

Yellow Bird

Arnulf Schiller, Walter Simon, Robert Supper

Was ist das?



Abb. 1: Was ist das?

Es ist gelb, etwa fünf Meter lang und hängt an einem Heereshubschrauber. Ein Torpedo des legendären „yellow submarine“? Eine Geheimwaffe des Bundesheeres? Weder noch - es handelt sich um „Hubschrauber-Elektromagnetik“ (HEM; bzw. „airborne electromagnetics“, AEM), ein etabliertes geophysikalisches Messverfahren, und das gelbe Ding heißt im österreichischen Fachjargon: „Der Bird“ (Abb. 2). Es enthält eine Sende- und Empfangsanlage für elektromagnetische Wellen, ein Magnetometer und andere Sensoren.

Das System gehört der Geologischen Bundesanstalt (GBA) in Wien. Für Messungen auf österreichischem Bundesgebiet wird der Hubschrauber vom Bundesheer zur Verfügung gestellt.



Abb. 2: „Der Bird“

Dr. Arnulf Schiller, Mag. Robert Supper, Geologische Bundesanstalt Geological Survey of Austria, Fachabteilung Geophysik, Department of Geophysics, Neulinggasse 38, 1030 Wien
PD Dr. Walter Simon, Gravitationsphysik, Universität Wien, Boltzmann-gasse 5, 1090 Wien, E-Mail: walter.simon@univie.ac.at

Während eines Messeinsatzes wird ein Außenlandeplatz mit Tankwagen und Servicefahrzeug eingerichtet – oft auf irgendeiner Wiese hinter einem Bauernhof in der Nähe des zu vermessenden Gebietes – von Anrainern vielbestaunt.

Dann wird das Messgebiet entlang von Linien in regelmäßigen Abständen befliegen, wobei elektromagnetische Wellen in den Untergrund abgestrahlt und die Veränderung des Sekundärfeldes aufgezeichnet werden. Durch Umrechnung dieser Veränderungen in die Verteilung der elektrischen Leitwerte und der magnetischen Permeabilität des Bodens können Aussagen über die Geologie und Hydrogeologie bis in Tiefen von ca. 150 Metern gemacht werden. Auf diese Weise können in kurzer Zeit große und oft schwierig zugängliche Gebiete „gescannt“ werden (mit einer Tagesleistung von bis zu 500 km). Insgesamt wurden von der GBA im In- und Ausland schon mehr als 120 000 Messkilometer geflogen, so z.B. auch über Vulcano/Gran Cratere in Süditalien oder über dem Vesuv zur Untersuchung von Vulkanaktivitäten sowie in Yucatan/Mexiko zur Vermessung von Süßwasserreservoir im Karst (siehe Kapitel 5).

Das Prinzip

Das Grundprinzip der in der Geophysik benutzten aktiven elektromagnetischen Verfahren besteht im Aussenden eines Feldes mittels einer Antenne und der Registrierung und Auswertung des vom Boden reflektierten oder des im Boden induzierten Feldes. Je nach Anwendung kommen dabei sehr unterschiedliche Frequenzen (zwischen 100 Hz und 500 MHz) zum Einsatz. Beispiel für ein hochfrequentes Verfahren ist etwa das „ground penetrating radar“ (GPR, auch „Georadar“ genannt) - ein Radar, das in den Boden anstatt in den Luftraum „sieht“. Weiters gibt es eine Reihe von EM-Messgeräten mit mittlerer Arbeitsfrequenz (kHz-Bereich), die am Boden zum Einsatz kommen – im Prinzip ähnlich den Metalldetektoren. Wenn diese Apparaturen „in die Luft gehen“ und mit modernen Datenverarbeitungsverfahren kombiniert werden, gelangt man schließlich zur HEM (oder AEM). Einen Überblick bietet die folgende Tabelle:

Name	GPR	HEM
Frequenzen	10 MHz - 500 MHz	100 Hz - 100 kHz
Antennen-größen	cm - m	dm - m
Wellenlängen	cm	km
Eindringtiefe	10 m	100 m
typische Anwendungen	Baugrunduntersuchungen Blindgängersuche Umwelt-Altlasten	Bodenschätze Grundwasser (Kapitel 5) Eisdickenmessung (Kapitel 4)

Beim GPR, das oft mit einem Schlitten über den Boden oder über Eisflächen bewegt wird, handelt es sich um eine Sender/Empfängerkombination, dessen ausgesandte Wellen von den Bodenstrukturen teilweise reflektiert werden (Abb. 3).

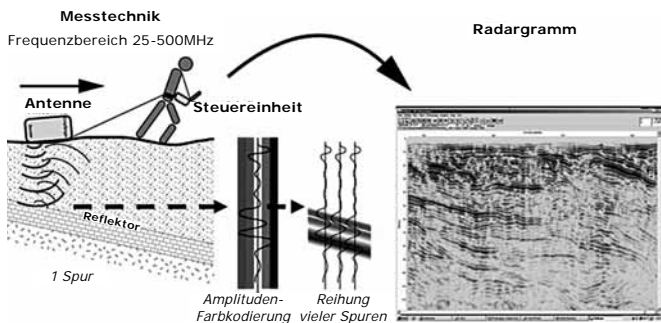


Abb. 3: Das Georadar (EPR)

Die Entfernungen Sender-Objekt-Empfänger sind dabei typischerweise deutlich größer als die verwendeten Wellenlängen. Das Objekt befindet sich daher in der „Fernzone“ (Begriff aus der Wellentheorie). Anders ist es bei der HEM (Abb. 4).

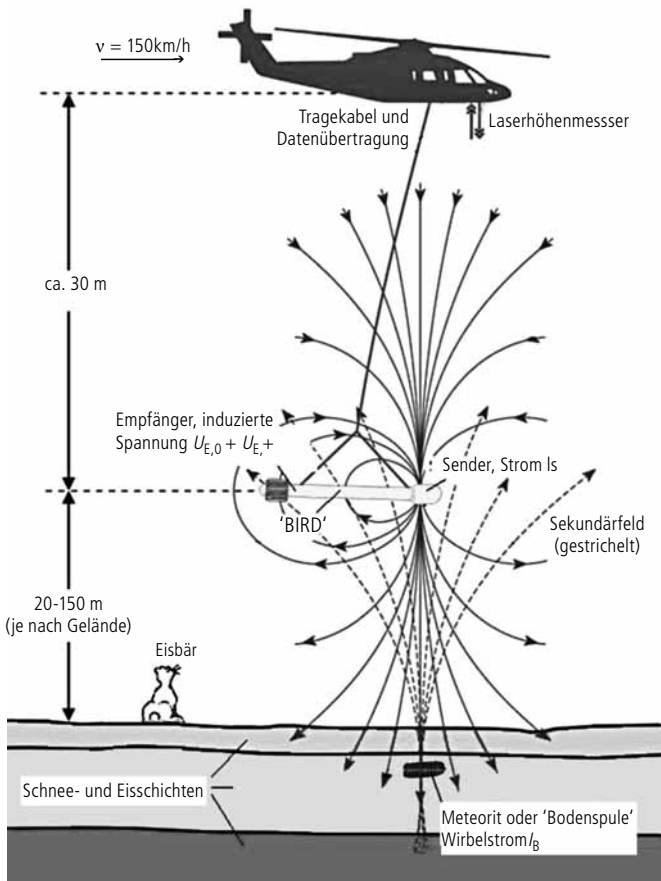


Abb. 4: Die HEM

Trotz der „Höhenlage“ bewegt sich der Bird typischerweise in einer Entfernung vom Zielobjekt die kleiner als die verwendete Wellenlänge ist (Wellenlängen bis 1000 km in Luft!). Der zu untersuchende Untergrund ist also in der „Nahzone“ der Strahlungsquelle (des Senderschwingkreises). Dieser induziert im Boden Wirbelströme und daher Magnetfelder, die im Wesentlichen von der Leitfähigkeit und der

Induktivität (Permeabilität) des Materials abhängen und die im Empfängerschwingkreis ein Signal auslösen.

So wäre die HEM bei der Suche nach im Polareis (nicht magnetisierbar, Nichtleiter) eingeschlossenen Eisenmeteoriten (magnetisierbar, gute Leiter) besonders effizient (obwohl den Autoren diesbezüglich keine Erfolgsmeldungen bekannt sind). In den meisten geologischen Anwendungen dominieren allerdings die Effekte der elektrischen Leitfähigkeitsunterschiede gegenüber Magnetisierungseffekten (siehe Kapitel 4 und 5).

Die Theorie

Ein vereinfachtes Modell für die schon erwähnten Schwingkreise des Bird besteht aus einer Sendespule S , die vom Wechselstrom

$$I_S = I_0 \exp(i\omega t) \quad (1)$$

durchflossen wird, sowie einer Empfangsspule E . Hier ist I_0 die Amplitude des Stromes und ω die Kreisfrequenz. (Die in Hertz gemessene Frequenz ist $f = \omega / 2\pi$).

Die durch S im Boden induzierten Wirbelströme werden durch einen Stromkreis modelliert, der aus einem Ohm'schen Widerstand R und einem induktiven Widerstand $i\omega L$ besteht. Im Boden stellt man sich also eine weitere Spule B mit der Selbstinduktivität L vor (Abb. 4). Der komplexe Gesamtwiderstand ist demnach

$$R_B = R + i\omega L \quad (2)$$

Die folgende Ableitung kommt mit drei Grundgesetzen aus (Ohm, Faraday und Maxwell). Da die Induktionsgesetze wegen der drei beteiligten Spulen allerdings in dreifacher Ausführung erscheinen und am Schluss alles algebraisch kombiniert wird, ist etwas Schreib- bzw. Lesearbeit zu leisten.

Um die Apparatur zu eichen, fliegt man zuerst so hoch, dass Bodeneffekte vernachlässigbar sind. Der Strom I_S in S erzeugt ein zur Stromstärke proportionales magnetisches Wechselfeld, das wiederum in E einen magnetischen Fluss

$$U_{E,0} = -\frac{d\Phi_{E,0}}{dt} = -i\omega L_E^S I_S \quad (3)$$

bewirkt. Die Proportionalitätskonstante L_E^S , die sogenannte „Gegeninduktivität“, hängt von der Geometrie, d.h. von den Größen der Spulen und ihrer gegenseitigen Lage ab. Nach dem Induktionsgesetz induziert nun dieser magnetische Fluss in E die Spannung

$$U_{E,0} = -\frac{d\Phi_{E,0}}{dt} = -i\omega L_E^S I_S \quad (4)$$

Nun sinkt der Hubschrauber auf Messhöhe. Die Wechselwirkung der „Bodenspule“ B mit E und S beschreiben nun die gleichen Formeln wie oben, mit den entsprechenden Indices: In B wirkt der vom Senderfeld in S hervorgerufene magnetische Fluss

$$\Phi_B = L_B^S I_S \quad (5)$$

wobei die Gegeninduktivität L_B^S jetzt außer von S noch von der Flughöhe abhängt. Der Fluss Φ_B induziert in B die Spannung

$$U_B = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -i\omega L_B^S I_S \quad (6)$$

die ebendort einen Strom

$$I_B = \frac{U_B}{R_B} = -i\omega \frac{L_B^S I_S}{R + i\omega L} \quad (7)$$

zur Folge hat. Dieser Strom bewirkt nun in E einen zu $\Phi_{E,0}$ zusätzlichen Fluss

$$\Phi_{E,+} = L_E^B I_B, \quad (8)$$

wobei diesmal ein Gegeninduktivitätsfaktor L_E^B auftritt. Dadurch bekommen wir schließlich in E eine zu $U_{E,0}$ zusätzliche Spannung der Größe

$$U_{E,+} = -\frac{d\Phi_{E,+}}{dt} = \omega^2 \frac{L_B^S L_E^B I_S}{R + i\omega L} \quad (9)$$

Die entscheidende Messgröße ist nun das Verhältnis der Spannungen (4) und (9), das sich mit den oben eingeführten Größen folgendermaßen darstellt:

$$\frac{U_{E,+}}{U_{E,0}} = -i\omega \frac{L_B^S L_E^B}{L_E^S (R + i\omega L)}. \quad (10)$$

Diese Formel lässt sich einfacher schreiben mittels der Definition

$$\Gamma = -\frac{L_B^S L_E^B}{L L_E^S} \quad (11)$$

und des sogenannten Responseparameters

$$Q = \omega L/R \quad (12)$$

Man erhält schließlich:

$$\begin{aligned} \frac{U_{E,+}}{U_{E,0}} &= \frac{\Gamma Q(Q+i)}{1+Q^2} = \\ &= \frac{\Gamma Q}{\sqrt{1+Q^2}} \exp\left(i \arctan \frac{1}{Q}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

Es ergibt sich also sowohl eine Amplitudenänderung der Spannung, als auch eine Phasenverschiebung von $\arctan(1/Q)$. Letztere hängt in diesem Modell also nur vom Responseparameter und damit vom Produkt der elektrischen Leitfähigkeit und Induktivität bzw. der Permeabilität des Bodenmaterials ab; sie kann maximal $\pi/2$ erreichen.

Ein gut leitender und ausreichend großer Meteorit würde so eine sehr schöne Anomalie im Messsignal erzeugen (Abb. 4). Leitende großflächige Sedimente (z.B. Tonschichten)

wären dagegen durch viele kleine Leiterschleifen (Wirbelströme) zu modellieren und zeigen sich im Signal durch eine gering schwankende Phasenverschiebung und eine Sekundärfeldamplitude, deren Werte von der Leitfähigkeit, aber auch von Tiefe und Dicke der Schichten abhängen.

Eisdickenmessung

Aus den oben beschriebenen Tatsachen wird nun eine besonders aktuelle Anwendung der Geoelektrik verständlich, nämlich die Eisdickenmessung in (ant-)arktischen Gewässern (Abb. 4). Sie wurde am Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung entwickelt [1]. Auf dem Hubschrauber befindet sich dabei außer dem Bird mit den Spulen noch ein Laser, der die Eisoberfläche abtastet. Da die kurzwelligen Laserimpulse (Wellenlänge ca. 600 nm) praktisch nicht in das Eis eindringen, lässt sich aus der Messung der Laufzeit des reflektierten Lasersignals die aktuelle Flughöhe genau bestimmen (Messgenauigkeit etwa 1 cm). Andererseits werden die langwelligen Signale (Wellenlänge im Kilometerbereich) durch das Eis (geringer Salzgehalt, geringe elektrische Leitfähigkeit, kaum Wirbelströme) kaum beeinflusst, während die im darunterliegenden Salzwasser (Leitfähigkeit 100 bis 1000 mal höher als Eis) induzierten Wirbelströme bzw. deren Magnetfelder registriert werden. Diese Methode konnte in den letzten Jahren mittels moderner Signalanalyse so weit entwickelt werden, dass Eisschichten von Dicken im Meterbereich auf wenige Zentimeter genau vermessen werden können. Die Ergebnisse sind umso genauer, je genauer der Salzgehalt von Eis und Wasser bekannt ist, und die Wassertemperatur spielt ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zu „direkten“ Messmethoden (am Eis ausgesetzte Opfer bewegen ein Georadargerät oder bohren Löcher und versenken Messlatten...) lassen sich natürlich per HEM große Eisflächen bequem und schnell erfassen. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Massenreduktion der Eisflächen in polnahen Regionen zu messen, auf die früher nur indirekt (durch das Verschwinden des Eises in polferneren Gebieten) geschlossen werden konnte. Auf die gleiche Weise kann übrigens auch der Salzgehalt von eisfreiem Brackwasser bestimmt werden.

Die im nächsten Kapitel beschriebene Anwendung beruht auf dem Leitfähigkeitsunterschied zwischen Süßwasser und Kalk.

Die „Quellen des Himmels“

Teile der Halbinsel Yucatan (Mexiko) bestehen aus ebenem, von einförmigem Urwald bedecktem Karstterrain der Küstenebene. Dort befindet sich auch das UNESCO-Weltnaturerbe Sian Kaan (Maya-Bezeichnung für „die Quellen des Himmels“), ein einzigartiges Küsten-, Mangroven- und Lagunen-Ökosystem mit einer Vielfalt an Tier- und Pflanzenarten. Charakteristisch für diesen Küstenbereich sind ausgedehnte unterirdische Karst-Höhlensysteme, die den Maya bzw. der jetzigen Bevölkerung angesichts nicht vorhandener natürlicher Oberflächengewässer als wichtiges

Reservoir für sauberes Trinkwasser dien(t)en – die Sichtweite in den Unterwasserhöhlen beträgt bis zu 250 Meter! Touristische Expansionspläne gefährden nun dieses Wasser wie auch die Natur Sian Kaans, wenn nicht fundierte hydrogeologische Daten und Argumente die Planung kontrollierend begleiten.

Im Rahmen eines internationalen Projektes (Österreich, Mexiko, Dänemark, Deutschland, Schweiz, Slowenien) unter Leitung der Geologischen Bundesanstalt und mit Unterstützung des FWF (Projekt L 524-N10) werden dort, nahe den berühmten Mayaruinen von Tulum, seit 2008 völlig neue Ansätze zur Datenerhebung für eine Grundwasserstudie erprobt. Der Anteil der geologischen Bundesanstalt daran: Hubschrauber-Messdaten sollen erstmals in hydrogeologische Parameter umgerechnet werden. Das erfordert eine sorgfältige Kalibrierung, weshalb Bohrloch- und Bodenmessdaten genau mit den Flugdaten abgestimmt werden müssen.

Ein erster großer Erfolg kann schon verzeichnet werden: Die bisherigen Flüge ergaben eine klare Korrelation der Flugmessdaten mit bekannten unterirdischen Flusssystemen und viele noch unbekannte scheinen in den Daten sichtbar zu werden.

Dadurch konnte bewiesen werden, dass die HEM-Methode zwischen relativ wenig wasserhaltigem massivem Kalk und wasserführenden Höhlen- und Kluftsystemen problemlos unterscheiden kann – und eine wichtige Information für die Erstellung eines hydrologischen Modells liefert. Das gibt zur Hoffnung Anlass, dass mit Hilfe der HEM große und schwer zugängliche Gebiete hydrogeologisch einfach vom Hubschrauber aus vermessen werden können – und das nicht nur im mexikanischen Urwald, sondern z. B. auch im Mittelmeerraum – ein Thema von zunehmender Bedeutung.

Technische Aspekte und weitere Entwicklungen

Der österreichische Bird wird ständig weiterentwickelt. Aktuell wird in einem vom Österreichischen Wissenschaftsfond geforderten Projekt (FWF-Projekt L354-N10) unter Leitung eines der Autoren (A. Schiller) das Driftverhalten und Rauschen des Messsystems selbst genauer untersucht.

Wie bei jedem Messsystem, so überlagern sich auch hier Störungen dem Messsignal. Kleine Werte des Nutzsignals können so unerkant bleiben oder Störungen irrtümlich als geologisch verursacht interpretiert werden. Die Studie soll die Ursachen für Drift und Rauschen identifizieren und Methoden entwickeln, mit denen diese Störungen reduziert werden können.

Eine wesentliche Quelle für die Drift ist die Temperaturempfindlichkeit der Sender- und Empfängerschwingkreise. In den Senderschwingkreis speist ein Verstärker Wechselstrom einer bestimmten Arbeitsfrequenz ein, wobei die

größte Sendeleistung erzielt wird, wenn die Schwingkreisresonanzfrequenz und die Verstärkerfrequenz übereinstimmen. Nun sind aber sowohl Induktivität als auch Kapazität des Senderschwingkreises temperaturabhängig. Bei Temperaturänderungen, die durch die Eigenwärmeproduktion der Senderspulen und der Leistungswiderstände, aber auch durch Änderung der Umgebungstemperatur verursacht werden, „driftet“ die Resonanzfrequenz, d.h. sie weicht von der Arbeitsfrequenz des Verstärkers ab. Der Frequenzunterschied ist zwar gering, allerdings ändern sich die frequenzabhängigen Größen, nämlich Betrag des Komplexwiderstandes und Phasenwinkel, im Bereich der Resonanzfrequenz am stärksten. Die Folge ist eine nicht vernachlässigbare Temperaturabhängigkeit der Senderfeldstärke, was durch stationäre Messungen am Boden bestätigt wird.

Auf ähnliche Weise variiert auch die Empfindlichkeit des Empfängers mit der Temperatur. Da sich auch räumlich langsam ändernde Strukturen im Untergrund wie z.B. Sedimente durch langsame Änderung von Amplitude und Phase im Messsignal abzeichnen, kann eine Temperaturdrift z.B. als Änderung einer Sedimentmächtigkeit fehl interpretiert werden. Als Konsequenz der bisherigen Ergebnisse des Forschungsprojektes werden nun für ein HEM-System weltweit erstmalig die Temperaturen vieler kritischer Systemkomponenten im Flug mit aufgezeichnet, und es wird über ein numerisches Modell die Temperaturdrift des Messsystems berechnet.

Nach Reduktion der Temperaturdrift, aber auch anderer Drift- und Rauschkomponenten erhält man ein verbessertes Bild der geologischen Situation eines untersuchten Gebietes. Mit diesen und weiteren Untersuchungen hofft man, die Leistung des Bird immer weiter zu verbessern und mit ihm neue Aufgabenbereiche in Geo- und Umweltwissenschaften oder Ingenieurgeophysik zu erschließen.

Literatur

- [1] A. Pfaffling, C. Haas, J. E. Reid, *Geophysics*, Vol. 72, No. 4, F127-F137 (2007)