

MNPQ-Projekt: Messplatz zur Charakterisierung und Zulassung von Magnetometern für die Kampfmittelsondierung

Bei der Ortung von Bomben-Blindgängern macht man sich die Tatsache zu Nutze, dass diese Kampfmittel über einen massiven Stahl- bzw. Eisenmantel verfügen, dem (a) bereits bei der Herstellung (unabsichtlich) eine magnetische Signatur aufgeprägt wurde, bzw. (b), dass aufgrund der Suszeptibilität des Stahl- bzw. Eisenmantels im Magnetfeld der Erde eine magnetische Signatur resultiert. Anhand des von dem magnetischen Momente der Bomben-Blindgänger ausgehenden magnetischen Streufeldes erfolgte bereits seit Beginn der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts die Ortung dieser Blindgänger: Dazu wird unter Zuhilfenahme von magnetischen Fluxgate-Gradientensonden das Gelände (die Detektionsebene), unter dem Bomben-Blindgänger vermutet werden abgeschritten und dabei die Komponente senkrecht zur Detektionsebene des von den Bomben ausgehenden magnetischen Streufeldes vermessen (siehe Ref. [1]).

Zu Ortung von Bomben-Blindgängern konnten bisher beliebige Sonden benutzt werden, was in der Vergangenheit schon oft dazu geführt hat, dass Bomben Blindgänger übersehen wurden. Daher wurden im Rahmen des hier vorgestellten MNPQ-Projektes - in einer Zusammenarbeit zwischen der Firma SENSYS GmbH, Bad Saarow und der PTB-Braunschweig - Prüfverfahren und Prüfstrukturen zur Kalibrierung und Rückführung von Sonden zur Kampfmittelortung, die nach dem Verfahren der magnetischen Detektion arbeiten, aufgebaut.

Als Prüfstruktur dient dabei ein System bestehend aus zwei Röhren, die in einem Winkel von 15.6° bzw. 10.2° unter dem Testfeld der Firma SENSYS GmbH verlaufen. Der Verlauf der beiden Röhren unter dem Testfeld ist in Fig. 1 dargestellt.

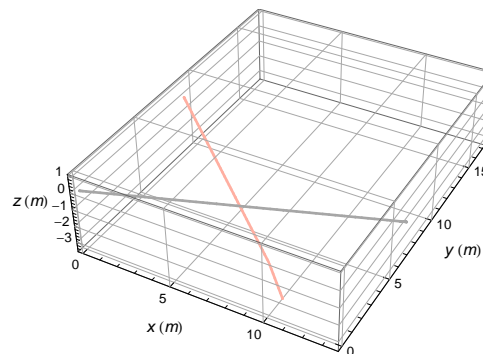


Fig. 1 Verlauf der beiden Röhren (graue und rote Line) unter dem SENSYS-Testgelände

Mit Hilfe umfangreicher Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass bereits ab einer Tiefe von 1.2m unter der Detektionsebene näherungsweise eine Fernfeldverteilung der magnetischen Streufelder von Bomben-Blindgängern des Typs GP 250 („General Purpose“-Bomben mit einem Gewicht von ca. 125 kg) vorliegt. Dies ermöglicht die Berechnung des magnetischen Streufeldes der Bomben-Blindgänger \mathbf{B} bei vorgegebenem magnetischem Moment \mathbf{m} der Bombe mit Hilfe der Gleichung (vgl. Ref. [2])

$$\mathbf{B} = [\mu_0/(4\pi)] [3\mathbf{n}_r(\mathbf{n}_r \cdot \mathbf{m}) - \mathbf{m}] / r^3 \quad (1)$$

(\mathbf{n}_r bezeichnet hierbei den Einheitsvektor in Richtung des Abstandsvektors \mathbf{r} zwischen dem magnetischen Moment \mathbf{m} und dem Ort oberhalb der Detektionsebene an dem der magnetische Streufluss \mathbf{B} bestimmt wird). Dies ermöglicht weiter eine Darstellung der magnetischen Streufelder der Bomben-Blindgänger durch Spulensysteme, die deutlich kleinere Abmessungen besitzen, als die hier betrachteten Bomben des Typs GP 250. Zur Simulation der Streufelder von Bomben-Blindgängern dienen die beiden in Fig. 2 abgebildeten Spulen.



Fig. 2 Abbildung der beiden schwenkbaren Testspulen PK215 (hier rechts abgebildet mit dem Gestell zum Verfahren in den Röhren des SENSYS-Testgeländes) und PK216 (links, ohne Verfahrgestell abgebildet) zur Simulation der Streufelder von Bombenblindgängern.

Für beide Spulen wurden Verfahrgestelle aufgebaut, mit deren Hilfe die Spulen in den Röhren unter dem Testfeld durch Halteseile positioniert werden können. Durch unterschiedliche Längen der Halteseile kann dabei die Tiefe der Spulen unter der Detektionsebene variiert werden. Eine kardanische Aufhängung der Spulen in dem Verfahrgestell, die mit Hilfe von Bleigewichten die Beibehaltung eines vorher eingestellten Polarwinkels der Spulenachsen gegenüber der Detektionsebene erlaubt, ist in der Abbildung Fig. 2 rechts mit abgebildet. Das magnetische Moment dieser Spulensysteme bei gegebenem Spulenstrom wurde nach der in Ref. [3] beschriebenen Methode unter mehrfachem Umpolen des Spulenstroms bei der PTB-Braunschweig gemessen. Für beide Spulen wurde so, im Rahmen der Messunsicherheit, das gleiche magnetische Moment bezogen auf die Spulenstromstärke zu

$$m/I = (13.173 \pm 0.065) \text{ Am}^2/\text{A} \quad (2)$$

bestimmt, was für die hohe Qualität dieser bei SENSYS gefertigten beiden Spulen spricht.

Für die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Prüfverfahren wurden von den verschiedenen möglichen geometrischen Anordnungen der schwenkbaren Testspulen diejenigen ausgewählt, bei denen die Achse der Spulen senkrecht zur Detektionsebene steht (d.h. die Spulenachsen sind parallel zur Richtung der z-Achse). Die Beschränkung auf diese Geometrie(n) bewirkt eine signifikante Vereinfachung der Prüfstrukturen, sowohl für die im Folgenden beschriebene Klassifizierung der Gradientenfelder (unter Verwendung von nur einer Testspule), als auch für die Klassifizierung der Auflösung des Ortes (unter gleichzeitiger Verwendung von beiden Testspulen):

A. *Klassifizierung des Gradientenfeldes*: Für die Klassifizierung der Gradientenfelder wird eine kleine Testspule (aus Fig. 2) in einer der Röhren des SENSYS-Testgeländes positioniert, wobei die Achse der Spule senkrecht zur Detektionsebene weist. Die für diese Winkelkonfiguration sich ergebenden Profilverläufe des Gradientenfeldes zeichnen sich dadurch aus, dass diese rotationssymmetrisch sind. Fig. 3 zeigt einen Schnitt durch einen derartigen, rotationssymmetrischen Profilverlauf eines Gradientenfeldes (berechnet unter Verwendung der Beziehung (1)). Bei vorgegebener Tiefe der Spule unter der Detektionsebene wurde der Spulenstrom so eingestellt, dass sich im Maximum des Gradientenfeldprofils für die verwendeten magnetischen Fluxgate-Gradientensonden (Gradiometerbasis = 65 cm, Position der Gradiometer-Mitte über dem Grund = 60 cm) ein Wert von 32 nT ergibt. Wie in Fig. 3 zu erkennen ist, finden wir eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Daten des berechneten Gradientenfeldprofils und experimentellen Daten einer Prospektion auf dem SENSYS-Testgelände.

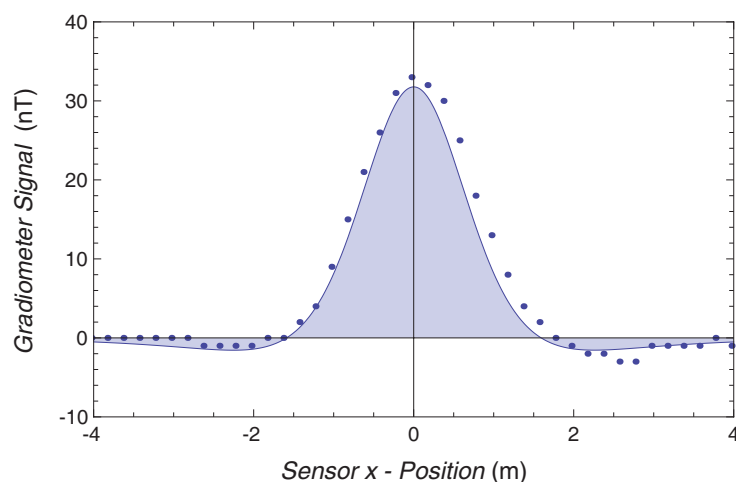


Fig. 3 Profil des Gradientensignales (durchgehende Line) berechnet anhand von Gleichung (1) für ein magnetisches Moment bei einer Tiefe des magnetischen Momentes unter dem Testgelände von 1.39m. Die diskreten Datenpunkte entstammen einer Prospektion auf dem SENSYS-Testgelände unter Verwendung einer der Testspulen aus Fig. 2 mit Fluxgate-Gradientensonden mit einer Gradiometerbasis von 65cm und einer Position der Gradiometer-Mitte über dem Grund von 60cm.

Die gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und berechneten Gradiometer-Daten in Fig. 3 erlaubt weiter die Erstellung einer Klassifizierungs-Tabelle, in der die Klassifizierungs-Information (d.h. eine erreichte Note) dem gerade von dem Equipment noch detektierten Wert des Maximums des Gradiometersignales gegenübergestellt wird.

B. Klassifizierung der Auflösung des Ortes: Zunächst wurden Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Orts-Trennschärfe für zwei parallel orientierte magnetische Momente mit der Orientierung senkrecht zur Detektionsebene in den beiden Röhren unter dem Testfeld (unter Verwendung der Beziehung (1)), durchgeführt. Aufgrund dieser Berechnungen konnte festgestellt werden, dass für kleine Abstände der magnetischen Momente voneinander, sich aufgrund deren positiver Überlagerung nur ein einziges Maximum des resultierenden Gradienten-Signalfeldes über der Detektionsebene herausbildet. Erst bei einer Wahl eines hinreichenden Abstands zwischen den beiden Spulen unter der Detektionsebene konnten zwei Maxima des Gradientensignalfeldes gefunden werden. Somit ist nur für diese Fälle eine Auflösung des Ortes sinnvoll zu klassifizieren. Ein Profil des Gradientensignals für einen derartigen Fall ist in Fig. 4 abgebildet. Darin dargestellt ist der Profilverlauf genau auf der Gerade zwischen den sich herausbildenden beiden Maxima. Die Spulenströme der beiden verwendeten Spulen aus Fig. 2 – und somit die daraus resultierenden magnetischen Momente (vgl. die Gleichungen (1) und (2)) – waren bei festgelegter Position der Spulen in den beiden Röhren unter dem SENSYS-Testgelände so dimensioniert worden, dass beide Maxima (dargestellt durch die beiden grünen Punkte in Fig. 4) gleich groß waren. Weiter erlaubten die freie Wahl der Spulenströme eine Festlegung des Abstandes zwischen den Gradientenfeld-Maxima und dem Sattelpunkts-Minimum (symbolisiert durch den dunkelroten Punkt Fig. 4) des Gradientensignales auf der hier betrachteten Gerade zwischen den beiden Gradientenfeld-Maxima. (Erwähnt sei hier am Rande, dass gerade die Reduktion auf die Geometrie mit der Wahl der Orientierung der beiden Spulen mit den Spulenachsen senkrecht zur Detektionsebene garantiert, dass das Sattelpunkts-Minimum des Gradientensignales gerade auf der Gerade zwischen den beiden Maxima des Gradientensignales zu liegen kommt.) Wie anhand der in Fig. 4 eingezeichneten Daten zu erkennen ist, finden wir auch für den Fall der hier betrachteten Geometrie mit zwei Spulen eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten Daten und Daten einer Prospektion auf dem SENSYS-Testgelände.

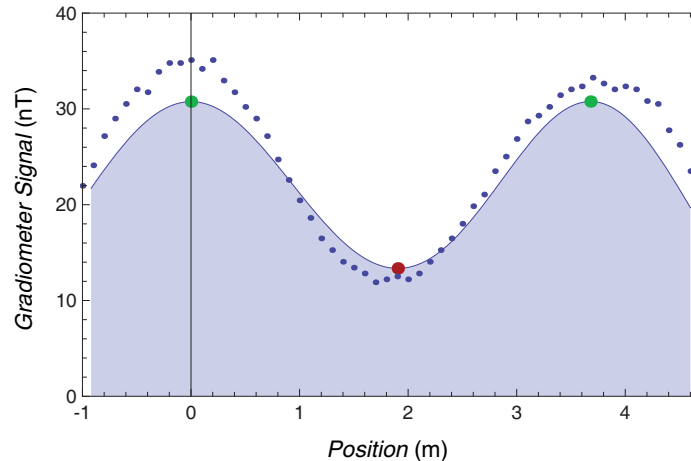


Fig. 4 Vergleich des Profilverlaufes des Gradientensignales (durchgehende Line) berechnet anhand der magnetischen Momente beider Spulen aus Fig. 2 auf der Geraden zwischen den beiden Maxima (dargestellt durch die beiden grünen Punkte) und experimentelle Datenpunkte (blaue Punkte). Das Sattelpunktsminimum des berechneten Gradiometersignales zwischen den beiden Maxima wird durch den dunkelroten Punkt symbolisiert. (Der Abstand der beiden Spulen in den Röhren unter dem Testfeld beträgt in dem hier betrachteten Fall 3.69 m. Der Abstand der Gradiometersignale zwischen den beiden gleichhohen Maxima und dem Sattelpunktsminimum beträgt aufgrund der Berechnungen hier 17.42 nT.)

Ähnlich wie im Fall A - *der Klassifizierung des Gradientenfeldes* – benutzen wir hier für B. *der Klassifizierung der Auflösung des Ortes* die gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und berechneten Gradiometer-Daten in Fig. 4. Dies erlaubt die Erstellung einer Klassifizierungs-Tabelle, in der hier die Klassifizierungs-Information (d.h. eine erreichte Note) dem gerade von dem Equipment noch detektierten Wert für die Differenz ΔG zwischen den Maxima des Gradiometersignales und dem Sattelpunktminimum des Gradiometersignales gegenübergestellt wird.

Zusammenfassung

Zusammenfassend können wir festhalten, dass die im Rahmen dieses Projektes hergestellten Spulensysteme, die in Röhren unter einem Testgelände positioniert wurden, bei Aufprägung eines geeigneten Stromes in der Lage sind, die magnetischen Signaturen von Bombenblindgänger zu simulieren.

Weiter kann festgehalten werden, dass die im Rahmen dieses Projektes aufgebauten Prüfverfahren und Prüfstrukturen sowohl eine Qualifizierung von magnetischen Sonden als auch die Kontrolle und Überwachung von magnetischen Sondierungsverfahren in der Kampfmittelsuche (von Bombensuchkommandos) erlauben. Die in der Vergangenheit oft aufgetretenen Unstimmigkeiten durch fehlerhafte Messergebnisse bei der Bombensuche sollten sich durch die hier vorgeschlagene Qualifizierungsmaßnahmen auf ein Minimum reduzieren lassen. Zusätzlich gewährleistet die Verwendung der hier gezeigten Spulensysteme eine Rückführung auf die metrologischen Standards der PTB.

Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an: Dr. Martin Albecht, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, AG 2.51 Magnetische Messtechnik, Tel: +49-531-592-2250, E-Mail: martin.albrecht@ptb.de.

Literatur

[1] <http://www.sensys.de/index.php/104.html>

[2] John David Jackson, „5.6 Magnetic fields of a local current distribution, magnetic moment“ in Classical Electrodynamics, 3rd. ed., New York: John Wiley & Sons, 1998, Gl. (5.56), S. 186.

[3] DIN EN 60404-14:2003-02, „Magnetische Werkstoffe - Teil 14: Verfahren zur Messung des magnetischen Dipolmomentes einer Probe aus ferromagnetischem Werkstoff mit dem Abzieh- oder dem Drehverfahren (IEC 60404-14:2002)“, <http://www.dke.de/de/SearchCenter/Seiten/Results.aspx?%20&s=DKE-Homepage&w=false&CONTENTTYPE=DKE-Dokument>.