

Neue Konzepte bei der Entwicklung einer EM-Flugsonde der BGR für fünf Frequenzen

Klaus-Peter Sengpiel, BGR, Hannover

1. Problemstellung

Wenn man die Präzision aerogeophysikalischer Erkundungsergebnisse steigern will, muß man u. a. bei der Qualität, evtl. auch Quantität der Meßdaten ansetzen. Man kann zeigen, daß Fehler von wenigen Prozent in den HEM-Daten die Inversionsergebnisse, d. h. die berechneten Leitfähigkeitsverteilungen, beträchtlich verfälschen können, wobei insbesondere die Aussagen für größere Tiefen betroffen sind.

Bei AEM-Messungen, die bei einer Geschwindigkeit um 150 km/h stattfinden, gibt es eine ganze Reihe von möglichen Beeinträchtigungen der Meßdaten, die ja im Idealfall das Sekundärfeld der im Untergrund induzierten Ströme darstellen, nämlich

- Instabilitäten der Kompensation des primären Feldes vom Sender, z. B. durch äußere Kräfte auf das Sensorsystem oder durch Temperatureinflüsse auf mechanische und elektrische Baukomponenten,
- externe magnetische Wechselfelder technischen und natürlichen Ursprungs (z. B. von Hochspannungsleitungen bzw. sferics), die mitregistriert werden,
- ungenaue Kalibrierungswerte auf der Basis von Eichmessungen, die auf leitendem Untergrund vorgenommen wurden,
- ungenaue „Phaseneinstellung“ am Gerät, d. h. ungenaue Aufspaltung des gemessenen Sekundärfeldes im Real- und Imaginärteil („Inphase- und Quadrature“-Komponente) mittels eines Ferritstabes.

Auf einem 20 - 100 km langen Meßprofil muß mit stark wechselnden Leitfähigkeiten in lateraler und vertikaler Richtung gerechnet werden, die von der Erdoberfläche bis in möglichst große Tiefe kontinuierlich ermittelt werden sollen. Im Prinzip braucht man dazu ein sowohl breites als auch dicht besetztes Band von Meßfrequenzen.

Mit den bisher vorhandenen drei Meßfrequenzen kann man zwar an jedem Meßort eine elektromagnetische Sondierung vornehmen, erhält aber i. a. nur ein ziemlich grobes Bild der vertikalen Leitfähigkeitsverteilung. Die Zahl der Meßfrequenzen zu erhöhen stellt für die AEM ein erhebliches technisches Problem dar. Abb. 1 zeigt schematisch das in einem 9 m langen, zylinderförmigen Flugkörper aus Kevlar untergebrachte Sensorsystem, bestehend aus je einer Sender-, Empfänger-, Kompensations- und Eichspule für jede Meßfrequenz. Drei Spulensysteme sind horizontal-koplanar angeordnet; weitere („optionale“) Spulensysteme können nur vertikal-koaxial untergebracht werden (Stand von 1995). Bei mehr als drei Frequenzen müßte man also ein Mischsystem mit Anregung durch vertikale und horizontale Dipole in Kauf nehmen, was Nachteile bei einer EM-Sondierung mit den Meßdaten aller Frequenzen haben kann.

2. Vorgesehene Verbesserungen

Unter Beibehaltung des Kevlar-Flugkörpers (Abb. 1) sind eine Reihe von Veränderungen vorgesehen, die vor allem das Sensorsystem betreffen:

2.1 Meßfrequenzen

Die Zahl der Meßfrequenzen soll von drei (385 Hz, 3600 Hz, 31 kHz oder 900 Hz, 7200 Hz, 32 kHz) auf fünf erhöht werden, nämlich:

375 Hz
1 972 Hz
8 600 Hz
41 000 Hz
195 000 Hz

Das bedeutet a) eine wesentliche Erweiterung des verfügbaren Frequenzbandes nach oben, b) eine Verringerung des Frequenz-Abstandes.

Durch a) erhält man eine bessere Auflösung der oberflächennahen Bereiche. Diese wird u. a. für eine indirekte Altlastenerkundung benötigt, d. h. für Altlasten mittlerer oder geringer Leitfähigkeit, mit welchen ggf. Sandgruben o. ä. verfüllt worden sind. Durch die Maßnahme b) läßt sich nicht nur insgesamt eine bessere Auflösung in der Vertikalen erzielen; aus Modellrechnungen ergab sich auch, daß die Inversion von Fünffrequenz-Daten bis in wesentlich größere Tiefen richtige Ergebnisse liefert, als mit Dreifrequenz-Daten, obwohl die tiefste Frequenz in beiden Fällen gleich ist.

2.2 Fünf koplanare Spulensysteme

Das Dipolfeld jeder Sendespule induziert nicht nur ein Stromsystem im leitenden Untergrund, sondern auch unerwünschte Ströme in benachbarten Sendespulen. Eine Verringerung der gegenseitigen Kopplung erreicht man bekanntlich durch Vergrößerung des gegenseitigen Abstandes oder durch eine orthogonale Anordnung wie zwischen C_x und C_{p1} in Abb. 1. Ebenfalls aus Abb. 1 ist ersichtlich, daß fünf koplanare Sendespulen im üblichen Abstand kaum unterzubringen sind. Auf meinen Vorschlag hin werden daher die Sendespulen in der Weise überlappend angeordnet, daß ihre gegenseitige Kopplung etwa Null wird. Wie das funktioniert, zeigt die Abb. 2: Zwei gleichgroße, z. B. rechteckige Spulen (1) und (2), von denen (1) als Sendespule fungiert, liegen im Abstand $\Delta z = 1,5$ cm übereinander. Die Kurve für den magnetischen Fluß durch (2) ist für die Mittelpunktse Entfernung $\Delta x = 0$ ein Maximum, d. h. wenn beide Spulen genau übereinanderliegen. Vergrößert man Δx bis auf etwa 54 cm, so wird der Fluß durch (2) zu Null. In der Praxis - mit großflächigen Spulen - läßt sich jedenfalls durch die Überlappung eine kleinere Kopplung erreichen als durch seitlichen Abstand, wie der Verlauf der Kopplungskurve in Abb. 2 zeigt.

In ähnlicher Weise kann man auch die Empfängerspulen entkoppeln.

2.3 Erhöhung des Verhältnisses Nutz-/Störsignal

2.3.1 Höheres Dipolmoment

Wie schon ausgeführt, überlagern technische und natürliche Störfelder die Meßsignale. Besonders kritisch ist der externe Störpegel für AEM-Messungen mit niedrigen Frequenzen, die im allgemeinen die schwächsten Nutzsignale liefern. Eine Erhöhung des Nutzsignals, d. h. eine Verstärkung des Sekundärfeldes, kann man durch eine Vergrößerung des Dipolmoments M der Sendespulen erreichen. Da

$$M = INF / 4\pi$$

ist, mit

$$\begin{aligned} I &= \text{Strom in der Senderspule} \\ N &= \text{Zahl der Windungen} \\ F &= \text{Fläche einer Windung} \end{aligned}$$

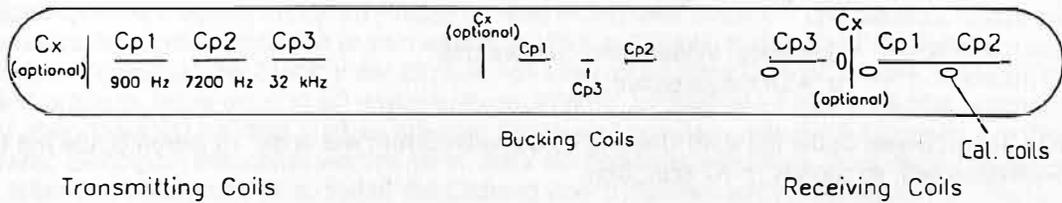
ist zu prüfen, welche dieser drei Größen am ehesten für eine Vergrößerung von M infrage kommt. Aus technischen Gründen sind einer Erhöhung von I und N enge Grenzen gesetzt, die in den bestehenden Geräten schon weitgehend ausgeschöpft sind. Eine weitere Erhöhung des Stromes führt z. B. zu einer überproportionalen Erwärmung (da diese $\sim I^2$) mit ungünstigen Auswirkungen auf die elektrische Stabilität des Systems. Eine Erhöhung der Windungszahl führt u. a. zu einer proportionalen Erhöhung des ohmschen Widerstandes der Spule (der induktive ist durch eine Kapazität in Reihe kompensiert) und damit zur Erniedrigung des Stromes.

Der Radius der bisher verwendeten Kreisspulen ist bereits so groß gewählt wie der Innendurchmesser ($2r \approx 45$ cm) der Kevlar-Röhre erlaubt. Würde man allerdings eine quadratische Sendespule mit demselben Platzbedarf verwenden, so kann man eine Vergrößerung der Spulenfläche um

$$V = \frac{(2r)^2}{r^2 \pi} = \frac{4}{\pi} = 1,273$$

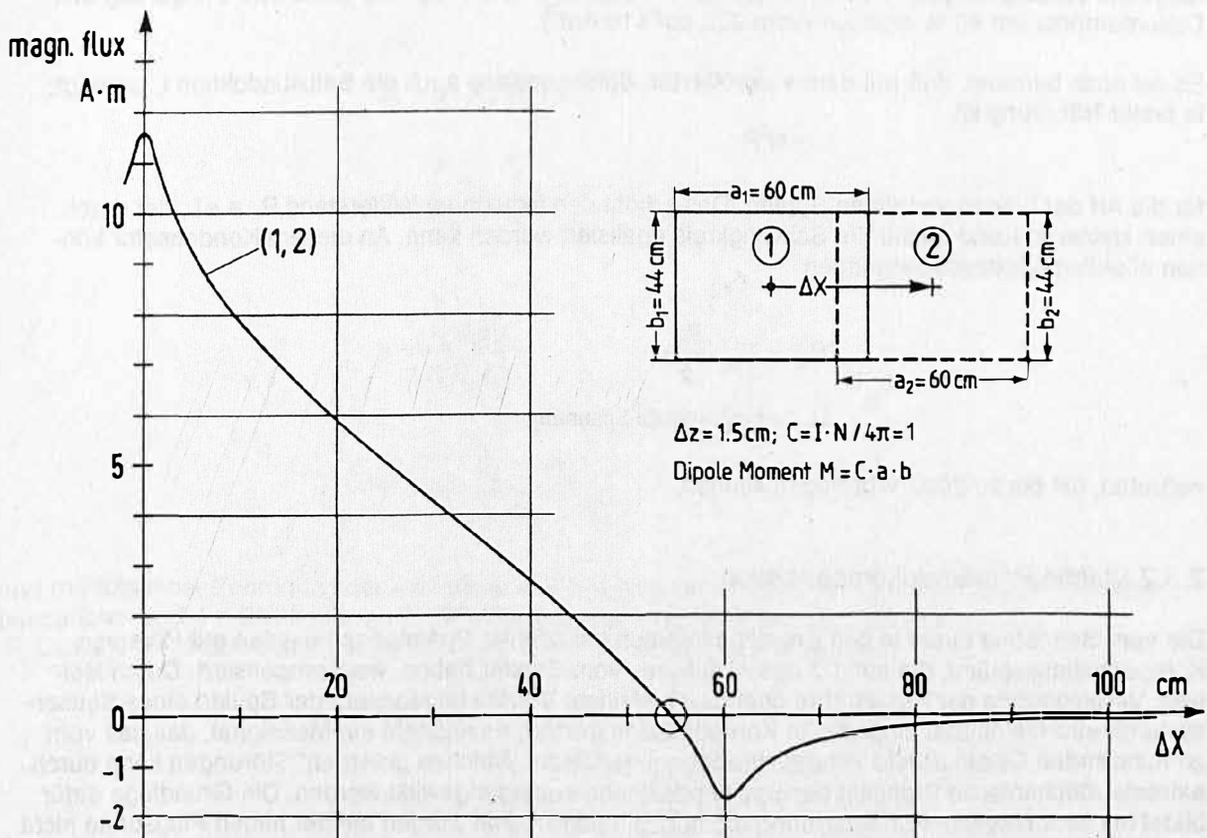
d. h., um 27,3 % erzielen.

DIGHEM EM BIRD COIL CONFIGURATION



BKS36 BIRD
for
BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE

Abb. 1: Anordnung der koplanaren Kreisspulen des bisherigen EM-Sensorsystems für 3 Frequenzen; ab der 4. Frequenz müssen vertikale Spulen eingefügt werden.



Sengpiel 1995

Abb. 2: Magnetischer Fluß durch eine rechteckige Spule (2) in Abhängigkeit von ihrer Mittelpunktentfernung Δx von einer Sendespule (1).

Nun muß geklärt werden, ob eine Vergrößerung der Spulenfläche F das Dipolmoment M tatsächlich erhöht. Da eine Vergrößerung von F mit einer Vergrößerung des Umfangs P der Spule verbunden ist, erhöht sich auch bei konstantem n der ohmsche Widerstand R der Drahtwicklung:

$$R = \rho_0 P N / q$$

mit $\rho_0 =$ spez. Widerstand des Drahtes
 $q =$ Drahtquerschnitt.

Wenn in der größeren Spule mit dem Umfang P_2 derselbe Strom wie in der kleineren Spule mit Umfang P_1 fließen soll, so muß $R_2 = R_1$ sein, bzw.

$$q_2 = q_1 \cdot \frac{P_2}{P_1}$$

Da für die Kreisspule $P_1 = 2\pi r$ und für die quadratische Spule $P_2 = 8r$ ist, muß q_2 gemäß

$$q_2 = q_1 \cdot \frac{4}{\pi} = q_1 \cdot 1,273$$

um 27,3 % vergrößert werden. Man erkaufte also ein höheres Dipolmoment mit einem proportional höheren Drahtgewicht der Spule, d. h. ein paar kg pro Spule mehr. Das spielt beim Gesamtgewicht der Flugsonde von über 200 kg keine große Rolle und ist daher sinnvoll. Tatsächlich werden für die beiden niedrigsten Frequenzen rechteckige Spulen mit 60×45 und 55×45 cm verwendet, die allerdings mit etwas geringerem Strom betrieben werden, so daß sie nur eine maximale Steigerung des Dipolmoments um 40 % ergeben (vom 293 auf 410 Am^2).

Es sei noch bemerkt, daß mit dem vergrößerten Spulenumfang auch die Selbstinduktion L ansteigt; in erster Näherung ist

$$L \sim N^2 P$$

für die Art der hier verwendeten Spulen. Das erhöht den induktiven Widerstand $R_L = \omega L$, der durch einen kleineren Kondensator im Schwingkreis egalisiert werden kann. An diesem Kondensator können allerdings Spitzenspannungen

$$U_C = U_0 \cdot \frac{R_L}{R}$$

$U_0 =$ eingespeiste Spannung

auftreten, die bis zu 2000 V betragen können.

2.3.2 Stabile Primärfeldkompensation

Die vom Sendefeld direkt in den Empfängerspulen induzierten Spannungen werden mit Hilfe von Kompensationsspulen, die nur $1/3$ des Abstandes vom Sender haben, weggemittelt. Durch kleinere Verbiegungen der Kevlarrohre oder durch kleinste Verrückungen einer der Spulen eines Sensorsystems wird die einmal eingestellte Kompensation gestört; es entsteht ein Meßsignal, das das vom zu messenden Sekundärfeld verursachte Signal verfälscht. Solchen „internen“ Störungen kann durch extreme mechanische Stabilität der Spulenpositionen entgegengewirkt werden. Die Grundlage dafür bildet die sehr biegesteife Kevlarrohre; die horizontalen Spulen werden bei der neuen Flugsonde nicht mehr einzeln, sondern in Gruppen auf einen stabilen, aber schweren Sperrholzrahmen montiert, der an der Kevlarwand befestigt ist. Insofern wird hier eine bewährte Technik weiterverwendet, um die Zahl der Entwicklungsrisiken zu beschränken.

2.4 Neukonzeption der Eichung

Die eingangs genannten Probleme mit der Eichung und der Phaseneinstellung am Gerät sollen mit einem neuen Konzept, das in Teilen schon in Hannover realisiert und erprobt worden ist, beseitigt werden. Bisher werden kleine, sehr nahe an den Empfängerspulen angebrachte Eichspulen verwendet, die während des Fluges gleichzeitig kurz eingeschaltet werden, indem ihre Enden durch einen Widerstand überbrückt werden. Eine genaue Berechnung dieses (komplexwertigen) Eichsignals ist offensichtlich nicht möglich, zumal im Prinzip in allen Eichspulen durch ein und dieselbe Sendespule Ströme induziert werden (natürlich in sehr unterschiedlicher Stärke), sodaß das Eichsignal am zugehörigen Empfänger aus der Summe der Signale von allen Eichspulen besteht. Dieses, während des Fluges in größerer Höhe beliebig oft wiederholbare „interne“ Eichsignal ist also zunächst unbekannt. Es wird aber dadurch bestimmt, daß es mit dem Signal einer großen „externen“ Eichspule verglichen wird, deren Eichsignal berechnet werden kann. Sehr störend kann allerdings dabei die Kopplung mit einem leitenden Untergrund sein, sodaß die Eichung über möglichst schlechtleitendem Untergrund stattfinden sollte, der in der Nähe eines Meßgebietes häufig nicht zu finden ist. Eine ähnliche Kopplung findet auch mit dem eingangs erwähnten Ferritstab statt, der für die täglich notwendige Einstellung der Phasenaufspaltung benötigt wird.

Meine neue Konzeption beinhaltet, daß die externe Eichung und Phaseneinstellung am Boden ersetzt wird durch zwei Formen von Eichsignalen, die während des Fluges in größerer Höhe - ohne Kopplung mit der leitenden Erde - erzeugt werden.

Dazu werden im Raum zwischen Kompensations- und Empfängerspulen fünf große, rechteckige Eichspulen fest installiert, deren Eichsignal für die zugehörige Frequenz genau berechnet werden kann. Zur Eichung wird jeweils nur eine Spule eingeschaltet.

Das Eichsignal berechnet man angenähert für kleine Eichspulen, deren \emptyset klein gegenüber den vorkommenden Spulenträgern r_{ij} ist, nach folgender Formel:

$$E / \text{ppm} = KD(1-q)T$$

mit

$$K = 0,1 N_4^2 F_4^2 / L_4$$

$$D = \left(\frac{r_{12}}{r_{14} r_{42}} \right)^3$$

$$q = \frac{F_3 N_3^3 r_{42}^3}{F_2 N_2^3 r_{43}^3}$$

$$T = Q_L \frac{(Q_L - Q_C) + i}{1 + (Q_L - Q_C)^2}$$

und mit folgender Zuordnung der Indizes zu den Spulenarten: 1 = Sende-, 2 = Empfänger-, 3 = Kompensations- und 4 = Eichspule; r_{42} = Mittelpunktsentfernung Spule 4 - Spule 2 usw.,
F, L und N = Fläche, Selbstinduktivität und Windungszahl einer Spule sowie

$$Q_L = \frac{\omega L_4}{R_4}$$

$$Q_C = \frac{1}{\omega C_4 R_4}$$

also die Verhältnisse von induktivem/kapazitivem Widerstand im Eichkreis zum ohmschen Widerstand R_4 des Kreises. Dieser besteht aus dem Innenwiderstand R_i der Spule und einem Vorschaltwiderstand R_+ , d. h.

$$R_4 = R_i + R_+$$

Typ A der Eichung:

Der Kondensator C_4 wird überbrückt ($Q_C = 0$) und R_4 so gewählt, daß $\omega L_4 = R_4$ bzw. $Q_L = 1$. Dann wird der Realteil von $T = \text{Re}(T) = 0,5$,
Imaginärteil von $T = \text{Im}(T) = 0,5$
und entsprechend $\text{Re}(E) = \text{Im}(E)$.

Typ B der Eichung (Phaseneinstellung):

Der Kondensator C_4 wird mit einem in Reihe geschalteten Widerstand R_{++} anstelle von R_+ in den Kreis der Eichspule geschaltet. C_4 ist so dimensioniert, daß $Q_C = Q_L$ wird. Damit wird der obige Faktor T

$$T = iQ_L = \frac{i\omega L}{R_i + R_{++}}$$

d. h. der Eichausschlag hat nun nur eine Quadrature-Komponente, während seine Inphase-Komponente zu Null wird. Wenn trotzdem am Gerät eine kleine Inphase-Komponente erscheint, liegt ein Fehler der Phaseneinstellung, d. h. der Aufspaltung in 0° - und 90° -Phase, bezogen auf die Phase des Primärfeldes, vor. Da nun die Phaseneinstellung in großer Flughöhe - ohne störendes Sekundärfeld - vorgenommen werden kann, ist mit einer Erhöhung der Meßgenauigkeit zu rechnen. Der Eichvorgang wird vom Hubschrauber aus so gesteuert, daß immer nur die Eichspule einer Frequenz aktiviert wird, und zwar entweder für die Phaseneinstellung oder die Amplitudeneichung.

2.5 Erhöhung der Abtaste

Die Abtaste der EM-Meßwerte soll von 4 auf 10/sec gesteigert werden. Damit sollen auch die kleinräumigen Anomalien, die von kleinen Objekten der Altlastenerkundung und geringen Meßflughöhen erwartet werden, hinreichend erfaßt werden. Die Abtaste 10/sec entspricht einer Meßpunktentfernung von 2 - 4 m.

Die höhere Abtaste verbessert auch die Möglichkeit, hochfrequente Störsignale durch Tiefpaßfilter zu entfernen, bzw. einzelne Ausreißer (sferics) zu erkennen und zu eliminieren.

2.6 Installation des GPS-Systems in die Flugsonde

Da die Flugsonde an einem knapp 50 m langen Kabel liegt, kann sie Pendelschwingungen mit relativ großer Amplitude ausführen. Da bisher die GPS-Antenne am Hubschrauber befestigt ist, d. h. die Position des Hubschraubers bestimmt wird, beeinträchtigen die Pendelschwingungen die Positionierungsgenauigkeit der EM Meßdaten mit Fehlern um 10 m, die insbesondere bei einer Altlastenerkundung unerwünscht sind. Diese Fehler entfallen bei einer Installation der GPS-Antenne (+ Verstärker bzw. Receiver) in die Flugsonde. Damit sollte auch ein gelegentlich auftretender Schwund der Satellitensignale entfallen, der bei bestimmten Einfallswinkeln der Signale möglicherweise durch die laufenden Rotoren verursacht wird.

3. Realisierung des Projekts

Die beschriebenen Entwicklungsarbeiten werden auf der Grundlage der beschriebenen Vorgaben von der Firma Dighem/Power in Mississauga bei Toronto, Kanada, ausgeführt. Schwierigkeiten traten bisher z. B. bei der Herstellung kompakter rechteckiger Spulen auf, sowie der Kompensation des Primärfeldes (Frequenz 1792 Hz und 195 kHz) und der Kabelübertragung von 195 kHz-Signalen von der Sonde zur Elektronik im Hubschrauber. Auch die Positionierung der Eichspulen mußte revidiert werden, da die Selbstinduktivitäten der fertigen Spulen größer ausfielen als abgeschätzt. Z. Zt. (Sept. 96) sind noch Labortests im Gange, die Auslieferung der neuen Sonde ist für Dezember 96 vorgesehen.