SUB | NIEDERSÄCHSISCHE STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK GÖTTINGEN

Werk

Jahr: 1957

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 Z NAT 2148:23

Werk Id: PPN101433392X_0023

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PID=PPN101433392X_0023|LOG_0049

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.
Each copy of any part of this document must contain there Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.
Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Methoden zur Bestimmung der räumlichen Gradienten des geomagnetischen Feldes [1]

Dt. Ak. d. Wiss. zu Berlin, Geomagn. Inst. Potsdam, Mitteilung Nr. 60

Von H. Schmidt, Potsdam-Niemegk [2]

Zusammenfassung: Es wird eine Diskussion der Methoden zur Bestimmung räumlicher Gradienten des geomagnetischen Feldes speziell im Hinblick auf kontinuierliche Registrierung gegeben. Zwei neue Gradiographen, die mit Differenzkompensation oder Stromsubtraktion arbeiten, werden beschrieben. Weiterhin gibt die Arbeit einen Ausblick auf Möglichkeiten der drahtlosen Registrierung.

Abstract: The paper discusses the methods for determining space gradients of the geomagnetic field particularly in regard to continuous recording. The new devices (gradiograph with difference-compensation or current-subtraction) are described. Possibilities of wireless recording are indicated.

I. Einleitung

Bereits vor etwa 20 Jahren wurde von *Chapman* [1] in einer ausführlichen Arbeit über die räumlichen Gradienten des Erdmagnetfeldes der Wunsch ausgesprochen, diese Größen kontinuierlich zu registrieren und auf die Fülle neuer Erkenntnisse hingewiesen, die das Registriermaterial bringen würde. Es scheint, daß es erst der arbeitstechnischen Impulse des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 bedurfte, die Schaffung derartiger Apparaturen, die im Vergleich zu sonstigen erdmagnetischen Geräten recht kostspielig sind, in Angriff zu nehmen. Das Fehlen jeglicher Dauerregistrierungen mag in den Schwierigkeiten begründet liegen, $10^{-6}\ \gamma/\mathrm{cm}$ nachzuweisen und stabil zu registrieren.

Die Beweggründe für eine kontinuierliche Registrierung der räumlichen Gradienten, die in [1] zum Teil ausführlich dargelegt werden, sind folgende:

1. Phänomenologische Information über den Ablauf flüchtiger örtlicher Inhomogenitäten mit dem Ziel, diese Effekte mit anderen geophysikalischen oder solaren Erscheinungen zu korrelieren

[1] Vortrag gehalten auf der Meteorologen-Geophysiker-Tagung 1956 in Hamburg. Abschnitt III.7 sowie einige Literaturzitate wurden nachträglich ergänzend eingefügt.

[2] Dr. Herbert Schmidt, Geomagn. Inst. d. Dt. Ak. d. Wiss., Potsdam, Telegrafenberg.

2. Abschätzung der Intensität und Lage ionosphärischer Stromgebiete
3. Prüfung der Vektorbeziehungen

$$\text{rot } \mathfrak{H} = 4\pi \mathfrak{i} \qquad \text{und} \qquad \text{div } \mathfrak{H} = -\frac{H_z}{\mu}\frac{d\mu}{dz}$$

(mit $\mathfrak{H}$ als Vektor der magnetischen Feldstärke, H_z dessen Z-Komponente, $\mathfrak{i}$ als Stromdichte und μ als Permeabilität) mit dem Ziel, die Frage nach der Existenz eines potentiallosen Anteils des Erdfeldes zu beantworten
4. Untersuchung des luftelektrischen Vertikalstromes auf magnetischem Wege
5. Ermittlung von Leitfähigkeitsanomalien des Untergrundes sowohl vom rein wissenschaftlichen wie auch vom praktischen Standpunkt aus.

Es sind somit Fragen von grundsätzlicher Bedeutung, die der Bearbeitung durch Gradientenuntersuchungen harren. Diese Erkenntnis mag *Chapman* [1] bewogen haben, eine gewisse Anzahl von Observatorien, die sowohl Komponenten als auch örtliche Gradienten zu registrieren in der Lage sind, für weitaus ertragreicher zu halten, als die doppelte Zahl von Observatorien, die nur Komponenten aufzeichnen.

Vom Informationswert her betrachtet steht die Registrierung der örtlichen Gradienten der Komponentenregistrierung keineswegs nach. Es wäre zu wünschen, daß die Auswertungsmethodik der letztgenannten mit der gleichen Intensität und Ausdauer auf die der örtlichen Gradienten übertragen würde. Die bewährten Verfahren der Aktivitätskennzeichnung durch Charakterzahlen lassen sich mit geringfügigen Änderungen direkt übernehmen.

Der Inhalt dieses Vortrages erstreckt sich nur auf geomagnetische Meßmethoden, bei denen besonderer Wert auf die Erfassung sehr kleiner Feldstärkedifferenzen bei kilometerweit entfernten Meßpunkten gelegt werden muß. Auf die Wiedergabe der für hohe Felder geeigneten Methoden (Kernphysik) wird verzichtet.

Den ersten Anlaß zur Beschäftigung mit dieser Materie gab ein von Prof. *Fanselau* im Jahre 1953 gehaltener Vortrag über Inhomogenitäten von Magnetfeldern, in dem die Höhenbestimmung stromführender Schichten aus geomagnetischen Beobachtungen behandelt wurde.

II. Die an eine Gradiographenanlage zu stellenden Forderungen

Anlagen zur kontinuierlichen Registrierung der örtlichen flüchtigen Gradienten (Gradiographen) sollten folgende Forderungen erfüllen:

1. Es muß eine simultane Feldstärkedifferenzbildung gewährleistet sein.

Die Differenzbildung soll kontinuierlich erfolgen und nicht erst nachträglich aus getrennten Registrierungen der Feldstärken an den Basispunkten.

2. Die zeitlichen homogenen Variationen sollen weitgehend eliminiert werden.
3. Es soll eine Differenzbildung von mehr als zwei Außenstationen möglich sein.
4. Die Empfindlichkeit der Gradiographen möge wenigstens 10^{-6} γ/cm betragen.
5. Die Nullpunktsstabilität soll möglichst eine Dezimale besser sein als die unter 4. angegebene Empfindlichkeit.
6. Die Differenzanzeige soll wenigstens auf 10 % genau sein.
7. Das zeitliche Auflösungsvermögen soll dem der üblichen Observatoriumsregistrierungen entsprechen (Papiervorschub von 2 bis 6 cm pro Stunde).
8. Bei den in 7. angegebenen Vorschüben soll eine amplituden- und phasentreue Differenzanzeige gewährleistet sein.
9. Änderungen der Eigenschaften des Übertragungsweges (Leitungen, drahtlose Strecken) sowie der Stromquellen dürfen die Meßwertanzeige nicht beeinflussen.
10. Die Registrierungen sollen frei von Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und Luftdruckeinflüssen sein.
11. Die Differenzanzeige soll in kleinen Bereichen linear, darüber hinaus jedoch logarithmischen Maßstab aufweisen.
12. Die Registrieranlage soll weitgehend wartungsfrei gehalten werden. Empfindlichkeitskontrollen müssen laufend automatisch ausgeführt werden.
13. Bedienungselemente und Anzeigegeräte sollen in der Hauptstation vereinigt sein.
14. Speziell für Warnzwecke im Internationalen Geophysikalischen Jahr ist die Forderung nach sofortiger Erkennbarkeit der Gradienten (Direktsichtanzeige mit Tinten- oder Wachspapier-Schreiber) zu erheben.

III. Die Eignung bisher bekannter Verfahren

Das Interesse an der Ermittlung örtlicher Gradienten im weitesten Sinne besteht schon seit langem und führte zu verschiedenen Methoden, die im folgenden in zwangloser Reihenfolge betrachtet werden sollen. Es wird die Vollständigkeit der Verfahren, nicht jedoch die Aufzählung der jeweiligen Bearbeiter angestrebt.

Für einen nicht registrierenden Gradientenmesser wird der Ausdruck "Gradiometer", für registrierende hingegen "Gradiograph" gebraucht, wofür auch noch "Gradientvariometer" [1] und "Differential-Magnetograph"

[21] geschrieben werden können. Der letztere ist nicht eindeutig, da man die als reine Feldstärkemesser arbeitenden Saturationskern-Anordnungen (saturable core device) wegen des am Eingang liegenden Differential-Transformators gelegentlich auch als Differential-Magnetographen bezeichnet.

Ebensowenig, wie es einen Vektormesser gibt, der mit einer einzigen Messung Betrag und Richtung des Vektors $\mathfrak{H}$ liefert, gibt es zur Untersuchung des differentiellen Verhaltens von $\mathfrak{H}$ ein Gerät, das direkt

$$d\mathfrak{H} = \frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial x} dx + \frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial y} dy + \frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial z} dz$$

mißt. Vielmehr muß man die drei Komponenten von $d\mathfrak{H}$ getrennt ermitteln:

$$dH_x = \frac{\partial H_x}{\partial x} dx + \frac{\partial H_x}{\partial y} dy + \frac{\partial H_x}{\partial z} dz$$

$$dH_y = \frac{\partial H_y}{\partial x} dx + \frac{\partial H_y}{\partial y} dy + \frac{\partial H_y}{\partial z} dz$$

$$dH_z = \frac{\partial H_z}{\partial x} dx + \frac{\partial H_z}{\partial y} dy + \frac{\partial H_z}{\partial z} dz .$$

Insgesamt sind somit 9 Meßgrößen zur Charakterisierung des differentiellen Verhaltens eines Vektorfeldes im rechtwinkligen Koordinatensystem erforderlich. Nimmt man zusätzlich die Beziehung

$$\text{rot } \mathfrak{H} = 0$$

als gültig an, was nur in bestimmten Fällen (siehe I.3) zulässig ist, reduzieren sich die 9 Meßgrößen auf 5. Jede dieser 5 bzw. 9 Meßgrößen ist ein Grenzwert, z. B.

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{H_x(x + \Delta x) - H_x(x)}{\Delta x} .$$

Die gesuchte linksseitige partielle Ableitung kann man meßtechnisch nur als Differenzenquotient ermitteln. Dieser gleicht umso mehr dem gesuchten Ausdruck, je kleiner Δx gewählt wird. aus Empfindlichkeitsgründen läßt sich aber Δx nicht beliebig klein machen, im Gegenteil ist man gezwungen, es für Erdfeldmeßzwecke auf einige Meter bis Kilometer zu bemessen. Unter der Voraussetzung eines monotonen Verlaufes der Komponente H_x im Intervall Δx läßt sich eine Zahl ϵ vorgeben:

$$\epsilon = \left| \frac{\frac{H_x(x + \Delta x) - H_x(x)}{\Delta x}}{\frac{\partial H_x}{\partial x}} - 1 \right|$$

Nur dann, wenn diese klein gegen 1 ist, kann von einer Gradientmessung gesprochen werden. In der gesamten Literatur ist es aber üblich, jede gemessene Feldstärkedifferenz, geteilt durch die Meßpunktentfernung, als Gradient zu bezeichnen, ohne auf die eben betonte einschränkende Bedingung einzugehen. Im folgenden wird hier ebenso verfahren.

1. Differenzbildung aus Feldwaagenablesungen

Die in H und Z oft geübte Methodik, Feldstärkedifferenzen aus Feldwaageablesungen zu ermitteln und zur Gradient-Berechnung zu verwenden, ist praktisch im Informationswert auf Lagerstättenuntersuchungen beschränkt. Für Messungen der Z-Komponente wird die Feldwaage in zwei verschiedenen Höhen (*Dixius* [2], *Hahn* [3]) stationiert, oft sogar unter Anwendung mehrere Meter hoher Meßgestelle (*Nodea* [4]). Die Ermittlung der Differenzen der H-Komponente erfolgt durch Feldwaagemessungen, die in gleicher Höhe über dem Boden ausgeführt werden, wie es in der Regionalvermessung oder in der Mikromagnetik (*Lauterbach* [5]) üblich ist. Für eine kontinuierliche Erfassung der Variationen örtlicher Gradienten kommen diese auf rein visuelle Ablesungen beschränkten Verfahren nicht in Frage.

2. Differenzbildung aus Komponentenregistrierungen

Es werden die Registrierungen benachbarter Observatorien (*Wiese* [6]) oder die eines Observatoriums und beweglicher Stationen (*Fleischer* [7]) verglichen und aus den unterschiedlichen Kurven bei bekannter Meßpunktentfernung der Gradient ermittelt. Einzelne großräumige Störungen lassen sich hiermit gut untersuchen. Es würde aber eine erhebliche Arbeit bedeuten, auf diese Weise kontinuierlich alle 6 in der Ebene meßbaren Gradienten zu ermitteln. Zudem geht hierbei entscheidend der Zeitmarkenfehler ein, so daß die Forderung II.1 nur unvollkommen erfüllt ist. Weiterhin spielen die Eigenschaften der für die Komponentenregistrierung verwendeten Instrumente eine ausschlaggebende Rolle. Vergleichbar sind letzten Endes nur Registrierungen, die von völlig gleichen Instrumenten stammen oder wenigstens von solchen, deren Eigenschaften rechnerisch aufeinander beziehbar sind. Handelt es sich um beweglich aufgehängte Magnete, so gelten diese Bedenken für die mittlere Orientierung (um den fälschenden Einfluß anderer Komponenten auszuschalten), die Torsionseigenschaften,

das magnetische Moment und den Lichtweg. Im allgemeinen kann diese Übereinstimmung nur selten erwartet werden. Bei Untersuchung sehr kleiner örtlicher Unterschiede muß diesen Fragen besondere Beachtung geschenkt werden.

Nichtsdestoweniger ist aber diese Methode für eine ganze Reihe von Gradientuntersuchungen geringerer Genauigkeitsanforderungen geeignet, da sie apparativ nichts fordert, was über die Ausrüstung eines üblichen Observatoriums hinausgeht.

Eine speziell für Seevermessungszwecke geeignete Anordnung zur Gradientermittlung auf der Basis der Differenzbildung aus Feldstärkeregistrierungen geben *Espersen, Andreasen, Egedal* und *Olsen* [8] an. Hierbei gelangten versenkbare registrierende H- und Z-Schneidenwaagen zum Einsatz.

3. Differenzmessung durch astatische Magnetometer

Astatische Magnetometer (*Johnson* und *Steiner* [9]) werden vorwiegend in der Gesteinsphysik zur Bestimmung der Magnetisierung von Gesteinen verwendet, wobei letztlich eine Differenzmessung zwischen dem ungestörten Feld und dem durch das Gestein veränderten Feld ausgeführt wird. Diese sehr empfindlichen Apparaturen sind auf Labortisch-Dimensionen beschränkt und eignen sich nicht für große Meßpunkt-Entfernungen, sofern man nicht die mechanische starre Kopplung beider Magnete durch eine elektrische Kopplung ersetzt, wie es in den Abschnitten III.7, IV.1 und IV.2 beschrieben wird.

4. Bestimmung örtlicher Inhomogenitäten mit der Drehwaage

Der Versuch von *Berroth* und *Schleusener* [10], mit Hilfe einer Drehwaage, die eine magnetisch wirksame und eine magnetisch unwirksame Masse enthält, örtliche Magnetfelddifferenzen zu bestimmen, ist historisch und didaktisch interessant, gilt jedoch heutzutage nicht als erfolgversprechend. Die Meßwerte werden sowohl von magnetischen als auch von Schwereanomalien beeinflußt. Zudem erscheint die Konstanz ferromagnetischer Eigenschaften hierfür fraglich.

5. Differenzbildung aus in Spulen induzierten Wechselspannungen

Gradiometer mit zwei synchron rotierenden Spulen zählen mit zu den ersten Instrumenten, die für eine Gradientmessung vorgeschlagen und z. T. realisiert wurden (*Haalck* [11], *Roman* und *Sermon* [12], *Ács* [13] und *Kalasnikow* [14]). Für kleine Meßpunktentfernungen (Labordimensionen)

lassen sich die hohen feinmechanischen Forderungen erfüllen, die aus Gründen der für jeden Moment geforderten Achsen- sowie Windungsebenenparallelität erhoben werden müssen. Sind aber die Meßorte kilometerweit entfernt, wie es aus Empfindlichkeitsrücksichten heraus nicht anders möglich ist, so ist eine Synchronisierung beider Spulen über Leitungen oder drahtlose Strecken hinweg nur mit sehr hohem Aufwand zu garantieren. Zum andern ist eine Apparatur mit bewegten Teilen nicht sonderlich für den wartungsfreien Dauerbetrieb geeignet.

Für Fluxmeter-Gradiometer gelten ähnliche Überlegungen.

6. Differenzbildung aus in hochpermeablen Kernen erzeugten Wechselspannungen

Hierunter sind alle Saturationskern-Gradiometer und Gradiographen zu verstehen, die wechselfeldgesättigte, hochpermeable Kerne als kennzeichnende Meßelemente aufweisen. Die bekannteste Methode ist die nach *Förster* [15], speziell behandelt von *Wurm* [16], wonach sich an jedem der beiden Orte, zwischen denen die Differenz festgestellt werden soll, ein Einzelkern befindet (Bild 1). Dieser trägt zwei Wicklungen, von denen die eine den Kern mittels Wechselstrom bis über die Sättigung hinaus aussteuert, die andere die induzierte Spannung aufnimmt. Bei hintereinandergeschalteten Erregerwicklungen erhält man in den gegeneinandergeschalteten Sekundärwicklungen eine Ausgangsspannung, die ein Maß für die Feldstärkedifferenz darstellt. Für geringe Meßpunktentfernungen hat die Methode zur Blindgängersuche (*Wegener* und *Fleischmann* [17]) und Gesteinsuntersuchung (*Lauterbach, Michael* und *Wendler* [18]) sowie in vielen anderen Fällen zur Lokalisierung ferromagnetisch wirksamer Körper Anwendung gefunden. Für kilometerweit entfernte Meßorte jedoch dürften sich auf Grund der variablen Wechselstromeigenschaften der Leitungswege Schwierigkeiten im Kernabgleich ergeben. Die weiter unten beschriebenen Photozellengradiographen sind frei von diesen Mängeln und bieten zudem den Vorteil wesentlich geringeren elektronischen Aufwandes, was geringere Störanfälligkeit sowie erhöhte Stabilität gegenüber den Saturationskerngradiographen bedeutet. Allerdings gilt dies nur für flüchtige Inhomogenitäten, deren Dauer einige Sekunden übersteigt, also für das übliche Interessegebiet des Erdmagnetikers, sofern er nicht von schnellen Variationen spricht. Diese bleiben der Saturationskernsonde allein vorbehalten. Im gegenwärtigen Zeitpunkt scheinen noch keine Gradiographen für derartig rasche Variationen zu existieren.

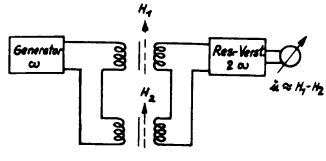

Abb. 1: Differenzmesser nach *Förster*.

Forderung II.3 nach Differenzbildung zwischen mehr als zwei Meßorten läßt sich mit der *Förster*schen Anordnung nicht erfüllen.

Für die Messung örtlicher Gradienten zur Lagerstättenerkundung vom Flugzeug aus wurden von *Wickerham* und *Doolen* [19] Anordnungen mit Saturationskernsonden (auch von *Glicken* [20] behandelt), bei denen in einer Kompensationsschaltung die Rückführgeschwindigkeit des Nachlaufmotors als Maß des örtlichen Gradienten unter Berücksichtigung der Fluggeschwindigkeit angesehen wird. Eine mögliche Erweiterung dieses Verfahrens für stationären Betrieb durch Gegeneinanderschaltung zweier derartiger Motoren und Erzeugen drehzahlproportionaler Wechselspannungen dürfte infolge der Verschiedenheit der Motorcharakteristiken nicht vorteilhaft erscheinen.

7. *Differenzregistrierung durch lichtelektrisch kompensierte Magnetometer*

Die günstigen Eigenschaften, die das photozellenkompensierte Unifilar-Magnetometer als Feldstärkenregistriergerät aufweist, veranlaßten *Nelson* [21] zu einem 1954 auf der Romtagung der UGGI angegebenen Vorschlag, das Feld der Hauptstation mit einem Photozellenkompensator zu kompensieren und den hierzu notwendigen Strom durch *Helmholtz*spulen der Außenstationen zu schicken. Die im Innern dieser Spulen aufgehängten Magnete stellen sich dann in die Resultierende aus örtlichem Feld und dem Spulenfeld ein. Bei Gleichheit aller Spulenkonstanten ist der Ausschlag der Magnete an den Außenstationen proportional der Differenz zwischen Haupt- und Außenstation. Für die Registrierung der Magnetbewegung ist die photographische Methode vorgesehen. Das Verfahren soll im Geophysikalischen Jahr Anwendung finden. Es ist zu erwarten, daß die Forderungen II.1 bis II.10 erfüllt werden, während hinsichtlich der Punkte II.11 bis II.14 noch Wünsche offen bleiben.

IV. Neue Wege

Die zusammenfassende Betrachtung der aufgezählten Meßverfahren ließ nach wie vor den Wunsch nach einem geeigneteren, das einfache Bedienung, Wartungsfreiheit, gute Anzeigestabilität und hohe Empfindlichkeit garantiert, nicht verstummen. Die besonders in unseren Breiten notwendigen langen Meßstrecken lassen die Frage aufkommen, ob nicht die drahtlosen Methoden aus ökonomischen Gründen den leitungsgebundenen Verfahren vorzuziehen sind. Vorerst wirken die leitungsgebundenen Anordnungen erfolgversprechender, zumal mit ihnen bereits Betriebserfahrungen vorliegen. Deshalb werden sie im nächsten Abschnitt weiter aus-

geführt, während die drahtlosen Methoden nur in einem Ausblick Erwähnung finden.

1. Leitungsgebundene Verfahren

Für die Diskussion der leitungsgebundenen Verfahren kommen nur Methoden in Betracht, bei denen Änderungen der Leitungsparameter (L, C und R) keinen Einfluß auf die Meßwertanzeige haben. Die Forderungen nach Direktsichtanzeige sowie Vereinigung aller Bedienungs- und Anzeigeelemente in der Hauptstation führten zu zwei Gradiographen, die im folgenden kurz beschrieben werden.

1.1 Gradiograph mit Differenzkompensation

Es finden zwei Kompensationskreise Anwendung (Bild 2), von denen einer simultan auf beide Variometer wirkt, der zweite nur auf eines. Der vom Variometer A geregelte Strom durchfließt die gleichen *Helmholtz*spulen der Variometer A und B und kompensiert so das Feld am Ort B bis auf einen Rest. Dieses Restfeld, das der Feldstärkendifferenz zwischen A und B entspricht, wird mit Hilfe des zweiten Variometers B zu Null gemacht. Der in diesem zweiten Kompensationskreis fließende Strom ist ein Maß für die Differenz und kann auf praktisch beliebig langen Leitungen in der Hauptstation registriert werden. Besonderes Augenmerk soll man auf das zeitliche Verhalten beider Regelkreise richten. Die Zeitkonstanten beider Regelungen müssen sich größenordnungsmäßig unterscheiden, damit – grob gesprochen – der zweite Kreis (Differenzanzeige) erst dann den Regelvorgang ausführt, nachdem ihn der erste Kreis (Simultankreis) bereits beendet hat.

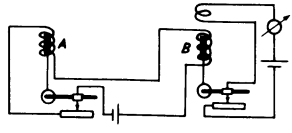

Abb. 2: Prinzip der Differenzkompensation.

Für die Methode der Differenzkompensation können als Nullindikatoren alle Anordnungen benutzt werden, die in der Lage sind, eine Rückführung zu bewirken. Es kommen somit lichtelektrische Kompensatoren, Saturationskernsonden und Rotationsspulen in Frage. Vergleicht man diese drei Möglichkeiten, so schneidet das lichtelektrisch kompensierte Magnetometer am günstigsten ab, denn

1. ist es in der Wartung einfacher, weil nur wenig elektrische Teile vorhanden sind,
2. existieren keine kritischen Wechselstrom-Nullfeldreste wie bei Sonde und Rotationsspule und es entfallen hochempfindliche Verstärker,
3. ist die Stabilität des Nullpunktes über längere Zeit hinweg viel weniger von der Güte und Konstanz elektrischer Zusatzeinrichtungen abhängig als im Falle der Sonde oder Rotationsspule.

Bild 3 zeigt die Prinzipschaltung der Methode der Differenzkompensation bei Verwendung zweier lichtelektrisch kompensierter Magnetometer. Diese Anordnung ist bereits realisiert worden. Besonders vorteilhaft wird empfunden, daß der Skalenwert des Registriergerätes (Tintenschreiber) einfach durch Bemessung der Spulenkonstanten des Differenzkreises festgelegt und gegebenenfalls durch einfache Umschaltung der Windungszahlen geändert werden kann.

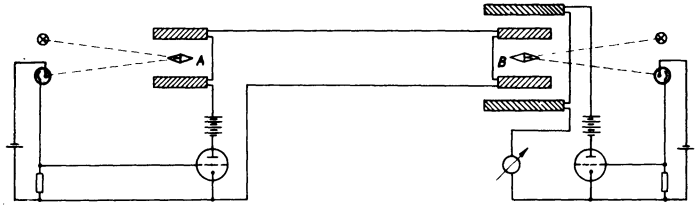

Abb. 3: Zwei lichtelektrisch kompensierte Unifilarmagnetometer in Differenz-Kompensations-Schaltung.

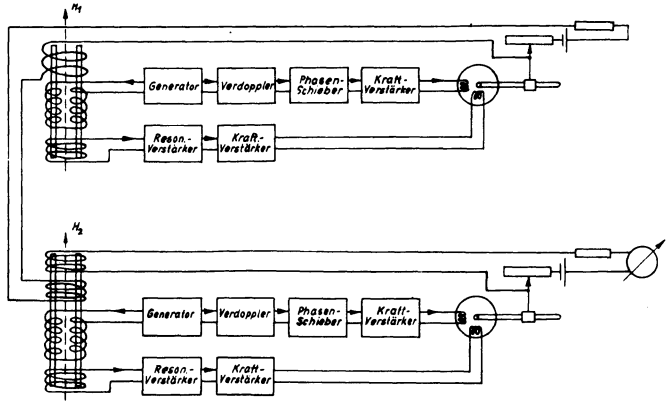

Abb. 4: Differenzkompensationsgerät mit *Förster*schen Sonden.

Rüstet man die Anordnung mit zwei *Förster*sonden aus, so gilt die in Bild 4 gezeigte Prinzipschaltung. Bild 5 zeigt eine Versuchsausführung, wobei die Kompensation allerdings noch von Hand geschah.

Ein Nachteil dieses Differenzkompensationsverfahrens könnte darin erblickt werden, daß eine ausgesprochene Differenzierung zwischen Haupt- und Hilfsstation vorliegt. Es ist nicht möglich, einen Registrierbetrieb durchzuführen, in dem beispielsweise Station B die Hilfsstation für Station A darstellt und gleichzeitig Hauptstation einer weiteren Hilfsstation C wäre. Diese Möglichkeiten können mit der folgenden Apparatur realisiert werden.

1.2 Gradiograph mit Stromsubtraktion

Der Grundgedanke dieses Prinzips liegt darin, daß man mit Hilfe automatischer Feldstärkenmesser Ströme erzeugt, die jeweils den Magnetfeldern am Ort der Feldstärkenmesser proportional sind und nun diese Ströme elektrisch subtrahiert. Die Subtraktion geschieht in Widerstandsnetzwerken, die praktisch beliebig weit von den Magnetometern entfernt sein können. In diesen Widerstandsnetzwerken können geringe Unterschiede der Kompensationsspulenkonstanten durch entsprechende Widerstandsbemessung ausgeglichen werden, so daß der bei anderen Verfahren notwendige kritische Spulenabgleich entfällt.

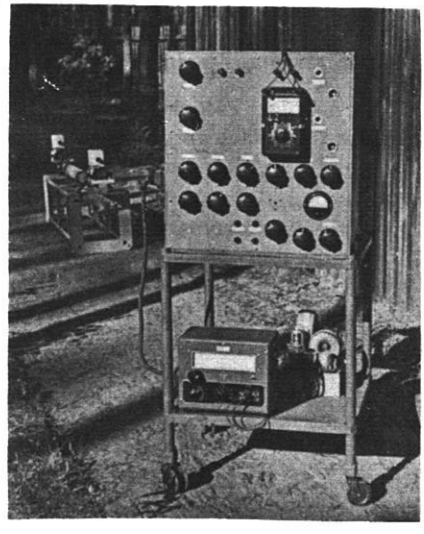

Abb. 5: Versuchsaufführung eines Sonden-Differenz-Kompensators, links im Hintergrund die Sonden.

Bild 6 zeigt das Prinzip der mit lichtelektrischen Kompensatoren ausgeführten Anordnung [22], die sich bereits in einem Probebetrieb über ca. 6,5 km Meßpunktentfernung bewährt hat. Das in der Mitte der Abbildung angedeutete Registrierinstrument zeichnet die zwischen den Stationen A und B auftretenden Feldstärkedifferenzen auf. Hiermit kann man eine größere Anzahl von Differenzmeßstationen aufbauen und auch eine Ring-Differenzmessung ausführen, die an anderer Stelle ausführlich erläu-

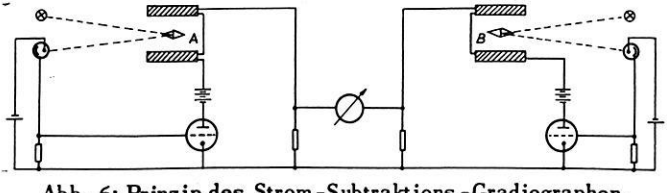

Abb. 6: Prinzip des Strom-Subtraktions-Gradiographen.

tert wird. Das Prinzip ist ebenso wie das vorhergehende nicht auf Photozellenkompensatoren angewiesen, sondern kann mit Saturationskernsonden oder Rotations-Spulen realisiert werden. Ein besonderer Vorteil dieses Prinzips besteht darin, daß man sowohl die Differenz als auch die beiden Komponenten, aus denen die Differenz gebildet wird, gleichzeitig registrieren kann. Zur Kontrolle der Apparaturen ist dies sehr nützlich.

Der Leitungswiderstand geht nicht in das Meßergebnis ein, nur der

Isolationswiderstand der Leitung muß gewissen Anforderungen genügen, die aber normale Fernmeldekabel ohne weiteres erfüllen.

2. *Ausblick auf drahtlose Methoden*

Die beträchtlichen Kosten, die bei Erdkabeln sowohl in der Anschaffung als auch in der Verlegung auftreten, werfen die Frage nach drahtlosen Möglichkeiten der Gradientregistrierung auf.

Die mit den an verschiedenen Orten stationierten Magnetometern ermittelten Feldstärkenwerte müssen jeweils Sendern aufmoduliert werden, die von einer Empfangsstation aufgenommen werden. In dieser erfolgt die Umsetzung in subtrahierbare Meßwerte und daraufhin die Differenzbildung. Entscheidend für die Wahl der Magnetometer wird deren Eignung als Modulator sein. Von selbst bietet sich die Magnetfeldmessung mit Hilfe von Kern- oder Elektronenresonanzen an, denn hierbei tritt infolge der Präzession der Elementarteilchen automatisch eine Frequenzmodulation durch das zu messende Magnetfeld ein, so daß ein besonderer Modulator entfällt. Vorwiegend eignet sich diese Methode zur Differenzbildung der Totalintensitäten.

Legt man Wert auf die Differenzen der Komponenten, die wohl für die Mehrzahl der Untersuchungen wesentlich sind, so läßt sich ein Impulsverfahren verwirklichen, das auf einer Impulszählung beruht. An beiden Stationen werden durch Treppenströme Magnetfelder erzeugt, die in Stufen von beispielsweise 1γ springen. Auf Synchronsignale hin starten die Treppengeber und werden jeweils von Nullrelais, die innerhalb der Spulen stationiert sind, bei Erreichen des Kompensationszustandes gestoppt. Ein in der Hauptstation stationiertes Zählwerk läuft beim ersten Nullsignal an und stoppt beim zweiten. Die Zahl der Impulse ist ein (gequanteltes) Maß für die Feldstärkedifferenz zwischen beiden Meßorten. Gegebenenfalls muß man den Hauptteil der Komponenten gleichmäßig an beiden Stationen kompensieren, was durch wiederum drahtlos überwachte Kernresonanzanordnungen [23] geschehen kann. Auf diese Methodik wird später näher eingegangen.

V. Schlußbemerkungen

Die vorstehenden Überlegungen und die Ergebnisse dazu ausgeführter Versuche lassen den Schluß zu, daß für die kontinuierliche Registrierung der örtlichen Gradienten, wie sie im Internationalen Geophysikalischen Jahr gewünscht wird, die mit Stromsubtraktion arbeitenden Gradiographen die geeigneten Apparaturen darstellen, mit denen sich die meisten der im Abschnitt II aufgestellten Forderungen erfüllen lassen. Sehr kleine Feldstärkedifferenzen werden auf große Entfernungen hin mit geringsten Ansprü-

chen an die Wartung in Direktsichtanzeige aufgezeichnet. Die auf dieser Basis in der Umgebung des *Adolf-Schmidt*-Observatoriums entstehende Anlage wird, wie Bild 7 zeigt, vier Außenstationen und eine Hauptstation umfassen, die jeweils mit Erdkabeln verbunden sind. Jede Außenstation enthält 3 lichtelektrisch kompensierte Magnetometer für X, Y und Z, während die Hauptstation nur Bedienungs- und Anzeige-Elemente enthält. Über die Ergebnisse wird zu gegebener Zeit berichtet.

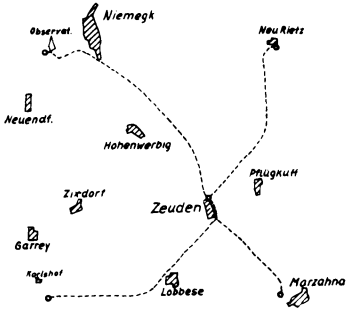

Abb. 7: Die Verteilung der Stationen der Niemegker Gradiographen-Anlage.

Literatur

[1] *Chapman, S.:* The space gradient of the earth's magnetic field. Terr. Magn. 41, 1936, S. 127-136.

[2] *Dixius, R.:* Anomale Magnetisierungsrichtungen der Rhön-Basalte. Geoph. pura e appl. 28, 1954, S. 109-148.

[3] *Hahn, A.:* Messungen des Vertikalgradienten von Z mit der Schmidt'schen Feldwaage. Notizblatt d. Hess. Landesamtes f. Bodenf. Wiesbaden, 82, 1954, S. 329-333.

[4] *Nodia, M. S.:* Neue Art der Plattform zur Messung des magnet. Gradienten mit Hilfe von Feldwaagen. Izv. Akad. Nauk Georginische SSR, T XI, Nr. 3, 1951, S. 135-138 (russ.).

[5] *Lauterbach, R.:* Mikromagnetik- ein Hilfsmittel geologischer Erkundung. Wiss. Z. d. Karl-Marx-Univ. Leipzig 3, Heft 3, 1953/54 a.

[6] *Wiese, H.:* Tiefentellurik. Abh. d. Geomagnet. Inst. u. Obs. Potsdam-Niemegk Nr. 16.

[7] *Fleischer, U.:* Ein Erdstrom im tieferen Untergrund Norddeutschlands während erdmagnetischer Baistörungen. Naturwiss. 41, 1954, S. 114-115.

[8] *Espersen, J., Andreasen, P., Egedal, J.* und *Olsen, J.:* Measurements at sea of the vertical gradient of the main geomagnetic field during the Galathea Expedition. Journ. of Geophys. Res. 61, 1956, S. 593-624.

[9] *Johnson, E. A.* und *Steiner, W.:* An astatic magnetometer for measuring susceptibility. Rev. Sc. Instr. 8, 1937, S. 236-238.

[10] *Berroth, A.* und *Schleusener, A.:* Erdmagnetische Messungen mit Hilfe der Drehwaage. Z. f. Geoph. 9, 1933, S. 355-368.

[11] *Haalck, H.:* Der Erdinduktor als Lokalvariometer und seine praktische Verwendungsmöglichkeit. Z. techn. Phys. 6, 1925, S. 377.

[12] *Roman, I.* und *Sermon, Th.:* A magnetic gradiometer. AIME Geoph. Prosp. 1934, S. 373-388.

[13] *Acs, E.:* Ein Gerät zur Bestimmung erdmagnetischer Gradienten. Födmerestani Közlemenyek. 1950, S. 1-11 (ungar.).

[14] *Kalasnikow, A.G.:* Ein magnetischer Gradientenmesser mit Fluxmeter. Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Geoph. 4, 1953, S. 307-317.

[15] *Förster, F.:* Ein Verfahren zur Messung von Gleichfeldern und Gleichfelddifferenzen ... Z. Metallk. 1955, S. 358-370.

[16] *Wurm, M.:* Beiträge zur Theorie und Praxis des Feldstärkedifferenzmessers nach Förster. Z. ang. Phys. 2, 1950, S. 210-219.

[17] *Wegener, H.* und *Fleischmann, R.:* Ortung tiefliegender Bombenblindgänger. Z. ang. Phys. 6, 1954, S. 120-127.

[18] *Lauterbach, R., Michael, I.* und *Wendler, R.:* Studien zur petromagnetischen Substanz- und Strukturanalyse. Wiss. Z. d. Karl-Marx-Univ. Leipzig 5, 1955/56, S. 415-420.

[19] *Wickerham, W.E.* und *Doolen, O.K.:* Magnetic gradiometer. US Pat. 2, 663, 843.

[20] *Glicken, M.:* Uses and limitations of the airborne magnetic gradiometer. Minig Eng. 7, 1955, S. 1054-1056.

[21] *Nelson, J.H.:* A preliminary report on a differential magnetograph. Instruction manual of the IGJ No. III Pt. I S. 37-39.

[22] *Schmidt, H.:* Ein erdmagnetischer Gradiograph (im Druck).

[23] *Schmidt, H.:* Über die Messung geomagnetischer Feldgrößen mittels Protonenresonanzen. Exp. Technik d. Physik, 1, 1953, S. 121-127.