auflösung von 0,0025 nT tatsächlich nutzen wollen, so wäre in der Vertikalen bereits eine Positionsgenauigkeit von 10 Zentimetern erforderlich.

Tatsächlich sind die Horizontal- und Vertikalgradienten im näheren und weiteren Umfeld einer Fläche aufgrund natürlicher topographischer und geologischer Gegebenheiten sowie anthropogener Konstruktionen meist wesentlich, teilweise um Größenordnungen größer. Um in solchen Bereichen eine Reproduzierbarkeit von Messergebnissen in der Größenordnung der optisch gepumpten Magnetometer zu erzielen, dürften Positionsungenauigkeiten allenfalls im Millimeterbereich zugelassen werden.

Doch auch der zu ortende Störkörper selbst erzeugt ein Gradientenfeld, das selbst bei idealen Bedingungen des Umfeldes zu Überlegungen bezüglich der geforderten Verortungsgenauigkeit zwingt. So erzeugen z.B. bei Annahme des magnetischen Dipols in 6 Metern Tiefe (siehe Abbildung 1) horizontale Positionsabweichungen von 10 Zentimetern bereits eine Abweichung von 0,05 nT; das ist bereits ein Faktor 20 bezogen auf die Ansprechschwelle optisch gepumpter Magnetometer.

### Schlussfolgerungen

1. Am Markt stehen immer mehr Magnetometer mit höherer Auflösung zur Verfügung. Rein theoretisch könnten mit dieser höheren Auflösung ferromagnetische Störkörper in größerer Entfernung lokalisiert werden. Totalfeld-Magnetometer haben dabei aufgrund des Abstandsverhaltens ihrer Messgröße (3. Potenz) gegenüber den Differenz-Fluxgate-Magnetometern (Potenz 3-4) einen Vorteil bei tiefer liegenden Störkörpern.
2. Die oben genannten Vorteile können in der Praxis aufgrund der Einflüsse des umgebenden Mediums und aufgrund der begrenzten Verortungsgenauigkeit nicht voll ausgeschöpft werden.
3. Der magnetische Rauschanteil des umgebenden Mediums bestimmt im wesentlichen Maße die tatsächlich verfügbare Auflösung des Magnetometers. Teilweise machen magnetische Störungen des Untergrundes den Einsatz von Magnetometern zur Kampfmittelsuche unmöglich.
4. Die höhere Auflösung eines Magnetometers kann nur dann sinnvoll genutzt werden, wenn eine entsprechend hohe Verortungsgenauigkeit bei der Datenaufnahme garantiert werden kann.
5. Beim Einsatz geophysikalischer Verfahren in der Kampfmittelortung muss den geophysikalischen und geologischen Zusammenhängen mindestens ebenso große Beachtung geschenkt werden wie den technischen Parametern des Messsystems.

**Fazit:** Das Auflösungsvermögen der heute in der Kampfmittelortung eingesetzten Magnetometer mit 0,1 nT stellt einen gesunden Kompromiss zwischen dem technisch machbaren und dem in der Praxis tatsächlich nutzbaren Auflösungsvermögen dar. Der Einsatz von Magnetometer höherer Auflösung bleibt speziellen Anwendungsfällen vorbehalten.