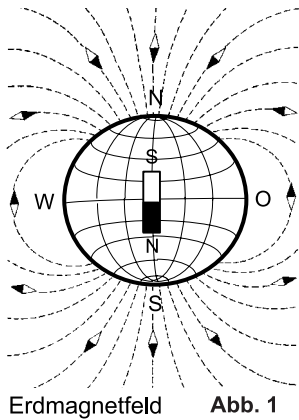


Die Geomagnetik (ingenieurgeophysikalischer Einsatz)



Erdmagnetfeld Abb. 1

Aufgabe

Erfassung des Erdmagnetfeldes bzw. dessen Anomalien

Anwendungen

- Suche und Erkundung von Gesteinsvorkommen (z.B. Magmatite) sowie insbesondere von Erzlagerstätten bzw. lithologischer Gliederung
- Erkundung von Störungszonen bei kristallinem Untergrund
- Suche von Eisenobjekten (z.B. Leitungen, Tanks, Fässer, Bomben)
- Erkundung von Deponien (z.B. Berandung, Gliederung, Mächtigkeitsabschätzung)
- Nachweis von Pleistozänrinnen für hydrogeologische Zwecke
- Erkundung für archäologische Fragestellungen (z.B. Brennöfen, Ziegelbauten, Gräben)
- Vorlaufuntersuchung für den gezielten Einsatz weiterführender Erkundungen

Erdmagnetfeld und -komponenten

Die Erde besitzt, hauptsächlich verursacht durch Ströme in ihrem Innern, ein Magnetfeld. In der Abb. 1 ist der globale Feldverlauf skizziert: Das Magnetfeld entspricht vereinfacht dem eines Stabmagneten im Zentrum der Erde. Gestrichelt sind dessen Feldlinien außerhalb des Erdkörpers gezeichnet. An ihnen würde sich eine frei bewegliche Magnetnadel (Kompass) wie dargestellt ausrichten.

Das Magnetfeld der Erde ist ein Vektorfeld. Folgende Bezeichnungen werden verwendet (siehe Abb. 2):

- T Totalintensität
- H Horizontalkomponente
- X und Y Komponenten von H
- Z Vertikalkomponente
- I Inklination (Abweichung von der Horizontalen)
- D Deklination (Abweichung magnetisch von geographisch Nord)

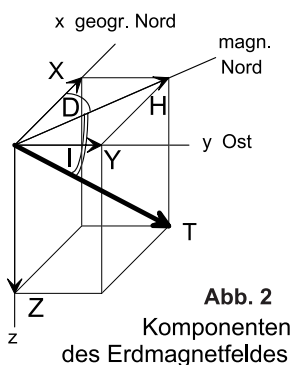


Abb. 2
Komponenten
des Erdmagnetfeldes

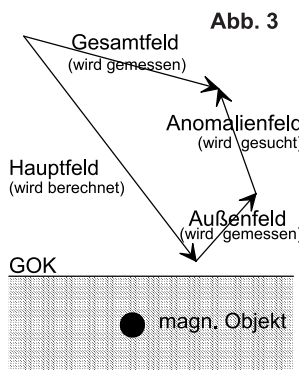


Abb. 3

vektor. Zusammensetzung
des Gesamtfeldes über
einem magnetisiert. Objekt

Zusammensetzung des Erdmagnetfeldes

Das Gesamtfeld der Erde setzt sich aus folg. vektor. Anteilen zusammen (s. Abb. 3):

- Hauptfeld** Es ist der vorherrschende Feldanteil mit einer relativ geringen, aber langzeitlichen Änderung. Sein Ursprung liegt im Erdinnern.
- Außenfeld** Es erreicht nur einen Bruchteil der Hauptfeldintensität, ändert sich aber zeitl. relativ rasch. Die Ursache liegt außerhalb der festen Erde.
- Anomalienfeld** Es ist meist viel kleiner als das Hauptfeld und zeitlich nahezu konstant. Der Ursprung liegt in der oberen Erdkruste.

Für die Belange der Ingenieurgeophysik ist das Anomalienfeld von Interesse. Magnetfeldanomalien sind örtliche Abweichungen vom Haupt- und Außenfeld. Ihre natürlichen Ursachen liegen in Magnetisierungskontrasten der Gesteine und insbesondere ihrem Gehalt an ferromagnetischen Mineralen. Künstliche Ursachen sind v.a. verborgene Eisenobjekte oder auch Bauobjekte, welche einen Magnetisierungskontrast bewirken.

Größenordnung von Magnetfeldwerten

(Totalintensität der magnetischen Flussdichte B in üblichen Messhöhen)

- Hauptfeld:** um 47.000 nT in mitteleuropäischen Breiten
- Außenfeld:** meist unter 50 nT, teilweise jedoch auch mehrere 100 nT
- Anomalienfeld:**
 - Erzlagerstätten: mehrere 10.000 nT
 - Metallfass, 2 m tief: bis 100 nT
 - Pleistozänrinnen: etwa 100 nT
 - Basaltlagerstätte: 500 nT
 - archäologische Objekte: bis 50 nT
 - Hausmülldeponien: über 2.000 nT
 - Pkw 5 m entfernt: bis 200 nT
 - Pipeline (30 cm Durchmesser) 10 m entfernt: 100 nT

Die Geomagnetik (ingenieurgeophysikalischer Einsatz)

Seite 2 von 4

Induktive Magnetisierung

Im Vakuum ist die magnetische Flussdichte B (Induktionswirkung des Magnetfeldes, deswegen auch als magnetische Induktion bezeichnet) der vorliegenden Feldstärke H proportional

$$B = \mu_0 H \quad \mu_0 \text{ universelle magnetische Feldkonstante}$$

Bringt man Materie in ein Magnetfeld, so erhöht sich die Flussdichte B durch einen Feldzuwachs, verursacht durch die induzierte Magnetisierung M_i der eingebrachten Materie

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M_i$$

In der Magnetisierung M_i stecken stoffliche Eigenschaften, die mit der Permeabilitätszahl $\mu_r = 1 + M_i/H$ oder der Suszeptibilität $\chi = M_i/H$ beschrieben werden können. Damit lässt sich vorige Gleichung wie folgt formulieren:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (1 + \chi) H$$

Die Permeabilitätszahl μ_r ist der Faktor, um den die magnetische Flussdichte durch das Einbringen von Materie in das Feld verändert wird.

Für die Geomagnetik ist folgende Einteilung relevant:

deutliche Verstärkung der Flussdichte bewirken

Ferromagnetika $\mu_r \gg 1$ (z.B. Eisen $\mu_r \sim 1.000$, Nickel $\mu_r \sim 300$)

Ferrimagnetika $\mu_r \gg 1$ (z.B. Magnetit Fe_3O_4 $\mu_r \sim 15$, Maghämilit $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\mu_r \sim 15$)

i.a. vernachlässigbaren Einfluss auf die Flussdichte haben

Paramagnetika $\mu_r > 1$ (z.B. Aluminium $\mu_r \sim 1,000\ 023$, Olivin $\mu_r \sim 1,000\ 500$, Pyrit $\mu_r \sim 1,000\ 050$)

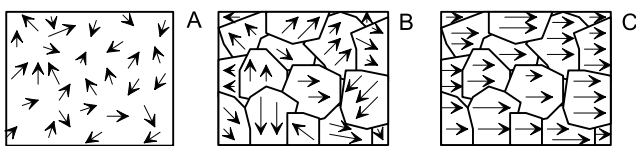
Diamagnetika $\mu_r < 1$ (z.B. Kupfer $\mu_r \sim 0,999\ 991$, Quarz $\mu_r \sim 0,999\ 985$, Steinsalz $\mu_r \sim 0,999\ 990$)

Antiferromagnetika $\mu_r > 1$ (z.B. Hämatit $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\mu_r \sim 1.001$)

Die meisten Minerale sind para- oder diamagnetisch. Wichtig sind die Eisenoxide, welche die meisten ferrimagnetischen Minerale bilden. Der Gesteinsmagnetismus richtet sich nach der Mineralzusammensetzung. Entsprechend der starken Wirkung der Ferro- und Ferrimagnetika bilden diese als Mineralbestandteil der Gesteine bzw. in Form von Eisenteilen die in der Ingenieurgeophysik gesuchten Anomalien. Da Eisen mit Abstand der am meisten in der Bautechnik verwendete ferromagnetische Stoff ist, können Magnetometer i.A. sehr gut als selektive Eisendetektoren eingesetzt werden.

Remanente Magnetisierung

Die Magnetisierung von Ferro- und Ferrimagnetika setzt sich aus dem zuvor beschriebenen induktiven (M_i) und aus einem remanenten Anteil M_r zusammen. Die remanente Magnetisierung ist permanent und fest mit der Materie verbunden. Wesentliche Ursachen remanenter Magnetisierung sind u.a. thermische, sedimentäre und chemische Vorgänge.



temperaturabhängige Ausrichtung der "Elementarmagnete" **Abb. 4**

Thermoremanenz Die magnetischen Eigenschaften von Atomen können vereinfacht durch Elementarmagnete, wie in Abb. 4 als Pfeile dargestellt, beschrieben werden. Oberhalb der sog. Curie-Temperatur (Eisen: $T_C \sim 700\ ^\circ\text{C}$) sind die Richtungen dieser Elementarmagnete infolge Temperaturbewegung willkürlich orientiert, so dass das Gesamtfeld in etwa den Wert Null annimmt (A). Unterhalb der Curie-Temperatur ordnen sich die Elementarmagnete parallel innerhalb von Domänen an (B), welche eine definierte Magnetisierung besitzen. Wenn die Materie bei Vorhandensein eines äußeren Magnetfeldes unter die Curie-Temperatur abkühlt, werden die im äußeren Magnetfeld ausgerichteten Elementarmagnete „eingefroren“ (C) und die Materie ist permanent magnetisch (Thermoremanenz). Dieser Effekt wird v.a. bei der Aufklärung der langzeitlichen (säkularen) Entwicklung des Erdmagnetfeldes ausgenutzt. Daneben ergibt sich daraus auch eine Anwendung innerhalb der Archäometrie (z.B. gebrannte Ziegel, Brennöfen).

Sedimentationsremanenz Bei der Sedimentation von ferrimagnetischen Mineralen in Wasser kann es zur gerichteten Ablagerung infolge des Erdmagnetfeldes kommen. Voraussetzung ist, dass die Partikel ein ausreichendes magnetisches Moment besitzen, um sich im Erdmagnetfeld (ähnlich einem Kompass) während des Sedimentationsprozesses auszurichten. Das Sediment wird dadurch permanent magnetisch (Sedimentationsremanenz).

Chemoremanenz Die chemische Neu- oder Umbildung eines ferrimagnetischen Minerals im Erdmagnetfeld bewirkt, dass dieses eine permanente Magnetisierung annimmt.

Viskose Remanenz Durch langandauernde Einwirkung eines äußeren Feldes (Erdmagnetfeld) kann ein Gestein zunehmend magnetisiert werden. Die Stärke richtet sich nach der Einwirkdauer und kann oft durch eine logarithmische Zeitfunktion beschrieben werden.

Weitere Remanenzarten: isothermale Remanenz, Druckremanenz, inverse Remanenz.

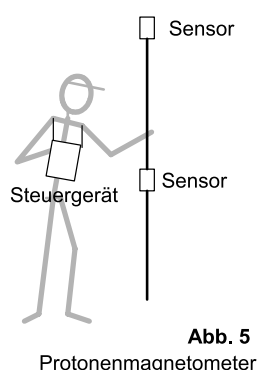


Abb. 5

Protonenmagnetometer

Die Geomagnetik (ingenieurgeophysikalischer Einsatz)

Seite 3 von 4

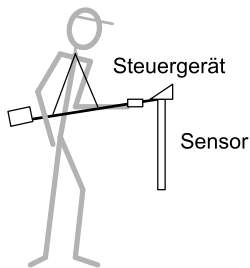


Abb. 6
Fluxgate-Magnetometer

Feldmessgeräte

Mit dem Protonen-Präzession-Magnetometer wird der Betrag der Totalintensität der magn. Flussdichte B in nT gemessen (siehe Abb. 5). Dieses Magnetometer muss nur grob orientiert werden. Der Messablauf ist schnell (i.A. < 5 sek/Messpunkt) und die Messgenauigkeit sehr hoch (i.A. < 1 nT).

Mit dem Sättigungskern-Magnetometer (Fluxgate-Magnetometer, siehe Abb. 6) wird eine Feldkomponente (i.A. Z) der magn. Flussdichte B in nT gemessen. Das Gerät muss genau entsprechend der Feldkomponente ausgerichtet werden. Der Messzyklus verläuft sehr schnell (i.A. < 1 sek/Messpunkt) und die Genauigkeit ist hoch (i.A. < 20 nT). Die Messgenauigkeit und -geschwindigkeit können je nach Anwendungszweck des Geräts sehr unterschiedlich sein.

Weitere seltenere Magnetometer: Cäsium-Magnetometer, Feldwaage, Absorptionszellen-Magnetometer, SQUID-Magnetometer.

Anwendungsart

Gemessen wird entweder der Betrag bzw. eine Komponente der magnetischen Flussdichte oder deren Gradient (meist Vertikalgradient). Dies geschieht entweder entlang von Profillinien als Profilierung oder flächendeckend mit einem bestimmten Messraster als Kartierung. Enge Messraster für Detailuntersuchungen liegen bei etwa 1 m, wogegen bei Übersichtsuntersuchungen die Messpunktabstände 5 m und teilweise mehr betragen können. Daneben wird an festen Basisstationen der zeitliche Verlauf des Magnetfeldes (Außenfeld) registriert, um die Magnetfeldwerte vom zeitlichen Einfluss befreien zu können. Dies ist bei Gradientenmessungen nicht notwendig. Die Dichte des Messrasters richtet sich v.a. nach der „Rauigkeit“ der Anomalienform. Die Anomalienform und -stärke ist u.a. durch den Messabstand zur Anomalienursache bedingt. Beispielsweise nehmen die Amplituden einer lokalen Dipolanomalie mit der 3. Potenz der Entfernung ab. Die Messwertaufnahme in mehreren Abständen bzw. Messhöhen lässt sich günstig zur Massen- und Tiefenabschätzung ausnutzen. Die Messhöhen liegen i.A. zwischen 1,0 m und 2,5 m über der Geländeoberkante (GOK).

Darstellung und Beurteilung der Messwerte

Die Magnetfeldanomalien (Totalfeld, Feldkomponenten, Gradient) werden üblicherweise in Profildiagrammen, Isolinieneplänen (Isogrammen) oder Farbdigrammen dargestellt. Zuvor werden notwendige Korrekturen durchgeführt, z.B. die Anteile des Haupt- und Außenfeldes reduziert. Eine Höhenreduktion ist nur in Spezialfällen notwendig.

Die einfachste Datenauswertung ist die Ortsangabe aufgrund der Anomalienposition, die Tiefenabschätzung aufgrund ihrer Halbwertsbreite und eine Massenklassifizierung aufgrund ihrer Stärke. Dies geschieht i.A. unter vereinfachenden Annahmen der Objektformen (z.B. Kugel, Platte) und ohne Berücksichtigung von remanentem Magnetismus.

Die anspruchsvollere Auswertung beinhaltet die rechnerische Modellierung der Anomalie, wobei die Objektgröße, -form und -tiefe, das Hauptfeld, die remanente Magnetisierung sowie v.a. die Permeabilität μ_r einbezogen werden.

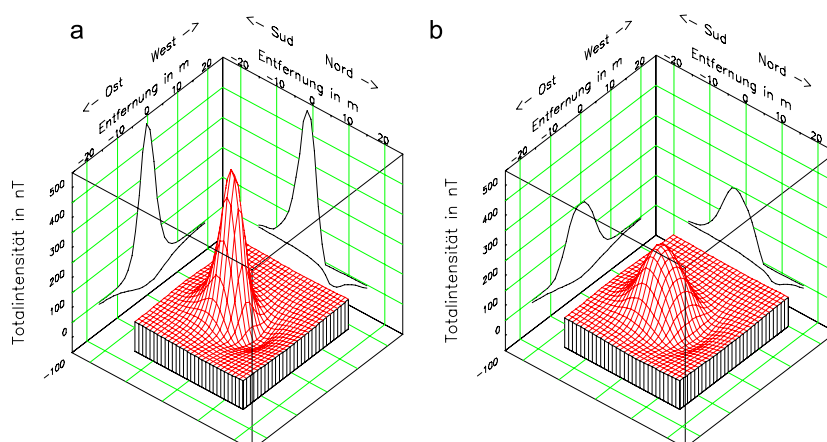


Abb. 7

Anomalien von Objekten gleichen Volumens, Permeabilität und Überdeckung aber unterschiedl. Form
a: Würfel (1 m Seitenlänge), b: Platte (10 m * 10 m Seitenlänge)

Inklination 65°, Deklination 0°, Normalfeld 47600 nT, Überdeckung 5 m, Suszeptibilität 1 emu

Die Abb. 7 veranschaulicht beispielhaft den Einfluss der Objektform sowie der Richtung des induzierenden Magnetfeldes. In Abb. 7a ist das magnetisierbare Material innerhalb eines kompakten Würfels konzentriert, wogegen es in Abb. 7b in einer flachen Scheibe verteilt ist und dadurch eine deutlich schwächere Anomalienstärke bewirkt. Daneben ist in beiden Bildteilen zu bemerken, dass das Anomalienmaximum gegenüber der Objektposition ($x/y = 0/0$) leicht verschoben ist. Dies wird durch die Richtung des induzierenden Erdmagnetfeldes (siehe Abb. 1) bewirkt. Entsprechend ergibt sich durch die geomagnetischen Breite des Messortes auf der Erde eine Verschiebung des Anomalienmaximums.

Die Geomagnetik (ingenieurgeophysikalischer Einsatz)

Seite 4 von 4

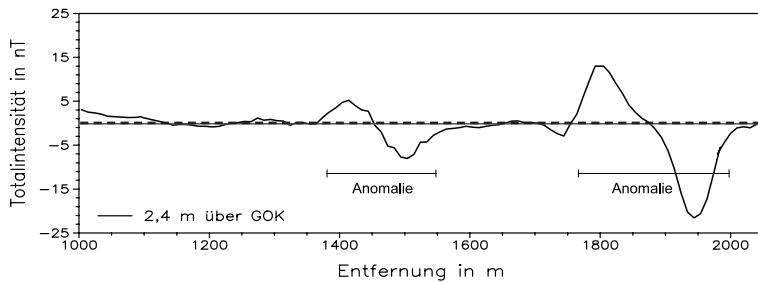


Abb. 8
Anomalien der Totalintensität über Störungen im Buntsandstein. Bei Profilmeter 1870 ist eine deutliche Dipolanomalie durch die erhaltene Störungszone zu erkennen. Bei Profilmeter 1450 ist eine weitere schwächere Dipolanomalie zu sehen.

Bemerkungen

Sehr wichtig bei der Geomagnetik ist die genaue Dokumentierung von störenden Eisenobjekten wie Maste, Fahrzeuge, Zäune usw. Diese haben starken Einfluss auf die Messwerte und müssen in jedem Fall bei der Auswertung berücksichtigt werden. Aus Obigem geht hervor, dass einerseits bei mäßigen Genauigkeitsansprüchen die Geomagnetik mit geringem Aufwand sehr schnell brauchbare Ergebnisse liefern kann. Andererseits kann insbesondere der Auswerteaufwand umfangreich werden, falls möglichst präzise Aussagen gemacht werden sollen. Da die Messungen i.A. sehr schnell gehen, liegt der Aufwand für die Feldmessungen v.a. im Festlegen der Messpunkte und Abschreiten des Messgebietes. Entsprechend spielt die Zugänglichkeit eine große Rolle.

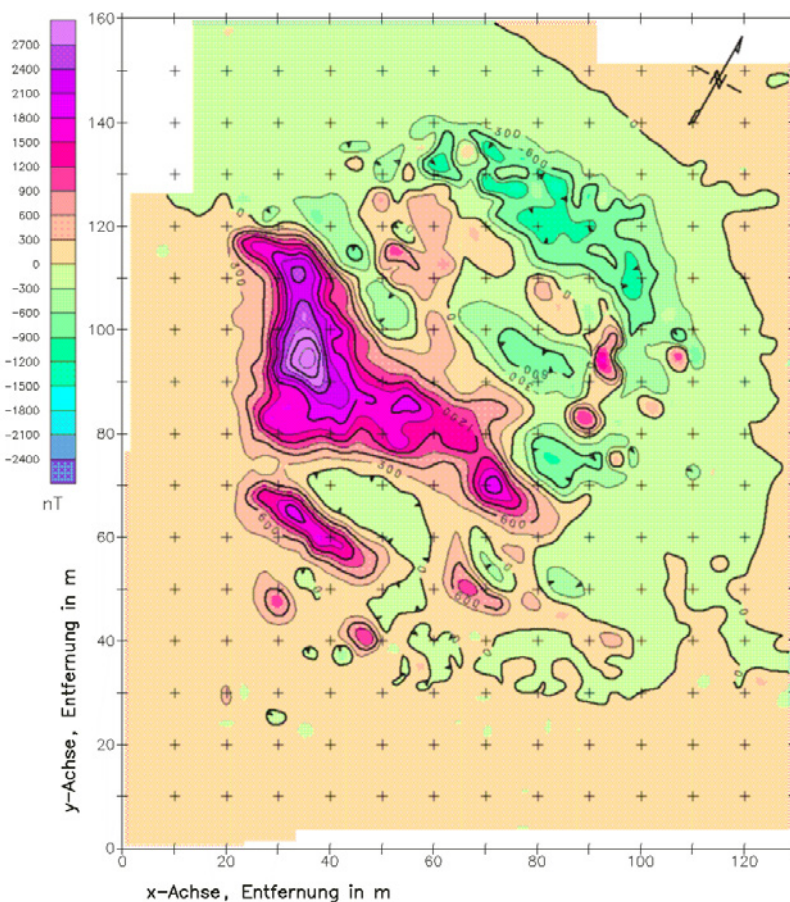


Abb. 9
Anomalien der Totalintensität über einer Tongrube, die ehemals als Deponie in Gebrauch war. Zur Zeit der Messung war die verfüllte Grube abgedeckt und landwirtschaftlich genutzt. An der Oberfläche waren keine augenscheinlichen Hinweise erkennbar.

In einfachen Fällen und bei geringen Objekt-tiefen kann die Verschiebung unberücksichtigt bleiben, falls der Ortsfehler tolerierbar ist. Durch die sog. Polreduktion können die Anomalien zur besseren Positionsbestimmung auf die Inklination 90° (PoI) transformiert werden. Im Falle von ausschließlich induziertem Magnetismus liegen die Anomalienmaxima dann direkt über dem Objekt.

Kombinierbare Verfahren

- Georadar und Metalldetektor bei der Objektsuche
- Geoelektrik und Elektromagnetik bei großräumiger Erkundung

Datenbeispiele

In der Abb. 8 ist der Anomalienverlauf über einer mineralisierten Störung im Buntsandstein zu sehen. In der Störungszone sind ferromagnetische Erze enthalten, welche einen schwachen magnetischen Kontrast zum umgebenden Sandstein bilden. Die Störungszone ist anhand von zwei getrennten Dipolanomalien um Profilmeter 1870 und 1450 festzustellen.

Die Abb. 9 zeigt den Anomalienverlauf über einer verfüllten Tongrube. Die Umrisse der Grube können anhand der Anomalienbegrenzung gut nachvollzogen werden. Daneben sind Auffüllungsbereiche bzw. größere Einzelobjekte anhand ihrer Dipolwirkungen in der Grube zu lokalisieren und klassifizieren.