

Bestimmung der Temperaturkoeffizienten des Göttinger Observatoriummagnetometers

Martin Leven und Peter Spitta
Institut für Geophysik, Universität Göttingen

1. Einleitung

Von 1957 bis 1993 wurden die erdmagnetischen Variationen auf dem Gelände des Institutes für Geophysik registriert, seit 1983 unterstützt von Absolutwertmessungen. Es zeigte sich aber immer deutlicher, daß die Störungen durch die Zunahme des Straßenverkehrs, steigende Studentenzahlen, kathodische Korrosionsschutzmaßnahmen der Gasleitung, die unmittelbar am Institut vorbeigeführt wurde, und die Lage am Rande der Kalksteinscholle, die zu sehr kurzfristigen Basisänderungen führte, eine Verlegung in ein ungestörteres Gebiet erforderten. Etwa 8 km östlich auf einem Forschungsgelände der Universität konnte im Frühjahr 1993 eine neue Registrierstation aufgebaut werden. Es wurden moderne Magnetometer mit eingebautem Speicher angeschafft, die sowohl lange Perioden als auch kurzperiodische Schwankungen des Erdmagnetfeldes aufzeichnen können. Außerdem wurde ein Overhauser-Protonenmagnetometer aufgestellt, das das Totalfeld mißt und aufzeichnet, die so gewonnenen Daten wurden einmal jede Woche abgeholt und in einem Speicher im Institut gesammelt.

Als Variationsinstrument wurde ein Magnetometer der Firma MAGSON (Hersteller: V. Auster) eingesetzt. Dieses Gerät zeichnet sich (nach Firmenangaben) durch hohe Empfindlichkeit, niedriges Rauschen und kleinem Temperaturkoeffizienten ($< 1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$) aus, und es konnte mit einem Speicher geliefert werden, der für die drei erdmagnetischen Komponenten X, Y und Z jeweils Minutenmittelwerte speichert. Diese Eigenschaft war auch ausschlaggebend für die Anschaffung des Gerätes.

Im Grunde ist das Gerät ein Feldgerät, das - weit entfernt von jeder menschlichen Siedlung - die erdmagnetischen Elemente registriert, es ist sehr empfindlich gegenüber allen elektrischen oder magnetischen Störungen: das Verbindungskabel zwischen dem Sensor, der die Fluxgate-elemente beherbergt, und der dazugehörigen Elektronik ist nicht abgeschirmt (bis auf die Erregerleitung, die die Ströme zum Erreichen der Sättigung der Kerne durchleitet), in der Elektronik sind zu wenig Entstörkondensatoren und keine Abschirmbleche zwischen den Platinen vorhanden, die Ausgangsspannung des Temperaturfühlers im Sensor (PT100) wird verfälscht durch den Kabelwiderstand. Im freien Feld sind solche Abschirmungen nicht erforderlich, aber in einem Observatorium treten doch Störfelder von benachbarten Geräten auf, die die Registrierung empfindlich stören können. Z. B. war es erforderlich, das Overhauser-Protonenmagnetometer zur Abschirmung in einen Metallkasten zu setzen und die Entfernungen zwischen dem Overhauser- und dem Fluxgatesensor möglichst groß zu machen. Um Störungen dieser Art zu vermeiden, war es dringend erforderlich, das Variationsinstrument zu verbessern.

Aber erst als die rege Forschungs- und Registriertätigkeit mit vielen Feldmessungen (Eifelprojekt) abgeschlossen waren, wobei das Observatoriumsgerät oft als Basisinstrument diente, stand ein Ersatzgerät zur Verfügung, um diese oben erwähnten Mängel zu beheben: Das Verbindungskabel zwischen Sensor und Elektronik wurde ausgetauscht durch ein Kabel, dessen Adern paarweise gegeneinander abgeschirmt waren, zusätzlich war ein Gesamtschirm nach außen vorhanden. Abschirmbleche und zusätzliche Kondensatoren wurden in die Elektronik eingebaut, und die Temperaturmessung im Sensor (PT100) wurde zu einer echten Vierpolmessung erweitert, der Kabelwiderstand spielt jetzt keine Rolle mehr. Und es ergab sich die Möglichkeit, im Institut für Geophysik in Braunschweig die vom Hersteller gemachten Angaben über die Skalenwerte und das Rauschen in den Komponenten zu überprüfen und die Temperaturkoeffizienten zu messen. Über diese Messungen, die in der Zeit vom 02. bis 05.05.2000 stattfanden, soll in dieser Arbeit berichtet werden.

2. Messung des Rauschens

Der Hersteller V. Auster hat in der Betriebsanleitung eine Grafik abgedruckt, in der er die Ergebnisse seiner Rauschmessung zeigt. Er setzte seinen Sensor einem Feld von 100 pT bei einer Frequenz von 1 Hz aus, die Ausgangsspannung wurde frequenzanalysiert und in dem gebräuchlichen Maß $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ über der Frequenz aufgetragen. Man sieht in Abb.1 (links) bei Frequenzen ≥ 2 Hz, daß das Rauschen einen mittleren Wert von $3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ annimmt. Dieses Ergebnis sollte nachgeprüft werden.

Rauschmessungen sind nur sehr eingeschränkt möglich, wenn das natürliche Erdfeld nicht abgeschwächt werden kann. Das Braunschweiger Institut besitzt einen Kasten, der vollständig mit zwei Lagen Mumetall abgeschirm ist und die Schwankungen des Erdmagnetfeldes bis auf wenige Prozent unterdrücken kann. Es kann eine Zylinderspule, die den Sensor umgibt, aufnehmen, durch die ein sinusförmiger Strom von 1 Hz fließt und ein Feld mit einer Amplitude von 1 nT erzeugt, das als anregendes Feld auf die einzelnen Komponenten im Sensor wirkt. Die Ausgangsspannungen der Komponenten werden frequenzanalysiert und als Grafik ausgedruckt (Abb.1, rechts: X-Komponente gestrichelt, Y-Komp. gepunktet, Z-Komp. durchgezogen). Die Ordinate ist hierbei logarithmisch in dBV bei festgelegter Basis geteilt ($0 \text{ dBV} = 1 \text{ V}$). So kann man die Spannungswerte ausrechnen und durch die Wurzel der betroffenen Frequenz teilen, um die beiden Grafiken vergleichen zu können. Das ist bei 5 Frequenzen durchgeführt worden, und zwar bei dem höchsten Störpegel der Z-Komponente, die als Spitzen gerade bei den Vielfachen von 1 Hz auftreten. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind als Kreuze in die Grafik von Auster aufgenommen worden. Man sieht, daß diese Spitzen einen etwas größeren Störpegel als Austers Kurve besitzen, aber zwischen den Kreuzen ist der Pegel um etwa 10 dBV (Faktor 3) kleiner als bei Auster – vermutlich dank der konsequenten Abschirmtechnik nach dem Umbau.

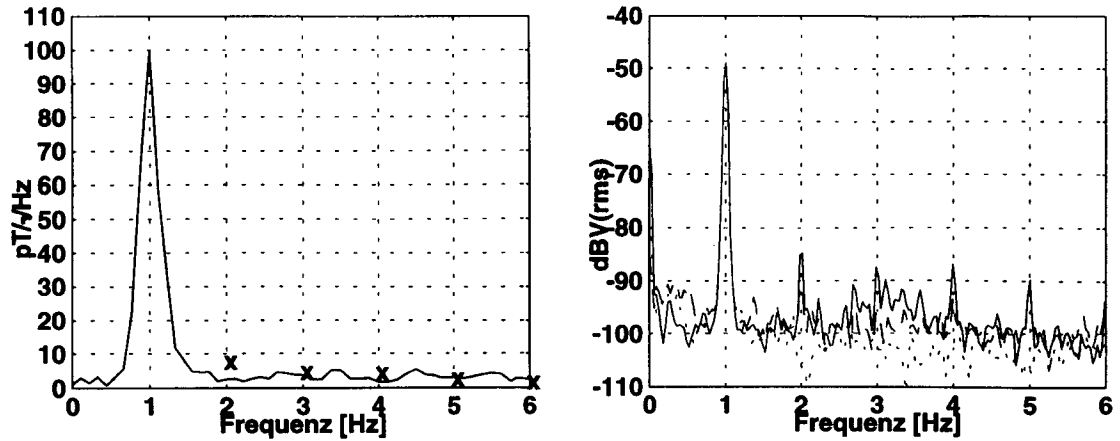


Abb. 1: Rauschspektrum von Auster (links) und von Braunschweig (rechts)

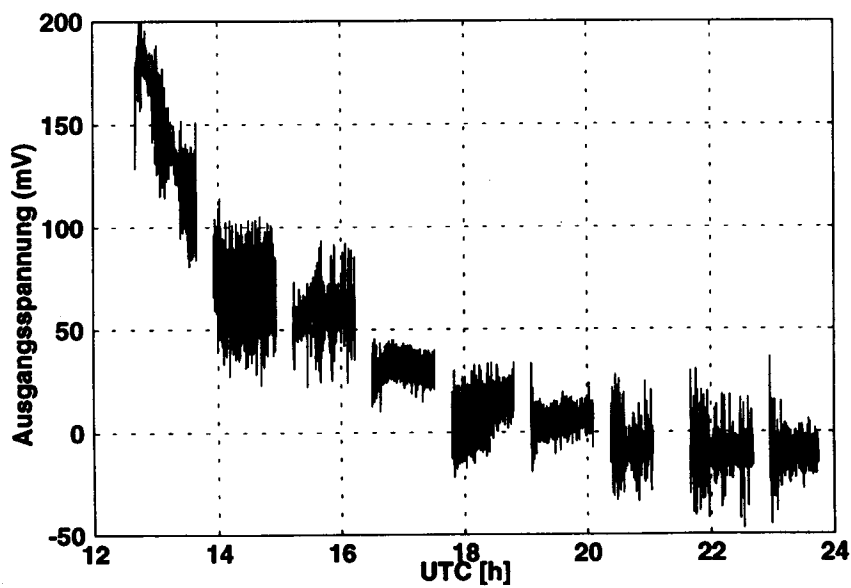


Abb. 2: Zeitreihe der X-Komponente bei Absenken der Temperatur und konstantem Magnetfeld

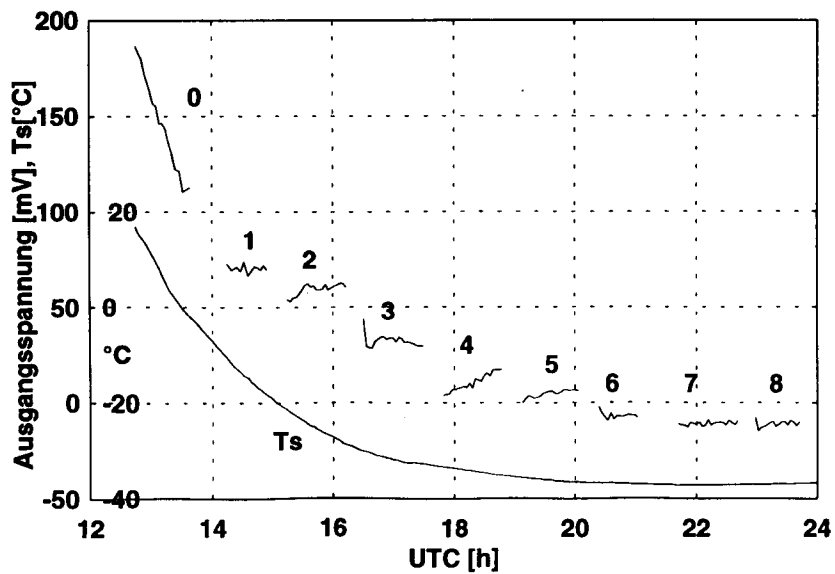


Abb. 3: Zeitreihe der X-Komponente, geglättet durch übergreifendes Mittel über 21 Werte. Ts ist die Sensortemperatur

3. Bestimmung der Temperaturkoeffizienten

3.1 Versuchsaufbau

Sensor und Elektronik haben beide einen Temperaturkoeffizienten. Bei diesem Versuch werden aber nur die TK's des Sensors bestimmt, die Elektronik bleibt in einem Vorraum mit normaler Zimmertemperatur, die nicht konstant gehalten wird. Der von Auster gelieferte Sensor besteht aus einem Fiberglasblock, in den Vertiefungen eingefräst worden sind zur Aufnahme der drei Fluxgate-Sensoren, außerdem befindet sich auf dem Block eine Dosenlibelle zum Horizontieren und ein Temperatursensor (PT100) zur Messung der Sensortemperatur. Um mechanische Schäden zu vermeiden, ist das Ganze mit einer durchsichtigen Haube abgedeckt worden.

Eigentlich sind diese Magnetometer für Feldeinsätze gebaut worden, der Sensor muß bei jedem Wetter trocken bleiben. Deshalb ist in Göttingen ein weiteres Gehäuse entwickelt worden, in das der Sensor eingebaut worden ist. Dieses Gehäuse ist wasserdicht, gestattet trotzdem eine Horizontierung und Orientierung nach Norden durch eine unmagnetische Mechanik mittels eines Schlüssels, der durch drei kleinen Öffnungen eingeführt werden kann, die nach diesen Einstellarbeiten wieder verschraubt werden. Der Sensor kann auch vergraben werden, um mögliche äußere Temperatureinflüsse zu verringern.

In Magnetsrode, der Außenstelle des Braunschweiger Institutes für Eicharbeiten an erdmagnetischen Geräten, wird für Temperaturuntersuchungen an Bauteilen ein Wärmekasten eingesetzt, der für tiefere Temperaturen eine Schale für Trockeneis, für höhere eine elektrische Heizung besitzt. Durch das zusätzliche Gehäuse mit der notwendigen Mechanik wäre bei diesem Sensor der thermische Zugang zu den zu untersuchenden Fluxgatespulen sehr erschwert worden. Deshalb muß der Deckel vom wasserdichten Gehäuse wieder abgeschraubt werden, damit keine nennenswerte Zeitverzögerung eintritt zwischen der Temperaturmessung, die an vielen Stellen gleichzeitig im Wärmekasten durchgeführt wird, und der Antwort der Magnetfeldsensoren. Der Sensor wird horizontiert und orientiert nach dem Spulensystem in Magnetsrode.

Das Spulensystem, in das der Wärmekasten eingesetzt wird, ist ein Dreikomponentensystem nach Braunbeck und gestattet, jedes beliebige Magnetfeld zu erzeugen und konstant zu halten. Die natürlichen Variationen der Erdmagnetfeldes können bis zu einer Genauigkeit von 0.1 nT wegkompensiert werden. Für diesen Temperaturversuch ist ein Feld eingestellt und konstant gehalten worden, das dem Erdfeld um Mitternacht in Göttingen entspricht (X: 19070 nT, Y: 0 nT, Z: 44800 nT). Alle Erdfeldvariationen wurden wegkompensiert. Die Ausgänge der drei Magnetfeldsensoren für X, Y und Z des Sensors wurden mit der Aufnahmeelektronik von Magnetsrode verbunden, die Taktrate der Aufzeichnung betrug 0.5 sec, jede Komponente erhielt ein eigenes File, auch die Temperaturen wurden separat aufgezeichnet.

Die erste Messung war die Überprüfung der Skalenwerte, mit denen die Ausgangsspannung der Komponenten, die in mV vorliegen, auf die gebräuchliche Maßeinheit nT für die magnetische Flußdichte umgerechnet werden kann. Dafür wurden – getrennt für jede Komponente – stufenweise ein definiertes Feld erzeugt und die Ausgangsspannungen gemessen. Die so gewonnenen Skalenwerte stehen in der Tabelle 1, sie weichen nur unwesentlich von den in Göttingen gemessenen ab.

Tab. 1: Skalenwerte der Komponenten

	Bs	GTT	Auster	
Skw(X)	5.035	5.022	5.005	nT/mV
Skw(Y)	5.034	5.047	5.004	nT/mV
Skw(Z)	5.006	5.034	5.004	nT/mV

Für die Bestimmung der Tk's wurde dann Trockeneis in den Kasten eingefüllt und der Deckel verschlossen.

Es ist in Magnetsrode üblich, nicht nur die Temperaturabhängigkeit der Magnetfeldsensoren zu messen, sondern auch eine mögliche Abhängigkeit der Skalenwerte von der Temperatur zu überprüfen. Dazu wird einmal pro Stunde ein Zusatzfeld von 1000 nT von einer Minute Dauer - erst positiv, eine Minute Pause, dann negativ - auf jede Komponente zugeschaltet, getrennt für jede Komponente. Diese Zusatzinformation haben wir aber nicht ausgewertet und aus den beiden großen Files, die die Registrierungen der drei Komponenten beim Abkühlen und beim Aufwärmen enthalten, entfernt. Damit haben wir die Files unterteilt in kleinere, die nummeriert wurden, die Teilungsgrenzen waren die ± 1000 nT, die leicht zu erkennen waren. Die Auswertung wurde in den drei Komponenten getrennt vorgenommen. Es ist es nicht erforderlich, jeden Schritt in jeder Komponente zu wiederholen. Die Spannungswerte der X-Komponente wurde zuerst ausgewertet. Bei der X-Komponente wird deshalb jeder Schritt ausführlich, bei Y und Z nur stichwortartig erläutert.

3.2 Temperaturkoeffizient der X-Komponente

Abb. 2 zeigt eine Zeitreihe der X-Komponente vom Beginn der Untersuchung (03.05.2000, Mittag) bis Mitternacht des gleichen Tages. Sie beschreibt die Abkühlphase. Das große File ist unterteilt worden in 9 kleinere Files, in den Lücken waren die Daten der 1000 nT-Zusatzfelder, die weggelassen wurden. Es fällt auf, daß ein sehr großes Rauschen bei allen Files auftritt, eine Auswertung ohne weitere Filterung ist schlecht möglich. Zur Glättung wurde deshalb ein übergreifendes Mittel über 21 Werte über die Registrierung gelegt - die Datendichte ist damit immer noch mehr als ausreichend. Diese Zeitreihen, die von 0 bis 8 nummeriert wurden, zeigt Abb. 3, dazu die Temperatur T_s im Sensor, die von 18°C bis -36°C fällt.

Diese Abbildung zeigt die Temperaturabhängigkeit der X-Komponente und die Temperatur mit der Zeit auf der Abzisse. Da eine deutlich sichtbare Beziehung zwischen der Ausgangsspannung der Komponente und der Temperatur besteht, kann sie umgezeichnet werden in ein Diagramm, das die Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Temperatur direkt zeigt (Abb. 4 oben).

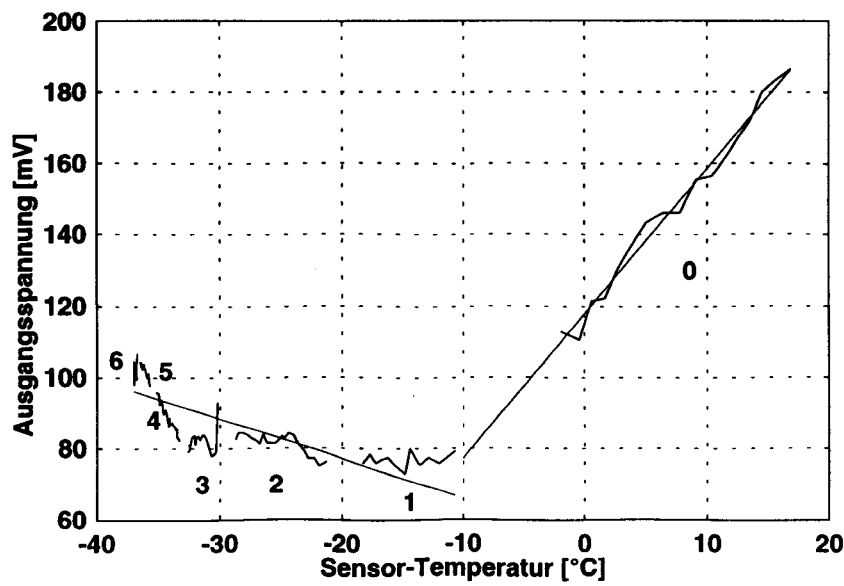
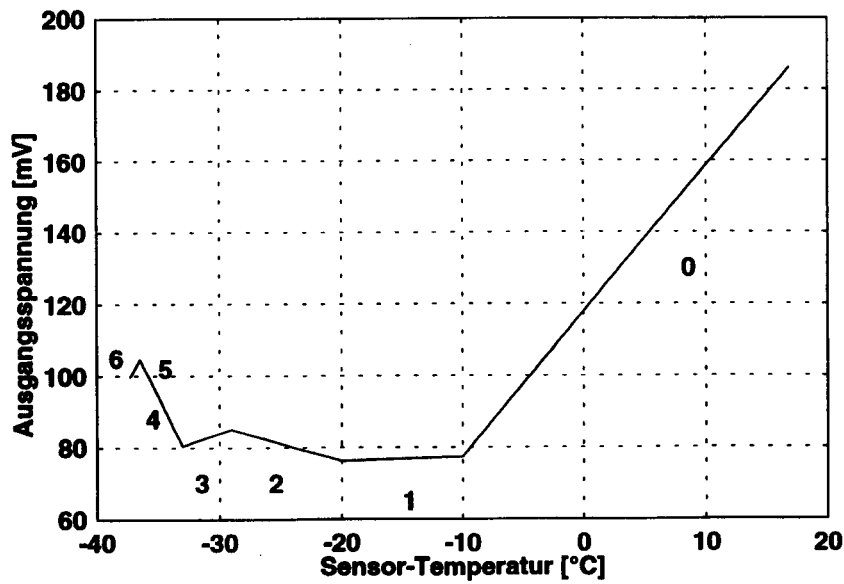
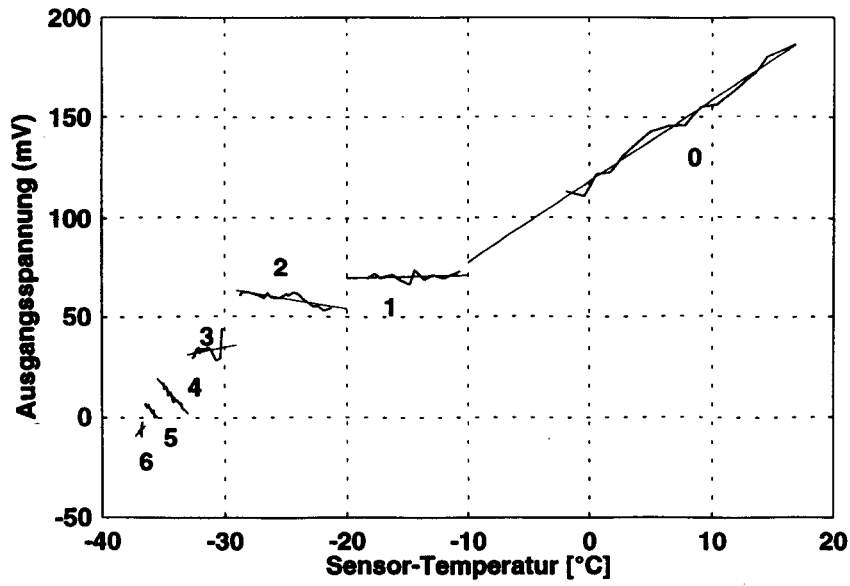


Abb. 4: Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der X-Komponente

Wenn man die Ausgangsspannung in Abb. 3 im Laufe der Zeit verfolgt und die Datenlücken nach Gutdünken schließt, fällt auf, daß oft der Anfang einer neuen Gruppe nicht die Position einnimmt, die man erwartet hätte. Offenbar ist die Nullpunktstabilität nach einer großen Auslenkung, die durch das ± 1000 nT-Zusatzfeld verursacht wurde, nicht mehr gegeben, der Ausgang stellt sich auf einen neuen Wert ein. Das ist in Abb. 3 schon sichtbar, in Abb. 4 (oben) natürlich auch. Um diese Versätze zwischen den Files, die sehr unterschiedlich sein können, zu eliminieren, wird durch die Daten jedes Files eine Regressionsgerade gelegt und diese nach vorne und hinten nach Augenmaß bis auf die Mitte der Datenlücke verlängert. Das Ende einer Geraden wird in der Regel nicht den Anfang der Regressionsgerade der nächsten Gruppe treffen. Diese Differenz (in mV) zwischen dem Ende der einen Gerade und dem Anfang der nächsten wird abgelesen und als Konstante zu allen Daten des nächsten Files addiert. Die beiden Files werden so aneinander angeschlossen. Das wird in Abb. 4 (Mitte) dargestellt. In Abb. 4 (unten) werden die Files nach dem "Anschluß" noch einmal dargestellt und - wieder nach Augenmaß - Regressionsgeraden durchgelegt. Es ergeben sich offenbar zwei Temperaturkoeffizienten (Tk): einer, der den Temperaturbereich von Zimmertemperatur bis etwa -10°C beschreibt, und eine weitere für die tieferen Temperaturen:

$$\text{Tk1}(X) = 4.06 \text{ mV}/^\circ\text{C} = 0.81 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = 20 \text{ bis } -10^\circ\text{C}$$

$$\text{Tk2}(X) = -1.12 \text{ mV}/^\circ\text{C} = -0.22 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = -10 \text{ bis } -36^\circ\text{C}$$

Für die Umrechnung der Tk's von der Einheit $\text{mV}/^\circ\text{C}$ auf die gebräuchliche Einheit $\text{nT}/^\circ\text{C}$ wurden die in Braunschweig bestimmten Skalenwerte benutzt (s. Kap. 3.1).

3.3 Temperaturkoeffizienten der Y- und Z-Komponenten

Die Bestimmung der Tk's der Y- bzw. Z-Komponenten vollzieht sich nach dem gleichen Schema wie bei der X-Komponente, die grafische Darstellung in Abb. 5 wird sehr verkleinert und zusammengefaßt.

Es fällt auf, daß bei fallenden Temperaturen die Ausgangsspannung von Y wächst, das läßt auf einen negativen Tk schließen. Die Versätze zwischen den einzelnen Files sind gegenüber der X-Komponente deutlich kleiner geworden, man kann einen einheitlichen Tk von Zimmertemperatur bis etwa -28°C festlegen. Unterhalb knickt die Kurve um. Im Vergleich zu X sind die Versätze bei der Z-Komponente deutlich größer. Der TK ist von Zimmertemperatur bis -10°C fast null und fällt dann stufenweise zu größeren Werten ab. Die Zahlenwerte der Tk's betragen

$$\text{Tk1}(Y) = -2.26 \text{ mV}/^\circ\text{C} = -0.45 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = 20 \text{ bis } -28^\circ\text{C}$$

$$\text{Tk2}(Y) = 4.22 \text{ mV}/^\circ\text{C} = 0.84 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = -30 \text{ bis } -36^\circ\text{C}$$

$$\text{Tk1}(Z) = -0.12 \text{ mV}/^\circ\text{C} = -0.02 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = 20 \text{ bis } -10^\circ\text{C}$$

$$\text{Tk2}(Z) = 10.57 \text{ mV}/^\circ\text{C} = 2.11 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = -10 \text{ bis } -28^\circ\text{C}$$

$$\text{Tk3}(Z) = 27.09 \text{ mV}/^\circ\text{C} = 5.41 \text{ nT}/^\circ\text{C}, T = -30 \text{ bis } -36^\circ\text{C}$$

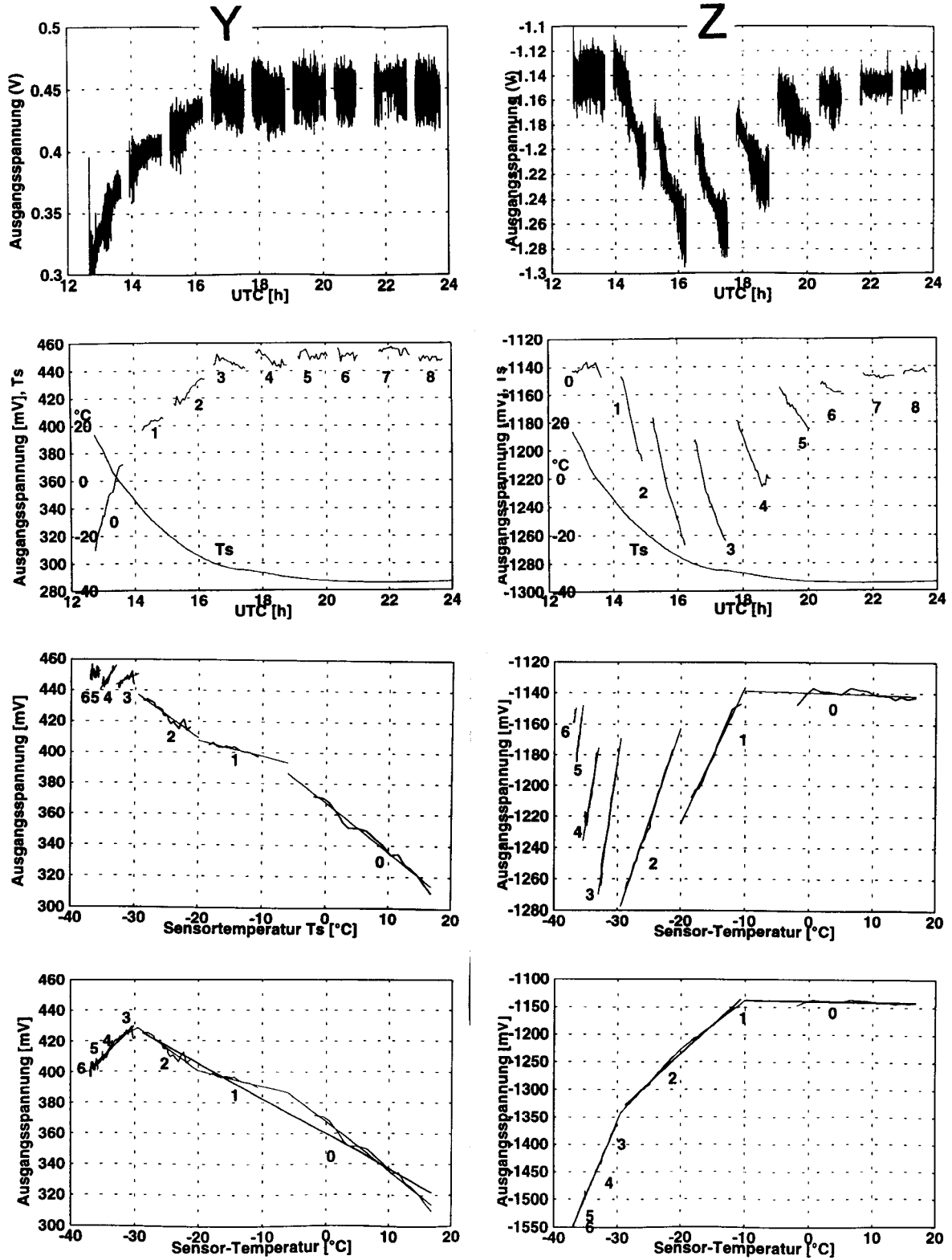


Abb. 5: Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Y- und Z-Komponente

3.4 Tk's beim Aufheizen

Etwa um Mitternacht (04.05.2000, 0h UTC) war das Trockeneis verdampft und eine zweite Periode schloß sich an, in dem sich der Sensor langsam erwärmte, in der letzten Phase mit Unterstützung einer elektrischen Heizung. Da die Auswertung dieser Daten sich nicht von der im ersten Teil geschilderten unterscheidet, wird hier nur das Ergebnis als Grafik und als Zahlenwert gebracht (Abb.6):

$$Tk3(x) = -1.93 \text{ mV/}^\circ\text{C} = -0.38 \text{ nT/}^\circ\text{C}, T = -33 \text{ bis } -23^\circ\text{C}$$

$$Tk4(x) = 4.17 \text{ mV/}^\circ\text{C} = 0.83 \text{ nT/}^\circ\text{C}, T = -23 \text{ bis } 20^\circ\text{C}$$

$$Tk3(Y) = -1.78 \text{ mV/}^\circ\text{C} = -0.35 \text{ nT/}^\circ\text{C}, T = -36 \text{ bis } -3^\circ\text{C}$$

$$Tk4(Y) = 4.89 \text{ mV/}^\circ\text{C} = 0.97 \text{ nT/}^\circ\text{C}, T = -3 \text{ bis } 20^\circ\text{C}$$

$$Tk4(Z) = 2.96 \text{ mV/}^\circ\text{C} = 0.59 \text{ nT/}^\circ\text{C}, T = -36 \text{ bis } -7^\circ\text{C}$$

$$Tk5(Z) = 0.32 \text{ mV/}^\circ\text{C} = 0.06 \text{ nT/}^\circ\text{C}, T = -6 \text{ bis } 20^\circ\text{C}$$

4. Versuch einer Deutung

Die oben gebrachten Ergebnisse sind etwas verwirrend, da sie keineswegs einen eindeutigen Temperaturkoeffizienten für die Magnetfeldkomponenten ergeben. Vergleicht man die TK's, die vom langsamen Abkühlen von der Zimmertemperatur bis -10°C her stammen, mit TK's, die von dem baugleichen Austergerät AU29 stammen (SPITTA, 2001), so findet man (wenn die Skalenwerte berücksichtigt werden), in X und Z eine qualitative Übereinstimmung, während Y sowohl im Zahlenwert als auch im Vorzeichen einen großen Unterschied zeigt (Tab. 2).

Tab. 2: Tk's des Observatoriumsinstrumentes AU20 und des Feldinstrumentes AU29

	Obs.-Instr. AU20	Feld-Instr. AU29	
Tk(X)	0.81	1.17	nT/°C
Tk(Y)	-0.45	1.42	nT/°C
Tk(Z)	-0.02	0.14	nT/°C

Beim weiteren Abkühlen zeigen alle Komponenten einen plötzlichen Wechsel im Vorzeichen und Betrag der Koeffizienten, bei X und Z bei etwa -10°C , bei Y erst bei etwa -28°C . Über die Ursache kann man nur Vermutungen anstellen. Es ist nicht wahrscheinlich, daß die Induktivität der Spulen sich schlagartig ändert (das müßte sie bei baugleichen Spulen auch bei Y tun). Wahrscheinlicher ist, daß die mechanischen Komponenten für Horizontierung und Einnorden, die zusätzlich eingebaut wurden und nicht von Auster stammen, bei so tiefen Temperaturen ihre Eigenschaften ändern, die Federn härter werden und die Horizontierung verloren geht. Beim Wiederaufwärmen wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit ein neuer "Horizont" einstellen, der mit dem alten nur den Namen gemein hat.

In allen Komponenten trat bei der plötzlichen Feldänderung, die klären sollte, ob auch die Skalenwerte eine Temperaturabhängigkeit zeigen, ein Versatz in den Kurven auf (s. Abb. 3 und 5): am wenigsten bei Y, merklich bei X, und stärksten bei Z. Weiter war das Rauschen der Komponenten (s. Kap. 2), jeweils bei festgehaltener Frequenz, am geringsten bei Y, stärker bei X und erreichte sein Maximum bei Z. Auch bei der Bestimmung der Tk's von AU29 (SPITTA, 2001) trat ein ähnlicher Effekt auf, als die Tk's der Elektronik bestimmt werden sollten. Es ergaben sich Tk's in X und Z, die den gleichen Zahlenwert ergaben, nur mit unterschiedlicher Größe des Fehlers (bei Y war der Tk = 0 nT/°C). Offenbar war der Bestim

mungsfehler abhängig von der Größe des Gleichstromes, mit dem das konstante Feld zu null kompensiert wird: bei Y wird nicht kompensiert, kein Strom (die Deklination ist $< 1^\circ$), bei X muß etwa $19 \mu\text{T}$, bei Z etwa $44 \mu\text{T}$ kompensiert werden. Es wäre möglich, daß sowohl die Versätze beim hier untersuchten Observatoriumsmagnetometer als auch das unterschiedliche Rauschmaß in irgendeiner Weise mit den in jeder Komponente unterschiedlichen Kompensationsströme zusammenhängen.

,

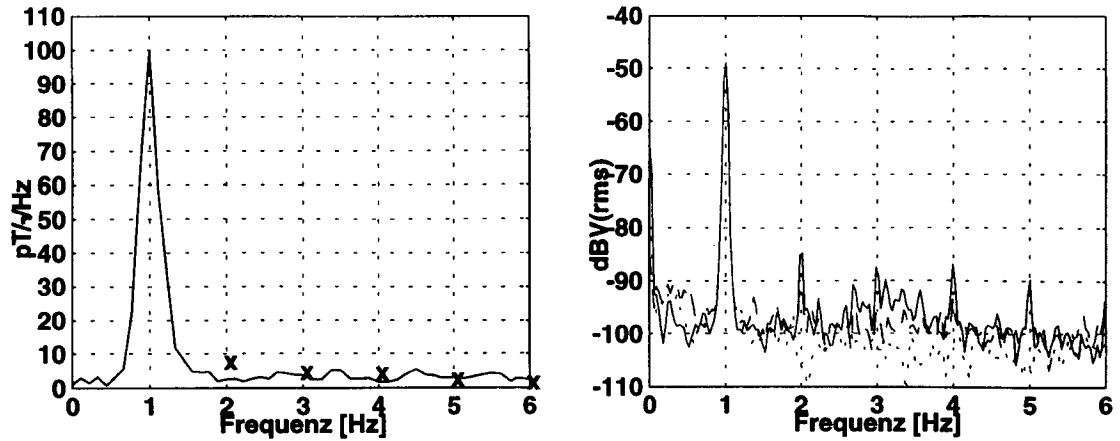


Abb. 1: Rauschspektrum von Auster (links) und von Braunschweig (rechts)

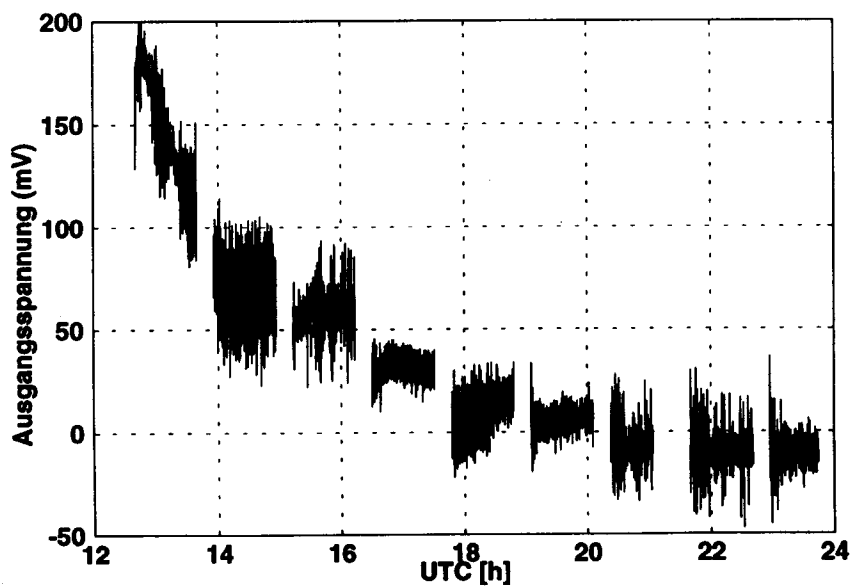


Abb. 2: Zeitreihe der X-Komponente bei Absenken der Temperatur und konstantem Magnetfeld

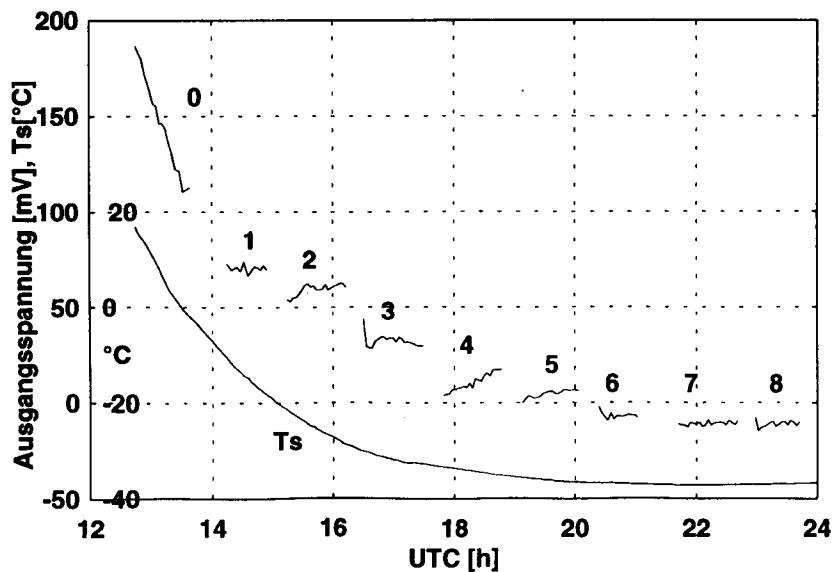


Abb. 3: Zeitreihe der X-Komponente, geglättet durch übergreifendes Mittel über 21 Werte. Ts ist die Sensortemperatur

5. Danksagung

Für die Möglichkeit, diese Untersuchung im Institut für Geophysik der Universität Göttingen durchführen zu können, danke ich der Institutsleitung, die uns räumlich und finanziell unterstützt hat. Besonderer Dank gebührt den Braunschweiger Kollegen Ingo Richter und Falko Kuhnke, die uns nicht nur beraten und betreut, sondern auch die Messungen durchgeführt und einen großen Teil der Auswertungen übernommen haben. Prof. Dr. Ulrich Schmucker danken wir für viele nützliche Anregungen und Diskussionen und für eine kritische Durchsicht des Manuskriptes.

6. Literatur

Spitta, P.: Bestimmung der Temperaturkoeffizienten von Magnetometern
in: Hördt, A. und J.B.Stoll (Hrsgb), Prot.19. Koll. "Elektromagnetische Tiefenforschung", Burg Ludwigstein, 1. - 5.10.2001