

"Tiefenreichweite" bei der Kampfmittelsuche mit Magnetometern

Von Laien und Fachleuten gleichermaßen wird immer wieder die Frage nach der Tiefenreichweite von Magnetometern bzw. Eisensuchgeräten, wie sie in der Kampfmittelsondierung eingesetzt werden, gestellt.

Prägend für das bis heute verbreitete Verständnis der Tiefenreichweite ist eine Darstellung in älteren Bedienungsanleitungen zu verschiedenen Eisensuchgeräten, die der Abbildung 1 ähnlich ist. In dieser Abbildung ist die Suchtiefe für typische Kampfmittel unterschiedlicher Größe dargestellt. Abbildungen entsprechender Objekte und horizontale Linien zu einer Tiefenskala lassen darauf schließen, dass z.B. eine 8,8-cm-Granate bis etwa 3 m unter Geländeoberkante (GOK), ein 250-kg-Bombenblindgänger bis 4,5 m unter GOK und eine 500-kg-Bombe bis 6 m unter GOK auffindbar sind. Aus diesen Abbildungen heraus hat sich ein allgemeines Verständnis der Tiefenreichweite entwickelt, dass in der Kampfmittelräumung bis heute als "Stand der Technik" angenommen wird.

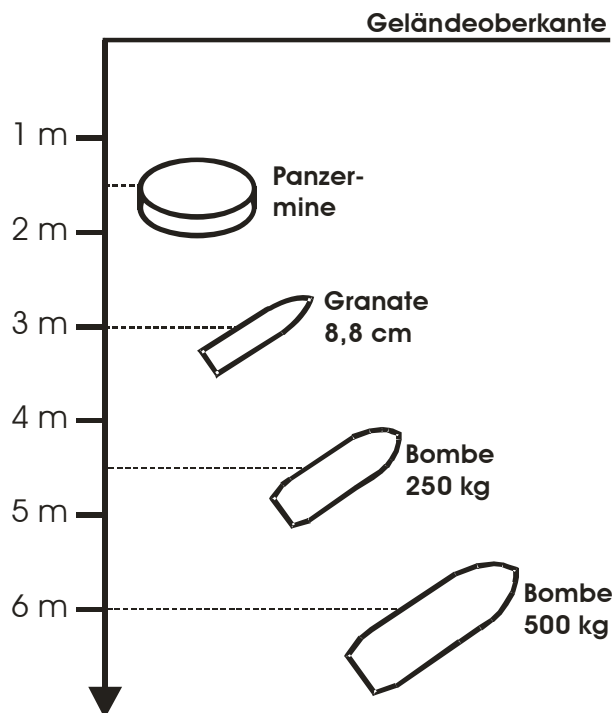


Abbildung 1: Darstellung, wie sie in der Vergangenheit in verschiedenen Bedienungsanleitungen für Eisensuchgeräte zu finden war. Diese Art der Darstellung prägt bis heute das Verständnis der "Tiefenreichweite" von Magnetometern.

Die vorgenannte Darstellung suggeriert eine sehr einfach abzuleitende, allgemeingültige "Tiefenreichweite" von Magnetometern. Tatsächlich ist die Ableitung dieser aber wesentlich komplexer. Grundsätzlich ist es nicht möglich, für Objekte eines bestimmten Typs oder einer Größenklasse eine allgemeingültige Tiefenreichweite anzugeben. Vielmehr muss, wie nachfolgend ausgeführt, von dem Begriff "Tiefenreichweite" im Zusammenhang mit magnetischen Messungen für die Kampfmittelsuche grundsätzlich Abstand genommen werden.

Die "Tiefenreichweite" hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und ist auch für Objekte gleichen Typs sehr unterschiedlich. Zu diesen Faktoren gehören die Magnetisierbarkeit und die tatsächliche Magnetisierung der Objekte, ihre Geometrie und Orientierung im Raum, magnetisches Rauschen am Messort, die Qualität des eingesetzten Magnetometers und die Fähigkeiten des Sondierers im Umgang mit dem verwendeten Messgerät.

Magnetisierung von Objekten

Die Magnetisierung von Objekten ist in Abhängigkeit von ihrer Magnetisierbarkeit, ihrer relativen Lage zum Erdmagnetfeldvektor und ihrer aufgeprägten Eigenmagnetisierung stark unterschiedlich.

Abbildung 2 zeigt für zehn willkürlich aus einer Fundstelle ausgewählte 2-cm-Granaten, dass die messbare Amplitude der durch die Objekte erzeugten Verzerrung des Erdmagnetfeldes stark variiert, obwohl es sich äußerlich um identische Objekte handelt. Im vorliegenden Fall reicht die Amplitude von 15 nT im ungünstigsten Fall bis 600 nT im günstigsten Fall. Ähnliche Unterschiede der Magnetisierung sind für alle Kampfmittel und alle anderen Eisenobjekte zu erwarten. Dies gilt unabhängig von ihrer Größe, d.h. das Beispiel ist auch auf Granaten größerer Kaliber und auf Bombenblindgänger übertragbar.



Abbildung 2a: Zehn Stück 2-cm-Granaten gleichen Typs aus dem II. Weltkrieg.

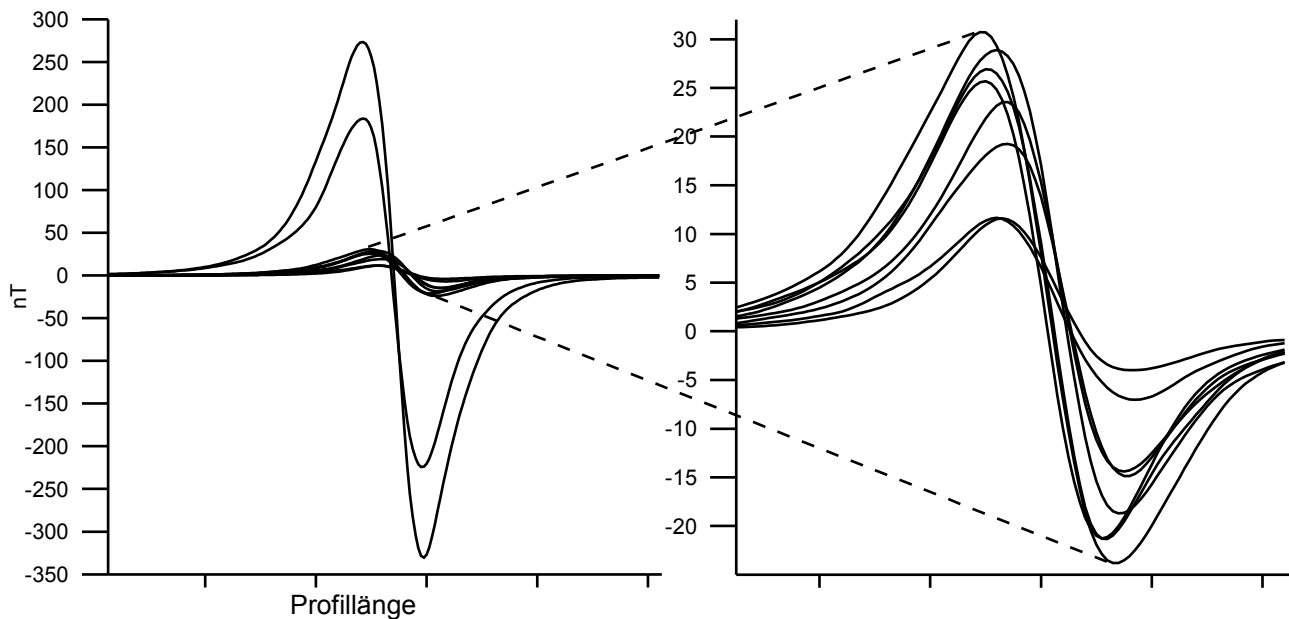


Abbildung 2b: Magnetische Signaturen der zehn Stück 2-cm-Granaten gleichen Typs aus dem II. Weltkrieg. Die magnetische Vermessung zeigt, dass die von den Objekten erzeugten Signaturen bezüglich Amplitude und Wellenlänge völlig unterschiedlich sind.

Aus der Abbildung 1 wird klar, dass die "Tiefenreichweite" bei Messungen mit Magnetometern nicht für alle Objekte eines Typs identisch ist, sondern vielmehr von der tatsächlichen Magnetisierung des individuellen Objektes abhängt.

Abnahme des Magnetfeldes mit der Tiefe

Das Magnetfeld eines Körpers nimmt bei Messungen mit dem Fluxgate-Vertikalgradiometer mit der vierten Potenz der Entfernung ab. Das bedeutet, dass die messbare Anomalie eines ferromagnetischen Körpers im Erdmagnetfeld, die in 0,5 m Entfernung 3.200 nT beträgt, in 1,0 m Entfernung nur noch 200 nT beträgt. Führt man diese Reihe fort, so beträgt die messbare Anomalie in 2,0 m Entfernung nur noch rund 12,5 nT [Breiner 1999, Bubke 2008, Militzer 1981].

Die nachfolgend dargestellte Abbildung 3 zeigt exemplarisch das Beispiel einer 8,8-cm-Granate, die im Testfeld GEOMIL auf dem Firmengelände der Firma SENSYS in Neu Golm eingebracht ist. In einer Entfernung von 0,7 m vom unteren Sensor des Magnetometers weist sie eine positive Amplitude von rund 90 nT auf. In einem Meter Entfernung reduziert sich diese auf rund 20 nT. In rund 1,8 m Entfernung hat sie sich weiter auf 3 nT reduziert.

Als weiteres Beispiel ist in Abbildung 4 eine 250-kg-Bombe dargestellt, die ebenfalls im Testfeld GEOMIL eingebracht ist. In einer Entfernung von 0,5 m vom unteren Sensor des Magnetometers weist sie eine positive Amplitude von rund 10.000 nT auf. In einem Meter Entfernung reduziert sich diese auf rund 1.100 nT. In drei Metern Entfernung beträgt sie nur noch etwa 40 nT, und in 6,8 m Entfernung hat sie sich auf 3 nT reduziert.

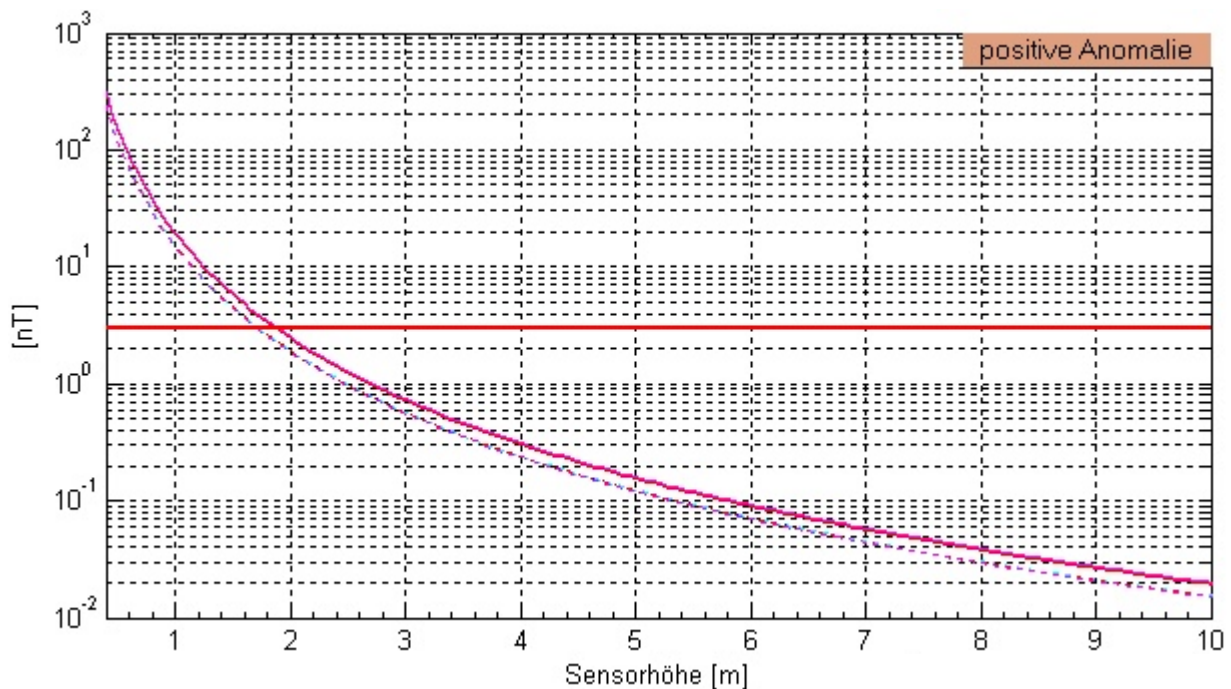


Abbildung 3: Abnahme der positiven Anomalie einer 8,8-cm-Panzergranate, die im Testfeld GEOMIL als Testobjekt eingebracht wurde. Die Grafik zeigt, dass die Amplitude mit zunehmender Tiefe mit der vierten Potenz der Entfernung abnimmt. Geht man davon aus, dass an der Oberfläche mindestens 3 nT messbar sein müssen (s.u.), um das Objekt bei der Flächensondierung mit Magnetometern (Vertikalgradiometern) zu finden, kann das konkrete Objekt bis in eine Tiefe von circa 1,8 m detektiert werden. Liegt das Objekt tiefer als 1,8 m, so ist eine Detektion für dieses Objekt im Regelfall nicht mehr möglich [GEOMIL 2004].

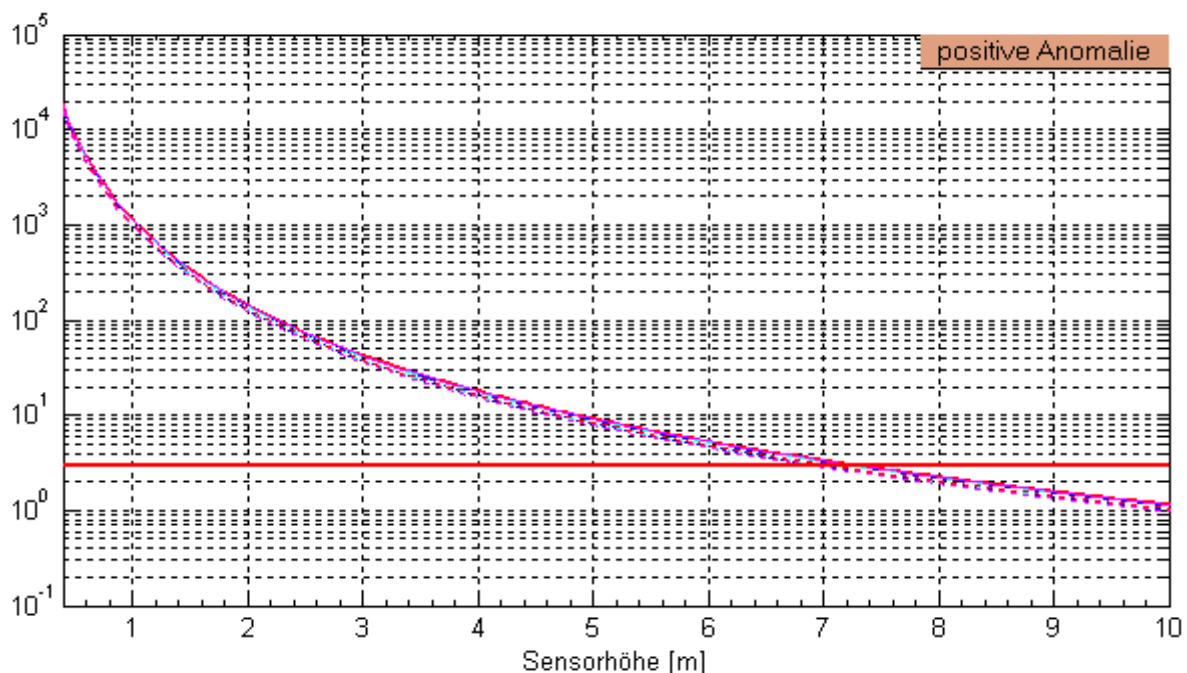


Abbildung 4: Abnahme der positive Anomalie einer 250-kg-Bombe GP500, die im Testfeld GEOMIL in Neu Golm eingebracht ist.

Einfluss des Rauschens auf die Detektierbarkeit

In jedem Messumfeld sind neben den Signaturen, welche die gesuchten Objekte (Kampfmittel, Teile von Kampfmitteln und Eisenschrott) erzeugen, weitere mehr oder weniger regelhafte Messwertschwankungen festzustellen. Sofern diese hinsichtlich Amplitude und Wellenlänge nicht selbst als Objekte angesprochen werden, sondern geringere Amplituden und kleine Wellenlängen aufweisen, sind sie in der Regel als sogenanntes "Rauschen" anzusprechen.

Das Rauschen, das bei jeder geophysikalischen Untersuchung mehr oder weniger stark auftritt, limitiert die Detektierbarkeit von Objekten. Der Begriff Rauschen bezeichnet allgemein Störgrößen unterschiedlicher Art und unterschiedlichen Ursprungs, die das Nutzsignal überlagern und beeinträchtigen. Rauschen hat unterschiedliche Ursachen, zu denen instrumentelles ("elektronisches") Rauschen der Messelektronik oder der Sensoren, Umgebungsrauschen durch zeitlich bzw. örtlich variierende Messwerte aus dem Umfeld der Messfläche oder Bewegungsrauschen durch die Bewegung eines Messsystems bei der Messung gehören können.

Abbildung 5 veranschaulicht anhand der Spurdarstellung einer magnetischen Flächensondierung den Effekt, den das Rauschen auf die Identifizierbarkeit einer Signatur haben kann. Dargestellt sind zwei unterschiedlich aufgenommene Spuren aus dem Testfeld GEOMIL auf dem Gelände der Fa. SENSYS in Neu Golm. In der blau dargestellten Messung ist das Rauschen minimal, in der rot dargestellten Messung ist das Rauschen mit circa 20 nT sehr stark und verformt die tatsächlichen Messwerte. Die Erkennbarkeit und Identifizierbarkeit von Signaturen ferromagnetischer Objekte nimmt also mit dem Rauschen ab.

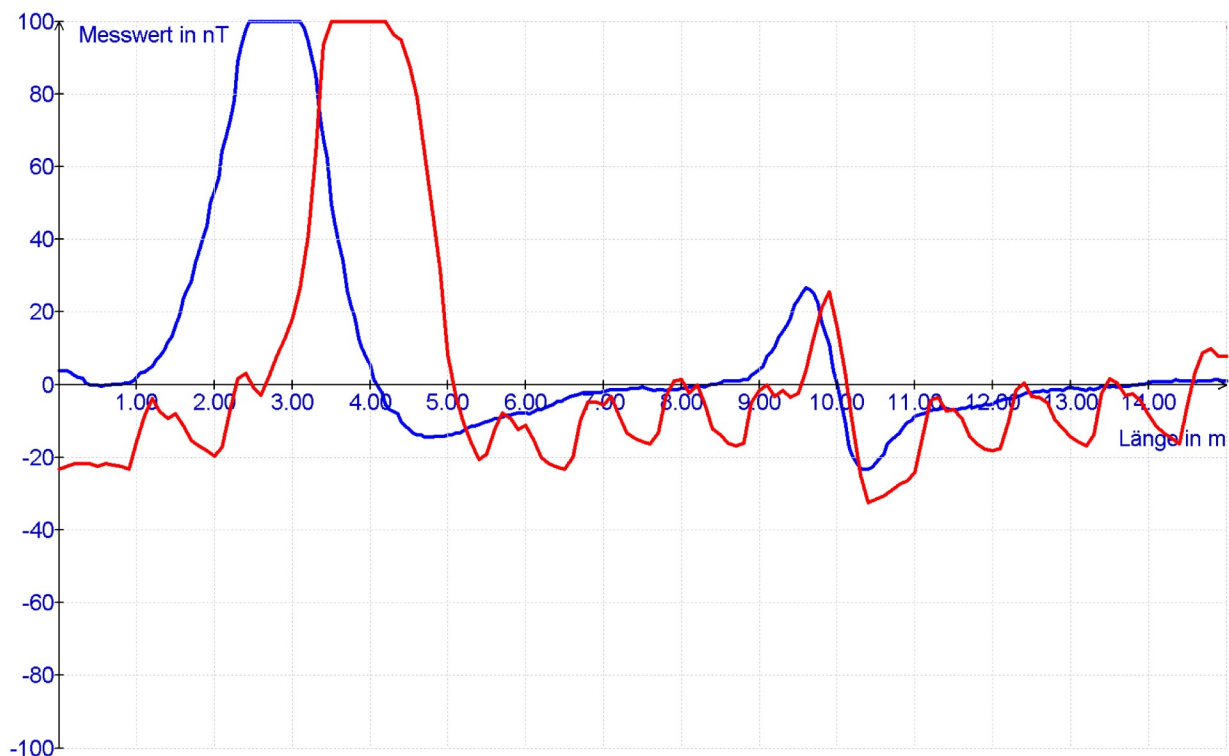


Abbildung 5: Messung entlang eines Profils auf dem Testfeld GEOMIL mit und ohne Rauschen. Die große positive Amplitude wird durch eine 250-kg-Bombe in 1,5 m unter Geländeoberkante erzeugt.

Die Qualität einer Messung wird meist durch das Signal-Rausch-Verhältnis (allgemein abgekürzt als SRV) beschrieben. Das SRV ist als Verhältnis der Stärke eines echten Signals zur Stärke von Rauschanteilen (stochastischen Störungen) definiert. Es berechnet sich als Quotient aus Nutzsignal geteilt durch das Rauschsignal. Ist das Nutzsignal "10" und das Rauschen "1", so ist das Signal-Rausch-Verhältnis $10/1 = 10$. Um ein Nutzsignal eindeutig vom Rauschen unterscheiden zu können, muss das Nutzsignal wesentlich größer sein als das Rauschen in einer Messung.

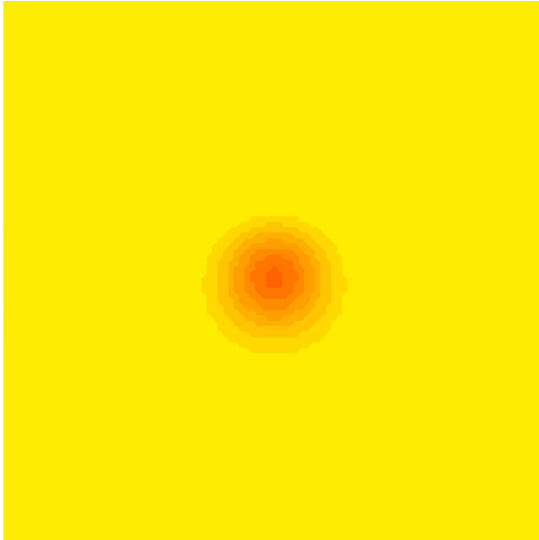
Rauschen kann sehr unterschiedliche Ursachen haben, zum Beispiel

- anthropogenes Umgebungsrauschen – durch elektrischen Strom oder bewegte magnetische Objekte (z.B. Fahrzeuge) erzeugt, zeitlich und örtlich variable Magnetfelder
- geogenes Hintergrundrauschen – durch ferromagnetische Gesteine und Sedimente hervorgerufene, örtlich variable Magnetfelder, die sich mit den magnetischen Signaturen der Zielobjekte überlagern
- Bewegungsrauschen – durch die Bewegung der Magnetometer, z.B. die Änderung der Entfernung zwischen Boden und Magnetometer oder durch das Verkippen von Fluxgate-Vertikalgradiometern erzeugte Pseudo-Signaturen
- instrumentelles Rauschen – Rauschen, das auf die Elektronik des Gerätes zurückzuführen ist
- Messfehler – z.B. ferromagnetische Ösen an Schuhen, Stahlkappen, nicht abgelegte Mobiltelefone, welche die Messelektronik stören, schaukelnde Sondenstäbe, etc.

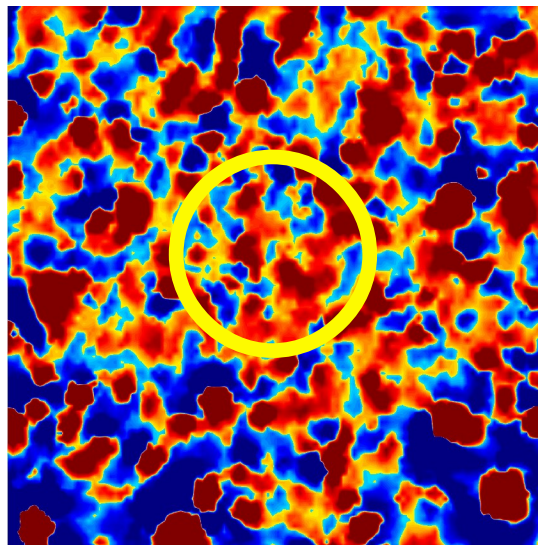
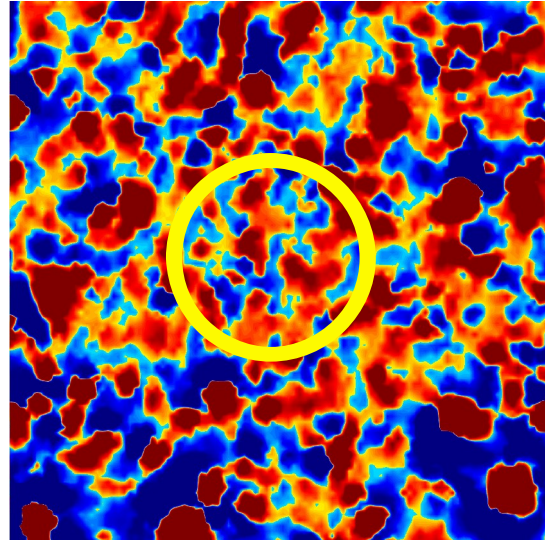
Das Rauschen in einem Messumfeld bei der Suche nach ferromagnetischen Objekten oder der magnetischen Kartierung führt zu einer Reduzierung der tatsächlich erzielbaren Detektionstiefen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch das Rauschen die Signaturen der gesuchten Objekte teilweise oder ganz überdeckt werden.

In Abbildung 6 ist ein Beispiel zur Kombination von Objektsignatur und Rauschen in einer Flächensondierung dargestellt. Links oben ist die Simulation eines kugelförmigen Objektes mit einem Durchmesser von 0,25 m dargestellt, das 2,5 m unter der Geländeoberkante liegt. Das Objekt ist rein induziert magnetisiert, d.h. es besitzt keinen Eigenmagnetismus (keine permanente Magnetisierung). Mit seiner Größe entspricht das simulierte Objekt etwa einer rein induzierten 155-mm-Granate, die in einer Tiefe von 2,5 m unter Geländeoberkante liegt. Effektiv resultiert dieses Objekt an der Oberfläche in einer fast kreisrunden, rein positiven Signatur mit einer maximalen Amplitude von 2,1 nT und einem maximalen Durchmesser von etwa drei Metern. Eine negative Anomalie ist aufgrund der Tiefenlage des Objektes und der rein induzierten Magnetisierung an der Oberfläche nicht mehr messbar. Rechts oben in Abbildung 6 ist das Ergebnis einer magnetischen Flächensondierung auf einer stark mit kleineren Störkörpern belasteten Fläche mit einer Skalierung von ± 8 nT dargestellt. Die starke Belastung mit kleineren Störkörpern kann in diesem Fall als Rauschen angesehen werden. Die Amplitude dieses Rauschens liegt etwa im Bereich von ± 10 nT. Unten in Abbildung 6 ist die Kombination der Simulation mit der verrauschten Flächensondierung dargestellt. Ein gelber Kreis zeigt die Lage des simulierten Objektes in der kombinierten Farbkarte. Außer einer leichten Verschiebung der Messwerte in Richtung des positiven Bereiches ist keine wesentliche Veränderung festzustellen. Das Objekt in 2,5 m Tiefe wäre in diesem Fall nicht detektierbar.

Signatur Objekt 0,25 m Durchmesser
2,5 m unter Magnetometer (± 8 nT)



Ergebnis der Flächensondierung auf
einer gestörten Fläche (± 8 nT)



Ergebnis der Kombination von
Sondierung und Simulation (± 8 nT)

Abbildung 6: Kombination der Simulation des induzierten Magnetfeldes eines kugelförmigen Objektes mit 0,25 m Durchmesser in einer Tiefe von 2,5 m unter Geländeoberkante mit dem Ergebnis der magnetischen Flächensondierung auf einer gestörten Fläche. Alle Abbildungen sind auf ± 8 nT skaliert, die Fläche beträgt jeweils $20\text{ m} \times 20\text{ m}$. Die Überlagerung des simulierten Objektes über die Farbkarte der Sondierung resultiert lediglich in einer leichten Verschiebung der Messwerte. Das Objekt, das etwa einer rein induziert magnetisierten 155-mm-Granate in dieser Tiefe entsprechen würde, wäre in diesem Fall nicht detektierbar, weder in einer Farbkarte noch bei einer manuellen Suche.

Das Beispiel aus Abbildung 6 zeigt, dass das Signal-Rausch-Verhältnis so groß wie möglich sein

muss, um ein Objekt detektieren zu können. Das bedeutet, dass das Rauschen deutlich kleiner sein muss, als der maximale Messwert des zu detektierenden Objektes. Das Rauschen sollte höchstens ein Drittel der maximalen Messwerte des zu detektierenden Objektes betragen, möglichst noch weniger. Das entspricht einem Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) von 3:1 (s.o.). Übertragen auf das Beispiel aus Abbildung 6 bedeutet dies, dass das Objekt eine positive Amplitude von 30 nT hätte ergeben müssen, um das Rauschen im Bereich von 10 nT so deutlich zu überprägen, dass es eindeutig detektierbar ist. Für das im Beispiel verwendete Objekt wäre das bei einer Tiefe von etwa 1,2 m unter Geländeoberkante der Fall. Das bedeutet, dass im vorliegenden Fall aufgrund des hohen Rauschanteils in der Messung das induziert magnetisierte Objekt mit einem Durchmesser von 0,25 m nur bis in eine Tiefe von 1,2 m unter Geländeoberkante detektierbar gewesen wäre.

Schlussfolgerungen

Aufgrund der oben gemachten Ausführungen lassen sich folgende Aussagen zur Detektionsreichweite bei der Sondierung nach Kampfmitteln mit Hilfe von Magnetometern treffen:

- Es gibt keine einheitlichen Detektionsreichweiten für Kampfmittel einer bestimmten Größe oder eines bestimmten Typs bei magnetischen Flächensondierungen.
- Die Magnetisierung von Kampfmitteln, auch solchen gleichen Typs und gleicher Größe unterliegt großen Schwankungen.
- Stark magnetisierte Kampfmittel können in wesentlich größeren Tiefen gefunden werden, als schwach magnetisierte Kampfmittel gleichen Typs.
- Die messbare Amplitude von magnetischen Störkörpern nimmt bei der Sondierung mit Fluxgate-Vertikalgradiometern mit der vierten Potenz der Entfernung ab.
- Die Auswahl der Suchstufe hat entscheidenden Einfluss auf die Entfernung, in der Objekte noch detektiert werden können. Je empfindlicher die gewählte Suchstufe, desto höher die "Reichweite".
- Auf allen Messflächen ist mit einem mehr oder weniger starken Rauschen zu rechnen, das die Detektierbarkeit von Objekten beeinträchtigt.
- Die Technologie für die Suche und die Bergung muss den qualitativen Anforderungen an die Beräumung angepasst werden. Gegebenenfalls ist zunächst die Oberfläche zu beräumen, um anschließend Objekte in größerer Tiefe detektieren zu können.
- Eine Kampfmittelfreigabe mit dem Zusatz "bis 6 Meter unter Geländeoberkante" nach einer einfachen Flächensondierung ist grundsätzlich nicht möglich. Hier sind Einschränkungen erforderlich.
- Skalare Totalfeldmagnetometer (Cäsiumdampf-Magnetometer, Protonenmagnetometer, Kalium-Magnetometer) haben gegenüber den traditionell in der Kampfmittelsondierung verwendeten vektoriellen Magnetometern (Fluxgate-Vertikalgradiometer) keinen Vorteil. Ihre höhere Empfindlichkeit führt nicht zu einer größeren "Tiefenreichweite" bei Flächensondierungen.

Literaturangaben

- Breiner 1999 Breiner, Sheldon. 1999. Applications Manual for Portable Magnetometers. Herausgegeben von Inc. Geometrics. San Jose, CA, USA. Online verfügbar unter www.geometrics.com.
- Bubke 2008 Bubke, Otto. 2008. Grundlagen für die Detektion von Kampfmitteln. ISBN 978-3-940445-31-5.
- Dietsch 2007 Dietsch, Frank; Ernstson, Kord; Ebinger, Klaus. 2007. "Hochempfindliche" Magnetometer in der Kampfmittelbeseitigung: Was ist notwendig und sinnvoll. In: Mitteilungen des Bundes Deutscher Feuerwerker und Wehrtechniker (BDFWT), H. 02, S. 22–23.
- GEOMIL 2004 Pilz, Heiko; Kolarov Dimitar; Winkelmann, Kay; Spyra, Wolfgang; Fischer, Andreas. 2004. Unterlagen zur Dokumentation des Testfeldes GEOMIL. Interne Dokumentation.
- Militzer 1981 Militzer, Heinz; Scheibe, Reiner. 1981. Grundlagen der angewandten Geomagnetik. 1. Aufl. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (Freiberger Forschungshefte, C352).
- Ripka 2007 Ripka, Pavel; Lewis, Adam M.; Kaspar, P.; Vcelak, Jan. 2007. DC gradiometers for bomb detection: scalar versus vectorial. In: Sensor Letters, Jg. 5, H. 1, S. 271–275.
- Winkelmann 2009a Winkelmann, Kay; Fischer, Andreas. 2009. Bewertung von ferromagnetischen Objekten anhand des magnetischen Momentes. Publikation für Kunden der Firma SENSYS GmbH.
- Winkelmann 2009b Winkelmann, Kay; Fischer, Andreas. 2009. Bewertung von ferromagnetischen Objekten anhand des magnetischen Momentes. Publikation für Kunden der Firma SENSYS GmbH.
- Winkelmann 2009c Winkelmann, Kay. 2009. Magnetic Area Surveys for UXO Detection – Scalar or Vectorial Magnetometers. Publikation für Kunden der Firma SENSYS GmbH

Haftungsausschluss

Alle in diesem Dokument enthaltenen Angaben wurden nach bestem Wissen und Gewissen recherchiert, berechnet und zusammengestellt. Trotzdem kann für die Richtigkeit der Angaben keine Gewähr übernommen werden.