

GFZ

Helmholtz-Zentrum
POTS DAM

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM

**DEUTSCHES
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

Eberhard Pulz

Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für dreiachsige Fluxgate- Magnetometer am Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam

Scientific Technical Report STR13/07

Imprint

HELMHOLTZ CENTRE POTSDAM
**GFZ GERMAN RESEARCH CENTRE
FOR GEOSCIENCES**

Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

Printed in Potsdam, Germany
May 2013

ISSN 1610-0956

DOI: 10.2312/GFZ.b103-13074
URN: urn:nbn:de:kobv:b103-13074

This work is published in the GFZ series
Scientific Technical Report (STR)
and electronically available at GFZ website
www.gfz-potsdam.de > News > GFZ Publications

Eberhard Pulz

**Entwicklung einer
Kalibriereinrichtung für
dreiaxiale Fluxgate-
Magnetometer am Deutschen
GeoForschungsZentrum
Potsdam**

Scientific Technical Report STR13/07

Eberhard Pulz

Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für dreiachsige Fluxgate-
Magnetometer
am Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam

Scientific Technical Report STR13/07

Inhalt

0. Abstract
1. Einleitung
2. Untersuchungen zur Eignung des Spulensystems
3. Spulenparameter
4. Aufbau des Kalibriermessplatzes
5. Ausrichtung des zu kalibrierenden Sensors im Spulensystem
6. Beispielmessungen
7. Technische Parameter
8. Danksagung

Anlage 1 Bedienung des fluxgate Kalibriermeßplatzes in den Hütten 17/18 des Adolf-Schmidt-Observatoriums in Niemegek

Anlage 2 Calibration of the coil system of the observatory Niemegek, GFZ
(Ales Zikmund, Czech Technical University Prag, Faculty of Electrical
Engeneering)

Abstract

The number of three dimensional fluxgate magnetometers has increased at the Geomagnetic Instrument Pool Potsdam of the GFZ. The instruments are subjected to extremely high mechanical loads during the expeditions, so that malfunctions can occur. This experience was gained earlier with the induction coils. A calibration facility was developed previously for checking these instruments [STR01/10, Meas.Sci. Technol. **13** (2002)N49-51]. A new calibration facility for checking three dimensional fluxgate magnetometers was developed now using the same principle. A large old wooden three axis coil system existing at the geomagnetic observatory of the GFZ in Niemegek was used. The facility works from 1mHz up to 500Hz.

1. Einleitung

Um die Jahrtausendwende wurde vom Verfasser eine Kalibriereinrichtung für Induktionsspulensystem entwickelt [STR01/10, Meas.Sci. Technol. **13** (2002)N49-51] (Zylinderspule). Zwischenzeitlich hat sich die Anzahl der dreiachsigen fluxgate-Magnetometer im Gerätepool (GIPP) des GFZ stark vergrößert. Die Geräte sind während der Meßkampagnen starken mechanischen Belastungen ausgesetzt, so daß Defekte nicht ausgeschlossen werden können. Diese führen zu falschen Messwerten und damit zu nicht korrekten Interpretationen. Nur durch routinemäßige Kalibrierungen können Fehler festgestellt werden.

Am geomagnetischen Observatorium des GFZ befindet sich ein großes, altes hölzernes, dreiachsiges Spulensystem (Abb. 1), das für diesen Zweck geeignet schien. Die Umsetzung zur Kalibriereinrichtung sollte auf den technischen Grundlagen der Zylinderspule basieren. Die Arbeit wurde von November 2012 bis März 2013 durchgeführt. Zu Beginn der Arbeiten war das Spulensystem nur für Gleichfeldanwendungen geeignet (vgl. Abb. 2). Erst nach zeitraubenden Untersuchungen konnten die Ursachen für das ungeeignete Frequenzverhalten eruiert und beseitigt werden.



Abbildung 1: Das hölzerne Spulensystem

2. Untersuchungen zur Eignung des Spulensystems

Das Spulensystem (Hütte 17) wurde vor etwa 60 Jahren errichtet. Anfang der 90er Jahre gab es zwei Versuche, aus dem Spulensystem eine Kalibriereinrichtung zu machen, die jedoch scheiterten. Daraus resultierten zusätzliche Wicklungen auf allen drei Spulen.

Die ursprünglichen Wicklungen schieden auf Grund der hohen Induktivität aus.

Die Wicklungen (14 Windungen pro Spule) aus den 90er Jahren sollten sich eignen, da die Eigeninduktivitäten kleiner 10mH gemessen wurden.

Das fluxgate-Magnetometer MAG-03MS von Bartington wurde als Testmagnetometer eingesetzt. Die Frequenz/Amplituden/Phasen Charakteristiken zeigen einen flachen Verlauf

bis nahe 1kHz. Das MAG-03MS ist also gut für den Spulentest geeignet.

Die ersten Messungen in den drei Richtungen zeigten, dass alle drei Spulen nicht den erwarteten flachen Verlauf in Amplitude und Phase besitzen (Abb. 2, nur Amplitude dargestellt). Die Referenz entspricht der Z-Komponente des Sensors und wurde in der Zylinderspule gemessen.

Die Y-Spule kam den Erwartungen noch am nächsten. Ein Test mit nur 2 Windungen auf der Z-Spule zeigte nahezu den selben Kurvenverlauf. Da die Anzahl der Wicklungen quadratisch in die Induktivität eingeht, konnte nur noch eine geschlossene Leiterschleife die Ursache sein. Diese wurde in der ursprünglichen Z-Wicklung vermutet

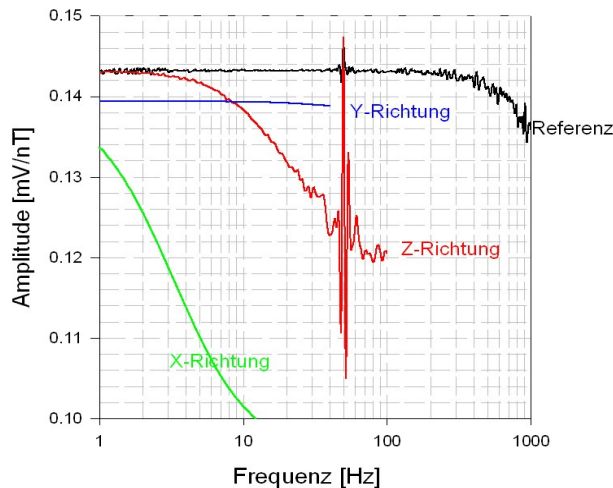


Abbildung 2: Frequenz/Amplituden-Charakteristik des Spulensystems in Hütte 17, gemessen mit MAG03 im Nov. 2013

(die seit Jahren defekt war). Daraufhin wurden die ursprünglichen ca. 220 Windungen der Z-Spule entfernt und die Windungen der 90er Jahre wieder aufgebracht.

Der Erfolg war überraschend; der Kurvenverlauf in Z-Richtung änderte sich nicht, dafür war der Kurvenverlauf der X-Richtung nun identisch mit dem Y-Verlauf. Daraus folgt, dass die orthogonalen Spulen nicht unabhängig voneinander sind, sondern große Wechselwirkungen bestehen. Die Suche nach einer weiteren geschlossenen Leiterschleife führte auf das Dach: Eine geschlossene Kupferdachrinne mit Traufblech. Desgleichen wurden geschlossene Kreise am Blitzableiter einschließlich Ringanker festgestellt. Nach Öffnung aller Leiterschleifen konnten in allen Richtungen die erwarteten flachen Kurvenverläufe gemessen werden (vgl. Abb. 3). Auffällig ist der extrem hohe 50Hz Störpegel in allen drei Richtungen.

Außerdem fällt noch der leichte Amplitudenanstieg in der X- und der Y-Komponente oberhalb von 50Hz auf. Nach langwierigem Suchen wurde die Ursache für den extrem großen 50Hz Pegel gefunden und beseitigt. Es waren der Schutz- und Nullleiter verbunden und so verlegt, dass der Strom von der Steuerhütte (Nr.18) zum Blitzschutzringleiter der Spulenhütte Nr.17 floss. Für den Amplitudenanstieg wurde eine kapazitive Wechselwirkung zwischen den alten Wicklungen und den Neuen vermutet. Durch Reihenschaltung einer Kapazität in eine der ursprünglichen Wicklung konnte diese Vermutung bestätigt werden. Ein Reihenwiderstand in der alten Wicklung sollte nun den Kreis so bedämpfen, dass der gewünschte Kurvenverlauf realisiert wird. Das war möglich für eine Komponente, veränderte aber ebenso die Eigenschaften der beiden orthogonalen Spulen, so dass entschieden wurde auch die alten Wicklungen der X- und Y-Spule zu entfernen.

Abb. 4 zeigt das Ergebnis nach diesen Veränderungen. Man erkennt einen minimalen

Amplituden-Abfall oberhalb von 50Hz in allen drei Komponenten. Dieser entspricht dem Referenzsignal. Das Rauschen in der X- und der Z-Komponente im Frequenzbereich unterhalb 1Hz ist eine Eigenschaft des Sensors MAG03MS. In beiden Richtungen wirkt das natürliche Erdfeld als Offset der Signalspannungen, was zum Rauschen führt.

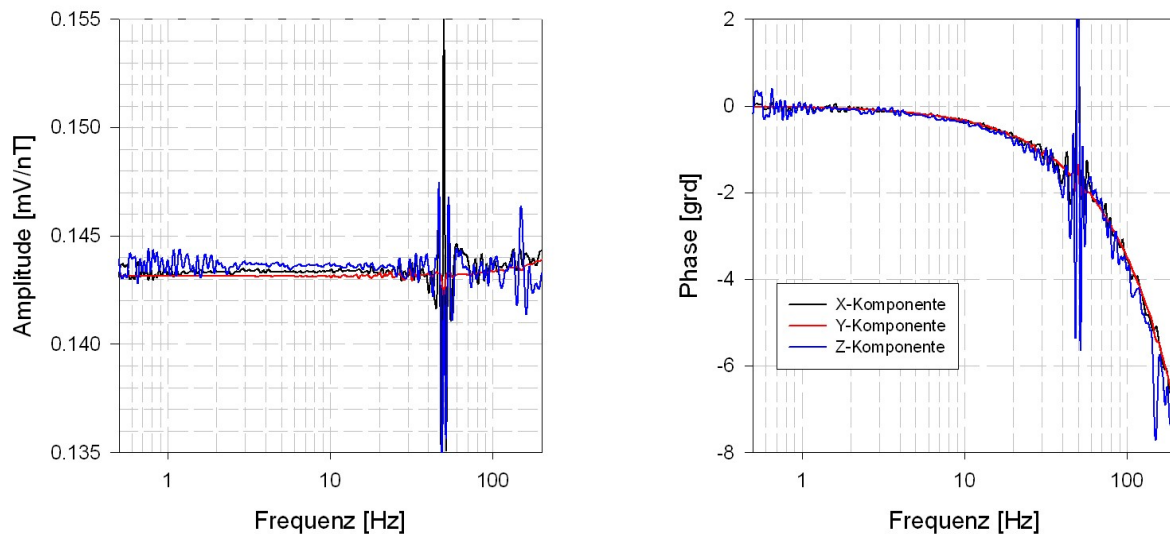


Abbildung 3: Ergebnis der Kalibrierung des Sensors MAG03MS nach Beseitigung aller Leiterschleifen

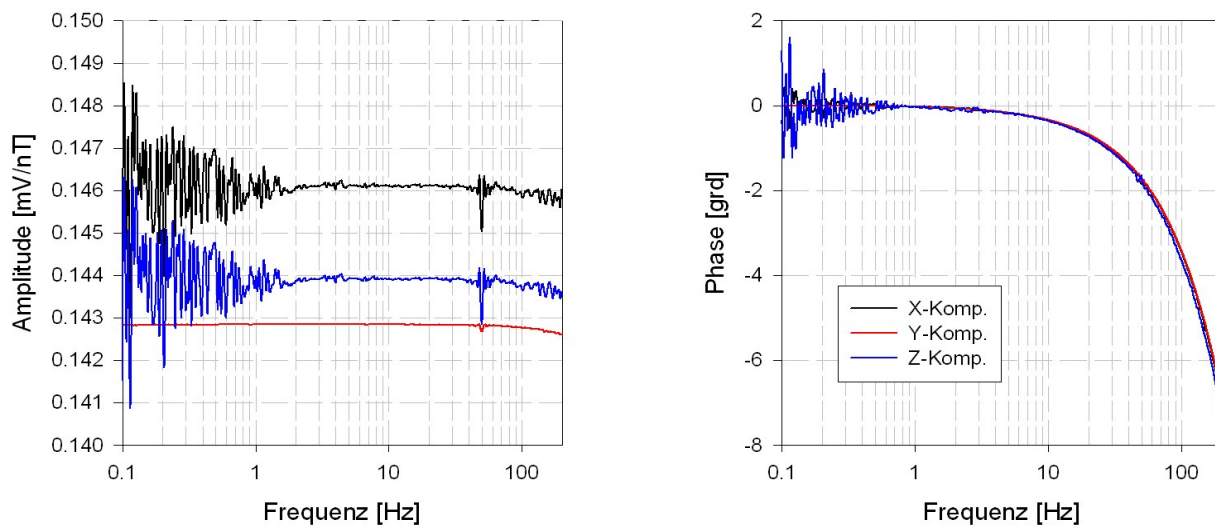


Abbildung 4: Ergebnis der Kalibrierung des Sensors MAG03MS nach Entfernung der ursprünglichen Bewicklung der X- und Y-Spulen sowie Beseitigung des 50Hz Problems (bitte Maßstab im Vergleich zu den Abb. 2,3 beachten)

3. Spulenparameter

Im Folgenden ist nur noch die Rede von den nachträglich aufgebrauchten 14 Wicklungen/Spule.

Spule	Widerstand Ohm	Induktivität mH	Spulenkonstante nT/mA	Orthogonalitäts- fehler grad
X	54.2	5.5	8,512	
Y	57.5	5.8	8,132	siehe Anhang
Z	82.5	8.5	5,498	

Die Spulenkonstanten S_k wurden mit Hilfe eines Cs-Magnetometers und der Serson-Formel neu bestimmt. Das in beiden Richtungen aufgeprägte Zusatzfeld wird mit A bezeichnet. Die dazugehörigen Messwerte werden mit F_+ und F_- bezeichnet. F ist der skalare Wert ohne Zusatzfeld. Dann ergibt sich A :

$$A = [(F_+^2 + F_-^2) / 2 - F^2]^{1/2}$$

$$S_k = A / I$$

$$I = \text{Spulenstrom}$$

Den kleinsten Durchmesser der drei Spulen besitzt die X-Spule mit einem Durchmesser von drei Metern. Die Homogenität ($10E-4$) erstreckt sich über ein Volumen von nahezu $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ (Abb.5) im Zentrum der Spule.

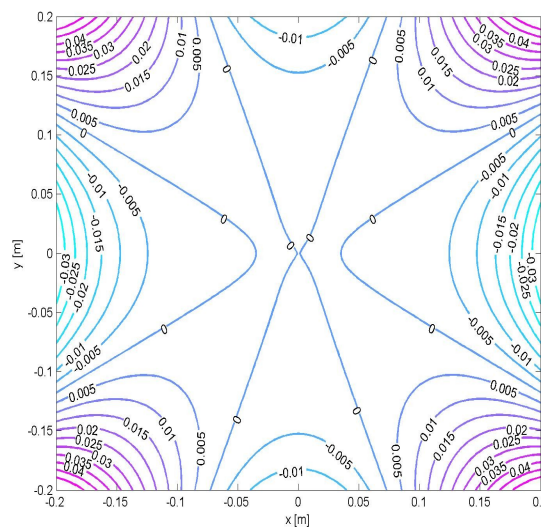


Abbildung 5: berechnete Homogenität der X-Spule (H.-P. Brunke)

4. Aufbau des Kalibriermessplatzes

Im Blockschaltbild (Abb. 6) ist das Messprinzip dargestellt. Der Analysator SR785, der zum Einsatz kommen sollte, hat nur eine Ausgangsspannung von 5V. Bei nur 14 Wicklungen/Spule würde das erzeugte Wechselfeld eine zu kleine Amplitude haben. Deshalb wurde der Verstärker P200 nachgeschaltet. Der Vorwiderstand mit 300 Ohm ist erforderlich, weil hohe Spannungen erforderlich sind, um eine schnelle Aufladung der Spule zu erreichen. Über den 10 Ohm Widerstand wird die Spannung für den Analysator-Eingang abgegriffen. Da automatisch alle drei Komponenten eines Sensors kalibriert werden sollten, wurde eine Schaltungsvorrichtung eingefügt. Es werden Computer-gesteuert nacheinander alle Spulen mit dem Messsignal beaufschlagt und gleichzeitig die entsprechende Signalspannung des Sensors zum Analysator durchgeschaltet. Der FitPC (Kleincomputer) steuert gleichzeitig den Analysator, übernimmt die Daten und speichert sie auf einem Observatoriums-PC.

Der Verstärker besitzt eine feste Verstärkung 10x, so dass die maximale Ausgangsspannung demzufolge 50V beträgt. Mit der Widerstandsbeschaltung beträgt der maximale Strom 80mA. Das entspricht einem erzeugten Feld in der Z-Richtung von $\pm 440 \text{ nT}$. Falls erforderlich, kann mit Hilfe eines zusätzlichen Verstärkers (2fache Verstärkung) das Feld verdoppelt werden. Softwaremäßig wird realisiert, dass in allen drei Komponenten das gleiche Feld erzeugt wird, obwohl sich die Spulenkonstanten unterscheiden. Für Sensoren mit einem Tiefpass unter 10Hz reichen 200nT Signalamplitude aus. Für Sensoren ohne Tiefpass werden größere Amplituden zur Unterdrückung der Störfelder benötigt.

Achtung: Es können nur fluxgate Sensoren mit analogem Ausgang kalibriert werden.

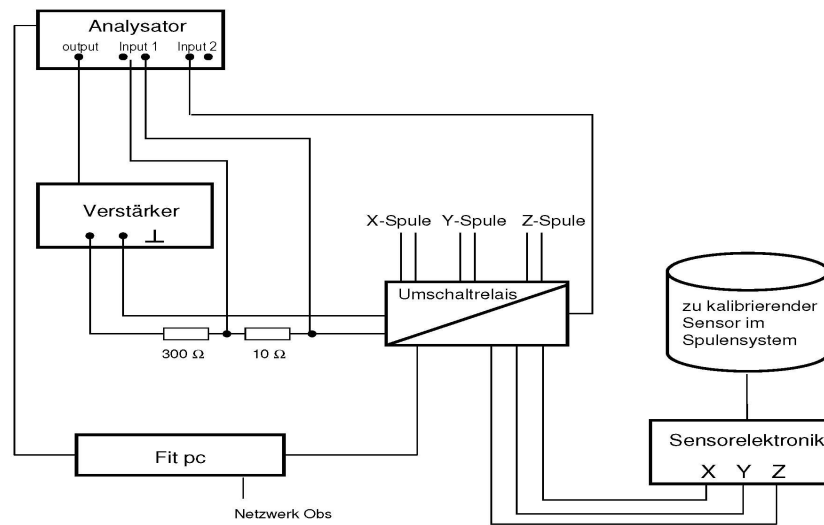


Abbildung 6: Blockschaltbild

4. Ausrichtung des zu kalibrierenden Sensors im Spulensystem

Zunächst muß der Sensor in Spulenmitte senkrecht aufgestellt werden. Die Basis sollte eisenfrei und nicht-leitend sein, denn in geschlossenen Leitern würde die Kalibrierung durch Wirbelströme verfälscht werden. Die X-Achse des Spulensystems weist mit einem Fehler von ca. 1,5 Grad (+600nT) in die magnetische Nordrichtung. Die 600nT wurden mit Hilfe eines aufgeprägten Wechselfeldes auf die X-Spule und eines Oszilloskops, welches am Y-Sensor angeschlossen war, ermittelt. Nach der Justierung des zu prüfenden Sensors in die senkrechte Lage dreht man den Sensor so, das die Y-Koordinate etwa 600nT anzeigt (gegebenenfalls muss der Analogwert mit einem Multimeter gemessen werden und in den Feldwert umgerechnet werden).

[Zur Kalibrierung der ukrainischen GEOMAG fluxgates (drei achsig) wurde im Zentrum des Spulensystems ein Drehteller aufgestellt. Nach Entriegelung der Aufhängung wird der Sensor wie folgt justiert: Es wird der Modus „Total field“ gewählt. Nun wird der Sensor gedreht bis in Y ca. 600nT angezeigt werden (X ca. 18500nT und Z ca. 45200nT). Danach muß der Modus „Compensation“ gedrückt werden.]

Die Ausrichtung des Sensors im Spulensystem ist relativ unkritisch, da Orientierungsfehler mit dem Cosinus des Winkels eingehen. In Abb. 7 wird das demonstriert. 5.5nT in Y-Richtung entsprechen einer Winkelminute, d. h. der Sensor wurde um $\pm 1,5\text{grd}$ gedreht.

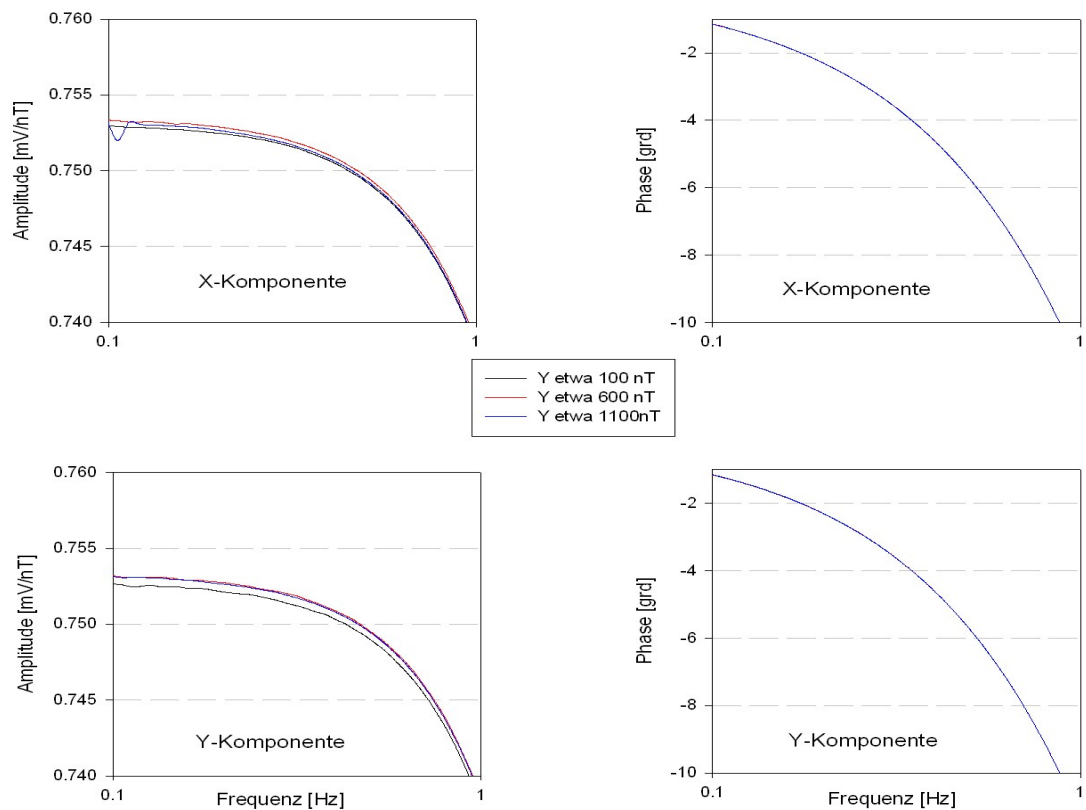


Abbildung 7: GEOMAG 48 orientiert am geomagnetischen Feld

6. Beispielmessungen

In Abb. 8 wird die Kalibrierung des GEOMAG 48 im Vergleich zu einer Kalibrierung der Z-Komponente des GEOMAG 03 (älteres Gerät) in der Zylinderspule demonstriert. In Abb. 9 wird die Kalibrierung von GEOMAG 44 gezeigt. Die Übereinstimmung kann man perfekt nennen. Das zeigt die hohe Qualität der ukrainischen Geräte und die Übereinstimmung der Kalibriereinrichtungen gleichermaßen.

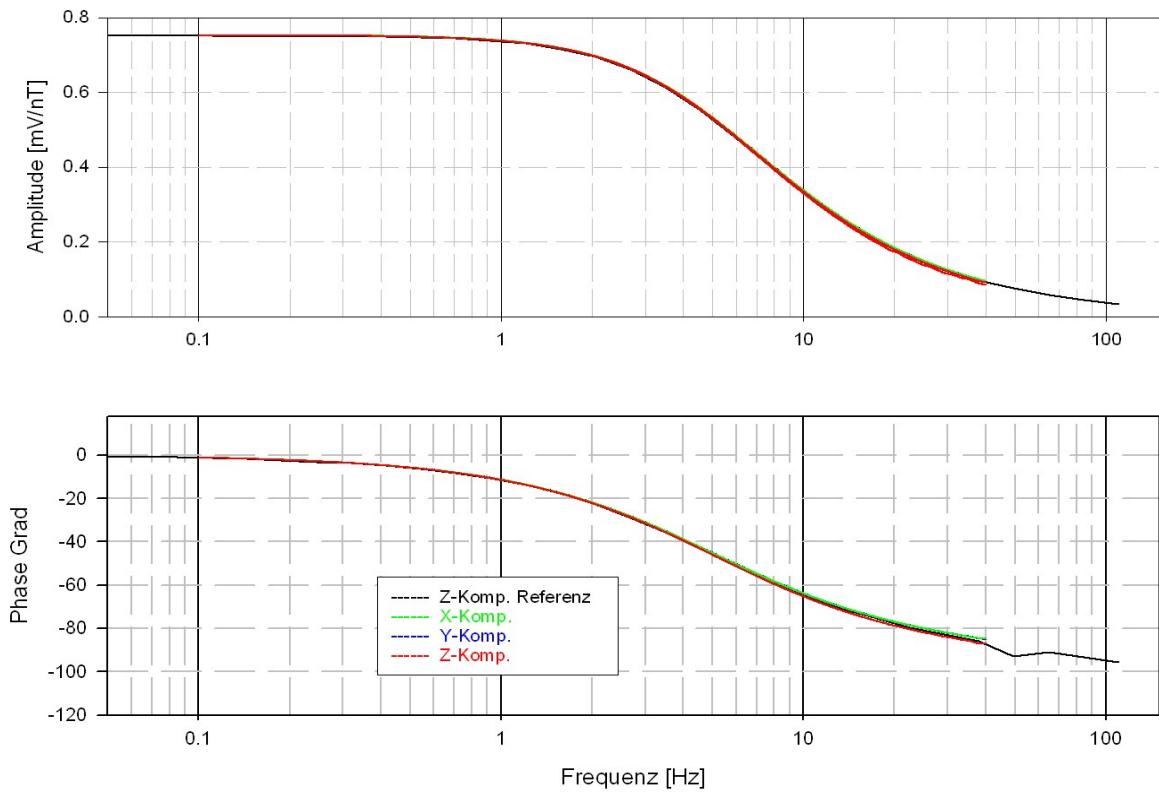


Abbildung 8: GEOMAG 48 (neue Kalibriereinrichtung) und GEOMAG 03 (Referenz, lange Spule)

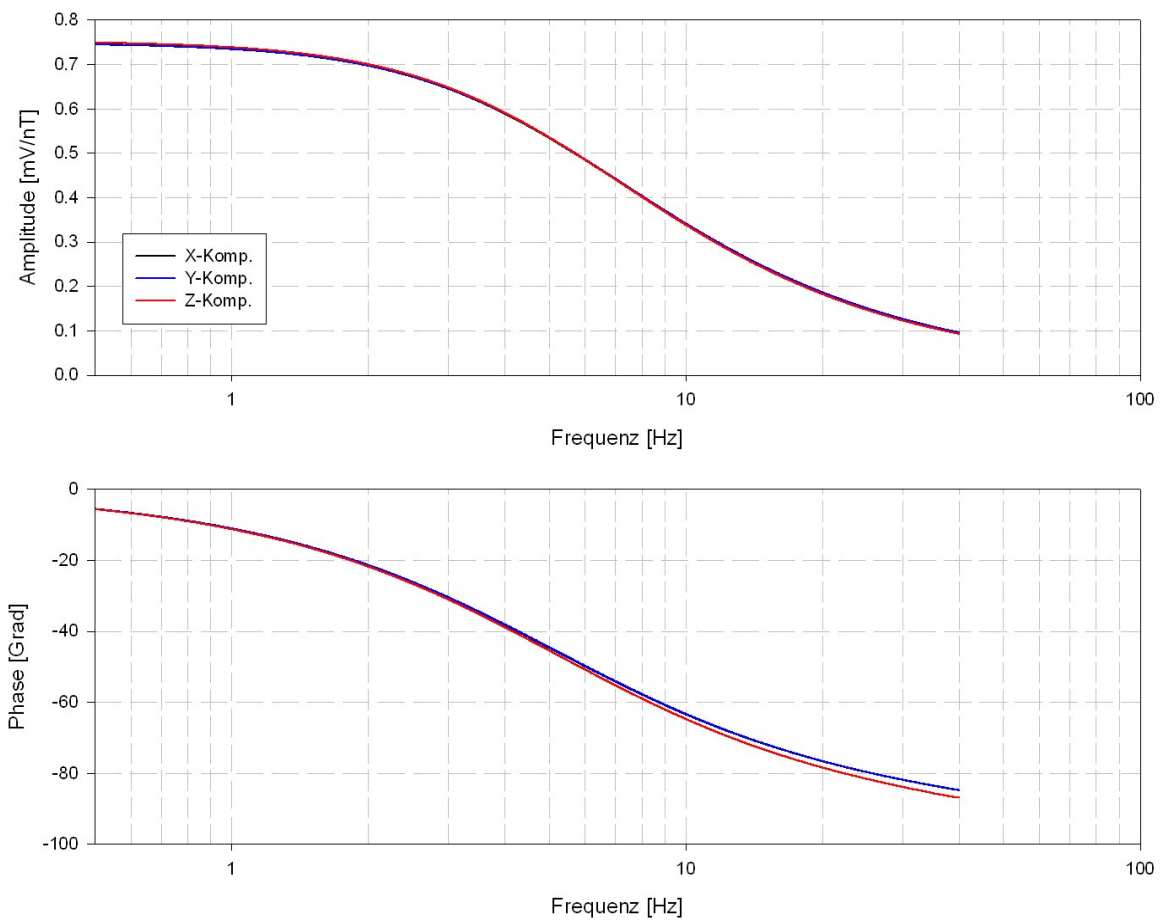


Abbildung 9: GEOMAG 44

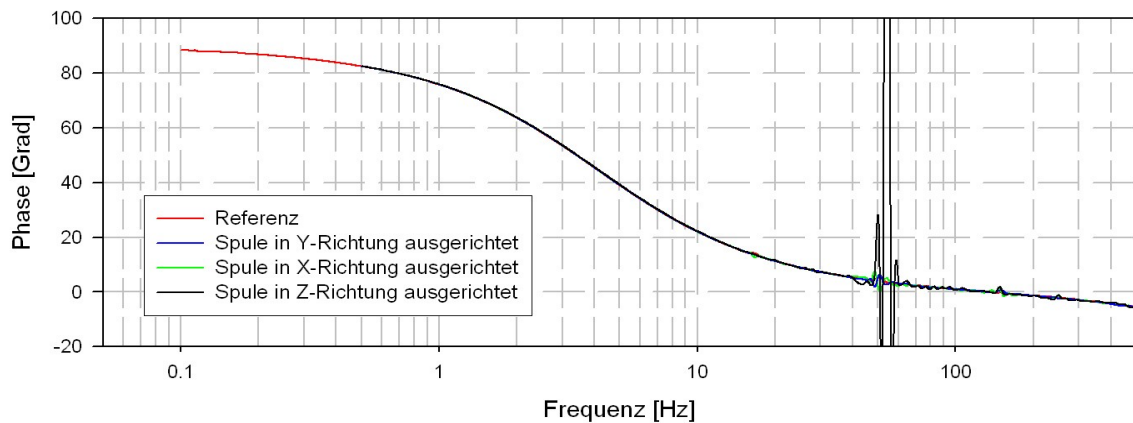
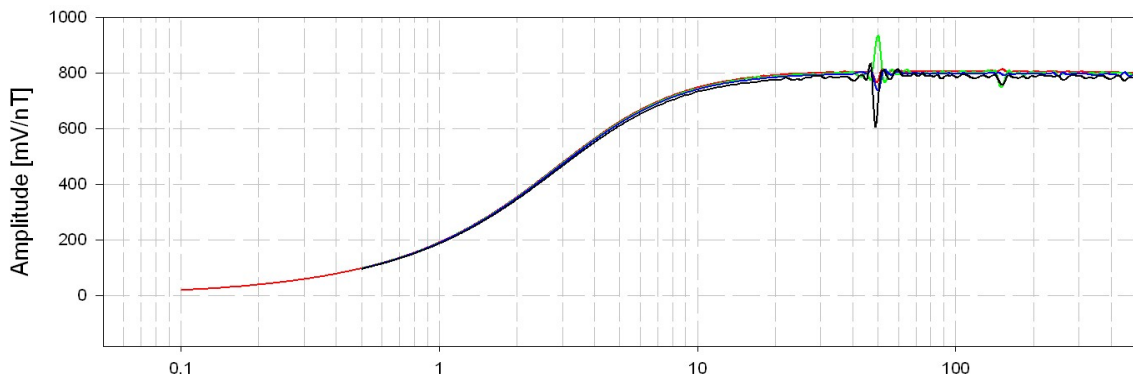
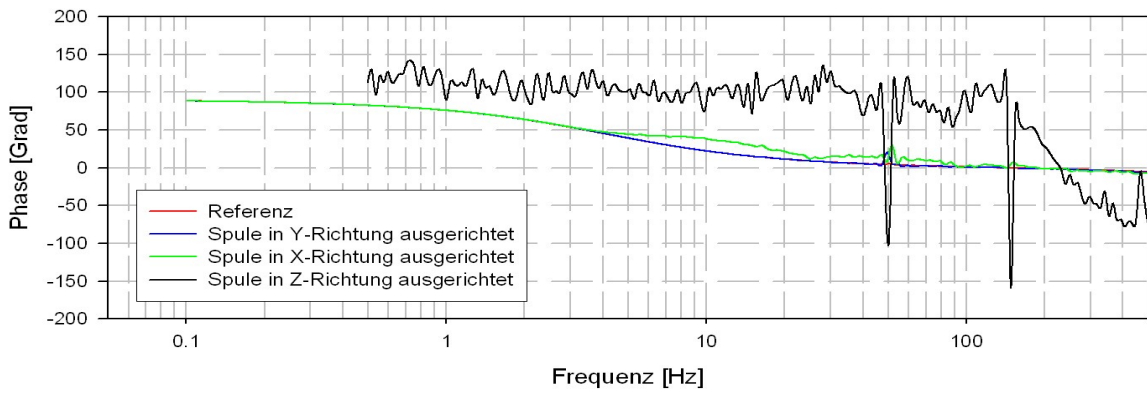
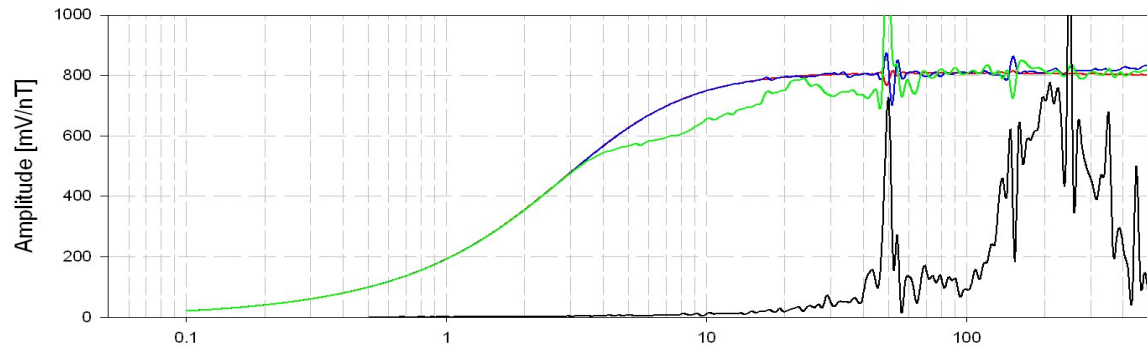


Abbildung 10: METRONIX 5048 vor Entfernung der ursprünglichen Wicklung der X- und Y-Spule (oben) und danach (unten)

Zur Abrundung der Testmessungen wurde die METRONIX 5048 getestet (Abb. 10). Im Gegensatz zu den fluxgate Sensoren können die Induktionsspulen nur mit max. 15nT Amplitude getestet werden. Mit größeren Amplituden sind sie übersteuert. Im oberen Teil der Abbildung wurde das Messergebnis vor dem Entfernen der ursprünglichen Wicklungen der X- und Y-Spule dargestellt (die Z-Spule war zu diesem Zeitpunkt schon gesäubert). Der untere Teil der Abbildung zeigt in allen drei Richtungen eine perfekte Übereinstimmung zur Kalibrierung in der Zylinderspule. Diese Messung zeigt auch die Nutzbarkeit der Kalibriervorrichtung bis 500Hz.

In Abb.11 wird das Ergebnis der Kalibrierung des Magnetometers MAGSON 03 wiedergegeben. Offensichtlich sind die Filter der X- und Y-Komponenten defekt. An Abb.10 wird deutlich, wie wichtig solche Kalibrierungen sind.

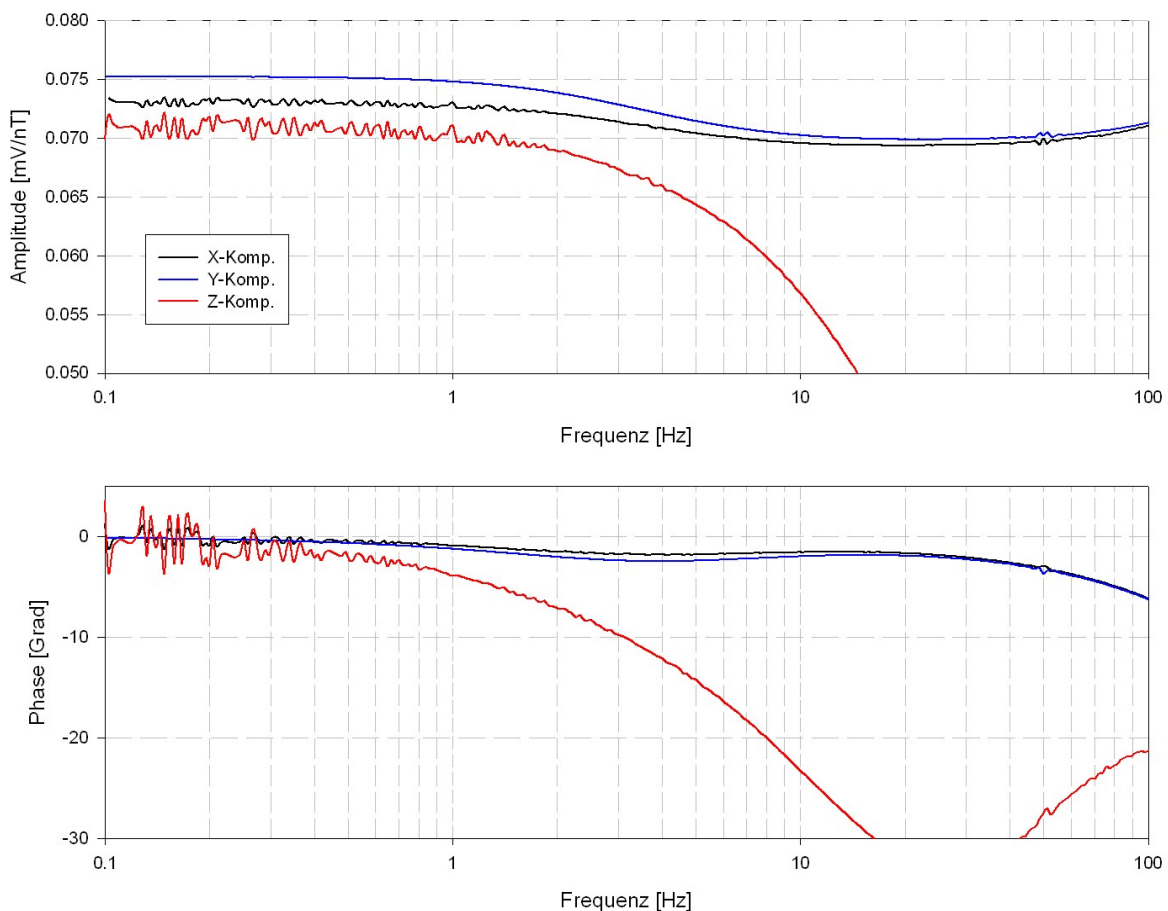


Abbildung 11: MAGSON 03

7. Technische Parameter

Frequenzbereich 0.001.....500Hz

Amplitude±440nT (880nT mit einer zusätzlichen Verstärkung)

Anzahl der Messpunkte500

Dauer einer Kalibrierung im Frequenzbereich 0.1 bis 100Hz bei 300 Punkten: ca. 9h.

8. Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei Dr. O. Ritter für die interessante Aufgabenstellung bedanken. O. Bronkalla besorgte die Programmierung, so dass die Kalibrierung automatisch abläuft und die Ergebnisse aufbereitet vorliegen. Nicht zuletzt möchte ich mich bei den Kollegen C. Müller, M. Schüler und St. Rettig für die Unterstützung bedanken.

9. Anlagen

Bedienung des fluxgate Kalibriermeßplatzes in den Hütten 17/18 des Adolf-Schmidt-Observatoriums in Niemegek

von E. Pulz, O. Bronkalla

1. Einleitung

In der Hütte 17 befindet sich ein dreiaxiales hölzernes Spulensystem Baujahr ca. 1955. Der Durchmesser der kleinsten Spule (O-W) beträgt 3m. Dieses Spulensystem besitzt einen geringen Orthogonalitätsfehler und gewährleistet einen großen homogenen Bereich. Es wurde deshalb für den Aufbau des Kalibriermeßplatzes ausgewählt.

Die Meßgeräte befinden sich in der Hütte 18 und werden von den Arbeitsplätzen im Haus 2 bedient.

Achtung: Es können nur fluxgates mit analogem Ausgang kalibriert werden.

2. Aufstellung des zu kalibrierenden Sensors

Zur Kalibrierung der ukrainischen LEMI/GEOMAG fluxgates (dreiaxial) wurde im Zentrum des Spulensystems ein Drehteller aufgestellt. Nach Entriegelung der Aufhängung wird der Sensor wie folgt justiert: Es wird der Modus „Total field“ gewählt. Nun wird der Sensor gedreht bis in Y ca. 600nT angezeigt werden (X ca. 18500nT und Z ca. 45200nT). Danach muß der Modus „Compensation“ gedrückt werden. Jetzt müssen die Ausgänge X, Y, Z in der selben Reihenfolge an die BNC-Buchsen 1, 2, 3 angeschlossen werden.

Soll ein fluxgate eines anderen Produzenten kalibriert werden, muß evt. statt des speziellen Drehtellers etwas anderes als Grundlage dienen. Auf keinen Fall darf es durchgehend metallisch sein, sonst wird das Messergebnis durch Wirbelströme verfälscht.

Falls diese Sensoren sich nicht automatisch (not suspended) in Z ausrichten, muss der Sensor zuerst horizontal justiert werden und dann wie oben beschrieben nach der Y-Anzeige gedreht werden. Falls nur eine analoge Ausgabe der Feldwerte vorliegt, muss mit Hilfe eines Multimeters und des vom Hersteller angegebenen Skalenwertes Y in nT berechnet werden.

$$U[\text{mV}] = 600[\text{nT}] \times \text{Sk}[\text{mV/nT}]$$

3. Inbetriebnahme der Kalibriereinrichtung

Bevor man an die Aufstellung des Sensors geht, empfiehlt sich die Inbetriebnahme der Elektronik in Hütte 18. Alle elektronischen Komponenten werden mit dem Einschalten der Steckerleiste gleichzeitig in Betrieb gesetzt. Das Herzstück der Anlage ist der Analysator SR785 (Blockschaltbild).

Alle weiteren Operationen erfolgen vom Arbeitsplatzcomputer.

4. Aufruf des Programms und Parametereingabe

Nach Anmeldung an der Konsole, bzw. über eine SSH-Verbindung von einem anderen Rechner aus, erscheint eine Kommando-Übersicht:

```
coilcheck@obs126: ~
bronki@:~$ fitpc2
139.17.221.126 being added to access control list
Linux obs126 3.2.0-4-486 #1 Debian 3.2.32-1 i586

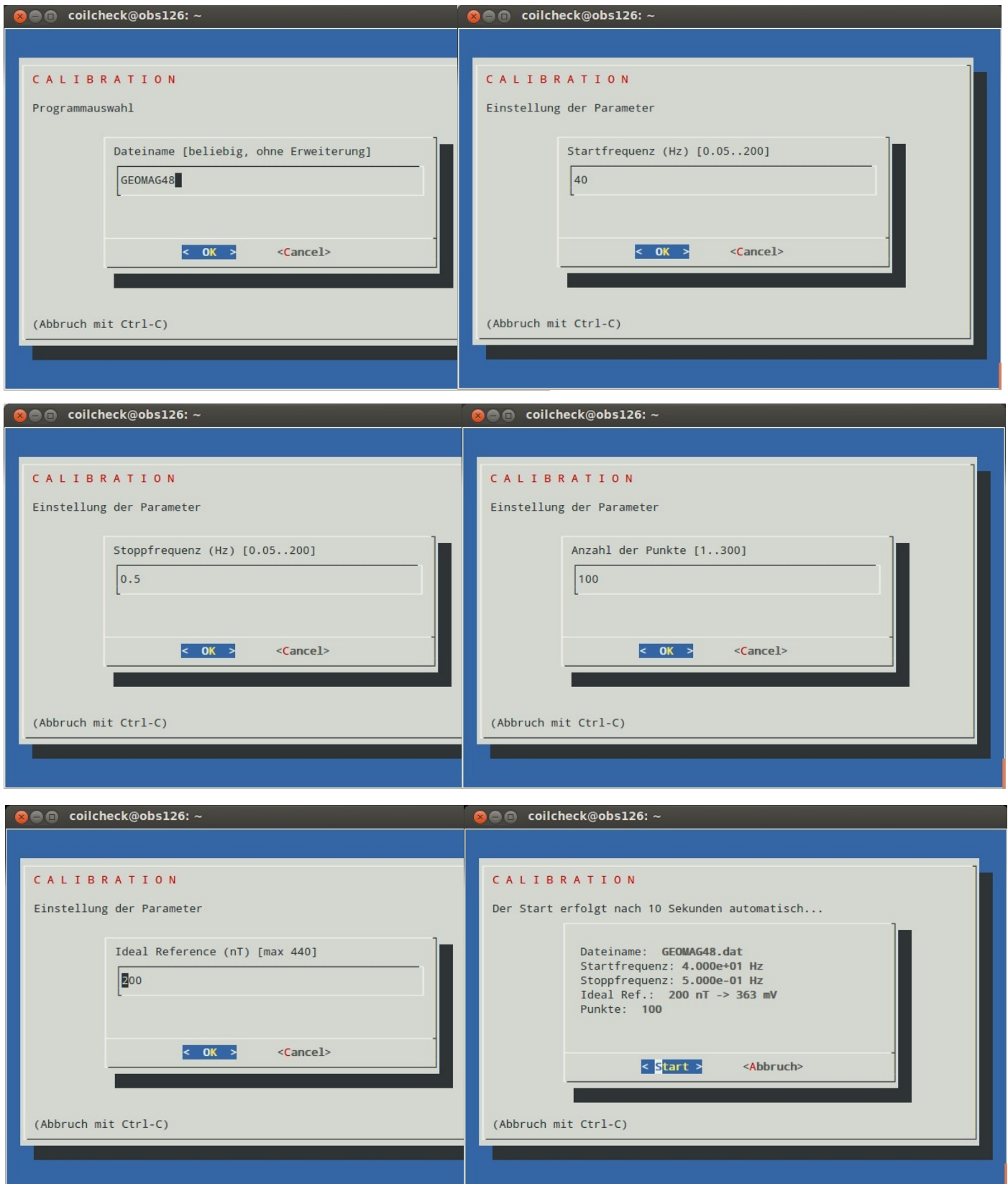
The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Mon Feb 25 14:55:44 2013 from 139.17.202.137

+-----+
| Welcome to the calibration fitPC! |
+-----+
| List of commands: |
| calibrate - start calibration |
| calibrate -f - kill an old running instance |
| |
| reboot - reboot the computer |
| halt - system shutdown and power off |
+-----+

coilcheck@obs126:~$
```


Nach Aufruf des Kalibrierungsprogramms mit dem Kommando `calibrate` werden Dateiname und Kalibrierungsparameter abgefragt.



Nach einer kurzen Anzeige aller eingegebenen Parameter beginnt die Messung für alle drei Raumachsen automatisch. Die Messung kann je nach Messbereich und Punktezahl bis zu 60min und länger je Raumachse dauern. Während dieser Zeit werden ständig Zeitstempel und Analyserstatus angezeigt. Das Ende der Messung wird durch eine Bildschirmausschrift und selbständige Beendigung des Programmes angezeigt. Die Ergebnisdaten werden im ASCII-Format sowie als GIF-Diagramm zusammen mit den verwendeten Konfigurationsparametern (ebenfalls im ASCII-Format) im Ordner ~/calibration gespeichert.

Eingabeparameter:

1. Frequenz

Entsprechend der Spuleneigenschaften könnte man bis 500Hz kalibrieren. Die tiefste Frequenz beträgt 0.001Hz. Eine Messung in diesem Frequenzbereich kann Tage dauern. Sie bringt auch keine zusätzliche Information. Deshalb wird die kleinste sinnvolle Frequenz mit 0.1Hz angegeben.

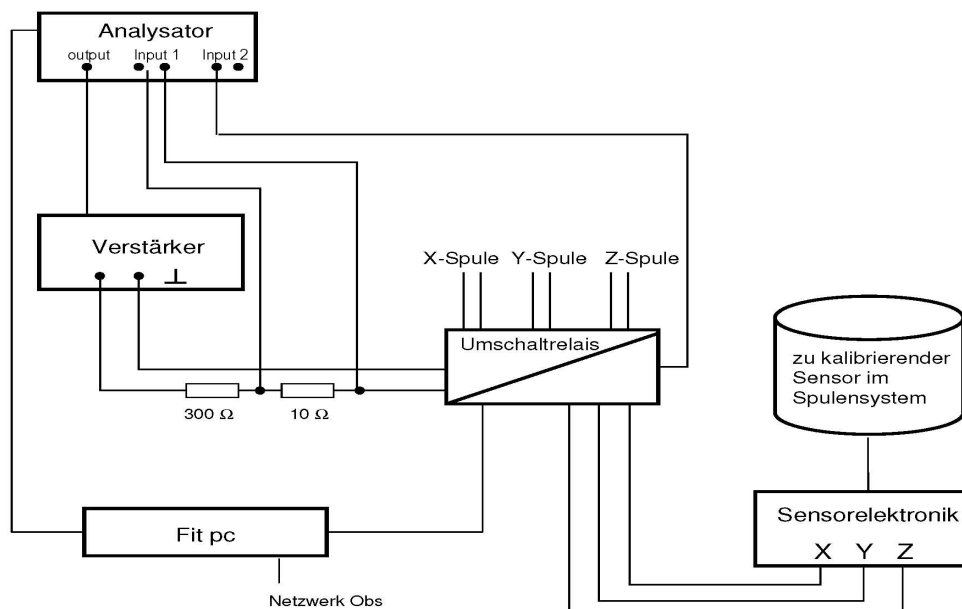
2. Ideal reference

Die maximal mögliche Referenz beträgt 800mV. Das entspricht einem Magnetfeld in der Z-Spule von $\pm 440\text{nT}$. In den Komponenten X und Y wird die Spannung entsprechend der Spulenfaktoren modifiziert, so dass etwa das gleiche Feld erzeugt wird.

Für die Kalibrierung der GEOMAG Sensoren werden 200nT eingegeben.

3. Punkteanzahl

Die Anzahl der gemessenen Punkte richtet sich nach der geforderten Feinheit der Kalibrierung und dem Frequenzumfang (200).



Blockschaltbild

Calibration of the coil system of the observatory Niemegk, GFZ

Ales Zikmund, Czech Technical University Prague, Faculty of Electrical Engineering

Introduction:

The coil system is three-dimensional Helmholtz setup. The biggest coil has diameter about three meters. Rough parameters of the coil are in the table below.

Coil	Resistance (Ω)	Inductance (mH)	Constant (nT/A)
X (oriented N-S)	54.2	5.5	8 500
Y (oriented E-W)	57.5	5.8	8 200
Z (oriented Vertically)	82.5	8.5	5 500



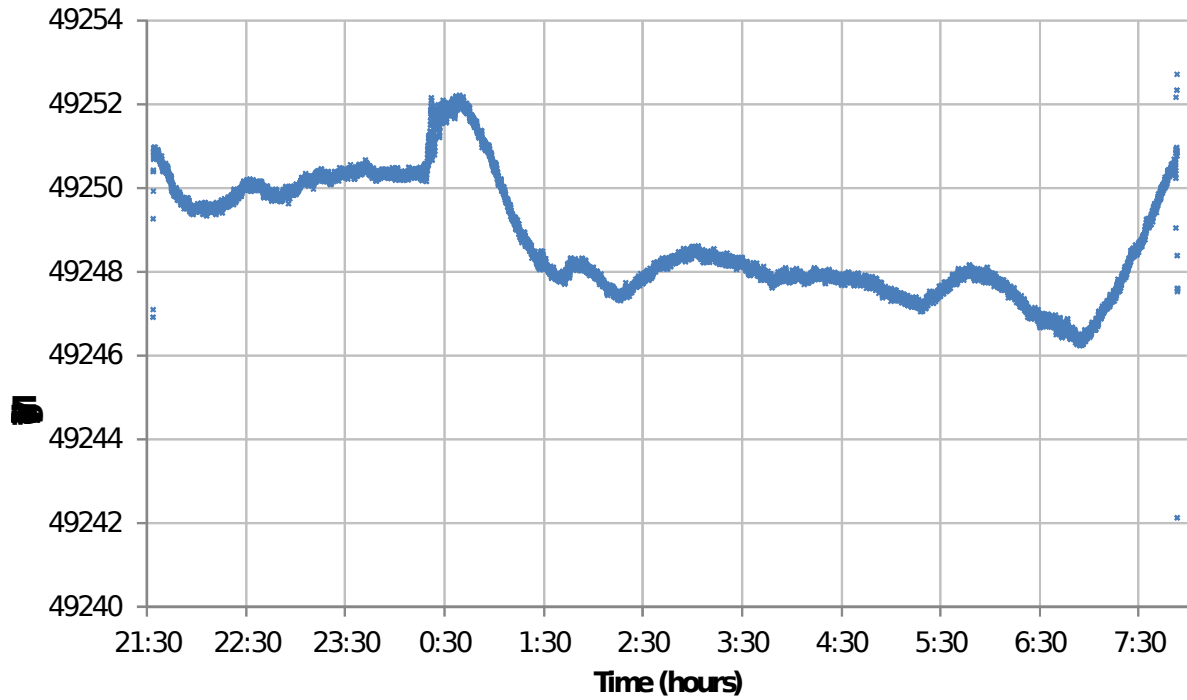
Calibration method:

The method is based on the article (Zikmund, 2010). An Overhauser magnetometer as a scalar magnetic sensor is directly in the middle of homogenous area of the coil system.

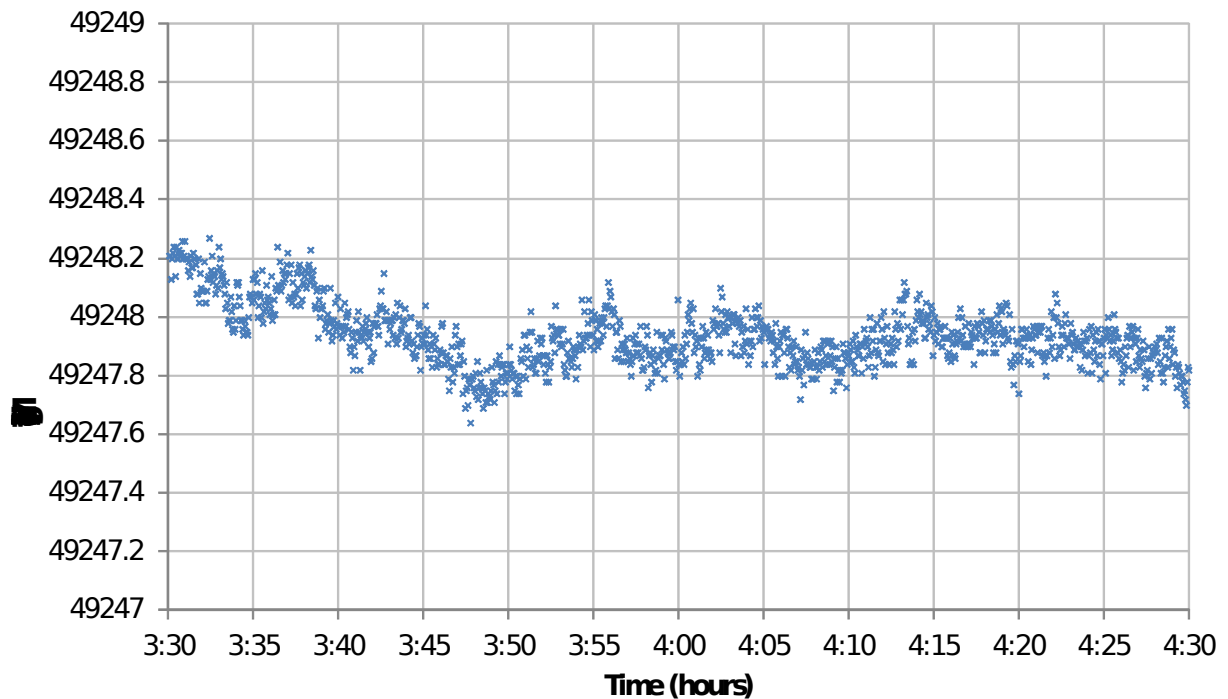
At the first step, individual coil constants are established by applying positive and negative current to each of them.

Orthogonality of the coils is calculated between pair of coils that means we have three combinations (three angles). Two coils (under orthogonality measurement) are excited with sequence of the currents and base on measured magnetic field and current the angle between them can be determined.

Variation of the Earth's magnetic field:



Variation of the Earth's magnetic field during April of 2nd and 3rd.



Short-time variation of the Earth's magnetic field during April of 3rd.

Based on this measurement the uncertainty of the magnetic field measurement was established as 0.1 nT.

Results of the coil constant calibration:

Coil	X (N-S)	Y (E-W)	Z (Vert.)
Constant OVH (nT/A)	8506.3	8132.2	5499.1
Uncertainty A (nT/A)	0.52	0.34	0.60
Uncertainty B (nT/A)	0.73	0.74	1.12
Combined uncertainty (nT/A)	0.89	0.81	1.27
Combined uncertainty (ppm)	105	100	231

Results of the orthogonality calibration:

Coils	X-Y	X-Z	Y-Z
Angle (deg)	89.91	89.98	89.92
Uncertainty A (deg)	0.02	0.02	0.01
Uncertainty B (deg)	0.03	0.04	0.04
Combined uncertainty (deg)	0.04	0.05	0.05

Calculation of the calibration uncertainty is described in the (Zikmund, 2012).

Reference:

[1] Zikmund, A. - Ripka, P.: Scalar Calibration of the 3-D Coil System. Journal of Electrical Engineering. 2010, vol. 61, no. 7/s, p. 39-41. ISSN 1335-3632.

[2] Zikmund, A. - Ripka, P.: Uncertainty Analysis of Calibration of the 3D Coil System. Journal of Electrical Engineering. 2012, vol. 63, p. 90-93. ISSN 1335-3632.

April 2013

