

Bewertung von ferromagnetischen Objekten anhand des magnetischen Momentes

Einleitung

Bei der Nutzung von magnetischen Verfahren für die Sondierung nach Kampfmitteln stellt sich regelmäßig die Frage nach der Bewertung von detektierten Anomalien bzw. deren Signaturen. Die Signatur einer detektierten Anomalie lässt sich aus den gewonnenen Messdaten, die in der Regel in Form von Spuren (auf der Oberfläche oder in Bohrlöchern) erfasst werden, bezüglich der Amplitude in Nanotesla [nT] und der Wellenlänge in Metern [m] beschreiben.

Die gängigen Software-Produkte bieten zusätzlich eine Objektberechnung an, bei der unterschiedliche Parameter ausgegeben werden, die das Objekt beschreiben. Zu diesen Parametern gehören neben den Objektkoordinaten (Hochwert, Rechtswert, Tiefe unter Sensor oder Geländeoberkante) insbesondere

- magnetisches Moment m in Ampere \times Quadratmeter [Am²]
- Objektdurchmesser in Metern [m]
- Objektvolumen in Litern [l] oder Kubikmetern [m³]
- Objektmasse in Kilogramm [kg]

Aus der Praxis ist dem Anwender von Programmen zur Objektberechnung hinreichend bekannt, dass insbesondere die Parameter Objektdurchmesser, Objektvolumen und Objektmasse häufig mit erheblichen Fehlern behaftet sind. Diese Parameter werden auf Grundlage unterschiedlicher Abschätzungs- und Berechnungsverfahren direkt oder indirekt aus dem magnetischen Moment der berechneten Objekte abgeleitet.

In dem vorliegenden Papier soll daher eine Orientierung zur Bewertung von detektierten Anomalien bzw. Signaturen anhand des **magnetischen Momentes** gegeben werden, welches mit Hilfe von *MAGNETO® 2.04* und *MAGNETO®-BM 2.01* aus den Signaturen im Bohrloch detektierter Objekte berechnet werden kann.

Bei Verwendung des magnetischen Momentes für die Bewertung von Anomalien werden alle magnetischen Messverfahren vergleichbar, weil sich das magnetische Moment eindeutig aus den Messdaten ableiten lässt und mit nur geringen Fehlern behaftet ist.

Die Magnetisierung von Objekten

Es ist allgemein bekannt, dass die Magnetisierung von Objekten gleichen Typs in der Praxis häufig sehr unterschiedlich ist.

Die unterschiedliche Magnetisierung von Objekten ist im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurückzuführen, namentlich die Magnetisierbarkeit (magnetische Permeabilität) des verwendeten Materials und die tatsächliche permanente Magnetisierung, welche das Objekt erfahren hat.

Die magnetische Permeabilität eines Materials wird durch die dimensionslose Größe μ_r (Permeabilitätszahl) beschrieben. Sie reicht theoretisch von 1,0 bis maximal etwa 300.000, wobei der Wert von 1,0 für "nicht magnetisierbar" steht und die Magnetisierbarkeit des Materials mit steigenden Werten von μ_r zunimmt. Vereinfacht steht die magnetische Permeabilität für die magnetische Leitfähigkeit eines Stoffes. Je höher die Permeabilität eines Stoffes ist, desto besser "leitet" er das Magnetfeld und desto stärker konzentriert sich ein äußeres Magnetfeld in diesem Stoff. Die Permeabilität kann für unterschiedliche Eisen- und Stahlsorten folgende Werte annehmen:

Material	Typischer Bereich der relativen magnetischen Permeabilität (μ_r)
Austenitischer Stahl (amagnetischer Stahl)	1,005 .. 1,05
Gusseisen (hoher Kohlenstoffanteil)	70 .. 600
Stahl (geringer Kohlenstoffanteil)	40 .. 7.000
Fe-Si-Legierung (korrosionsbeständiger Stahl)	10.000 .. 20.000

Die Werte für μ_r in der Tabelle zeigen, dass die Magnetisierbarkeit eines Werkstoffes bereits eines wesentlichen Einfluss auf die Magnetisierung von Objekten haben kann. Dies ist z. B. dann von Bedeutung, wenn verschiedene Chargen eines Munitionskörpers aus Stahl mit unterschiedlichem Kohlenstoffanteil hergestellt wurden. Dabei werden Munitionskörper, die aus einem kohlenstoffarmen Stahl gefertigt wurden, eine höhere Magnetisierbarkeit aufweisen als solche, die aus einem kohlenstoffreicheren Stahl hergestellt wurden.

Auch bei gleicher Permeabilität des Werkstoffes kann die Magnetisierung von Objekten unterschiedlich sein. Dies hängt mit dem unterschiedlich stark ausgeprägtem Eigenmagnetismus von Objekten gleichen Typs zusammen.

Die mit Magnetometern messbare Magnetisierung setzt sich aus zwei Magnetisierungsanteilen zusammen, (1.) dem induzierten Magnetisierungsanteil und (2.) dem permanenten Magnetisierungsanteil. Der induzierte Magnetisierungsanteil hängt ab von der Permeabilität des Stoffes und der Stärke des äußeren Magnetfeldes, d.h. des Erdmagnetfeldes. Würde man das Erdmagnetfeld "abschalten", so würde dieser Magnetisierungsanteil vollständig verschwinden. Der permanente Magnetisierungsanteil ist der Anteil der Magnetisierung eines Objektes, der vom äußeren Magnetfeld unabhängig ist. Er kann für äußerlich identische Objekte unterschiedlich sein, ist unter normalen Umweltbedingungen als weitgehend stabil anzusehen. Die beiden Magnetisierungsanteile, induzierte und permanente Magnetisierung addieren sich vektoriell und können so in gänzlich unterschiedlichen Magnetisierungen von Objekten resultieren.

Das magnetische Moment

Das magnetische Moment, auch als Ampere'sches magnetisches Moment bezeichnet, ist eine physikalische Größe, welche die Stärke eines Magneten bzw. eines ferromagnetischen Objektes beschreibt. Seine Einheit ist Ampere \times Quadratmeter [Am²].

Die Beschreibung der Stärke von Magneten mit Hilfe des magnetischen Momentes beruht auf der Analogie von Magneten (bzw. ferromagnetischen Objekten) zu stromdurchflossenen Spulen.

Mit einer Spule mit n Windungen, die eine Fläche A umschließen, kann in Abhängigkeit von dem Strom, der durch die Spule fließt, das magnetische Feld eines Magneten nachgebildet werden:

$$m = n \times I \times A [Am^2]$$

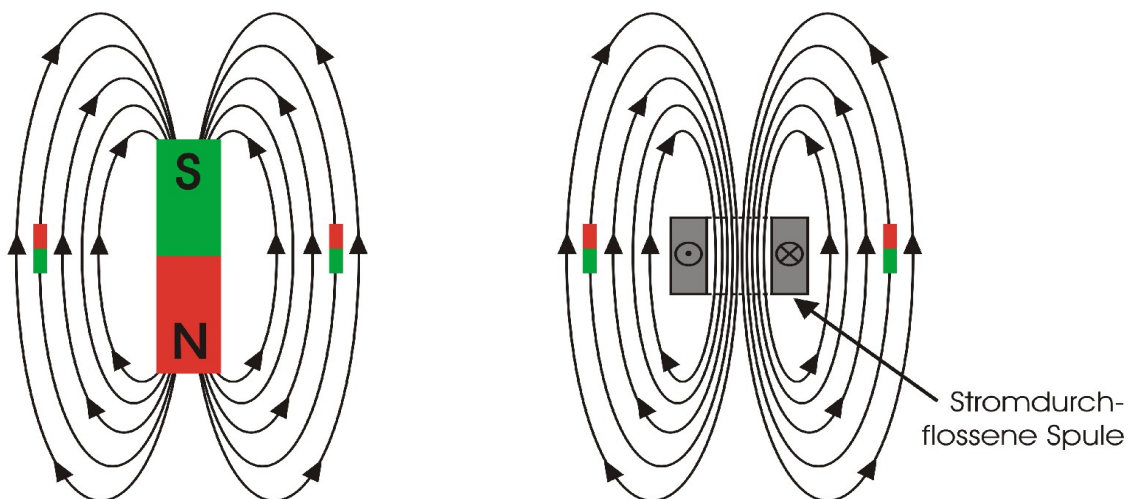


Abbildung 1: Analogie von Stabmagneten (links) und stromdurchflossenen Spulen (rechts).

Literaturangaben zu magnetischen Momenten

Der einschlägigen, internationalen Fachliteratur können zahlreiche Angaben zu magnetischen Momenten von typischen Kampfmitteln, die mit ferromagnetischen Verfahren gesucht werden, entnommen werden. Eine Auswahl ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

Objekt	Magnetisches Moment	Bemerkung
Granate 60 mm	0,01 .. 0,2 Am ²	Quelle: Billings 2002.
Granate 76 mm	0,03 .. 0,4 Am ²	Quelle: Billings 2002.
Granate 81 mm	0,05 .. 0,5 Am ²	Quelle: Billings 2002.
Werfergranate 81 mm	0,45 Am ²	Quelle: Sanchez 2006.
Granate 105 mm	1 Am ²	Erwartete Größe des magnetischen Moments für diese Objektgröße. Quelle: Clem 2004.
Granate 122 mm	0,49 .. 0,82 Am ²	Mit unterschiedlichen Methoden aus unterschiedlichen Messdaten für eine 122-mm-Sprenggranate berechnetes magnetisches Moment. Quelle: SENSYS 2009 (eigene Berechnungen).
Granate 155 mm	> 0,7 .. ca. 4,0 Am ²	Quelle: Billings 2002.
Bombe 50 kg	2 .. 4 Am ²	Achtung: nur induzierter Anteil der Magnetisierung betrachtet! Tatsächliches Moment meist höher, weil sich induzierter und permanenter Magnetisierungsanteil vektoriell addieren! Quelle: Zhang 2006.
Bombe 100 lbs.	2,5 Am ²	Quelle: Salem 2005.
Bombe 100 lbs.	6,5 Am ²	Quelle: Gerovska 2004.
Bombe 250 lbs.	19,7 Am ²	Simulationskörper für 250-lbs-Bombe. Quelle: Gerovska 2004.
Bombe 250 lbs.	13,7 Am ²	Simulationskörper für 250-lbs-Bombe. Quelle: Gerovska 2004.
Bombe 250 kg	7 .. 12 Am ²	Achtung: nur induzierter Anteil der Magnetisierung betrachtet! Tatsächliches Moment meist höher, weil sich induzierter und permanenter Magnetisierungsanteil vektoriell addieren! Quelle: Zhang 2006.
Bombe 500 lbs.	30 Am ²	Quelle: Weinstock 1996.
Bombe 500 kg	15 .. 20 Am ²	Achtung: nur induzierter Anteil der Magnetisierung betrachtet! Tatsächliches Moment meist höher, weil sich induzierter und permanenter Magnetisierungsanteil vektoriell addieren! Quelle: Zhang 2006.
Bombe 1000 kg	30 .. 50 Am ²	Achtung: nur induzierter Anteil der Magnetisierung betrachtet! Tatsächliches Moment meist höher, weil sich induzierter und permanenter Magnetisierungsanteil vektoriell addieren! Quelle: Zhang 2006.
Bombe 2000 lbs.	100 Am ²	Erwartete Größe des magnetischen Moments für diese Objektgröße. Quelle: Clem 2004.
UXO allgemein	3 .. 30 Am ²	Erwartete Größe für UXO auf einem ehemaligen Truppenübungsplatz. Es ist davon auszugehen, dass kleinkalibrige Munition und große Bombenblindgänger nicht berücksichtigt sind. Quelle: Clem 2004.

Die Tabelle gibt einen Überblick über die Größenordnungen von magnetischen Momenten von Kampfmitteln, die mit ferromagnetischen Verfahren gesucht werden. Es ist zu beachten, dass die magnetischen Momente von Kampfmitteln insbesondere aufgrund stark unterschiedlicher permanenter Magnetisierungsanteile erheblich variieren können.

Berechnung des magnetischen Momentes

Hinter der Berechnung des magnetischen Momentes aus Bohrlochdaten in der *MAGNETO® 2.04* bzw. *MAGNETO®-BM 2.01* nach dem Tripelverfahren steht eine komplexe Mathematik, deren Erläuterung in diesem Zusammenhang zu weit führen würde. Allerdings sollte beachtet werden, dass die Genauigkeit der Bestimmung des magnetischen Momentes stark von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Lagegenauigkeit der Bohrlöcher zueinander
- Abweichung der Bohrlöcher aus der Vertikalen
- Kalibrierung des verwendeten Magnetometers
- Qualität der Messdaten (insbesondere Punktabstand und Ortszuordnung)
- Berücksichtigung des Basisabstandes des Magnetometers

Grundsätzlich ist daher darauf zu achten, dass

- die Lage der Bohrlöcher zueinander realitätsgetreu im Bohrlochdatensatz in der Software wiedergegeben wird (präzise Einmessung der Bohrlöcher),
- die Abweichung der Bohrlöcher aus der Vertikalen möglichst gering ist (durch Verwendung eines geeigneten Bohrverfahrens),
- das verwendete Magnetometer kalibriert ist,
- eine möglichst hohe Messpunktdichte vorliegt (Messpunktabstand 0,05 m oder kleiner),
- eine möglichst gute Zuordnung der Messwerte entlang der Z-Achse erfolgt (Verwendung von *MAGNETO®-BM DISTLOG*), und
- der Basisabstand des verwendeten Magnetometers bei der Objektberechnung berücksichtigt wird.

Zusammen mit den Berechnungsergebnissen (Lage X, Y, Z und magnetisches Moment) wird von *MAGNETO® 2.04* bzw. *MAGNETO®-BM 2.01* ein Qualitätsfaktor Q ausgegeben, der eine Abschätzung der Güte der Berechnung ermöglicht. Q kann theoretisch von 0,00 bis 1,00 reichen, wobei höhere Werte eine höhere Güte der Objektberechnung bedeuten. Geringere Werte weisen auf Fehler in den Datensätzen hin, zumeist weil einer der oben genannten Faktoren nicht berücksichtigt wurde. In der Praxis sollte der Qualitätsfaktor für eine Objektberechnung immer größer 0,6 sein. Andernfalls ist davon auszugehen, dass Fehler im Datensatz vorliegen oder das Objekt zu klein ist, um es aus mehreren Bohrlöchern gemeinsam zu berechnen.

Grundsätzlich sollte ein Objekt mehrfach aus unterschiedlichen Bohrlochtripeln berechnet werden, um sowohl das magnetische Moment des Objektes als auch seine Lage zu verifizieren. Aufgrund ihrer Größe und ihrer typischen Magnetisierung sollten die meisten Bombenblindgänger und ähnlich große Objekte in mehr als einem Bohrlochtripel erkennbar sein, so dass eine voneinander unabhängige, mehrfache Berechnung eines Objektes problemlos möglich sein sollte. Gegebenenfalls sollten Zusatzbohrungen niedergebracht werden, um ein Objekt mehrfach zu berechnen.

Beobachtete magnetische Momente von geborgenen Bombenblindgängern

Für eine Auswahl von Datensätzen wurde das magnetische Moment von später geborgenen Bombenblindgängern mit *MAGNETO® 2.04* bzw. *MAGNETO®-BM 2.01* berechnet. Die entsprechenden Daten sind in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben:

Quelle	Bombentyp	Klasse	Magnetisches Moment [Am ²]	Tiefe uGOK [m]	Berechnungsqualität Q [-]	Bemerkungen
Fa. SENSYS	SC 70	50 kg	4	2,4	0,98	
KMBD BBG	500 lbs.	250 kg	16	3,0	0,86	
KMBD BBG	500 lbs.	250 kg	22	4,0	0,83	
Fa. GFKB	GP500	250 kg	23	3,9	0,66	
Fa. SENSYS	GP500	250 kg	24	2,8	0,61	Zerscheller
Fa. GFKB	GP500	250 kg	27	5,5	0,84	
KMBD BBG	500 lbs.	250 kg	30	4,6	0,74	
KMBD BBG	500 lbs.	250 kg	31	4,6	0,78	
Fa. GFKB	SAP500	250 kg	34	3,3	0,79	
Fa. SENSYS	GP500	250 kg	37	4,7	0,74	
KMBD BBG	500 lbs.	250 kg	45	3,2	0,69	
Fa. GFKB	1000 lbs.	500 kg	22	7,0	0,81	
Fa. SENSYS	GP1000	500 kg	46	2,8	0,71	
Fa. GFKB	1000 lbs.	500 kg	129	3,8	0,72	

Wie oben ausgeführt ist zu beachten, dass die Berechnung des magnetischen Momentes aus Signaturen, die bei der Bohrlochsondierung aufgenommen wurden, mit Unsicherheiten behaftet ist. Diese sind insbesondere auf die häufig ungenaue Ortsreferenzierung der Bohrlöcher, die unzureichende Ortsreferenzierung der Messdaten in den Spuren sowie die teilweise unterschiedliche Grundkalibrierung der verwendeten Magnetometer zurückzuführen. Daher handelt es sich bei der Berechnung von magnetischen Momenten aus Bohrloch- und Flächendatensätzen in der Regel eher um eine Abschätzung als um eine präzise Berechnung des magnetischen Momentes. Dennoch ist davon auszugehen, dass diese Abschätzung für die Bewertung hinreichend genau ist.

Grundsätzlich sollte eine Objektberechnung mehrfach unabhängig voneinander erfolgen, d.h. das selbe Objekt sollte mehrmals aus den Daten unterschiedlicher Bohrlöcher berechnet werden.

Das magnetische Moment im Vergleich zu Volumen- und Massenangaben

Das Volumen und die Masse von Störkörpern, die von diversen Softwareprodukten einschließlich *MAGNETO® 2.04* und *MAGNETO®-BM 2.01* ausgegeben werden, beruhen auf zahlreichen Annahmen, weshalb sie in den meisten Fällen stark fehlerbehaftet sind.

So werden für die Berechnung des Volumens Annahmen hinsichtlich der Geometrie des Körpers, seiner Mindestwandstärke und seiner magnetischen Permeabilität getroffen. Weil diese für die Berechnung immer konstant gehalten werden (müssen), in der Realität aber mehr oder weniger große Abweichungen von diesen Annahmen auftreten, ist das berechnete Volumen häufig ungenau.

Für die Berechnung der Masse eines Objektes müssen über die vorgenannten Annahmen hinaus weiterhin Annahmen über die Dichte bzw. die Füllung eines Objektes getroffen werden. Weil eine Unterscheidung von Voll- und Hohlkörpern nicht möglich ist und die Wandstärken von Kampfmitteln je nach Verwendungszweck (z. B. Splitter-, Spreng- oder Übungsbomben) sehr unterschiedlich sind, ist eine Massenangabe immer stärker fehlerbehaftet als die Angabe eines Volumens.

In jedem Fall aber ist die Angabe eines magnetischen Momentes weniger fehlerbehaftet als die Angabe eines mit Hilfe von weiteren Annahmen daraus abgeleiteten Volumens oder einer Masse.

Schlussfolgerungen

Die Bewertung von Objekten anhand des berechneten magnetischen Momentes ist zuverlässiger als die Bewertung anhand von Größen wie Volumen und Masse, die auf weiteren Annahmen beruhen.

Für Bombenblindgänger sind in etwa die folgenden magnetischen Momente zu erwarten:

Größenordnung	Erwartetes magnetisches Moment
50 kg	2 .. 8 Am ²
125 kg	6 .. 20 Am ²
250 kg	15 .. 80 Am ²
500 kg	20 .. 130 Am ²
1.000 kg	30 .. 200 Am ²

Die Tabelle gibt einen Überblick über zu erwartende magnetische Momente für Bomben unterschiedlicher Größenordnungen. Aufgrund der Überschneidung der magnetischen Momente für die unterschiedlichen Größenordnungen ist eine Unterscheidung von Bomben unterschiedlicher Größe nicht möglich, lediglich eine Einordnung in einen Bereich. Um hier eine größere Sicherheit zu erreichen, sollte zukünftig eine statistische Erfassung von magnetischen Momenten geborgener Bombenblindgänger erfolgen.

Das magnetische Moment erlaubt keine Unterscheidung von Bombenblindgängern und anderen ferromagnetischen Objekten. Grundsätzlich müssen alle Objekte, deren magnetisches Moment nach der Berechnung in den für Bombenblindgänger zu erwartenden Bereich von 2 Am² bis 200 Am² fallen, durch Öffnung überprüft werden. Je nach Größenordnung der am Standort erwarteten Objekte sind gegebenenfalls auch Objekte mit kleinerem oder größerem magnetischen Moment durch Öffnung zu überprüfen, weil nach wie vor keine Verfahren für die Unterscheidung von Bombenblindgängern und ferromagnetischen Objekten ähnlicher Größenordnung existieren.

Literaturangaben

- Billings 2002 Billings, Stephen D.; Pasion, Leonard R.; Oldenburg, Douglas W. 2002. Discrimination and Identification of UXO by Geophysical Inversion. Phase II: Inversion of Total-Field Magnetics. Final Progress Report. The University of British Columbia, Geophysical Inversion Facility. Vancouver.
- Clem 2004 Clem, T. R.; Foley, C. P.; Keene, M. N. 2006. SQUIDSs for Geophysical Survey and Magnetic Anomaly Detection. In: The SQUID Handbook, Volume 2. Herausgeber: John Clarke und Alex I. Braginski. Weinheim: Wiley-VCH.
- Gerovska 2004 Gerovska, Daniela; Araúzo-Bravo, Marcos J.; Stavrev, Petar (2004): Determination of the parameters of compact ferro-metallic objects with transforms of magnitude magnetic anomalies. In: Journal of Applied Geophysics, Jg. 55, S. 173–186.
- Pasion 2003 Pasion, Leonard R.; Billings, Stephen D.; Oldenburg, Douglas W. 2003. Discrimination and classification of UXO using magnetometry: Inversion and error analysis using robust statistics. In: Environmental & Engineering Geophysical Society (Hg.): SAGEEP 2003 Proceedings. Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems. 6-10 April 2003, San Antonio, TX, USA. Denver, CO, USA .
- Sanchez 2006 Sanchez, Vinicio; Li, Yaoguo; Nabighian, Misac; Wright, David. 2006. Numerical modeling of magnetic moments for UXO applications. SPIE Proceedings, Volume 6239.
- Weinstock 1996 Weinstock, H. (Hg.) 1996. SQUID sensors: fundamentals, fabrication and applications. Berlin: Springer (NATO security through science series, Series E, Volume 329).
- Zhang 2006 Zhang, Qing; Huang, Yi; Al-Nuaimy, Waleed 2006. Unexploded ordnance location and identification using borehole magnetometry. In: IEEE Proceedings on Science, Measurement and Technology, Jg. 153, H. 1, S. 22–30.

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. Insbesondere wird keine Haftung für die Bewertung von Anomalien, die auf Grundlage dieses Dokumentes erfolgt, übernommen.