

U. WIENS und U. SCHMUCKER

"Vergleichsregistrierungen von Askania-Variographen und
EDA-Fluxgatemagnetometern"

1. Einleitung

Im Herbst 1978 wurde auf dem Gelände des Göttinger Instituts eine Vergleichsregistrierung mit drei Askania-Variographen, drei EDA-Fluxgatemagnetometern und der Göttinger Hauptregistrierung vorgenommen. Die Variographen und die Sensoren der Fluxgatemagnetometer standen in transportablen Schutzhütten auf einer schattigen Waldwiese, die Schaltkästen der Fluxgatemagnetometer in einer festen Holzhütte. Die Göttinger Hauptstation befindet sich in einem doppelwandigen Haus mit täglichen Temperaturschwankungen von höchstens 0.5°C . Ihre Registrierung wurde als eine von Temperatureffekten freie Vergleichsregistrierung betrachtet.

Die ungeheizten Variographen und Fluxgatemagnetometer waren bewußt den täglichen Temperaturschwankungen ausgesetzt, um auf diese Weise die Temperaturkoeffizienten der Variometer und Sensoren zu bestimmen. Durch einen glücklichen Zufall konnte sowohl ein magnetischer Sturm als auch eine Folge magnetisch ruhiger, sonniger Herbsttage registriert werden. Die täglichen Temperaturschwankungen erreichten während dieser Tage 20°C im Freien und 5°C im Innern der Variographen. Die Größe der Temperaturschwankungen in der Hütte, in der die Schaltkästen der Fluxgatemagnetometer standen, betrug etwa 3°C .

Die Registrierung der Variographen und der Göttinger Hauptregistrierung erfolgte auf Papierfilm mit dem üblichen Vorschub von 20 mm/h, die Skalenwerte der Variometer betragen etwa 1.5 nT/mm für Z und 3 nT für H und D. Die Aufzeichnung der Fluxgatemagnetometer erfolgte digital auf eine Magnetbandkassette mit einer Taktrate von 2s.

2. Tagesperiodische Variationen

Bei der Registrierung längerer Perioden, insbesondere bei tagesperiodischen Sq-Variationen und Dst, müssen mögliche Temperatureffekte berücksichtigt werden. Bei Torsionsfaden-Magnetometern, wie sie in den Variographen und der Göttinger Hauptregistrierung benutzt werden, verändern Temperaturschwankungen den Torsionsmodul der Fäden,

das Moment der Magnete und bei horizontaler Aufspannung (hier nur bei Z) die Schwerpunktslage des Systems.

Beim Askania-Variographen ist das H-System vom Hersteller temperaturkompensiert worden. Der Temperatureffekt auf einen aus zwei Stücken zusammengesetzten Faden wird gerade durch den entgegengerichteten Temperatureffekt des magnetischen Moments aufgehoben. Das D-System sollte keinen Temperatureffekt haben, da keine Astasierungsmagneten benutzt werden und die Aufhängefäden verschwindend kleine Rückstellmomente haben. Beim Z-System der Variographen muß die Temperaturkompensation vom Benutzer experimentell besorgt werden, indem die Vortorsion des aufgehängten Systems in geeigneter Weise auf zwei Fäden mit unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten verteilt wird.

Der Hersteller empfiehlt, zur Erreichung dieser Kompensation Temperaturversuche mit der eingebauten Heizung durchzuführen. Dies ist jedoch nur in Grenzen möglich, da bei schnellen Temperaturänderungen nichtlineare Effekte auftreten und jede Änderung der Vortorsion zu langanhaltenden nichtelastischen Nachwirkungen der unter hoher Spannung stehenden Fäden führt. Zur Bestimmung der linearen Effekte, die dann in einer einfachen Korrektur berücksichtigt werden können, eignen sich daher nur sehr langsam erfolgende Temperaturänderungen, insbesondere die natürlichen Temperaturänderungen im Verlauf eines Tages. Wird nach einem solchen Temperaturtest die Vortorsion verändert, etwa um die Kompensation zu verbessern, so ist vor dem nächsten Temperaturtest das Ausklingen der Hystere abzuwarten, die sich erfahrungsgemäß über Tage und Wochen erstrecken kann.

Die EDA-Fluxgatemagnetometer besitzen eine eingebaute Temperaturkompensation. Wie die Vergleichsregistrierungen gezeigt haben, ist eine vollständige Kompensation nicht erreicht worden. Es verbleiben lineare Temperatureffekte in der Größenordnung von $1 \text{ nT}/^{\circ}\text{C}$, und zwar in allen Komponenten. Es ist jedoch unsicher, ob dies Temperaturgänge der Sensoren oder der elektronischen Bauteile im Schaltkasten sind.

Die Registrierungen an den genannten fünf ruhigen Tagen vom 7. bis 12. Oktober 1980 wurden folgendermaßen ausgewertet: Jeweils zur vollen Stunde wurden Momentanwerte der drei magnetischen Komponenten und der in den Variographen mitregistrierten Temperaturen abgelesen und nach Abzug eines Trendpolynoms 2. Grades die Differenzen

zur Göttinger Hauptregistrierung berechnet. Diese Differenzen zur i-ten Stunde werden als (nicht-korrigierte) "Residuen" mit D_i^* , H_i^* und Z_i^* bezeichnet. Von den Temperaturwerten wurden gleichfalls Trendpolynome abgezogen. Es verbleiben die Temperaturschwankungen T_i . Im Mittel betragen die Doppelamplituden des Tagesganges etwa 90 nT in D, 70 nT in H, 25 nT in Z und 5°C in T.

Wie Abb.1 zeigt, sind diese Residuen, die bei den Variographen übrigens nur in Z erscheinen, gut mit den Temperaturschwankungen korreliert. Die Temperatureffekte sind also im wesentlichen linear und sollen durch Temperaturkoeffizienten η_D , η_H , η_Z beschrieben werden. Ihre Bestimmung erfolgte durch eine Ausgleichsrechnung für den linearen Ansatz (für Z)

$$Z_i^* = \eta_Z T_i + Z_i$$

mit $i = 1, 2, \dots, N = 121$. Es ergaben sich für die Z-Systeme die in Tabelle 1 mit ihren Fehlern aufgeführten Werte.

Sodann wurden mit Hilfe der so gewonnenen Temperaturkoeffizienten korrigierte Residuen

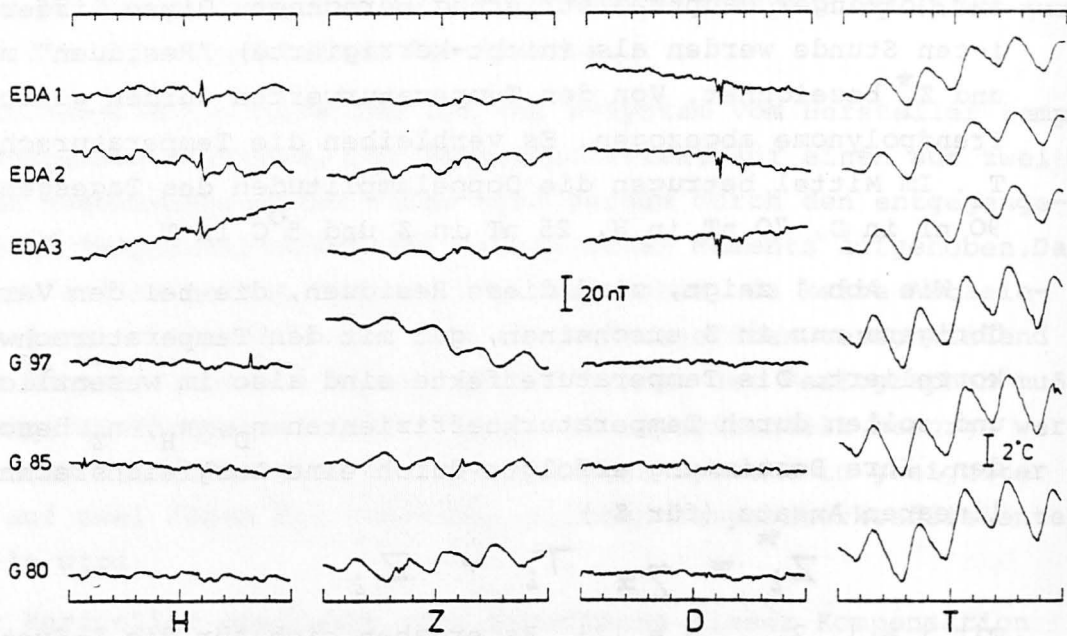
$$Z_i = Z_i^* - \eta_Z T_i$$

berechnet, die in Abb.2 gezeigt sind. Man sieht, daß sie kleiner sind als in Abb.1. Die Wirkung der Temperaturkorrekturen wird durch die mittleren Residuen

$$s_Z^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (Z_i^*)^2} \quad \text{und} \quad s_Z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i Z_i^2}$$

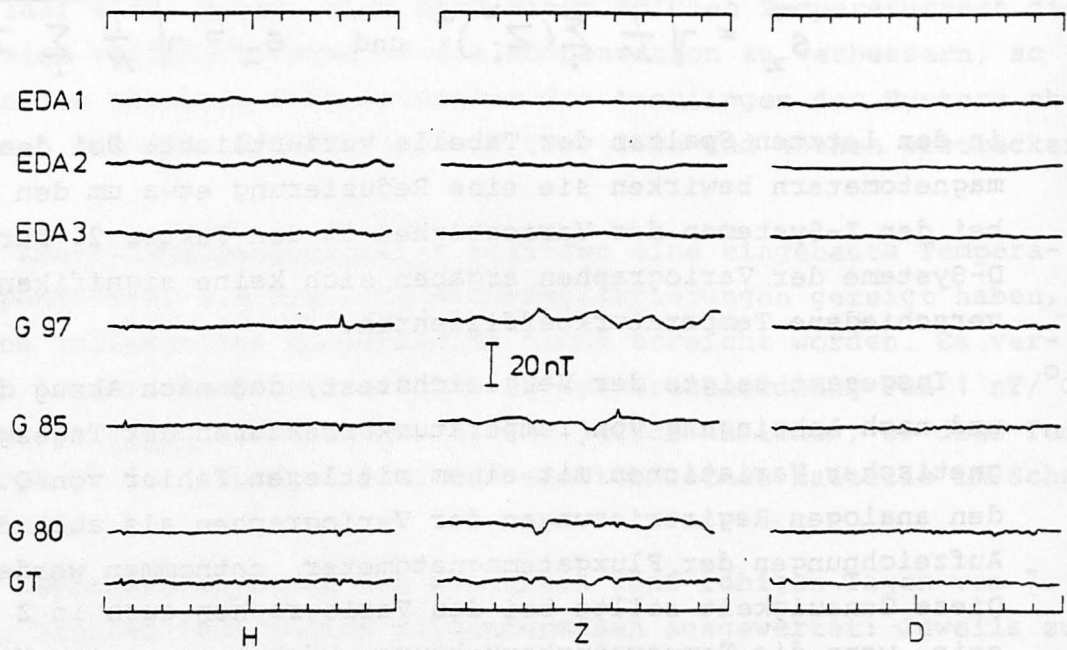
in den letzten Spalten der Tabelle verdeutlicht. Bei den Fluxgate-magnetometern bewirken sie eine Reduzierung etwa um den Faktor 4, bei den Z-Systemen der Variographen um den Faktor 2. Für die H- und D-Systeme der Variographen ergaben sich keine signifikant von Null verschiedene Temperaturkoeffizienten.

Insgesamt zeigte der Vergleichstest, daß nach Abzug des Trends und nach Anbringung von Temperaturkorrekturen der Tagesgang erdmagnetischer Variationen mit einem mittleren Fehler von 0.5 nT sowohl den analogen Registrierungen der Variographen als auch den digitalen Aufzeichnungen der Fluxgatemagnetometer entnommen werden kann. Diese Genauigkeit sollte bei den Variographen auch in Z erreichbar sein, wenn die Temperaturkorrekturen höchstens einige Nanotesla betragen und nicht wie in diesem Test fast 20 nT. Wir glauben, daß eine verbesserte Temperaturkompensation der Z-Systeme mit $\eta_Z < 1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ deutlich kleinere Residuen s_Z erbracht hätte als sie in Tabelle 1 erscheinen.



1978 Okt 07 - Okt 12

Abb.1 Residuen an fünf ruhigen Tagen ohne Gang- und Temperaturkorrektur bezüglich Hauptregistrierung Göttingen für drei Fluxgatemagnetometer EDA1-3 und drei ASKANIA Variographen G97, G85, G80. Rechts: Temperaturverlauf in Variographen und am Aufstellungsort der Schaltkästen der Fluxgates.



1978 OKT. 7 - 12

Abb.2 Residuen von Abb.1 nach Gang- und Temperaturkorrektur.

Tabelle 1: Temperaturkoeffizienten in (nT/°C) und mittlere Residuen in (nT) für fünf ruhige Tage

Instrument	η_Z	s_Z^*	s_Z	s_D	s_H
G 80	3.33 ±0.15	4.3	1.5	0.5	0.5
G 85	-2.45 0.11	3.2	1.5	0.5	0.5
G 97	-3.15 0.23	3.6	2.1	0.4	0.7
EDA 1	0.66 0.15	1.8	0.3	0.4	0.6
EDA 2	2.68 0.23	2.2	0.6	0.4	0.9
EDA 3	1.57 0.14	1.3	0.4	0.4	0.4

3. Magnetischer Sturm

Bei der Registrierung schnell verlaufender Variationen mit Variographen werden Residuen nicht so sehr durch Temperatureffekte erzeugt, sondern in erster Linie durch die Schwierigkeit, zu exakt gleichen Zeitpunkten die Kurven auf verschiedenen Magnetogrammen abzulesen. Während des von uns ausgewerteten Sturmes etwa änderte sich D um 180 nT in 30 min., ein Synchronisationsfehler von $\Delta t = 1$ min würde also bereits ein Residuum von 6 nT erzeugen. Diese Synchronisationsschwierigkeit entfällt bei den digital registrierenden, mit auf 0.1s genau gehenden Uhren ausgerüsteten Fluxgatemagnetometern. Bei sehr starken Feldänderungen könnten Diskrepanzen zusätzlich durch Nichtlinearitäten der Eichkurven sowie Orientierungsfehler der Sensoren und Magnetsysteme entstehen.

Zur systematischen Untersuchung dieser verschiedenen möglichen Fehlerquellen wurde ein zehn-stündiger Ausschnitt eines mittleren Sturms (Kp 6+) in Abständen von einer Minute digitalisiert. In diesem Intervall treten Ausschläge in D bis zu 180 nT auf, in H bis zu 80 nT und in Z bis zu 40 nT. Nach Abzug (unbedeutender) Temperaturkorrekturen und eines Polynoms 2. Grades zur Beseitigung des Trends wurden zunächst im Zeitbereich die Residuen für D, H und Z berechnet.

Da die Fluxgatemagnetometer mit einem Tiefpaß aufzeichnen, dessen Abschneidefrequenz 8 cph beträgt, sind ihre Aufzeichnungen mit denjenigen der Variographen nicht unmittelbar vergleichbar. Es wurden daher zu jeder Minute die korrigierten Werte der drei Fluxgatemagnetometer und Variographen getrennt gemittelt und diese Mittelwerte von den korrigierten Werten abgezogen. Die verbleibenden Residuen,

Tabelle 2: Mittlere Residuen in (nT) für den Sturm

Variograph	s _H	s _D	s _Z	Fluxgate	s _H	s _D	s _Z
G 80	0.7	2.5	0.7	EDA 1	0.3	0.2	0.3
G 85	0.9	2.5	0.3	EDA 2	0.5	0.2	0.2
G 97	0.9	3.1	0.6	EDA 3	0.5	0.3	0.2

die also die Übereinstimmung der Instrumente gleichen Typs anzeigen, sind in Abb.3 dargestellt.

Sehr überzeugend ist zunächst die sehr gute Übereinstimmung der Fluxgatemagnetometer, deren mittlere Residuen kaum 0.5 nT erreichen (Tabelle 2). Die Residuen der Variographen sind größer, doch auch ihre mittleren Residuen in H und Z bleiben unter 1 nT. Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich eigentlich für die Göttinger Hauptregistrierung mit maximalen Abweichungen bis zu 5 nT.

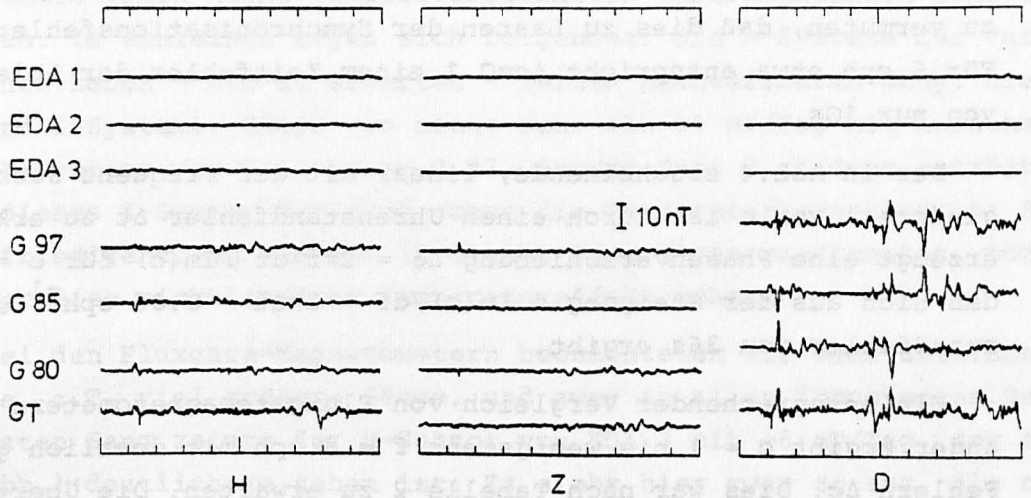
Auffallend große und unkorrelierte Residuen erscheinen jedoch in D mit mittleren Residuen von 2-3 nT und Spitzenwerten von 10 nT. Wir glauben, daß sie ausschließlich durch nicht genügend synchrone Ablesungen der schnellen D-Schwingungen verursacht werden. Es fehlt jede signifikante Korrelation zwischen H und D als Hinweis auf Orientierungsfehler, noch besteht eine Beziehung zwischen der Größe der Residuen und der Größe des Ausschlags wie man sie bei Nichtlinearität erwarten würde.

Wir haben sodann eine statistische Frequenzanalyse des Sturmausschnitts vorgenommen und für Frequenzbänder der Breite $\Delta f = 1$ cph univariate Übertragungsfunktionen berechnet. Für die D-Komponente etwa wurde der lineare Ansatz

$$\tilde{D}_1(\omega) = c(\omega) \tilde{D}_2(\omega) + \delta \tilde{D}_1(\omega)$$

ausgewertet, wobei die Subskripte sich auf die Registrierungen der Instrumente "1" und "2" beziehen.

Abb.4 zeigt zwei Beispiele für solche Übertragungsfunktionen, und zwar für D. Insgesamt hat sich folgendes ergeben: Werden Registrierungen von zwei Variographen aufeinander bezogen, so gilt innerhalb der Fehlergrenzen $c = 1$ bis 6 cph. Für $f > 6$ cph wird $c < 1$, d.h. c wird nunmehr systematisch unterschätzt ("bias"), da bei höheren Frequenzen das Rauschspektrum in D_2 wirksam wird. Außerdem beginnt bei 6 cph ein steiler Anstieg des Fehlers Δc , in dem die nach-



1978 SEPT. 27 16⁰⁰ - 02⁰⁰

Abb.3 Residuen während eines magnetischen Sturms mit Amplituden in D bis 180 nT bezüglich getrennter Mittelwerte für Fluxgates EDA 1-3 und Variographen G97, g85 und G80. GT: Göttinger Hauptregistrierung.

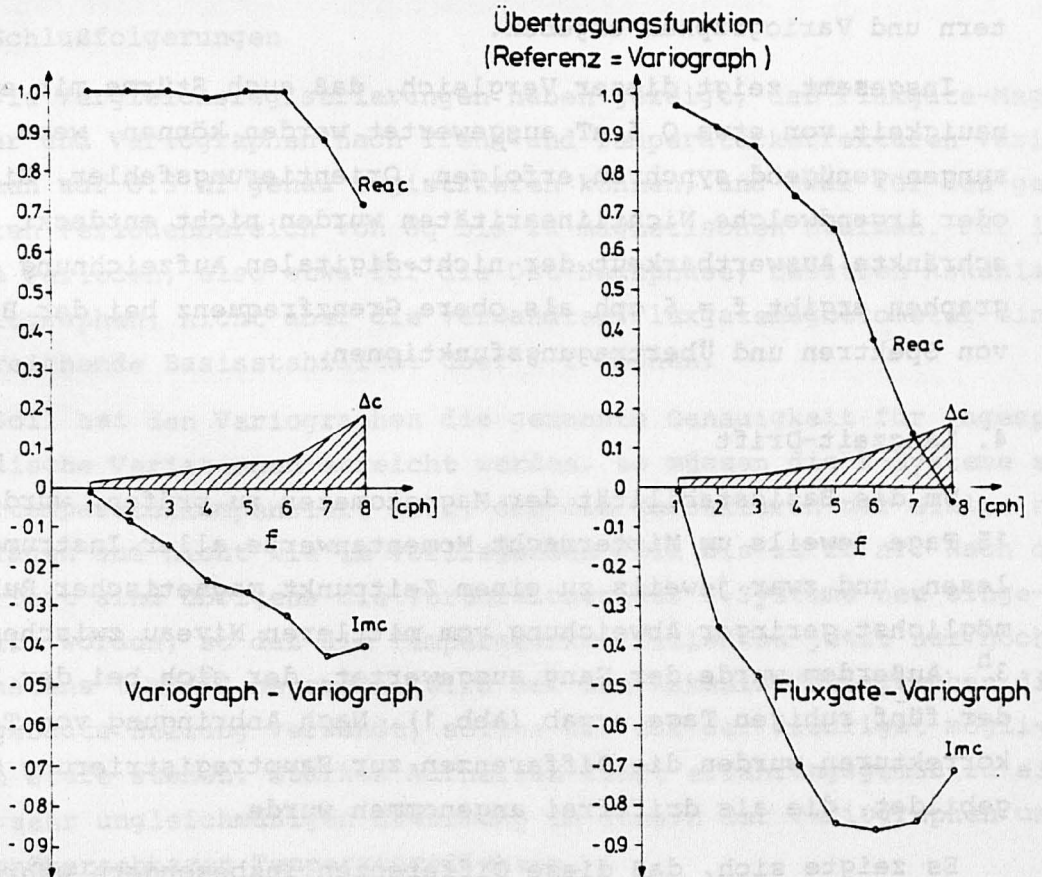


Abb.4 Übertragungsfunktionen zwischen D-Registrierungen verschiedener Instrumente. Schraffierte Vertrauensbereiche für $\beta=0.68$ der FISHER-Verteilung.

lassende Kohärenz zwischen den Registrierungen sichtbar wird. Es ist zu vermuten, daß dies zu Lasten der Synchronisationsfehler geht. Für 6 cph etwa entspricht $\Delta c = 0.1$ einem Zeitfehler der Ablesungen von nur 10s.

Der in Abb.4 erscheinende, linear mit der Frequenz wachsende Imaginärteil von c ist durch einen Uhrenstandfehler Δt zu erklären. Er erzeugt eine Phasenverschiebung $\Delta \phi = 2\pi f \Delta t \approx \text{Im}(c)$ für $c = 1$, so daß sich aus der Steigung $d \text{Im}(c) / df = 2\pi \Delta t = 0.06 \text{ cph}^{-1}$ ein Uhrenstandfehler von 36s ergibt.

Ein entsprechender Vergleich von Fluxgatemagnetometern untereinander ergibt $c = 1$ bis wenigstens $f = 8 \text{ cph}$ mit deutlich geringeren Fehlern Δc . Dies war nach Tabelle 2 zu erwarten. Die Übertragungsfunktionen zwischen Fluxgatemagnetometern und Variographen (Abb.4 rechts) geben sehr genau die aus Eichungen mit periodisch oszillierenden Feldern gewonnene Resonanzkurven der Fluxgatemagnetometer wieder, wobei sich etwa gleiche Fehler Δc , also gleichgroße Kohärenzen wie beim Vergleich Variograph-Variograph ergeben. Bei der Berücksichtigung der Resonanzkurven sollte sich also im Zeitbereich eine entsprechend gute Übereinstimmung zwischen Fluxgatemagnetometern und Variographen ergeben.

Insgesamt zeigt dieser Vergleich, daß auch Stürme mit einer Genauigkeit von etwa 0.5 nT ausgewertet werden können, wenn die Ablesungen genügend synchron erfolgen. Orientierungsfehler, Eichfehler oder irgendwelche Nichtlinearitäten wurden nicht entdeckt. Die beschränkte Auswertbarkeit der nicht-digitalen Aufzeichnung der Variographen ergibt $f = 6 \text{ cph}$ als obere Grenzfrequenz bei der Bestimmung von Spektren und Übertragungsfunktionen.

4. Langzeit-Drift

Um die Basisstabilität der Magnetometer zu prüfen, wurden für 15 Tage jeweils um Mitternacht Momentanwerte aller Instrumente abgelesen, und zwar jeweils zu einem Zeitpunkt magnetischer Ruhe, d.h. möglichst geringer Abweichung vom mittleren Niveau zwischen 21^h und 3^h. Außerdem wurde der Gang ausgewertet, der sich bei der Analyse der fünf ruhigen Tage ergab (Abb.1). Nach Anbringung von Temperaturkorrekturen wurden die Differenzen zur Hauptregistrierung Göttingen gebildet, die als driftfrei angenommen wurde.

Es zeigte sich, daß diese Differenzen insbesondere während der genannten fünf Tage recht genau lineare Funktionen der Zeit sind

und damit einen nicht-temperaturbedingten instrumentellen Gang anzeigen. Im einzelnen ergab sich folgendes: Die D-Systeme der Variographen haben - wie zu erwarten - keinen nachweisbaren Gang, die H- und Z-Systeme, Gänge von nicht mehr als ± 1 nT/Tag mit Ausnahme des Z-Systems von Variograph G 97, dessen Gang 2 nT/Gang beträgt. Für dieses Z-System war auch schon die Temperaturkorrektur bei S_q unbefriedigend, so daß wir in diesem Gang einen unerkannten, möglicherweise nichtlinearen Temperatureffekt sehen.

Bei den Fluxgate-Magnetometern beobachteten wir sehr unterschiedliche, z.T. viel größere Gänge, und zwar in allen Komponenten. Den höchsten Gang zeigte der H-Sensor von EDA 3 mit +8 nT/Tag, der auch in Abb.1 deutlich zu sehen ist. Es sieht hier zwar so aus, als ob dieser Gang dem stetigen Temperaturanstieg im Verlauf der fünf Tage entspricht. Er kann aber nicht temperaturbedingt sein, da die täglichen Temperaturschwankungen keinen Effekt zeigen.

Es sei abschließend vermerkt, daß während des Tests auf gleichbleibende Horizontierung der Variographen geachtet wurde, um vorgetauschte Gänge durch Horizontierungsfehler auszuschließen.

5. Schlußfolgerungen

Die Vergleichsregistrierungen haben gezeigt, daß Fluxgate-Magnetometer und Variographen nach Trend- und Temperaturkorrekturen Variationen auf 0.5 nT genau registrieren können, und zwar für den gesamten Periodenbereich von S_q bis zu magnetischen Stürmen. Für längere Perioden, also etwa für die Dst-Nachphase, besitzen Askania-Variographen, nicht aber die verwandten Fluxgatemagnetometer eine ausreichende Basisstabilität über 1-2 Wochen.

Soll bei den Variographen die genannte Genauigkeit für tagesperiodische Variationen erreicht werden, so müssen die Z-Systeme so gut temperaturkompensiert sein, daß die Korrekturen nur einige nT betragen und nicht wie im vorliegenden Fall bis zu 20 nT. Nach diesem Test sind übrigens die Vortorsionen der Z-Systeme neu eingestellt worden, so daß die Temperaturkoeffizienten jetzt nur noch höchstens $1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$ betragen. Wird bei den Askania-Variographen die eingebaute Heizung verwandt, sollte sie auf der niedrigst möglichen Stufe stehen. Starkes Aufheizen führt erfahrungsgemäß zu einer sehr ungleichmäßigen Erwärmung im Innern der Variographen und zu unübersehbaren Temperatureffekten.

Eine besondere Schwierigkeit stellen die nicht unerheblichen Temperatureffekte bei den verwandten Fluxgatemagnetometern dar. Es sind weitere Versuche im Gange, um zu klären, ob sie wie zu vermuten auf dem Temperaturgang der elektronischen Bauteile beruhen. Sollte dies der Fall sein, müßte man durch eine geeignete Aufstellung die Temperatur im Innern der Schaltkästen auf 1 bis 2°C konstant halten, um die Temperaturkorrekturen auf einige nT zu beschränken.

Die Auswertung von Bays und Stürmen für Frequenzen oberhalb von 6 cph setzt voraus, daß die Ablesungen auf Sekunden genau synchron erfolgen. Aufgrund dieses Tests erfolgt jetzt die Registrierung mit Variographen nur noch auf 16mm Film mit einem Vorschub von 5 mm/h und mit Lichtpulsen von 10s Länge im Abstand von einer Minute, die von einer genau gehenden Uhr gesteuert werden. Bei 12-facher Vergrößerung erscheinen dann die Registrierpunkte in Abständen von 1 mm. Man verliert dadurch zwar die Möglichkeit, Pulsationen zumindest in ihrem Erscheinungsbild zu erfassen, reduziert aber zugleich den Stromverbrauch auf etwa 1 Amperestunde/Tag und ermöglicht so einen netzfreien Batteriebetrieb über einige Wochen.