

Vortrag Dr. Wienert, Fürstenfeldbruck

Registrierinstrumente für erdmagnetische Tiefensondierung.

I. Grundsätzliche Forderungen.

Den Darstellungen der Vorredner ist zu entnehmen, daß an die Registrierinstrumente, die zum Einsatz kommen sollen, erhebliche Anforderungen gestellt werden, Anforderungen, die mit Mühe und Not in einem gut gepflegten Observatorium erfüllt werden können.

Unsere Vorstellungen von den Fehlern eines einer Normalregistrierung entnommenen Wertes sind von den 02 Uhr GMT-Vergleichen der mitteleuropäischen Observatorien an ruhigen Tagen und von den Vergleichen zwischen mehreren Variometersystemen an einem Observatorium geformt worden. Es treten Fehler des Absolutniveaus bis zu $\pm 2\gamma$ auf, die gelegentlich bis zu $\pm 5\gamma$ ansteigen können. Die relative Änderung des Niveaus eines Variometers von Tag zu Tag mag etwas geringer sein. Die Sicherheit des Niveaus eines Variometers über mehrere Stunden liegt bei $\pm 0,5\gamma$ und sinkt an mäßig gestörten Tagen auf $\pm 1\gamma$ ab.

Voraussetzung für die Erreichung dieser Genauigkeiten ist nicht nur die Temperaturkompensation der Variometer, sondern in weit höherem Maße die Temperaturkonstanz der Variometerräume. Weiterhin müssen die Variometer "richtig" aufgestellt sein, d.h., die Variometermagnete dürfen nicht mehr als 0.3 bis 0.5° von der Soll-Lage abweichen. Die Variometermagnete müssen nach dem am ungestörten Ort der Beobachtung geltenden magnetischen Meridian ausgerichtet werden. Werden die Variometer in magnetisch gestörten Gebäuden aufgestellt, so ist der ungestörte magnetische Meridian abseits vom Gebäude zu bestimmen, durch einen Polygonzug in den Variometerraum zu übertragen und zu vermarken.

Die Aufstellung der Variometer in unbewohnten Gebäuden oder abseits von bewohnten Gebäuden (in 100 Metern Abstand) ist anzustreben. Es ist zwar fast immer zu erkennen, wann in einem Gebäude magnetische Gegenstände bewegt wurden und wie groß die Versetzung in den Komponenten war. Wenn jedoch eine Reihe solcher Versetzungen stattgefunden hat können sich die Fehler summieren.

Die notwendige Empfindlichkeit der Variometer sollte nicht so sehr durch die Astasierung der Variometermagnete, sondern durch lange Lichtwege erreicht werden. Dadurch werden bei großen Variationen die Abweichungen der Magnete von der Soll-Lage klein gehalten. Die gegenseitige Beeinflussung der Variometer bleibt dann ebenfalls klein.

Werden photographisch registrierende Variometer geplant, so verdienen Konkavspiegel Beachtung. Oberflächenversilberte sphärische Spiegel (Spindler und Hoyer) genügen allen Anforderungen. Die Variometerabstände vom Registrierapparat sollen so gewählt werden, daß gängige Krümmungsradien verwendet werden können, da Sonderanfertigungen teuer sind. Konkavspiegel ergeben außerordentlich scharfe Spuren bei wenig Licht. Darum wird gute zeitliche Auflösung bei geringem Papiervorschub, bzw. bessere Zeitauflösung bei gegebenem Vorschub erzielt.

Aus der Diskussion ergab sich eine Reihe von speziellen Anforderungen, die an die Normalregistrierung zu stellen sind:

- a) Kennzeichnung der Variometerspuren etwa durch Auslenkung der Variometerspuren über Helmholtzspulen zu verschiedenen Zeiten über die Kontaktuhr.
- b) Kennzeichnung mindestens der Stunde 0000 Uhr und unter Umständen auch der Stunde 1200 Uhr, etwa durch ausfallende, besonders starke oder doppelte Zeitmarken. Dadurch wird die Beschriftung der Magnetogramme sehr erleichtert, und Zählfehler können sich nicht beliebig weit fortpflanzen.
- c) Es besteht Klarheit darüber, daß erhebliche Anforderungen an die zeitmarkengebende Uhr zu stellen sind, die sich schwer erfüllen lassen. Normalregistrierungen sollen es ermöglichen, daß Pulsationen bis herunter zu einer Periode von 2 - 3 Minuten entnommen werden. Dafür sind Skalenwerte von 2 - 3 $\frac{1}{7}$ mm erforderlich. Für die Vertikalintensität werden noch geringere Skalenwerte verlangt. Stürme können bei solchen Skalenwerten nicht mehr ausgewertet werden. Die Apparatur soll 3 bis 4 Wochen ohne Wartung laufen.

Die Spezifikationen für eine Pulsationsapparatur wurden nicht mit der für die Normalregistrierung erreichten Schärfe herausgestellt. Die Göttinger Grenet-Apparatur scheint kaum Wünsche

offen zu lassen was die Ausbeute anbetrifft. Jedoch bestand Einigkeit darüber, daß Ausschau nach einer weniger aufwendigen Anordnung gehalten werden sollte.

II. Klassische Normalstationen.

1) Variometer von Schmucker.

Die Geräte haben für die erste Erkundung vorzügliche Dienste geleistet. Das Z-Variometer hat einen zu kleinen Lichtweg (80 cm). Es wird eine Aufstellung vorgeschlagen, bei der die Variometer für D und H in etwa 1.75 m Entfernung stehen während das Z-Variometer dahinter etwa in 2.25 m Entfernung vom Registrierapparat steht.

Die fehlende Temperaturkontrolle macht die Variometer für eine Untersuchung von S_q -Gängen wenig geeignet. Es ist möglich, die Variometer einzeln in kleine Behälter einzukapseln und getrennt zu beheizen. Eine solche Anlage ist nicht sehr handlich.

Die "richtige" Aufstellung getrennter Variometer ist sehr umständlich und kann trotz aller Sorgfalt fehlerhaft sein, weil eine durchgreifende Kontrolle mit parallelen Absolutmessungen nicht möglich, oder doch mindestens sehr zeitraubend ist. Weiterhin sind solche Stationen immer an feste Gebäude gebunden.

2) Der Askania-Variograph.

Der Askania-Variograph ist die kompakteste Normalstation, die kommerziell zu haben ist. Das Instrument ist netzabhängig. In seinen Leistungen kommt der Variograph fast an einen in einem Observatorium eingebauten Satz von Variometern heran. Der Thermostat, dessen Temperatur in einem großen Bereich wählbar ist, beseitigt bei mäßigem Stromverbrauch alle Probleme, die mit Temperaturänderungen zusammenhängen.

Die Variometer sind vororientiert. Die Anwendung komplizierter Justier- und Prüfverfahren ist nicht notwendig. Der Variograph ist für die Registrierung der D, H und Z-Komponente eingerichtet. Von einer X, Y, Z-Registrierung muß abgeraten werden, weil das Instrument dafür nicht eingerichtet ist. Dazu kommt, daß die Bestimmung des astronomischen Meridians zeitraubend und mit umständlichen Rechnungen verbunden ist.

Die Skalenwerte der Variometer sind von 2 - 3 μ /mm ab frei wählbar. Bei kleineren Skalenwerten sind Stürme nicht auswertbar. Die Registrierspuren sind scharf und gestatten Pulsationen bis herunter zu Perioden von 2 bis 3 Minuten besonders bei Re-Registrierung auf Schmalfilm auszuwerten.

Als Nachteil ist zu nennen, daß die Fäden des Z-Variometers vorgespannt sind. Das führt meist zu erheblichen Basisstandänderungen, die unter Umständen so groß sind, daß die Z-Spur herausläuft. Dieser Nachteil kann dadurch behoben werden, daß der Magnet nicht im Schwerpunkt aufgehängt wird.

Im Winter können bei wiederholtem Frieren und Tauen des Bodens Neigungen eintreten, wodurch unter Umständen die Variometermagnete am Gehäuse anliegen. Diesem Übelstand wird am besten dadurch abgeholfen, daß etwa 50 cm lange Pflöcke in den Boden gerammt werden, auf die die Füße des Variographenstativs gestellt werden.

Variographen können leicht abseits von Gebäuden in kleinen zusammenlegbaren Hütten aufgestellt werden.

Drei Instrumente haben in einem sechsjährigen dauernden Einsatz wenig Anlaß zu Klagen gegeben.

3) Kompensierende Variometer.

a) Proportional regelnde Variometer.

Ein Ausschlag des Variometermagneten ändert die Spannung an der Differentialphotozelle. Die Spannung der Photozelle wird verstärkt und einer Helmholtzspule zugeführt, deren Achse in Richtung der zu registrierenden Komponente liegt. Der Magnet wird fast in die alte Lage zurückgeführt. Das Verhältnis der Winkelbewegung des geregelten Magneten zur Winkelbewegung des ungeregelten Magneten soll zwischen 1:10 bis 1:100 betragen. Verhältnisse die größer sind als 1:10 führen zu unsymmetrischen Ausschlägen. Der Gleichstromverstärker und die Photozellen müssen streng linear sein.

b) Integral regelnde Variometer.

Eine Abweichung des Magneten von der Soll-Lage wird sofort über Differentialphotozelle, Verstärker und mechanisches Stellglied

berichtigt. Zur Aufzeichnung kann ein Kompensationsschreiber, der Verstärker und mechanisches Stellglied enthält, mit großen Nutzen angewendet werden.

Die Anforderungen an die Linearität des Verstärkers und der Photozellen sind verhältnismäßig gering. Dagegen muß das Potentiometer linear sein.

Regelnde Variometer verdienen besondere Beachtung, weil die Variometermagneten stets sehr nahe der Soll-Lage bleiben. Deshalb treten bei großen Variationen (besonders in der Horizontalintensität) nicht die bei klassischen Variometern zu beobachtenden Fehlanzeigen auf. Registriert wird der Regelstrom oder der an einem Normalwiderstand zu beobachtende Spannungsabfall. Dadurch wird die Verwendung einer größeren Anzahl von Registrierverfahren ermöglicht. Die Empfindlichkeit kann wesentlich höher gewählt werden als bei gewöhnlichen Variometern, ja soweit gesteigert werden, daß auch Pulsationen mit genügender Amplitude aufgezeichnet werden können. Bemerkenswert ist die starke Verkürzung der Periode gegenüber Variometern üblicher Bauart (Rückkoppelung), was den Gedanken nahelegt, Normal- und Pulsationsregistrierung zu vereinigen. Liegt die Untergrenze der kürzesten noch aufzulösenden Perioden bei 40 bis 50 Sekunden, so können bei verhältnismäßig geringem Papiervorschub Variationen und Pulsationen gemeinsam aufgezeichnet werden. Es ist für eine große Registrierbreite zu sorgen. Servoschreiber besorgen die Versetzung der Spur automatisch. Bei photographischer Registrierung mit Galvanometern sind Reservelichtpunkte vorzusehen.

Sollen Pulsationen und Variationen getrennt werden, was bei höheren Anforderungen an die Zeitauflösung der Pulsationsregistrierung nicht zu vermeiden ist, so stehen Verfahren zur Verfügung, die die Trennung schon an der Station besorgen, als auch solche, bei denen die Trennung nachträglich in der Auswertung vorgenommen werden kann.

Ein Registriersystem, das die Trennung von Pulsationen und Variationen auf der Station vornimmt, besteht aus einem proportional regelnden Teil mit kleiner Zeitkonstante, der die Pulsa-

tionen auf einem papiersparenden Schrieb aufzeichnet (Spirale), während der integral regelnde Teil mit großer Zeitkonstante die Variationen aufzeichnet. Bei Tonbandaufzeichnungen wird die Trennung in einem Auswertegerät vorgenommen, das nach ähnlichen Prinzipien arbeitet wie die soeben beschriebene Anlage. Interessante Teile der Registrierung können gedehnt werden. Leider kommt man auch bei knapp bemessenem Tonbandvorschub zu phantastischen Tageslängen. Bei digitaler Aufzeichnung werden die Tageslängen zwar kleiner, dafür steigt aber der elektronische Aufwand sowohl bei der Registrierung als auch bei der Auswertung stark an.

Kompensierende Variometer sind ideal für eine X,Y,Z-Registrierung, weil alle Anforderungen bezüglich der Aufstellung in Strenge erfüllt werden können. Die eingangs erwähnten Schwierigkeiten bei der "richtigen" Aufstellung bleiben erhalten. Transistorisierte Elektronik muß sorgfältig ausgelegt werden, damit durch Temperaturänderungen keine Fehler entstehen. Am besten wird die gesamte Anlage temperaturkontrolliert.

Die räumliche Anordnung der Variometer muß weitläufiger sein, als bei den üblichen Variometern, weil die Spulenfelder eine gegenseitige Beeinflussung der Variometer hervorrufen. Bei enger Aufstellung sind Korrekturwicklungen notwendig, durch die Anteile der Regelströme der anderen Variometer geführt werden.

Es wird sich bei den kompensierenden Variometern um komplexe Anlagen handeln, die umständlich in der Aufstellung sein werden. Bis zu einer feldeinsatzfähigen Anlage wird noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten sein.

4) Registrierende Protonen- und Elektronenpräzessionsmagnetometer.

Magnetometer oder Variometer dieser Art sind absolut. Eichungen und Vergleiche sind nicht notwendig. Die Konstanten können aus Naturkonstanten und Konstanten der Elektronik am Schreibtisch errechnet werden. Die Naturkonstanten sind in normalen Bereichen temperaturunabhängig, während die Elektronik teilweise unter Temperaturkontrolle gehalten werden muß. Die Auflösung kann beim Protonenpräzessionsmagnetometer (linear) bis auf $\pm 0.1\%$, beim Rubidiummagnetometer (nichtlinear) und metastabilen Heliummagnetometer (linear) bis auf $\pm 0.02\%$ getrieben werden. Die Meßfühler

sind verhältnismäßig unkritisch in der Orientierung und geben grundsätzlich nur die skalare Größe des erdmagnetischen Feldes. Durch Zusatzfelder werden sie zu Vektormagnetometern.

Präzessionsmagnetometer, speziell Protonenpräzessionsmagnetometer, können nicht an jedem beliebigen Platz aufgestellt werden. Vor der Aufstellung ist an dem in Aussicht genommenen Ort durch Probebeobachtungen zu prüfen, ob das magnetische Feld genügend homogen ist, und ob die Störungen durch das Wechselstromnetz genügend klein sind. Im inhomogenen Feld wird die transversale Relaxationszeit stark verkürzt, und bei Wechselstromstörungen wird das Signal-Störverhältnis für genaue Messungen zu klein.

Das Protonenpräzessionsmagnetometer.

Die Meßwerte fallen diskontinuierlich an. Für die volle Ausnutzung der Genauigkeit und für eine schnelle Auswertung durch elektronenrechner ist die digitale Registrierung notwendig. Zur Zeit liegt die Grenze der relativen Genauigkeit bei $\pm 0.1\%$, während die Absolutgenauigkeit wegen der begrenzten Genauigkeit des gyromagnetischen Verhältnisses und der Unbestimmtheit des Abklügens der Signalamplitude bei $\pm 0.5\%$ liegt.

Das Prinzip des Magnetometers ist inzwischen so bekannt geworden, daß darüber nichts gesagt zu werden braucht. Es sind mehrere Instrumente kommerziell verfügbar. Darüber hinaus bereitet der Eigenbau keine wesentlichen Schwierigkeiten.

Es wurde schon gesagt, daß das Magnetometer die skalare Größe des geomagnetischen Vektors mißt. Für die Komponentenmessung müssen Zusatzfelder benutzt werden. Beim Nelson-Hurwitz-Verfahren wird die Resultierende in Richtung der zu messenden Komponente gedreht. Dieses Verfahren hat den Nachteil, daß in unseren Breiten bei der Horizontalintensität ein kleiner Wert zu messen ist. Das Protonensignal hat nur eine kleine Amplitude. Die Justierbedingungen sind kritisch und in der Nähe des Äquators und des Pols versagt das Verfahren ganz. Dagegen ist das Bacon-Allredge-Verfahren universell anwendbar. Der kleinste zu messende Wert ist die am Meßort herrschende Totalintensität. Die Fehlergleichungen für die Komponentenbestimmungen haben Koeffizienten, die ≤ 1 sind. Die Berechnung der Komponenten ist in aller Strenge möglich.

Das Gerät besteht aus zwei ineinandergeschachtelten Helmholtzspulen (besser Fanselauspulen), deren Zentren zusammenfallen. Die magnetische Achse einer der beiden Spulen (ΔJ - Spule), liegt in der Vertikalebene, die den mittleren Vektor des geomagnetischen Feldes am Beobachtungsort (Inklination J_0 , Deklination D_0) enthält, und bildet mit dem Vektor einen rechten Winkel. Die magnetische Achse der zweiten Spule (ΔD - Spule) steht senkrecht auf der magnetischen Achse der ersten Spule. Im gemeinsamen Zentrum der beiden Spulen befindet sich der Meßkopf. Die Justierung der Helmholtzspulen erfordert große Sorgfalt. Geeignete Justier- und Prüfverfahren können angegeben werden.

Zunächst wird F gemessen. Dann wird die ΔJ - Spule mit einem Strom beschickt und die Resultierende F_+ ermittelt. Nach Umkehr des Spulenstromes wird F_- bestimmt. In Wirklichkeit werden die Zählungen n , n_+ und n_- beobachtet. Es ist

$$F = \frac{C}{n} \qquad F_+ = \frac{C}{n_+} \qquad F_- = \frac{C}{n_-}$$

C ist eine Konstante, die sich aus dem gyromagnetischen Verhältnis und den Konstanten des Zählfrequenzmessers zusammensetzt.

$$\Delta J = \frac{F_+^2 - F_-^2}{4FA} = \frac{F_+^2 - F_-^2}{2\sqrt{2} F \sqrt{F_+^2 + F_-^2} - 2F^2}$$

In derselben Weise wird mit Hilfe der ΔD -Spule ΔD bestimmt. Der Ausdruck auf der rechten Seite ist dann noch mit $\sec J_0$ zu multiplizieren. Das Spulenfeld A braucht nicht bekannt zu sein, muß aber bei den beiden zusammengehörigen Messungen auf $2 \cdot 10^{-5}$ konstant bleiben.

Es läßt sich zeigen, daß die Rechnung wesentlich vereinfacht werden kann, wenn $A = \sqrt{2} \cdot F$ gemacht wird. In diesem Falle übt eine Änderung von F über große Bereiche und eine Änderung von A über 10% keinen wesentlichen Einfluß auf ΔJ und ΔD aus. Es kann gesetzt werden

$$\Delta J = C'(n_+ - n_-) \qquad \Delta D = C'(n_+ - n_-) \sec J_0$$

worin C' eine Konstante ist, die die Differenz der Zählungen in Bogenminuten und deren Dezimalteile verwandelt.

Es ist weiter für Elektronenrechner

$$Z = F \sin (J_0 + \Delta J) \quad H = F \cos (J_0 + \Delta J)$$

und falls eine Analogdarstellung erwünscht ist über Analogrechner

$$\Delta Z = \sin J_0 \Delta F + \cos J_0 \Delta J \quad H = \cos J_0 \Delta F - \sin J_0 \Delta J$$

Eine weitere Vereinfachung kann dadurch erreicht werden, daß n_+ vorwärts und n_- rückwärts gezählt wird. Dadurch geht jedoch die Möglichkeit verloren die Konstanz von A zu prüfen.

Der Meßvorgang wird so eingeteilt, daß pro Minute je ein Meßwert von F, ΔJ und ΔD anfällt. Der Strom der Helmholtzspulen wird durch einen automatisch abgleichenden Kompensator konstant gehalten. Ein Programmwähler, der von einer Quarzuhr gesteuert wird, sorgt für die notwendigen Umschaltungen. Die Werte werden für die unmittelbare Inspektion des Gerätes auf einem Blatt ausgedruckt und für den elektronischen Rechner auf Lochstreifen gestanzt. Es brauchen nur die letzten 4 Stellen der Zählungen registriert zu werden. Die fehlenden konstanten Stellen werden im Elektronenrechner hinzugefügt. Dann ergibt sich pro Tag eine Lochstreifenlänge von etwa 100 Metern. Lochstreifen können auf 1000 Meter- oder größeren Vorratsrollen gehalten werden.

Eine solche Anlage ist bereits in mehreren Exemplaren, wenn auch mit unzureichender Genauigkeit, im Betrieb gewesen (Shapiro, Heppner und Stolarik). Es läßt sich nicht verschweigen, daß das Gerät außerordentlich komplex wird. Bei aller bestechenden Genauigkeit hat das Gerät einen schwerwiegenden Nachteil. Es entnimmt nur Stichproben. Eine engere Wertfolge läßt aber das anfallende Lochstreifenmaterial zu unhandlichen Dimensionen anschwellen. Darüber hinaus ist eine Verdichtung der Meßwerte höchstens um den Faktor drei möglich, weil sonst nicht mehr die erwünschten Genauigkeiten erreicht werden können.

Elektronenpräzessionsmagnetometer.

Dieser Magnetometertyp kann kontinuierliche Werte geben. Es werden relative Genauigkeiten von $\pm 0.02\%$ erreicht. Die Einstellungsgeschwindigkeit der inneratomaren Vorgänge liegt bei $1 \cdot 10^{-4}$ Sekunden. Die Trägheit der Servoschreiber begrenzt jedoch die

zeitliche Auflösung auf Bruchteile einer Sekunde. Die Rubidiummagnetometer (Rubidium⁸⁵ und Rubidium⁸⁷) sind selbstschwingende Magnetometer. Die Frequenzänderung mit dem magnetischen Feld ist nicht streng linear, weil die Rubidiumatome Kernmomente haben, die auf die Elektronenhülle einwirken. Die Larmorfrequenz liegt bei 300 und 400 kHz ($F=0.5\Gamma$). Beim metastabilen Heliummagnetometer, dessen Frequenz bei 1.4 MHz liegt, muß der Hochfrequenzgenerator moduliert und nachgesteuert werden, weil es keine Photozellen gibt, die so hohe Frequenzen anzeigen können.

Die drei Magnetometertypen beruhen auf demselben Prinzip, Die Atome, die sich zusammen mit einem Puffergas in einer Absorptionszelle befinden, werden mittels zirkular polarisierten Lichtes (optisches Pumpen) angeregt. Beobachtet werden die Übergänge zwischen dem Grundzustand und einem naheliegenden angehobenen Energieniveau. Die Polarisation wird von einer Photozelle angezeigt, die auch die Erregung bzw. die Nachsteuerung des de-polarisierenden Hochfrequenzgenerators besorgt. Die Ausgangsfrequenz, d.h., die Larmorfrequenz, wird mit einer Quarzfrequenz überlagert. Die Differenzfrequenz wird mittels kommerzieller Frequenzschreiber aufgezeichnet.

Da bei diesen Magnetometern die Absorptionszellen wesentlich kleiner ausfallen als die Protonenproben bei Protonenpräzisionsmagnetometern, eignen sie sich sehr gut auch für Vektormagnetometer der oben beschriebenen Art. Die Helmholtzspulen können einen erheblich kleineren Durchmesser haben als bei Protonenmagnetometern, da das homogene Feld sich nur über einen kleinen Raum von 50 bis 60 cm³ zu erstrecken braucht.

Die hohe Auflösung der Magnetometer fordert dazu heraus, sie für die Registrierung der Pulsationen einzusetzen. Wenn man nur die Pulsationen der skalaren Größe des geomagnetischen Feldes aufzeichnet, kann allein Pulsationsstatistik getrieben werden. Damit ist bei der geomagnetischen Tiefensondierung wenig anzufangen. Für Vektormagnetometer des Bacon-Alldredge-Typs müssen aber die Zusatzfelder auf 10^{-6} konstant gehalten werden. Solche Einrichtungen erfordern einen erheblichen Aufwand und sind nach dem augenblicklichen Stand kaum feldbrauchbar.

Abschließend ist zu sagen, daß zwar zur Zeit schon alle Möglichkeiten vorhanden sind, Registriersysteme aufzubauen, die der automatischen Datenverarbeitung förderlich sind und die einen hohen Grad von Genauigkeit erreichen. Jedoch sind die neuen Methoden nicht auf dem hohen Stand von Reife angelangt, der von den klassischen Methoden in Gestalt des Variographen erreicht wurde. Darüber hinaus müssen sich die Bearbeiter zunächst an die abstrakte Registrierung in Form von Magnetbändern und Lochstreifen gewöhnen, ehe fortschrittliche Methoden der Datenverarbeitung voll zum Tragen kommen können. Dennoch sollte die Entwicklung solcher Apparaturen vorangetrieben werden, damit ein langsamer Übergang erfolgen und in Zukunft in großen Mengen anfallendes Beobachtungsmaterial überhaupt verarbeitet werden kann.