Aufbau eines Systems zur archäomagnetischen Prospektion

von

Peter Kretz

Diplomarbeit in Physik

angefertigt im
Institut für Strahlen- und Kernphysik

vorgelegt der
Mathematisch- Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität
Bonn

im August 1997

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Referent : Prof. Dr. H. Mommsen
Korreferent : Prof. Dr. H.-J. Kümpel

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Das Ziel einer Prospektion ist die Erkennung von im Erdreich liegenden, verborgenen Strukturen. Diese Erkennung ist nur möglich, wenn sich die Strukturen in irgendeiner Weise von ihrer Umgebung unterscheiden. Das Unterscheidungsmerkmal bei der magnetischen Prospektion ist die *Suszeptibilität* und eine eventuell vorhandene *magnetische Remanenz*. Da durch die Suszeptibilitätsunterschiede der im Boden befindlichen Strukturen das Magnetfeld der Erde geringfügig verändert wird, mißt man diese Veränderungen, um Rückschlüsse auf diese Strukturen zu ziehen.

Die magnetische Prospektion findet seit geraumer Zeit Anwendung bei der Suche nach archäologischen Bodendenkmälern. So fand Aitken bereits 1959 mit einem Protonenpräzessionsmagnetometer während einer einwöchigen Prospektion in Northhamptonshire einen römisch-britischen Brennofen [Ait59]. Aber auch in der Erkundung bereits bekannter Fundorte hat sich diese Methode bewährt. Sie wird sehr häufig zur Überprüfung und genauen Lokalisation von Fundorten, deren Lage durch Luftbilder bereits bekannt ist, eingesetzt.

Der große Vorteil gegenüber den sonst üblichen Probegrabungen ist die Zerstörungsfreiheit, da ein Vermessen des interessierenden Gebietes mit einem Magnetometer und die Auswertung der so erhaltenen Daten bereits wertvolle Hinweise auf eine eventuell vorhandene archäologische Struktur liefern können. Gegenüber der Luftbild-Prospektion zeichnet sich die geomagnetische Methode zum einen durch ihre Jahreszeit- und Wetterunabhängigkeit aus, zum anderen können mit ihr auch noch Strukturen gesehen werden, die vollständig unter der Erdoberfläche liegen und sich durch nichts Sichtbares mehr in den obersten Schichten verraten [Mom86].

Der Arbeitsgruppe Archäometrie am Institut für Strahlen- und Kernphysik in Bonn steht ein solches Magnetometer zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um ein Cäsiummagnetometer der Firma Geometrics (G-858), das vom Institut für Vor- und Frühgeschichte bereitgestellt wurde.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden sowohl Hard- als auch Softwarekomponenten entwickelt, die der Bonner Archäometriegruppe die magnetische Prospektion ermöglichen. Dazu wurde ein Meßwagen gebaut, der durch eine Positionierungselektronik eine automatische Datenaufnahme und Meßwertpositionierung erlaubt und somit eine sehr genaue und schnelle Prospektion ermöglicht.

Zur Weiterverarbeitung und grafischen Darstellung der Daten wurde das Programmpaket XMAGCAL entwickelt. Es ermöglicht durch eine Fehlerkorrektur der Rohdaten eine erste Beurteilung bereits unmittelbar nach Abschluß der Messungen. Desweiteren können beliebige Querschnitte im magnetischen Profil abgegriffen werden und als Eingabe für eine Störkörperberechnung benutzt werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Komponenten haben sich bereits bei einer Prospektion in Mechernich-Obergartzem/Eifel bewährt, und zwei der entdeckten Anomalien wurden mit theoretischen Störkörpern modelliert.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der magnetischen Prospektion erläutert. Hierzu wird in erster Linie auf das Magnetfeld der Erde, die magnetischen Eigenschaften von Böden und das dem Magnetometer zu Grunde liegende Meßprinzip eingegangen. Aus der unterschiedlichen Magnetisierbarkeit verschiedener Materialien resultieren verschieden starke Gesamtfelder, die sich mittels eines Magnetometers messen lassen. So ist man in der Lage, durch die Kenntnis dieser Feldanomalien auf etwaige Strukturen im Boden zu schließen.

Die gängigsten Magnetometertypen sind:

- Protonenpräzessionsmagnetometer
- Saturationskernmagnetometer (Fluxgate)
- Absorptionszellenmagnetometer

Da für die hier vorgestellten Messungen ein Cäsiumabsorptionszellenmagnetometer verwendet wurde, soll eine Darstellung dieses Magnetometertyps genügen[1].

2.1 Geophysikalische Grundlagen

2.1.1 Das Erdmagnetfeld

Nach C. F. Gauss läßt sich das an der Erdoberfläche gemessene magnetische Feld in zwei Anteile zerlegen. Dies geschieht mit Hilfe einer Entwicklung nach Kugelflächenfunktionen. Die Quellen des ersten Anteils, der ca. 99% des Gesamtfeldes ausmacht, liegen im Erdinneren, die des zweiten Anteils liegen in der Ionosphäre und der Magnetosphäre.

[1] Für eine Beschreibung der anderen Magnetometertypen sei auf [Cla90] und [Mil84] verwiesen

Da als Magnetfeldquelle ein Permanentmagnet wegen der hohen Temperatur im Erdinneren nicht in Frage kommt - bereits ab etwa 50 km Tiefe wird die Curie-Temperatur ferromagnetischer Mineralien überstiegen - muß das Erdmagnetfeld durch Ströme erzeugt werden, deren Dimensionen nicht mehr im Mikroskopischen liegen können. Dies führte zur Entwicklung der sogenannten Dynamotheorie des Permanentmagnetfeldes der Erde [Els58]. Die Konvektionsbewegungen im Erdkern rufen allerdings kein unmittelbares magnetisches Dipolfeld hervor. Dieses bildet sich erst als Sekundäreffekt durch Wechselwirkung zwischen dem durch Konvektionsbewegung hervorgerufenen Feld und weiteren Materiebewegungen aus [Ker69].

Das Erdmagnetfeld läßt sich vektoriell in eine horizontale und eine vertikale Komponente zerlegen. Den Winkel zwischen der Richtung des Erdmagnetfeldes und der Erdoberfläche bezeichnet man als Inklination. In unseren Breiten beträgt sie 65°. Die Deklination oder auch magnetische Mißweisung beschreibt den Winkel zwischen dem geographischen Nordpol und der Vertikalkomponente des Magnetfeldes der Erde. Die Totalintensität des Magnetfeldes beträgt in Bonn ca. 48000 nT. Ein nT wird in der älteren Fachliteratur häufig mit γ (Gamma) bezeichnet.

Die langsame Änderung des Hauptfeldes, die sogenannte Säkularvariation, ist für eine magnetische Prospektion von keinerlei Bedeutung. Sie ist auf eine vergleichsweise langsame Änderung des magnetischen Innenfeldes zurückzuführen. Störend wirken sich hingegen Tagesvariationen, Mikropulsationen und Magnetstürme aus, da sie kurzzeitige Magnetfeldschwankungen von mehreren hundert nT auslösen können. Sie werden durch Variationen des magnetischen Außenfeldes erklärt. Dem kann man zum einen mit einer Messung des Tagesganges begegnen, mit dessen Hilfe man die Meßdaten korrigieren kann. Zum anderen lassen sich diese Störungen sehr gut durch eine Gradiometeranordnung eliminieren, wozu man aber eine zweite Meßsonde benötigt. Trotzdem sollte man während eines Magnetsturms eine magnetische Prospektion wegen der Stärke der Magnetfeldschwankungen unterlassen. Die Tagesvariationen werden in solare und lunare Variationen unterschieden. Die solaren Variationen erreichen gegen Mittag ihren Höhepunkt und sind mit 20 nT bis 30 nT etwa zehnmal größer als die lunaren Variationen. Sie werden durch Kreisströme in der Ionosphäre hervorgerufen. Diese beiden Induktionsstromsysteme entstehen dadurch, daß sich die Hochatmosphäre mit der Tageserwärmung und den Sonnen- und Mondgezeiten im Erdmagnetfeld hebt bzw. senkt. Ströme, die zu einer Magnetfeldänderung von 10 nT am Erdboden führen, haben eine Stärke von $10^4 - 10^5 A$ [Ger95]. Unter Mikropulsationen versteht man erdmagnetische Variationen zwischen $0,2$ sec und 10 min. Sie entstehen am Rande der Magnetosphäre, breiten sich bis zur Ionosphäre aus und werden von dort als elektromagnetische Wellen zum Erdboden abgestrahlt. Magnetstürme sind eng an sehr hohe Sonnenaktivitäten gekoppelt. So beobachtet man im Zusammenhang mit Magnetstürmen Sonneneruption. Es handelt sich also um die Magnetfeldwirkung einer an die Magnetosphäre heranrückenden solaren Partikelwolke [Ker69].

2.1.2 Magnetische Eigenschaften von Böden

Magnetisierung

Ein *Magnetfeld* $\vec{H}$ besitzt im Vakuum die *magnetische Flußdichte* $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ ($\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-6}\ Vs/Am$). Wenn man Materie einem *magnetischen Fluß* Φ mit der *magnetischen Flußdichte* $\vec{B}$ aussetzt, dann beginnen um die Flußrichtung herum mikroskopische Kreisströme zu fließen. Man spricht dann von der *Magnetisierung* der Materie. Sie ist als magnetisches Moment $\vec{m}$ pro Volumeneinheit V definiert:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \tag{2.1}$$

Das Verhältnis zwischen *magnetischer Flußdichte mit Materie* $\vec{B}_M$ und der *magnetischen Flußdichte ohne Materie* $\vec{B}_O$ bezeichnet man als *Permeabilität* μ [Ber87]:

$$\frac{|\vec{B}_M|}{|\vec{B}_O|} = \mu \tag{2.2}$$

Wenn man nun die zusätzliche, von der Materie herrührende *magnetische Feldstärke* als additive Größe hinschreibt erhält man mit $\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H}$ für die *Magnetisierung*:

$$\vec{M} = (\mu - 1)\vec{H}_0 = \chi \vec{H}_0 \tag{2.3}$$

Analog zu 2.3 geht man für die *magnetische Flußdichte* vor und erhält die *magnetische Polarisation* $\vec{J}$:

$$\vec{J} = \chi \vec{B}_0 \tag{2.4}$$

Die *Permeabilität* μ ist bei Stoffen, die nicht ferromagnetisch sind, nur sehr wenig von eins verschieden. Deshalb benutzt man häufiger die *Suszeptibilität* χ:

$$\chi = \mu - 1 = \frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}_0|} = \frac{|\vec{J}|}{|\vec{B}_0|} \tag{2.5}$$

Sie bestimmt das magnetische Verhalten der Materie. Da diese jedoch sehr unterschiedliche magnetische Eigenschaften aufweist, muß man folgende Arten von Magnetismus unterscheiden [Ger95]:

1. *Diamagnetismus*
2. *Paramagnetismus*
3. *Ferromagnetismus*
4. *Antiferromagnetismus*
5. *Ferrimagnetismus*

1: Die Suszeptibilität *diamagnetischer* Stoffe ist kleiner null und liegt größenordnungsmäßig im Bereich von $\chi \approx 10^{-6}$. Schiebt man einen *diamagnetischen* Stoff in ein Magnetfeld, so entstehen in ihm widerstandslose Kreisströme, die ein magnetisches Feld hervorrufen, das dem ursprünglichen entgegengesetzt ist. Vereinfacht kann man sich das so vorstellen, als rotiere das gesamte Atom mit seiner Elektronenhülle um die Magnetfeldrichtung mit der *Larmorfrequenz* $\omega_L = \frac{e}{m}B$. Der Gegenstand erfährt eine repulsive Kraft.

2: Im Gegensatz zum Diamagnetismus werden *paramagnetische* Stoffe ins Magnetfeld hineingezogen. Sie magnetisieren sich also in Feldrichtung. Die Suszeptibilität ist stets positiv und feldunabhängig. Man kann sich *paramagnetische* Substanzen aus kleinen, ungeordneten Dipolen bestehend vorstellen, die sich in einem äußeren Magnetfeld in Feldrichtung ausrichten. Dem wirkt jedoch die thermische Bewegung entgegen. Nach dem Gesetz von *Pierre Curie* zeigt sich eine reziproke Temperaturabhängigkeit:

$$\chi = \frac{\text{const.}}{T} \tag{2.6}$$

Da dieser Effekt stärker als der Diamagnetismus ist, überdeckt er diesen bei *paramagnetischen* Materialien meistens völlig.

3: Die Atome oder Moleküle *ferromagnetischer* Stoffe besitzen - wie die Atome oder Moleküle diamagnetischer Stoffe auch - ebenfalls permanente magnetische Momente. Der entscheidende Unterschied besteht jedoch darin, daß in *Ferromagnetika* die Wechselwirkung zwischen den einzelnen magnetischen Momenten so stark werden, daß sie der ungeordneten Wärmebewegung entgegenwirken. Dies äußert sich in einer spontanen Magnetisierung des Körpers. In einem äußeren Magnetfeld der *Flußdichte* $\vec{B}$ nehmen *ferromagnetische* Materialien eine sehr hohe *magnetische Polarisation* $\vec{J}$ an, die $\vec{B}$ gleichgerichtet ist. Die große Permeabilität dieser Stoffe ist aber sehr stark vom äußeren Feld und der Vorgeschichte des Materials abhängig. Eine vorhandene Magnetisierung bleibt auch beim Wegfall des äußeren Feldes erhalten. Es handelt sich hierbei um die sogenannte *remanente Magnetisierung*. Das Feld, das nötig ist, um die Magnetisierung aufzuheben, bezeichnet man als *Koerzitivfeld*. Im Gegensatz zu paramagnetischen Substanzen zeigen *Ferromagnetika* keinen linearen Zusammenhang zwischen ursprünglichem und resultierendem Feld. Materialien dieser Art durchlaufen beim Anlegen eines Wechselfeldes eine Hysteresiskurve. Aus ihr kann man die *Remanenzmagnetisierung*, das *Koerzitivfeld* und die *Sättigung* ablesen. Diese *ferromagnetischen* Eigenschaften gehen aber bei Überschreitung der sogenannten *Curie-Temperatur* T_C verloren, und der Stoff wird paramagnetisch. Sinkt die Temperatur wieder unter die *Curie-Temperatur*, so richten sich die magnetischen Momente in Feldrichtung aus und werden bei Erreichen der *Blockungstemperatur* T_B, die knapp unter der *Curie-Temperatur* liegt, in dieser Richtung „verblockt“. Die bekanntesten *ferromagnetischen* Elemente sind Eisen, Nickel und Kobalt.

4: Manche Stoffe besitzen eine kritische Temperatur T_N, die nach ihrem Entdecker *Néel-Temperatur* genannt wird. Oberhalb dieser Temperatur T_N folgt die Suszeptibilität folgendem Gesetz:

$$\chi = \frac{\text{const.}}{T + \Theta}, \quad \text{für} \quad T > T_N. \tag{2.7}$$

Θ bezeichnet hierbei eine materialabhängige Temperaturkonstante. Unterhalb der Temperatur T_N sinkt die Suszeptibilität wieder ab. Sie erreicht bei T_N also ihr Maximum. Dieses Verhalten bezeichnet man als *antiferromagnetisch* und deutet es folgendermaßen: Die Elektronenspins sind bei tiefen Temperaturen im Gitter paarweise antiparallel ausgerichtet und damit nach außen hin magnetisch neutral. Steigt nun die Temperatur an, wird diese Ordnung aufgelockert und bricht bei Erreichen der *Néel-Temperatur* völlig zusammen. Oberhalb dieser Temperatur verhält sich das Material wie ein Paramagnetikum, da die Spins nun nur noch der Wärmebewegung ausgeliefert sind.

5: In einigen Gitterstrukturen sind benachbarte Spins antiparallel ausgerichtet, aber verschieden groß. Die magnetischen Momente kompensieren sich also nicht völlig, sondern nur zu einem gewissen Bruchteil, so daß ein magnetisches Moment resultiert. Diese *Ferrimagnetika* kommen sehr häufig in oberen Bodenschichten vor und spielen deshalb eine große Rolle in der magnetischen Prospektion. Zwei für die magnetische Prospektion wichtige Stoffe dieser Art sind Magnetit (Fe_3O_4) und Maghämit (γ-Fe_2O_3). Maghämit ist die kubische, ferrimagnetische Modifikation von Hämatit (α-Fe_2O_3), das antiferromagnetisch ist.

Le Borgne-Effekt

Da Feuerstellen sehr gut prospektierbar sind, suchte man eine Erkärung für diesen Effekt. Ursache hierfür ist eine erhöhte Maghämitkonzentration an der Bodenoberfläche. Le Borgne erklärt diese hohe Konzentration durch Reduktion (Erhitzung in Anwesenheit organischen Materials) von Hämatit oberhalb von 770 K zu Magnetit. Beim Abkühlen an Luft soll Magnetit dann später zu Maghämit oxidiert werden (Le Borgne-Effekt) [LeB55] [LeB60]. Obwohl theoretisch denkbar [Sch59] [Shi77], ist ein Nachweis von Maghämit aus diesem Prozeß bisher noch nicht gelungen [Faß94]. *Stanjek* konnte 1987 zeigen, daß unter Feuereinfluß und Anwesenheit organischen Materials Goethit (α-FeOOH) zu Hämatit und Lepidokrokit (γ-FeOOH) zu Maghämit umgewandelt werden [Sta87]. Sowohl Goethit als auch Lepidokrokit kommen in heimischen Böden vor und sind beide antiferromagnetisch. Findet man erhöhte Maghämitkonzentrationen an der Bodenoberfläche, so ist zweifellos die Entstehung durch Feuer anzunehmen [Faß94]. Ansonsten kommt Maghämit häufiger in tropischen und subtropischen Böden vor [Mar51] [Sch59].

Magnetotaktische Bakterien

Eine weitere Entstehungsmöglichkeit von Magnetit ist dessen Bildung durch Bakterien. Magnetotaktische Bakterien (MV-1) wurden erstmals von *Blakemoore* gefunden und sind seitdem aus den verschiedensten Böden bekannt [Bla75]. Magnetische Bakterien und deren Magnetofossilien konnten von *J. W. E. Faßbinder* erstmals nachgewiesen werden und spielen eine große Rolle für die Prospektierbarkeit von Bodendenkmäler, die früher aus Holz bestanden [Faß94]. Eine weitere Bakterienart, die GS-15 Bakterien, kommen zwar für die Magnetitbildung in Frage, konnten aber noch nicht aus Böden isoliert werden und sind auf ein anaerobes Milieu beschränkt [Lov87].

Thermoremanenz

Die relativ starke Magnetisierung von gebranntem Ton wird durch die sogenannte *Thermoremanenz* erklärt. Brennt man den Ton, so entstehen aus den schwach magnetischen Substanzen im Ton Oxide, die zum Teil magnetithaltig sind. Durch den Brennvorgang wird der Gegenstand bei Überschreiten der *Curie-Temperatur* (etwa 850 K für Magnetit) komplett entmagnetisiert. Kühlt er ab, so richtet sich die Magnetisierung größtenteils in Erdmagnetfeldrichtung aus, so daß eine remanente magnetische Polarisation in der Größenordnung von bis zu 500 nT resultiert. Basalte und andere Schmelzgesteine zeigen ebenfalls eine remanente Magnetisierung, die sie sich während des langsamen Abkühlens und Erstarrens erworben haben [Cla90].

Viskose Remanenz

Werden feinkörnige magnetische Stoffe über einen längeren Zeitraum einem schwachen magnetischen Feld ausgesetzt, so wächst ihr magnetisches Moment logarithmisch mit der Zeit an. Man spricht dann von *viskoser Remanenz*. Unter dem Einfluß der Wärmebewegung findet ein Ausrichten des magnetischen Moments in Erdmagnetfeldrichtung statt:

$$m(t) = m_0 \left[1 + V_c \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \tag{2.8}$$

Hierbei bedeutet $m(t)$ das *magnetische Moment* zur Zeit t, m_0 das *magnetische Moment* zur Zeit $t = 0$ und V_c die Konstante, welche das Verhalten der magnetischen Viskosität beschreibt [Sco90].

2.2 Meßprinzip

Zur Magnetfeldmessung wurde ein Cäsiumabsorptionszellenmagnetometer benutzt. Dieses Meßgerät nutzt den *Zeeman-Effekt* aus, um die magnetische Flußdichte zu bestimmen. Unter dem *Zeeman-Effekt* versteht man die Erscheinung, daß sich die Spektrallinien vieler Atome in mehrere eng benachbarte Komponenten aufspalten, wenn die strahlenden Atome in ein Magnetfeld gebracht werden. Die rein spektroskopische Ermittlung der Linienaufspaltung, die proportional zum Magnetfeld ist, ist umständlich und als Meßprinzip wenig geeignet [Mil84]. Stattdessen findet das Prinzip des optischen Pumpens Anwendung.

2.2.1 Prinzip des optischen Pumpens

Hamiltonoperator mit äußerem Magnetfeld

Der Grundzustand des ^{133}Cs lautet [Xe] 6 ^{2}s$_{1/2}$. Es handelt sich also um ein wasserstoffähnliches Einelektronenspektrum. Der zugehörige Hamiltonoperator mit äußerem Magnetfeld hat die Form

$$H = \underbrace{\sum_{i=1}^{Z}\left(\frac{p_i^2}{2m_e} - \frac{Ze^2}{r_i}\right)}_{Kern-Elektron-WW} + \underbrace{\sum_{i=1}^{Z}\sum_{j=1}^{i-1}\frac{e^2}{|r_n i - r_j|}}_{Elektron-Elektron-WW} + H_{FS} + H_{HFS} + H_B, \tag{2.9}$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad p_i &= \text{Impulsoperator des i-ten Elektrons}, \\ r_i &= \text{Abstand des i-ten Elektrons vom Kern}, \\ m_e &= 9.1095 \cdot 10^{-31}\ kg \quad \text{(Ruhemasse des Elektrons)}, \\ e &= 1.6022 \cdot 10^{-19}\ C \quad \text{(Ladung des Elektrons)}, \\ Z &= 55 \quad \text{(Kernladungszahl des Cäsiums)}. \end{aligned}$$

Feinstrukturaufspaltung

Die *Feinstrukturaufspaltung* ist auf die Wechselwirkung zwischen Elektronenspin und Bahndrehimpuls zurückzuführen. Die Operatoren $\vec{L}$ und $\vec{S}$ vertauschen bei Anliegen eines Magnetfeldes nicht mehr mit dem Hamiltonoperator. Sie koppeln zum Gesamtdrehimpuls der Hülle $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$. Die Zusatzenergie der Aufspaltung beträgt

$$H_{FS} = \sum_{i=1}^{N} \xi(i)\vec{L}_i \cdot \vec{S}_i, \quad \text{mit} \quad \xi(i) = \text{Radialfunktion des i-ten Elektrons}. \tag{2.10}$$

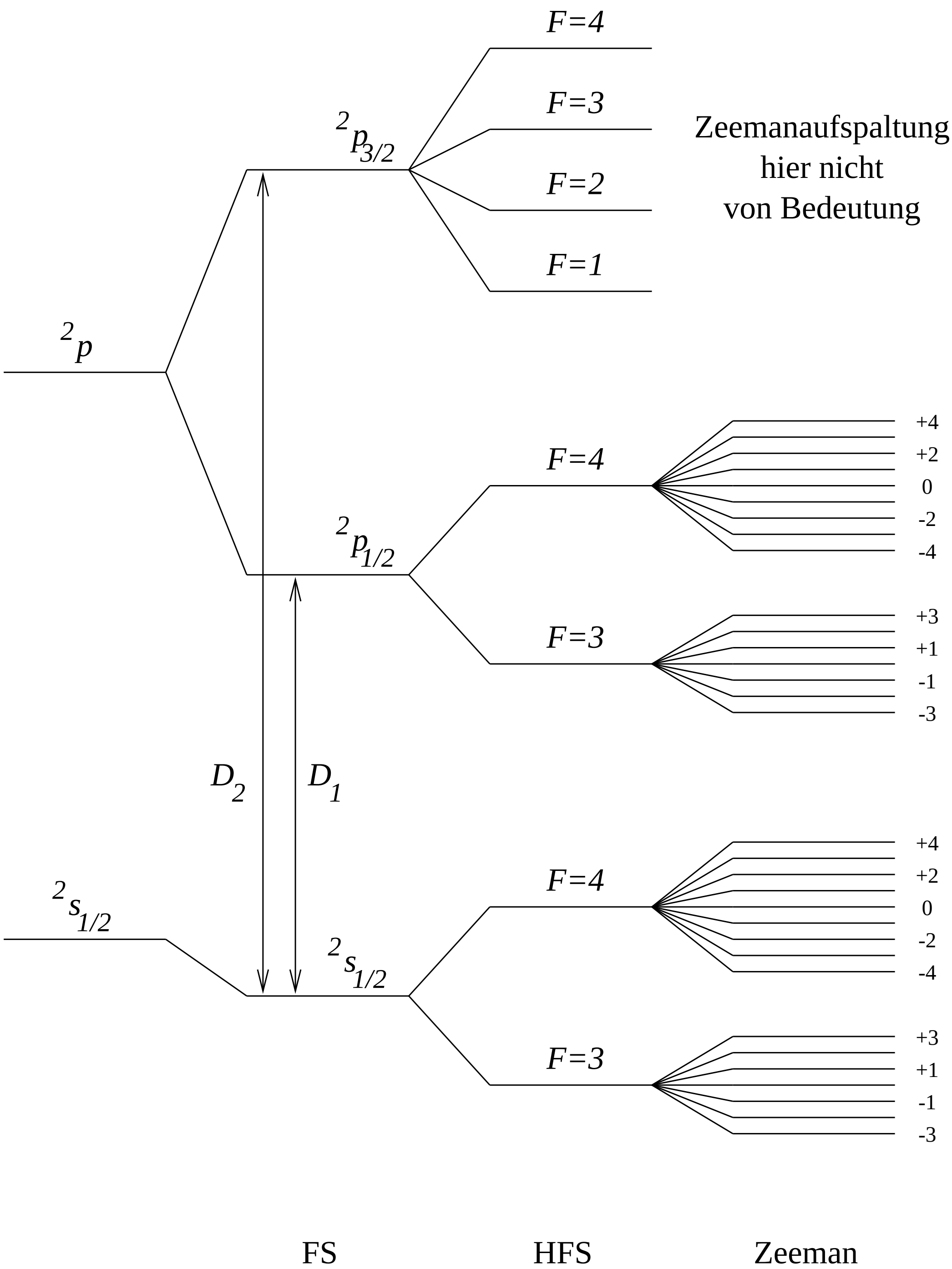


Abbildung 2.1: Termschema von ^{133}Cs mit Feinstrukturaufspaltung (FS), Hyperfeinstrukturaufspaltung (HFS) und Zeeman-Aufspaltung (die relativen Größen der Aufspaltungen entsprechen nicht den tatsächlichen Verhältnissen).

Hyperfeinstrukturaufspaltung

Diese Aufspaltung erfolgt aufgrund der Wechselwirkung zwischen Hüllendrehimpuls $\vec{J}$ und Kernspin $\vec{I}$. Sie koppeln zum Gesamtdrehimpuls des Atoms $\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$, so daß man die Aufspaltungsenergie [May85]

$$H_{HFS} = -\frac{\mu_I \mu_K B_H}{\hbar^2 I J}(\vec{I} \cdot \vec{J}) \tag{2.11}$$

erhält, wobei B_H die Stärke des magnetischen Hüllenfeldes am Kernort bezeichnet.

Zeeman-Effekt

Der *Zeeman-Effekt* kommt durch die Wechselwirkung des Gesamtdrehimpulses $\vec{F}$ mit einem nicht zu starken äußeren Magnetfeld zustande. Wird das äußere Feld zu stark, so kommt es zu einer Entkopplung der Drehimpulse, so daß ein fließender Übergang zum *Paschen-Back-Effekt* hin stattfindet. Die zugehörige Energie lautet

$$H_B = -g_F \mu_B \vec{F} \cdot \vec{B}, \tag{2.12}$$

$$\text{mit} \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} \text{ (Bohrsches Magneton).}$$

Die äquidistante Energieaufspaltung beträgt demnach

$$\Delta E_B = g_F \mu_B B m_F, \tag{2.13}$$

$$\text{mit} \quad m_F = -F, \ldots, 0, \ldots + F.$$

Die Landéschen g-Faktoren berechnen sich wie folgt:

$$\begin{aligned} g_F &= g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} \\ &\quad - g_K \frac{\mu_K}{\mu_B} \frac{F(F+1) + I(I+1) - J(J+1)}{2F(F+1)}, \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\text{mit} \quad g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}. \tag{2.15}$$

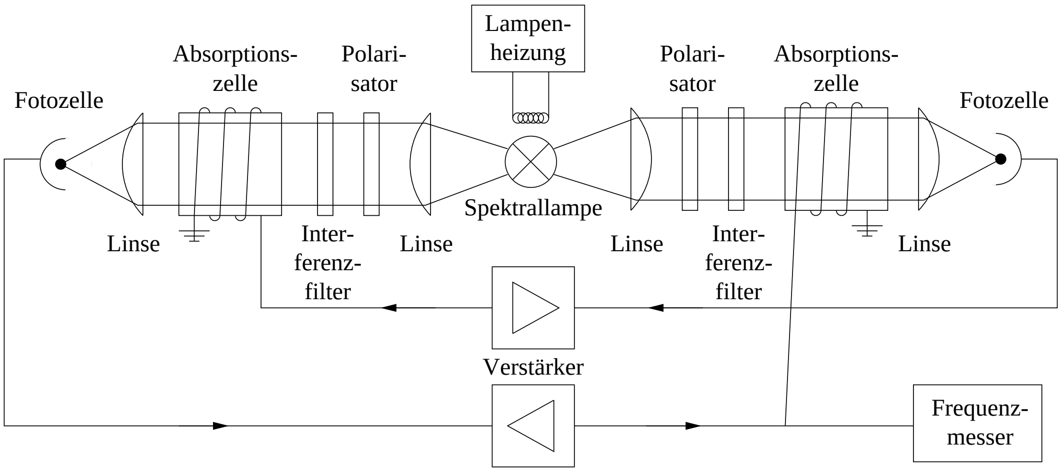


Abbildung 2.2: Prinzipdarstellung eines Absorptionszellenmagnetometers [Sch71]

Optisches Pumpen

Im thermodynamischen Gleichgewicht sind bei Zimmertemperatur die $2F{+}1$ Zeeman-Niveaus des Cäsiums nahezu gleich besetzt. Durch das optische Pumpen möchte man eine Besetzungsinversion erzeugen. Hierzu strahlt man parallel zum Magnetfeld rechtszirkular polarisiertes Licht in eine Zelle, die ^{133}Cs-Dampf enthält, ein (σ^+-Linie). Das dafür benutzte Licht der sogenannten D_1-Linie besitzt eine Wellenlänge von 894.35 nm. Durch geeignete Filter erreicht man, daß nur noch rechtszirkular polarisiertes Licht dieser Wellenlänge die Cäsiumzelle durchdringt (Interferenzfilter, Polarisator). Aufgrund der Impulserhaltung können nur Übergänge mit der Auswahlregel $\Delta m_F = +1$ auftreten. Nach Absorption eines solchen Quants hat sich also die Drehimpulsquantenzahl um eins erhöht. Dieser Zustand kann nun spon-

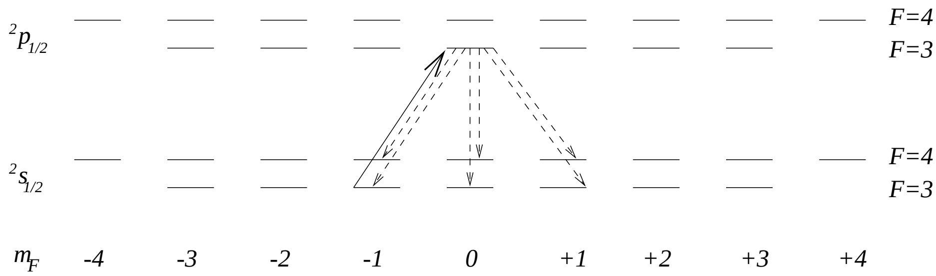


Abbildung 2.3: Pumpschema des Cäsiumatoms. Hier ist die Zeeman-Aufspaltung der am Pumpvorgang beteiligten Hyperfeinstrukturniveaus dargestellt. Die Energiedifferenz zwischen den Niveaus $^2p_{1/2}$ und $^2s_{1/2}$ entspricht einer Wellenlänge von 894.35 nm (D_1-Linie).

tan unter der Auswahlregel $\Delta m_F = 0, \pm 1$ zerfallen. Da alle drei Möglichkeiten gleich wahrscheinlich sind, findet man das Elektron nach Absorption und spontaner Emission mit einer Wahrscheinlichkeit von 2/3 in einem höheren Grundzustand wieder. Da dieser Pumpvorgang ständig läuft, ist der Zustand $6\ {}^2\mathrm{s}_{1/2}, F = 4, m_F = 4$ derjenige mit der größten Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Die Absorption des Cäsiumlichts in der Cäsiumzelle wird geringer, da sich fast alle Elektronen auf diesem Niveau befinden. Entvölkert man diesen Zustand, so absorbieren die Cäsiumatome das Licht wieder, und man stellt hinter der Zelle ein Minimum der Intensität fest. Die Entvölkerung erfolgt durch reine induzierte Zeeman-Übergänge mit $\Delta m_F = -1$. Dies erreicht man durch Einstrahlung eines geeigneten Hochfrequenzfeldes, das der Bedingung

$$h\nu = g_F \mu_B B \tag{2.16}$$

genügt. Aus 2.16 läßt sich nun die *magnetische Flußdichte B* berechnen. Sie ist mit dem Faktor

$$\frac{g_F \mu_B}{h} = 3.4985272\ \frac{Hz}{nT} \tag{2.17}$$

proportional zur eingestrahlten Hochfrequenz.

Kapitel 3

Meßvorrichtung

Nach ersten Testmessungen, die in Mechernich/Eifel stattfanden (siehe Abschnitt 5.1), wurde der Entschluß gefaßt, einen Meßwagen zu bauen, um die Meßwertaufnahme zügiger und die Meßwertpositionierung genauer zu gestalten. Erfahrungen mit solchen Wagen liegen bereits aus anderen Gruppen vor. So erzielten *H. Becker et al.* vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege sehr gute Ergebnisse in der Prospektion vielzähliger Bodendenkmäler [Bec96]. Desweiteren benötigt man eine Elektronik, die die Positionierung der Meßwerte vornimmt. Durch diese Maßnahmen erreicht man eine sehr viel genauere und sehr schnelle Prospektion des betreffenden Gebietes. Somit besteht die Meßvorrichtung aus den drei Komponenten

- Cäsiummagnetometer,
- Meßwagen,
- Positionierungselektronik,

wovon die erste vom Institut für Vor- und Frühgeschichte zur Verfügung gestellt wurde und die beiden letzteren vom Verfasser selbst entwickelt und gebaut worden sind.

3.1 Cäsiummagnetometer

3.1.1 Technik

Bei dem hier benutzten Cäsiummagnetometer handelt es sich um den Typ G-858 der Firma Geometrics Inc.. Im Gegensatz zu herkömmlichen Absorptionszellenmagnetometern, deren Frequenz ständig durchgestimmt werden muß, um das Absorptionsminimum und somit die magnetische Flußdichte zu bestimmen, wird die Frequenz des HF-Signals dieses Gerätes ständig dem Absorptionsminimum bei $\nu = \frac{g_F \mu_B B}{h}$

(Larmor-Frequenz) angepaßt. Man geht folgendermaßen vor, um dies zu erreichen: Das Signal der Fotozelle besitzt eine der Zeeman-Aufspaltung entsprechende leichte HF-Modulation im mV-Bereich. Dieses Signal wird nun auf 2V verstärkt und zur Hochfrequenzspule zurückgekoppelt, so daß diese direkt mit der Larmor-Frequenz schwingt. Die Zelle absorbiert also ständig, und man stellt hinter ihr ein permanentes Minimum der Lichtintensität fest (Abbildung 2.2). Ein solches Magnetometer nennt man selbstoszillierendes Cäsiumabsorptionszellenmagnetometer [Smi97]. Der Meßbereich des Magnetometers deckt Werte von 17.000 nT bis 100.000 nT ab. Desweiteren ist noch zu beachten, daß der zylindrische Sensor über sogenannte Totzonen verfügt. Fällt das Magnetfeld in eine dieser Totzonen ein, so ist das Meßgerät bauartbedingt nicht in der Lage ein vernünftige Feldmessung durchzuführen, und es zeigt 0 nT an. Um dies zu vermeiden, sollte die Symmetrieachse des Sensors im Winkel von $45° \pm 30°$ zum Erdmagnetfeld eingestellt werden [Smi97].

3.1.2 Gradiometeranordnung

Da man die Auswirkung des Tagesganges auf die Messungen so gering wie möglich halten möchte, wird in Gradiometeranordnung gemessen. Eine solche Anordnung besteht aus zwei Meßsonden, die in unserem Fall in einem Abstand von 1 m vertikal übereinander angebracht sind. Die untere Sonde befindet sich in einer Höhe von 0.3 m über dem Boden. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß kein tatsächlicher Gradient gemessen wird, da hierfür die Grenzwertbedingung

$$f'(\vec{x}) = \lim_{|\vec{h}| \to 0} \frac{f(\vec{x}) - f(\vec{x} + \vec{h})}{|\vec{h}|} \tag{3.1}$$

nicht erfüllt ist. Tatsächlich wird in unserem Fall die Differenz der magnetischen Flußdichten zweier Orte im vertikalen Abstand von 1 m gemessen:

$$\Delta B(\vec{x}) = \frac{B(\vec{x}) - B(\vec{x} + \vec{h})}{|\vec{h}|}, \qquad \text{mit } \vec{h} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{3.2}$$

Breiner gibt an, daß die Gradientenbedingung erst hinreichend erfüllt ist, wenn $|\vec{h}|$ kleiner als ein Fünftel des Abstands von der Anomalie ist [Bre73]. Man sollte also beachten, daß es sich nicht um einen wirklichen Gradienten, sondern nur um eine Differenz handelt, wenn im weiteren Verlauf dieser Arbeit davon die Rede sein wird.

Es wurde ein Tagesgang über 24 h mit beiden Sensoren in einem Abstand von 1 m aufgenommen, um zu überprüfen, wie gut die Gradiometeranordnung die Tagesgangschwankungen korrigiert. Hierbei betrug das Meßintervall 1 min. Die Meßwerte wurden in einem stark besiedelten Gebiet aufgenommen, so daß mit Störungen, die auf die Zivilisation zurückzuführen sind, gerechnet werden muß. Abbildung 3.1 stellt die Meßwerte des oberen Sensors, des unteren Sensors und die Sensordifferenz dar. Die Totalintensität des Magnetfeldes schwankte an diesem Tag zwischen 48050 nT

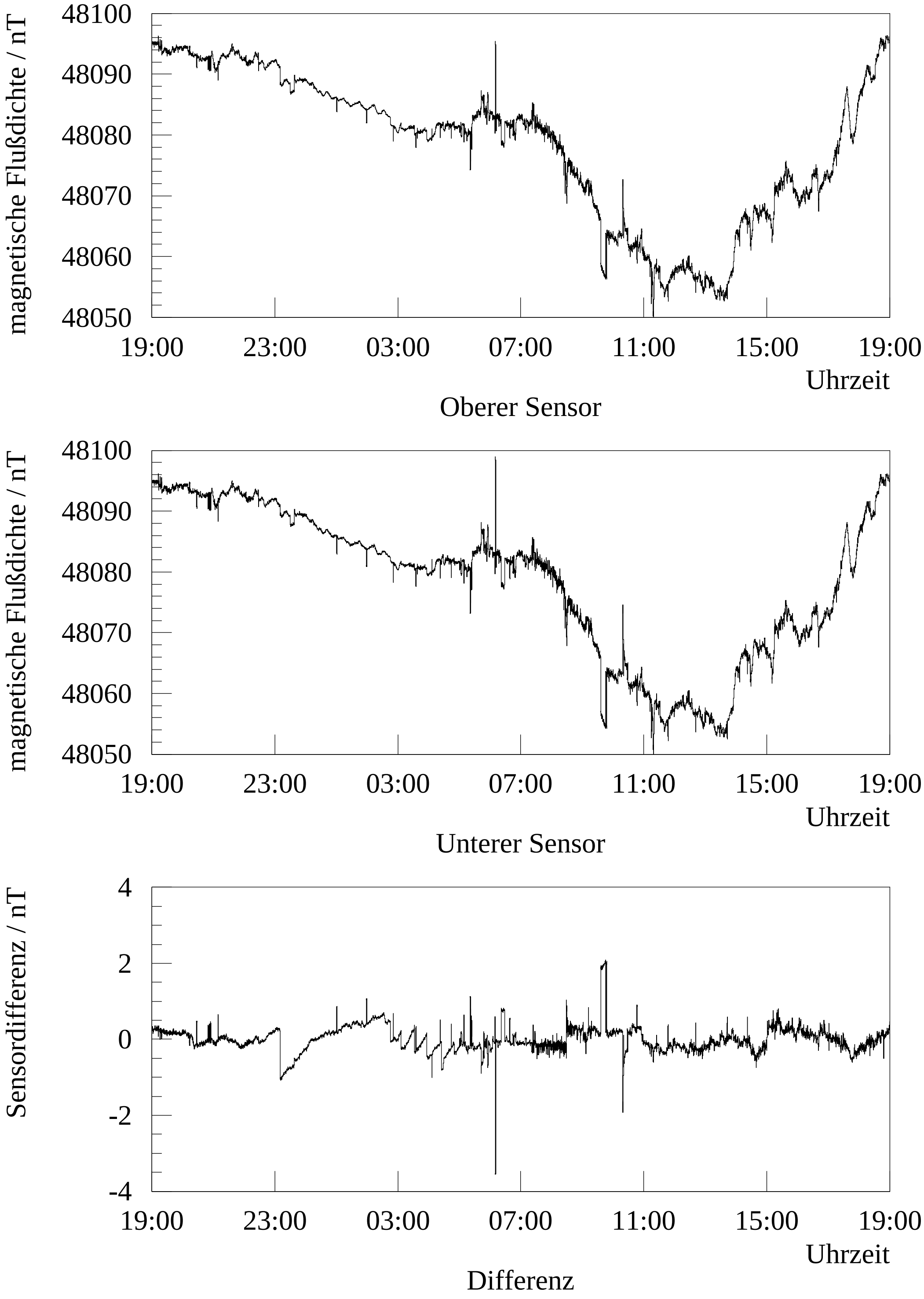


Abbildung 3.1: Messung des Tagesganges vom 25. auf den 26.05.97.

und 48100 nT um ca. 50 nT. Deutlich ist das Minimum der Intensität gegen Mittag zu erkennen, was auf ein Maximum der Aktivitäten in der Ionosphäre und der Magnetosphäre zurückzuführen ist (höchster Sonnenstand). Die Sensordifferenz zeigt diese großen Schwankungen nicht. Der fallende Trend der magnetischen Flußdichte gegen Mittag ist aufgehoben worden. Dennoch sind deutliche Änderungen zu beobachten, die im Bereich von 0.5 nT liegen. Gegen 23.00 Uhr wird ein starker Abfall der Sensordifferenz beobachtet. Dies ist wahrscheinlich auf Umwelteinflüsse zurückzuführen. Hierzu zählen in erster Linie Veränderungen der Sensorpositionen durch Wind und elektrische Geräte, die sich in der Nähe des Meßplatzes befinden. Der Abstand zu den nächsten Häusern betrug ca. 10 m, so daß sogar mit Störungen gerechnet werden muß, wenn der Nachbar sein Auto in die Garage fährt. Um ca. 10.00 Uhr beobachtet man ein plötzliches Ansteigen der Differenz, die sich eine kurze Zeit auf diesem Niveau hält, um dann wieder auf ihren ursprünglichen Wert zu sinken. Hier muß davon ausgegangen werden, daß diese Störung in unmittelbarer Umgebung des Meßplatzes stattfand. Es wurde, wie auch immer, für kurze Zeit ein Magnetfeld erzeugt, das in der Sensoranordnung eine Differenz von knapp 2 nT auslöste. Hieraus wird ersichtlich, mit welchen Störungen man zu rechnen hat, wenn man in Zivilisationsnähe prospektieren möchte.

3.1.3 Datenaufnahme

Das Intervall der Meßwertaufnahme kann in 0.1sec-Schritten zwischen 0.1 sec und 1h variiert werden. Zur Speicherung der Daten im Binärformat steht intern ein 1MB großer Speicher zur Verfügung. Die Daten können wahlweise direkt über eine RS-232 Schnittstelle an einen PC transferiert werden oder nach Abschluß der Messung aus dem Speicher des Meßgerätes heruntergeladen werden. Die Speicherkapazität reicht für eine dreistündige Messung in Gradiometeranordnung mit einem Meßintervall von 0.1 sec aus.

Es besteht die Möglichkeit, Referenzpunkte, die sogenannten Marken, zu setzen, um die Positionierung der Meßdaten vorzunehmen. Jeweils am Beginn einer Linie, die man abschreitet, setzt man eine Marke mittels Knopfdruck. Erreicht man die vorher genau festgelegten Referenzpunkte, drückt man erneut den Markenknopf. Ist man am Linienende angelangt, muß man den Linienknopf drücken. Damit hat man die Meßwertaufnahme beendet und kann die nächste Linie vermessen. Um eine automatische Positionierung vornehmen zu können, ist das Gerät mit Marken- und Linieneingängen ausgestattet, die auf Masse gelegt werden müssen, um ein Marken- oder Linienereignis auszulösen. Diese Aufgabe übernimmt die in Abschnitt 3.3 beschriebene Positionierungselektronik, so daß ein Betätigen der Knöpfe entfällt. Die Anschlußbelegung des Meßgeräts befindet sich im Anhang A.1.

3.1.4 Fehler

Präzision des Meßgerätes

Die Bestimmung der Präzision des Meßgerätes in Abhängigkeit vom Meßintervall erfolgte, indem bei vier verschiedenen Meßintervallen jeweils 100 Differenzmessungen am selben Ort durchgeführt und der jeweilige 2σ-Fehler (doppelte Standardabweichung) bestimmt wurde. Da hierbei aber aufgrund der Mikropulsationen immer eine kleine lokale Änderung des Gradienten mit der Zeit beobachtet wurde und so die Bestimmung des reinen Meßfehlers nicht möglich war, wurde diese zeitliche Variation des Erdmagnetfeldes rechnerisch eliminiert. Hierzu wurde ein Polynomfit durchgeführt, der die Änderung des Magnetfeldes phänomenologisch simuliert. Dieser wurde von den Meßwerten abgezogen. Dadurch hat man nun auf eine konstante Differenz normiert und kann die statistischen Fehler unter der Annahme einer Normalverteilung der Meßwerte bestimmen. Abbildung 3.2 zeigt die Korrektur der Daten am Beispiel des Meßintervalls von 0.2 *sec*.

Werksseitig wird der 2σ-Fehler in Abhängigkeit vom Meßintervall T für einen Sensor wie folgt angegeben [Geo95]:

$$2\sigma(T) = \frac{1}{\sqrt{T}} \cdot 0.016\ nT\sqrt{sec} \tag{3.3}$$

Für eine Differenzmessung zweier Sensoren folgt also für den 2σ-Fehler nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung:

$$2\sigma_d(T) = \frac{1}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{2} \cdot 0.016\ nT\sqrt{sec} \tag{3.4}$$

Die Ergebnisse dieser Messung sind in Tabelle 3.1 und Abbildung 3.3 dargestellt. Die Meßfehler stimmen innerhalb ihres statistischen Fehlers mit den Herstellerangaben überein. Alle nachfolgenden Messungen wurden mit einem Meßintervall von 0.1 *sec* durchgeführt, so daß man für die Sensordifferenz von einem Fehler von 0.07 nT ausgehen kann.

Meßintervall/sec	$2\sigma_d/nT$	$2\sigma_{exp}/nT$	$\Delta 2\sigma_{exp}/nT$
0.1	0.072	0.071	0.007
0.2	0.051	0.052	0.005
0.5	0.032	0.034	0.003
1.0	0.023	0.021	0.002

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Differenzmessung nach Korrektur der Einflüsse der Mikropulsationen (siehe Abb. 3.3)

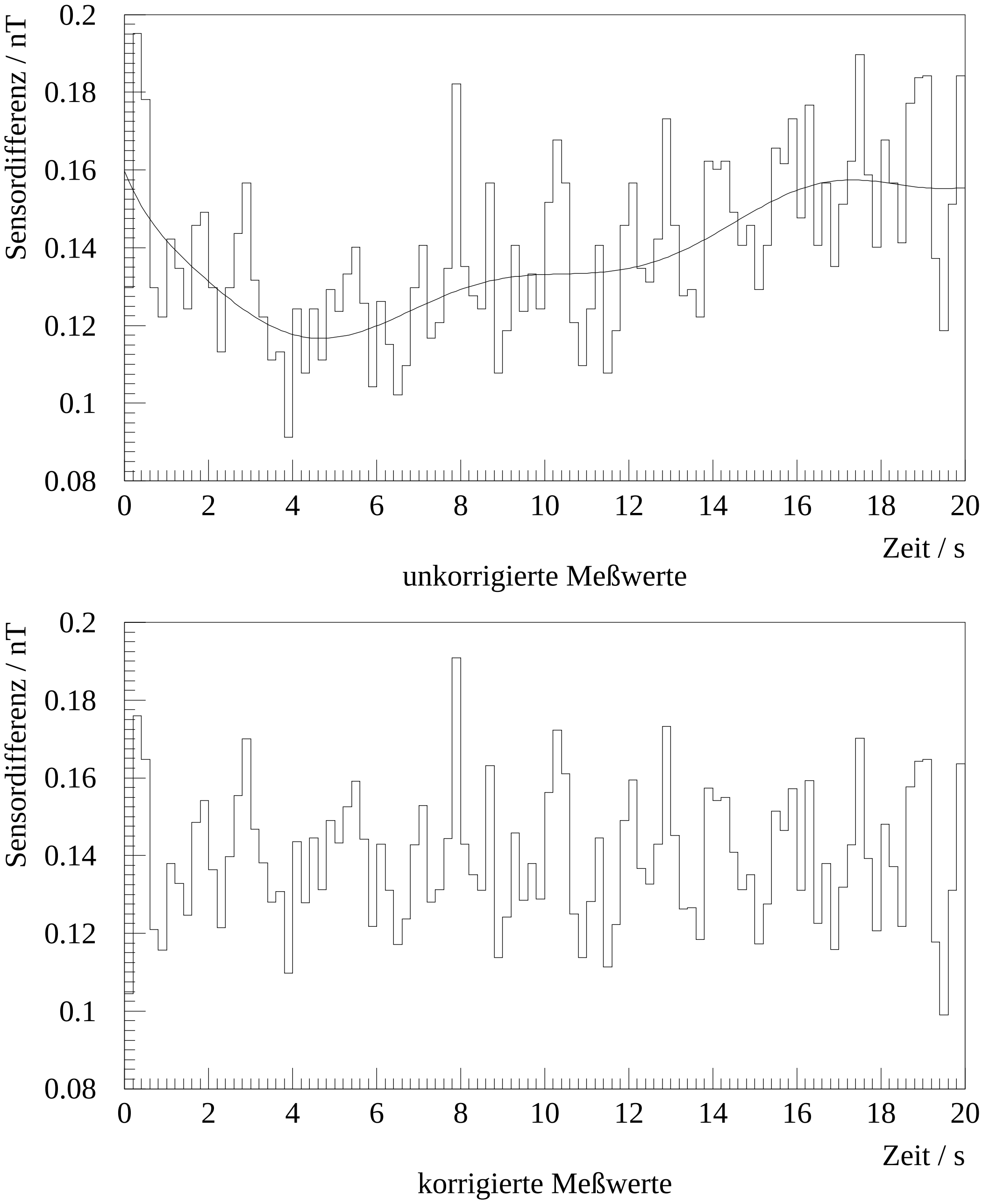


Abbildung 3.2: Korrektur der Gradientenänderung durch einen Polynomfit. Die im oberen Diagramm dargestellten Meßdaten wurden an ein und demselben Ort mit einem Meßintervall von 0.2 *sec* aufgezeichnet. Deutlich ist die Änderung des Gradienten zu sehen, die durch das eingezeichnete Polynom phänomenologisch erfaßt wird. Im unteren Diagramm sieht man die korrigierten Meßdaten nach Addition des Mittelwertes und Subtraktion des Polynoms. Der Einfluß der zeitlichen Gradientenänderung ist verschwunden.

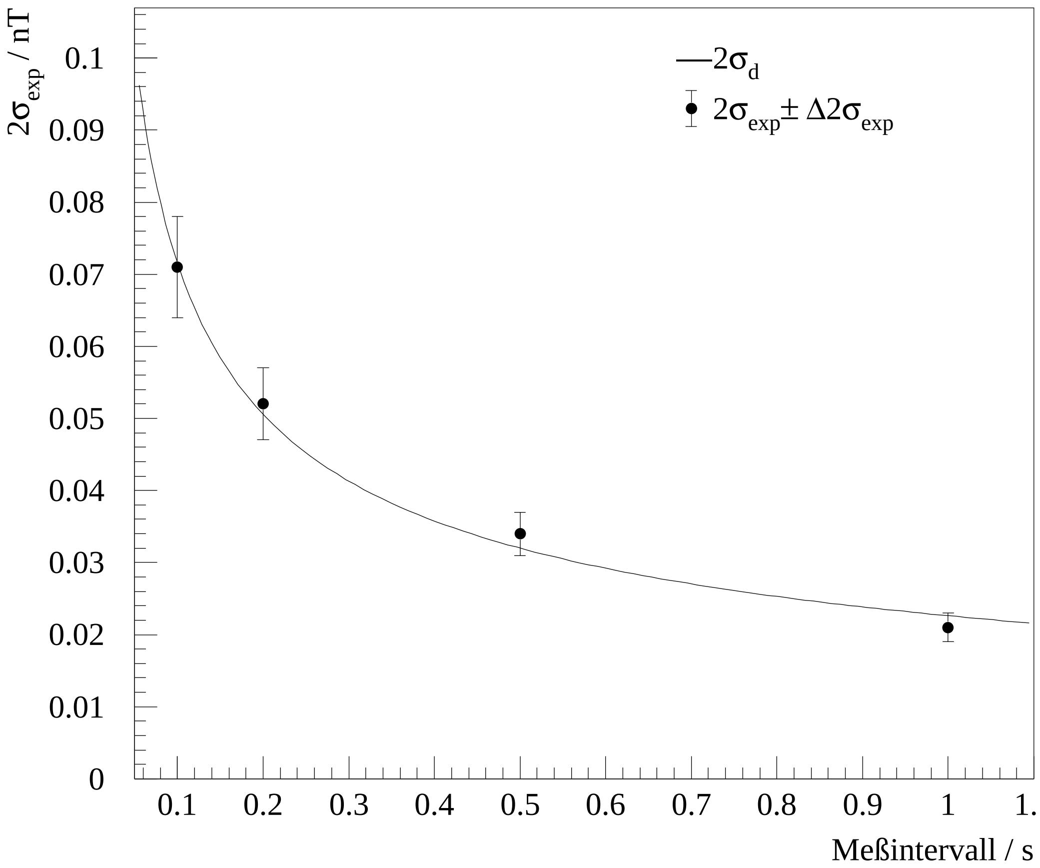


Abbildung 3.3: Meßfehler des Magnetometers in Gradiometeranordnung (Differenzmessung) in Abhängigkeit vom Meßintervall

Einfluß der Mikropulsationen auf die Datenreproduzierbarkeit

Da die ständig auftretenden Mikropulsationen die Reproduzierbarkeit der Messung beeinflussen, soll an dieser Stelle kurz untersucht werden, in welcher Größenordnung diese Beeinflussung liegt. In Abschnitt 3.1.4 wurden diese Einflüsse phänomenologisch eliminiert, um die tatsächliche Präzision des Meßgerätes zu bestimmen. Nun kann man bei einer Prospektion die zeitlichen Änderungen ohne eine zeitlich hochaufgelöste Tagesganganalyse nicht von der örtlichen Änderung des Gradienten unterscheiden, so daß man an der Größenordnung des Einflusses dieser zeitlichen Schwankung interessiert ist. Es ist allerdings zu beachten, daß es sich hierbei um eine Abschätzung handelt. Die Messung stimmt für den Augenblick, in dem sie durchgeführt wurde. Hieraus lassen sich aber keine Rückschlüsse auf ein zukünftiges zeitliches Verhalten des Magnetfeldes ziehen. Dies ist der Hauptgrund, warum während eines Magnetsturmes die magnetische Prospektion zu keinen guten Ergebnissen führt.

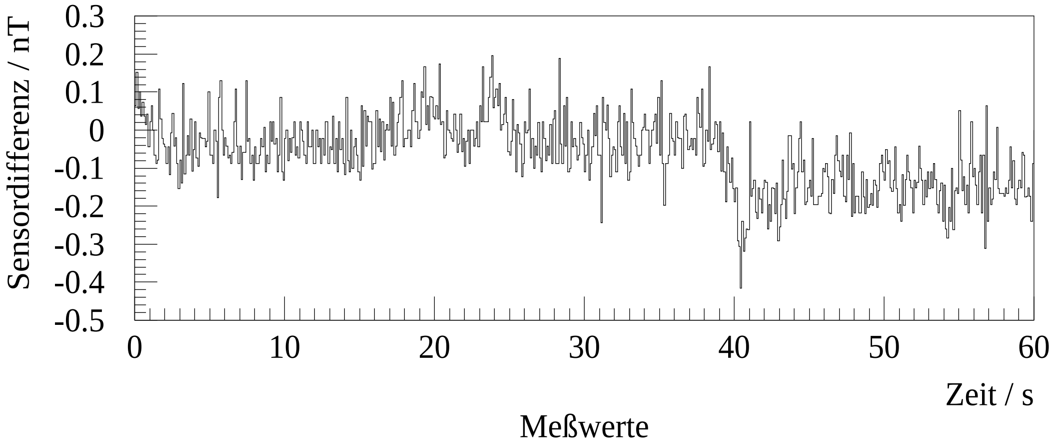
Mit einem Meßintervall von 0.1 *sec* wurde 60 *sec* lang die Differenz B_d an einem festen Ort mit einem vertikalen Sensorabstand von 1 *m* bestimmt. Aus diesen 600 Meßwerten wurden der Mittelwert und der 2σ-Fehler bestimmt. Abbildung 3.4 zeigt die Häufigkeitsverteilung dieser Meßwerte. Der Mittelwert beträgt

$$\overline{B_d} = -0.06\ nT/m, \tag{3.5}$$

und die doppelte Standardabweichung beträgt

$$\Delta B_d = 0.19\ nT/m. \tag{3.6}$$

Die Daten waren also in diesem Fall mit einem Fehler von $\Delta B = \pm 0.19\ nT/m$ innerhalb einer Meßzeit von 60 *sec* reproduzierbar. Dieser Fehler ist ungefähr dreimal größer als die eigentliche Meßpräzision des Gerätes.



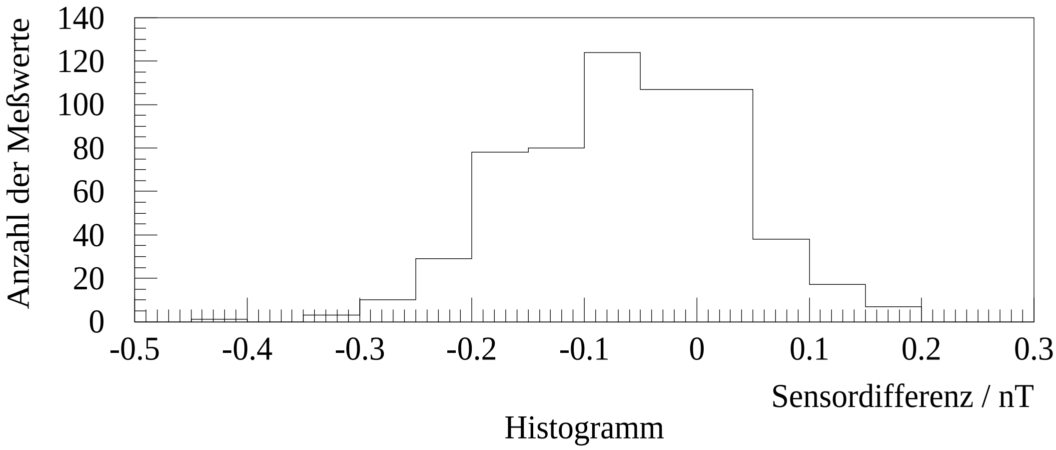


Abbildung 3.4: Histogramm der Meßwerte einer Reproduzierbarkeitsmessung von 60 *sec* Dauer mit einem Meßintervall von 0.1 *sec*.

Temperaturdrift

Ein weiterer Fehler ist die Temperaturdrift. Sie wird mit 0.05 $nT/°C$ angegeben [Geo95]. Hierbei ist also zu beachten, daß das Meßgerät einer ausreichenden Akklimatisation unterzogen wird und sich nicht erst während der Messung aufwärmt bzw. abkühlt.

Heading Error

Der sogenannte „Heading Error“ tritt auf, falls sich der Winkel zwischen Magnetfeldrichtung und Sensorachse ändert. Dies ist z.B. der Fall, wenn bidirektional gemessen wird. Hierbei wird ein Offset zwischen zwei benachbarten Linien beobachtet. Dieser Fehler kommt durch leichte magnetische Verschmutzungen im Sensor selbst und durch fehlerhafte Ausrichtung beim Zusammenbau der Sensoren zustande [Smi97]. Weiterhin ändert sich die relative Position des Meßwagens und der Person, die die Messung durchführt. Er wird durch das in Kapitel 4 besprochene selbstentwickelte Programmpaket XMAGCAL korrigiert.

Zum Nachweis des Heading Errors des von uns benutzten Meßgerätes wurde eine Differenzmessung bei verschiedenen Winkeln durchgeführt. Hierzu wurden beide Sensoren senkrecht montiert. Der Winkel wurde geändert, indem beide Sensoren um ihre Symmetrieachse gedreht wurden. Hierdurch erfaßt man den Heading Error der Gradiometeranordnung. Das Meßintervall betrug 0.5 sec, woraus folgt, daß mit einer Präzision von 0.034 nT gemessen wurde. Mit 0.1 m wurde ein relativ kleiner Sensorabstand gewählt, um Störeinflüsse durch möglicherweise vorhandene Anomalien am

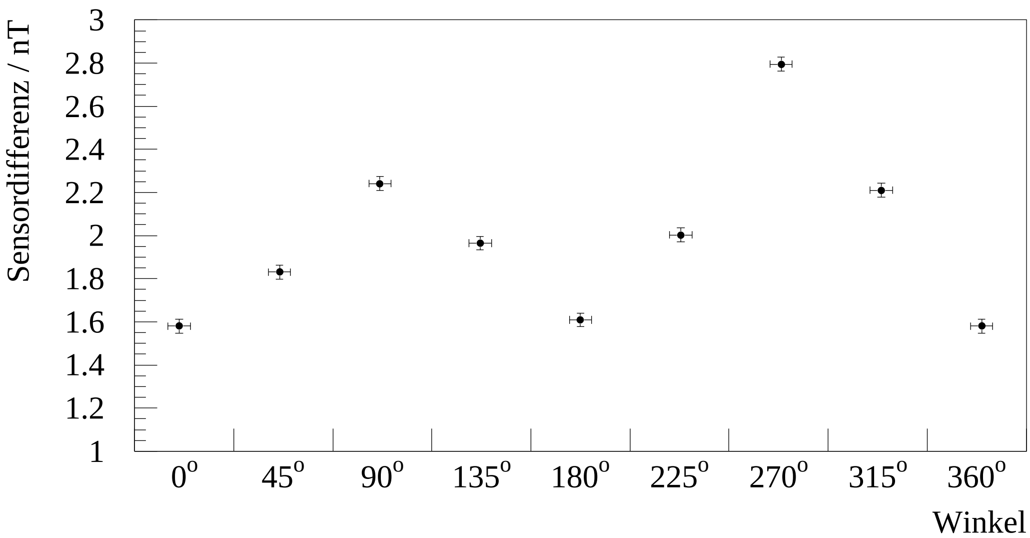


Abbildung 3.5: Experimenteller Nachweis des Heading Errors

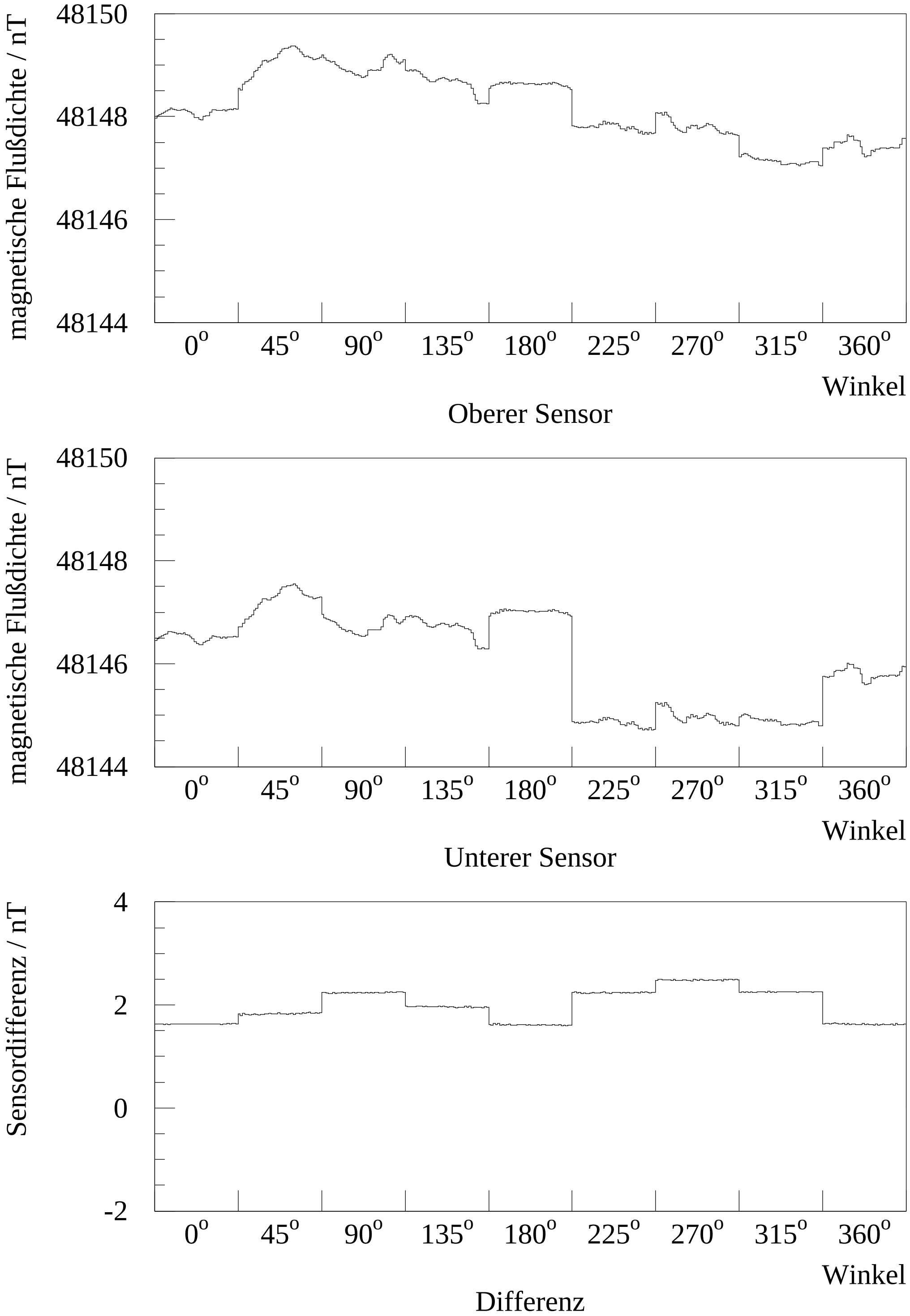


Abbildung 3.6: Meßdaten zum Nachweis des Heading Errors

Meßplatz so klein wie möglich zu halten. Norden entspricht einem Winkel von 0°. Für die Winkel 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° und 360° wurden jeweils 38 Meßwerte aufgenommen. Abbildung 3.6 zeigt die Meßdaten der beiden Sensoren, so wie deren Differenz. Hier ist gut zu erkennen, daß eine Differenzmessung die störenden Mikropulsationen eliminiert. Abbildung 3.5 zeigt die Mittelwerte der Differenzen zwischen den beiden Sensoren in Abhängigkeit vom Winkel. Der Fehler in der Sensordifferenz wurde durch die Meßpräzision abgeschätz, für den Winkel wurde ein Fehler von 5° angenommen. Die Werte bei 0° und 360° stimmen innerhalb ihrer Fehler überein, woraus man schließen kann, daß kein Trend in der Differenz während dieser Messung stattgefunden hat. Desweiteren stellt man fest, daß die minimale Differenz bei Winkeln von 0° und 180° auftritt. Maxima bilden sich bei 90° und 270° aus. Verdreht man den Sensor also um 180°, so zeigt er ein ähnliches Verhalten in Bezug auf den Heading Error.

3.2 Meßwagen

Folgende Anforderungen sollte man an einen Meßwagen stellen, um mit ihm magnetische Prospektionen durchführen zu können:

- Die verwendeten Materialien sollten eine geringe Suszeptibilität aufweisen; auf keinen Fall dürfen Ferro- oder Ferrimagnetika eingebaut werden.
- Metalle sollten sparsam eingesetzt werden, an rotierenden Teilen dürfen sie überhaupt nicht benutzt werden (Wirbelströme).
- Der Wagen sollte eine hohe Spurstabilität besitzen.
- Die Positionierung der Meßwerte sollte automatisch erfolgen.

Auf die Einhaltung der oben genannten Anforderungen wurde streng geachtet, um Fehlerquellen so klein wie möglich zu halten. Mit Ausnahme der Elektronik konnte auf Metall ganz verzichtet werden, so daß nur Kunststoffe, Gummi und Holz Verwendung fanden.

3.2.1 Aufbau

Grundgerüst des Wagens ist ein geleimter Holzrahmen mit den Ausmaßen $129.5\ cm \times 71.0\ cm$. Er besteht aus Fichtenkantholz der Stärke $55\ mm \times 40\ mm$ und wird in der Mitte nochmals durch ein Kantholz verstärkt. Der aus Rundhölzern bestehende Griff ist abnehmbar, um einfachen Transport zu gewährleisten. Die Kunststoffachse (Ø $31\ mm$) ist durch zwei Teflonblöcke, die als Gleitlager dienen, am Rahmen befestigt. Die Räder bestehen aus Kunststoffahrradfelgen (Ø 20”) auf die ein passender Gummidruckschlauch montiert ist. Sie sind starr mit der Achse verschraubt, was zu einer höheren Spurstabilität auf Kosten geringerer Wendigkeit führt. Auf den

Rahmen wird eine Halterung gesetzt, an der die Cäsiumsensoren befestigt werden können. Um jegliche Wirbelströme zu vermeiden, wurden für alle Schraubverbindungen Kunststoffschrauben gewählt. Das Meßgerät und die Positionierungselektronik können zusammen mit ihren Stromversorgungen am Wagen befestigt werden, und die optoelektronische Positionsabnahme erfolgt direkt an der Wagenachse (näheres hierzu im Abschnitt 3.3). Abbildung 3.7 zeigt den betriebsbereiten Meßwagen.

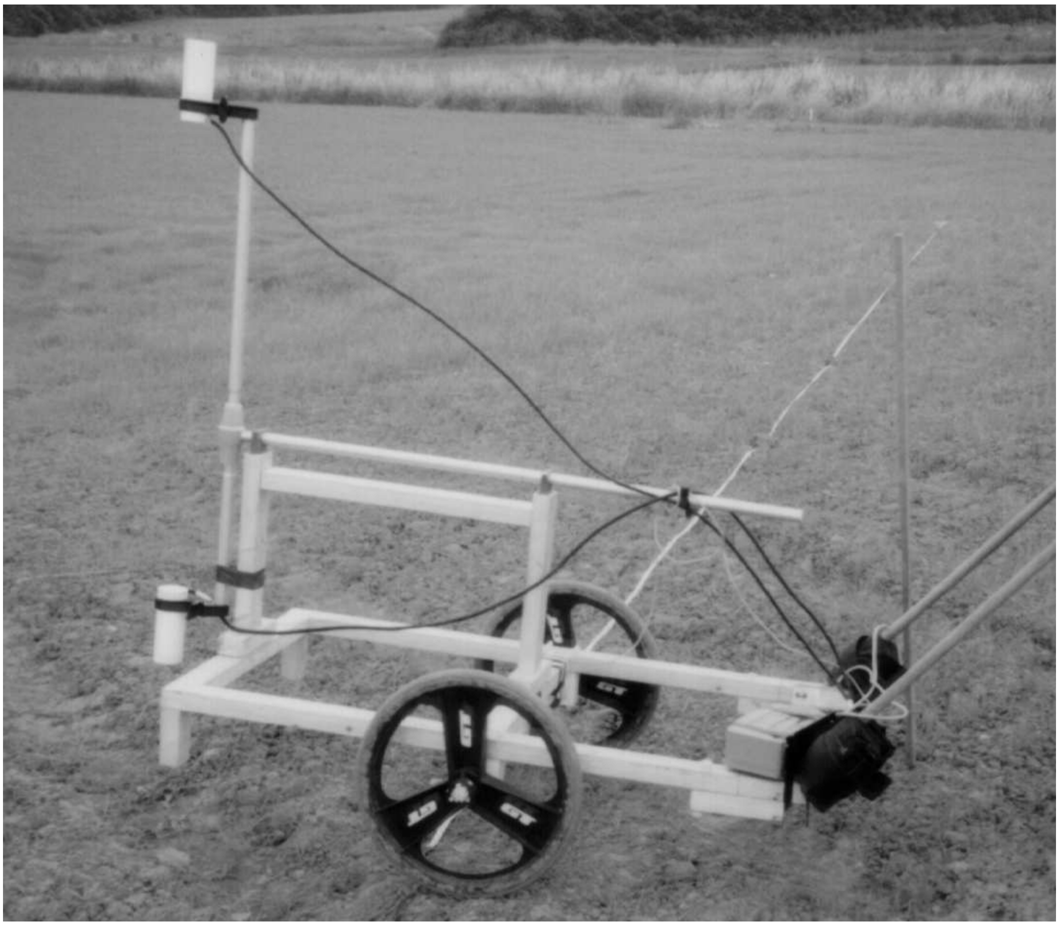


Abbildung 3.7: Einsatzbereiter Meßwagen

3.3 Positionierungselektronik

Die Aufgabe der Elektronik besteht darin, dem Meßgerät die vorher fest definierten Markensignale und nach einer vorher festgelegten Markenanzahl das Liniensignal zu senden. Hierzu werden die Wagenumdrehungen optoelektronisch an der Wagenachse abgenommen. Pro Umdrehung ergeben sich zwei äquidistante Signale, so daß bei einem Radumfang von 1.42 m nach jeweils 71 cm eine Marke gesetzt wird. Die Anzahl der Marken, nach der das Liniensignal gesendet wird, kann zwischen 0 und 999 eingestellt werden. Hieraus resultiert eine maximale Linienlänge von 709.29 m, die aber in der Praxis wohl kaum Anwendung finden wird (Fortpflanzung der Positionierungsfehler).

3.3.1 Hauptplatine

Die Schaltung wurde in der störungsunanfälligen TTL-Technik gebaut. Sie besteht im wesentlichen aus drei BCD-Zählern (SN74LS290), die die optoelektronischen Impulse zählen und einem Vergleicher, der durch NOR-, EOR- und AND-Gatter (SN7425, SN74LS86, SN74LS11) realisiert wurde. Er prüft ständig, ob das zuvor eingestellte Linienende bereits erreicht ist. Solange dies noch nicht der Fall ist, wird bei jedem optoelektronischen Impuls ein Markensignal an das Meßgerät gesendet. Mit Erreichen des Zählerstandes wird das Liniensignal gesendet, und das Meßgerät beendet die Messung dieser Linie. Da nun bei einem weiteren optoelektronischen Impuls wieder ein Markensignal gesendet würde, wird ein Stopbit gesetzt, das anzeigt, daß nun keine Signale mehr ans Meßgerät gehen dürfen. Man kann nun an die Anfangsposition der nächsten Linie fahren. Dort wird der Reset-Schalter betätigt, um den Zählerstand auf Null zurückzusetzen und das zuvor gesetzte Stopbit zu löschen, und man kann mit der Prospektion der nächsten Linie beginnen.

Sowohl der aktuelle Zählerstand, als auch der Referenzstand werden über LED-Siebensegmentanzeigen angezeigt, so daß eine ständige Überprüfung der aktuellen Position möglich ist. Abbildung 3.8 zeigt die Logikschaltung und Abbildung 3.9 das Flußdiagramm der Elektronik. Im Schaltbild wurden die Siebensegmentanzeigen und deren Treiberbausteine (SN7447) aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Die RS-232 Ein- und Ausgänge des Meßgeräts stehen ebenfalls auf der Elektronikplatine zur Verfügung, so daß ein Laptop auch bei angeschlossener Elektronik Daten vom Meßgerät empfangen kann. Abbildung A.3 zeigt die Lage der Schalter und Stecker in der Elektronikbox. Die Steckerbelegungen werden aus Abbildung A.2 im Anhang ersichtlich. Die Stromversorgung der Elektronik besteht aus einem Blei-Gel-Akku mit einer Spannung von 6 V und einer Kapazität von 3 Ah. Da der maximale Stromverbrauch der Elektronik weniger als 1 A beträgt, läßt sich mit einer Batterie eine Meßdauer von ca. 3 h realisieren.

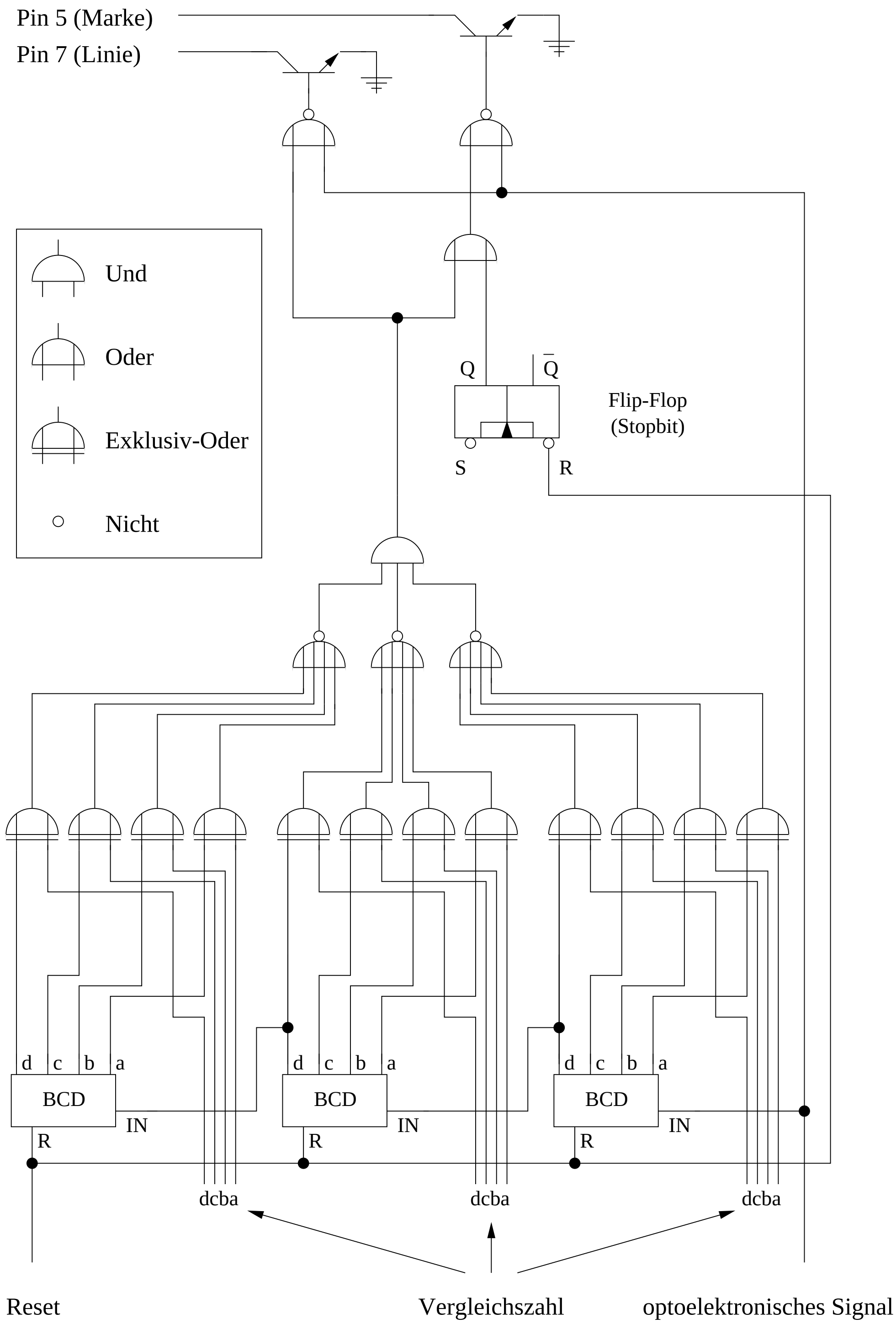


Abbildung 3.8: Logikschaltung der Positionierungselektronik. Die Treiber der Siebensegmentanzeigen wurden aus Gründen der Übersichlichkeit weggelassen.

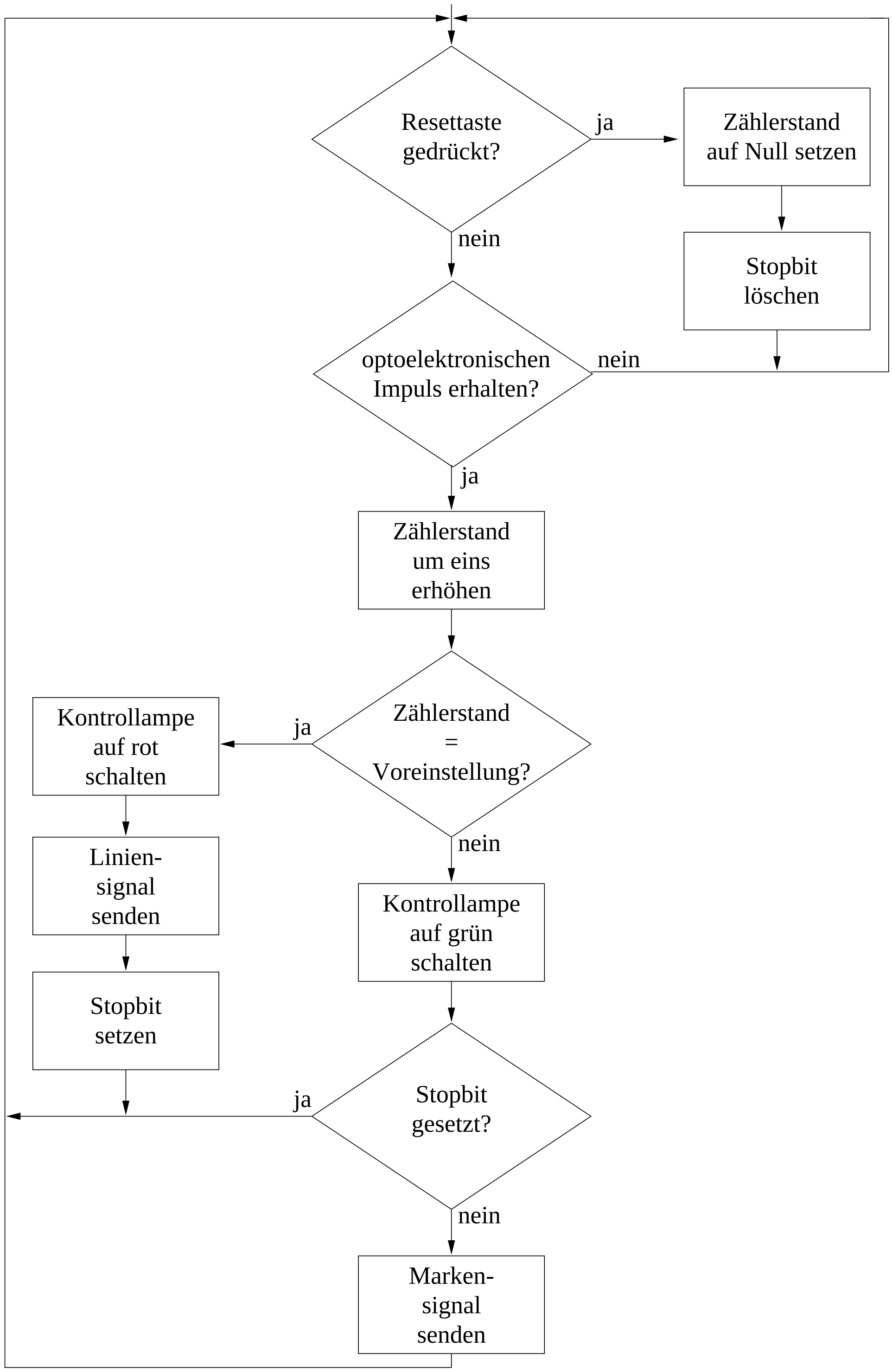


Abbildung 3.9: Flußdiagramm der Positionierungselektronik

3.3.2 Optoelektronischer Impulsgeber

Der optoelektronische Impulsgeber besteht aus einer Infrarotlichtschranke, die beim Wechsel von dunkel auf hell durchschaltet. Sie steuert einen TTL-Treiber (SN 75451B) an, dessen Ausgangssignal als Eingangssignal für den BCD-Zähler dient. Abbildung 3.10 zeigt das Schaltbild des Impulsgebers.

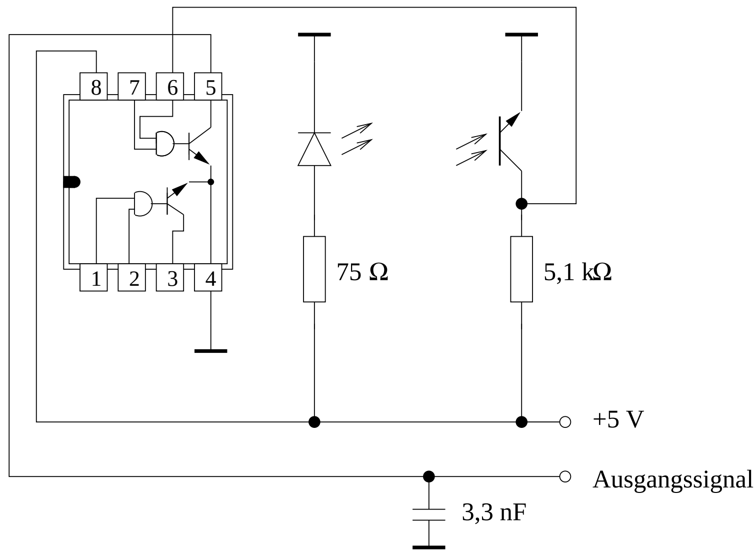


Abbildung 3.10: Schaltung des optoelektronischen Impulsgebers

Kapitel 4

Software

Ein weiterer wesentlicher Teil dieser Diplomarbeit bestand in der Entwicklung des Programmpakets Xmagcal. Eine ausführliche Anleitung befindet sich im Anhang B. An dieser Stelle sollen die Fähigkeiten dieser Software erläutert werden. Hierzu zählen in erster Linie

- Datentransfer,
- Datendarstellung,
- Datenbearbeitung.

Im Abschnitt 4.1 wird auf die Übertragung der Daten in den Computer und die Konvertierung in ortsaufgelöste Meßwerte eingangen. Abschnitt 4.2 beschäftigt sich mit der Darstellung der Daten als Graustufenplot, dem Abgriff eines Querschnittsprofils und weiteren nützlichen Zusatzfunktionen. Die Korrektur der Meßfehler und einige andere Datenmanipulationen werden Gegenstand von Abschnitt 4.3 sein.

Die Software wurde in C geschrieben und mit Hilfe des GNU C-Compilers 2.7.1 [GNU96] auf einem Pentium 100 unter dem Betriebssystem Linux 2.0.29 [Tor96] kompiliert. Desweiteren ist die graphische Benutzeroberfläche X11R6 [Xfr96] erforderlich. Die Fensterprogrammierung erfolgte unter Benutzung der Forms Library [Tao96].

4.1 Datentransfer

Der Datentransfer erfolgt über die serielle Schnittstelle (RS-232) im Ascii-Format mit einer Rate von 115200 Bit/sec, 8 Datenbits, einem Stopbit und negativer Parität. Die so vom Meßgerät erhaltenen Daten werden als Ascii-Dateien mit der Endung „`.stn`“ gespeichert und können nun vom Programm weiter verarbeitet werden.

Die C-Befehle, die vom Meßgerät benutzt werden, um die Ascii-Dateien zu erzeugen, lauten [Geo96]

```
fprintf(in,"%u %12.2lf %12.2lf %s %s %10ld %11ld %11ld %3u %10ld\r
        \n",typ,x_pos,y_pos,zeit,datum,anz,linie,marke,status,pos);
```

für Markenereignisse am Linienanfang (typ= 6),

```
fprintf(in," %u %12.2lf %12.2lf %s %s %10ld %11ld %11ld %3u\r\n ",
        typ,x_pos,y_pos,zeit,datum,anz,linie,marke,status);
```

für sonstige Markenereignisse und Linienendeereignisse (typ= 3) und

```
fprintf(in," %u %10.3lf %10.3lf %s %s %3u ", typ, sensor1,sensor2,
        zeit,datum,status);
```

für Meßwerte (typ= 0).

Hierbei bedeutet

`typ:`	Typ des Ereignisses,	`x_pos:`	Linienposition,
`y_pos:`	Markenposition,	`zeit:`	Uhrzeit der Messung,
`datum:`	Datum der Messung,	`anz:`	Meßwerteanzahl,
`linie:`	Liniennummer,	`marke:`	Markennummer,
`status:`	Meßgerätestatus,	`pos:`	bisherige Markenanzahl,
`sensor1:`	Meßwert des 1. Sensors,	`sensor2:`	Meßwert des 2. Sensors.

Da die vom Meßgerät gelieferten Daten nur den Zeitpunkt der Meßwertaufnahme und der Markensignale enthalten, ist es erforderlich, den Meßwerten Ortskoordinaten zuzuordnen. Dies wird vom Programm durchgeführt. Folgende Angaben zur Markenposition können gemacht werden:

- Angabe der Markenposition für alle Linien gleichzeitig oder für jede Linie einzeln
- Angabe jeder einzelnen Markenposition oder äquidistante Verteilung der Markenpositionen auf einer Linie
- uni- oder bidirektionales Abschreiten der Linien

Sind diese Angaben gemacht worden, erfolgt eine Ausgabe in Dateien der Endungen „`.top`" für die Daten des oberen Sensors, „`.bot`" für die Daten des unteren Sensors und „`.gra`" für die Sensordifferenz. Diese Daten sind bereits nach steigenden x- und y-Koordinaten geordnet, wobei die Linienrichtung mit der y-Achse übereinstimmt. Das Ausgabeformat dieser Dateien lautet:

```
fprintf(out, " %10.2lf %10.2lf %10.3lf \n ", x, y, wert);
```

4.2 Datendarstellung

4.2.1 Graustufenplot

Die Darstellung der Daten erfolgt als Graustufenplot. Dazu teilt man das Intervall zwischen maximalem und minimalem Wert in 127 Teilintervalle ein. Die Zuordnung der Grautöne wird wie folgt berechnet:

$$farbe = \frac{z - zmin}{zmax - zmin} \cdot 127, \qquad \text{mit} \quad z \in [zmin, zmax]. \tag{4.1}$$

Hierbei entsprechen die Werte 0 und 127 den Farben weiß und schwarz. Ein Kästchen des entsprechenden Grautones kann nun an der entsprechenden Bildschirmstelle gezeichnet werden. Die x-Richtung verläuft am Bildschirm dabei von links nach rechts und die y-Richtung, die ja der Linienrichtung entspricht, verläuft von unten nach oben. Auf der rechten Seite neben dem Graustufenplot erscheint eine Legende, der man die Zuordnung *magnetische Flußdichte/nT* $\Longleftrightarrow$ Farbton entnehmen kann.

Optimierung der Grautondarstellung

Die Intervallgrenzen $zmin$ und $zmax$ lassen sich nach Belieben ändern, so daß man dadurch das Bild auf den optischen Eindruck optimieren kann. Es besteht die Möglichkeit, ein Fenster einstellbarer Breite durch den Datensatz zu schieben. Fensterbreite und Startpunkt sind frei wählbar. Der Startpunkt entpricht $zmin$, die Fensterbreite entspricht $zmax - zmin$. Alle Werte, die oberhalb bzw. unterhalb der so festgelegten Grenzen liegen, werden schwarz bzw. weiß dargestellt. Innerhalb dieses Fensters erfolgt die Darstellung in Grautönen. Das Fenster läßt sich nun per Knopfdruck mit einer einstellbaren Schrittweite durch den Datensatz schieben. Dabei kann man die Änderung der Grautöne beobachten, bis man mit dem optischen Eindruck zufrieden ist.

Hervorhebung von Anomalien

Eine weitere Möglichkeit, Strukturen sichtbar zu machen, ist die Einfärbung gewisser Bereiche in Rot. Dies geschieht durch die Angabe des Startwertes und der Größe des einzufärbenden Bereiches. Die Angaben erfolgen in Farbstufen, werden aber in nT umgerechnet und in beiden Einheiten auf dem Bildschirm angezeigt. Die Änderung der Darstellung erfolgt direkt nach Eingabe der verschiedenen Werte, so daß auch hier eine unmittelbare Optimierung möglich ist.

Positionsbestimmung

Die Bestimmung der Position einer Anomalie kann direkt am Graustufenplot vorgenommen werden. Dazu läßt sich durch einen Schalter die Programmfunktion „*Positionskreuz*“ aktivieren. Klickt man, nachdem diese Funktion aktiviert wurde, auf einen Bildpunkt im Graustufenplot, so erscheinen in einem dafür vorgesehen Feld die Koordinaten dieses Punktes in m. Dadurch läßt sich ein umständliches Durchforsten der Datensätze vermeiden, und man kann den gewünschten Punkt sehr leicht im Gelände wiederfinden. Diese Positionskreuze finden ebenfalls bei der Festlegung der Querschnitte (4.2.2) und der Korrektur der Positionsfehler (4.3.1) Anwendung.

4.2.2 Querschnittsprofil

Zur besseren Beurteilung des Verlaufs einer Anomalie ist es häufig nützlich, ein Profil dieser Anomalie zu betrachten. Desweiteren können diese Daten direkt zur theoretischen Störkörperberechnung benutzt werden bzw. mit dieser verglichen werden. Wählt man diese Funktion an, so berechnet das Programm das Querschnittsprofil zwischen den beiden letzten Positionskreuzen. Auf der durch diese beiden Punkte gebildeten Strecke kann eine frei wählbare Anzahl von Zwischenpunkten berechnet werden. Die diskrete Geradengleichung mit Punktezahl N, dem Anfangspunkt $\vec{a}$ und dem Endpunkt $\vec{b}$ lautet

$$\vec{g}(n) = \vec{a} + \frac{n}{N-1}(\vec{b} - \vec{a}), \qquad \text{mit} \quad n \in [0, N-1] \subset \mathcal{N}. \tag{4.2}$$

Für diese Punkte wird nun die *magnetische Flußdichte* $B(\vec{g}(n))$ aus den benachbarten Punkten approximiert. Dies geschieht nach folgendem Prinzip: Die Ebene wird in acht Segmente gleicher Größe geteilt, und aus jedem Segment wird der am nächsten gelegene Punkt ausgewählt. Sei $\vec{g}$ ein Punkt der diskreten Geradengleichung und $\vec{c}$ ein Punkt, der als benachbarter Punkt in Frage kommt, so prüft man erst, in welchem Segment er liegt. Dies ist eindeutig durch den Winkel

$$\angle(\vec{c}, \vec{g}) = \arctan\left(\frac{c_x - g_x}{c_y - g_y}\right) \tag{4.3}$$

bestimmt. Ist der Abstand des Punktes $\vec{c}$ vom Punkt $\vec{g}$

$$\|\vec{c} - \vec{g}\| = \sqrt{(c_x - g_x)^2 + (c_y - g_y)^2} \tag{4.4}$$

der kleinste in diesem Segment, so wird er für die Approximation von $B(\vec{g})$ ausgewählt. Die *magnetischen Flußdichten* der so erhaltenen acht Punkte werden mit dem reziproken Abstandsquadrat zu $\vec{g}$ gewichtet, gemittelt und als Approximation $B(\vec{g})$ für die *magnetische Flußdichte* am Punkt $\vec{g}$ benutzt:

$$B(\vec{g}) = \left(\sum_{i=1}^{8} \frac{1}{\|\vec{c}_i - \vec{g}\|^2}\right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{8} \frac{1}{\|\vec{c}_i - \vec{g}\|^2} B(\vec{c}_i) \tag{4.5}$$

Hierbei entsprechen die Punkte $\vec{c}_i$ den $\vec{g}$ am nächsten gelegenen Punkten in den jeweiligen Segmenten. So verfährt man für jeden Punkt $\vec{g}(n)$, $n \in [0, N-1] \subset \mathcal{N}$ der Gerade, und man erhält das Querschnittsprofil zwischen den Punkten $\vec{a}$ und $\vec{b}$.

4.3 Datenbearbeitung

4.3.1 Korrektur der Positionierungsfehler

Die Aufnahme der Meßwerte erfolgt in der Bewegung. Da der Meßvorgang eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, entspricht die Position, die dem Meßwert zugeordnet wird, nicht der tatsächlichen Position des Meßwertes. Es treten Bewegungsartefakte auf, die einer Korrektur bedürfen. Geht man die Linien immer in der selben Richtung ab, so ergibt sich ein Versatz der Positionen der Meßwerte in Laufrichtung. Dieser ist umso größer, je größer die Geschwindigkeit ist. Die Meßwerte sind fälschlicherweise zu höheren y-Werten hin verschoben. Mißt man bidirektional, so ergibt sich das typische Reißverschlußmuster, das vom Wechsel der Laufrichtung hervorgerufen wird. Diese Fehler müssen korrigiert werden, um ein naturgetreues Abbild der lokalen magnetischen Flußdichte zu erhalten.

In Abbildung 4.2 sieht man eine unkorrigierte Testmessung. Die Linien wurden in Nord-Süd-Richtung gelegt und sind 7 m lang. Die x-Koordinaten in Abbildung 4.4 spielen keine Rolle, da ein und dieselbe Linie mehrmals bidirektional mit dem Meßwagen abgefahren wurde. Das Meßintervall betrug 0.1 sec, die Geschwindigkeit betrug $(0.6 \pm 0.1)\frac{m}{sec}$. Dies wurde aus den ursprünglichen Daten ermittelt, die die Zeitpunkte der Markenereignisse enthalten. Deutlich zeigt sich das typische Reißverschlußmuster. Die durchschnittliche Verschiebung beträgt $\Delta y = (0.42 \pm 0.01)\ m$. Sie kann aus den unkorrigierten Meßwerten ermittelt werden, indem man mit Hilfe der Positionskreuze die Koordinaten der Anomalien bestimmt und dann die Differenz der auseinandergerissenen Lineamente ermittelt. Da der Wagen nach Erreichen des Linienendes nicht gedreht wurde, sondern rüchwärts zurückgezogen wurde, um

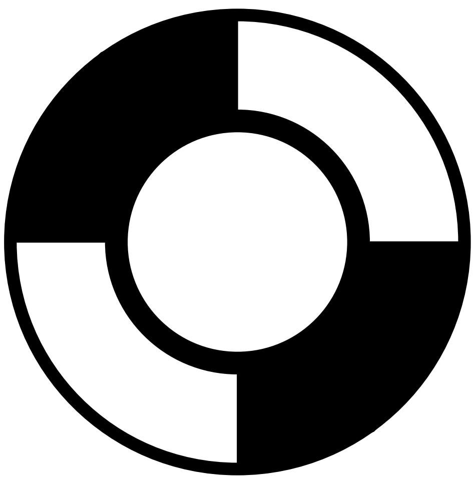


Abbildung 4.1: Unterbrecher im Maßstab 1:1

den bereits in Abschnitt 3.1.4 angesprochenen Heading Error zu vermeiden, ist ein Teil dieses Positionierungsfehlers auf die Geometrie des Unterbrechers des optoelektronischen Impulsgebers zurückzuführen. Wie man in Abbildung 4.1 sehen kann, verschiebt sich die Positionierung um 1/4 des Radumfanges, wenn der Wagen nicht gedreht, sondern einfach zurückgezogen wird. Bei einem Radumfang von 1.42 m entspricht dies einem zusätzlichen Positionierungsfehler von 0.355 m. Der Effekt, der auf die Meßdauer des Gerätes zurückzuführen ist, beträgt hier also $(6.5 \pm 1)cm$. Die Messung wurde mit einem Meßintervall von 0.2 sec wiederholt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit betrug ebenfalls $(0.6 \pm 0.1)\frac{m}{sec}$. Es wurde ein Positionierungsfehler von $(0.49 \pm 0.01)m$ festgestellt. Der Effekt des Meßgerätes auf den Positionierungsfehler beträgt nun folglich 13.5 cm. Es zeigt sich also, daß sich die Verschiebung mit doppeltem Meßintervall bei gleichbleibender Geschwindigkeit ebenfalls verdoppelt. Da jede Linienrichtung die Hälfte zum Positionierungsfehler beiträgt, ergeben sich bei einem Meßintervall von 0.1 sec eine Meßdauer von $(0.05 \pm 0.01)sec$ und bei einem

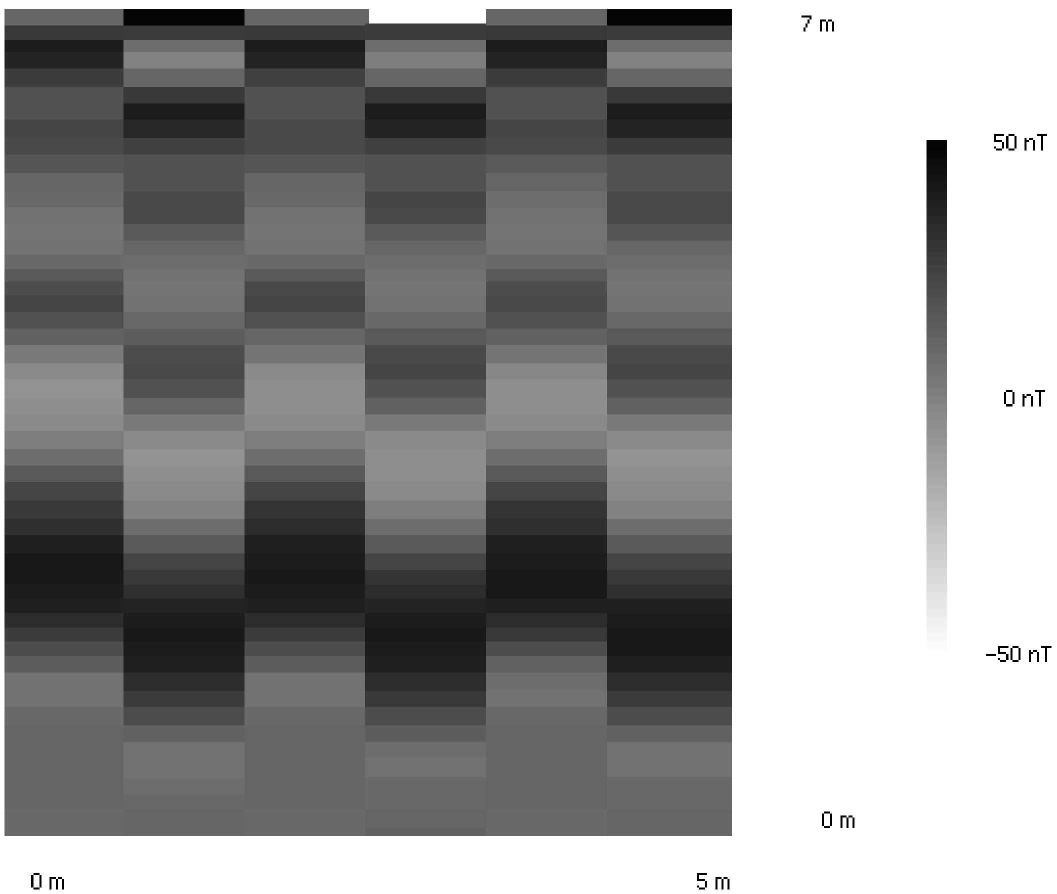


Abbildung 4.2: Positionierungsfehler des Meßgeräts bei bidirektionaler Messung

Meßintervall von 0.2 *sec* eine Meßdauer von $(0.11 \pm 0.02) sec$. Man kann also davon ausgehen, daß die Meßdauer jeweils der Hälfte des Meßintervalls entspricht. Die Korrektur des Positionierungsfehlers der Größe Δy erfolgt, indem auf der Hinrichtung $\frac{\Delta y}{2}$ von y subtrahiert und auf der Rückrichtung der gleiche Betrag addiert wird. Abbildung 4.3 zeigt dieselbe Messung, jedoch nach der Korrektur durch XMAGCAL. Man kann sehr gut erkennen, daß eine Korrektur notwendig ist und den optischen Eindruck stark verbessert. Trotzdem ist im unteren Teil der Abbildung noch eine kleine Abweichung vorhanden. Diese kann durch Geschwindigkeitsveränderungen erklärt werden, da sich an dieser Stelle eine Erhebung befindet, die den Meßwagen langsamer werden läßt.

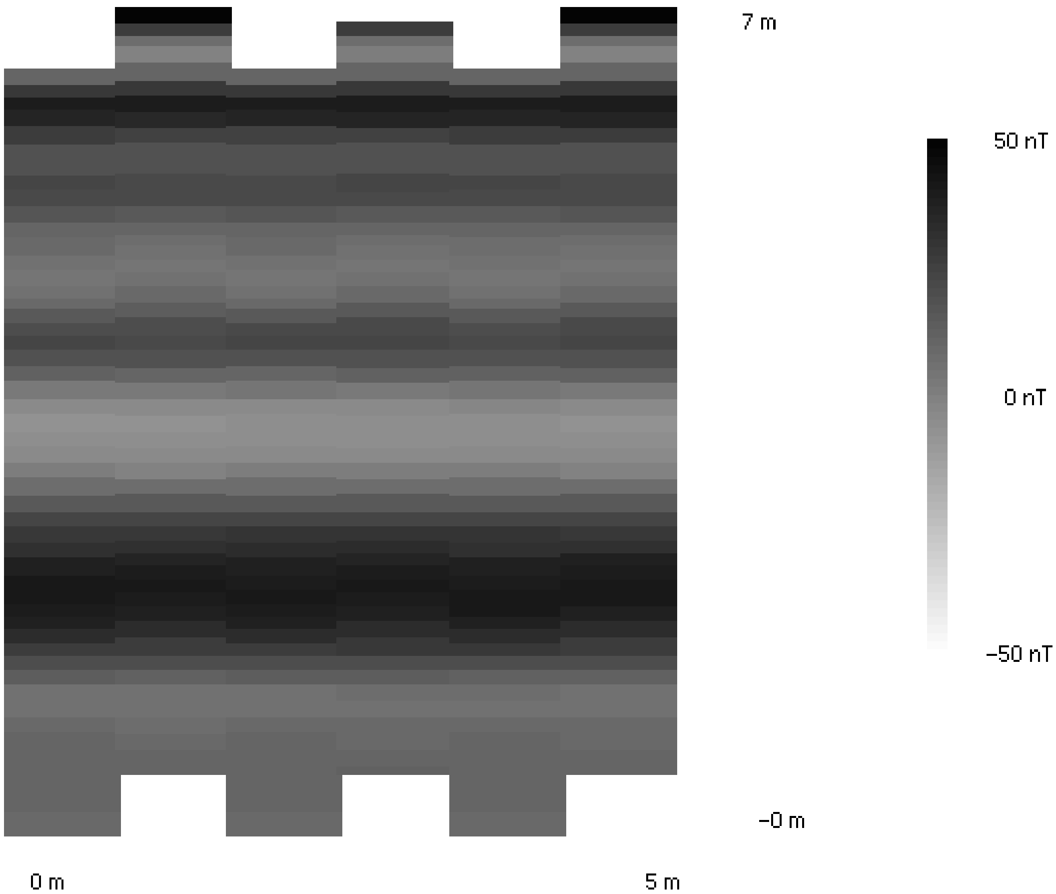


Abbildung 4.3: Meßwerte nach der Korrektur des Positionierungsfehlers

4.3.2 Korrektur des Heading Errors

Die Entstehung des Heading Errors wurde bereits in Abschnitt 3.1.4 erläutert. Die Größenordnung dieses Fehlers liegt im Bereich um 1 nT. Er hängt von der Größe des Magnetfeldes ab und müßte daher durch Multiplikation mit einem Faktor korrigiert werden. Da sich jedoch die einzelnen Faktoren in unserem Meßbereich um weniger als die Meßgenauigkeit in Gradiometeranordnung unterscheiden, erfolgt die Korrektur additiv. Um diesen Fehler zu demonstrieren, wurde eine Testmessung durchgeführt (Abb. 4.4). Hierbei wurden die Linien in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet und eine

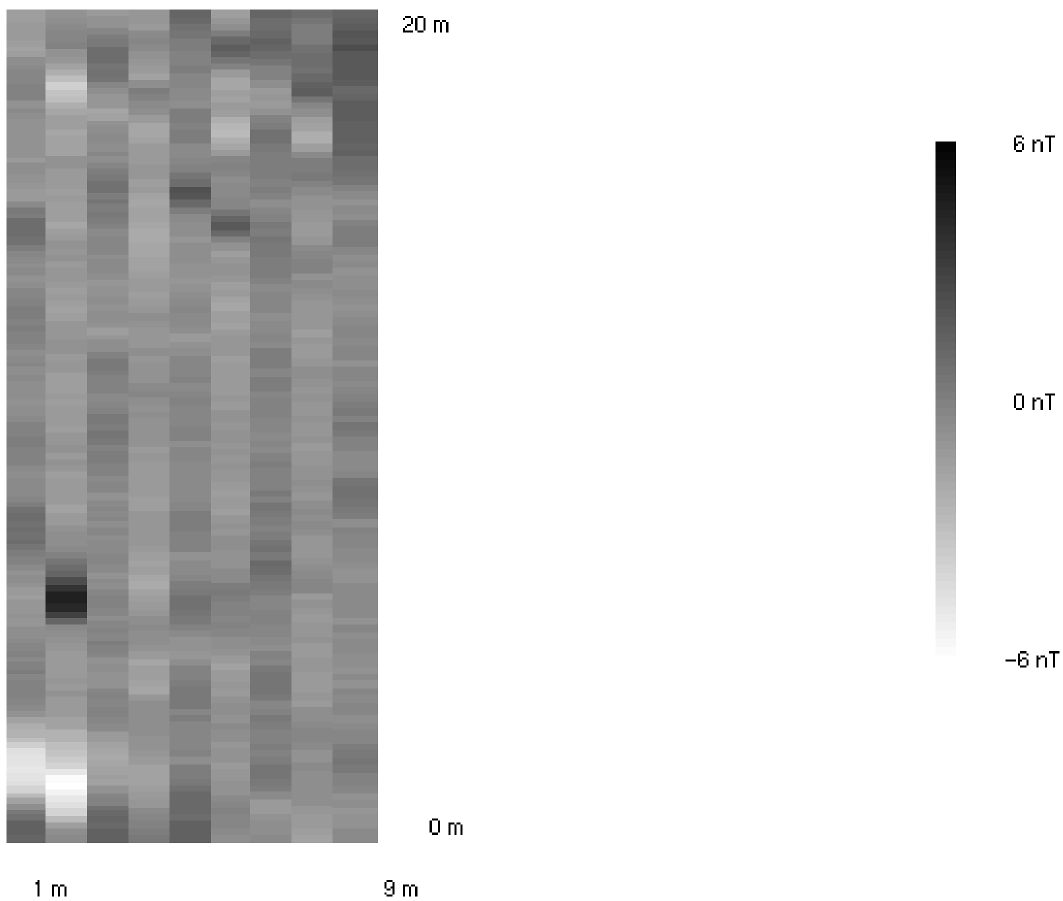


Abbildung 4.4: Heading Error

Linienlänge von 20 m gewählt. Es wurden 9 Linien im Abstand von 1 m vermessen. In einem ersten Schritt kann man sich die Histogramme der Hin- und Rückrichtungen getrennt ansehen (Abb. 4.5). Hier stellt man meist eine Verschiebung der Histogrammschwerpunkte fest. Nun wählt man sich ein geeignetes Intervall, das nur den magnetischen Untergrund und keine Anomalien enthält. Für dieses Intervall läßt man sich die Mittelwerte der einzelnen Linien berechnen (Abb. 4.6) und kann dann anhand dieser Daten entscheiden, um welchen Betrag die Linien korrigiert werden sollen. Die durchschnittliche Differenz zwischen den beiden Linienrichtungen beträgt hier $\Delta z = 0.76\ nT$.

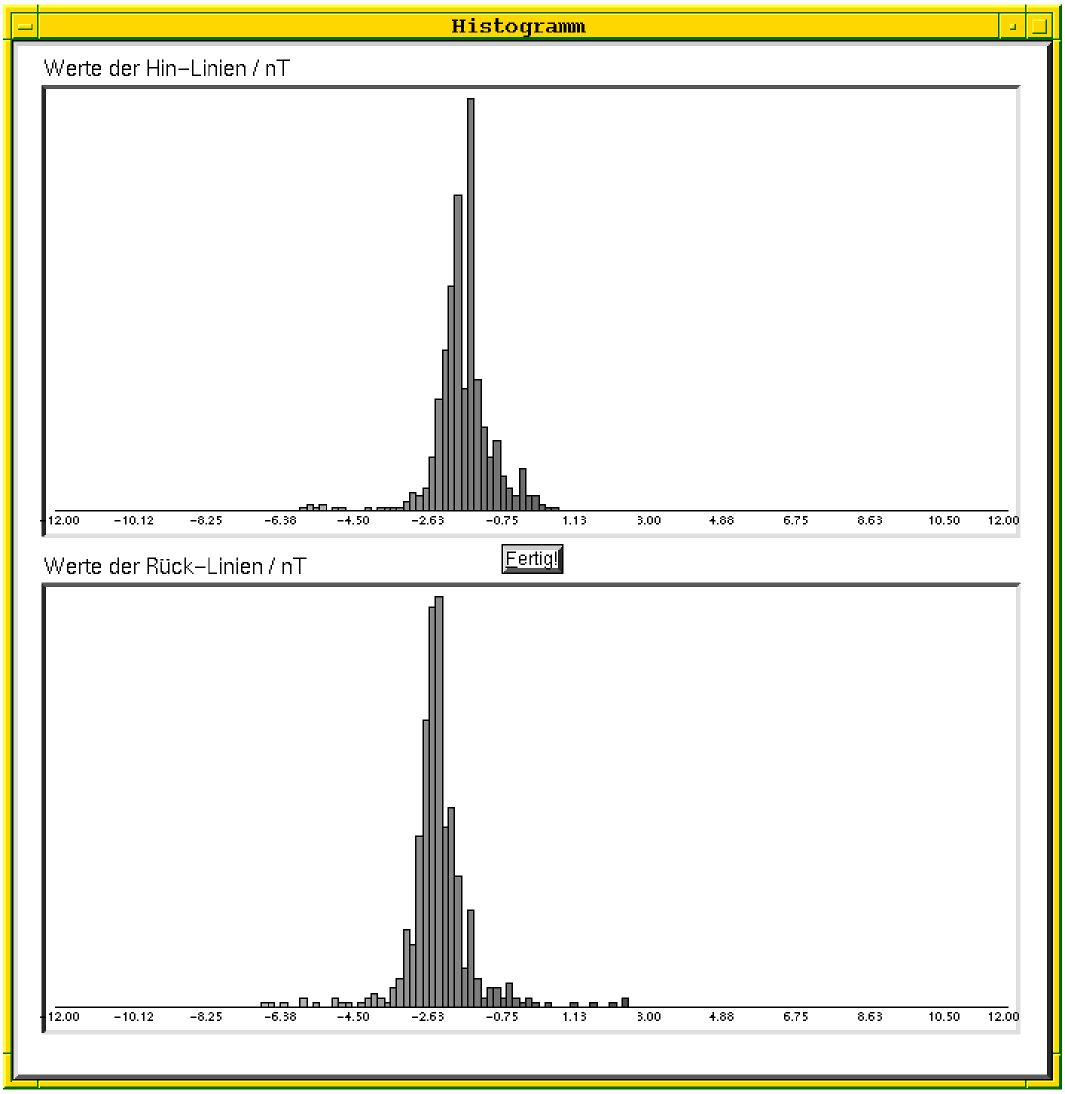


Abbildung 4.5: Histogrammdarstellung der unkorrigierten Meßwerte

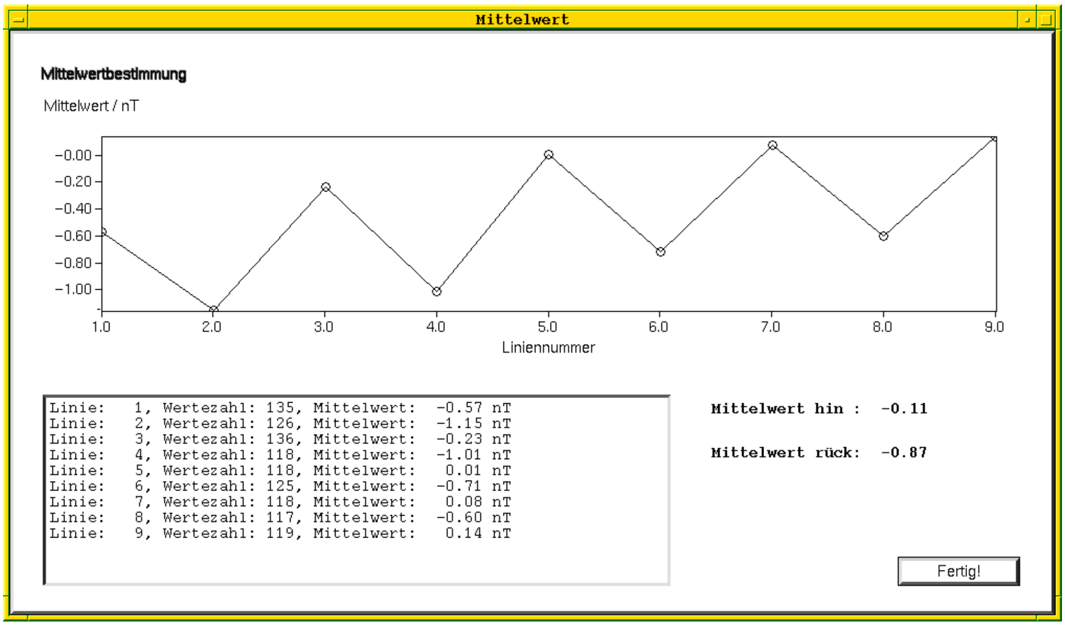


Abbildung 4.6: Mittelwertdarstellung der unkorrigierten Meßwerte

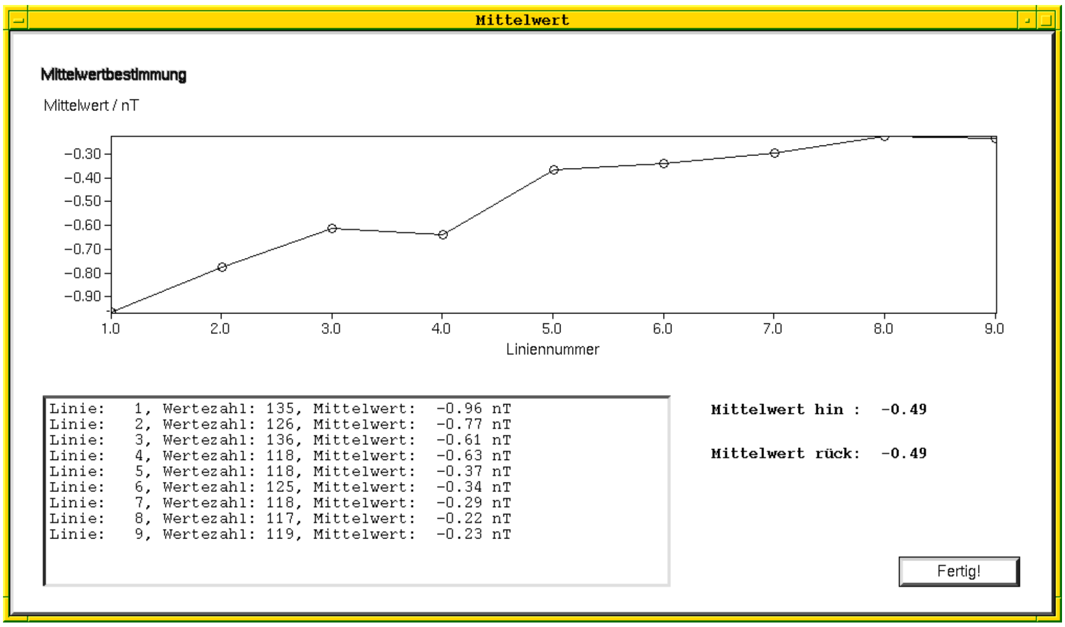


Abbildung 4.7: Mittelwertdarstellung der korrigierten Meßwerte

In diesem Beispiel erkennt man sehr schön die Unterschiede in den Mittelwerten. Es ist aber auch eine steigende Tendenz im Magnetfeld von Linie zu Linie zu beobachten. Dieser lokale Gradient läßt sich auf ein Haus zurückführen, das sich etwa 10 m westlich dieses Testfeldes befindet. Von den Meßwerten der Linien der Hinrichtung wird $\frac{\Delta z}{2}$ subtrahiert, zu den Meßwerten der Rückrichtung wird der gleiche Betrag addiert, so daß die Niveaus der Linien aneinander angepaßt wurden. Trennt man die Datensätze, so kann man diese Anpassung natürlich auch für Teilbereiche bis hin zu einzelnen Linien vornehmen. Dies ist z.B. sinnvoll, wenn sich während der Messung ein Sensor leicht verstellt hat. Schaut man sich erneut die Linienmit-

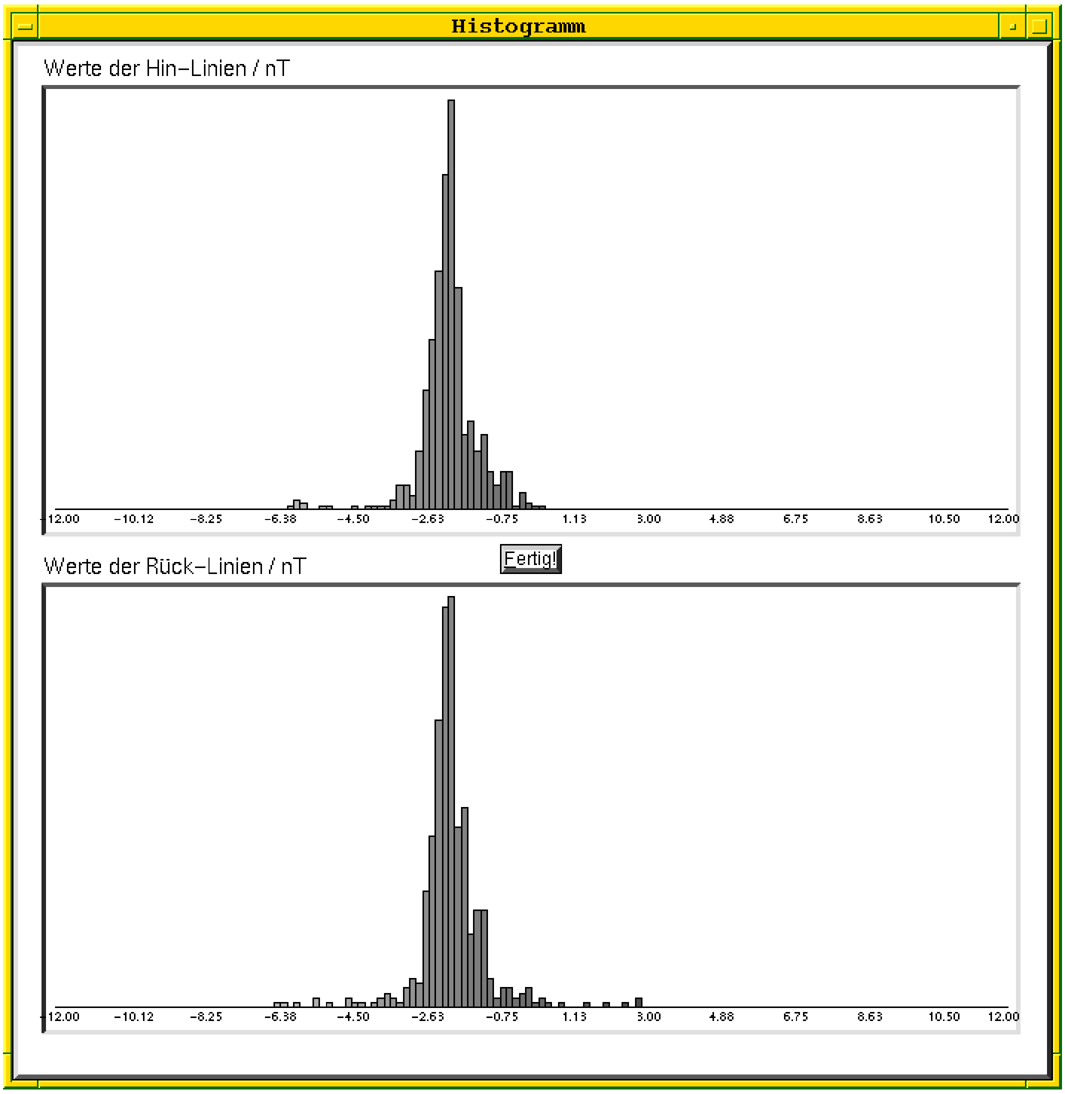


Abbildung 4.8: Histogrammdarstellung der korrigierten Meßwerte

telwerte (Abbildung 4.7) und das Histogramm (Abbildung 4.8) an, so erkennt man an diesen Werten, daß die Korrektur erfolgreich war. Die Linien wurden einander angepaßt. Optisch wird dies in Abbildung 4.9 deutlich. Die Helligkeitsunterschiede zwischen benachbarten Linien sind verschwunden. Der Positionierungsfehler wurde bereits vorher korrigiert, um den Einfluß des Heading Errors besser zu erkennen. Jetzt sind die zahlreichen kleinen Anomalien gut zu erkennen, die höchstwahrscheinlich auf den basaltsteinhaltigen Boden des Testfeldes in Vettelschoß bei Linz am Rhein zurückzuführen sind.

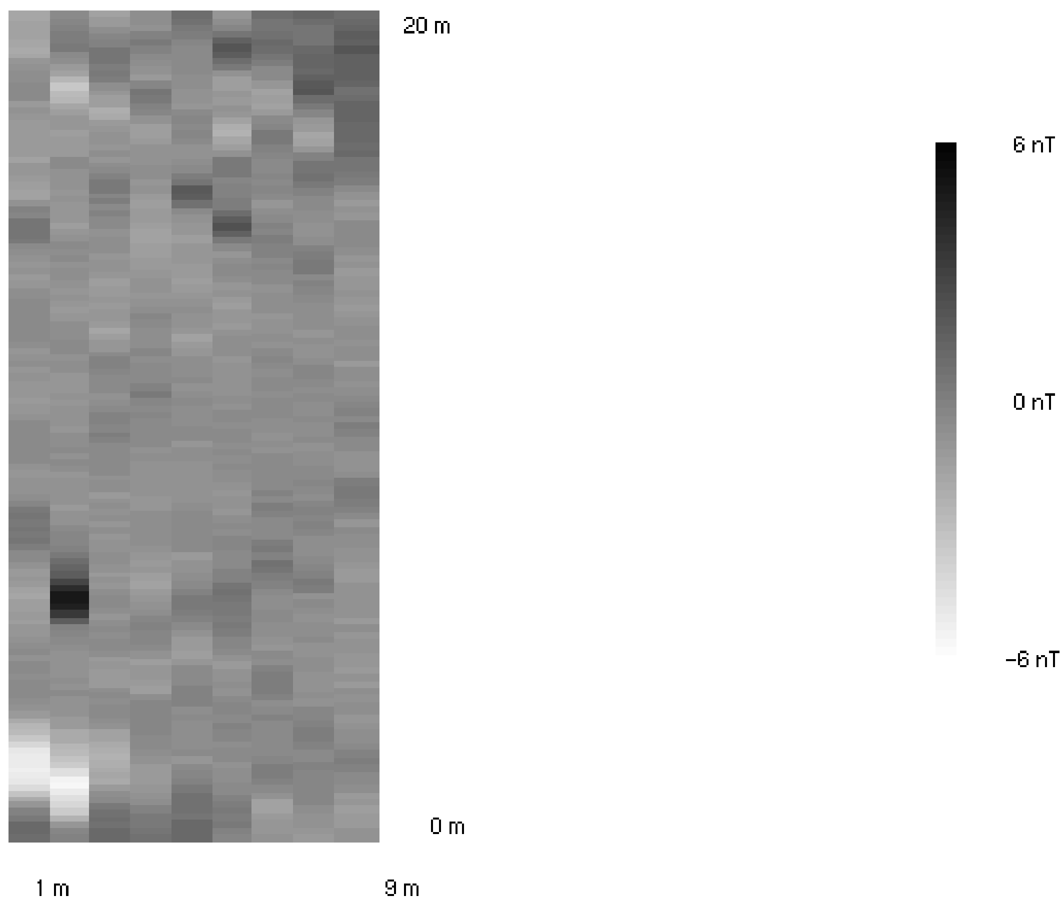


Abbildung 4.9: Meßwerte nach der Korrektur des Heading Errors

4.3.3 Weitere Datenmanipulationen

Offset

Prospektiert man ein großes Feld an mehreren Tagen, kann es zu einem allgemeinen Offset im Gradienten der magnetischen Flußdichte kommen. Die Gründe hierfür wurden bereits in Abschnitt 3.1.3 erläutert. Möchte man diese Daten im selben Graustufenplot darstellen, so unterscheiden sich die verschiedenen Messung in ihrer Helligkeit, so daß eine Anpassung vorgenommen werden muß. Hierzu addiert das Programm zu den Meßwerten den angegebenen Betrag hinzu, und man kann so die Niveaus der einzelnen Messungen aneinander angleichen.

Multiplikation

XMAGCAL berechnet den Gradienten immer mit einem Sensorabstand von 1 m. Hat man nun aber einen anderen Sensorabstand gewählt, so ist man mit dieser Funktion des Programms in der Lage, die Daten mit einem Faktor zu multiplizieren, um den Gradienten exakt wiederzugeben. Mißt man beispielsweise mit einem Abstand von 2 m, so multipliziert man den gesamten Datensatz mit 0.5, und hat den Gradienten korrekt in nT/m angegeben. Desweiteren kann es vorkommen, daß die Anschlüsse des oberen und des unteren Sensors am Meßgerät vertauscht werden. Dies kann man korrigieren, indem man den Datensatz später mit -1 multipliziert. Somit erhält man die korrekte Darstellung von positiven und negativen Gradienten.

Kapitel 5

Archäomagnetische Prospektionen

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Diplomarbeit vom Verfasser selbst durchgeführten magnetischen Prospektionen vorgestellt. Es handelt sich hierbei um eine erste Testmessung in Mechernich/Eifel, die noch ohne Meßwagen durchgeführt wurde, da sich dieser zum damaligen Zeitpunkt noch im Bau befand und um eine zweite Messung, bei der der Wagen und die Elektronik erfolgreich getestet wurden. Diese zweite Messung fand in Mechernich-Obergartzem auf dem Gebiet einer ehemaligen Villa Rustica statt. Im Anhang C findet man eine Gegenüberstellung zwischen unkorrigierten und durch das Programmpaket XMAGCAL korrigierten Daten, so daß an dieser Stelle nur die Meßdaten als Graustufenplot abgebildet werden, deren Positionierungsfehler und Heading Error bereits korrigiert wurden.

5.1 Prospektion in Mechernich

5.1.1 Meßgebiet

Die erste Prospektion, die als Testmessung zu verstehen ist, wurde im Februar diesen Jahres in Mechernich/Eifel durchgeführt. Ihr ging zunächst eine archäologische Prospektion der WIBA[1] e.V. im Auftrag der Stadt Mechernich voraus. Diese Prospektion wurde vom Rheinischen Landesamt für Denkmalpflege angeordnet, da die Stadt Mechernich plant, hier ein Gewerbegebiet entstehen zu lassen. Aufgrund eines Luftbildes besteht der Verdacht, daß sich auf einem Teilgebiet des geplanten Gewerbegebietes eine kreisförmige Grabenanlage befindet. Sie wird innerhalb des Kreises in Abbildung 5.1 vermutet. Das Meßgebiet ist als schwarzes Feld dargestellt.

[1] Wissenschaftliche Baugrundarchäologie

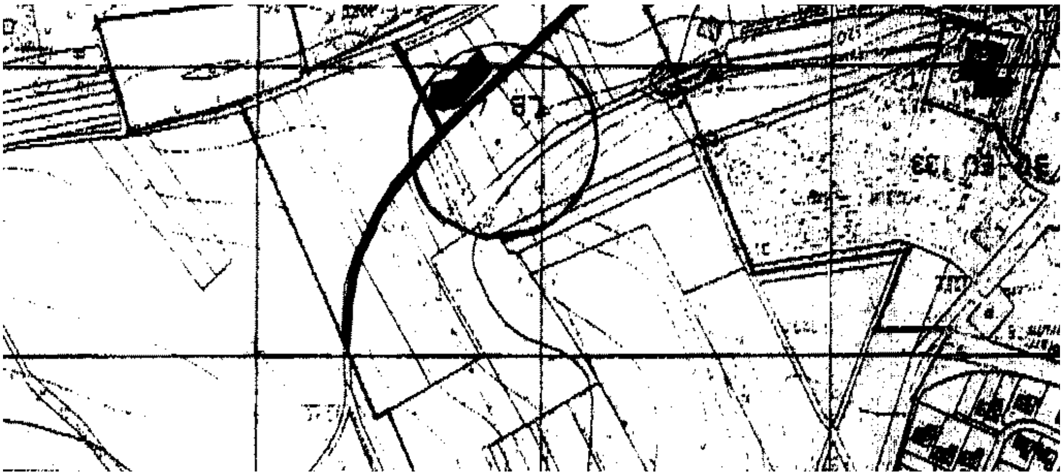


Abbildung 5.1: Lage des Meßgebietes in Mechernich. Süden befindet sich oben. Die Kantenlänge der eingezeichnet Planquadrate beträgt jeweils 200 m. Das Meßgebiet befindet sich schwarz markiert im Kreis.

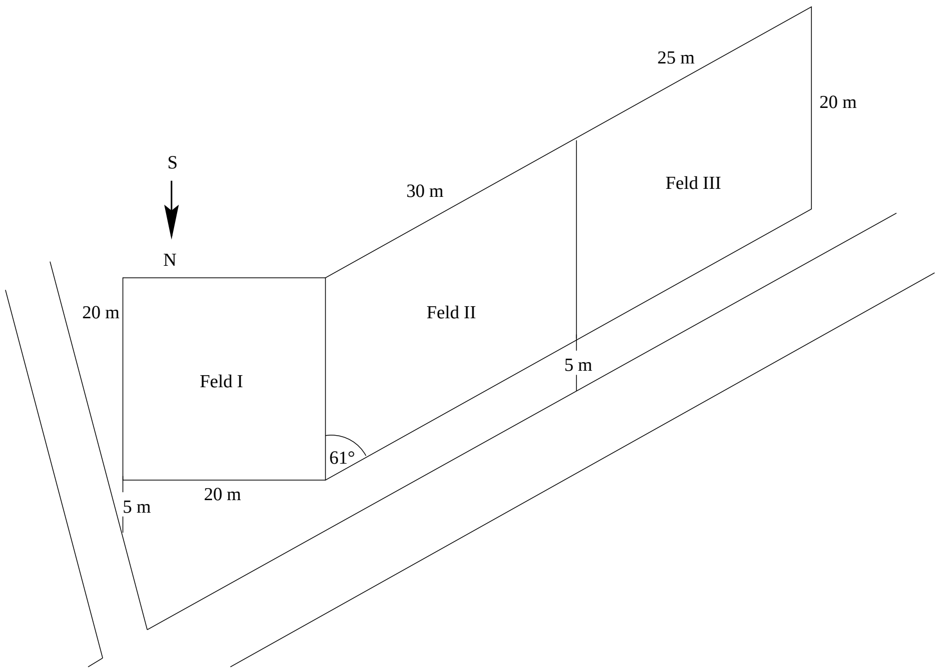


Abbildung 5.2: Meßfelder in Mechernich. Die Linienabstände auf Feld I betrugen 0.5 m. Auf den Feldern II und III betrugen sie 0.7 m. Die Profile wurden bidirektional beginnend mit der Nord-Süd-Richtung abgegangen.

Da die Lage der Grabenanlage nur ungefähr bekannt ist und es sich um eine erste Testmessung handelte, wurde das Meßgebiet nach den Gesichtspunkten der guten Zugänglichkeit und Prospektierbarkeit ausgewählt. Insgesamt wurden drei Meßfelder angelegt, deren Profile allesamt in Nord-Süd-Richtung verlaufen.

Das erste Testfeld ist quadratisch und hat eine Kantenlänge von 20 m. Die Testfelder II und III sind Parallelogramme, deren Grundseiten 30 m bzw. 20 m lang sind. Die Höhe der Parallelogramme beträgt jeweils 17.5 m, die Profillängen betragen 20 m. Für das erste Feld wurde ein Profilabstand von 0.5 m gewählt, bei den beiden anderen Feldern liegen die Profile 0.7 m auseinander. Abbildung 5.2 zeigt die Lage der Meßfelder. Hierbei ist zu beachten, daß sich bei dieser Abbildung Süden oben befindet. Die Meßfelder wurden zusätzlich in die Karte 5.1 eingezeichnet. Das Meßgelände besteht aus einer ebenen Wiese, die gut begehbar ist. Topographische Geländegegebenheiten müssen hier also nicht berücksichtigt werden.

5.1.2 Durchführung der Messung

Die Messungen wurden auf allen Feldern mit einem Meßintervall von 0.1 sec durchgeführt. Der Abstand des unteren Sensors zum Boden betrug 0.3 m. Der vertikale Abstand der Sensoren wurde auf 1 m eingestellt. Hierbei ist zu beachten, daß durch das Tragen des Magnetometers und die damit verbundenen Bewegungen ein Fehler in der Bodenhöhe entsteht, der größenordnungsmäßig mit $\Delta h = \pm 0.1\ m$ abgeschätzt werden kann.

Jede Linie wurde durch ein Maßband aus Kunststoff gekennzeichnet. Die Positionierung der Meßwerte erfolgte durch Betätigen des Markenknopfes während des Vermessens nach jeweils einer Schrittlänge. Diese sehr ungenaue Positionierung hat große Fehler zur Folge. Sie können je nach Schrittgeschwindigkeit und Schrittlänge bis zu 0.5 m betragen. Da es sich hierbei aber um eine Testmessung zur Überprüfung des Gerätes handelte, wurden diese in Kauf genommen. Dennoch wurden später die Positionierungsfehler, die durch das Messen in Bewegung entstehen, korrigiert.

Ein weiterer Fehler entsteht durch seitliche Abweichungen beim Vermessen der einzelnen Profile, da es fast nicht möglich ist, genau geradeaus zu laufen. Dieser Fehler muß aber toleriert werden, da ein diskretes Vermessen eines Profils viel mehr Zeit in Anspruch nehmen würde, als die von uns verwendete Methode. Diese Abweichungen betragen aber selten mehr als 0.15 m nach links und nach rechts. Sie werden nicht korrigiert, da sie schwer erfaßbar sind.

Feld I

Die Meßwerte auf dem ersten Feld schwanken zwischen $-83\ nT$ und $17\ nT$. Um auch kleinere Strukturen erkennen zu können und die Helligkeit des Bildes anzuheben, wurde zur Darstellung von Feld I (Abbildung 5.3) ein Intervall von $-17\ nT$ bis $17\ nT$ gewählt. Im oberen Teil des Plots ist eine relativ große negative Anomalie zu erkennen. Sie hat einen Durchmesser von ca. $2\ m$ und ihr Minimum beträgt $-83\ nT$. Neben weiteren kleineren Anomalien sind in dieser Darstellung sonst keine Strukturen zu erkennen. Insbesondere können keine Anomalien ausgemacht werden, die auf eine Grabenstruktur hinweisen.

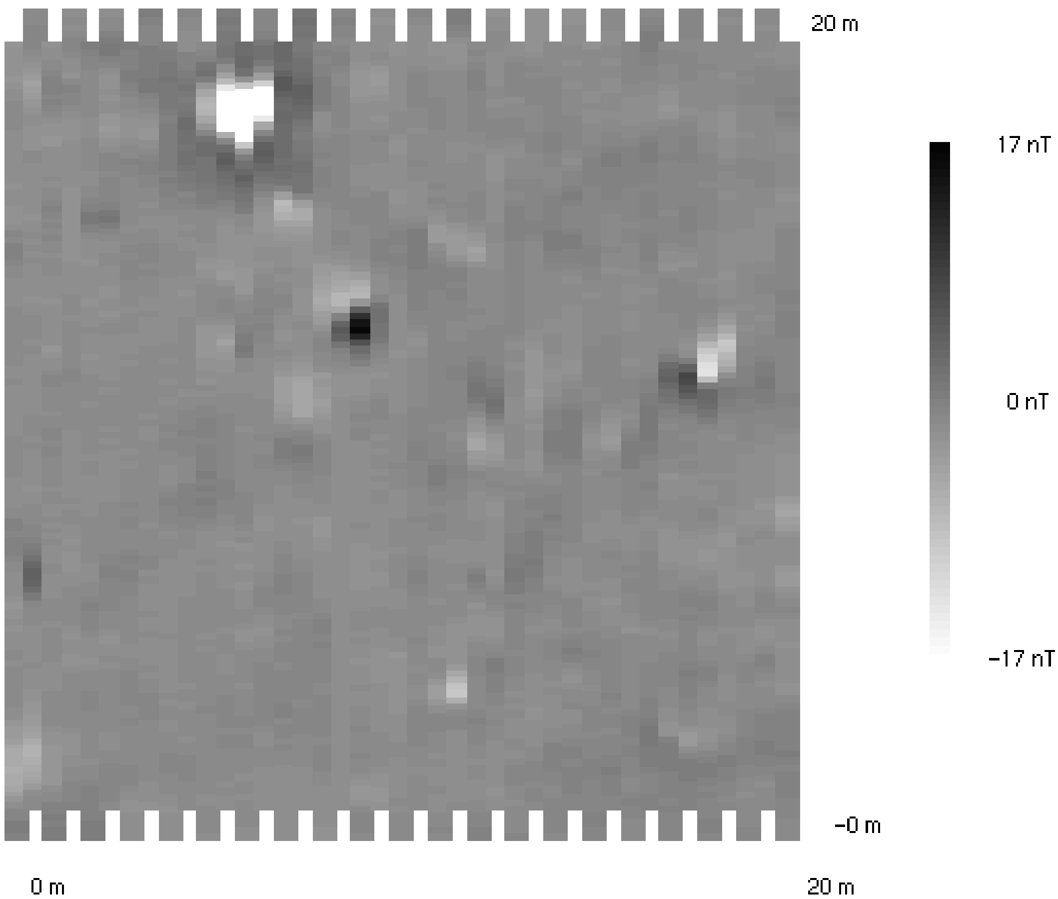


Abbildung 5.3: Korrigierte Daten des ersten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-17\ nT$ bis $17\ nT$

Feld II

Feld II wurde nach dem selben Prinzip wie Feld I vermessen. Abbildung 5.4 zeigt die korrigierten Daten. Die größere Anomalie im rechten unteren Teil des Graustufenplots ist auf einen Eisen-Hering zurückzuführen, der bei der Vermessung des Gebietes zur Befestigung des Maßbandes benutzt wurde. Er diente als Testbeispiel einer bewußt eingebrachten Fe-Störung. Auch in diesem Feld können keine Grabenstrukturen ausgemacht werden.

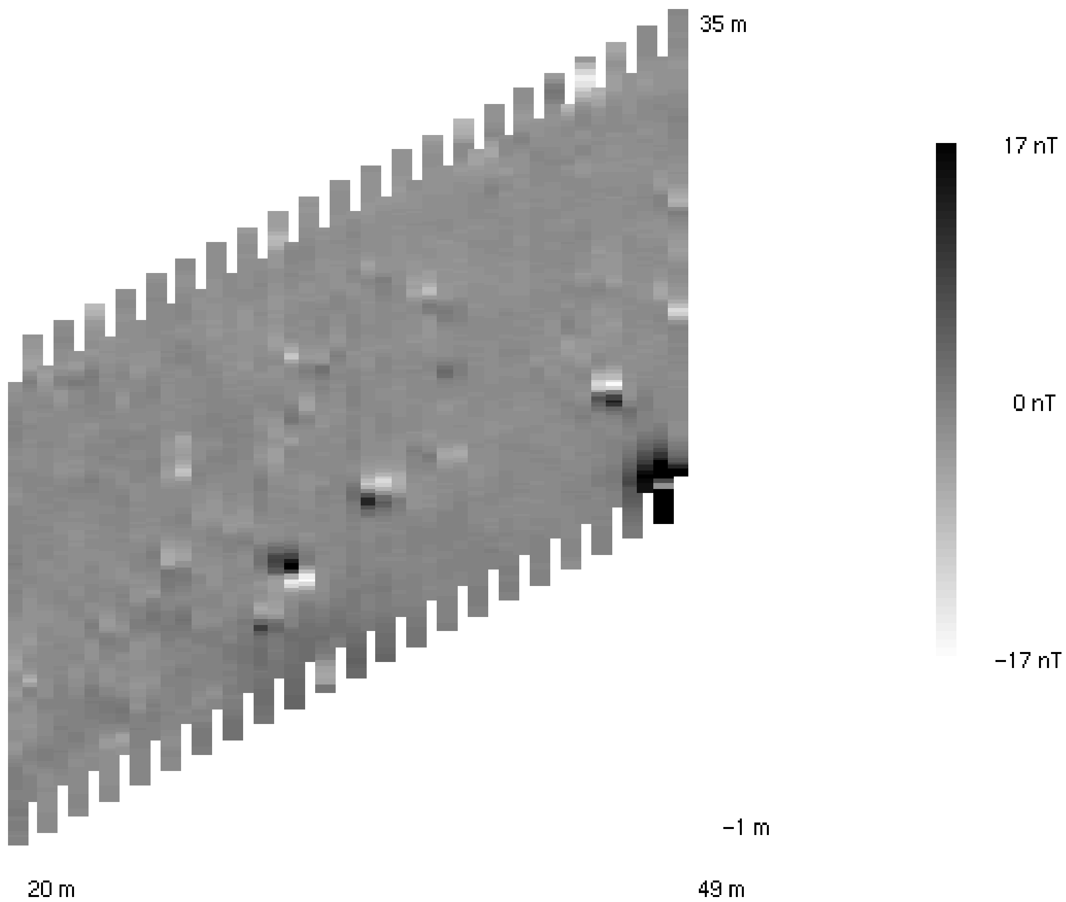


Abbildung 5.4: Korrigierte Daten des zweiten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-17\ nT$ bis $17\ nT$

Feld III

Die Anomalien des dritten Meßfeldes liegen in einem Bereich von $-1212\ nT$ bis $1322\ nT$. In diesem Intervall erfolgt auch die Darstellung als Graustufenplot (Abbildung 5.5). Die relativ großen Positionierungsfehler dieses Feldes rühren daher, daß die Markenpositionen in Bezug auf den Körper des Vermessers und nicht in Bezug auf die Sensorpositionen gesetzt wurden. Da sich die Sensoren in einem Abstand von $1\ m$ zum Körper befinden, resultiert ein zusätzlicher Positionierungsfehler von $2\ m$. In der unteren Bildhälfte erkennt man eine Struktur, die nur von einem Gegenstand sehr großer remanenter Magnetisierung hervorgerufen werden kann. Hierfür sprechen zum einen die Größe der Anomalie und zum anderen die Form und Ausrichtung der Anomalie. Für diese Anomalie wird in Abschnitt 6.2.1 ein theoretischer Störkörper modelliert.

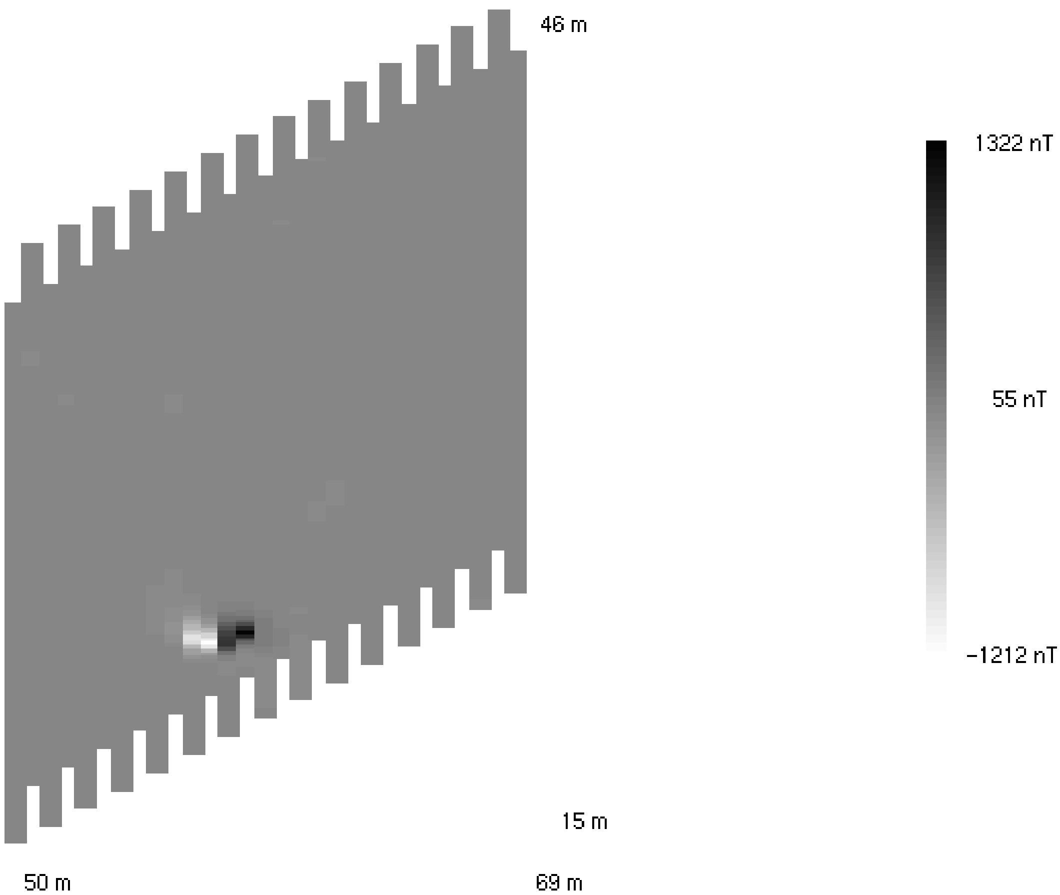


Abbildung 5.5: Korrigierte Daten des dritten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-1212\ nT$ bis $1322\ nT$

5.2 Prospektion in Obergartzem

5.2.1 Meßgebiet

Im Juni diesen Jahres fand eine magnetische Prospektion in Mechernich-Obergartzem statt. Auch auf diesem Prospektionsgebiet soll ein Gewerbegebiet entstehen. Abbildung 5.6 zeigt dieses Gebiet. Die hierfür erforderliche archäologische Prospektion wurde ebenfalls von der WIBA e.V. durchgeführt [WiB97]. Bei dieser Prospektion kam zum ersten Mal der selbstgebaute Meßwagen zum Einsatz. Ein zuerst geplanter Test des Meßwagens auf den Feldern I, II und III in Mechernich zwecks Vergleich zwischen einer Vermessung „per Hand“ und einer mit einem Wagen durchgeführten Prospektion konnte leider nicht durchgeführt werden, da zu diesem Zeitpunkt der Bewuchs auf diesen Feldern für eine Prospektion bereits zu hoch war. Auch konnte nicht damit gerechnet werden, daß dieses Feld noch einmal gemäht werden würde, da die Bauarbeiten in diesem Gebiet bereits in vollem Gange waren. So nahm man das Angebot der WIBA e.V. dankend an, eine Prospektion in Obergartzem auf dem Gebiet einer ehemaligen Villa Rustica durchzuführen. Das Hauptgebäude dieser Villa befand sich auf einem angrenzenden Grundstück. Hier gilt es, die Frage zu klären, ob sich auf dem zu prospektierenden Gebiet weitere Neben- und Wirtschaftsgebäude dieser Villa Rustica befanden. Die Prospektion wurde hierbei auf ein Gebiet konzen-

Abbildung 5.6: Meßgebiet in Obergartzem

triert, das sich durch eine große Anzahl von römischen Scherbenfunden auszeichnet. Den Hauptteil an diesen Funden bilden römische Dachziegel. Abbildung 5.7 zeigt eine Einzelfundaufnahme der auf diesem Gebiet gefunden Scherben [WiB97]. Diese wurden archäologisch datiert und in diese Karte eingetragen. Stelle 3 und Stelle 4 bezeichnen Orte besonders hoher Funddichten. Norden befindet sich oben. Die ungefähre Lage der Meßgebiete wurde ebenfalls in die Karte eingetragen. Die genaue Lage ist nicht bekannt, da die Meßfelder noch nicht exakt eingemessen wurden. Feld I ist quadratisch und hat eine Kantenlänge von 30 m. Feld II hat eine Ausdehnung von 30 m in Ost-West-Richtung und von 25 m in Nord-Süd-Richtung.

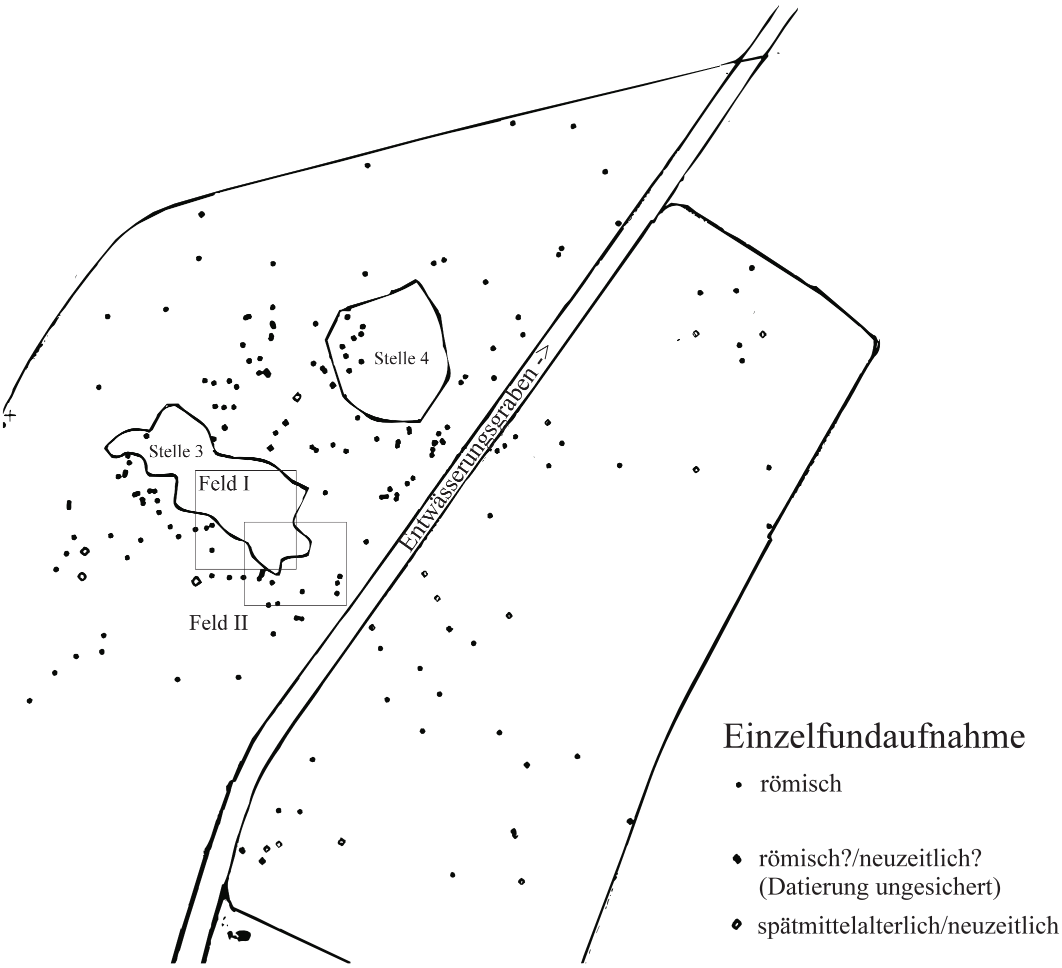


Abbildung 5.7: Einzelfundaufnahme mit ungefährer Lage der Meßgebiete

5.2.2 Durchführung der Messung

Feld I

Das Meßfeld wurde so ausgerichtet, daß die Profile in Nord-Süd-Richtung abgefahren werden konnten. Die Messung wurde diskret durchgeführt, d.h. daß mit jeder halben Radumdrehung jeweils nur ein Meßwert genommen wurde. Hieraus resultiert ein Meßpunktabstand von 0.71 m. Der Abstand zwischen den Profilen beträgt jeweils 0.5 m. Es wurde eine Sensorhöhe von 0.3 m gewählt. Der zweite Sensor befand sich in einem vertikalen Abstand von 1 m über dem unteren Sensor.

Da die Meßdaten auch zeitliche Informationen enthalten, konnte die mittlere Geschwindigkeit während der Messung bestimmt werden. Sie betrug $(0.76 \pm 0.12)\frac{m}{sec}$. Berücksichtigt man, daß die Meßwertaufnahme bei diskreter Messung eine halbe Se-

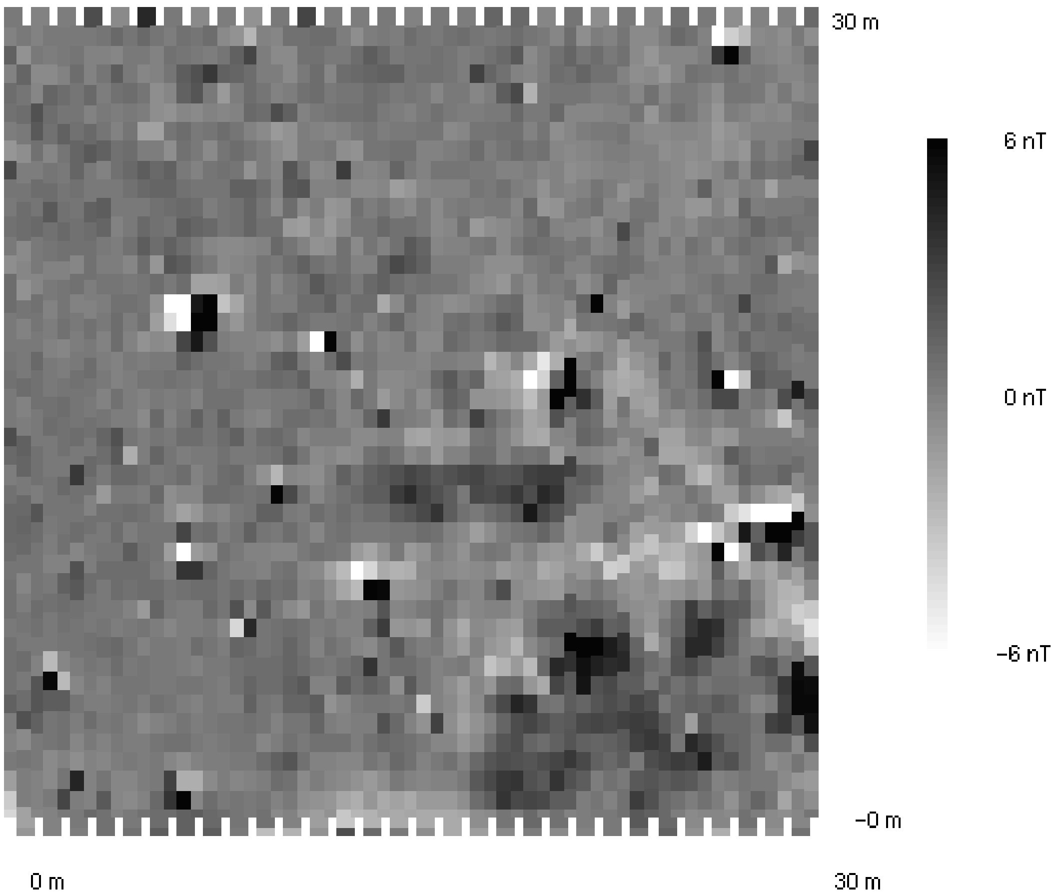


Abbildung 5.8: Korrigierte Daten des zweiten Feldes in Obergartzem im Graustufenplot von -6 nT bis 6 nT

kunde dauert, so kommt man zu einem Positionsfehler von $(0.38 \pm 0.06)m$ pro Linie. Es resultiert also ein Gesamtfehler von $(0.76 \pm 0.12)m$. Abbildung 5.8 zeigt die Meßdaten, deren Posititionen um 0.38 m in die jeweilige Laufrichtung korrigiert worden sind. Der theoretisch erwartete Positionierungsfehler stimmt also mit dem tatsächlich vorhandenen überein. Zusätzlich wurde auch der Heading Error korrigiert. Es fällt auf, daß im Gegensatz zu den Messungen in Mechernich die Anomalien auf diesem Gebiet vom Betrag her kleiner sind. Von links oben nach rechts unten zieht sich eine längliche Struktur durchs gesamte Magnetogramm. Sie könnte ein Hinweis auf eventuell noch vorhandene Mauerfundamente sein. Weiterhin befindet sich ungefähr in der Mitte der Abbildung eine 9 m lange und 2 m breite positive Anomalie. Ihr Maximum liegt bei 4 nT. Die längere Seite ist in Ost-West-Richtung ausgerichtet. Sie wird in Abschnitt 6.2.2 durch theoretische Störkörper modelliert. In der rechten unteren Ecke des Bildes ist deutlich eine Struktur zu erkennen, die aus mehreren positiven Anomalien von ungefähr 6 nT Größe mit einem Durchmesser von ca. 2 m besteht, die halbkreisförmig angeordnet sind. Um diese interessante Struktur näher zu untersuchen, wurde beschlossen, ein zweites Meßfeld abzustecken, das die Anomalie mittig enthält.

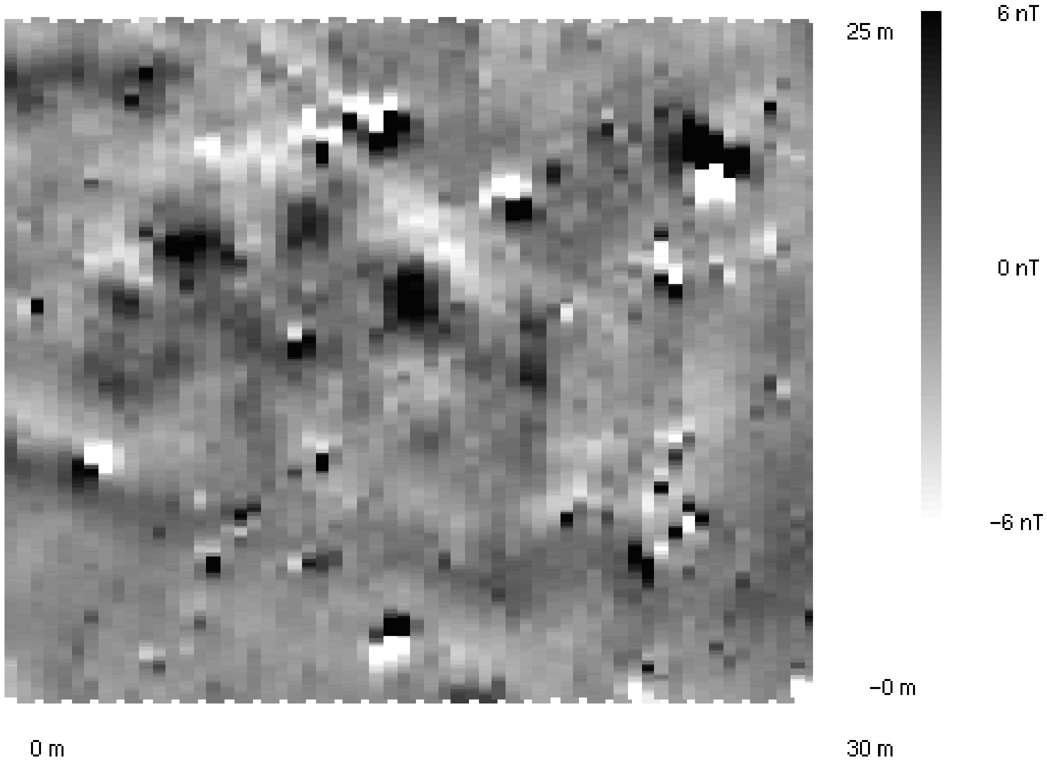


Abbildung 5.9: Korrigierte Daten des zweiten Feldes in Obergartzem im Graustufenplot von -6 nT bis 6 nT

Feld II

Abbildung 5.9 zeigt die korrigierten Daten des zweiten Meßfeldes, das im Gegensatz zum ersten Feld kontinuierlich mit einem Meßintervall von 0.1 sec ausgemessen wurde. Die Breite in Ost-West-Richtung beträgt 30 m, und die Länge beträgt 25 m. Die untere Sensorhöhe betrug ebenfalls 0.3 m, jedoch wurde jetzt ein Sensorabstand von 1.3 m gewählt, da man sich von einem größeren Sensorabstand einen höheren Kontrast versprach. Auf diesem Magnetogramm ist sehr schön zu erkennen, daß die Verteilung dieser Anomalien auf einen Halbkreis beschränkt bleibt. Mit 6 nT hat sich ihre Größe nicht verändert, obwohl der Sensorabstand vergrößert wurde. Dies deutet darauf hin, daß die magnetische Flußdichte bereits in 1 m Entfernung auf ein ungestörtes Niveau abgefallen ist und mit einer größeren Entfernung des zweiten Sensors zur Anomalie kein Kontrastgewinn verbunden ist. Weiterhin fällt eine zweite längliche Struktur auf, die links knapp unter der Hälfte des Bildes beginnt und sich dann in Richtung der rechten unteren Ecke fortsetzt. Auch dies könnte ein Hinweis auf einen Mauerüberrest sein. Erstaunlich ist, daß diese Struktur offensichtlich mit der Grenze von Stelle 3 übereinstimmt. Um diese Fragen jedoch klärend zu beantworten, müßten an dieser Stelle Grabungen durchgeführt und die Meßgebiete exakt eingemessen werden. Hier zeigt sich der große Nutzen der magnetischen Prospektion. Man hat nun genaue Anhaltspunkte, wo man nach eventuell vorhandenen archäologischen Strukturen suchen kann.

5.3 Vor- und Nachteile des Meßwagens

Da die Prospektion in Mechernich „per Hand" durchgeführt wurde, läßt sich diese Messung gut mit der Prospektion in Obergartzem vergleichen, bei der man sich des Meßwagens bediente. Zuerst werden noch einmal die Unterschiede zwischen diesen beiden Methoden verdeutlicht.

Vermessung „per Hand"

Bei der üblichen Methode schnallt sich die Person, die die Messung durchführt, das Meßgerät und den Batteriegürtel um. Die Stange, an der die Sensoren befestigt werden, hält sie in der Hand. Sie ist zusätzlich mit einem Schultertragegurt ausgestattet. Während der Messung muß sich diese Person darauf konzentrieren, die Spur zu halten. Dies geschieht, um die Abweichungen vom zuvor abgesteckten Profil zu minimieren. Darüberhinaus muß sie auch noch die Marken und Endpunkte setzen. Verpaßt sie, zum richtigen Zeitpunkt den richtigen Knopf zu drücken, resultieren daraus nicht unerhebliche Positionierungsfehler. Hinzu kommt, daß durch die Messung während des Gehens die Sonden schwanken. Dies führt zu Fehlern in der Sondenhöhe, die nicht korrigierbar sind.

Benutzung eines Meßwagens

Benutzt man einen Meßwagen, so reduziert sich das Betätigen der Knöpfe auf das Drücken der Resettaste zwischen zwei Profilen. Bemüht man sich, den Wagen senkrecht zu halten, kann man ebenfalls mit einer Minimierung der Fehler in der Sondenhöhe rechnen. Die Marken- und Liniensignale werden von der Positionierungselektronik gesetzt, so daß man sich hierauf nicht mehr konzentrieren muß. Am Ende einer jeden Linie sollte jedoch immer eine Überprüfung stattfinden, ob die tatsächlich gesetzten Marken auch mit der erwarteten Anzahl übereinstimmen. Die Positionierungsfehler sind deutlich geringer als bei der ersten Methode. Erste Testmessungen haben gezeigt, daß dieser Fehler bei maximal 5 cm auf einer Länge von 20 m liegt. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß die Fehler sehr stark von der Bodenbeschaffenheit abhängen. Ein glatter Untergrund hat einen geringeren Fehler zur Folge als ein unebener Untergrund.

Vor- und Nachteile

Vorteile:

- höhere Positionsgenauigkeit
- Meßdauer ist für ein Feld gleicher Größe geringer
- geringerer Fehler in der Sondenhöhe
- geringere Gewichtsbelastung der Person, die die Messung durchführt

Nachteile:

- nur auf relativ ebenem Gelände anwendbar
- größerer Aufwand im Transport des Meßsystems

Als Fazit bleibt festzuhalten, daß es ratsam ist, einen Meßwagen immer dort einzusetzen, wo es durch die örtlichen Gegebenheiten ermöglicht wird.

Kapitel 6

Störkörpermodellierung

In diesem Kapitel werden exemplarisch zwei Störkörpermodellierungen durchgeführt. Der erste Körper besitzt neben einer induzierten Magnetisierung auch eine remanente Magnetisierung. Zur Modellierung des zweiten Körpers wurde die Annahme gemacht, daß er keine remanente Magnetisierung besitzt. Die Berechnungen wurden mit dem Programm MAGIX PLUS [Mag94] durchgeführt, das uns freundlicherweise vom Fachbereich Angewandte Geophysik des Geologischen Instituts der Universität Bonn zur Verfügung gestellt wurde. Hierbei handelt es sich um ein Programm, das in der Lage ist, 2D-, 2.5D- und 2.75D-Modellierungen vorzunehmen. Führt man eine 2D-Modellierung durch, wird der Störkörper durch seinen Querschnitt bestimmt. Die Ausdehnung senkrecht zu dieser Richtung wird als unendlich angenommen. Eine 2.5D-Modellierung ist in der Lage, eine endliche Ausdehnung senkrecht zum Querschnitt zu berücksichtigen. Allerdings ist die Ausdehnung nach beiden Seiten hin gleich groß. Führt man eine 2.75D-Modellierung durch, so können in diesen zwei Richtungen unterschiedliche Längen berücksichtigt werden. Beide Störkörper wurden mit Hilfe einer 2.5D-Modellierung berechnet.

6.1 Modellierungsverfahren

Zur Modellierung theoretischer Störkörper finden zwei Verfahren Anwendung: die direkte und die indirekte Modellierung. Beide Verfahren benutzen als Ausgangspunkt die Lösung der Poissongleichung

$$\Phi(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \iiint\limits_V \vec{M}(\vec{r}\,')\nabla_{r'} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}\,'|} d^3r', \qquad (6.1)$$

wobei $\Phi(\vec{r})$ das magnetische Potential am Ort $\vec{r}$ beschreibt und $M(\vec{r}')$ die Magnetisierung am Ort $\vec{r}'$ darstellt. Mit ihrer Hilfe kann die vom Störkörper erzeugte Anomalie numerisch berechnet werden.

Integriert man in Gleichung 6.1 z.B. über das Volumen einer Kugel mit dem Radius a und dem Mittelpunkt in der Tiefe t, so erhält man für die Anomalie an der Erdoberfläche [Mil84]

$$\begin{aligned} \delta B(x,y) &= \big((2a_0 a_m - b_0 b_m - c_0 c_m)x^2 - 3(a_0 c_m - a_m c_0)xt \\ &\quad - (a_0 a_m + b_0 b_m - 2c_0 c_m)t^2\big) \cdot \frac{a^2 \mu_0 M}{3\,(x^2+y^2+t^2)^{\frac{5}{2}}}\ , \qquad (6.2) \\ \text{mit} \quad a_{0/m} &= \cos D_{0/m}, \\ b_{0/m} &= \cos I_{0/m} \cdot \sin D_{0/m}, \\ c_{0/m} &= \sin I_{0/m}\ . \end{aligned}$$

Hierbei bedeuten I_0 die Inklination und D_0 die Deklination des Erdmagnetfeldes. I_m und D_m bezeichnen die Inklination und die Deklination einer eventuell vorhandenen remanenten Magnetisierung.

6.1.1 Direkte Modellierung

Führt man die direkte Modellierung durch, überlegt man sich zunächst ein Störkörpermodell, von dem man annimmt, daß es die beobachtete Anomalie hervorrufen könnte. Dann läßt man sich die theoretische Form der Anomalie dieses Körpers berechnen und kann so zwischen den berechneten und den tatsächlichen Werten vergleichen. Im Normalfall stimmen diese Werte nicht überein. Man versucht nun den Körper so zu verändern, daß die theoretischen Werte mit den gemessenen Werten besser übereinstimmen. Dies führt man solange fort, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Meßwerten erzielt wird [Pat85].

6.1.2 Indirekte Modellierung

Benutzt man diese Methode, wählt man ebenfalls ein Störkörpermodell, von dem man annimmt, es könne die beobachtete Anomalie hervorrufen. Nach der Berechnung der theoretischen Anomalieform des Störkörpers beschreibt man die Differenz mathematisch und versucht durch einen geeigneten Algorithmus diese Differenz zu minimieren. Diese Verfahren beruhen meist auf der Basis von partiellen Ableitungen nach den Parametern des Modells. Aus diesen Ableitungen werden Korrekturterme berechnet, mit deren Hilfe die Störkörperform abgeändert wird. Dieses Verfahren führt man fort, bis sich die Differenz nicht weiter minimieren läßt, bzw. bis sie konvergiert [Pat85].

6.2 Durchführung der Modellierung

6.2.1 Modellierung des ersten Störkörpers

Lage

Die erste Modellierung betrifft die Anomalie in Mechernich auf Feld III, die von einem größeren ferromagnetischen Gegenstand verursacht sein könnte. Ihre Größe variiert von $-1212\ nT$ bis $1322\ nT$. Abbildung 6.1 zeigt die Stelle des Profilabgriffs zur ersten Störkörperberechnung zwischen den Punkten 1 und 2.

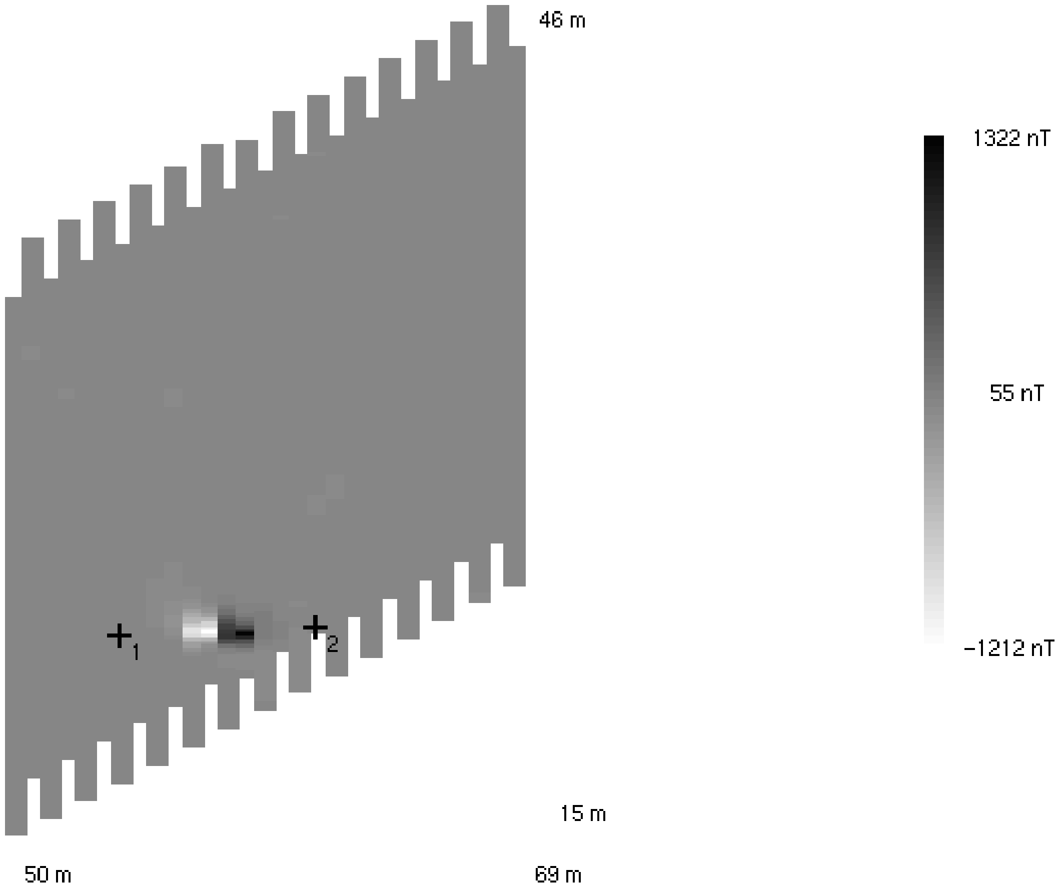


Abbildung 6.1: Abgriff des ersten Störkörperprofils

Annahmen

Folgende Annahmen wurden zur Modellierung des ersten Störkörpers gemacht:

- Da es sich um eine relativ starke Anomalie handelt, deren Verbindungsstrecke zwischen Minimum und Maximum senkrecht zur Nord-Süd-Richtung verläuft, muß davon ausgegangen werden, daß es sich um eine remanente Magnetisierung handelt. Die Deklination dieser remanenten Magnetisierung beträgt $-90°$.
- Zur Inklination der remanenten Magnetisierung können keine Aussagen getroffen werden. Sie wurde während der Störkörpermodellierung schrittweise verändert. Der theoretische Störkörper, dessen Anomalie den gemessenen Werten am nächsten kommt, besitzt eine Inklination von $15°$.
- Der Suszeptibilitätskontrast wurde mit 8 $[SI]$ abgeschätzt. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, daß dieser Wert willkürlich gewählt wurde. Auch andere Suszeptibilitäten sind denkbar, jedoch kommt mit diesem Wert die kleinste Differenz zwischen gemessenen und theoretisch berechneten Werten zustande.
- Für den *Königsberger-Quotienten*[1] K wurde ein Wert von $K = 2$ angenommen. Auch hier ist die Wahl dieses Quotienten auf das bestmögliche Ergebnis zurückzuführen.
- Die Inklination des Erdmagnetfeldes beträgt in unseren Breiten $65°$.
- Die Deklination wurde nicht berücksichtigt, da die Profile zum magnetischen Südpol und nicht zum geographischen Nordpol ausgerichtet wurden.
- Die magnetische Flußdichte betrug in Mechernich zum Zeitpunkt der Messung durchschnittlich 48061 nT. Hierbei ist aber zu beachten, daß das von uns benutzte Cäsiumabsorptionszellenmagnetometer eine geringere absolute Genauigkeit besitzt als z.B. ein Protonenpräzessionsmagnetometer.
- Die Ausdehnung des Störkörpers wurde senkrecht zur Profilrichtung mit jeweils 0.2 m in beide Richtungen abgeschätzt.

Ergebnis

Abbildung 6.2 zeigt die theoretisch berechneten und die tatsächlich gemessen Werte. Die theoretischen Werte wurden durch Linien verbunden, die Meßwerte sind durch Kreuze dargestellt. Darunter befindet sich der theoretische Störkörper, der die oberhalb dargestellte Anomalie hervorrufen würde. Es handelt sich hierbei um einen viereckigen Störkörper in etwa 1.1 m Tiefe mit den maximalen Ausmaßen von

[1] Der *Königsberger-Quotient* bezeichnet das Verhältnis von remanenter Magnetisierung zur induzierten Magnetisierung durch das gegenwärtige Erdfeld [Mil84].

40 cm × 30 cm in x- und in y-Richtung. Es fällt auf, daß die Größe der Anomalie richtig wiedergegeben wird, daß sie aber im theoretischen Modell etwas zu breit erscheint. Diese Unzulänglichkeit ist auf die große Anzahl der unbekannten Parameter zurückzuführen.

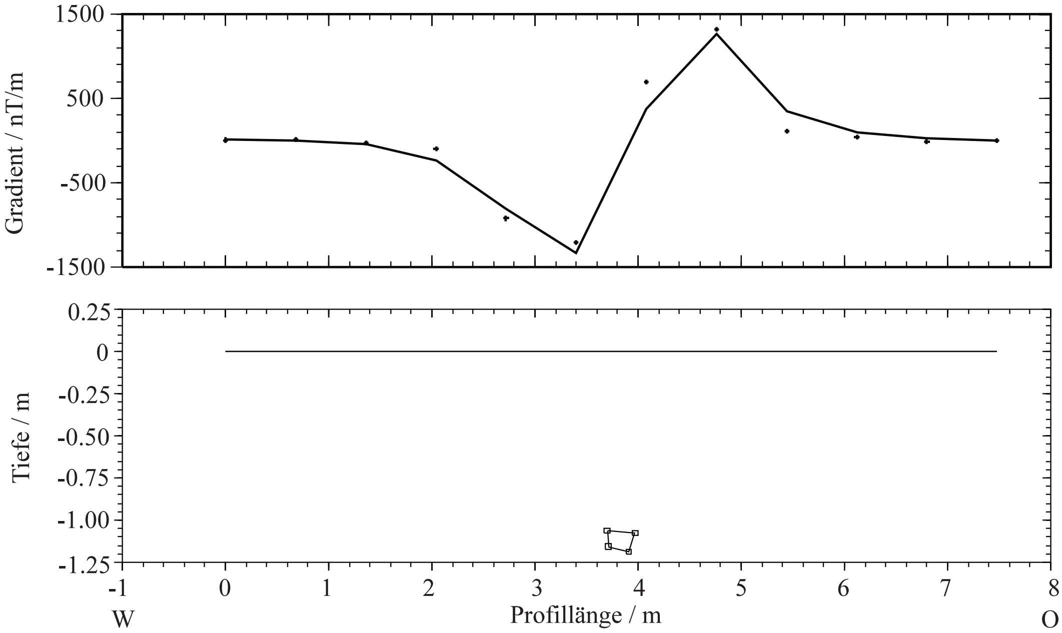


Abbildung 6.2: Modellierung des ersten Störkörpers

6.2.2 Modellierung des zweiten Störkörpers

Lage

Zur zweiten Modellierung wurde ein längliche Anomalie auf dem Meßfeld I in Obergartzem ausgewählt. Ihre Stärke umfaßt einen Bereich von 0.5 nT bis 3.5 nT. Abbildung 6.2.2 zeigt die Stelle des Profilabgriffs zur zweiten Störkörperberechnung zwischen den Punkten 1 und 2.

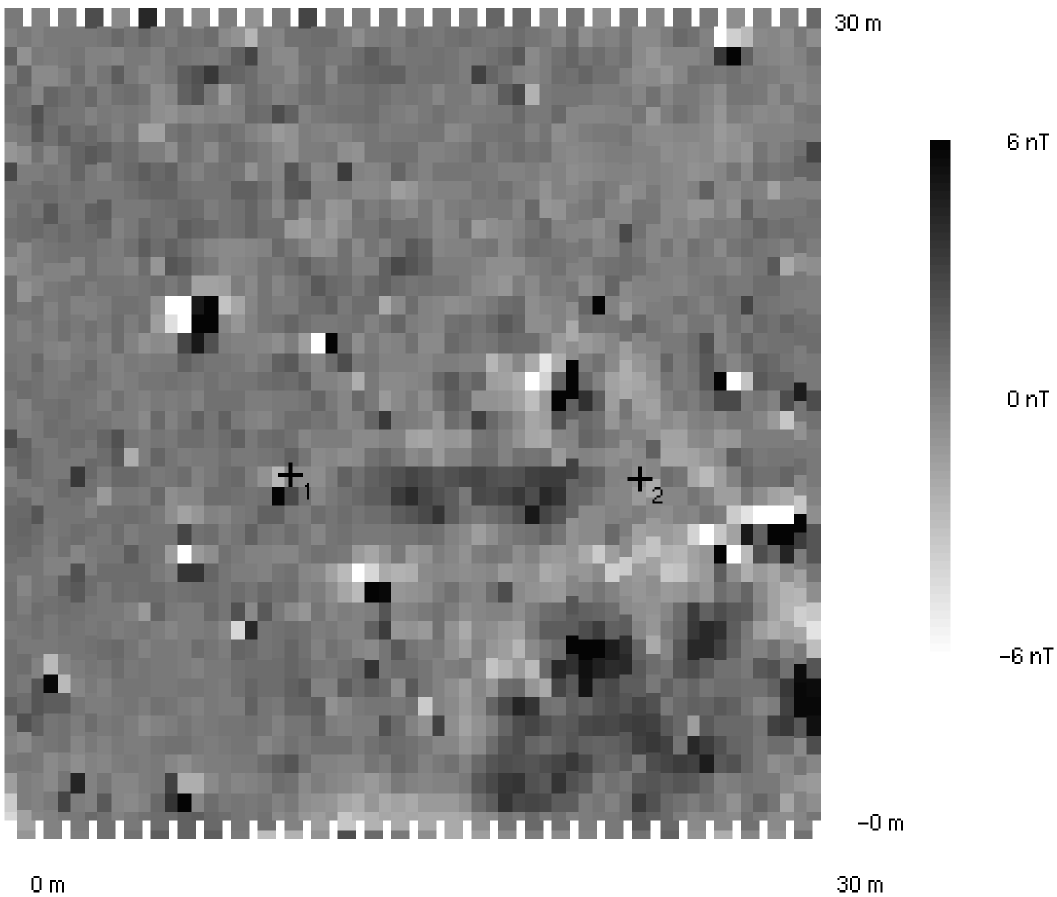


Abbildung 6.3: Abgriff des zweiten Störkörperprofils

Annahmen

Folgende Annahmen wurden zur Modellierung des zweiten Störkörpers gemacht:

- Von einer remanenten Magnetisierung wurde hier nicht ausgegangen.
- Die Inklination des Erdmagnetfeldes beträgt in Obergartzem ebenfalls 65°.
- Die Deklination wurde nicht berücksichtigt, da auch hier die Profile zum magnetischen Südpol und nicht zum geographischen Nordpol ausgerichtet wurden.
- Die magnetische Flußdichte betrug in Mechernich zum Zeitpunkt der Messung durchschnittlich 48083 nT.
- Die Ausdehnung des Störkörpers wurde senkrecht zur Profilrichtung mit jeweils 1 m in beide Richtungen abgeschätzt.
- Der Suszeptibilitätskontrast wurde mit 0.07 $[SI]$ abgeschätzt. Dies ist ebenfalls nur eine Vermutung, mit der jedoch gute Resultate in der Störkörpermodellierung erzielt wurden.

Ergebnis

Abbildung 6.4 zeigt die theoretischen und gemessenen Werte. Die Werte, die der theoretische Störkörper hervorrufen würde, sind hier ebenfalls durch Linien verbunden, die Meßwerte werden durch kleine Quadrate dargestellt. Hier mußten allerdings zwei Störkörper angenommen werden, um die Anomalieform zu reproduzieren. Der größere der beiden Körper ist knapp 13 m lang und an der dicksten Stelle ca. 20 cm dick. Der kleinere Körper hat eine dreiecksähnliche Form mit einer Grundseitenlänge von etwa einem halben Meter und einer Höhe von ungefähr 20 cm.

Insgesamt kann man sagen, daß die Anomalie recht gut wiedergegeben wird, jedoch hätte man ein solches Ergebnis sicherlich auch mit mehreren kleineren Störkörpern erzielen können (Mehrdeutigkeit der Störkörperberechnung). Letztlich kann hier nur eine Grabung Klarheit über die Ursache dieser Anomalie bringen, zumal auch der tatsächliche Suszeptibilitätskontrast nicht bekannt ist.

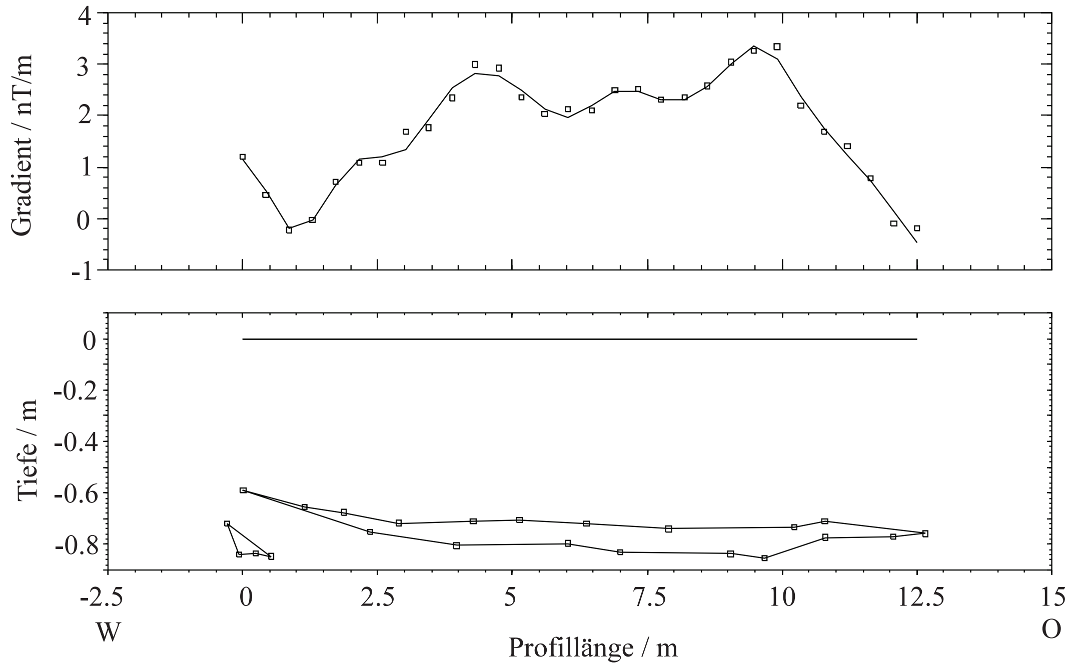


Abbildung 6.4: Modellierung des zweiten Störkörpers

Kapitel 7

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es, ein System aufzubauen, das der Archäometriegruppe des Institus für Strahlen- und Kernphysik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Vor- und Frühgeschichte die magnetische Prospektion archäologischer Bodendenkmäler ermöglicht.

Hierzu wurde ein Meßwagen gebaut, der durch eine ebenfalls selbstentwickelte Elektronik in der Lage ist, die Meßwertpositionierung vorzunehmen und der das Meßgerät, die Sensoren und die Stromversorgung trägt. Die Positionsabnahme erfolgt hierbei optoelektronisch. Die Vorteile eines Meßwagensystems liegen in einer kürzeren Meßdauer, präziseren Meßwertpositionierung, geringeren Sondenhöhenschwankungen und einer geringeren Gewichtsbelastung der Person, die die Messung durchführt. Das Meßgerät wurde vom Institut für Vor- und Frühgeschichte bereitgestellt. Die vom Hersteller angegebene Präzision konnte bestätigt werden. Weiterhin wurde die Datenreproduzierbarkeit im Hinblick auf Mikropulsationen und der Heading Error des Gerätes geprüft.

Zur Korrektur der Meßfehler (Positionierungsfehler, Heading Error) wurde ein Programmpaket entwickelt, das neben der graphischen Darstellung der Daten als Graustufenplot die Möglichkeit bietet, Querschnittsprofile abzugreifen, die später als Eingabedateien für ein Störkörperberechnungsprogramm dienen können. Weitere Leistungsmerkmale dieser Software sind der direkte Datentransfer vom Meßgerät in den Computer, die Optimierung der Grautondarstellung, die Hervorhebung von Anomalien und die mausgesteuerte Positionsbestimmung.

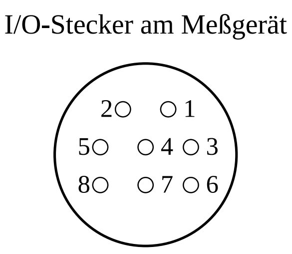
Diese Komponenten wurden erfolgreich bei einer Prospektion auf dem Gebiet einer ehemaligen Villa Rustica in Obergartzem getestet. Durch einen Vergleich mit einer zuvor durchgeführten Testmessung in Mechernich, die ohne Meßwagen durchgeführt wurde, konnten die Vorteile eines Meßwagensystems bestätigt werden. Auf den Meßgebieten in Obergartzem traten Anomalien auf, die auf eine archäologische Struktur deuten könnten, was sich aber letztlich nur durch eine Grabung klären läßt.

Examplarisch wurden zwei Störkörperberechnungen mit Hilfe des Programms MAGIX PLUS durchgeführt, das vom Fachbereich Angewandte Geophysik des Geologischen Instituts der Universität Bonn zur Verfügung gestellt wurde. Zum einen wurde für eine Anomalie auf dem Meßfeld III in Mechernich, die auf eine remanente Magnetisierung schließen läßt, ein Störkörper modelliert, der sich in etwa 1.1 m Tiefe befindet und eine Ausdehnung von 40 $cm \times 30$ cm besitzt. Zum anderen konnte eine Anomalie auf dem Meßfeld I in Obergartzem mit zwei theoretischen Störkörpern und einem Suszeptibilitätskontrast von 0.07 $[SI]$ modelliert werden.

Anhang A

Elektronik

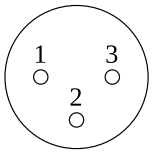
A.1 Steckerbelegung am Meßgerät



Pin-Nummer	Funktion
1	Masse
2	RS-232 Empfangen
3	RS-232 Senden
4	Masse
5	Marke
6	Audio
7	Linie
8	Enter

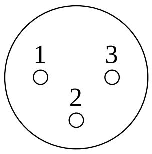
Abbildung A.1: Pinbelegung des I/O-Steckers am Meßgerät in Aufsicht [Geo96]. An Pin 5 wird das Markensignal gesendet und an Pin 7 das Liniensignal.

A.2 Steckerbelegung der Elektronik



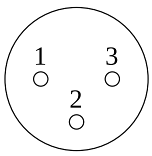
Pinbelegung der Stromversorgung

Pin-Nummer	Funktion
1	+5V bzw +5V - +12V
2	Masse
3	-



Pinbelegung des optoelektronischen Signaleingangs

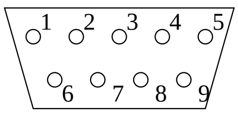
Pin-Nummer	Funktion
1	Signalleitung
2	Masse
3	+5V



Pinbelegung der RS-232 Schnittstelle

Pin-Nummer	Funktion
1	RS-232 Empfangen
2	Masse
3	RS-232 Senden

Pinbelegung des Meßgeräteanschlusses



Pin-Nummer	Funktion
1	-
2	RS-232 Senden
3	RS-232 Empfangen
4	-
5	Masse
6	Marke
7	-
8	Linie
9	-

Abbildung A.2: Pinbelegung der verschieden Anschlüsse an die Elektronik in Aufsicht

A.3 Lage der Schalter und Stecker der Elektronik

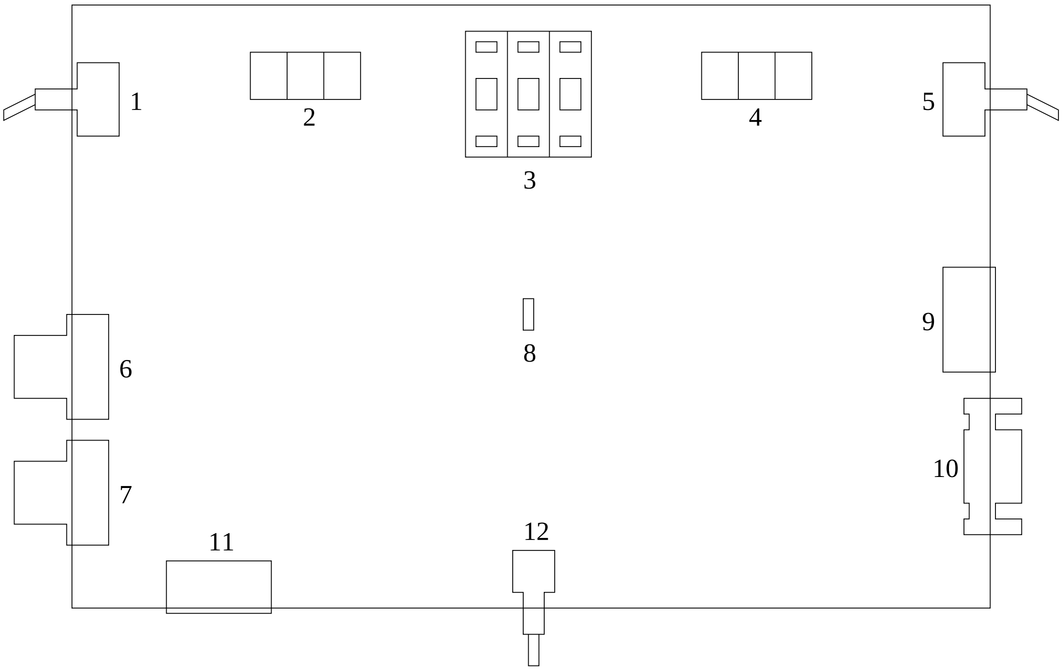


Abbildung A.3: Gehäuse der Positionierungselektronik

Nr.	Funktion
1	Markenanzeige ein
2	Markenanzeige
3	Einstellung des Linienendes
4	Anzeige des Linienendes
5	Linienendeanzeige ein
6	Stromversorung $6V - 12V$
7	Stromversorgung $5V$
8	Kontrollampe (Markenereignis: grün, Linienereignis: rot)
9	RS-232 Schnittstelle
10	Anschluß des Meßgerätes
11	Anschluß des optoelektronischen Impulsgebers
12	Resetschalter

Tabelle A.1: Funktionen der Schalter und Stecker der Elektronik

Anhang B

Bedienungsanleitung Xmagcal

B.1 Installation

Die Installation des Programmpaketes Xmagcal erfordert einen Linuxrechner [Tor96], auf dem die Graphische Benutzeroberfläche X11R6 [Xfr96] installiert sein muß. Desweiteren benötigt man die Forms Library Ver. 0.81 [Tao96]. Möchte man das Programm auf seinem System kompilieren und linken, so ruft man im Verzeichnis, in dem der Quellcode steht

```
make xmagcal
```

auf, und das System beginnt damit, die ausführbare Datei zu erstellen. Nach einigen Minuten ist dieser Vorgang beendet. Nun kopiert man die Binärdatei mit dem Befehl

```
cp xmagcal ~/
```

in sein Home-Verzeichnis und erstellt dort mit

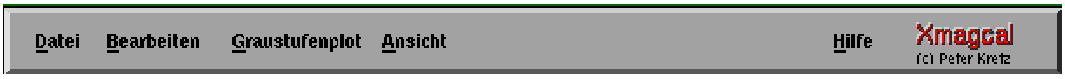
```
mkdir magnetometerdaten
```

das Verzeichnis, das später die Daten beinhalten wird. Die Installation ist beendet. Man kann nun das Programm mit dem Aufruf

```
xmagcal &
```

starten.

Es erscheint ein Fenster, das eine Menüleiste enthält, mit deren Hilfe man alle Funktionen des Programms nutzen kann.



B.2 Datentransfer

Zum Transferieren von Daten an den Computer wird zuerst das Meßgerät mit dem Computer an der seriellen Schnittstelle ttyS1 (COM 2 unter DOS) verbunden. Nun wählt man im Menü "`Datei`" den Punkt "`Datentransfer`" aus. Es erscheint ein Fenster, das einem gestattet, eine bereits vorhandene Datei auszuwählen und diese zu überschreiben oder einen neuen Dateinamen einzugeben.

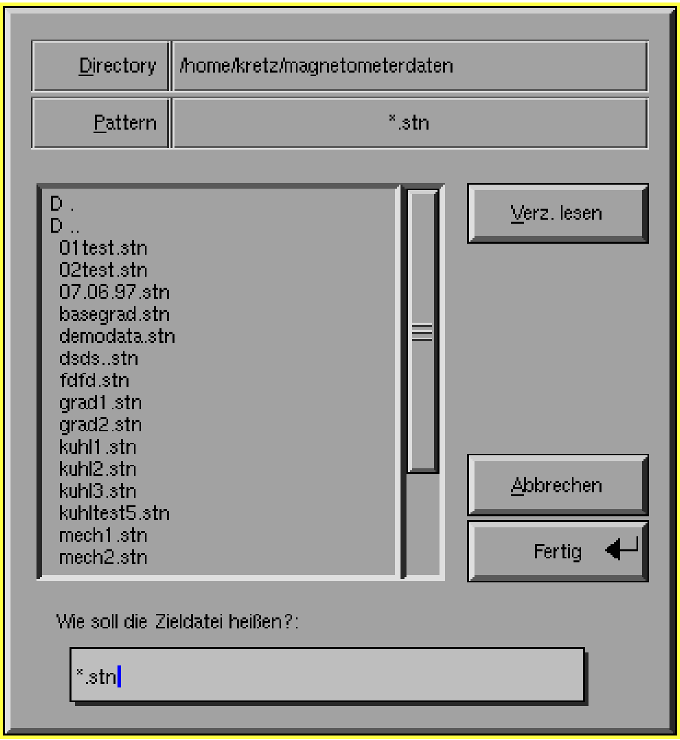
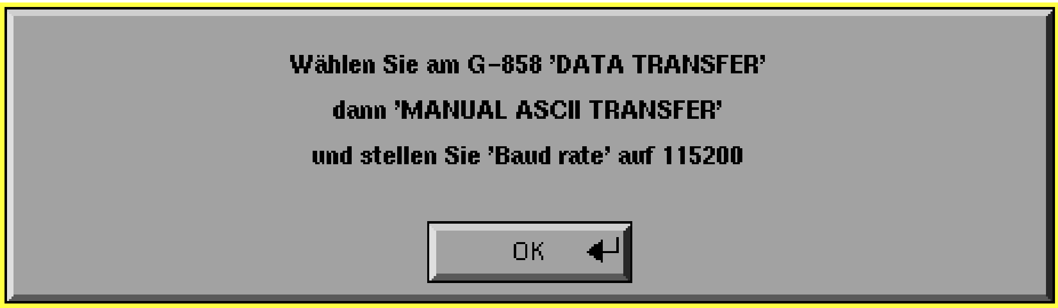


Abbildung B.1: Dateifenster. Mit Hilfe dieses Fensters ist es möglich Dateien zu speichern und zu öffnen.

Hat man einen korrekten Dateinamen eingeben - er sollte auf „`.stn`“ enden - so drückt man return(↩) oder wählt den Knopf ‘‘`Fertig`‘‘. Daraufhin erscheint folgende Meldung:

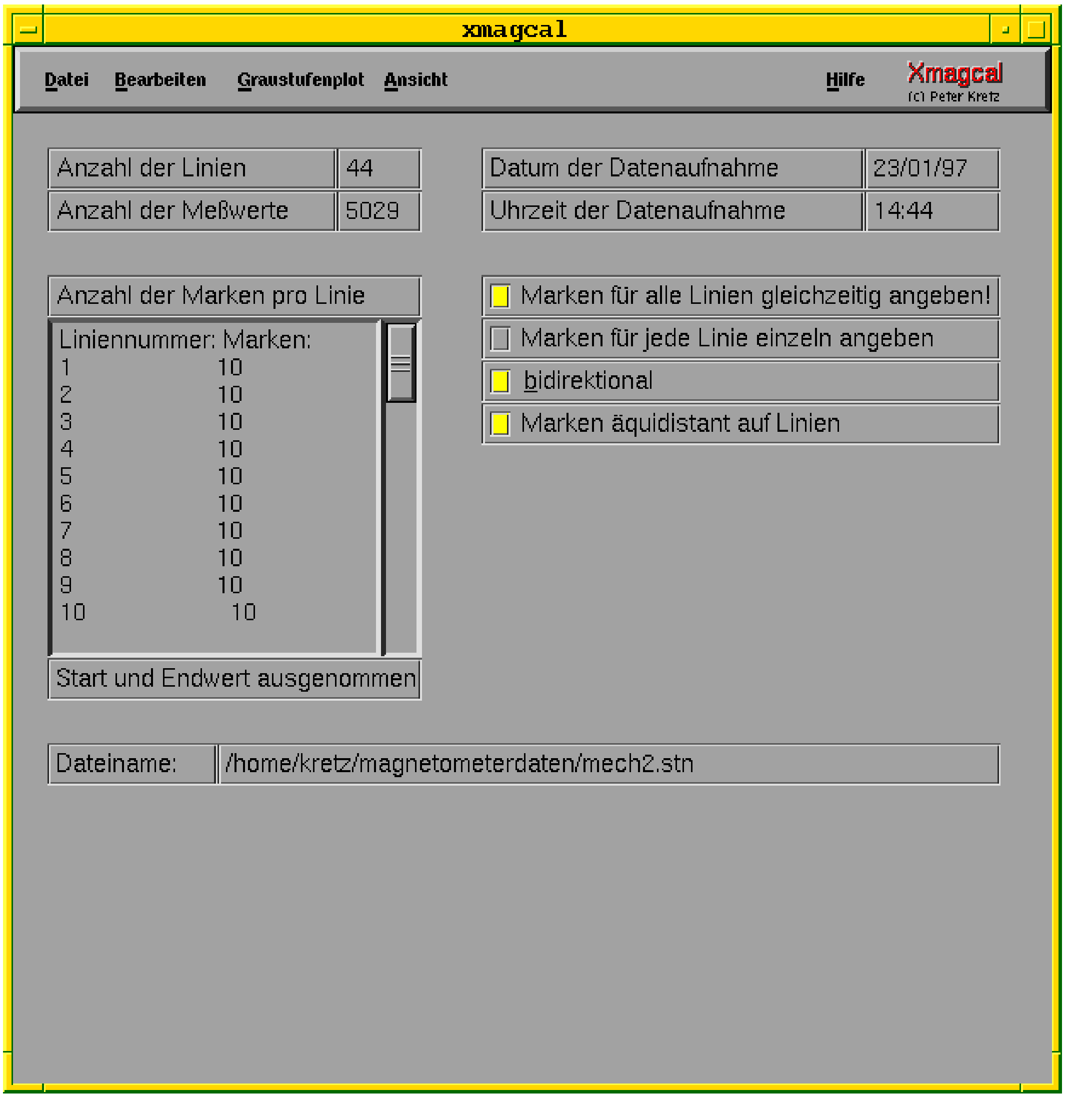


Man nehme diese Einstellungen vor. Hat man alles richtig gemacht, erscheint die Nachricht:

Wenn der Datentransfer beendet ist - man erkennt dies daran, daß im Display des Meßgeräts alle Pakete als „*transferiert*“ deklariert sind - drückt man „`Fertig`“, und der Vorgang ist beendet.

B.3 Datenkonvertierung

Die vom Meßgerät gelieferten Daten beinhalten nur zeitliche Informationen. Demzufolge müssen ihre Ortskoordinaten ausgerechnet werden. Hierzu wählt man im Menü “`Datei`“ den Punkt “`Öffnen`“ aus. Es erscheint wieder das Dateifenster aus Abbildung B.2, das einem gestattet, die zu konvertierende Datei auszuwählen. Ist dies geschehen, so erscheint im Hauptfenster folgendes:

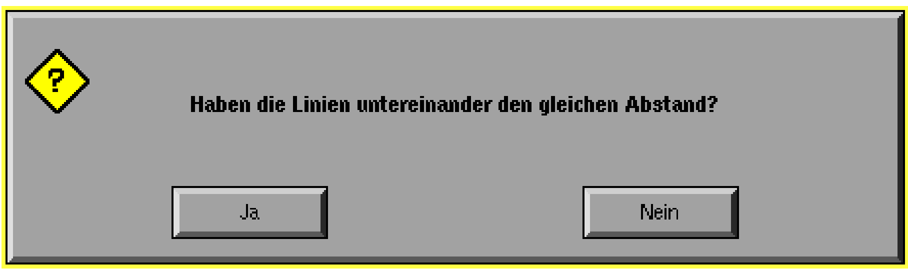


Folgende Daten werden angezeigt:

- Anzahl der abgegangenen Linien
- Anzahl der aufgenommenen Meßwerte
- Datum der Datenaufnahme
- Uhrzeit der Datenaufnahme
- Anzahl der Marken auf jeder einzelnen Linie
- Name der zu konvertierenden Datei

Nun werden die Koordinaten der Markenpunkte festgelegt. Zwischen diesen Marken werden die Koordinaten linear interpoliert. Zuerst sollte man angeben, ob man die Marken für alle Linien gleichzeitig oder für jede Linie einzeln eingeben möchte. Dann kann man auswählen, ob die Messung bi- oder unidirektional erfolgte. Desweiteren besteht die Möglichkeit, die Marken äquidistant auf die Linie zu verteilen, so daß man nicht jede Koordinate einzeln angeben muß. Hat man diese Einstellungen korrekt vorgenommen, wählt man im Menü “`Bearbeiten`“ den Punkt “`Marken eingeben`“ aus. Daraufhin folgen eine Reihe von Fenstern, die die nötigen Koordinaten verlangen.

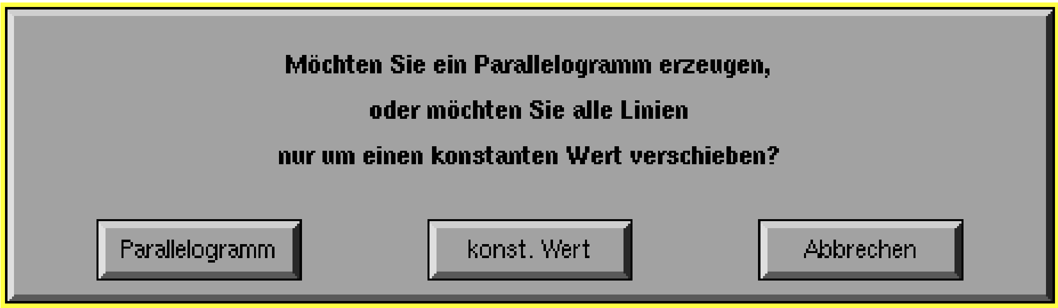
Hat man diese eingegeben, so erscheint folgende Frage:



Man beantwortet diese Frage, und gibt die Linienabstände ein. Im Hauptfenster erscheinen zwei weitere Knöpfe:

- “`einzelne Linie in y-Richtung verschieben`“
- “`alle Linien in y-Richtung verschieben`“

Jetzt gibt man an, ob man die Linien einzeln oder zusammen in y-Richtung verschieben möchte, um etwaige Koordinatenanpassungen an vorherige Messungen durchzuführen. Wählt man eine dieser beiden Optionen aus, so wird man dazu aufgefordert, die Größe der Verschiebung anzugeben. Ist dies erledigt, erscheint folgendes Fenster:



Man kann nun ein Parallelogramm erzeugen - z.B. wenn die Linien einen konstanten Versatz in ihren Anfangspunkten aufweisen - oder alle Linien um dieselbe Länge konstant verschieben. Mit dem Menüpunkt “`Datei`“ und dem Unterpunkt “`speichern`“ speichert man die Koordinatendateien. Die Ausgabe erfolgt in Dateien der Endungen „`.top`“ für die Daten des oberen Sensors, „`.bot`“ für die Daten des unteren Sensors und „`.gra`“ für die Sensordifferenz.

B.4 Graustufenplot

Zur Darstellung der Daten als Graustufenplot wählt man im Menü "`Graustufenplot`" den Punkt "`Öffnen`" aus. Nun erscheint wieder das Dateifenster aus Abbildung B.2, mit dem man die zu öffnende Datei auswählen kann. Ihr Format sollte dem in Abschnitt 4.1 besprochenen Format ähneln. Hat man eine Datei ausgewählt, die man selbst mit Xmagcal erzeugt hat, so ist dies auf jeden Fall gewährleistet. Nach kurzer Rechenzeit erscheint der Graustufenplot:

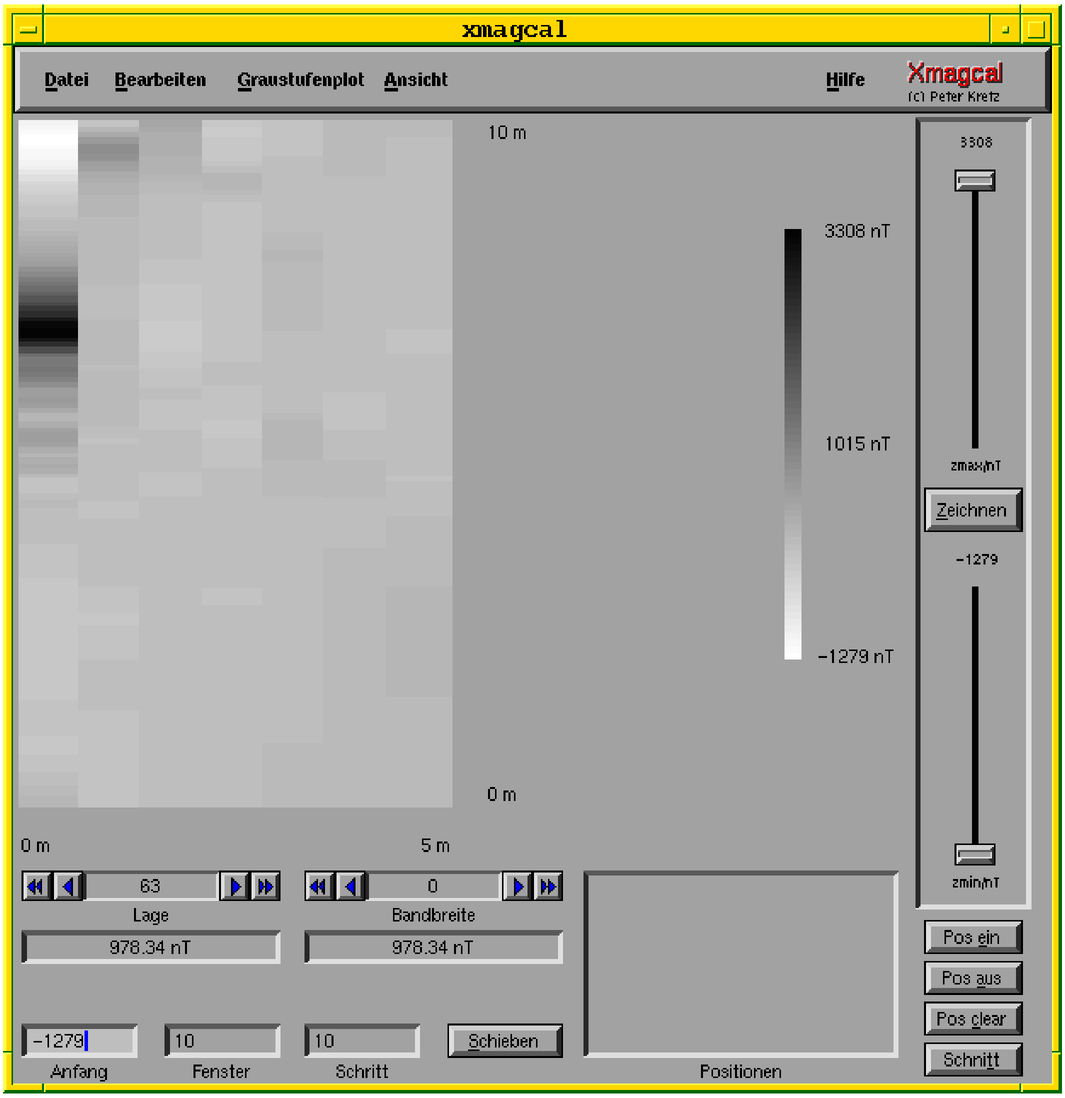


Abbildung B.2: Graustufenplot

B.4.1 Grenzen des Graustufenplots ändern

In Abbildung B.4 sieht man am rechten Rand des Fensters zwei Schieber, mit denen man die Grenzen des Graustufenplots neu einstellen kann. Hat man diese Werte verändert und drückt den Knopf "`Zeichnen`" zwischen diesen Schiebern, so werden die Daten erneut geplottet, jedoch verteilen sich die 127 Graustufen nun zwischen diesen neuen Werten. Den gleichen Effekt erreicht man auch, indem man den Menüpunkt "`Graustufenplot`" und anschließend "`Grenzen ändern`" wählt. Auch hiernach ist ein Drücken des Knopfes "`Zeichnen`" erforderlich, um die Änderungen sichtbar zu machen.

B.4.2 Optimierung der Grautondarstellung

Die Wirkungsweise dieses nützlichen Werkzeugs wurde bereits in Abschnitt 4.2.1 besprochen. Abbildung B.4 zeigt in der linken unteren Ecke die drei Kästchen "`Anfang`", "`Fenster`" und "`Schritt`", in die die Werte für den Startpunkt des Fensters, die Größe des Fensters und die Schrittweite eingetragen werden können. Bedient man nun den Knopf "`Schieben`", wird das Fenster mit der vorgegeben Schrittweite durch den Datensatz geschoben.

B.4.3 Einfärbung bestimmter Wertebereiche

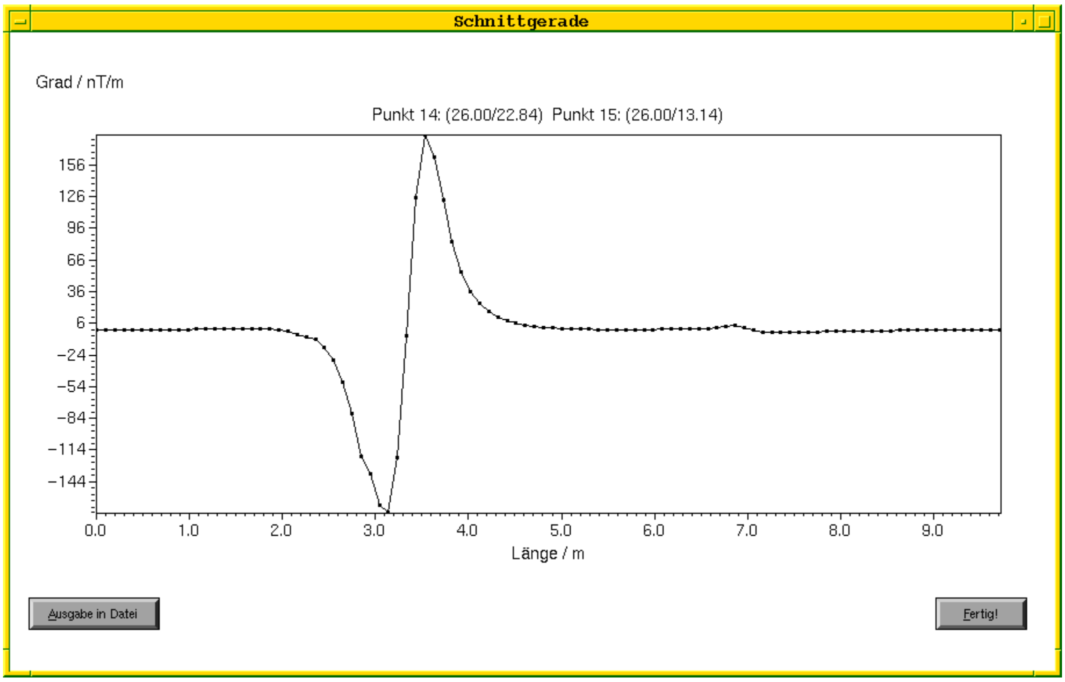
Die mit "`Lage`" und "`Bandbreite`" beschrifteten Zähler dienen zur Einstellung des Anfangswertes und der Größe des Bereiches, der eingefärbt werden soll. Sie zeigen die Werte in Farbstufen an. Darunter befinden sich zwei Anzeigen, die den Anfangs- und den Endwert des betreffenden Bereiches in nT angeben. Möchte man diese Option deaktivieren, stellt man die "`Bandbreite`" auf Null ein.

B.4.4 Positionskreuze

Um die Positionskreuze zu aktivieren, betätigt man den Knopf "`Pos ein`", "`Pos aus`" schaltet diese wieder aus, und "`Pos clear`" löscht sämtliche Kreuze inklusive deren Koordinaten. Diese Koordinaten werden, sobald ein Kreuz durch Mausklick auf dem Graustufenplot gesetzt wird, im Feld "`Positionen`" angezeigt.

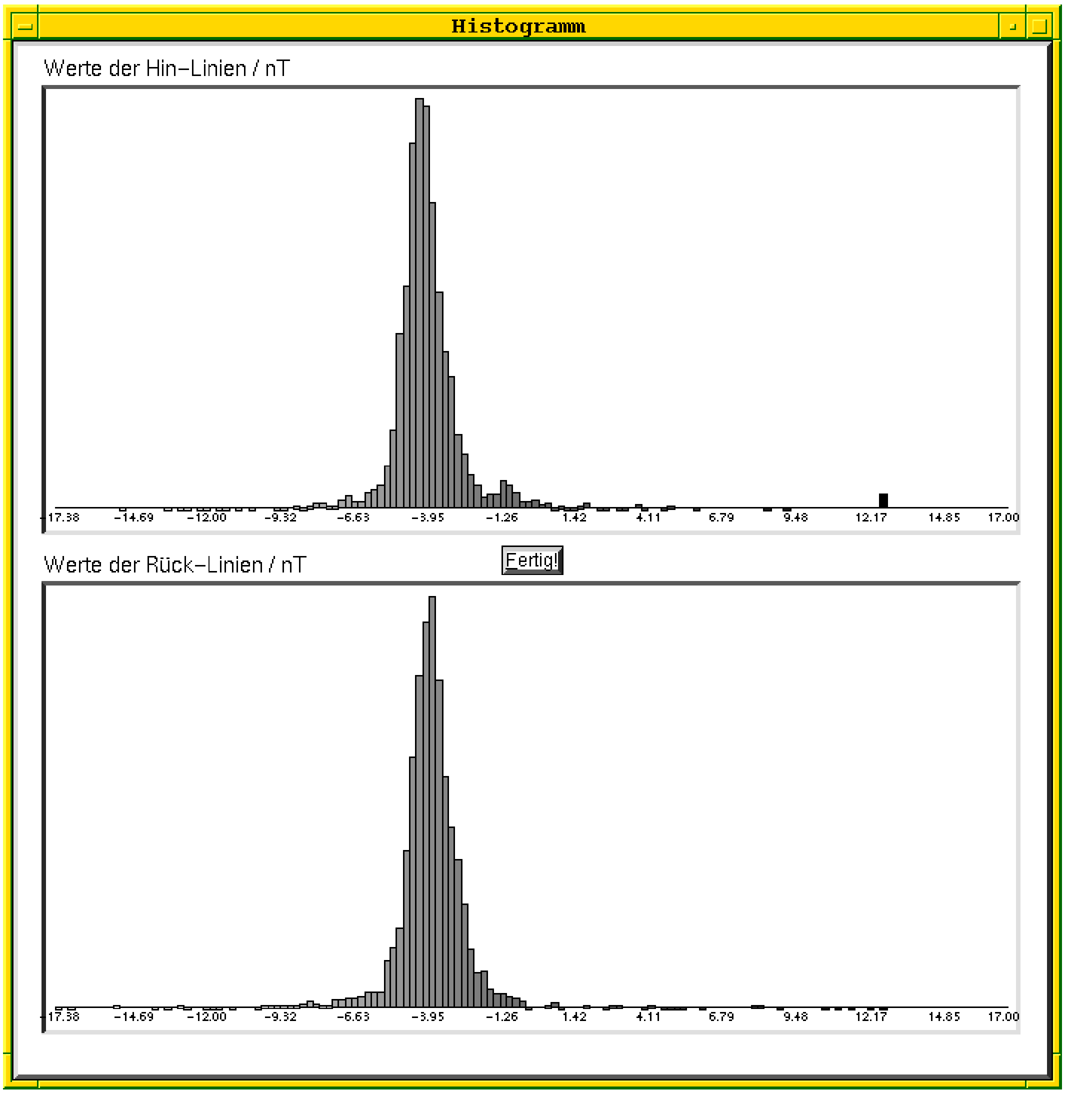
B.4.5 Querschnittsprofil

Betätigt man den Knopf "`Schnitt`", so wird das Querschnittsprofil zwischen den beiden letzten Positionskreuzen gezeichnet. Es erscheint ein Fenster, das das Profil zeigt. Über dem Profil befinden sich die Koordinaten, zwischen denen der Querschnitt abgegriffen wurde. Hierbei ist zu beachten, daß die Längenangaben der x-Achse als Entfernungen vom vorletzten Positionskreuz zu verstehen sind. Das zuletzt gesetzte Positionskreuz besitzt also den größten x-Wert. Das Querschnittsprofil kann als ASCII-Datei abgespeichert werden. Dies geschieht durch Betätigen des Knopfes "`Ausgabe in Datei`", woraufhin wieder das Dateifenster erscheint, das einem die Dateiauswahl erlaubt. Hier wird keine Dateiendung vorgegeben, so daß man diese direkt an das Störkörperberechnungsprogramm anpassen kann, das man benutzen möchte.



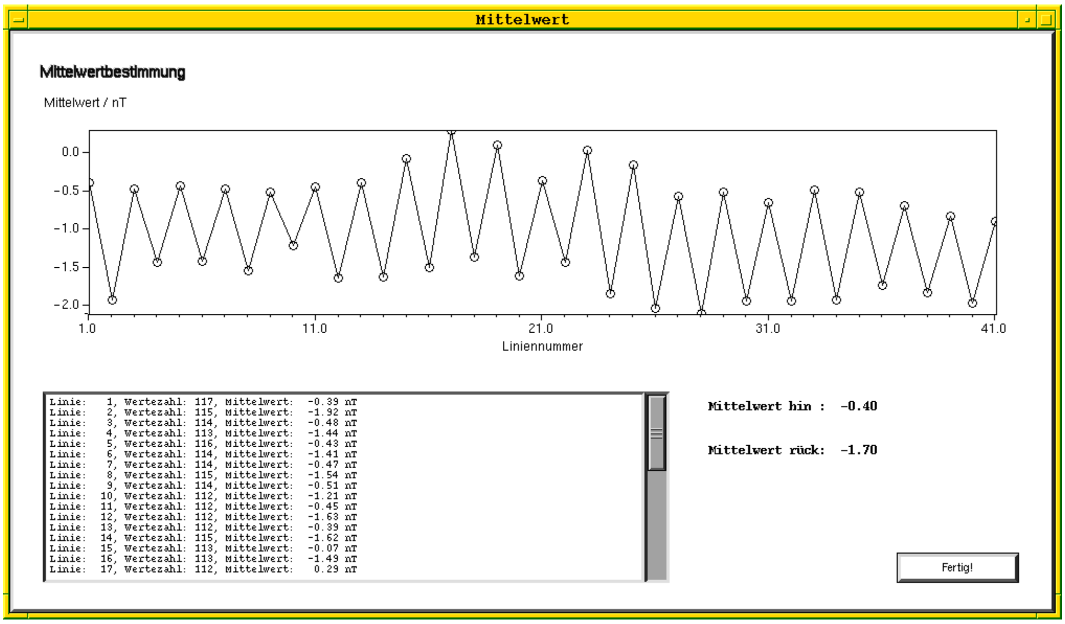
B.4.6 Histogramm

Mit dieser Funktion werden zwei Histogramme aus den Daten des Graustufenplots erstellt. Das erste beinhaltet die Daten der Hinrichtung, das zweite die Daten der Rückrichtung. Die Ober- und Untergrenzen der Histogramme entsprechen denen des Graustufenplots. Alle Meßwerte, die über der Obergrenze liegen, werden in den höchsten Kanal eingetragen. Diejenigen, die unter der Untergrenze liegen, werden in den niedrigsten Kanal eingetragen. Um diese Funktion aufzurufen, wählt man im Menü “`Ansicht`“ den Punkt “`Histogramm`“. Daraufhin erscheint ein Fenster, das beide Histogramme gleichzeitig darstellt. Mit Betätigung des Knopfes “`Fertig!`“ schließt sich dieses Fenster wieder.



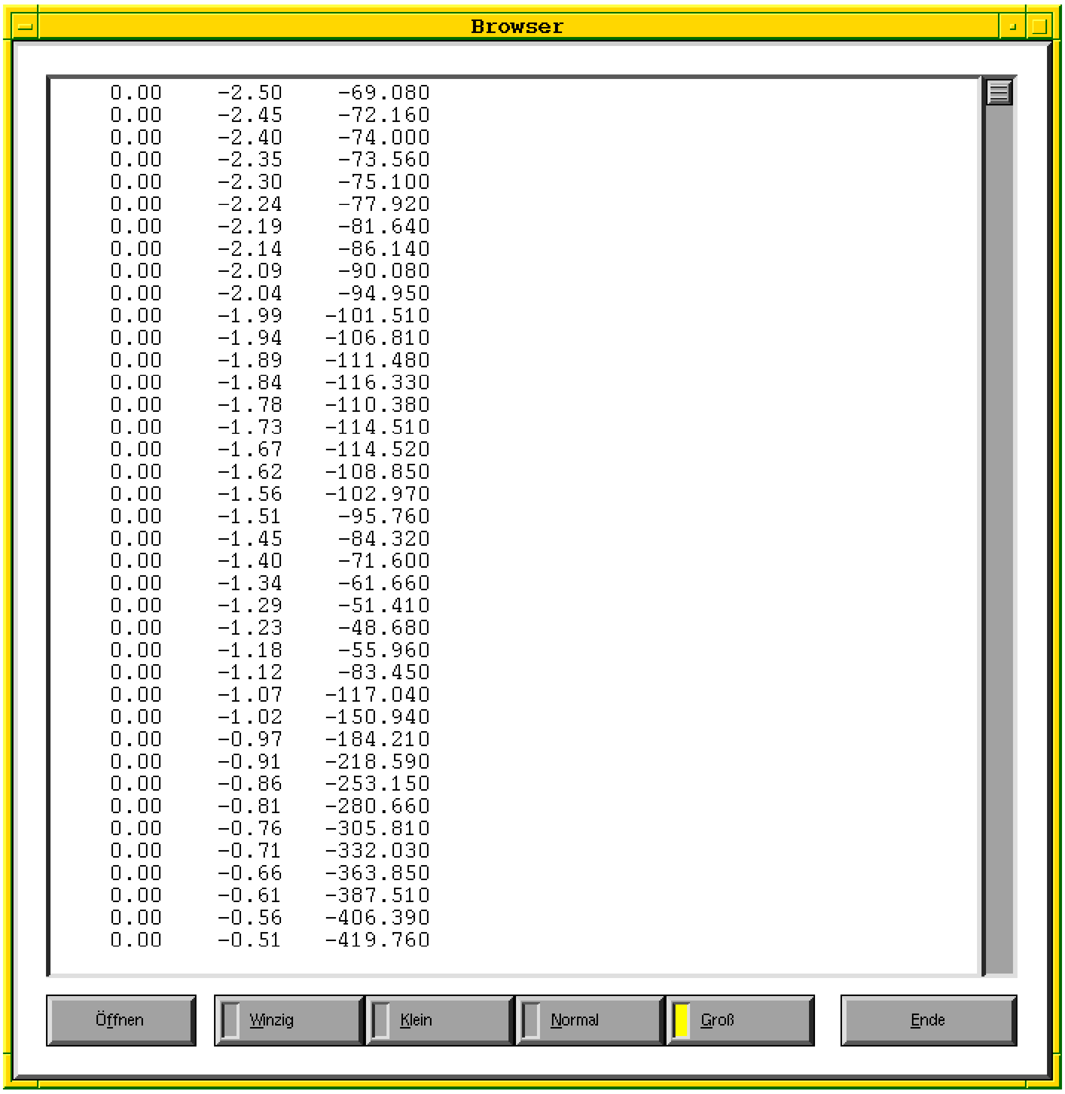
B.4.7 Linienmittelwerte

Die einzelnen Mittelwerte der Linien des momentan dargestellten Graustufenplots können in vorgegebenen Grenzen berechnet und in einem separaten Fenster dargestellt werden. Bei der Berechnung dieses Mittelwertes werden nur die Daten berücksichtigt, die im zuvor anzugebenden Intervall liegen. Dazu muß man im Menü “`Ansicht`“ den Punkt “`Linienmittelwerte`“ auswählen. Es erscheint eine Aufforderung zur Angabe der Intervallgrenzen. Nachdem dies geschehen ist, werden die Linienmittelwerte grafisch und in Tabellenform dargestellt. Zusätzlich erscheinen die Mittelwerte über alle Hin- und Rücklinien.



B.4.8 Ansicht von ASCII-Dateien

Manchmal ist es nötig, sich die Datensätze direkt im ASCII-Format anzuschauen. Um dafür nicht umständlich einen Editor öffnen zu müssen, wurde im Programmpaket XMAGCAL die Funktion „*Ansicht von ASCII-Dateien*“ implementiert. Hierzu wählt man im Menü ``Ansicht`` den Punkt ``ASCII-Dateien`` aus. Es erscheint folgendes Fenster:



Wählt man nun ``Öffnen`` aus, so erscheint wieder das Dateifenster (Abbildung B.2). Nach Auswahl der Datei kann man sich diese in aller Ruhe auf dem Bildschirm ansehen. Mit den Knöpfen ``Winzig`` bis ``Groß`` kann man die Schriftgröße von 8 *pt* bis 14 *pt* einstellen. ``Ende`` beendet diesen Vorgang.

B.5 Datenkorrekturen

B.5.1 Korrektur der Positionierungsfehler

Die Positionierungsfehler lassen sich korrigieren, indem man im Menü “`Bearbeiten`“ den Punkt “`Position Error`“ wählt. Nun wird man aufgefordert, die Größe des Positionierungsfehlers anzugeben. Diesen kann man zum einen aus Geschwindigkeitsbetrachtungen gewinnen oder empirisch durch Auswertung des Reißverschlußmusters mit Hilfe von Positionskreuzen feststellen. Nach kurzer Rechenzeit erscheint die Meldung “`Fertig!`“. Durch Betätigen des Knopfes wird die korrigierte Datei unter Anhängen der Endung „`.pos`“ abgespeichert und als Graustufenplot auf dem Bildschirm angezeigt. Die alten Daten bleiben jedoch erhalten, um eine eventuell fehlerhafte Korrektur nochmals richtig durchführen zu können.

B.5.2 Korrektur des Heading Errors

Hierzu wählt man im Menü “`Bearbeiten`“ den Punkt “`Heading Error`“. Man muß nun die Größe der Korrektur angeben, die man, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, bestimmen kann. Nach kurzer Rechenzeit erscheint der Knopf “`Fertig!`“. Nach Drücken dieses Knopfes erscheint die korrigierte Datei als Graustufenplot auf dem Bildschirm, und sie wurde unter Anhängen der Endung „`.head`“ abgespeichert.

B.5.3 Weitere Datenmanipulationen

Analog zu den oben geschilderten Korrekturen geht man mit den Funktionen *„Offset“* und *„Multiplikation“* um. Dazu wählt man im Menü “`Bearbeiten`“ die Punkte “`Offset`“ bzw. “`Multiplizieren`“. Die Endungen der geänderten Datensätze lauten „`.off`“ und „`.mul`“.

B.6 Hilfe

B.6.1 Online-Hilfe

Um dem Benutzer das Arbeiten mit XMAGCAL so angenehm wie möglich zu gestalten wurde eine Online-Hilfe programmiert. Fährt man mit der Maus auf ein Objekt, das aktiviert ist, d.h. das jederzeit betätigt werden darf, so erscheint ein kleines gelbes Kästchen, das eine Hilfestellung zu diesem Objekt gibt. Es enthält eine kurze Beschreibung zur Funktion dieses Objekts, so daß der Benutzter sofort entscheiden kann, ob er diese Funktion momentan wünscht. Diese Online-Hilfe kann im Menü ‘‘`Hilfe`‘‘ durch Auswahl der Punkte ‘‘`Online-Hilfe aus`‘‘ und ‘‘`Online-Hilfe ein`‘‘ aus bzw. eingeschaltet werden.

B.6.2 Shortcuts

Das Programmpaket XMAGCAL unterstützt sogenannte „Shortcuts“. Hierbei handelt es sich um Tasten, die, wenn sie gedrückt werden, bestimmte Funktionen ausführen. Sind im Menü oder auf Knöpfen Buchstaben zu finden, die unterstrichen sind, so bezeichnen diese Buchstaben den Shortcut. Drückt man diese Taste, wird die entsprechende Funktion ausgeführt. Treten im Programm Fragen auf, die mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden müssen, genügt ein Betätigen der Tasten ‘‘`y`‘‘ bzw. ‘‘`n`‘‘ zur Beantwortung dieser Frage.

Anhang C

Meßdatenvergleich

In diesem Anhang findet eine Gegenüberstellung der korrigierten und unkorrigierten Meßdaten der im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Prospektionen statt. Hierbei befinden sich die Daten eines Feldes immer auf derselben Seite. Im oberen Teil der Seite werden die unkorrigierten, darunter die korrigierten Meßdaten dargestellt. Folgende Korrekturen wurden gemacht:

- Der Heading Error wurde anhand der Histogrammdarstellung und der jeweiligen Mittelwerte über die Hin- und Rückrichtung korrigiert.
- Die Positionierungsfehler, die durch die Messung in Bewegung entstanden, wurden ebenfalls korrigiert.
- In Einzelfällen wurden auch einzelne Linien in ihrer Position und ihrem Mittelwert korrigiert, wenn sie deutlich aus dem Rahmen der umliegenden Linien fielen. Diese Korrekturen blieben aber die Ausnahme.

C.1 Mechernich - Feld I

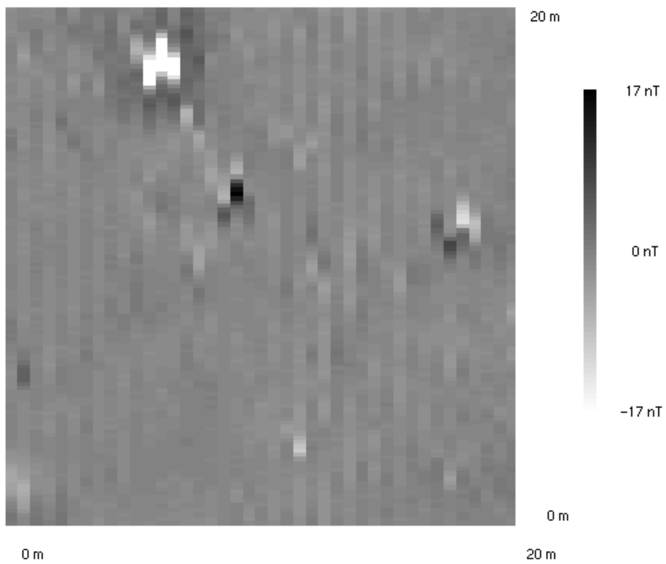


Abbildung C.1: Rohdaten des ersten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-17\ nT$ bis $17\ nT$

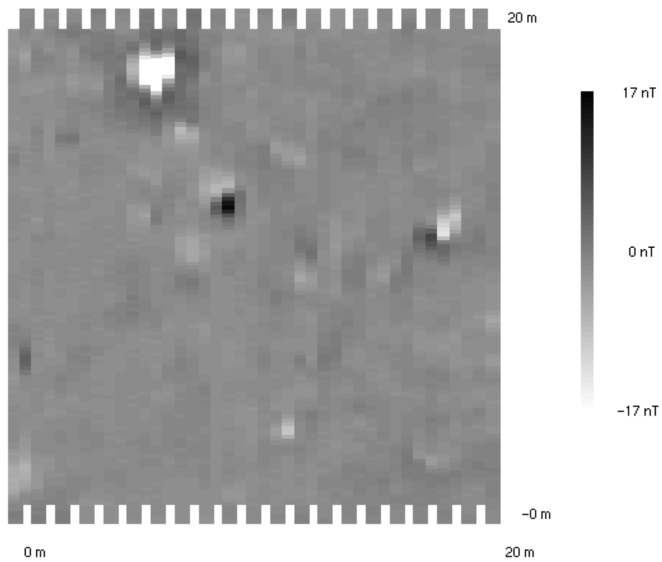


Abbildung C.2: Korrigierte Daten des ersten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-17\ nT$ bis $17\ nT$

C.2 Mechernich - Feld II

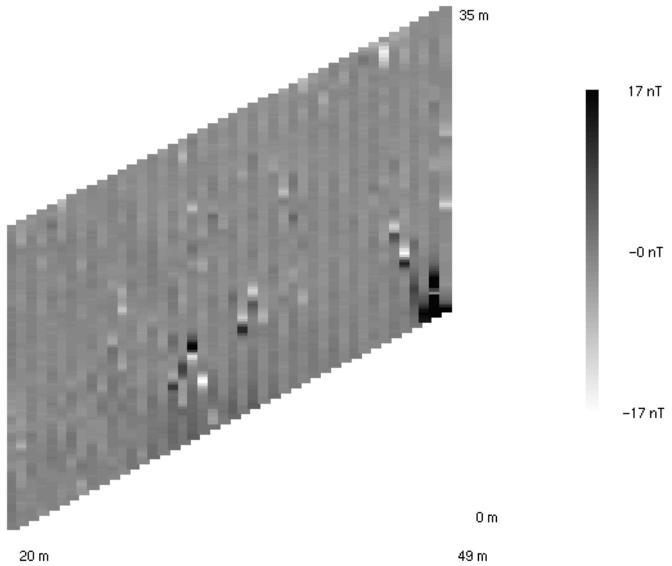


Abbildung C.3: Rohdaten des zweiten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-17\ nT$ bis $17\ nT$

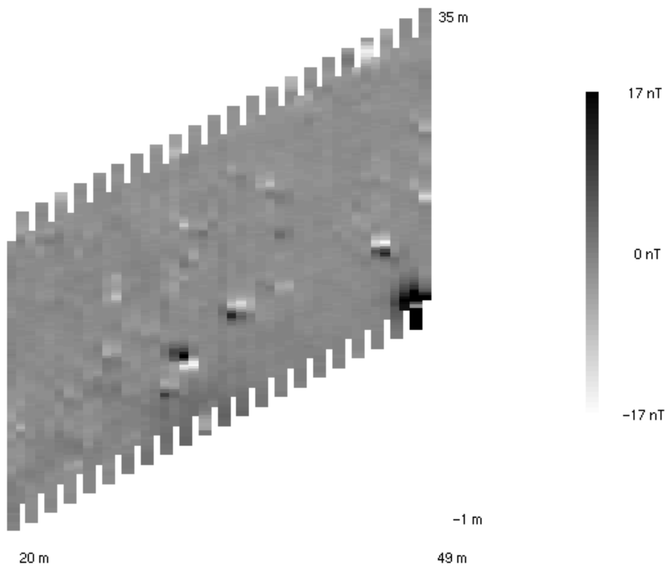


Abbildung C.4: Korrigierte Daten des zweiten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-17\ nT$ bis $17\ nT$

C.3 Mechernich - Feld III

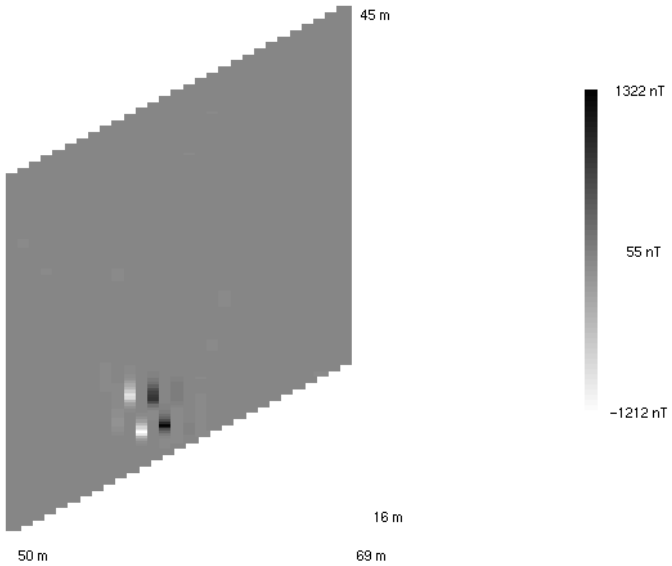


Abbildung C.5: Rohdaten des dritten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-1212\ nT$ bis $1322\ nT$

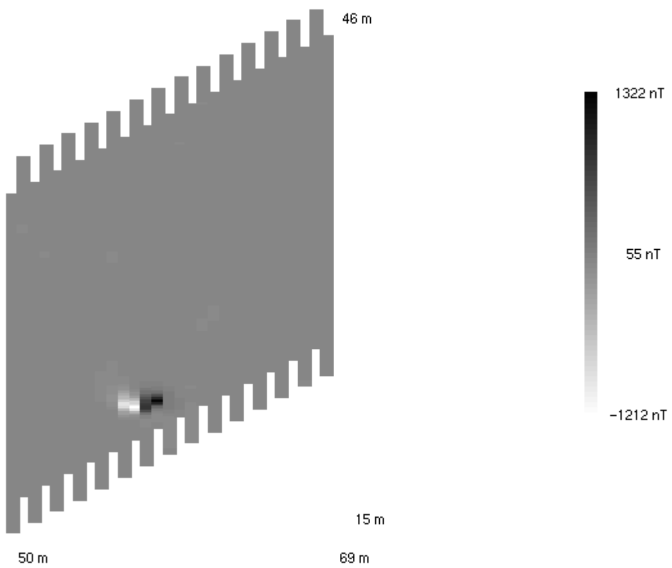


Abbildung C.6: Korrigierte Daten des dritten Feldes in Mechernich im Graustufenplot von $-1212\ nT$ bis $1322\ nT$

C.4 Obergartzem - Feld I

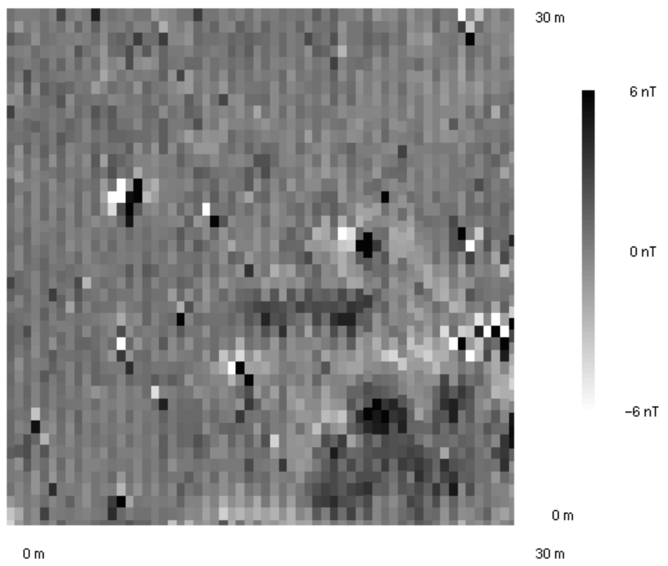


Abbildung C.7: Rohdaten des ersten Feldes in Obergartzem im Graustufenplot von $-6\ nT$ bis $6\ nT$

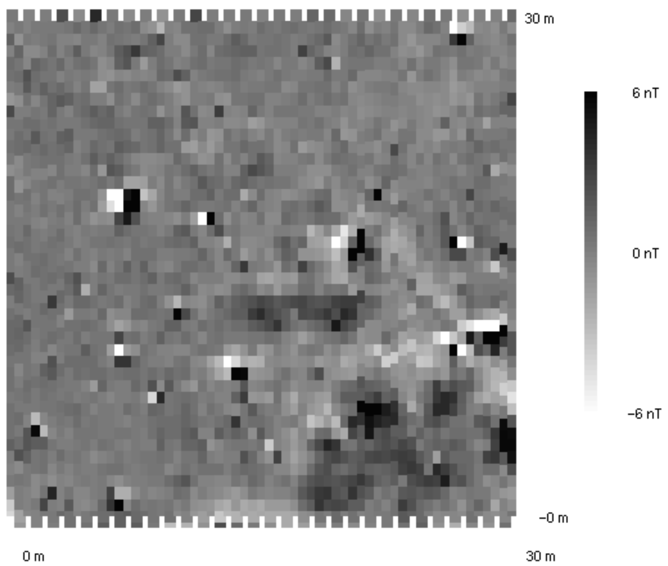


Abbildung C.8: Korrigierte Daten des ersten Feldes in Obergartzem im Graustufenplot von $-6\ nT$ bis $6\ nT$

C.5 Obergartzem - Feld II

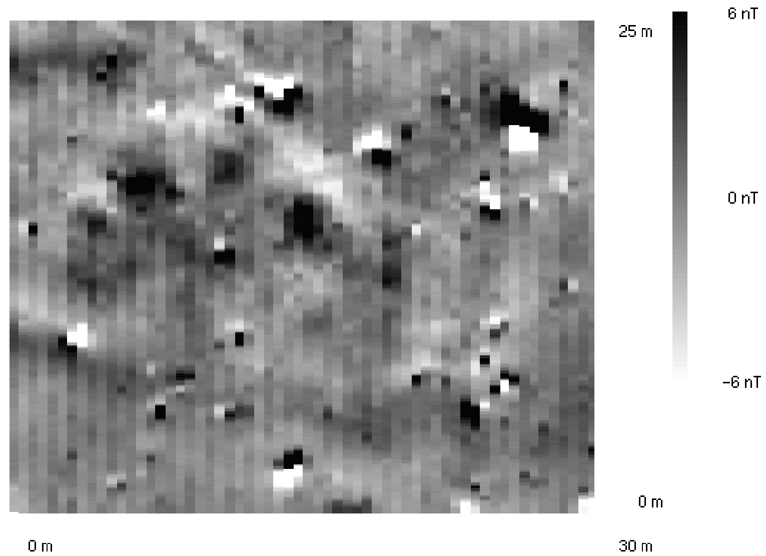


Abbildung C.9: Rohdaten des zweiten Feldes in Obergartzem im Graustufenplot von -6 nT bis 6 nT

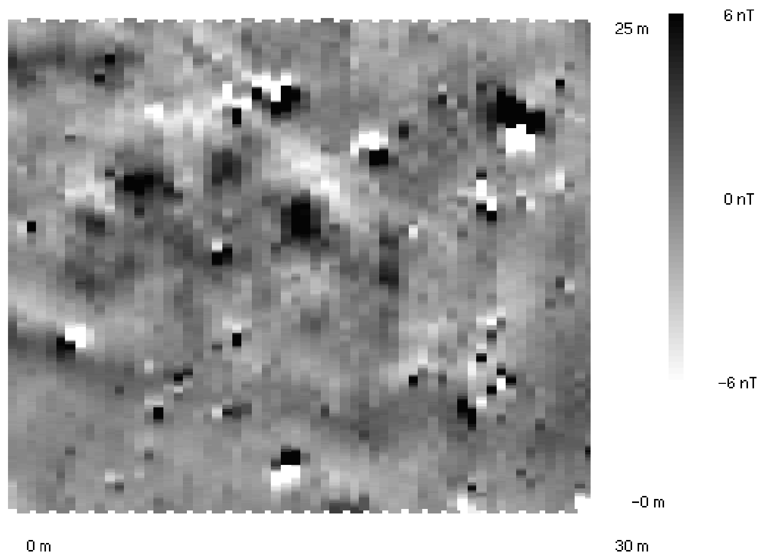


Abbildung C.10: Korrigierte Daten des zweiten Feldes in Obergartzem im Graustufenplot von -6 nT bis 6 nT

Literaturverzeichnis

[Ait59] M. J. Aitken, *The Listener 61*, 325, 1959.

[Bec96] H. Becker, *Die magnetische Prospektion*, Archäologische Prospektion - Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 73 - 76, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München, 1996.

[Ber87] L. Bergmann, C. Schaefer, H. Gobrecht, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 2 Elektrizität und Magnetismus*, Berlin, New York, de Gruyter, 1987.

[Bla75] R. P. Blakemoore, *Magnetotactic Bacteria*, Science 190, 377-379, 1975.

[Bre73] S. Breiner, *Applications Manual For Portable Magnetometers*, Geometrics Inc., Sunnyvale(California), 1973.

[Cla90] A. J. Clark, *Seeing beneath the soil*, B. T. Batsford Ltd, London, 1990.

[Els58] W. Elsasser, *Scientific American 198*, 44-48, Mai 1958.

[Faß94] J. W. E. Faßbinder, *Die magnetischen Eigenschaften und die Genese ferrimagnetischer Minerale in Böden im Hinblick auf die magnetische Prospektion archäologischer Bodendenkmäler*, Verlag Marie L. Leidorf, Buch am Erlbach, 1994.

[Geo95] Geometrics Inc., *Portable Magnetometer/Gradiometer Model G-858 - Preliminary Data Sheet*, Sunnyvale(California), 1995.

[Geo96] Geometrics Inc., *Manual G-858*, Sunnyvale(California), 1996.

[Ger95] C. Gerthsen, H. Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995.

[GNU96] *GNU C-Compiler, Version 2.7.1*, Free Software Foundation, Inc., Cambridge/USA, 1996.

[Ker69] W. Kertz, *Einführung in die Geophysik*, B.-I. Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1969.

[LeB55] E. Le Borgne, *Susceptibilité magnétique anomale du sol superficiel*, Annales de Geophysique 11, 399-419, 1955.

[LeB60] E. Le Borgne, *Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du chiste et du granite*, Annales de Geophysique 16, 159-195, 1960.

[Lov87] D. R. Lovley, J. F. Stolz, G. L. Nord, E. J. P. Phillips, *Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism*, Nature 330, 252-254, 1987.

[Mag94] *MAGIX PLUS*, Magnetic and Gravity Data Interpretation Software, Interpex Ltd., Golden(Colorado), 1994.

[Mar51] H. W. Van der Marel, *Gamma ferric oxide in sediments*, J. Sediment. Petrol. 21, 12-21, 1951.

[May85] T. Mayer-Kuckuk, *Atomphysik*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1985.

[Mil84] H. Militzer und F. Weber, *Angewandte Geophysik - Band 1: Gravimetrie und Magnetik*, Springer-Verlag, Wien, New York, Akademie-Verlag, Berlin, 1984.

[Mom86] H. Mommsen, *Archäometrie*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1986.

[Pat85] N. R. Paterson und C. V. Reeves, *Applications of gravity and magnetic surveys - The state-of-the-art in 1985*, Geophysics 50 - 12, 2558-2594, 1985.

[Sch71] H. Schmidt und V. Auster, *Neuere Meßmethoden der Geomagnetik*, Enzyklopädie der Physik, Band 49/3 (Geophysik III/3), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.

[Sch59] U. Schwertman und B. Heinemann, *Über das Vorkommen und die Entstehung von Maghämit in nordwestdeutschen Böden*, Neues Jb. Mineralogie Mh. 8, 174-181, 1959.

[Sco90] I. Scollar, A. Tabbagh, A. Hesse, I. Herzog, *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

[Shi77] P. N. Shive und J. F. Diehl, *Reduction of hematite to magnetite under natural and laboratory conditions*, Journal of Geomagnetics and Geoelectrics 29, 345-354, 1977.

[Smi97] Kenneth Smith, *Technical Report M-TR91 - Cesium optically pumped magnetometers*, Geometrics Inc., Sunnyvale(California), 1997.

[Sta87] H. Stanjek, *The formation of maghemite and hematite from lepidocrite and goethite in a Cambisol from Corsica, France*, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 150, 314-318, 1987.

[Tao96] T. C. Tao und M. Overmars, *Forms Library - A Graphical User Interface Toolkit for X, V0.81*, C-Bibliothek, University of Wisconsin-Milwaukee, Utrecht University, Juli 1996.

[Tel90] W. M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff, *Applied Geophysics - Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 1990.

[Tor96] Linus Torvalds, *Linux, Kernel 2.0.29*, Betriebsystem für i386 und höher, Helsinki, 1996.

[WiB97] *Prospektion Mechernich-Obergartzem - Abschlußbericht*, Wissenschaftliche Baugrundarchäologie e.V., Bonn, Juni 1997.

[Xfr96] *X11R6 GUI*, The XFree86[TM] Project, Inc., 1996.

Abbildungsverzeichnis

Index

Dank

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. H. Mommsen für die intensive Betreuung meiner Arbeit danken.

Herrn Prof. Dr. H.-J. Kümpel danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Den ehemaligen und aktuellen Mitgliedern der Arbeitsgruppe Archäometrie des Instituts für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn danke ich für ihre Hilfs- und Diskussionsbereitschaft, die sehr zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen hat: U. Becker, H. Dittmann, F. Faßbender, Dr. A. Hein, H. Ihmsen, M. Lehnen, Prof. Dr. H. Mommsen, A. Rosenberg, T. Sieredzki und G. Zender.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. H. Mommsen, Herrn Dr. A. Hein, Herrn F. Faßbender und Herrn H. Reufels für die Hilfe bei der Durchführung der Messungen danken.

Dem Institut für Vor- und Frühgeschichte der Universität Bonn, insbesondere Herrn Prof. Dr. Roth, danke ich für die Bereitstellung des Meßgerätes.

Herrn D. Pettenkofer und Herrn H. Schnitzler vom Institut für Vor- und Frühgeschichte der Universität Bonn danke ich für die freundliche und gute Zusammenarbeit.

Dem Fachbereich Angewandte Geophysik des Geologischen Instituts der Universität Bonn, hier sei besonders Herr Prof. Dr. H.-J. Kümpel erwähnt, danke ich für die Überlassung des Störkörperberechnungsprogrammes MAGIX PLUS.

Den Damen des Sekretariats Frau B. Gatzweiler und Frau A. Pitrella danke ich für ihre Hilfsbereitschaft.

Herrn Dr. G. Mertler danke ich für die freundliche und zügige Bearbeitung meiner Anliegen.

Den Mitarbeitern der Elektronikwerkstatt danke ich für ihre guten Ratschläge und ihre Hilfsbereitschaft.

Meinem Studienkollegen und Freund Frank Faßbender danke ich für die gute Zusammenarbeit während der Praktika und des gesamten Studiums.

Meinen Eltern Elisabeth Kretz und Heinz Kretz danke ich für die finanzielle und geistige Unterstützung während meines gesamten Studiums.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Freundin und zukünftigen Frau Silvia Rühling für die geistige Unterstützung, die sie mir während meines gesamten Studiums entgegenbrachte.