

Dreiachs-Magnetometer: Was bringen sie bei der Bohrloch-Sondierung in der Kampfmittelortung?

Prof. Dr. Dr. habil. Kord Ernstson



In der Kampfmittelortung mit Magnetfeldmessungen werden seit einiger Zeit vermehrt Dreiaxismagnetometer in Bohrungen zur Registrierung der Totalintensität und ihrer Komponenten eingesetzt.

Als Ersatz für die herkömmlichen Vertikal-Differenzmagnetometer („Gradiometer“) sind sie nicht unumstritten. Der Artikel klärt über die einfachsten Zusammenhänge und gängige Irrtümer auf, beschreibt die Ergebnisse experimenteller Messreihen mit dem Dreiaxser an einfachen Störkörpern und hebt hervor, dass die grundsätzlichen Probleme der passiven Magnetfeldmessungen in der Kampfmittelortung auch beim Einsatz eines Dreiaxismagnetometers dieselben bleiben. Eine sinnvolle Ausnutzung der Möglichkeiten eines Dreiaxers verlangt eine hohe fachliche Qualifikation für den Umgang mit Vektorfeldern und geophysikalischen Feldern allgemein. Ein Grund, Dreiachs-Magnetometer in der Kampfmittelortung zwingend vorzuschreiben, existiert nicht.

Für angebliche Vorteile bei bestimmten Messkonstellationen gibt es keine Belege, die eine Reproduzierbarkeit untermauern würden, und physikalische Gründe sind nicht erkennbar.

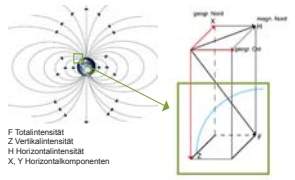
Three-axis magnetometers: What do they contribute to borehole sounding for explosive ordnance detection?

For quite a while, explosive ordnance detection has been making increasing use of 3-axis magnetometers for the purpose of magnetic field measurements in boreholes in order to record total intensity and its components.

Their use as replacement for conventional vertical differential magnetometers (gradiometers) is controversial. This article explains the simple contexts and common misapprehensions, describes the results of experimental test series with a 3-axis device on simple anomalies, and shows that the basic problems of passive magnetic field measurements for explosive ordnance detection are the same as when using a 3-axis magnetometer. When dealing with vector fields and geophysical fields in general, the expedient use of the possibilities offered by a 3-axis device requires expert qualification. There is no reason for the compulsory use of 3-axis magnetometers in explosive ordnance detection. There is also no evidence for alleged advantages with particular measurement constellations that supports reproducibility, and no physical reasons are identifiable.



Inhalt | Content

Dreiachs-Magnetometer: Was bringen sie bei der Bohrloch-Sondierung in der Kampfmittelortung? Three-axis magnetometers: What do they contribute to borehole sounding for explosive ordnance detection?	1
Einleitung Introduction	2
	
Die Komponenten des Dreiachs-Magnetometers Components of 3-axis magnetometers	3
Von der Theorie zur Praxis: einfache Experimente mit einem EBINGER-Dreiaxismagnetometer From theory to practice: Simple experiments with a 3-axis Ebinger magnetometer	4
Vergleich Z-Gradiometer und Dreiachs-Magnetometer Comparison of Z-gradiometer and 3-axis magnetometer	6
Zusammenstellung und generelle Konsequenzen Compilation and general consequences	6
Die unmagnetische Bombe - ein Märchen? The non-magnetic bomb - fact or fiction?	9
Einleitung Introduction	9
Geophysikalische Grundlagen: die induzierte Magnetisierung Fundamentals of geophysics: induced magnetisation	10
Geophysikalische Grundlagen: die gemessene magnetische Anomalie, die homogen magnetisierte Kugel und der magnetische Dipol Geophysical fundamentals: the measured magnetic anomaly, the homogeneously magnetised sphere and the magnetic dipole	12
Geophysikalische Grundlagen: die remanente Magnetisierung Fundamentals of geophysics: remanent magnetisation	14
Die remanente Magnetisierung bei Blindgängern Remanent magnetisation in UXO	15
Experimente zur remanenten Magnetisierung Experiments with remanent magnetisation	17
Nutz- und Störsignal: Das Signal-Rausch-Verhältnis und die „unmagnetische Bombe“ Nutz- und Störsignal: Das Signal-Rausch-Verhältnis und die „unmagnetische Bombe“	18
Schlussfolgerungen Conclusions	20

SONDERAUSGABE
2015

Einleitung

Ortung von ferromagnetischen Objekten in der Kampfmittelräumung ist seit Dekaden vor allem mit dem Einsatz von Fluxgate-Magnetometern (Saturationskern-Magnetometern) verknüpft, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden.

Sie bestehen in aller Regel aus zwei übereinander angeordneten Fluxgate-Sonden, die in Differenzschaltung operieren. Damit wird grob näherungsweise der Vertikalgradient der Vertikalkomponente des Erdmagnetfeldes gemessen, was zu der nicht ganz korrekten Bezeichnung der „Gradiometer“ geführt hat. Durch die Differenzmessung werden Orientierungsfehler der stark neigungsempfindlichen Fluxgate-Sonden unterbunden sowie die zeitlichen Variationen des Erdmagnetfeldes eliminiert. Zudem wird das Auflösungsvermögen erhöht, was aber mit einer deutlich reduzierten Untersuchungstiefe bzw. Reichweite bei Bohrlochmessungen einhergeht. Andere physikalische Messprinzipien erlauben die Messung der magnetischen Totalintensität mit Protonenpräzessions-Magnetometern oder optisch pumpenden Magnetometern (z.B. Cäsium-Magnetometern). Sie haben den Vorteil, neigungsunabhängig zu messen und - sofern sie nicht ebenfalls als Doppelsonden in Differenzschaltung gebaut sind - größere Untersuchungstiefen zu erzielen.

Als Einzelsonden unterliegen sie den unregelmäßigen Schwankungen des Erdmagnetfeldes, die mit einer zweiten festen Basisstation erfasst werden müssen, und aus konstruktionstechnischen Gründen können sie nicht in den schlanken Bohrungen der Kampfmittelräumung eingesetzt werden. Hier kommen die prinzipiellen Vorzüge der Dreiachs-Magnetometer zur Geltung.

Die Komponenten des Dreiachs-Magnetometer

Ein Dreiachs-Magnetometer besteht aus drei einzelnen Fluxgate-Sonden, die ein rechtwinkliges Koordinatensystem x, y, z aufspannen und in jeder Sonde jeweils die Messwerte X, Y und Z des Erdmagnetfeldes (Abb. 1) registrieren (Abb. 2). Dann ergibt sich vektoriell der Betrag F der erdmagnetischen Totalintensität nach der Formel.

$$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$$

Zwar sind die einzelnen Fluxgate-Sonden weiterhin stark neigungsempfindlich, aber die Formel gibt für beliebige Orientierung des Dreiachsen stets den Wert F am Messpunkt, also genau das, was auch Protonenpräzessions-Magnetometer und optisch pumpende Magnetometer liefern. Und da die Dreiachs-Sonde wegen ihrer geringen Größe bequem in den Bohrungen der Kampfmittelräumung gefahren werden kann, sind Messungen nicht nur in vertikalen Bohrungen sondern auch in stark geneigten oder sogar horizontalen Löchern möglich (Abb. 2).

Eine Besonderheit des Dreiachsen ist der Umstand, dass die Signale jeder einzelnen der drei Sonden getrennt registriert und - theoretisch - damit sämtliche Magnetfeldgrößen am Messpunkt ermittelt werden können. Ist der Dreiachsen im Raum so justiert, dass die Z-Sonde vertikal orientiert ist und die orthogonalen X- und Y-Sonden nach geographisch Nord und geographisch Ost weisen (Abb. 1), so ergeben sich unmittelbar die Werte für die magnetischen X-, Y- und Z-Komponenten, und aus den Größen lassen sich außer der Totalintensität zudem die Horizontalkomponente H sowie die Deklination D und die Inklination I, also insgesamt sieben Größen ermitteln (Abb. 1).

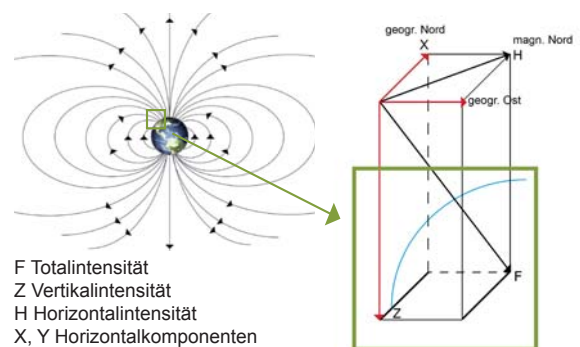


Abb. 1. Das Erdmagnetfeld und seine Komponenten.
Fig. 1. The geomagnetic field and its components.

Es leuchtet ein, dass eine Analyse all dieser Magnetfeld-Parameter ein deutliches Mehr an Information liefern kann, wenn bei einer Kampfmittel-Bohrlochmessung versucht wird, das ferromagnetische Objekt, beispielsweise einen Bombenblindgänger, bezüglich seiner Raumorientierung so genau wie möglich anzusprechen. Im Prinzip lässt sich dazu das Koordinatensystem für das Erdmagnetfeld in den Bombenkörper verlegen, von dem im allgemeinen stark vereinfacht angenommen wird, dass er durch einen magnetischen Dipol repräsentiert wird. Dann kann man der Dipolachse die Eigenschaft eines Totalfeldvektors f mit seinen drei Komponenten x, y und z sowie seiner Deklination d und seiner Inklination i zuschreiben (Abb. 3).

Der Dreiachsen würde dann das Störfeld der Bombe genauso beschreiben, wie er das ungestörte Erdfeld beschreibt, und diesen angenommenen Dipol orten. Wie sieht es in der Praxis aus?

Introduction

For decades, the detection of ferromagnetic objects in explosive ordnance disposal (EOD) is mainly associated with the use of fluxgate magnetometers (saturation core magnetometers), which are offered by various manufacturers.

They mostly consist of two fluxgate sensors mounted above each other and operated in a differential circuit. This permits an approximate measurement of the gradient of the geomagnetic field's vertical component, which has resulted in the not quite correct term „gradiometer“. The differential measurement corrects orientation errors of the highly inclination-sensitive fluxgate sensors, and eliminates temporal variations of the geomagnetic field. In addition, resolution is increased, but this is accompanied by a clearly reduced penetration depth or range with borehole measurements. Other physical measurement principles permit measurement of the total magnetic intensity with proton precession magnetometers or optically pumped magnetometers (e.g. caesium magnetometers). They have the advantage of not being inclination-dependent, and – provided that they are not operated as dual sensors in a differential circuit – permitting measurements to greater depths.

As single sensors they are subjected to the irregular variations of the geomagnetic field, which must therefore be detected with a second, fixed base station, and for constructional reasons they cannot be lowered into the narrow boreholes used for EOD. This is where the basic advantages of 3-axis magnetometers come to bear.

Components of 3-axis magnetometers

A 3-axis magnetometer consists of three separate fluxgate sensors arranged in a rectangular x, y, z coordinate system, whereby each sensor records (Fig. 2) the relevant X, Y, and Z values of the geomagnetic field (Fig. 1). These values lead to the vectorial amount F of the total geomagnetic intensity according to the formula.

$$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$$

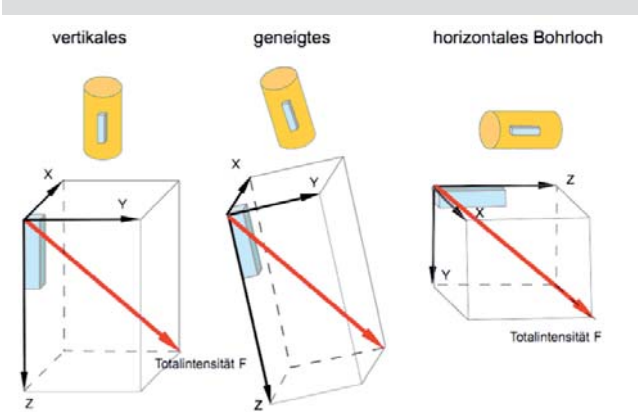


Abb. 2. Das Dreiaxismagnetometer in Bohrungen unterschiedlicher Neigung und die davon unberührte Ermittlung der Totalintensität F.

Fig. 2. The 3-axis magnetometer in boreholes with different inclinations, and the unaffected total intensity measurement value F.

Even though the individual fluxgate sensors are still highly inclination-sensitive, the formula always returns the amount F for the measurement location, regardless of the orientation of the 3-axis device, i.e. precisely what proton precession magnetometers and optically pumped magnetometers also supply. And because the 3-axis sensors can be lowered easily into the EOD boreholes thanks to their compact dimensions, measurements are not only possible in vertical boreholes, but also in sharply inclined or even horizontal boreholes (Fig. 2).

A particularity of 3-axis devices is that the signals from each of the three sensors are recorded separately, and therefore – theoretically – every geomagnetic quantity at the measurement location can be deduced. If the 3-axis device is

arranged spatially so that the Z-sensor is vertical, and the orthogonal X and Y sensors are oriented to the geographical North and East (Fig. 1), this returns the values for the magnetic X, Y, and Z-components directly. Apart from total intensity, these measured values are then used to determine the horizontal component H, declination D, and inclination I, i.e. seven values in total (Fig. 1).

It is evident that analysis of all these magnetic field parameters from measurements in an EOD borehole is able to produce far more data, if it is attempted to determine the spatial orientation of a ferromagnetic object – e.g. an unexploded bomb – as accurately as possible. Basically, the coordinate system for the geomagnetic field can be transferred to the bomb casing, whereby it is generally assumed in simple terms that the bomb is represented by a magnetic dipole. In this case, one can assign the properties of a total field vector f to the dipole axis, with its three components x, y, and z as well as its declination d and its inclination i (Fig. 3).

The 3-axis device would then describe the anomaly of the bomb just as accurately as it describes the undisturbed geomagnetic field, thereby locating the assumed dipole. But does this work in practice?

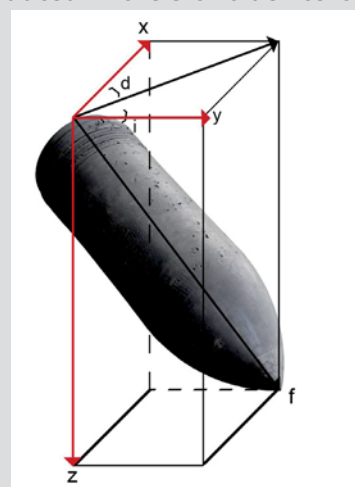


Abb. 3. Die Bombe als magnetischer Dipol mit seinen Komponenten.

Fig. 3. The bomb as a magnetic dipole with its components.

Von der Theorie zur Praxis: einfache Experimente mit einem EBINGER - Dreiachsmagnetometer

Abb. 4 zeigt einen einfachen Versuchsaufbau, in dem verschiedene ferromagnetische Körper an einem EBINGER-Dreiachsmagnetometer vorbeigeführt wurden, um damit Verhältnisse einer Registrierung im Bohrloch zu simulieren. Besonders instruktiv hat sich dabei die Versuchsreihe mit einer kleinen Granate erwiesen, die grundlegende Zusammenhänge und Probleme aufzeigen konnte. Man mag einwenden, dass ein solch kleiner Störkörper wenig mit einem großen Bombenblindgänger gemein haben kann; das Gegenteil ist der Fall.

Die magnetischen Eigenschaften einer großen Bombe sind im allgemeinen wesentlich komplexer als es bei dieser Granate der Fall ist, und - soviel sei vorweggenommen - die „abschreckenden“ Ergebnisse der Experimente dürften im Fall der echten Kampfmittel-Bombenortung nicht geringere sondern eher merklich größere Probleme bereiten. Mit der Granate wurden die folgenden insgesamt 24 Messreihen absolviert:

- Achse der Granate parallel zur „Bohrung“, Spitze voraus, rotiert um jeweils 90°
- Achse der Granate parallel zur „Bohrung“, Öffnung voraus, rotiert um jeweils 90°
- c), d) Achse bildet mit der „Bohrloch“-Achse einen rechten Winkel, rotiert um jeweils 90° , Messreihen bei gegenüberliegenden Positionen, gleich orientiert
- e), f) Achse bildet mit der „Bohrloch“-Achse einen rechten Winkel, rotiert um jeweils 90° , Messreihen bei gegenüberliegenden Positionen, entgegengesetzt orientiert



Abb. 4. Der Versuchsaufbau mit einem EBINGER-Dreiachsmagnetometer.

Fig. 4. Test setup with a 3-axis Ebinger magnetometer.

Aus Platzgründen können hier nur exemplarisch einige Ergebnisse vermittelt werden, und Abb. 5 zeigt die „in der Bohrung“ gemessenen Profile für die Fälle a) und b) und jeweils die Komponenten X, Y und Z des Dreiachs-Magnetometers.

Es zeigt sich:

- Mit nur wenigen Aufstellungen gibt es bereits eine große Vielzahl der verschiedensten Kombinationen bei den Komponenten.
- Eine große Zahl unterschiedlicher Anomalie-Konfigurationen umfasst monopolar positive, monopolar negative, bipolare plus-minus und bipolare minus-plus Anomalien, sowie alle möglichen Übergänge.
- Im konkreten Fall des Experiments werden extrem unterschiedliche Messwerte mit Amplituden zwischen 80 nT und 1500 nT bei sonst gleichen Messbedingungen immer desselben Körpers registriert.
- Beim Rotieren in sonst fester Position werden extrem unterschiedliche Anomalien durchlaufen.

Es folgt aus den Experimenten:

- Der ferromagnetische Körper (die Granate) besitzt einen starken remanenten Magnetismus.
- Das magnetische Dipolmoment der Granate liegt nicht in der Bombenachse sondern stark exzentrisch. Der Winkel zwischen den Achsen wurde zu etwa 45° abgeleitet.
- Die Messungen beschränkten sich auf wenige Standardorientierungen. Tatsächlich ist in der Realität bei gleicher Tiefe die Bombe vier 360° -Freiheitsgraden der Orientierung und azimuthalen Lage im Raum um die Bohrung herum ausgesetzt.
- Es gibt deshalb eine unendlich große Zahl von Kombinationen der drei X-, Y- und Z-Komponenten, die bei einer unbekannt im Raum befindlichen Bombe auftreten können; mehrere ganz unterschiedlich platzierte Bomben können im Rahmen der Messgenauigkeit dieselben Komponenten-Tripel (X, Y, Z) erzeugen.
- Anders als beim kontrollierten Experiment kann in der Praxis durch Messfehler, Einwirkungen von unregelmäßigen Bodenmagnetisierungen und äußeren Störfeldern mit unsicherem Nullniveau bei der Messkurve in vielen Fällen nicht einmal der Charakter der Anomalie (z.B. bipolar oder monopolar) sicher angesprochen werden. Die Unsicherheiten sind nicht mehr überschaubar.
- Es ist i.a. illusorisch, mit einem Dreiachser in einer einzigen Bohrung mehr Informationen als mit einem herkömmlichen Z-Gradiometer über die Lage und die Orientierung einer Bombe zu gewinnen.

From theory to practice: simple experiments with a 3-axis Ebinger magnetometer

Fig. 4 shows a simplified test setup, in which various ferromagnetic objects were passed by a 3-axis Ebinger magnetometer in order to simulate the conditions of a borehole recording. Hereby, the test series with a small grenade were particularly instructive in demonstrating the basic relationships and problems. One could object by saying that such a small causative body has little in common with a large unexploded bomb, but the opposite is true.

In general, the magnetic properties of a large bomb are far more complex than those of a grenade, and – to point this out right away – in the case of a real bomb, the „deterrent“ results of the experiments will give rise to considerably greater problems. In total, the following 24 test series were carried out with a grenade:

- Grenade axis parallel to the „borehole“, pointing forwards, rotated in 90° steps
- Grenade axis parallel to the „borehole“, opening forwards, rotated in 90° steps
- , d) Grenade axis at right angles to the „borehole“ axis, rotated in 90° steps, test series with opposing positions, same orientation
- , f) Grenade axis at right angles to the „borehole“ axis, rotated in 90° steps, test series with opposing positions and opposite orientation

For lack of space, only a few exemplary results will be presented, and Fig. 5 shows the profiles measured „in the borehole“ for cases a) and b) with the respective components X, Y and Z of the 3-axis magnetometer.

It is shown that:

-- Just a few settings result in a great number of the most varied combinations for the components.

-- A large number of different anomaly configurations covers monopolar positive, monopolar negative, bipolar plus-minus, and bipolar minus-plus anomalies, plus all possible transitions.

-- In the specific case of the experiment, extremely different measurement values with amplitudes between 80 nT and 1500 nT were recorded for the same body under equal measurement conditions.

-- During rotation in a fixed position, extremely different anomalies were detected.

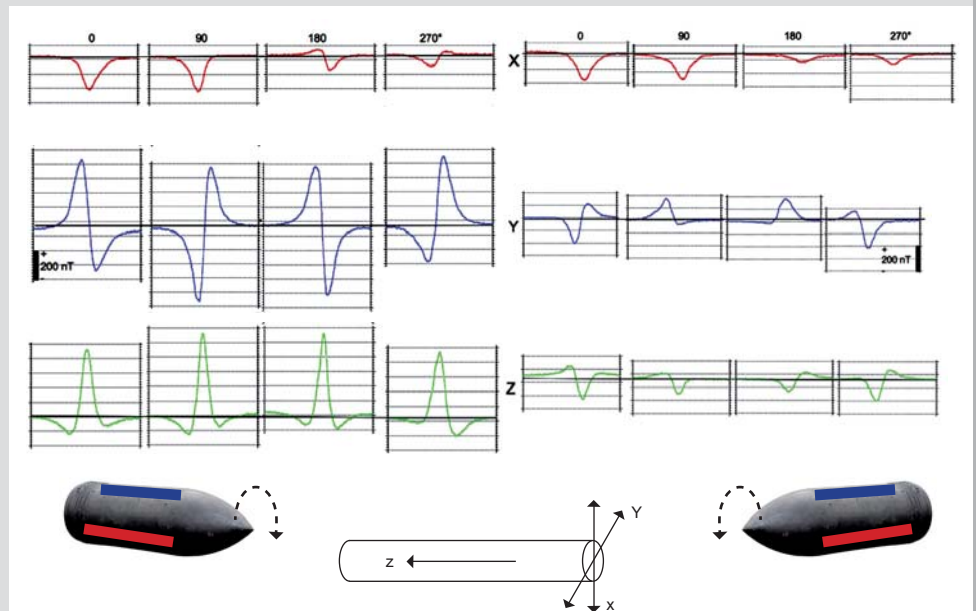


Abb. 5. Beispiele der Registrierung der Komponenten mit einem EBINGER-Dreiaxismagnetometer.

Fig. 5. Examples of recorded components with a 3-axis Ebinger magnetometer.

Deductions from the experiments:

-- The ferromagnetic body (the grenade) has a strong remanent magnetism.

-- The grenade's magnetic dipole moment does not lie in the bomb's axis, but is highly eccentric. The angle between the axes was deduced about 45°.

-- The measurements were limited to just a few standard orientations. In real life, and at the same depth, the bomb's orientation and azimuth position can adopt any of four 360 degrees of spatial freedom around the borehole.

-- Therefore, an infinitely large number of combinations exists for the three X, Y, and Z components, which can apply for the unknown spatial position of a bomb. Within the measurement accuracy range, various bombs in completely different positions can generate the same triple component (X, Y, Z).

-- In many cases, and different to the controlled experiment, practical measurements are not even able to reliably determine the anomaly's nature (e.g. bipolar or monopolar), due to measurement errors, influences from irregular ground magnetization and external interfering fields that cause an unreliable zero level of the measured curve. The uncertainties are no longer manageable.

-- It is usually illusionary to expect more information about the position and orientation of a bomb from a 3-axis device in a single borehole than with a conventional Z-gradiometer.

Vergleich Z-Gradiometer und Dreiachs-Magnetometer

Verglichen mit einem herkömmlichen Z-Gradiometer besitzt ein Dreiachsmagnetometer eine größere Reichweite bei geringerem Auflösungsvermögen. Die gemessenen Anomalien haben i.a. eine einfachere Form. Der Einfluss störender Eisenmassen oder magnetischer Gesteine ist erhöht. Zur Unterscheidung zeitlicher Feldänderungen (schwankendes Erdmagnetfeld, elektromagnetische Impulse der Umgebung) von örtlichen Anomalien sollte mit einer zweiten festen Basisstation registriert werden. Messungen in beliebig geneigten Bohrungen einschließlich von Horizontalbohrungen sind möglich.

Daraus ist zu lernen, dass das Dreiachs-Magnetometer nicht das moderne, bessere und leistungsfähigere Instrument ist. Es ist ein anderes Instrument.

Werden zwei Dreiachser übereinander für Differenzmessungen der Komponenten und der Totalintensität angeordnet (was praktiziert wird), ergeben sich zunächst dieselben Eigenschaften wie beim Z-Gradiometer: Geringere Reichweite, höheres Auflösungsvermögen, komplexere Anomalien, kein Einfluss zeitlicher Feldänderungen. Vorteil des Dreiachs-Differenzmagnetometers: Es kann in beliebig geneigten, selbst horizontalen Bohrungen gemessen werden. Ein definierter Gradient für die Totalintensität oder deren Komponenten (z.B. Vertikal- oder Horizontalgradient) ist allerdings nicht zu ermitteln.

Es lässt sich ableiten, dass die Eigenschaften von Z-Gradiometer und Dreiachs-Differenzmagnetometer weitgehend vergleichbar sind. Zusätzlich stehen die drei Einzelkomponenten in beiden Dreiachsern sowie deren jeweilige Gradienten (korrekt: Differenzwerte) zur Verfügung. Dabei erscheinen die Horizontalkomponenten wichtiger; der Gradient der Vertikalkomponente unterscheidet sich in unseren Breiten nicht wesentlich vom Gradienten der Totalintensität.

Es stellt sich die Frage, was an Mehrinformation die drei Gradienten der Einzelkomponenten bezüglich der Lage und Orientierung der Bombe bringen. Mit Blick auf die Experimente und stärkere remanente Magnetisierungen ist die Frage rasch mit GAR NICHTS beantwortet, da von einer Bombe a priori nicht bekannt ist, ob sie diese remanente Eigenschaft hat oder nicht. Der sich aufdrängende Schluss ist, dass ein Dreiachs-Differenzfeldmagnetometer („Gradiometer“) keinen allgemein nutzbaren Fortschritt bedeutet, es sei denn, man möchte es in einer Horizontalbohrung einsetzen.

Zusammenstellung und generelle Konsequenzen

In der Theorie haben Dreiachsmagnetometer als Einzel- oder Differenzsonde ein hohes Potential für erhebliche Mehrinformationen bezüglich Lage und Orientierung von ferromagnetischen Störkörpern, die über Bohrungen genau geortet werden sollen. Dazu müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein. Der Störkörper muss das Magnetfeld eines Dipols besitzen, dessen Feldgrößen magnetisches Moment, Inklination und Deklination zu ermitteln sind, wobei die Dipolachse zumindest gut näherungsweise mit der Achse der Bombe oder Granate zusammenfallen sollte.

Die Lage der Dreiachssonde muss bezüglich Neigung und azimuthaler Ausrichtung entlang der Messtrecke in der Bohrung bekannt sein. Während die letztere Bedingung durch entsprechende, sicherlich kostenintensive Maßnahmen gewährleistet werden kann, ist die den Störkörper betreffende Bedingung kaum je erfüllt.

Während im Fernfeld Bomben näherungsweise Dipolcharakter haben, können im Nahfeld sehr komplexe Magnetisierungsverteilungen z.B. durch Multipole wirksam werden. Die Verhältnisse werden noch unübersichtlicher, wenn eine remanente Magnetisierung der Bombe hinzutritt. Wie die Experimente mit dem EBINGER-Dreiachser gezeigt haben, können magnetische Störkörper mit einer remanenten Magnetisierung in nahezu beliebiger Lage und Orientierung praktisch nicht unterscheidbare Anomalien erzeugen.

Selbst wenn es in einfach gelagerten Fällen gelingen sollte, die Inklination und Deklination des Dipolmoment-Vektors zu ermitteln, kann er völlig anders als die Achse der Bombe liegen. Auch die Analyse der Einzelkomponenten des Dreiachsers führt keinen Schritt aus dem Dilemma.

Ein bleibendes Dilemma in der Kampfmittelortung nur mit Magnetfeldmessungen, an dem auch das Dreiachsmagnetometer nicht das geringste ändert, ist eben letztlich die remanente Magnetisierung von Kampfmitteln als eine völlig unbestimmte aber nicht wegzudiskutierende und grundsätzlich zu berücksichtigende Größe.

Unglücklicherweise wird dieser Sachverhalt, der gravierende Konsequenzen impliziert, weiterhin in der Kampfmittelräumung fahrlässig ignoriert, wenn allein auf Magnetfeldmessungen vertraut wird und regelmäßig aus der Amplitude gemessener Anomalien und über das modellierte Dipolmoment auf die Eisenmasse und die Größe und damit auf die Relevanz als gefährlich oder nicht gefährlich geschlossen wird, was gleichermaßen Feld- und Bohrlochmessungen betrifft. Bomben können bei remanenter Magnetisierung magnetisch „unsichtbar“ werden,

wenn remanente und induzierte Magnetisierung sich weitgehend oder völlig kompensieren und ein kleines Signal-Rausch-Verhältnis kein Erkennen mit der Magnetik zulässt. Es wird an die Granate der oben beschriebenen Experimente erinnert, die bei gleicher Position aber nach Rotation 80 nT oder aber auch 1500 nT am Magnetometer anzeigt.

Es muss deshalb noch einmal betont werden, dass ein Dreiachs-Magnetometer demselben Problem der Remanenz ausgesetzt ist und letztlich den Nimbus einer großartigen Neuentwicklung einbüßt. Man kommt nicht umhin, auch mit einem Dreiachsler weiterhin in einem Bohrraster mit mindestens drei Löchern zu messen, um den Ort der vermuteten Bombe zu erhalten. Wie aufgezeigt, bringt die Analyse der Einzelkomponenten im allgemeinen keinerlei vertrauenswürdige Zusatzinformation. Damit befindet man sich auf derselben Ebene wie beim Z-Gradiometer, mit dem bereits vor 20 Jahren in Dreierkonstellation und mit dem Messsystem ETsmart und der Auswertesoftware PROFsmart der Kampfmittelräumfirma TAUBER die vier Größen Ort, Dipolmoment, Inklination und Deklination am Computer modelliert werden konnten (wissend, dass der berechnete Dipol nicht notwendigerweise mit der Bombenachse zusammenfallen musste).

Wird schließlich noch hervorgehoben, dass die Anschaffung von Dreiachsmagnetometer-Messsystemen, vor allem als Differenz-Magnetometer mit zwei Dreiachsern, und der Geländeeinsatz unvergleichlich hohe Kosten verursachen, gibt es keinerlei Grund, diese Magnetometer in der Kampfmittelortung zwingend vorzuschreiben, wie es bereits gehandhabt wird.

Über das Dreiachsmagnetometer in Bohrungen soll der Stab nicht vollständig gebrochen werden. Als Einzelsonde kann die größere Reichweite zu einer Ausdünnung des Bohrrasters genutzt werden, womit aber geringeres Auflösungsvermögen und stärkere Störwirkungen durch außen liegenden Eisenmassen und magnetische Gesteine im Untergrund erkaufte werden. In wohl eher seltenen Fällen mögen auch die einzelnen Komponenten mehr an Information liefern, was aber nach einem sehr erfahrenen (und teureren!) Anwender, der sich mit Vektoren und der Physik der Magnetfeldmessungen gut auskennt, verlangt. Eine routinemäßige Anwendung eines Dreiachslers durch den „normalen“ Kampfmittelräumer wird durch die Suggestion, scheinbar ein „besseres“ Instrument zur Hand zu haben, zu eher negativen Resultaten führen.

Die jüngst verbreitete Meldung, dass mit dem Dreiachsler bei bestimmten Messkonstellationen (z.B. in der Nähe von Spundwänden) bessere Resultate als mit dem Z-Gradiometer erhalten wurden, hat vorerst keinerlei Wert, solange nicht reproduzierbare Messergebnisse mit genau beschriebenen Messbedingungen, vorzugsweise mit einer physikalisch stichhaltigen Erklärung, vorgelegt werden.

Comparison of Z-gradiometer and 3-axis magnetometer

Compared with a conventional Z-gradiometer, a 3-axis magnetometer has a greater range with lower resolution. In general, the measured anomalies have a simpler form. The influence of interfering iron masses or magnetic rocks is increased. In order to differentiate temporal field variations of local anomalies (varying geomagnetic field, electromagnetic pulses in the environment) a second fixed base station should be used for recording. Measurements are possible in inclined as well as horizontal boreholes.

Consequently, we can say that the 3-axis magnetometer is not a more modern, better, and more powerful instrument. It is a different instrument.

If two 3-axis devices are arranged above each other for differential measurement of the components and total intensity (as done in practice), initially the same properties are exhibited as for a Z-gradiometer: Reduced range, higher resolution, more complex anomalies, no influence from temporal field variations. Main advantage of the 3-axis differential magnetometer: It can be used for measurements in boreholes with any inclination, even in horizontal boreholes. However, a defined gradient for total intensity or its components (e.g. vertical or horizontal gradient) cannot be determined.

This permits the conclusion that the properties of Z-gradiometers and 3-axis differential magnetometers are comparable to a wide extent. Moreover, the three individual components in both 3-axis devices and the corresponding gradient (correct: differential values) are available. Hereby, the horizontal components seem to be more important – in our latitudes the vertical component gradient hardly differs from the total intensity gradient.

This raises the question of whether the three gradients of the individual components provide more information about the bomb's positions and orientation. With a view on the experiments and stronger remanent magnetizations, the answer is found quickly: NOTHING, because a priori it is not known whether the bomb has this remanent property or not. The obvious conclusion is that a 3-axis differential field magnetometer (gradiometer) represents no generally useful advancement, except if it is to be used in a horizontal borehole.

Compilation and general consequences

Theoretically, 3-axis magnetometers used as individual or differential sensors have a high potential for considerable additional information regarding the position and orientation of ferromagnetic causative bodies, which are to be located precisely by means of boreholes. For this, several conditions must be fulfilled. The causative body must have the magnetic field of a dipole, whose field values (magnetic moment, inclination, and declination) must be determined, whereby the dipole's axis should coincide as closely as possible with the bomb's or grenade's axis.

The position of the 3-axis sensor in terms of inclination and azimuth orientation along the measuring length in the borehole must be known. While the latter condition can be ensured by means of corresponding – probably expensive – measures, the condition regarding the causative body will hardly ever be fulfilled.

While bombs in the far field have an approximately dipolar character, highly complex magnetization distributions, e.g. due to multi-poles, can become effective in the near field. The relationships become even more confusing, if a remanent magnetization of the bomb is present. As shown by the experiments with the Ebinger-3-axis device, magnetic causative bodies with a remanent magnetization can generate practically indistinguishable anomalies in any position and orientation.

Even if it should be possible in simple cases to determine the inclination and declination of the dipole moment vector, this can be completely different from the bomb's axis. Nor does an analysis of the individual components of the 3-axis device provide a solution for this dilemma.

A permanent dilemma encountered in explosive ordnance detection using only magnetic field measurements (whereby the 3-axis magnetometer changes nothing), is the remanent magnetization of explosive ordnance as a completely indefinable value that cannot be ignored nor rationalized away.

Unfortunately, this circumstance – which implies grave consequences – is still being ignored negligently in explosive ordnance disposal, if trust is placed solely in magnetic field measurements, and the amplitude of measured anomalies as well as the modelled dipole moment are used to decide whether an iron mass and its size permits the object to be classified as harmless or dangerous. This applies equally to field and borehole measurements. With remanent magnetization, bombs can become magnetically „invisible“ if remanent and induced magnetization compensate each other to a great extent or even completely, and a small signal-to-noise ratio does not permit magnetic detection. Here, the grenade in the experiment described above should be kept in mind, where the magnetometer reading changed from 80 nT to 1500 nT after rotation in the same position.

Therefore, it must be pointed out once again that a 3-axis magnetometer is subjected to the same problem of remanence, and finally relinquishes the nimbus of a great new development. Consequently, in order to determine the location of a presumed bomb – also with a 3-axis device – there is no other choice than to continue using an arrangement with at least three boreholes. As demonstrated, an analysis of the individual components generally does not provide any trustworthy additional information. This means that we are at the same level as with the Z-gradiometer, which the explosive ordnance disposal company Tauber GmbH 20 years back already used in a triple constellation together with the ETsmart measurement system and the PROFsmart evaluating software package. This setup enabled the four parameters location, dipole moment, inclination, and declination to be modelled on a computer (well knowing that the calculated dipole does not necessarily coincide with the bomb's axis).

If one also considers that the purchase of 3-axis magnetometer measurement systems – primarily as differential magnetometers with two 3-axis devices – and their use in the field cause incomparably high costs, there is no reason for the compulsory use of these magnetometers in explosive ordnance detection, as is partially the case already.

Of course, there is also no reason to fully condemn 3-axis magnetometers in boreholes. As single sensors, their greater range can be used to thin out the borehole grid, whereby the lower resolution and higher susceptibility to external interference from iron masses and magnetic rocks underground must be taken into account. In somewhat rarer cases the individual components might provide additional information, but its evaluation requires a very experienced (and more expensive) operator, who is very familiar with vectors and the physics of magnetic field measurements. If a „normal“ bomb disposal team decides to routinely use a 3-axis device because of the assumption that this is a „better“ instrument, this will probably lead to negative results.

For the time being, the recent announcement that a 3-axis device achieves better results with certain measurement constellations (e.g. near sheet pile walls) than with a Z-gradiometer, has no significance as long as no reproducible results with precisely defined measurement conditions are presented – preferably with a physically valid explanation.

Die unmagnetische Bombe - ein Märchen?

Prof. Dr. Dr. habil. Kord Ernstson

Die bei der Kampfmittelräumung nach wie vor favorisierte und eingesetzte passive Magnetfeldmessung hat gravierende Nachteile, die geophysikalisch begründet sind, seit zwei Dekaden immer wieder angemahnt aber heute immer noch weitgehend ignoriert werden. Die bei Kampfmitteln existierende, vielfach starke remanente Magnetisierung verurteilt alle Versuche und regelmäßig praktizierten Berechnungen, aus den gemessenen magnetischen Anomalien die Größe von Verdachtsköpern zu ermitteln, als unzulässig und grundsätzlich zum Scheitern. Die remanente Magnetisierung kann ferner zu irreführenden Modellierungen der räumlichen Lage von vermuteten Blindgängern führen.

Im Rahmen des Signal-Rausch-Verhältnisses von Nutz- und Störsignal bleiben wegen einer remanenten Magnetisierung Kampfmittel wie z.B. Bombenblindgänger unerkannt und können weiterhin selbst auf freigegebenen Flächen im Untergrund existieren. Aktive geophysikalische Sondierungen mit elektromagnetischen Induktionsverfahren unterliegen diesen Problemen nicht.

Einleitung

Ogleich heute - aus guten Gründen - zunehmend aktive geophysikalische Messverfahren der Elektromagnetik in der Kampfmittelortung und -räumung eingesetzt werden, dominiert weiterhin die passive Messmethode der Magnetfeldmessungen. Das Hauptinstrument ist ein Fluxgate-Vertikalgradiometer für die erdmagnetische Vertikalkomponente, das Ende der dreißiger Jahre von Friedrich Förster erfunden und bereits im Krieg eingesetzt wurde. Nach dem Krieg und bis heute wird es schwerpunktmäßig für die Bomben-Blindgängerortung von der Erdoberfläche oder von Bohrungen aus eingesetzt. Magnetometer, die zum Teil andere Messprinzipien nutzen (Protonenpräzessions-Magnetometer, optisch gepumpte Magnetometer), werden ebenfalls eingesetzt, wobei das auch auf dem Fluxgate-Prinzip beruhende Dreiachs-Magnetometer in jüngster Zeit bei der Kampfmittelräumung einen gewissen Wirbel verursacht, ohne dass überhaupt irgendwelche signifikanten Vorteile zu erkennen sind (worauf ein gesonderter Artikel in den Ebinger NEWS eingeht).

Unabhängig von der Art und Ausführung der Magnetometer leiden sie alle unter einer gravierenden Schwäche, die physikalisch begründet ist, in großen Teilen der Kampfmittelräumung ignoriert und hier die Basis der folgenden Ausführungen sein wird. Bereits vor über 20 Jahren ist der Verf. mit dieser eigenartigen Konstellation konfrontiert worden, als er zum ersten Mal mit der praktischen Kampfmittelräumung in engen Kontakt kam. In Gesprächen mit Sondengängern der Räumgruppen fielen Bemerkungen der Art, dass das Magnetometer bei der Bohrlochmessung wieder einmal

The non-magnetic bomb – fact or fiction?

Passive magnetic field sensing is still the favoured and most used approach for tackling bomb disposal work. Although the laws of geophysics make the practice highly problematic, these are largely ignored even today despite repeated warnings being given over the last two decades. All attempts and calculations regularly performed to determine the size of the suspected ordnance from the magnetic anomaly measured are condemned to unreliability and fundamentally doomed to failure by the aggregate strength of the remanent magnetisation present in munitions. Moreover, this remanent magnetisation can also be misleading when modelling the spatial location of presumed unexploded ordnance (UXO).

Due to the signal-to-noise ratio between signal data and interference, remanent magnetisation means that ordnance such as unexploded bombs remain undetected and may continue to exist in subsoil even in areas thought to be safely cleared. These problems are not experienced by the method of active geophysical sensing with electromagnetic induction.

Introduction

While active geophysical surveys using electromagnetic sensing are increasingly deployed today in UXO location and clearing – and for good reason – the passive methods of magnetic field sensing nevertheless continue to dominate. The primary instrument here is a vertical component fluxgate gradiometer for the vertical gradient of the Earth's magnetic field, invented in the late 1930s by Friedrich Förster and in use before the end of the war. Post-war, its use as the preferred approach to unexploded bomb (UXB) location from the surface or boreholes has continued up to the present day. Some types of magnetometers that utilise other sensing mechanisms – such as proton precession magnetometers or optically pumped magnetometers – are also deployed. Yet the triple-axis magnetometer based on the fluxgate principle has recently generated a flurry of interest in UXO clearance circles, even despite the lack of any significant advantages whatsoever (a topic addressed by a separate Ebinger NEWS article).

Regardless of the type and design of the magnetometer, all such devices suffer from a serious flaw that originates in the laws of physics, yet is widely ignored by the UXO community: this weakness will form the basis for the present discussion. The author was confronted with this singular set of circumstances as many as twenty years ago, when he first came face-to-face with practical UXO clearance work. In discussions with field personnel in the UXO disposal squads, comments were made to the effect that, during borehole sensing, the magnetometer had again virtually failed to emit any signal when moving past an UXB. Yet when the author replied that this was

unmittelbar beim Vorbeifahren an einer Bombe praktisch kein Signal gegeben habe. Als der Verf. entgegnete, dass das nicht überraschend und physikalisch ganz einfach zu erklären sei, wanderten - bildlich gesprochen - die Zeigefinger an die Lippen: Darüber sprechen wir lieber nicht. Dieses Bild ist bis heute lebhaft geblieben, zumal festzustellen ist, dass sich an dieser Einstellung bei den Kampfmittelräumdiensten inzwischen praktisch nichts geändert hat und die „unmagnetische“ bzw. praktisch nicht messbare Bombe bei der Ortung verdrängt wird.

Methodisch einher damit gehen Beobachtungen, dass weiterhin Gefahrenpotenziale von Blindgängern nach der Amplitude der gemessenen Anomalien als signifikant oder nicht signifikant beurteilt werde, dass von Auftraggebern an die Magnetik-Räumgruppen Listen verteilt werden, in der die Größe der magnetischen Objekte einzutragen ist, und dass in Prospekten von Räumfirmen und Geräteherstellern immer noch die Zuordnung von gemessenen Magnetfeldwerten zu bestimmten Objekten propagiert wird.

Die folgenden Ausführungen werden vermitteln, dass in der Geophysik seit Generationen bekannte Zusammenhänge bei Magnetfeldmessungen nicht wirklich Eingang in die Kampfmittelortung und -räumung gefunden haben.

unsurprising and could be explained very simply by the laws of physics, fingers were placed on metaphorical lips: we'd rather not talk about that. This image is as vivid to me now as it was then, and all the more so since I can see how this attitude has remained practically unchanged within UXO disposal teams, and how the concept of the „non-magnetic“ or effectively invisible bomb is suppressed during surveys.

In methodological terms, practices observed include the following: the potential risk of a UXO is assessed as significant or not significant based on the amplitude of the measured anomaly; clients issue magnetisation-based disposal squads with lists in which the size of the magnetic object is to be entered; and brochures from UXO clearance companies and equipment manufacturers still propagate the myth of magnetic field values measured for specific objects as being usable parameters.

While familiar to generations of geophysicists, the following discussion will show that the circumstances affecting magnetic field sensing have yet to make real headway in UXO location and clearance work.

Geophysikalische Grundlagen: die induzierte Magnetisierung

Grundlage aller Magnetik-Messungen in der Kampfmittelortung ist das Erdmagnetfeld (Abb. 6), das ein Vektorfeld und in jedem Punkt durch die Richtung und den Betrag des Vektors gekennzeichnet ist. Das irdische Magnetfeld F induziert in jeder Materie einen Magnetismus, der als Vektorgröße mehr oder weniger parallel zum Vektor des induzierenden Erdmagnetfeldes ausgerichtet ist (Abb. 6). Der Vektor heißt induzierte Magnetisierung M_i . Der Magnetisierungsprozess bei der Induktion hat verschiedene Gesichter: man spricht von Dia-, Para-, Ferri-, Ferro- und Antiferromagnetismus. Ferri- und Ferromagnetismus sind besonders stark, Dia-, Para und Antiferromagnetismus ziemlich schwach. Die Stärke wird durch die materialspezifische Größe der magnetischen Suszeptibilität k bestimmt, die als Proportionalitätsfaktor zwischen den Beträgen des induzierenden Feldes F und der induzierten Magnetisierung M_i vermittelt:

$$M_i = k * F$$

M_i und F haben die Einheit Ampère/Meter (A/m); k ist als SI-Einheit dimensionslos. Die Minerale Quarz und Calcit, aber auch Wasser sind (negativ) diamagnetisch mit $k \approx -10^{-5}$, Feldspat und Glimmer sind paramagnetisch mit $k = + 10^{-4} - 10^{-2}$, Basaltgesteine sind überwiegend ferrimagnetisch, Eisen ist ferromagnetisch mit $k = + 10^3 - 10^4$. Bomben sind vor allem ferromagnetisch.

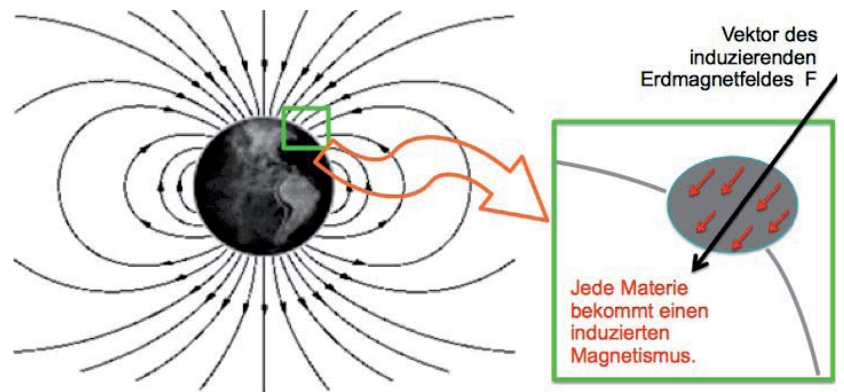


Abb. 6. Das Dipolfeld der Erde als Ursache für die induzierte Magnetisierung jeglicher Materie.

Fig. 6. The Earth's dipolar field as the origin of induced magnetisation for any material

Eine weitere wichtige Größe ist die magnetische Induktion (= magnetische Flussdichte) B, die das Magnetometer misst und anzeigt. Die Einheit ist das dem Sondengänger geläufige Tesla (T) bzw. Nanotesla (nT); bei Gradiometern ist es sinnvoll, die Messgröße auf das Meter mit der normierten Einheit nT/m zu beziehen. Mit der induzierenden Feldstärke F hängt die magnetische Induktion B über die magnetische Permeabilität μ zusammen,

$$B = \mu * F,$$

die ihrerseits über

$$\mu/\mu_0 = 1 + k$$

mit der Suszeptibilität verknüpft ist (μ_0 magnetische Feldkonstante). Letztlich führt der Induktionsprozess dazu, dass insbesondere Einzelkörper - vereinfacht gesprochen - zu einem Magneten werden, der selbst ein Magnetfeld besitzt, das sich dem induzierenden Erdfeld überlagert und es in seinem Umfeld verformt. Diese Verformungen oder Anomalien des Erdfeldes aufzuspüren und zu deuten, ist Aufgabe der geophysikalischen Geomagnetik; der Sondengänger versucht, damit z.B. Bombenblindgänger als sogenannte magnetische Störkörper zu identifizieren.

Fundamentals of geophysics: induced magnetisation

Underlying all magnetic sensing used in UXO location is the Earth's magnetic field (fig. 6), which is a vector field and characterised by the vector's direction and magnitude at any coordinate. In any material, the Earth's magnetic field, F, induces magnetisation that is a vector quantity oriented more or less parallel to the vector of the applied Earth's magnetic field (fig. 6). This vector is termed induced magnetisation, M_i . A number of terms – dia-, para-, ferri-, ferro- and antiferromagnetism – are used to describe this process of induced magnetisation. Ferri- and ferromagnetism are especially powerful, while dia-, para- and antiferromagnetism are fairly weak. Field strength is determined by the magnetic susceptibility specific to the material, k, which is calculated as the proportionality factor between the norms of the applied field F and the induced magnetisation M_i :

$$M_i = k * F$$

The unit for M_i and F is the ampere-meter (A•m); k is a dimensionless SI unit. The minerals quartz and calcite are (negatively) diamagnetic, as is water, with $k \approx -10^{-5}$, while feldspar and mica are paramagnetic, with $k = +10^{-4} - 10^{-2}$. Basaltic rocks are largely ferrimagnetic, while iron is ferromagnetic, with $k = +10^3 - 10^4$. In most cases, bombs are ferromagnetic.

Another important quantity is the magnetic induction, B, as measured and displayed by the magnetometer. The unit is the tesla (T) or nanotesla (nT), both familiar to UXO sensing teams; with gradiometers, per-metre readings are advisable, thus enabling use of the standardised unit nT/m. The magnetic induction B is related to the applied field strength F via the magnetic permeability, μ ,

$$B = \mu * F,$$

itself in turn linked via

$$\mu/\mu_0 = 1 + k$$

to susceptibility (μ_0 = magnetic field constant). Put simply, the induction process ultimately causes discrete objects to „turn into magnets“: these then possess their own magnetic field that is superimposed over the Earth's applied field and deforms the latter in the object's vicinity. The detection and interpretation of these deformations or anomalies in the Earth's magnetic field is a task for geophysical geomagnetism, which the sensing team applies in an attempt to identify a UXB as a causative body.

Geophysikalische Grundlagen: die gemessene magnetische Anomalie, die homogen magnetisierte Kugel und der magnetische Dipol

Magnetfeldmessungen in der Kampfmittelräumung nutzen heute vielfach die unschätzbaren Vorteile einer digitalen Datenaufnahme und ihrer kartennmäßigen Verarbeitung. Die gemessene Anomalie eines Bombenblindgängers kann sich dann darstellen, wie es Abb. 7 A vermittelt. Beschränkt man sich auf ein Messprofil, das über das Zentrum der Anomalie verläuft, mag man einen Kurvenverlauf der Magnetfeldwerte erhalten, wie es Abb. 7 B zeigt. In dieser Kurve stecken wichtige Größen des Blindgängers - Tiefe, Größe, Orientierung, Magnetisierung - die zu analysieren sind und für eine Bergung Bedeutung haben. Im allgemeinen sind Bomben bzw. ihre Blindgänger sehr komplexe magnetische Störkörper. Man behilft sich deshalb in aller Regel mit der sehr einfachen, aber in guter Näherung probaten Näherung, dass man das Objekt als einen magnetischen Dipol betrachtet. Vereinfacht ist ein solcher Dipol ein Magnet mit Nord- und Südpol, bei dem die beiden Pole aber unendlich nahe zusammengerückt sind. Ein Maß für die Stärke eines solchen magnetischen Dipols ist das (magnetische) Dipolmoment m , und sein magnetisches Feld, das Dipolfeld, hat genau die Gestalt, wie es Abb. 6 für die Erde zeigt, deren Magnetfeld bekanntlich in erster Näherung auch ein Dipolfeld ist.

Steht man mit einem Magnetometer über einem solchen magnetischen Dipol, so ist die angezeigte magnetische Induktion B (z.B. in nT) vom Abstand zwischen beiden und vom Dipolmoment abhängig, was sofort einleuchtet. Für den einfachsten Fall - das magnetische Moment m des Dipols ist als Vektorgroße vertikal ausgerichtet, und das Magnetometer befindet sich im Abstand z direkt darüber - misst man mit den hier unwichtigen Konstanten c, c' einen Betrag

$$B = c' * m/z^3,$$

wenn das Magnetometer ein 1-Sensor-Gerät ist, und

$$B = c' * m/z^4$$

für ein Gradiometer (nebenbei zeigen die Exponenten 3 und 4, wie rasch die magnetische Wirkung eines Dipols mit der Tiefe z abnimmt). Sind der Dipol und sein magnetischer Momentvektor gedreht und befindet sich das Magnetometer seitlich versetzt, so ist mit den einzelnen Vektorkomponenten zu operieren, was am Grundsätzlichen nichts ändert, aber die Möglichkeit eröffnet, aus dem kompletten Messprofil mit dem Magnetometer über dem Dipol beides, m mit Betrag und Richtung sowie z zu ermitteln.

Hier setzt die Auswertung bei der Kampfmittelräumung ein, über das Dipol-Modell die Tiefe und das magnetische Moment des Blindgängers zu berechnen. Nun hat der magnetische Dipol im Gegensatz zur Bombe durch die unendlich dicht zusammengerückten Pole aber ein Volumen Null. Für die Praxis bedeutet das, dass aus der Messung

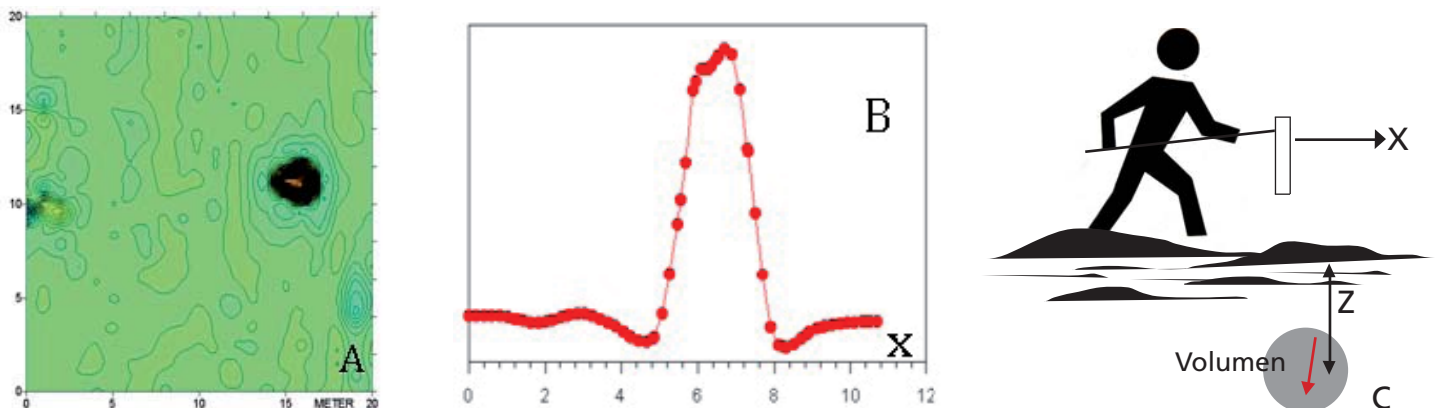


Abb. 7. A: Die magnetische Anomalie eines Bombenblindgängers nach digitaler Datenaufnahme. B: Ein Profil von Magnetfeld-daten über das Zentrum der Anomalie. C: Ersatz des Bombenblindgängers durch eine homogen magnetisierte Kugel (roter Pfeil als Vektordarstellung) zur Modellierung der Tiefe z und des magnetischen Dipolmomentes der Kugel.

Fig. 7. A: The magnetic anomaly of an unexploded bomb, as obtained by a digital survey. B: A magnetic field data profile through the centre of the anomaly. C: Substitution of the UXB with a homogeneously magnetised sphere (vector illustrated by red arrow) for modelling the depth, z , and the magnetic dipole moment of the sphere.

die Tiefe und das magnetische Moment des Bomben-Ersatzdipols zu gewinnen sind, aber überhaupt nichts über die Größe zu erfahren ist. Eine kleine Granate und eine 250 kg-Bombe erzeugen dasselbe Magnetfeld, wenn sie bei gleicher Tiefenlage nur dasselbe magnetische Moment besitzen. Einen Ausweg bietet das Konzept mit der Kugel, die homogen magnetisiert ist, d.h. dass der Vektor der Magnetisierung M_i durch den Induktionsprozess überall in der Kugel dieselbe Richtung und denselben Betrag hat, mit anderen, sehr einfachen Worten, dass die kleinen Magnetpartikelchen in der Kugel überall homogen verteilt, gleichstark magnetisch und einheitlich ausgerichtet sind. Dann hat das magnetische Feld außerhalb dieser induktiv magnetisierten Kugel genau das Feld eines magnetischen Dipols, der im Mittelpunkt der Kugel sitzt, und es gelten die Beziehungen:

$$m = M_i * V = k * F * V \quad V = m/k * F$$

(m = magnetisches Dipolmoment, M_i = induzierte Magnetisierung, F = induzierendes Magnetfeld, k = magnetische Suszeptibilität, V = Volumen der Kugel)

Wird dieser Formalismus auf die Bombe und ihre magnetische Ersatzkugel angewandt (Abb. 7 C), so kann bei bekanntem induzierendem Erdmagnetfeld und bekannter Suszeptibilität des Materials das Volumen berechnet werden. Da die Suszeptibilität für Eisen größenordnungsmäßig bekannt ist, ergibt sich mit dem Volumen der Durchmesser und mit der bekannten Dichte für Eisen die Masse der Ersatzkugel. Zusammengefasst beruht also die bei Kampfmittelräumern benutzte Abschätzung der „Größe“ von magnetischen Objekten auf der Ermittlung des magnetischen Dipolmoments m aus der gemessenen Anomalie (was der Computer zusammen mit der Bestimmung der Tiefe z erledigt), was zu Volumen und Eisenmasse der Ersatzkugel führt.

Dieses Vorgehen, eine komplex aufgebaute Bombe mit einer homogen magnetisierten Kugel für grobe Abschätzungen zur Objektgröße zu nutzen, ist auf den ersten Blick zulässig, weist letztlich aber einen grundsätzlichen und schwerwiegenden Fehler auf, der die ganze Methode ins Abseits stellt und auf die Beantwortung der Frage nach der unmagnetischen Bombe zielt.

Geophysical fundamentals: the measured magnetic anomaly, the homogeneously magnetised sphere and the magnetic dipole

Modern magnetic field surveying in UXO clearance makes plentiful use of the inestimable advantages of digital data collection and its cartographic processing. The anomaly measured for an UXB can then present itself as illustrated in figure 7 A. Limiting ourselves to readings taken along a line bisecting the anomaly, the magnetic field values should follow a curve similar to that shown in figure 7 B. This curve holds key parameters for the UXB – including depth, size, orientation and magnetisation – which require analysis and have relevance for UXB clearance. Generally speaking, bombs – and thus UXB – are highly complex magnetic interfering objects. Accordingly, the most common approach is to utilise the highly simplified – yet since sound, legitimate – approximation of considering the object as a magnetic dipole. Expressed simply, such a dipole is a magnet with a north and a south pole, but where the distance between the poles is infinitely small. One dimension for the strength of such a magnetic dipole is the (magnetic) dipole moment, m : its magnetic field – the dipole field – precisely matches that shown for the Earth in figure 6, whose magnetic field is commonly modelled to first-order approximation by a dipole field.

If we hold a magnetometer above this kind of magnetic dipole, the magnetic induction B shown (e.g. in nT) will depend – as is manifestly obvious – on the distance between the two objects and the dipole moment. For the simplest case, i.e. where the dipole's magnetic moment m is oriented as a vertical vector component and the magnetometer is located directly above at a distance z - you measure with the herein insignificant constants c , c' a magnitude

$$B = c' * m/z^3,$$

if the magnetometer is a single-sensor device, and

$$B = c * m/z^4$$

for a gradiometer (demonstrating, as a side note and with regard to the formulas' 3 and 4 exponents, how rapidly the magnetic effect of a dipole decreases with increasing depth z). If the dipole plus its magnetic moment vector are rotated and the magnetometer is laterally displaced, we work instead with the individual vector components. This does not alter the underlying principles but enables us to determine both quantities – m with magnitude and

direction, plus z – from the complete measurement profile with the magnetometer over the dipole. This type of analysis can be applied in UXO clearance work, where we use the dipole model to calculate the depth and magnetic moment of the UXB. Unlike a bomb, however, the magnetic dipole has zero volume, since the distance between its poles is infinitely small. In the field, while this means we can use our measurement to obtain the depth and magnetic moment of our pseudo-dipole bomb, we can learn nothing whatsoever about its size. A small grenade and a 250 kg bomb generate an identical magnetic field if they are at the same depth and simply have an identical magnetic moment. One solution is to use the model of a homogeneously magnetised sphere, where the direction and magnitude of the vector of the magnetisation M_i produced by induction are identical throughout the sphere. Or, in very simple terms: where the sphere's tiny magnetic particles exhibit perfectly homogeneous distribution, an identical magnetic strength and a uniform orientation. Here, the magnetic field outside this inductively magnetised sphere is the same as the field of a magnetic dipole at the centre of the sphere and the variables are related as follows:

$$m = M_i * V = k * F * V \qquad V = m/k * F$$

(m = magnetic dipole moment, M_i = induced magnetisation, F = applied magnetic field, k = magnetic susceptibility, V = sphere volume)

If this formal model is applied to the bomb and its magnetic pseudo-sphere (fig. 7 C), then the volume can be calculated if we know the strength of the Earth's applied magnetic field and the material's susceptibility. Since the susceptibility of iron is known to within one order of magnitude, the pseudo-sphere's mass can be derived from the volume of the diameter and the known density of iron. Put succinctly, the estimate of the „size“ of magnetic objects as used by UXO clearance teams is based on deriving the magnetic dipole moment m from the anomaly measured (a task that can be assigned to a computer, together with the depth z), producing a figure for the volume and iron mass of the pseudo-sphere.

This approach – considering a structurally complex UXB by utilising a homogeneously magnetised sphere for rough approximations of the object's size – appears reasonable at first glance. Closer examination exposes a serious and fundamental error, however, which renders the entire method worthless and attempts to answer the question of the non-magnetic bomb.

Geophysikalische Grundlagen: die remanente Magnetisierung

Ein bedeutsamer Umstand bei allen Magnetfeldmessungen in der Geophysik, Geologie und auch der Kampfmittelräumung ist die Eigenschaft von ferri- und ferromagnetischen Stoffen, zwei Arten von Magnetismus aufzuweisen: den zuvor behandelten induzierten Magnetismus und einen remanenten (bleibenden) Magnetismus. In einem Gedankenexperiment lässt sich das so veranschaulichen: Schalte ich das Erdmagnetfeld aus oder bringe ich den Körper aus dem Erdmagnetfeld heraus (z.B. auf den Mond), so verschwindet auch die induzierte Magnetisierung. Trotzdem kann ich in vielen Fällen feststellen, dass das Magnetometer weiterhin einen verbliebenen, remanenten Magnetismus anzeigt. Wird er analysiert, so stellt man fest, dass diese natürliche remanente Magnetisierung (NRM) vielfach aus mehreren verschiedenen Komponenten besteht. Sie können ganz unterschiedlichen Prozessen zugeordnet werden, die der Körper in seiner Vergangenheit durchgemacht hat, und man unterscheidet u.a. eine thermoremanente Magnetisierung TRM (durch Abkühlung eines erhitzten Körpers unter seine Curie-Temperatur in einem äußeren Feld), eine chemische Remanenz CRM (durch chemische Mineralumwandlungen), eine meist nicht stabile viskose Remanenz VRM (durch das zeitweise Einbringen des Körpers in ein Magnetfeld) oder auch eine isothermale Remanenz IRM (z.B. durch Blitzschlag). In der

Fundamentals of geophysics: remanent magnetisation

A significant state of affairs affecting all magnetic field surveys in geophysics, geology and – by extension – UXO clearance is the ability of ferri- and ferromagnetic materials to exhibit two distinct kinds of magnetism: the induced magnetism as discussed above and a remanent (residual) magnetism. We can illustrate this by means of the following thought experiment. If I switch off the Earth's magnetic field or move the mass away from the Earth's magnetic field (to the moon, for example) then the induced magnetisation disappears. Notwithstanding this, my magnetometer will in many cases continue to detect and display a residual – remanent – magnetism. If we analyse this magnetism, we find that this natural remanent magnetisation (NRM) is a complex quantity composed of multiple separate components and traceable to a wide variety of processes that the mass has been subjected to in the past. Examples of sources of NRM include: thermoremanent magnetisation or TRM (resulting from the cooling down of a heated mass below its Curie temperature in an external field); chemical remanence or CRM (via chemical mineral changes); a generally unstable viscous remanence or VRM (from the temporary placement of the mass in a magnetic field); and isothermal remanence or IRM (originating from a lightning strike, for example). In geophysics and geology, a stronger case of remanent magnetisation in rock is

Geophysik und Geologie ist eine stärkere remanente Magnetisierung der Gesteine meist eine TRM, die bei der Abkühlung magmatischer Gesteine (z.B. Basalt) im Erdmagnetfeld aufgeprägt wird. Stähle bekommen eine starke remanente Magnetisierung häufig bei ihrer Herstellung.

Die Existenz einer Remanenz führt dazu, dass sich in einem magnetischen Körper beide Komponenten, die induzierte und die remanente Magnetisierung vektoriell überlagern, wobei die magnetische Suszeptibilität den induktiven und die Vorgeschichte den remanenten Anteil bestimmen. Ein Bild verdeutlicht die Konsequenz: Drehe ich einen magnetisierten Körper, so bleibt der Vektor der induzierten Magnetisierung raumfest, während sich der Remanenzvektor mit der Probe dreht, mit der er fest verankert ist.

Nach außen hin bestimmt die wirksame Magnetisierung, also der Summenvektor aus beiden Komponenten das magnetische Verhalten. Wird bei einer Messung und ihrer Auswertung eine merkliche Remanenz ignoriert, ergeben sich falsche Resultate.

generally due to TRM, which is acquired as igneous rock (e.g. basalt) cools down in the Earth's magnetic field. Steels often acquire strong remanent magnetisation during the manufacturing process.

For a magnetic mass, the existence of remanence leads to a situation where both components of magnetisation – the induced portion (determined by magnetic susceptibility) and the remanent portion (determined by the past history of the mass) are vectorially superimposed. The consequence can be illustrated as follows: if I rotate a magnetised mass, the vector of the induced magnetisation remains spatially constant, while the remanence vector rotates with the mass to which it is permanently anchored.

An external observer sees only the effective magnetisation – the vector sum from both components of the mass' magnetic activity. If significant remanence is ignored when taking and analysing a measurement, this will falsify the results.

Die remanente Magnetisierung bei Blindgängern

In den Abb. 8-11 werden die zuvor erläuterten Zusammenhänge zur remanenten Magnetisierung am Beispiel von Kampfmitteln aufgezeigt. Abb. 8 vermittelt, dass in einem Blindgänger, dem im Zuge der Stahlherstellung eine starke remanente Magnetisierung aufgeprägt wurde, zwei Komponenten existieren, die sich zur wirksamen Magnetisierung vektoriell addieren. Dessen Störfeld registriert das Magnetometer bei der Messung im Gelände.

Abb. 9 zeigt, wie sich das bei der Ortung eines Blindgängers im Gelände auswirken kann. Je nach seiner Lage im Untergrund und der Orientierung und Stärke des remanenten Magnetismus ergeben sich ganz unterschiedliche „Reaktionen“ des Magnetometers, was für drei ausgewählte Konstellationen zusammengestellt ist und deutlich macht, dass je nach Rotation der Magnetismus zwischen den Extremen „starker Magnetismus“ und „sehr geringer Magnetismus“ liegen kann.

Abb. 9. Bei der Rotation eines Körpers dreht sich der Remanenzvektor (grün) mit diesem fest verbunden mit. Der Vektor der induzierten Magnetisierung (rot) verharrt raumfest. Der resultierende wirksame Vektor (schwarz) verändert sich entsprechend oder - im Extremfall - verschwindet nahezu ganz.

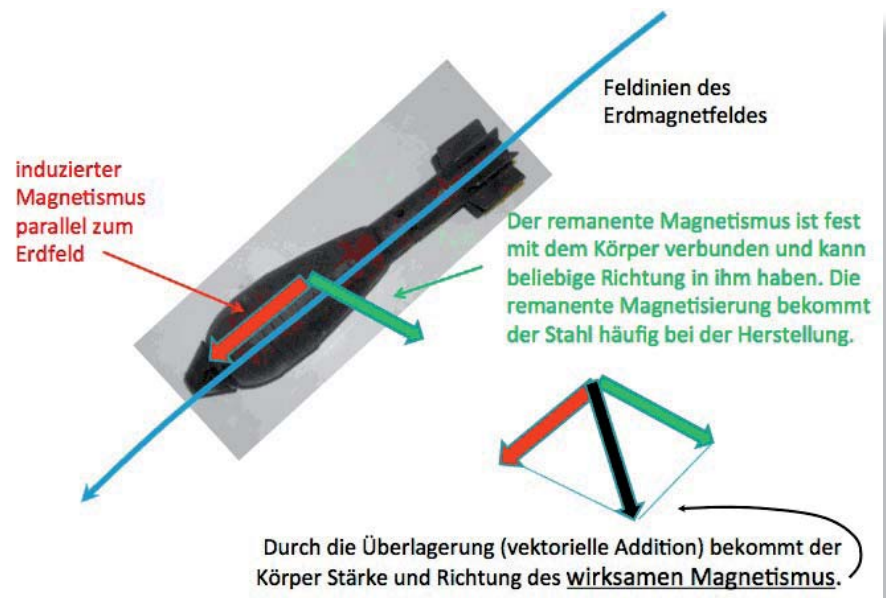


Abb. 8. Die Vektoren der induzierten und der remanenten Magnetisierung überlagern sich zum Summenvektor der wirksamen Magnetisierung.

Fig. 8. The vectors from induced and remanent magnetisation are superimposed to produce a vector sum – the effective magnetisation

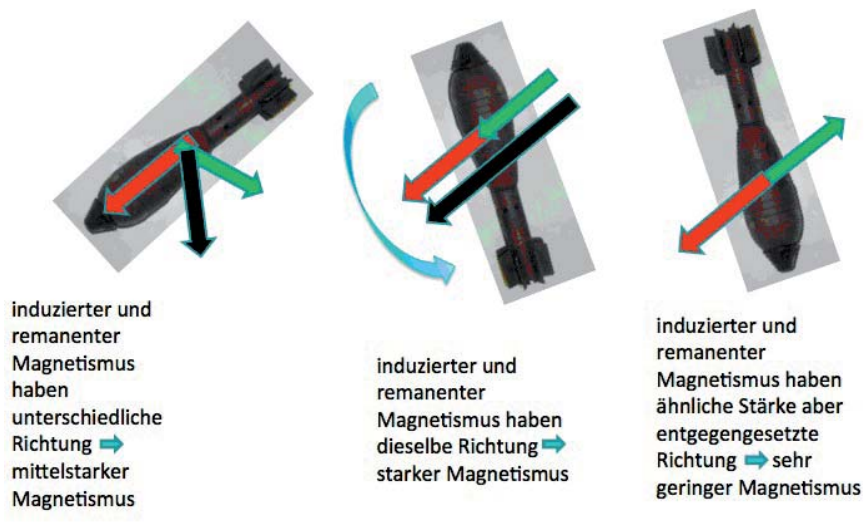


Abb. 9. Bei der Rotation eines Körpers dreht sich der Remanenzvektor (grün) mit diesem fest verbunden mit. Der Vektor der induzierten Magnetisierung (rot) verharrt raumfest. Der resultierende wirksame Vektor (schwarz) verändert sich entsprechend oder - im Extremfall - verschwindet nahezu ganz.

Fig. 9. Rotating a mass has the effect of rotating its permanently-anchored remanence vector (green). The vector due to induced magnetisation (red) remains immobile. The resulting effective vector (black) either varies accordingly or - in extreme cases - may almost vanish altogether.

Den mit dem Magnetometer gemessenen Kurven teilt sich das mit, was in Abb. 10 skizziert ist, und die mit aller Eindringlichkeit zu formulierende Konsequenz lautet schon hier: Eine Abschätzung der Objektgröße aus der Amplitude der gemessenen magnetischen Anomalie verbietet sich grundsätzlich, wenn nichts Genaueres über eine remanente Magnetisierung des Verdachtskörpers bekannt ist. Das ist einleuchtender Weise stets der Fall.

Abb. 10. Je nach Orientierung des Verdachtskörpers misst das Magnetometer gemäß Abb. 9 sehr unterschiedlich starke bis hin zu verschwindende Anomalien. Selbst eine grobe Abschätzung der Größe des Objektes verbietet sich strikt.

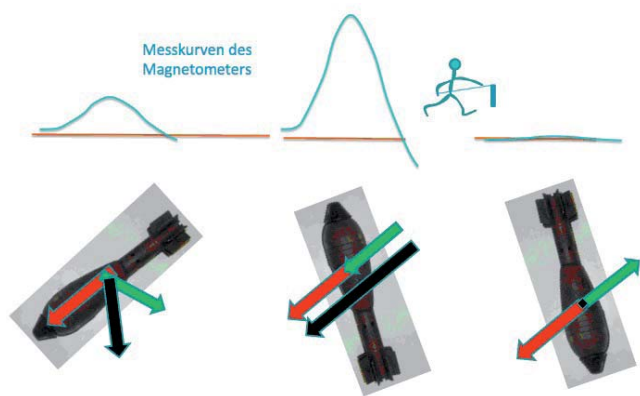


Abb. 10. Je nach Orientierung des Verdachtskörpers misst das Magnetometer gemäß Abb. 4 sehr unterschiedlich starke bis hin zu verschwindende Anomalien. Selbst eine grobe Abschätzung der Größe des Objektes verbietet sich strikt.

Fig. 10. Depending on the orientation of the suspected UXO, magnetometer readings for figure 4 vary wildly - registering both major and insignificant anomalies. Strictly speaking, even rough approximations of object size are impossible.

Eine weitere Konsequenz vermittelt Abb. 6. In der gezeigten Konstellation hat der Blindgänger dieselbe Position in derselben Tiefe, aber die stark unterschiedliche Stärke und Orientierung des Remanenz-Vektors (grün in Abb. 11) führt in einem Fall zu einer positiven, im anderen Fall zu einer negativen Anomalie. Überspitzt formuliert sollte sich bereits hier der Sondengänger Gedanken machen, ob der negative Ausschlag an seinem Magnetometer nicht auch eine negative Größe des Verdachtsobjektes im Untergrund bedeutet. Sinnvollerweise sollte er aber den Schluss ziehen, dass eine dominierend negative magnetische Anomalie in unseren Breiten zwangsläufig eine remanente Magnetisierung bedeutet, die größer als die induzierte ist. Diese Beobachtung existiert auf vielen Räumfeldern und auf den weltweit existierenden Testfeldern für Kampfmittel-Ortung zusammen mit dem Auftreten dipolartiger Anomalien, die entgegengesetzt dem induzierenden Erdfeld orientiert sind. Das widerlegt eindeutig die vielfach bei den Kampfmittelräumdiensten zu hörende und selbst in einer Fachpublikation zu lesende Behauptung, dass remanente Magnetisierungen bei Kampfmitteln keine Bedeutung haben.

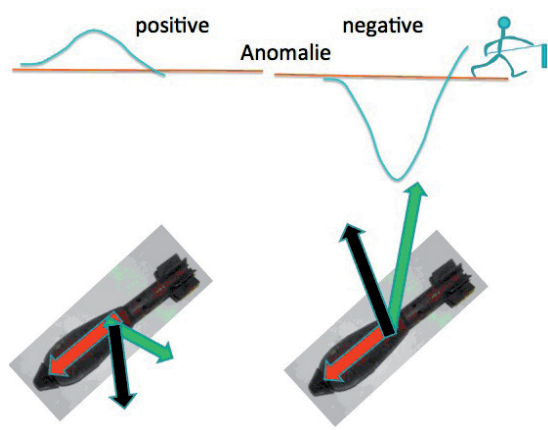


Abb. 11. Ein geeignet orientierter starker Remanenzvektor (grün) kann die induzierte Magnetisierung überkompensieren und zu einer negativen Hauptanomalie über dem Störkörper führen. Die bekannten begleitenden Randanomalien des jeweils anderen Vorzeichens werden hier nicht weiter beachtet.

Fig. 11. A strong and suitably oriented remanence vector (green) can overcompensate for induced magnetisation and lead to a negative primary anomaly above the interfering object. The known parallel secondary anomalies of each of the other signs are not considered further in this model.

Remanent magnetisation in UXO

Figures 8 to 11 use the example of unexploded ordnance to illustrate the principles underlying the concept of remanent magnetisation. In figure 8, we see how unexploded ordnance whose steel acquired strong remanent magnetisation during manufacture exhibits two magnetisation components: these sum vectorially to produce the UXO's effective magnetisation – registered on-site by a magnetometer as the UXO's interference field.

Figure 9 depicts the potential consequences for UXO surveys in the field. Depending on the object's position in the subsoil and the orientation and strength of remanent magnetisation, a number of very different „reactions“ may be seen from the magnetometer. Three specific scenarios are illustrated, clearly showing how rotation can cause the magnetism measured to vary between the extremes of „strong magnetism“ and „very weak magnetism“.

The curves the magnetometer measures are party to the circumstances illustrated in figure 10. We can already draw a conclusion here and needn't mince our words when doing so: any estimation of the size of an object derived from the amplitude of the magnetic anomaly measured is fundamentally flawed in cases where details of the suspected UXO's remanent magnetisation are unknown. This is – rather obviously – always the case.

Figure 11 illustrates a further consequence. In the scenario as depicted, the UXO occupies an identical position at the same depth, but the magnitude and direction of the remanence vector (green in fig. 11) shows considerable variance, causing a positive anomaly in one case and a negative anomaly in the other. At this point, to put it bluntly, the UXO clearance team should seriously be wondering if the negative reading from the magnetometer points to a negative size for the suspected UXO in the subsoil! The level-headed conclusion, however, is that a preponderantly negative magnetic anomaly registered in our latitudes necessarily indicates a remanent magnetisation that is larger than the induced component. This can be observed on many UXO clearance sites and test sites for UXO location around the world, together with the occurrence of dipole-type anomalies that are oriented in the opposite direction to the Earth's applied magnetic field. This unambiguously refutes the assertion often heard in UXO clearance circles – and in one case even published by an industry journal – that remanent magnetisation events are of no importance for ordnance.

Experimente zur remanenten Magnetisierung

Den markanten Effekt der remanenten Magnetisierung und die Unsinnigkeit, aus der gemessenen Nanotesla-Amplitude auf die Größe der Verdachtsobjekte zu schließen, kann jeder Sondengänger mit seinem Magnetometer selbst nachvollziehen, wenn er einige ganz einfache Experimente mit normalen Gegenständen des täglichen Lebens, aber auch mit geborgenen entschärften Kampfmitteln oder anderen Erdfinden durchführt. Einige in Abb. 12 gezeigte Beispiele mit Gewichtsangaben und Ausschlägen am Magnetometer für Messungen in jeweils demselben Abstand vom unteren Sensor können als Anregung dienen. Dabei stehen nicht nur der Kontrast zwischen den 5000 g der Kanonenkugel mit 85 nT/m Ausschlag und der 27 g kleinen Blechdose mit ähnlichen 68 nT/m Ausschlag ins Auge, sondern auch die starke Abhängigkeit von der Orientierung der kleinen Granate mit elffach unterschiedlichem Ausschlag macht den Einfluss der Remanenz deutlich.

Experiments with remanent magnetisation

The marked effect of remanent magnetisation and the absurdity of using the measured nanotesla amplitude to derive conclusions about the size of the suspected UXO can be confirmed personally with a magnetometer by any UXO clearance team. A number of simple experiments can be performed with normal, everyday objects, or, alternatively, by using recovered and disarmed ordnance and other excavated objects. Figure 12 presents several such experimental objects, together with details of object weight and the magnetometer reading (each taken at the same distance from the lower sensor). The similarity of the readings between the massive five-kilo cannonball (85 nT/m) and the tiny 27 g sardine tin (68 nT/m) is not the only eye-catching figure here. Also unmistakable is the effect of remanence on the small grenade: a simple change in orientation means the readings now differ by a factor of 11.



Abb. 12. Experimente zur remanenten Magnetisierung verschiedener Probekörper mit Angaben zum jeweiligen Gewicht und zu den mit dem Magnetometer ermittelten Messwerten für einen in allen Fällen gleichen Abstand.

Fig. 12. Experiments investigating remanent magnetisation for a range of test masses, providing details of object weight and the readings taken with a magnetometer at a uniform distance for all test masses.

Nutz- und Störsignal: Das Signal-Rausch-Verhältnis und die „unmagnetische Bombe“

Die vorherigen Ausführungen haben gezeigt, dass die remanente Magnetisierung von Kampfmitteln eine nicht wegzudiskutierende Tatsache ist, die einen großen Einfluss haben kann und nicht ignoriert werden darf. Ob ein Blindgänger eine starke oder eine sehr schwache Anomalie für das Messgerät anzeigt, hängt von dieser Größe ab, die im Prinzip allen ferri- und ferromagnetischen Materialien eigen ist. Aber: Eine unmagnetische Bombe gibt es nicht, auch wenn der extrem unwahrscheinliche Fall gegeben sein sollte, dass die Stärke der beiden genau entgegengesetzt orientierten Magnetisierungsvektoren identisch ist. Es ist deshalb festzuhalten: Eine Bombe ist, wie alle anderen Objekte auch, grundsätzlich magnetisch. Der alles entscheidende Punkt ist mit der Frage verknüpft: Ist die Bombe messbar magnetisch? Das hängt ab vom sogenannten Signal/Rausch-Verhältnis – ein wichtiges Prinzip bei physikalischen Messungen, das Abb. 13 erläutert.

Sie macht klar, dass es die unmagnetische Bombe zwar nicht gibt, aber dass eine Bombe für den Sondengänger und sein Magnetometer „unsichtbar“ dann bleibt, wenn das Bombensignal (das erwünschte Nutzsignal) im Rauschen des Störsignals untergeht. Ein solches Rauschen existiert IMMER, mal stärker, mal schwächer, und es ist nur eine Frage, wie stark das Nutzsignal bei einer vergebenen Instrumentenempfindlichkeit das Störsignal „übertönt“. So muss die remanente Magnetisierung gar nicht unbedingt die induzierte Magnetisierung kompensieren; auch bei einem merklich wirksamen Magnetisierungsvektor kann das Nutzsignal bei stärkerem Rauschen darin untergehen, und die Bombe bleibt mit alleinigen magnetischen Messungen unentdeckt. Feste Regeln für ein Ja oder Nein gibt es einleuchtender Weise nicht.

Signals and interference: the signal-to-noise ratio and the „non-magnetic bomb“

The discussion as presented above has shown that the remanent magnetisation of unexploded ordnance is a potentially decisive factor that cannot merely be explained away or ignored as irrelevant. A strong or weak anomaly as indicated by a magnetometer reading therefore depends on this remanence, which is in principle an inherent property of all ferri- and ferromagnetic materials. Conversely, there is no such thing as a non-magnetic bomb – even in the highly unlikely scenario presented by the two magnetisation vectors having

the same magnitude and a diametrically opposed orientation. In a nutshell, therefore, we can say that a bomb – like any other object – is fundamentally magnetic. The all-important question is therefore: can we actually measure the bomb's magnetism? This depends on the signal-to-noise ratio (SNR), a key concept underlying real-world measurements, which is illustrated in figure 13.

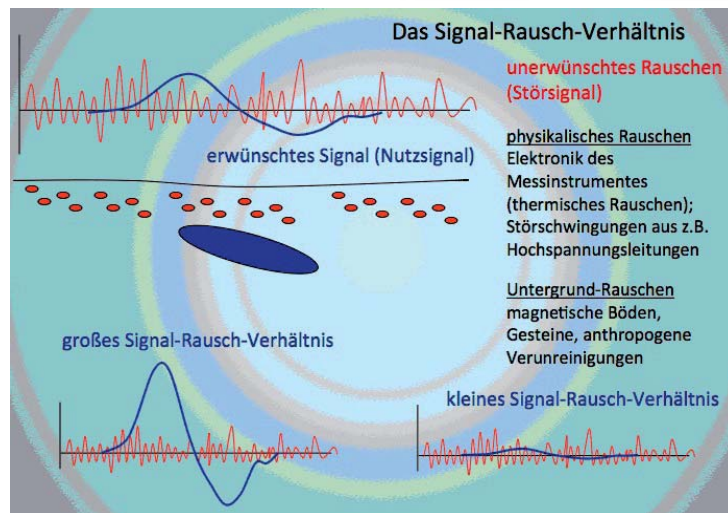


Abb. 13. Das Prinzip vom Signal-Rausch-Verhältnis und seine Bedeutung für eine mögliche komplette Maskierung von Blindgängern bei einer remanenten Magnetisierung.

Fig. 13. The signal-to-noise ratio concept and its significance for the potentially perfect masking of unexploded ordnance by remanent magnetisation.

While clearly showing that the non-magnetic bomb is a fiction, the figure illustrates how a bomb can remain „invisible“ to the magnetometer and UXO clearance team if the bomb's signal (the useful data required) is masked by interference noise. Noise of this kind may be strong or weak but it is ALWAYS present: it is merely a question of whether the interference is able to „drown out“ the data signal for a given instrument sensitivity. Accordingly, the remanent magnetisation need not even compensate for the induced magnetisation but merely has to be sufficiently strong to boost interference to a level capable of masking the data signal: the bomb then remains undetected to teams working solely with magnetism readings. As we can see, there is no hard and fast rule for a „yes“ or „no“ answer.

Schlussfolgerungen

Wie die vorherigen Ausführungen gezeigt haben, kann das magnetische Verhalten von Kampfmitteln sehr komplex sein, und die Annäherung mit dem Dipolmoment und einer analog wirkenden homogen magnetisierten Kugel kann nur in einer Hinsicht einigermaßen funktionieren, und das ist die Ermittlung von Ort und Tiefenlage des Dipols. Das gibt umso bessere Resultate, je größer der Abstand zwischen Blindgänger und Magnetometer ist. Im Nahfeld macht sich immer stärker die Abweichung des realen Bombenkörpers von einem magnetischen Dipol bemerkbar, und starke Inhomogenitäten können sogar zu Multipolen mit entsprechend komplexen Magnetfeldern führen.

Auch das immer wieder praktizierte Vorgehen, einen Kampfmittel-Verdachtskörper und seine räumliche Orientierung mit einem magnetischen Dipol zu modellieren, kann rasch zum Scheitern verurteilt sein, wenn eine stärkere Remanenz dazu führt, dass der resultierende, nach außen wirksame Magnetisierungsvektor nicht mit der Achse der Bombe oder Granate zusammenfällt sondern einen großen Winkel mit ihr bildet, wofür es immer wieder Beispiele gibt. Da modelliert der Computer zwar diesen Vektor, aber die Bombe liegt dann doch beliebig anders orientiert. Gerade diese Konstellation stellt auch den vielfach gepriesenen Vorteil von Dreiaxismagnetometern, mit der Erfassung der Einzelkomponenten detailliert den Verdachtskörper in seiner Untergrundorientierung beschreiben zu können, in Frage. Überhaupt nicht zulässig ist die nach wie vor in weiten Teilen der Kampfmittelräumung praktizierte Methode, aus der gemessenen Amplitude einer Magnetfeldanomalie auf die Größe eines Objektes zu schließen. Eine mögliche remanente Magnetisierung, die mit der Messung selbst nicht zu quantifizieren ist, verbietet das strikt. Im Rahmen des Signal-Rauschverhältnisses ist die „unmagnetische Bombe“ auch kein Märchen, wobei besser von einer magnetisch nicht messbaren Bombe zu sprechen ist. Ohne Zweifel ist deshalb davon auszugehen, dass im Bereich von sondierten Flächen, auf denen allein mit dem Magnetometer gemessen wurde und die dann freigegeben wurden, unentdeckte Blindgänger existieren. Bei den Kampfmittelräumdiensten sollte das Thema, das seit mindestens 20 Jahren in seiner Tragweite existiert, nicht unter den Tisch gekehrt werden.

Eine weitere Konsequenz ist, dass durch den Einsatz der modernen Digital-Messtechnik und ein leistungsfähiges Daten-Processing das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant zu verbessern ist (z.B. durch digitale Filter), was neben vielen anderen einschneidenden Vorteilen auch den Vorteil hat, das Problem der „unmagnetischen Bombe“ zu reduzieren. Aber auch die Digitaltechnik kommt an ihre Grenzen. Es gibt das belegte Beispiel, dass eine auf einem Testfeld vergrabene 250 kg-Bombe in 3 m Tiefe selbst mit dem besten Magnetik-Digitalsystem und der ausgeklügeltsten Datenverarbeitung nicht zu sehen ist.

Damit sind die prinzipiellen Nachteile des passiven Magnetik-Ortungsverfahrens aufgezeigt. Man muss sich damit nicht abfinden. Eine zeitgemäße Kampfmittelortung nutzt deshalb vorteilhaft zusätzlich oder alternativ die aktiven Induktionsverfahren der Frequenz- und Impuls-elektromagnetik.

Conclusions

As shown by the arguments presented in this paper, the magnetic properties of unexploded ordnance can be extremely complex. Equally, an approximation using the dipole moment and the model of a homogeneously magnetised sphere delivers acceptable results in only one respect – that of calculating dipole location and depth. The quality of these results is proportional to the distance between the UXO and the magnetometer. In near-field work, discrepancies between the real-world bomb mass and the magnetic dipole become increasingly present, and extreme inhomogeneity can even lead to multipoles with appropriately complex magnetic fields.

The frequently observed practice of modelling a effective magnetisation vector available to an observer is no longer parallel to the axis of the bomb or grenade but instead forms a large angle with the latter. While the computer is able to model this vector, the bomb may be oriented along any one of multiple axes. This scenario in particular raises questions about the frequently extolled advantage of the triple-axis magnetometer, namely its ability to define the orientation of a UXO in the subsoil by making detailed surveys of its component parts. What is absolutely inadmissible is the method still being practiced by many UXO clearance teams, namely that of deriving the size of an object from the amplitude measured for a magnetic field anomaly: this is prohibited by the potential for remanent magnetisation, which is unquantifiable by the use of this method. In the light of the signal-to-noise ratio, the „non-magnetic bomb“ is also fact rather than fiction, although a not measurably magnetic bomb is a more precise term. Considering the question of sites surveyed only with magnetometers and subsequently classified as cleared, we should therefore assume that these areas nonetheless contain undetected unexploded ordnance. This topic, whose ramifications now extend over a period of twenty years or more, should no longer be swept under the carpet by UXO clearance teams.

As one further consequence, modern digital surveying technology and powerful data processing systems can be deployed to significantly improve the signal-to-noise ratio (by applying digital filters, for example). Alongside a host of other decisive benefits, this also has the advantage of reducing the problem of the „non-magnetic bomb“. Digital techniques also have their limits, however. As shown by one documented field trial, a 250 kg bomb buried at a depth of 3 meters remained invisible to even the best digital magnetic system and the most sophisticated data processing software.

This indicates the fundamental disadvantages of passive magnetic surveying techniques. We don't have to accept this state of affairs. Modern UXO surveying methods therefore supplement or even replace these techniques with active systems using time- and frequency-domain electromagnetic induction.

Impressum | Imprint

Herausgeber | Editor

Ebinger Prüf- und Ortungstechnik GmbH
Hansestraße 13 | 51149 Cologne
Phone +49 (0) 2203 977100
Fax +49 (0) 2203 36062
info@ebinger.org | www.ebinger.org

Ebinger Prüf- und Ortungstechnik GmbH
Vulkanstraße 14 | 54578 Wiesbaum
Phone +49 (0) 6593 998940
Fax +49 (0) 6593 9989450
eifel@ebingergmbh.de

Redaktionsleitung | Editorial

Klaus Ebinger | Osia Theofilaktu

Redaktion | Editorial staff

Prof. Dr. Dr. habil. Kord Ernstson

Art direction & Layout

Sara Vaz

Fotos | Photos

Prof. Dr. Dr. habil. Kord Ernstson

Druck | Printing

Viaprinto.de/Münster

Für Druckfehler wird nicht haftet. Änderungen in
Beschreibungen und Abbildungen bleiben ausdrück-
lich vorbehalten. Gedruckt in Deutschland.

Subject to change. Printed in Germany.
EB-NEWS-D-E-2015



