



GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Scientific Technical Report

ISSN 1610-0956



GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Eberhard Pulz

**Entwicklung
eines optisch-gepumpten
Skalar-Magnetometers mit
hoher Langzeitkonstanz am
GeoForschungsZentrum
Potsdam**

Scientific Technical Report STR98/03

Impressum

GeoForschungsZentrum Potsdam
Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

e-mail: postmaster@gfz-potsdam.de
www: <http://www.gfz-potsdam.de>

Gedruckt in Potsdam
März 1998

Eberhard Pulz

**Entwicklung eines optisch-gepumpten
Skalar-Magnetometers
mit hoher Langzeitkonstanz am
GeoForschungsZentrum Potsdam**

Scientific Technical Report STR98/03

**Entwicklung eines optisch-gepumpten
Skalar-Magnetometers
mit hoher Langzeitkonstanz
am GeoForschungsZentrum Potsdam**

von E. Pulz

Potsdam, im Februar 1998

Inhalt

1. Einleitung
 - 1.1. Geräteausstattung des Adolf-Schmidt-Observatoriums Niemegek
 - 1.2. Der Weg zu einem „Superskalarmagnetometer“
2. Kurze Beschreibung der Arbeitsweise moderner Magnetometer
 - 2.1. Flux-gate Magnetometer
 - 2.2. Klassische Magnetometer
 - 2.3. Protonenmagnetometer
 - 2.4. Optisch gepumpte Magnetometer
3. Signalgewinnungsverfahren und Linienbreite von optisch gepumpten Magnetometern
 - 3.1. Selbstschwingendes Magnetometer
 - 3.2. Magnetometer mit Linienabtastung
 - 3.3. Gegenüberstellung beider Signalgewinnungsverfahren
 - 3.4. Fehlerdiskussion von optisch gepumpten Magnetometern
4. Das K-Tandem-Magnetometer des GFZ
 - 4.1. Grundidee
 - 4.2. Physikalisch -technische Beschreibung
5. Zusammenfassung und Diskussion

Danksagung

Literatur

Anhang: Modern Optically Pumped Magnetometers in Test
 -A Long-Term Stability Investigation of Scalar Magnetometers-
 nach dem Vortrag zur IAGA Tagung Uppsala, 1997, Aug. 4.-16.

1. Einleitung

1.1. Geräteausstattung des Adolf-Schmidt-Observatoriums Niemeck

Im geomagnetischen Observatorium Niemeck des GeoForschungsZentrum Potsdam wurden bis Anfang der 90er Jahre alle magnetischen Elemente klassisch registriert bzw. bestimmt. Für diese Arbeiten war und ist ein hoher Personalaufwand nötig. Durch die hohe Einsatzbereitschaft des Personals und die projektierte Redundanz wurde die theoretisch erreichbare Genauigkeit über Jahrzehnte gehalten, was dem Observatorium den Ruf eines Standardobservatoriums einbrachte. Parallel dazu erfolgte seit dem Ende der 70er Jahre eine Registrierung mit Hilfe von modernen, am Observatorium selbst entwickelten Instrumenten [1]. Die Ergebnisse waren in zweifacher Hinsicht unbefriedigend:

- die Zuverlässigkeit ließ zu wünschen übrig
- die Meßunsicherheit war größer als die der klassischen Instrumente

Zur zeitgemäßen Ausstattung des Observatoriums einschließlich digitaler Registrierung und online Versendung der Resultate bestand daher schon längere Zeit Handlungsbedarf.

Nach 1990 wurden 3-Komponenten-flux-gate-Magnetometer verschiedener Hersteller angeschafft. Davon arbeitet jedoch nur ein Typ zufriedenstellend [2,3].

Die Hauptmängel sind :

- hohe Temperaturabhängigkeit
- schlechte Langzeitkonstanz
- Sprünge
- hoher Rauschpegel

In der Gerätekategorie „absolut messende Magnetometer“ wurden nach 1992 drei Geräte vom Typ Overhauser- Effekt-Protonen-Magnetometer vom Hersteller GEM SYSTEMS, Canada, gekauft. Von allen angebotenen Protonenmagnetometern ist dieser Typ gegenwärtig der beste. Dennoch weisen auch sie Mängel auf, wie diskontinuierliche Betriebsweise mit Verletzung des Abtasttheorems und Temperatursprünge [4,5,6]. Die absolute Genauigkeit ist im Vergleich zu klassischen Geräten besser.

Zur Basiswertbestimmung der Variometer (3-Komponenten-flux-gate-Magnetometer) sind absolute Messungen erforderlich. Das gleiche gilt für Feldmessungen an Säkularpunkten und zur magnetischen Landesvermessung, die ebenfalls zu den Aufgaben des Observatoriums gehören. Nachdem sich das Vektorprotonenmagnetometer nach AUSTER [1] als unbrauchbar erwiesen hat, werden jetzt ein auf einem magnetfreien Theodoliten montiertes 1-Komponenten-flux-gate-Magnetometer und ein Protonen-Overhauser-Effekt-Magnetometer verwendet. Für eine Messung benötigt man zwei Instrumente.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß trotz aller Fortschritte auf dem Gebiet der Magnetfeldmesstechnik weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf besteht.

Mit der Inbetriebnahme des K-Tandem-Magnetometers, das im folgenden beschrieben wird, kam im traditionsreichen geomagnetischen Observatorium Niemeck ein Gerät zum Einsatz, das für die Gerätekategorie „absolutmessende Magnetometer“ neue Maßstäbe setzt. Erstmals kann die skalare Größe des Erdmagnetfeldes ohne prinzipbedingte Meßpausen mit einer absoluten Meßgenauigkeit und einer zeitlichen Auflösung registriert werden, die die bisherige Meßtechnik um mehr als eine Größenordnung übertrifft. Vergleiche über einen Zeitraum von mehr als 3 Jahren bestätigten die theoretische Langzeitdrift $\leq 10\text{pT/Jahr}$.

1.2. Der Weg zu einem „Superskalarmagnetometer“

Der wissenschaftliche Gerätebau hat am Observatorium Niemegek eine lange Tradition. Nach dem Kriege wurden noch zahlreiche Verbesserungen an klassischen Magnetometern vorgenommen (G.FANSELAU). Ab Mitte der 50er Jahre forschte H.SCHMIDT an den gerade entdeckten Meßprinzipien flux-gate und Protonenresonanz [11]. Ende der 60er Jahre wurden diese Arbeiten von V.AUSTER weitergeführt. Ab 1979 wurde das erste Vektorprotonenmagnetometer der Welt mit kleinen Zylinderspulen in den Routineeinsatz überführt [12]. Infolge der Einzelmessung und der Netzempfindlichkeit konnte dieses Gerät jedoch nie die klassischen Registrierungen ablösen. Das gleiche trifft für die Messung [1] der Totalintensität zu..

1985 begann der Autor mit der Entwicklung eines seetauglichen Versuchsgradiometers zur Detektierung von Seeminen. Für diesen Zweck eignet sich auch nach dem heutigen Stand der Wissenschaft ein selbstschwingendes Cs-Magnetometer optimal. 1987/88 wurde ein Versuchsquantenmagnetometer (VQM) fertiggestellt und zahlreiche Messungen an diversen Typen von Seeminen durchgeführt [13]. Während der Auseinandersetzung mit diesem Meßprinzip reiften Pläne zur Verbesserung der Meßgerätesituation am Geomagnetischen Observatorium Niemegek [14]. Es wurden sowohl ein Gerät zur Bestimmung der Deklination bzw. Inklination bei gleichzeitiger Messung der Totalintensität vorgeschlagen, als auch ein Magnetometer mit gegenüber dem herkömmlichen Protonenmagnetometer wesentlich verbesserten Parametern. Die Realisierung dieser Pläne scheiterte nicht zuletzt daran, finanzielle Mittel und geeignete Firmen für die Herstellung von Absorptionsgefäßen zu finden. Nach Gründung des GeoForschungsZentrums wurde die folgende Strategie zur Verbesserung des Gerätepools eingeschlagen: 1. Entwicklung eines neuartigen optisch gepumpten Magnetometers im eignen Haus. 2. Kooperation mit einem St. Petersburger Institut zur gemeinsamen Erforschung der Langzeiteigenschaften eines zweiten modernen optisch gepumpten Magnetometers. Nach langwierigen Verhandlungen mit dem Ioffe Institut, St. Petersburg (Russland), konnte von P. Kuleshov ein Cs-He-Magnetometer in Niemegek im März 1994 installiert werden [15]. Während des VIth IAGA Workshops on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing in Dourbes, Belgien im Sept. 1994 konnte das GFZ-Versuchsmuster eines K-Tandem-Magnetometers, das nach einem neuen Signalgewinnungsverfahren arbeitete [16,17], der internationalen Fachwelt vorgestellt werden. Die Meßresultate führten zur Entscheidung, Observatoriumsinstrumente nach diesem Verfahren im Projektbereich Geräteentwicklung des GFZ weiterzuentwickeln. Der Vorschlag, auch eine feldtaugliche Variante gemeinsam mit dem Ioffe Institut zu entwickeln, fand dagegen keine Resonanz.

2. Kurze Beschreibung der Arbeitsweise von Magnetometern

2.1. Flux-gate Magnetometer

In einem ferromagnetischen Spulenkern wird mit Hilfe eines meist sinusförmigen Erregerfeldes eine magnetische Induktion im kHz-Bereich induziert. Über eine Induktionsspule gewinnt man auf Grund der Nichtlinearität der B(H)-Kurve (Magnetisierung/Entmagnetisierung) ein nicht sinusförmiges Signal. Ist der ferromagnetische Spulenkern einem magnetischen Gleichfeld (z. B. dem Magnetfeld der Erde) ausgesetzt, so wird das Signal nicht sinusförmig (vgl. Abb.1). Die mathematische Behandlung dieser Übertragung zeigt, daß dann die 2. Harmonische ungleich Null ist (Amplitude $\sim F$).

Gewöhnlich ist der ferromagnetische Kern noch von einer dritten Spule umgeben, die von einem Gleichstrom durchflossen wird, so daß das umgebende Magnetfeld kompensiert wird

und am Ort des Kerns Null ist. Der Spulenstrom ist dann die Meßgröße, die über einen Tiefpass einem A/D-Converter zur weiteren Signalverarbeitung übergeben wird. Diese Meßgröße muß kalibriert werden.

Vorteile:

- durch Ausrichtung des Sensors in bestimmte Richtungen, lassen sich die Komponenten des magnetischen Feldvektors bestimmen
- 3 orthogonal ausgerichtete Sensoren liefern die gesamte Vektorinformation
- bei Verwendung eines magnetfreien Theodoliten lassen sich die Deklination und die Inklination einfach messen
- geringer Stromverbrauch
- kleine Baugröße

Nachteile:

- die Meßgröße muß kalibriert werden
- sehr starke Temperaturabhängigkeit [2,7]
- schlechte Langzeitkonstanz
- erzeugt ein eigenes Magnetfeld, so daß Schutzabstände zu anderen Magnetometern bis zu 3 m eingehalten werden müssen [7].

2.2. *Klassische Magnetometer*

Auch klassische Magnetometer sind in den letzten Jahren so umgerüstet bzw. neu entwickelt worden, daß sie modernen Anforderungen der Datenverarbeitung gerecht werden. Der sog. „Magnet am Faden“ wird dabei von einer Kompensationsspule, die über einen Regelkreis betrieben wird, in der Nulllage gehalten (vgl. Flux-gate-Magnetometer). Mechanische Probleme der Magnetaufhängung bzw. Lagerung spielen in dieser Betriebsweise nur eine untergeordnete Rolle. Wichtig ist vor allen Dingen die Temperaturstabilität der Kompensationsspule. Der Regelkreis arbeitet über eine Lichtquelle, deren Licht über die verspiegelte Stirnfläche des Magneten zu zwei Fotodioden reflektiert wird. In der Nulllage empfangen beide Fotodioden kein Licht. Auch wird das digitale Signal vom Spulenstrom abgeleitet. Zur Erfassung der vollständigen Vektorinformation benötigt man 3 Systeme.

Vorteile:

- einfache Komponentenmessung
- bei vorhandenen Magnetometern preiswerte Umrüstung
- die Temperaturstabilität ist oft besser als bei den Flux-gate-Magnetometern
- konstruktionsbedingte Tiefpaßfilterung

Nachteile:

- Basiswertbestimmung erforderlich
- Temperaturabhängigkeit
- falls alte klassische Geräte umgerüstet wurden, großer Platzbedarf

2.3. Protonenmagnetometer

Setzt man eine Probe mit einem möglichst großen Protonenanteil z. B. Wasser, Petroleum, Alkohol einem starken Magnetgleichfeld aus, so richten sich alle Kernspins nach diesem Magnetfeld aus. Die Probe wird polarisiert. Nach Abschalten dieses Magnetfeldes präzedieren die Kernspins um die Richtung des lokalen Erdmagnetfeldes mit einer Frequenz f_0 , die der Totalintensität F proportional ist:

$$f_0 = \gamma_p F$$

f_0 - Resonanzfrequenz, γ_p - Gyromagnetisches Verhältnis und
 F - Totalintensität des Erdmagnetfeldes

Das sog. gyromagnetische Verhältnis γ_p , enthält nur Naturkonstanten und wurde nach 1991 neu bestimmt zu [8]:

$$\gamma_p = 42,576375 \text{ Mhz T}^{-1}$$

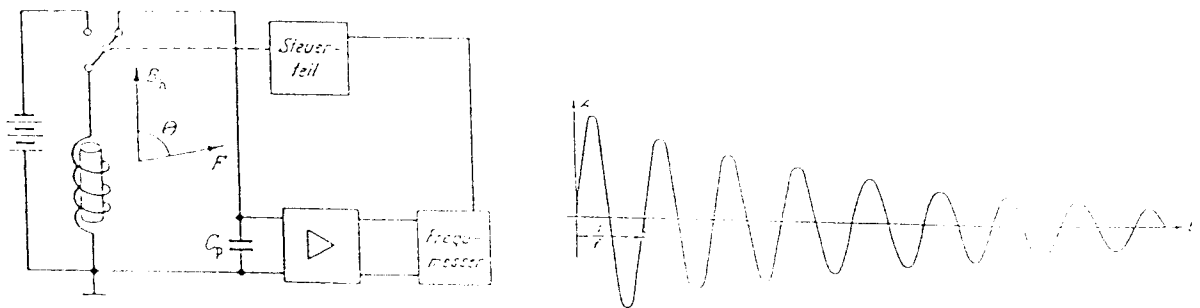


Abb. 2 Prinzipdarstellung eines Protonenmagnetometers sowie seines Nutzsignals

In Abb. 2 ist der prinzipielle Aufbau eines Protonenmagnetometers gezeigt. Mit Hilfe eines Gleichstroms wird die Probe mehrere Sekunden polarisiert. Nach Betätigung des Umschalters und einer Wartezeit von bis zu einer halben Sekunde kann man der umgebenden Spule die von der Präzessionsbewegung induzierte Spannung über einen Verstärker entnehmen. Das Signal ist eine gedämpfte Schwingung mit der Frequenz f_0 (vgl. Abb. 2). Die Frequenz kann je nach Signalqualität über einen Zeitraum bis zu einer Sekunde ausgewertet werden. Die Signalqualität hängt von vielen Faktoren ab, z.B.:

- der Stärke, Homogenität und Dauer der Polarisation
- dem Probevolumen
- der Reinheit der Probe
- der chemischen Zusammensetzung der Probe
- der Güte der umgebenden Spule
- den Verstärkereigenschaften
- der Homogenität des umgebenden Magnetfeldes

Die Signalamplitude ist proportional zur Stärke des umgebenden Magnetfeldes. Im Bereich des natürlichen Magnetfeldes der Erdoberfläche (ca. 20.000 ... 70.000 nT) hat man eine sehr kleine Signalamplitude, so daß man ein brauchbares Signal-Rausch-Verhältnis nur durch den Aufbau eines schmalbandigen Schwingkreises erhält. Die Spule empfängt nicht nur Signale aus dem Probevolumen sondern auch aus der Umgebung, was zum totalen Verlust des Nutzsignals führen kann. Um dem entgegenzuwirken, verwendet man seit ca. 10 Jahren in Reihe geschaltete Doppelspulen entgegengesetzten Wickelsinns mit zwei Probengefäßen. Dadurch wird der Einfluß äußerer Wechselfelder wirksam unterdrückt. Diese Maßnahme in Verbindung

mit Abschirmungen haben zu einer erheblichen Verbesserung der Gebrauchseigenschaften der Protonenmagnetometer geführt.

Aus der Arbeitsweise des Protonenmagnetometers folgt, daß nur diskontinuierliche Messungen möglich sind. Man kann in bestimmten Zeitabständen (entsprechend der Polarisationsdauer) Momentanwerte erfassen.

Die Auflösung des Protonenmagnetometers liegt auf Grund des relativ kleinen gyromagnetischen Verhältnisses (bei 50.000 nT beträgt die auszuwertende Frequenz nur 2,12 kHz) und des schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses im Zehntel-nT-Bereich. Die absolute Genauigkeit hängt theoretisch nur von atomphysikalischen Konstanten ab. Doch beobachtet man in der Praxis trotzdem eine Drift. Die Ursachen liegen dann in magnetischen Verunreinigungen des Meßkopfes und in der Drift der Zeitbasis (Quarzoszillator). Bestenfalls beträgt die absolute Genauigkeit 0,2 nT. Einer kanadischen Firma ist es in den letzten Jahren gelungen, ein sogenanntes Overhauser-Protonenmagnetometer auf den Markt zu bringen. In diesem Magnetometertyp wird zusätzlich zur Gleichfeldpolarisation eine Sättigung der Elektronenspinresonanz von Radikalen (Dynamic Nuclear Polarisation) erzeugt, wodurch eine Vergrößerung der Signalamplitude erreicht wird. Diese effektivere Polarisation und eine wesentlich verbesserte Methode zur Frequenzmessung ermöglichen eine theoretische Auflösung von 0,01 nT. Die absolute Genauigkeit wird zu 0,2nT angegeben bei einer Langzeitstabilität von 0,05 nT/Jahr. Dieses Magnetometer erlaubt bis zu 20 Messungen je Minute.

Vorteile:

- absolute Bestimmung der Totalintensität des magnetischen Feldvektors
- einfache Handhabung
- Kabellänge zwischen Sensor und Elektronik bis zu 100m möglich

Nachteile:

- Verletzung des Abtasttheorems [z.B.4]
- Erzeugung eines sehr starkes Magnetfeld während der Polarisation [7]
- die Messung der vollständigen Vektorinformation ist nur durch Zusatzspulen möglich
- relativ hoher Stromverbrauch (für Observatoriumseinsatz unwesentlich)
- empfindlich gegen Netzeinflüsse (50 Hz) [9]

2.4. Optisch gepumpte Magnetometer

Ähnlich wie beim Protonenmagnetometer wird bei optisch gepumpten Magnetometern ein atomphysikalischer Effekt zur mittelbaren Messung eines Magnetfeldes genutzt. Man bedient sich hierbei des magnetischen Moments von Elektronen paramagnetischer Atome. Jedoch wird nicht die freie Präzession der magnetischen Momente der Hüllenelektronen um die Magnetfeldachse beobachtet, sondern man erzwingt sie durch Einstrahlung der Resonanzfrequenz f_o (Tabelle 1).

$$f_o = \gamma_E * F$$

f_o - Resonanzfrequenz, γ_E - Gyromagnetisches Verhältnis und

F - Totalintensität des Erdmagnetfeldes

Element	Cs	K	He
$\gamma_E / \text{Mhz T}^{-1}$	$3.499 * 10^3$	$6,99 * 10^3$	$28.0 * 10^3$

Tabelle 1 : Gyromagnetisches Verhältnis der Elektronenhülle von verschiedenen Atomen in 1. Näherung

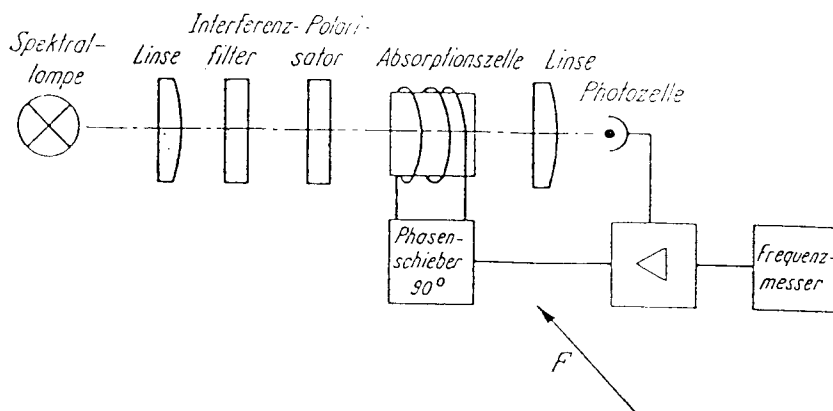


Abb 3 Prinzipdarstellung eines selbstschwingenden optisch gepumpten Magnetometers

Die Polarisation der Probe erfolgt mit Hilfe des optischen Pumpens. Während die Aufspaltung der Spektrallinien von paramagnetischen Atomen in einem äußeren Magnetfeld schon um die Jahrhundertwende von ZEEMAN entdeckt wurde (Ursache: das magnetische Moment der Elektronen), wurde die Methode des optischen Pumpens erst in den 50-er Jahren dieses Jahrhunderts herausgearbeitet. Kurze Zeit später existierte bereits das erste Labormuster eines optisch gepumpten Magnetometers [10]. In Abb.3 ist das Prinzip eines selbstschwingenden Magnetometers dargestellt.

Die gravierenden Unterschiede zum Protonenmagnetometer liegen im wesentlich (100-fach) größeren gyromagnetischen Verhältnis und im kontinuierlich anstehenden Signal. Damit ist eine größere Auflösung möglich als beim Protonenmagnetometer. Das selbstschwingende optisch gepumpte Magnetometer gestattet eine nahezu beliebige Auswertung seiner Resonanzfrequenz: Bildung von beliebigen Mittelwerten und/oder Momentenwerten. Die Einhaltung des Abtasttheorems ist bei optisch gepumpten Magnetometern gewährleistet. Auch schnelle Ereignisse werden erfasst. Vom Autor wurde nachgewiesen, daß Magnetfeldvariationen bis 2 kHz übertragen werden.

Die optisch gepumpten Magnetometer der 60er bis 80er Jahre besitzen einen systematischen Fehler, so daß ihre absolute Genauigkeit oft nicht besser als 10nT war.

- Vorteile:
- ständig anliegendes sinusförmiges Signal im Radiofrequenzbereich
 - hohe Empfindlichkeit bei kurzen Meßzeiten
 - von der Feldstärke unabhängige Signalamplitude
 - Messung auch in elektrisch gestörter Umgebung möglich
 - hoher Dynamikbereich
 - keine Erzeugung magnetischer Störfelder
- Nachteile:
- schlechtere Handhabung im Vergleich zum Protonenmagnetometer
 - eine Messung der vollständigen Vektorinformation ist nur durch Zusatzspulen möglich
 - hoher Stromverbrauch

3. *Signalgewinnungsverfahren und Linienbreite von optisch gepumpten Magnetometern*

3.1. *Selbstschwingende Magnetometer*

Nach dem Einschalten des Magnetometers wird das Arbeitsmedium optisch gepumpt, und die Absorptionszelle wird nach kurzer Zeit transparent. Über den Weg Fotozelle- Verstärker- Phasenschieber- Erregerspule (vgl. Abb.3) wird dem Arbeitsmedium Energie zugeführt. Es werden atomare Übergänge induziert und somit die Zelle weniger transparent. Die sich herausbildende Schwingung ist die Resonanzfrequenz.

3.2. *Magnetometer mit Linienabtastung*

Führt man der polarisierten Zelle des optisch gepumpten Magnetometers über einen Generator und die Erregerspule die Resonanzfrequenz f_0 zu, werden atomare Übergänge erzwungen, und die Absorptionszelle wird lichtundurchlässig, da die Quantenenergie für den erneuten Pumpvorgang verbraucht wird. Moduliert man das zu bestimmende Magnetfeld der Erde oder die Resonanzfrequenz, so kann man ein Fehlersignal gewinnen, das zur Steuerung eines spannungsgesteuerten Oszillators aufbereitet werden kann, und man erhält auch mit diesem Verfahren ein kontinuierliches Signal.

3.3. *Gegenüberstellung beider Signalgewinnungsverfahren*

Die selbstschwingende Anordnung zeichnet sich durch einen einfachen elektronischen Aufbau aus und arbeitet in einem großen Dynamikbereich. Auf Feldänderungen reagiert das System trägheitslos. Nach Betriebsunterbrechungen erholt sich der selbstschwingende Vorgang sofort. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist sehr gut.

Gegenüber elektrischen Störungen und Feldinhomogenitäten sind Geräte dieser Bauart sehr robust. Kritisch ist jedoch die Einhaltung der elektrischen Phasenverschiebung im Verstärker. In Abhängigkeit von der Linienbreite des verwendeten Absorptionsgefäßes entstehen Abweichungen von der Resonanzfrequenz und damit Meßfehler.

Bei der Methode der Linienabtastung erreicht man unter Verwendung desselben Absorptionsgefäßes (gleiche Linienbreite) eine höhere absolute Genauigkeit im Vergleich zum selbstschwingenden Magnetometer. Im Vergleich zum selbstschwingenden Magnetometer besitzen Magnetometer, die nach der Methode der Linienabtastung arbeiten, folgende Nachteile:

- eingengter Dynamikbereich
- langsame Erholung von einer Betriebsunterbrechung
- schlechte Übertragungsfunktion(vgl.Abb.4)
- erhöhter elektronischer Aufwand

3.4. *Fehlerdiskussion von optisch gepumpten Magnetometern [14]*

Theoretisch kann man ein optisch gepumptes Magnetometer sehr gut mit einem elektronischen Oszillator vergleichen. Es besteht aus einem Verstärker, einem frequenzbestimmenden Bauteil

und der Rückkopplung. Man kann zeigen, daß die Güte des frequenzbestimmenden Bauteils soweit verbessert werden kann, daß die Eigenschaften der Elektronik keinen Einfluß mehr auf die Konstanz der erzeugten Frequenz haben. Die Güte hängt im wesentlichen von der Linienbreite des Resonators ab. Hat man eine breite Linie, kann man die Resonanzfrequenz durch Veränderung der Verstärkereigenschaften in einem gewissen Bereich hin- und herschieben. Hat jedoch das frequenzbestimmende Teil nur einen sehr schmalen Resonanzbereich, kann durch Änderung der äußeren Parameter keine Frequenzänderung erreicht werden, und es kommt nur zum Verlöschen der Resonanz, wenn die Schwingbedingung nicht eingehalten wird.

In Abb.5 sind die Resonanzlinien von verschiedenen Absorptionsgefäßen optisch gepumpter Magnetometer annähernd im gleichen Maßstab aufgezeichnet. Die einfache Cs-Zelle besitzt eine breite Resonanzkurve. Das Doppelzellenmagnetometer verspricht schon bessere Eigenschaften. Um eine Zehnerpotenz ist die Resonanzkurve der He-Cs-Zelle schmaler. Die Resonanzlinien moderner K-Zellen sind um eine weitere Größenordnung schmaler.

Die Atomstruktur der Alkalimetalle ist kompliziert. Deshalb besitzen alle Atome mehr als eine Zeemann-Aufspaltung, was zu komplizierten Resonanzstrukturen führt. Normale Alkali-Absorptionszellen besitzen deshalb nicht nur breite Linien sondern auch einen systematischen Fehler, der sich in der Orientierungs-, Licht- und Temperaturabhängigkeit äußert. Trotz einfacherer Atomstruktur des He-Atoms besitzt auch ein konventionelles He-Magnetometer einen systematischen Fehler.

Mehr als drei Jahrzehnte wurde an der Beseitigung des systematischen Fehlers weltweit gearbeitet [18]. Nach der Auffassung des Autors waren dabei zwei Teams besonders erfolgreich: das A.F. Ioffe Institut mit dem Alkali-Helium Magnetometer [19] und das Vavilov Institut mit der K-Absorptionszelle (beide in St. Petersburg).

Die Herstellung von Absorptionsgefäßen und Spektrallampen hat sophistischen Charakter und ist das Geheimnis weniger Experten.

4. Das K-Tandem Magnetometer des GFZ Potsdam

4.1. Die Grundidee

Das Problem der Schmalbandmagnetometer besteht darin, ein ausreichendes dynamisches Verhalten zu realisieren, einen kompakten Meßkopf zu besitzen und kein magnetisches Störfeld zu erzeugen.

Die Idee, die guten Eigenschaften beider Signalgewinnungsverfahren zu einem Magnetometer hoher absoluter Genauigkeit zu vereinen, ist nicht neu [20]: Das Tandemmagnetometer besteht aus einem selbstschwingenden breitbandigen Magnetometer, das allen Variationen des umgebenden Magnetfeldes träge folgt aber eine schlechte absolute Genauigkeit besitzt (± 2 nT bis ± 15 nT). Darüber wird eine Helmholtz-Spule gestülpt, die die gleiche Ausrichtung besitzt wie das umgebende Magnetfeld. Ein dort durchfließender Gleichstrom verändert das Magnetfeld und somit die Resonanzfrequenz des selbstschwingenden Magnetometers. Die Frequenz wird entsprechend dem gyromagnetischen Verhältnis der verwendeten Resonanzfrequenzen vervielfacht und dem Schmalband-Magnetometer zugeführt, das nach dem Prinzip der Linienabtastung arbeitet. Das selbstschwingende Magnetometer mit der Spule zur Gleichfelderzeugung wird also wie ein stromgesteuerter Oszillator verwendet. Dieser Oszillator folgt aber gleichzeitig den Variationen des zu bestimmenden Magnetfeldes, was ein normaler Generator nicht kann. Dieser würde bei schnellen Änderungen (Variationen) des Magnetfeldes die sehr schmale Linie des K-Sensors verlieren.

Dieser Typ von Magnetometer benötigt viel Platz, da beide Sensoren weit voneinander getrennt werden müssen, andernfalls wirkt das erzeugte Gleichfeld auch am Ort der schmalbandigen Zelle.

In dem neu entwickelten Magnetometer des GFZ wurde dieser Nachteil beseitigt und ein kompakter Sensor geschaffen (Fig.4, Anhang).

In Kap. 4.3 wurde im Zusammenhang mit der Beschreibung des selbstschwingenden Magnetometers auf die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der elektrischen Phasenverschiebung hingewiesen. Diese Eigenschaft wird im GFZ-Magnetometer bewußt ausgenutzt. Die Phase wird spannungsgesteuert, und das breitbandige selbstschwingende Magnetometer wird mit Hilfe der Spannungsregelung vom schmalbandigen K-Magnetometer kalibriert. Die verwendeten K-Absorptionszellen des Vavilov-Instituts, St. Petersburg, liefern hierbei eine theoretisch absolute Genauigkeit von 10 pT. Das für den Observatoriumseinsatz konzipierte Instrument besitzt folgende Eigenschaften :

- hohe absolute Genauigkeit < 0,1 nT
- hohe Langzeitstabilität 10 pT/Jahr
- hohe zeitliche u. magnetische Auflösung < 10 pT (bei $1/10$ sec Frequenzmeßzeit)
- Übertragung von Erdfeldvariationen bis 2 kHz
- keine Störmagnetfelderzeugung
- Orientierungsabhängigkeit < 10 pT/10° (ab 40° Abweichung von der optimalen Lage Verlöschen des Signals)
- hoher Dynamikbereich 20.000 ... 80.000 nT
- Temperaturbereich +10°C bis +35°C
- Kabellänge Sensor-Elektronik 20m

4.2. *Physikalisch- technische Beschreibung*

In einem selbstoszillierenden Magnetometer wird das Signal der Photodiode verstärkt und auf die RF-Spule (RF-radio frequency) des Magnetometers gegeben (vgl. Abb. 3). Solch ein System schwingt mit seiner Resonanzfrequenz für den Fall, daß die Summe aller Phasenverschiebungen gleich Null ist.

$$\varphi = 0 = \varphi_K + \varphi_V + \varphi_{opt}. \quad (1)$$

Darin sei φ_K die Phasenverschiebung im passiven Teil (Sensor), φ_V im Verstärker und φ_{opt} im optischen Teil. Da φ_{opt} gleich -90° ist, muß φ_V gleich $+90^\circ$ betragen. Wenn sich durch Änderung der elektrischen Eigenschaften des Verstärkers φ_V um den Betrag $\Delta \varphi_V$ ändert, muß sich im frequenzbestimmenden passiven Teil zwangsläufig ebenfalls eine Phasenverschiebung $\Delta \varphi_K$ einstellen, für die wieder gilt

$$\varphi = 0 = \Delta \varphi_V + \Delta \varphi_K \quad (2)$$

(φ_{opt} sei const.)

Das wird durch die Frequenzänderung

$$\Delta f = (df / d\varphi_K) \Delta \varphi_K$$

erreicht.

Mit Gleichung (2) kombiniert wird

$$\Delta f = - (df / d\varphi_K) \Delta\varphi_V$$

Eine Phasenverschiebung im Verstärker bewirkt also eine Frequenzverschiebung, die nur vom Faktor $(df / d\varphi_K)$ bestimmt wird, der ein Maß für die Linienbreite ist.

Für kleine Frequenzänderungen variiert die Phase nach der Beziehung $\cot^{-1} (2 \Delta f/L)$, worin L die Linienbreite ist.

Für ein Cs-Absorptionsgefäß, das nach Anleitung des Autors in Leipzig hergestellt worden ist, ist in Abb. 6 die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der elektrischen Phasenverschiebung des Verstärkers dargestellt.

Die Linienbreite, die ein Absorptionsgefäß liefert, hängt von folgenden Bedingungen ab:

- der Atomstruktur des verwendeten paramagnetischen Stoffes
- der Gefäßform
- vom Pufferstoff
(Edelgase, Druck, Wandbeschichtungen mit Paraffinen oder anderen langkettigen Verbindungen)
- der Temperatur
- der Art der Betriebsweise
(Stärke des Pumplichtes, Amplitude der Frequenz-Einstrahlung)

Cs- Gefäße haben darum Linienbreiten von ca. 50 nT bis zu einigen 100 nT. Die Resonanzkurve des Cs setzt sich auf Grund der Atomstruktur aus 8 Einzellinien zusammen, die sich im Magnetfeld der Erde nicht trennen lassen, wohl aber in stärkeren Magnetfeldern. Wegen der Art des optischen Pumpens kommt es noch zu Unsymmetrien, die sich unter anderem in einer Orientierungsabhängigkeit äußern ¹⁾.

Nach Optimierung aller Parameter erreicht man bestenfalls eine absolute Genauigkeit von ± 2 nT. Die vier Zeemann-Übergänge des Isotopes K-39 liegen in einem umgebenden Magnetfeld von 50.000 nT etwa 70 nT (=500 Hz) auseinander, so daß die Linienbreite von K-Absorptionsgefäßen in der selben Größenordnung liegen wie die der Cs-Absorptionsgefäße, da auch in diesem Fall nur die Einhüllende beobachtet werden konnte.

Erst nach jahrzehntelangen Experimenten [18] ist es im Vavilov Institut, St. Petersburg, gelungen, Absorptionsgefäße herzustellen, die es gestatten, die Resonanzen im Bereich des Erdmagnetfeldes einzeln aufzulösen.

Im GFZ-Tandem-Magnetometer wurde die Linienbreite des selbstschwingenden Cs-Magnetometers ²⁾ so gewählt, daß ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis und damit eine hervorragende Kurzzeitstabilität gegeben ist und andererseits die erforderliche Frequenzverschiebung erreicht wird :

Zum Beispiel, in einem Feld von 50.000 nT ist die Resonanzfrequenz des Atomübergangs ³⁹ K $m_2 \rightarrow m_1$

$$f_K = 7,00466 \times H - 3 \times 1,063 \cdot 10^{-7} \times H^2 + \dots$$

$$f_K = 349,435 \text{ kHz} \quad (f \text{ in Hz, } H \text{ in nT})$$

Die entsprechende verdoppelte Cs-Frequenz beträgt 349,700 kHz. Es ist also eine Verschiebung von ≈ 150 Hz (~ 40 nT) erforderlich. Eine Helmholtz-Spule in früheren Tandem-Magnetometern (Abb. 7) mußte dieses Feld erzeugen. Das Prinzipschaltbild des als VCO

¹⁾ Eine ausführliche Fehlerdiskussion zu optisch gepumpten Magnetometern findet man in [14].

²⁾ Für das Cs-Magnetometer sprechen nicht nur die günstigen Eigenschaften, sondern auch die vorhandenen Erfahrungen. Für stationäre Geräte ist der erhöhte Aufwand für 2 Spektrallampen unerheblich.

(voltage controlled oscillator) arbeitenden Cs-Magnetometers mit dem Schaltbild der elektrischen Phasenverschiebung ist in Abb. 8 dargestellt.

Die Ausgangsfrequenz des als VCO arbeitenden Cs-Magnetometers wird zur Elektronikeinheit übertragen, dort verdoppelt und dem als Zähler arbeitenden Computer per Lichtwellenleiter übergeben (siehe Abb. 9). Parallel dazu erfolgt eine zweite Verdopplung mit Hilfe einer PLL-Einheit, die gleichzeitig die Resonanzfrequenz mit 5 Hz zur Speisung der K-Spule moduliert. Das Signal der Photodiode wird verstärkt und dem „lock-in demodulator“ zugeführt. Das integrierte Ausgangssignal kontrolliert die Phase und damit die Frequenz. Bei geschlossener Regelschleife wird die Cs-Frequenz ständig innerhalb der Resonanzlinie der schmalen K-Linie festgehalten. In Abb. 10 ist die detaillierte technische Realisierung des Instruments gezeigt. Der Sensor (Fig. 4 Anhang) besitzt einen Durchmesser von 340 mm und eine Höhe von 600 mm. Er besteht aus einer massiven Plattform und einem Halter für beide Sensoren. Der K-Sensor befindet sich im oberen Teil des Sensors, um einen möglichst großen Abstand zu eventuellen magnetischen Störeinflüssen zu haben. Bei der Auswahl der Materialien und während der Bearbeitung wurde größte Sorgfalt aufgewendet, um jede magnetische Kontamination (z.B. Span eines Werkzeuges oder magnetische Materialien) des gesamten Sensors zu vermeiden. Der Sensor wird durch zwei zylindrische Hüllen geschützt. Die innere besteht aus Plexiglas und die äußere dient der Thermoisolation. Die elektronische Einheit ist in Fig. 5, Anhang, gezeigt. Die für den optischen Pumpvorgang nötigen Spektrallampen werden mit Hilfe von HF-Energie zum Leuchten angeregt. Es war deshalb ein besonderes Problem, die einschlägigen Vorschriften (EMV, VDE) bezüglich der Abstrahlung von HF-Energie einzuhalten. Der hochempfindliche Breitbandverstärker des selbstschwingenden Cs-Magnetometers verstärkte nicht nur das gewünschte Signal sondern jede elektromagnetische Strahlung in seiner Umgebung. Dieses Problem konnte erst mit einem besonderen mechanischen Aufbau in Verbindung mit einem Lichtleiterbündel gelöst werden:

Die Photozelle befindet sich im HF-dichten Verstärkergehäuse und wirkt deshalb nicht mehr als Antenne. Das Signal vom Sensor gelangt über das speziell angefertigte Lichtleiterbündel zur Photozelle. Damit entfällt auch die Antennenwirkung des Kabels.

Die optimale Betriebstemperatur des K-Sensors liegt bei 35 bis 40° C und die des Cs-Sensors bei 30° C. Eine Beheizung des Sensors ist demzufolge unerlässlich, wobei die Heizung aber kein Magnetfeld erzeugen darf. (Ein Strom von 1 mA, der durch einen geraden Leiter fließt, erzeugt ein Magnetfeld der Stärke 2 nT in 10 cm Entfernung.) Angesichts dieser Tatsache kann man sich vorstellen, welche Probleme eine elektrische Heizung für ein hochpräzises Magnetometer liefert.

Die Ergebnisse des ersten Langzeittests zwischen modernen optisch gepumpten Magnetometern befinden sich im Anhang.

5. Zusammenfassung und Diskussion

Wie der Vergleich zwischen den Magnetometern zeigt, liefern die modernen optisch gepumpten Magnetometer ein um mindestens eine Größenordnung besseres Ergebnis als das derzeitige Spitzengerät der Protonenmagnetometer. Nach Fertigstellung des zweiten K-Tandem-Magnetometers des GFZ sind auch Vergleiche bis in den msec-Bereich möglich, was eine neue Dimension der Magnetfeldbeobachtung erschließt. Die bisher noch unzureichende Lebensdauer der K-Spektrallampen von durchschnittlich 6 Monaten muß verbessert werden. Für eine feldtaugliche Variante des Tandem-Magnetometers wäre eine Kombination von Cs/Cs-He- Magnetometer geeignet. Der etwas verringerten absoluten Genauigkeit ständen andere Vorteile wie geringerer Energieverbrauch u. a. gegenüber.

Auch die Entwicklung eines Magnetometers für die Komponenten-Messung für den Einsatz als absolut messendes Variometer, zur Stabilisierung von Magnetfeldsimulatoren und zur handlichen Vermessung von Säkularpunkten bei der Landesaufnahme wäre eine erfolgsversprechende Herausforderung.

Weitere Anwendungen in der Geologie, Vulkanologie, Lithosphärenstress und Erdbebenforschung bieten sich an, besonders wegen der hohen Langzeitstabilität und der Möglichkeit, auch Magnetfeldvariationen bis in den kHz-Bereich hinein registrieren zu können. Ein weiterer großer Vorteil dieser Magnetometer liegt in der einfachen Signalübertragung per Lichtleitkabel, die gegenüber allen elektromagnetischen Störungen (EMI) unempfindlich sind. Seit der Inbetriebnahme der optisch gepumpten Magnetometer 1994 im geomagnetischen Observatorium des GFZ gab es noch keinen einzigen Ausfall infolge eines Gewitters. Nach Kenntnis des Autors wird nur im GFZ mit dieser neuen Gerätegeneration kontinuierlich registriert. Im geomagnetischen Observatorium Dourbes, Belgien, werden sporadisch Kurzzeitexperimente mit modernen optisch gepumpten Labormustern aus Kanada und Russland durchgeführt. Ergebnisse darüber wurden bisher nicht veröffentlicht.

Danksagung

Zum Abschluß möchte ich es nicht versäumen, mich bei meinem Projektleiter Herrn Dr. R. Stecher und bei Herrn Dr. A. Best vom Observatorium Niemegek dafür zu bedanken, daß aus meiner Vision ein Projekt wurde.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des Projektbereiches „Geowissenschaftliche Gerätetechnik“, der Zentralen Werkstatt sowie des Observatoriums Niemegek die in Zusammenarbeit an der Realisierung des Projekts mitgewirkt haben, bedanke ich mich an dieser Stelle besonders herzlich. Stellvertretend für alle, möchte ich namentlich nur Herrn M. Schüler und Herrn R. Paul nennen.

Literatur

- | | | |
|-----|------------------------------------|--|
| [1] | A. Best
H.-J. Linthe | Present Niemegek Observatory Instruments
Proceedings of „ VII th IAGA Workshop on Geomagnetic
Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“,
Sept. 8th - 15th, 1996, Niemegek, Germany |
| [2] | A. Grafe
E. Pulz | Results of Test of MAG 03
Proceedings of VI th IAGA Workshop „Geomagnetic
Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“,
Sept. 18th - 24th, 1994, Dourbes, Belgium |
| [3] | A. Best
H.-J. Linthe
E. Pulz | About the Experience with GEOMAG System at the Niemegek
Observatory Proceedings of VI th IAGA Workshop
„Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and
Processing“, Sept. 18th - 24th, 1994, Dourbes, Belgium |
| [4] | E. Pulz
H.-J. Linthe | Eine Bestandsaufnahme der Beobachtungstechnik für die
Totalintensität am Niemegeker Observatorium
Scientific Technical Report GFZ STR97/20 |

- [5] A. Best
H.-J. Linthe
E. Pulz Results of Comparison Between Several Scalar Magnetometers
Proceedings of VIth IAGA Workshop „Geomagnetic
Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“,
Sept. 18th - 24th, 1994, Dourbes, Belgium
- [6] I. Hrvoic Requirements for Obtaining High Accuracy with
Proton Magnetometers
Proceedings of VIth IAGA Workshop „Geomagnetic
Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“,
Sept. 18th - 24th, 1994, Dourbes, Belgium
- [7] E. Pulz
H.-J. Linthe Verträglichkeitsprüfung zur GEOMAG-Station zwecks
Umsetzung der Sensoren in das Variationshaus.
Temperaturabhängigkeit der Sensoren
Scientific Technical Report GFZ 09/95
- [8] O. Rasmussen The Proton Gyromagnetic Ratio
IAGA NEWS, No.30, Boulder, 1991
- [9] T.D.G. Clark
A. Carruthers
J.G.Carrigan A Discussion on the Problem of Main Interferences at Magnetic
Observatories
Proceedings of VIth IAGA Workshop „Geomagnetic
Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“,
Sept. 18th - 24th, 1994 Dourbes, Belgium
- [10] H.G.Dehmelt Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms
Phys. Rev. 105, (1957 b), No. 6, 1924
- [11] H. Schmidt Beobachtungen der Totalintensität mit Protonenmagnetometern
Jahrbuch 1959 des A. Schmidt Observatoriums für
Erdmagnetismus in Niemeck, Akademie Verlag, Berlin 1962
- [12] V. Auster Kernresonanz-Komponenten-Messtechnik, Jahrbuch 1983 des
A. Schmidt Observatoriums für Erdmagnetismus Niemeck
Akademie Verlag, Berlin 1985
- [13] E. Pulz Versuchsquantenmagnetometer
Technische Beschreibung und Bedienungsanleitung
Bericht, Niemeck April 1988
- [14] E. Pulz Applikation von Quantenmagnetometern
Physikalisch - technische Fehleranalyse
Dissertation AdW, Berlin 1989
- [15] Agreement on carrying out of joint scientific-technical work
„ Investigation of long-term stability of Cs-He magnetometer
with HF plasma heating for geomagnetic observation and
metrology „

between A.I. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg, Russia, Director S. Gordeev and GFZ, Director Prof. R. Emmermann

- [16] GFZ Potsdam
(E. Pulz) Verfahren zur Signalgewinnung von schmalbandigen optisch gepumpten Magnetometern
Pat.-Nr. 195151739
- [17] E. Pulz
K.-H. Jäckel A New Design for an Optical Pumped Tandem Magnetometer
Proceedings of the VIIth IAGA Workshop „Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“, Sept. 9th - 14th, 1996, Niemegek, Germany
- [18] E.B. Alexandrov
V.A. Bonch-Bruevich Optical Pumped Atomic Magnetometers after three Decades
Optical Engineering, 31 (1997) No. 4, p.711
- [19] P.P. Kuleshov
E.V. Blinov
A.E. Shilov Cesium-Helium Magnetometer with HFPH for High Accuracy Magnetic Field Measurements
Proceedings of VIth IAGA Workshop „Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing“, Sept. 18th - 24th, 1994, Dourbes, Belgium
- [20] I.H.Allen
P.L.Bender Narrow-Line Rubidium Magnetometer for High Accuracy Field Measurements, J. Geomagn. Geoelectr. 24 (1972) p. 105

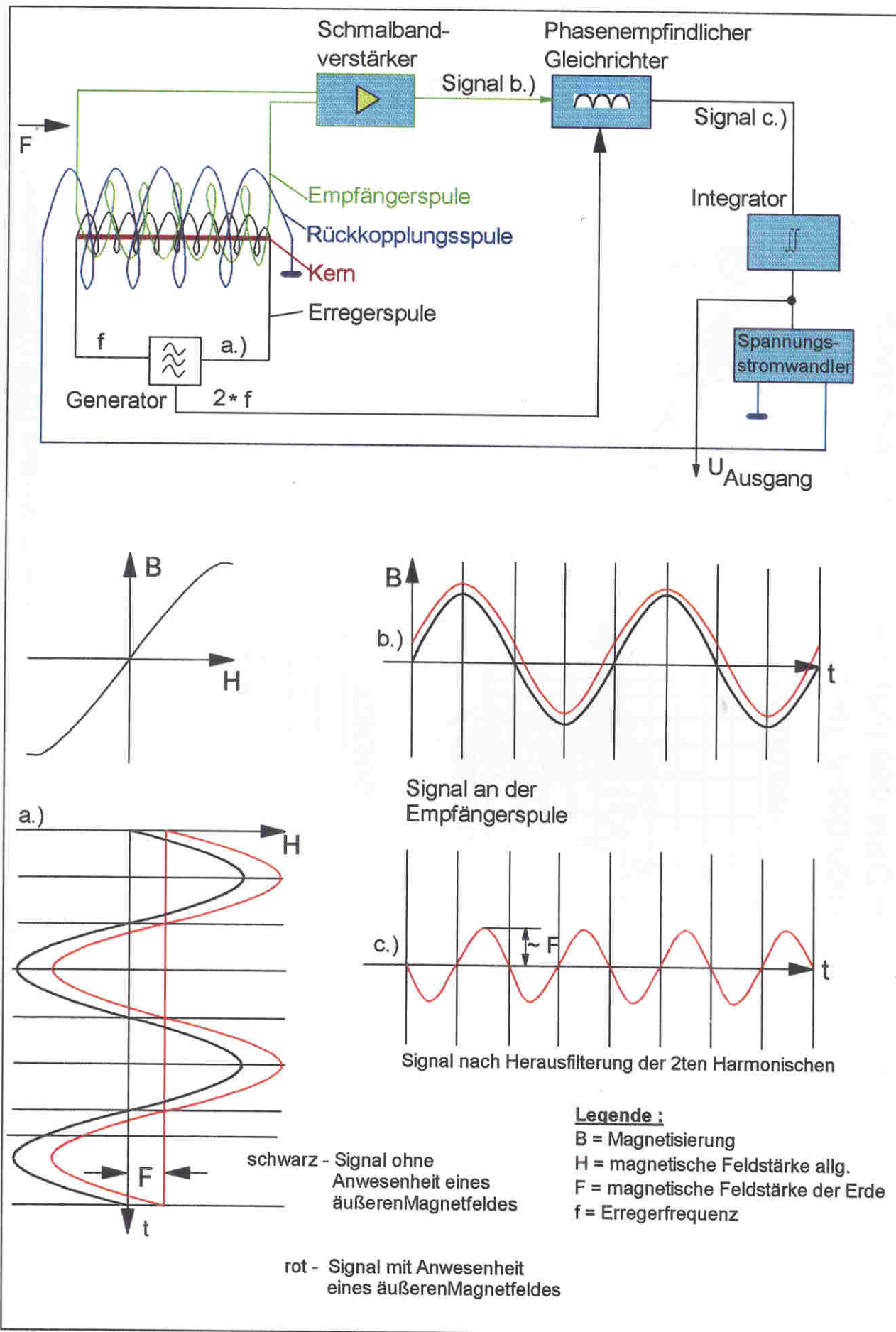
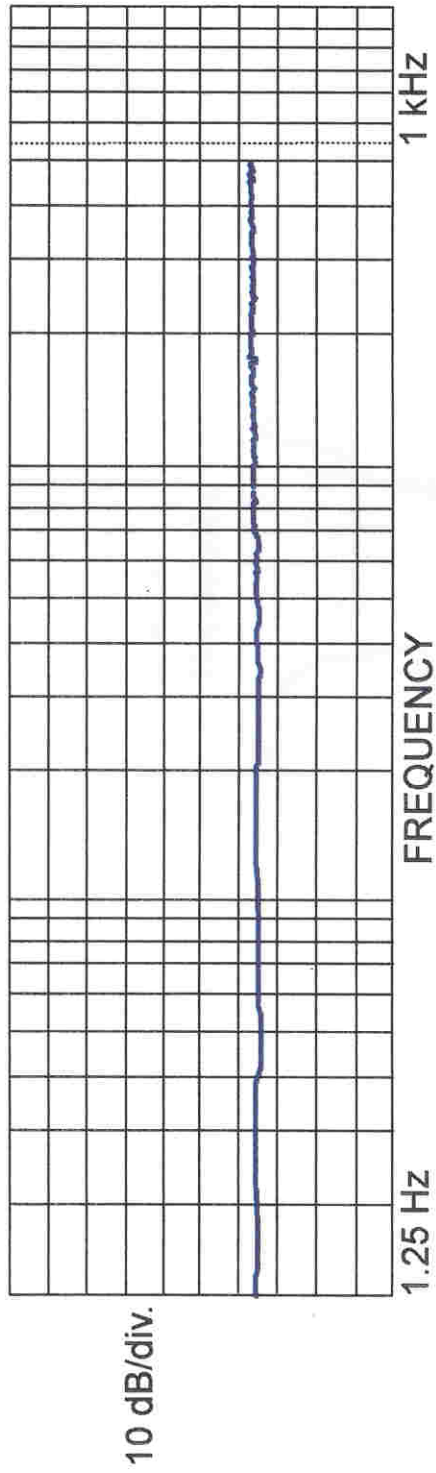


Abb.1 Prinzip eines flux-gate Magnetometers

New K-tandem OPM (GFZ Potsdam)

R9211B FFT SERVO ANALYZER



Cs-He OPM (Ioffe Institute, St. Petersburg), Mz -Type

R9211B FFT SERVO ANALYZER

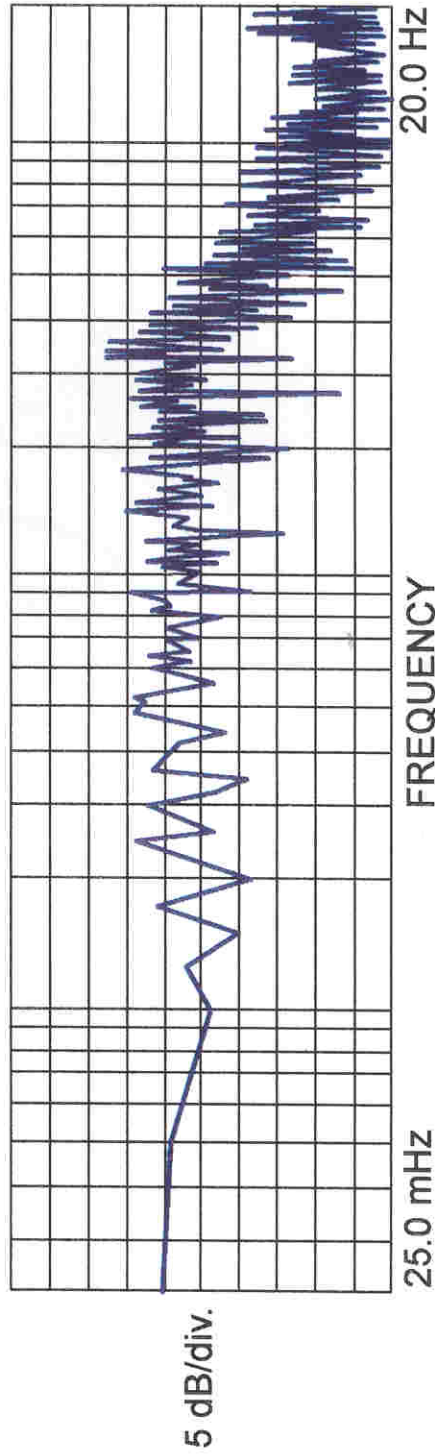


Abb. 4 Antwort - Funktion des K-Tandem-OPM des GFZ, Potsdam (a.)
und des Cs-He-OPM des Ioffe Instituts, St. Petersburg

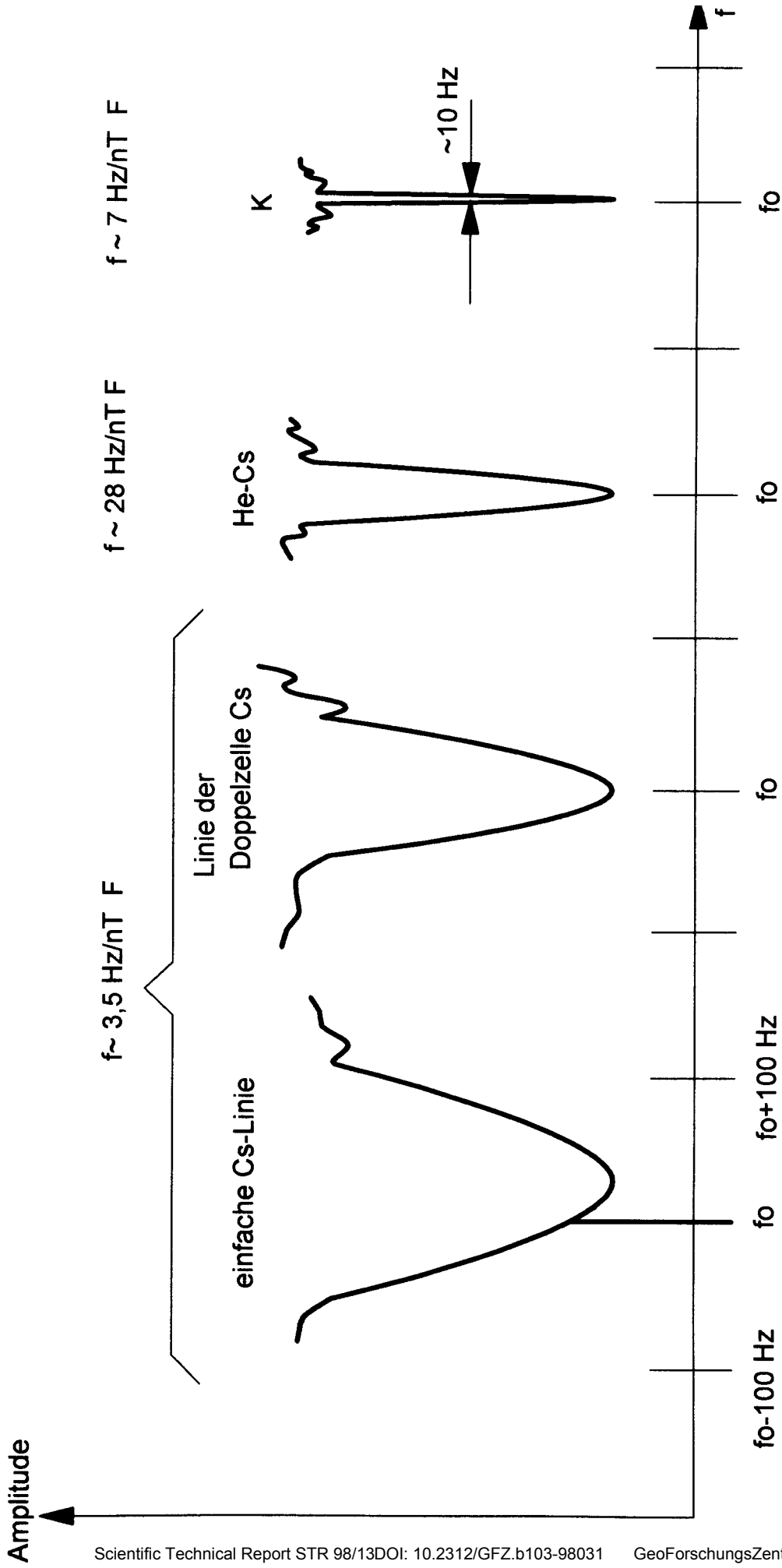


Abb.5 Linienbreiten von Cs-, He-Cs- und K-Magnetometern im Vergleich

f_0 = dem tatsächlichen Feldwert entsprechende Frequenz

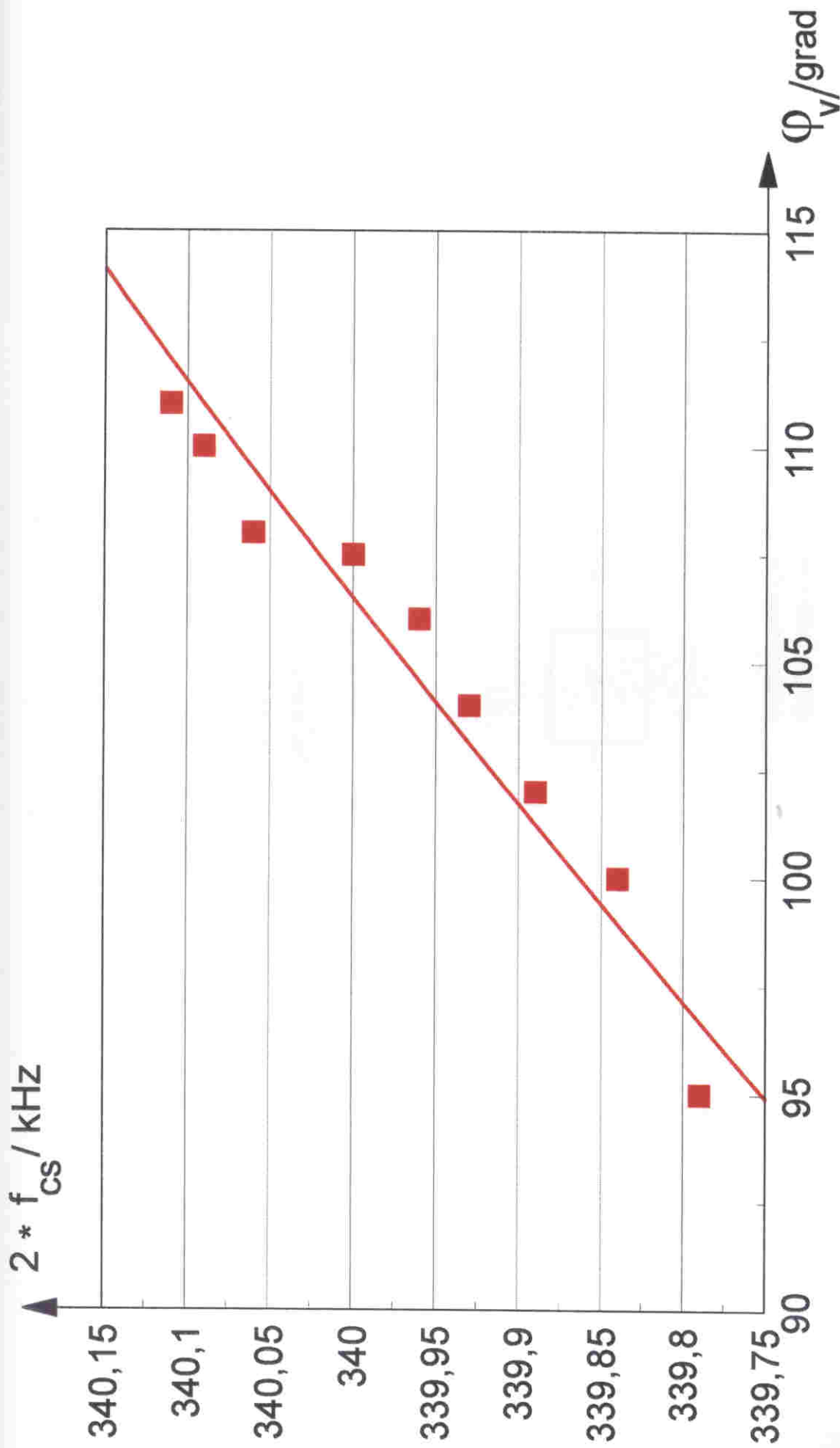


Abb.6 Resonanzfrequenzverschiebung bei einem selbstschwingenden Cs-Magnetometer in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung φ_V des Verstärkers

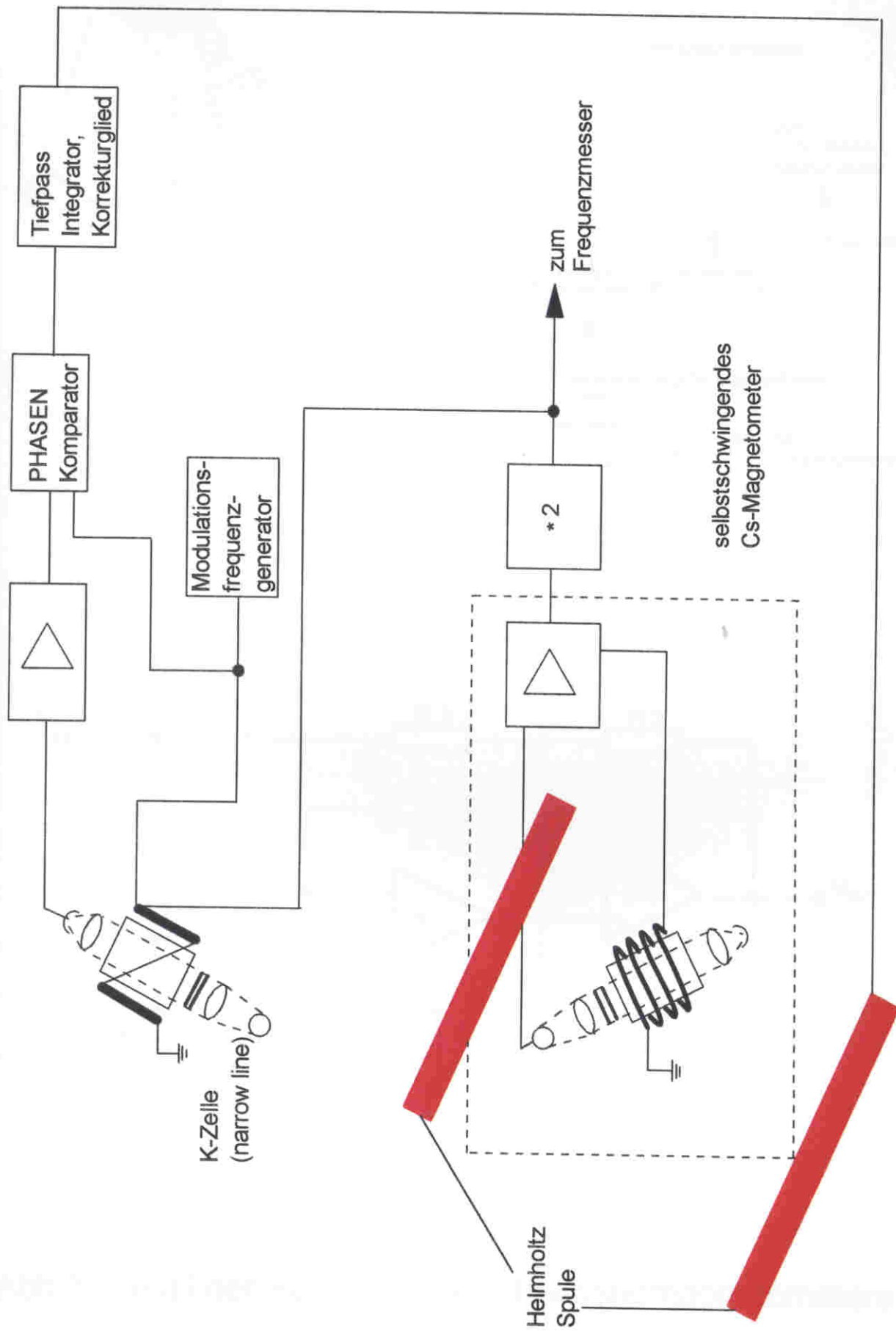


Abb. 7 Tandem-Magnetometer - Blockschaltbild

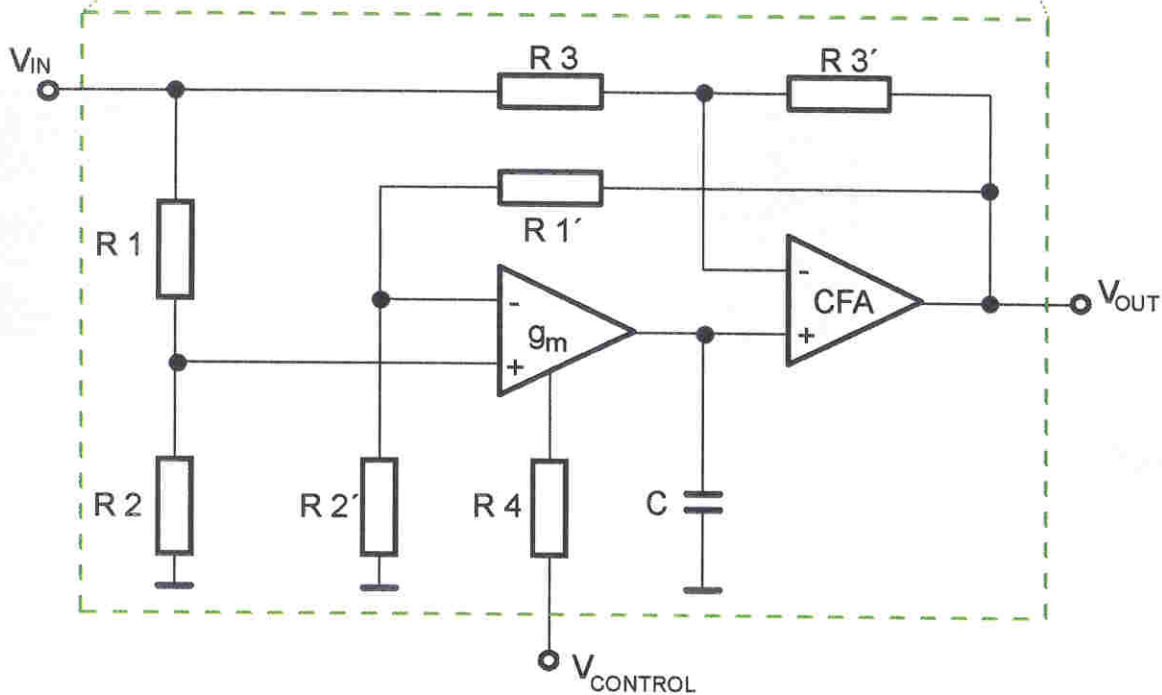
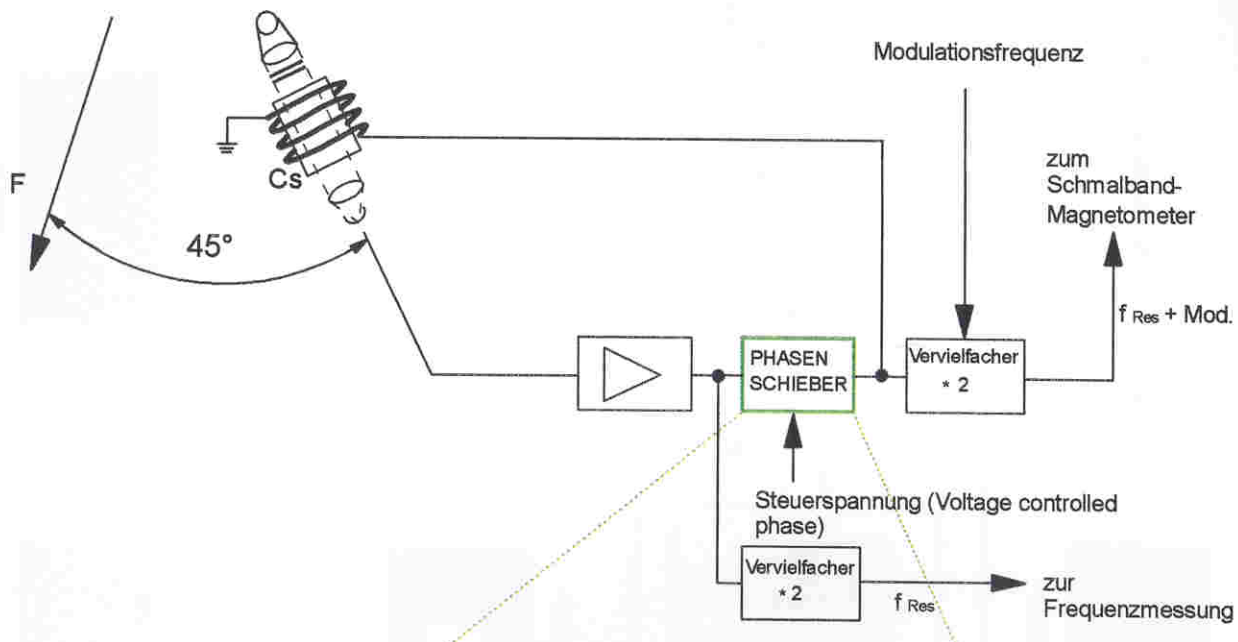


Abb.8 Detail der Schaltung des Breitbandmagnetometers

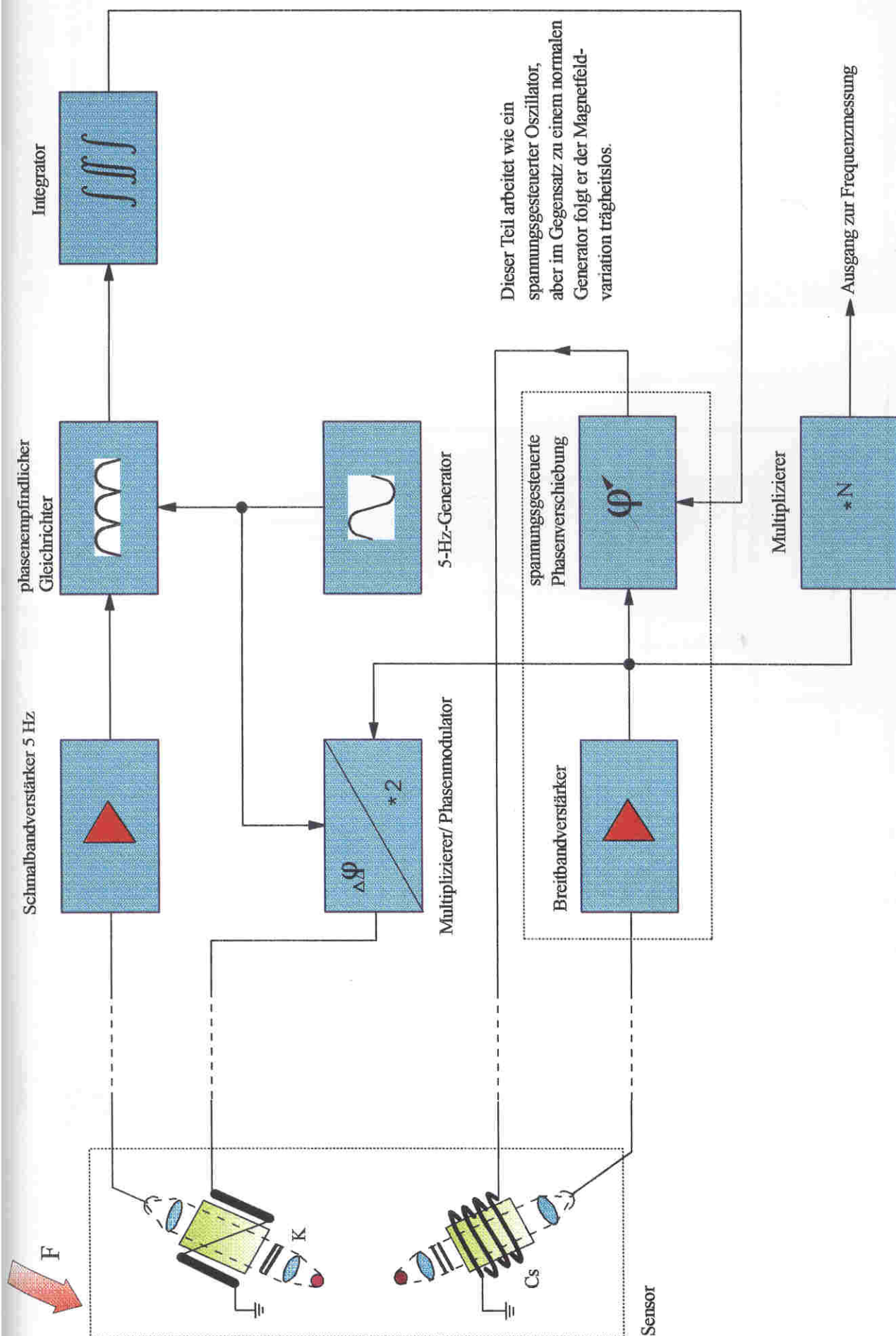


Abb. 9 Block Diagramm des K-Tandem-Magnetometers

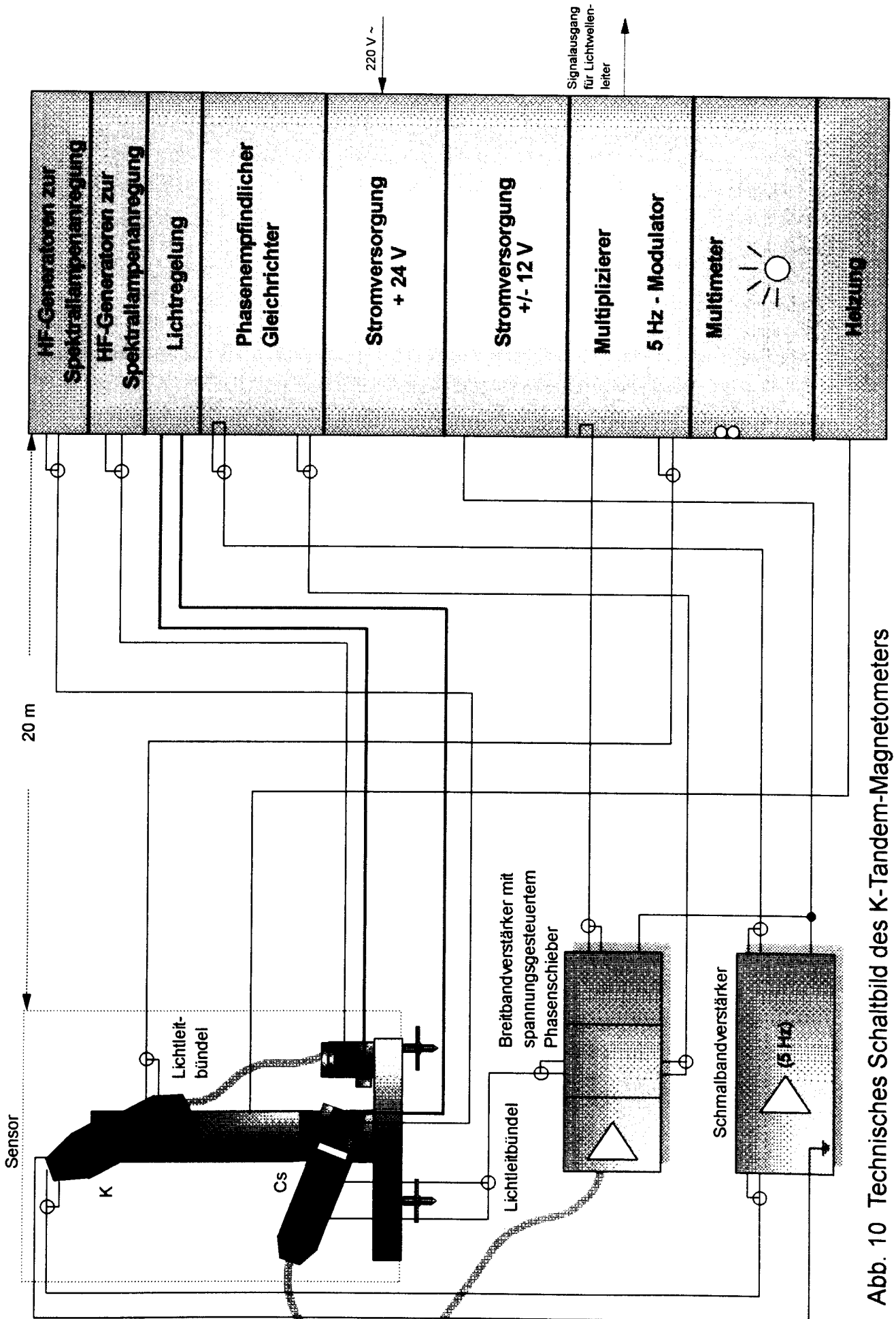


Abb. 10 Technisches Schaltbild des K-Tandem-Magnetometers

Anlage

nach Vortrag IAGA Tagung Uppsala, 1997, Aug. 4.-16.

Modern Optically Pumped Magnetometers in Test - A Long-Term Stability Investigation of Scalar Magnetometers-

E. Pulz, H.-J. Linthe, K.-H. Jäckel, GFZ Potsdam

1. Introduction

In recent years, optically pumped magnetometers (OPMs) have been typically used in gradiometer applications and not for absolute measurements. This is despite the fact that their history goes back to the fifties [1]. Surely, the reason is the systematical error of OPMs from the earlier generation, which can be seen in the orientation and temperature dependence of the results, and often show insufficient absolute accuracy. On the other hand, the continuous output signal and the high gyromagnetic ratio which is more than 100 times that of the proton precession magnetometer (PM) provides high sensitivity as well as high time resolution. This makes these instruments ideal for application as a gradiometer [2].

In order to reduce the systematic error, many investigations over a period of three decades have been carried out [3]. In particular, two groups of scientists in St. Petersburg, Russia, were very successful. The Alkali-Helium magnetometer and the narrow-line potassium magnetometer were developed.

We have both types of modern OPMs in the GFZ Potsdam, A.-Schmidt-Observatory, Niemegk, so that it was possible to start a long-term experiment in 1994. The main purpose of the investigations was to demonstrate that modern OPMs have much better properties - absolute accuracy, long-term stability and reliability- in comparison to older OPMs and modern PMs. Here, in contrast to earlier investigations (Fig. 1) comparisons between different types of PMs and OPMs were carried out during a much longer test period than in earlier experiments.

2. The Instruments (Fig. 2)

The Cs-He magnetometer, with high frequency plasma heating, was investigated and built at the A. F. Ioffe Institute, St. Petersburg (Russia) [4]. At first it was operated at the GFZ by an agreement between Ioffe Institute and GFZ. Later it was bought by the GFZ. The Alkali-He magnetometer does not show a systematic error, unlike the simple He-magnetometer.

Characteristics of this instrument:

Temperature range: +15 to +35 °C
Total Field range : 48,000 +/-4,000 nT
Gradient Tolerance: 4 nT per m
Sensitivity : 0.01 nT
Frequency response: 0...3 Hz
Absolute accuracy: 10 ppm

It is important to note that this magnetometer uses a single electron spin resonance line and has strictly linear dependence of the output frequency as a function of the magnetic field intensity.

The second OPM was developed and built at the GFZ [5] and contains a K-cell which was produced by the S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg (Russia). It is a new type of a Cs-K-tandem magnetometer, and combines the fast response of a Cs-selfoscillating magnetometer with the accuracy of a narrow-line K-Mz-magnetometer. In contrast to earlier constructions it does not generate any disturbing magnetic field and works in a wide field range.

Characteristics of this instrument:

Temperature range: +10 to +40 °C

Total Field range : 20,000 nT to 100,000 nT

Gradient Tolerance: 4 nT per m

Sensitivity : better than 0.01 nT for 1 sec. measuring time

Frequency response: 0...2 kHz

Absolute accuracy: better than 0.1 nT

We are using also for the comparison two types of Overhauser effect proton scalar magnetometers which were produced by GEM-SYSTEMS. One of them is included in a so called Automatic Geomagnetic Observatory. And the third used PM is an older instrument, a Vector Proton Magnetometer, made by AUSTER. The measurement of the output frequency of each OPM is being recorded over the time period of one minute, that means both magnetometers are producing a real minute mean value. The reference frequency for counting as well as for the recording time is being controlled by radio clock (DCF 77)(Fig.3).

One Overhauser PM delivers one measurement per minute, and the other one delivers 12 measurements per minute. The reference frequency for counting signal as well as for the recording time is being controlled by a crystal.

The AUSTER PM generates one measurement per minute. The reference frequency is being controlled by crystal, while the recording time is being controlled by radio clock (DCF 77).

Because of their discontinuous working regime, PMs are not very useful for comparisons to OPMs [6,7,8]. Here, PMs were used as a validity check for both OPMs.

3. *Position of magnetometers*

On the premises of the A.-Schmidt-Observatory some wooden huts exist which are qualified for installation of magnetometers for the purpose of comparison. The sensors of both OPMs were positioned at a distance each to other of about 1.5 m. They were in operation from October 1994 until June 1996 in the same wooden hut. In July 1996 the OPMs were moved into an other wooden hut. During the move also the K-tandem prototype was replaced. Since July 1996 the new created instrument (Fig. 4, Fig. 5) is in operation.

The distance to the PMs was not more than 100m, and, following the movement of the OPMs, it was less than 60 m.

4. *The Results*

For the results of comparison of the minute mean values between OPMs and PMs, please look at Fig. 6.

The basic for all comparisons which we will present, is the average value over a period of 48h with start at Saturday 0.00 and stop at Sunday 24.00, that means we are using the whole weekends.

The first comparison between Cs-He OPM, the AUSTER PM, and Overhauser PM was made from May 1994 to August 1994, the results has been drawn in Fig. 7.

The differences between AUSTER PM and Cs-He OPM increase from 11.8 nT to 12.4 nT, and the differences between the Cs-He OPM and the Overhauser PM which is included in the GEOMAG STATION fluctuate from 15.7 nT to 16.0 nT.

The second test period was started in October 1994 after the workshop in Dourbes, and the end of test was in June 1996. The comparison between both OPMs shows over a period of 21 month differences in the range of 0.78 nT to 0.88 nT, i.e. an absolute discrepancy of 0.1 nT (Fig. 8). For the period of 21 month the rms-value was 30 pT. The peak in the comparison of the OPMs on the first days of September 1995 was not due to a failure in the OPMs operation. This can be seen from the Fig. 9 with the basic values of the classical variometers. At the Y component and X component an anomaly was observed at the same time. The reason for this anomaly is not known, but may be caused due to natural or artificial currents in the ground of the area of the observatory.

In this period the difference to the AUSTER PM varies within an interval of 10.4 nT to 12.1 nT. Taking into account the smaller differences between the Overhauser PM and the Cs-He OPM, it is obviously, that the drift of the differences is caused by the operation of the AUSTER PM or by effects in the underground of the observatory area. During the period of 10 month the comparison between the Overhauser PM and the Cs-He OPM shows only a variation of 13.5 nT to 14.2 nT. The difference was constant within the absolute accuracy of the PM (Fig. 8).

During the preworkshop and during the workshop (IAGA) from July to September 1996 the comparison was interrupted because of lots of neighbored instruments.

The third period of the comparison was started in September 1996. The distance between both OPMs and both Overhauser-PMs is now 56 m. The distance between the OPMs is about 1 m, and between the PMs is 2.5 m.

The comparison between both OPMs shows over this 8 month period differences of 1.48 nT to 1.56 nT, i.e. an absolute discrepancy of less than 0.1 nT (Fig. 10). For the period of 8 month the rms-value of differences was 20 pT. The differences to the both PMs shows a range of 1 nT. The rms-value of differences between the He-Cs OPM and the Overhauser PM in the one measurement regime is equal 0.44 nT, and for the instrument in the 12 measurement regime per minute it is equal 0.39 nT.

All three comparisons show the same course. One notes the different scales, and the different distances of magnetometers to each other. It may be supposed that the changes in the difference are not always an error in the magnetometer function but a natural effect in the underground of observatory, may be in dependence of the temperature or other environmental influences.

5. *Conclusion and operating experience (Fig. 11)*

Our opinion is that the comparison of scalar magnetometers is showing very clearly the better long-term properties, and absolute accuracy of OPMs of the new generation. Actually, this characteristics are ten times better compared to PMs. Nobody disputes that the modern PMs are having the best handling and a very good reliability. For the use in an observatory the reability is more important than the handling. Here our experiences with both instruments:

The Cs-He magnetometer has had some interruptions in it's function from March 1994 until September 1994 due to problems with the electronics. Since October 1994 it is in operation without any interruption and without maintenance. In the Cs-K-tandem prototype magnetometer some experiments and modifications of electronic units were made until June 1996. In June 1996 a newly developed instrument was installed. This instrument was designed for use in observatories. It should be noted that the lifetime of K-spectral-lamps is lower than 1 year ,often only 6 month. In contrast to this, the Cs-lamp of Cs-He-OPM is in operation since March 1994.

6. *Acknowledgements*

The authors are grateful to P. P. Kuleshov, A. F. Ioffe Institute, St. Petersburg (Russia), and E.B.Alexandrov, S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg (Russia) for the good co-operation.

7. *References*

- [1] Dehmelt, H. G. Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms Phys. Rev. 105, (1957 b), No. 6, p.1924
- [3] Pulz, E. Applikation von Quantenmagnetometern
Physikalisch-technische Fehleranalyse/Dissertation,
AdW Berlin 1989
- [3] Alexandrov, E.B. Optical pumped atomic magnetometers after three
Bonch-Bruevich, V.A. decades
Optical Engineering, 31 (1997) No.4, p.711
- [4] Kuleshov, P.P. Cs-He-Magnetometer with HFPH for High
Blinov, E.V. Accuracy Field Measurements
Shilov, A.E. Proceedings of the VIth Workshop on Geomagnetic
Observatory Instruments Data Acquisition and
Processing, Dourbes, Belgium, Sept. 1994
- [5] Pulz, E. New design for an optical pumped tandem
Jäckel, K.-H. magnetometer
Proceedings of the VIIth IAGA Workshop
„Geomagnetic Observatory Instruments, Data
Acquisition and Processing“, Sept. 9th-14th, 1996,
Niemeck, Germany
- [6] Ware, R.H. Improved self-calibrating rubidium magnetometer
accurate to 0,01 nT rms, Rev. Sci. Instrum. 54 (1983)
(12), p. 1739
- [7] Ware, R.H. A comparison of proton and self-calibrating rubidium
Johnston, M.J.S. magnetometers for tectonomagnetic studies, J.Geomag.
Mueller, R.J. Geoelectr. 37 (1985), pp. 1051-1061,
- [8] Pulz, E. Sind Protonenmagnetometer in der Lage, korrekte
Linthe, H.-J. Minutenmittelwerte zu produzieren ?
Scientific Technical Report GFZ 01/96

<i>Authors, Instruments, distance between sensors</i>	<i>Test duration</i>	<i>Averaging time</i>	<i>Least count</i>	<i>Range of temperature</i>	<i>Results</i>
J.H. Allen and P.L. Bender, 1972, two Rb-tandem OPMs side-by-side	1 week	30 min	4 pT	room tempe- rature, with thermocontrol of sensors	12 pT, rms
	9.5 days	30 min	4 pT		20 pT, rms
R.H. Ware et al., 1985, two SCR's, (Rb- tandem OPMs), 50 m	16.6 hours	100 sec	1.4 pT	-8 to +21 °C, with thermo- control of sensors	2 pT, rms (12 pT, p. to p.)
	3 days	30 min	0.1 pT		6 pT, rms
	4 days	30 min	0.1 pT		8 pT, rms
E.B. Alexandrov et al., 1992, two K-OPMs, (narrow line), 2 m	5 hours	0.1 sec	1.4 pT	outdoor, with thermocontrol of sensors	1.6 pT, rms (10 pT, p. to p.)
Performed paper (E. Pulz et al.) Cs-He OPM with HFPH and K-tandem OPM of a new design, 1.5 m	10 hours	1 sec	analog recording	17.5 - 28 °C both OPMs without ther- mocontrol of sensors	2 pT, rms (12 pT, p. to p.)
	24 hours	60 sec	1 pT		9 pT, rms
	1 year	48 h	1 pT		20 pT, rms

Fig. 1 : Comparison of long-term tests obtained in earlier papers with results of the performed paper

Scalar magnetometers which were being included in the long-term stability investigation

	measuring-regime	reference frequency	recording time
- Cs-He optically pumped magnetometer (A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg, Russia)	real minute mean value	DCF 77	DCF 77
- K-Tandem OPM (S.I.Vavilov State Optical Institute St. Petersburg, Russia, GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany)			
- Overhauser effect proton precession magnetometer (GEM SYSTEMS, Canada, which is included in the GEOMAG Automatic Geomagnetic Observatory, France)	one measurement per minute in the first second of each minute	crystal	crystal
- Overhauser effect proton precession magnetometer, GSM-19 (GEM-SYSTEMS, Canada)	12 measurements / min	crystal	DCF 77
- proton precession magnetometer (AUSTER, Niemegk, Germany)	one measurement per minute	crystal	DCF 77

Fig. 2

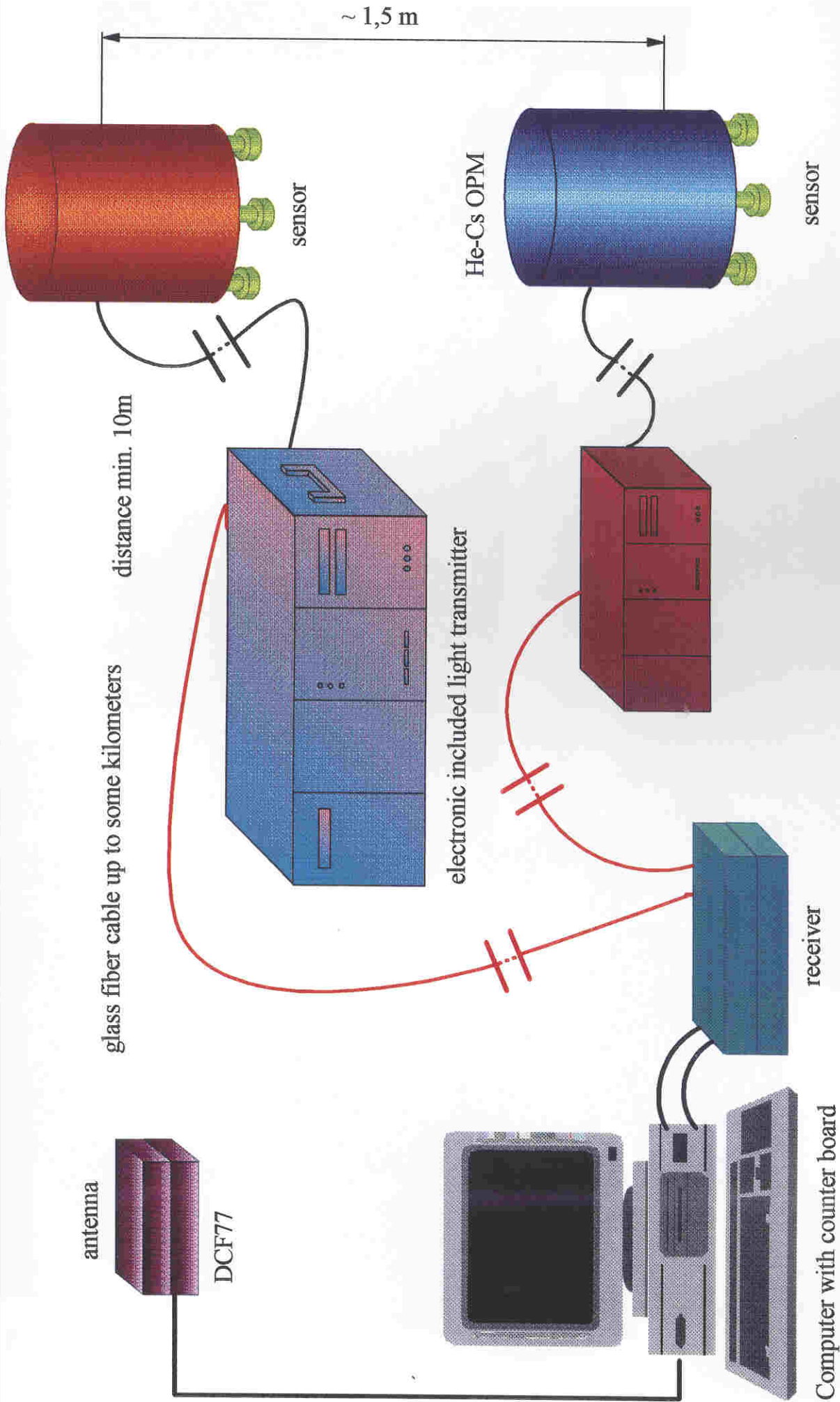


Fig. 3 data transmission OPMs

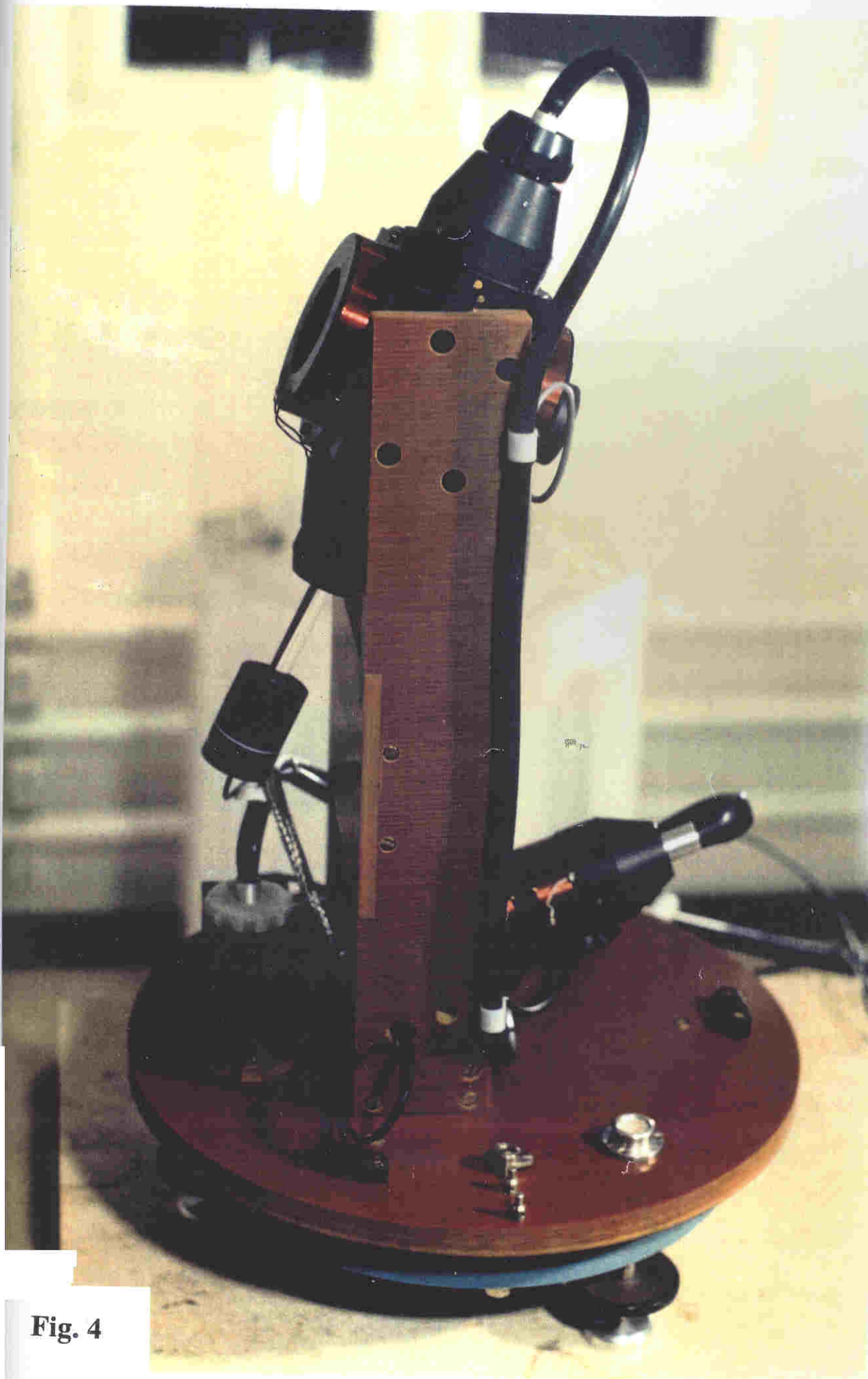


Fig. 4

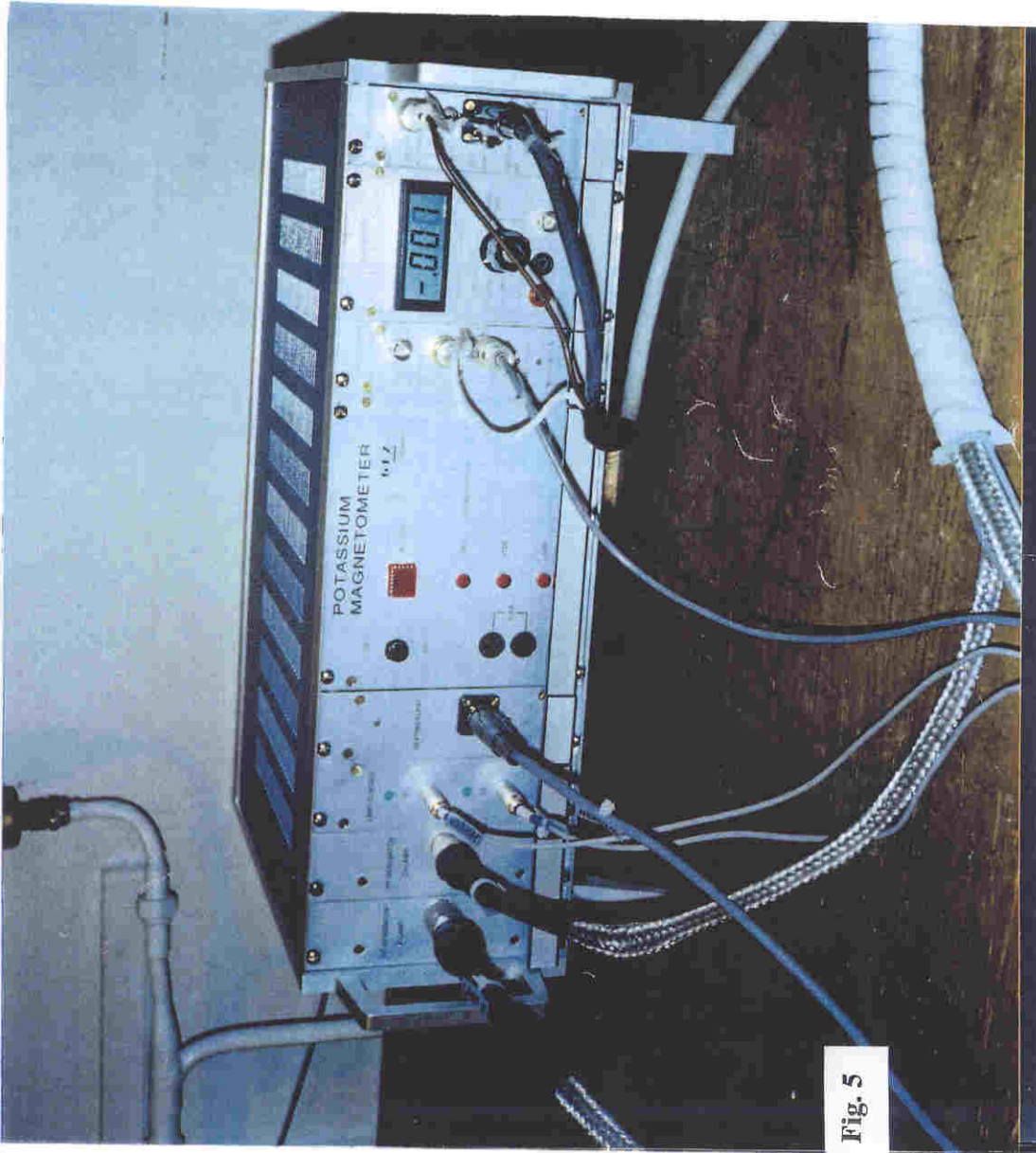
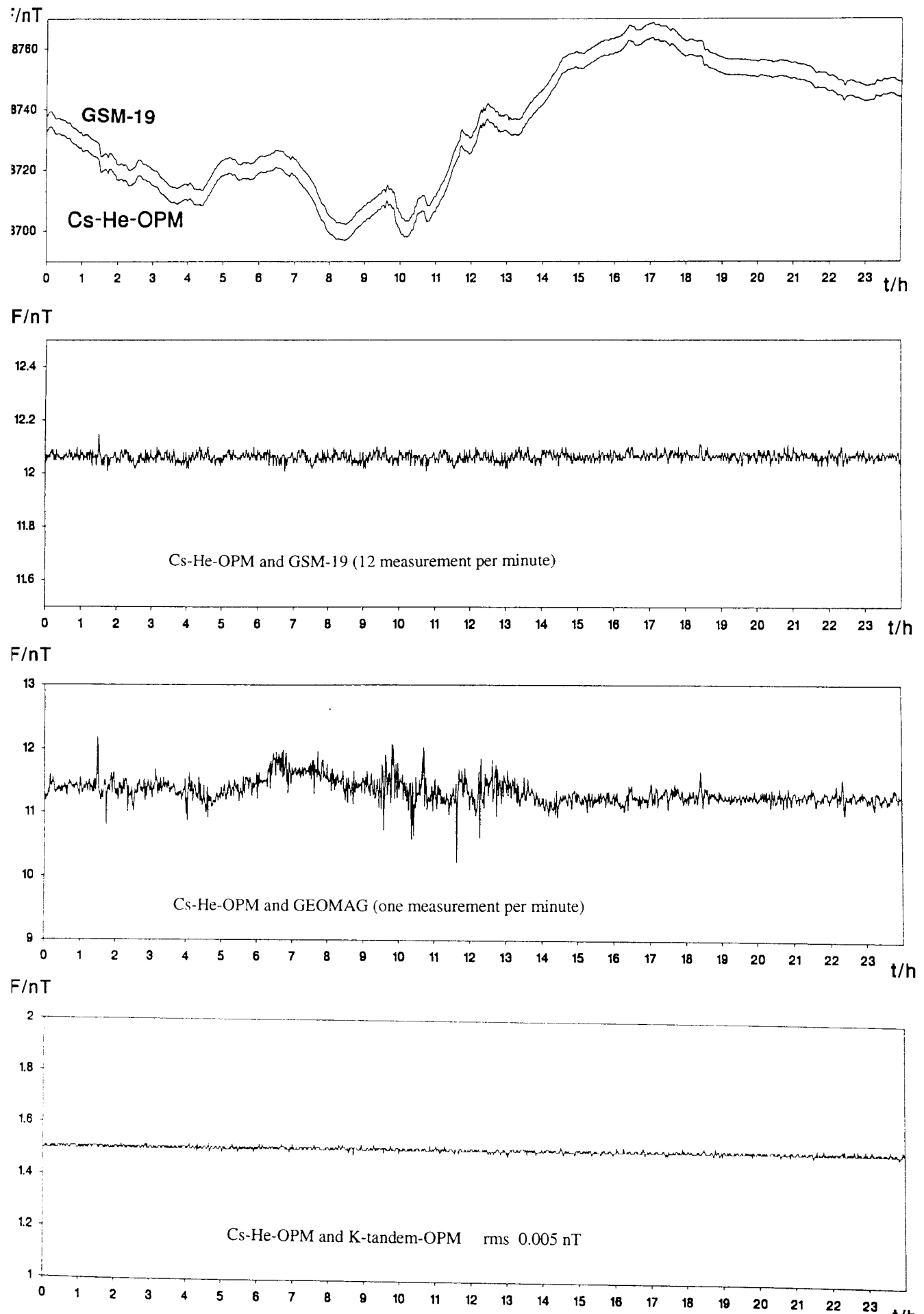


Fig. 5



Differences between average values (0° : Saturday to Sunday $0^\circ = 48h$)
 from Mai 94 to July 94

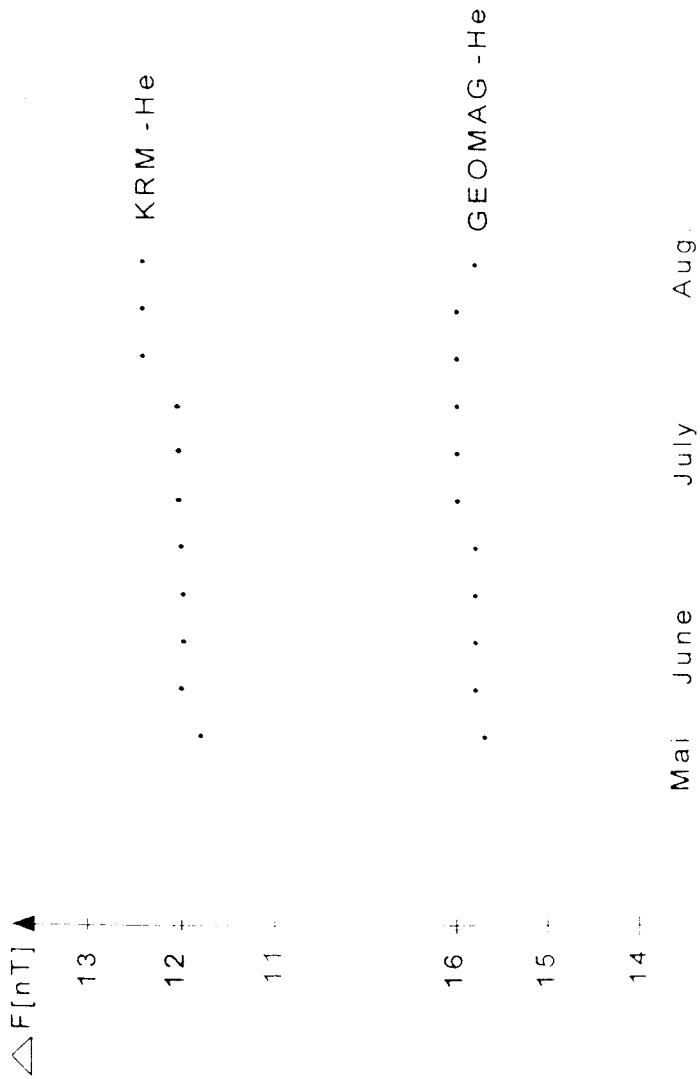


Fig. 7

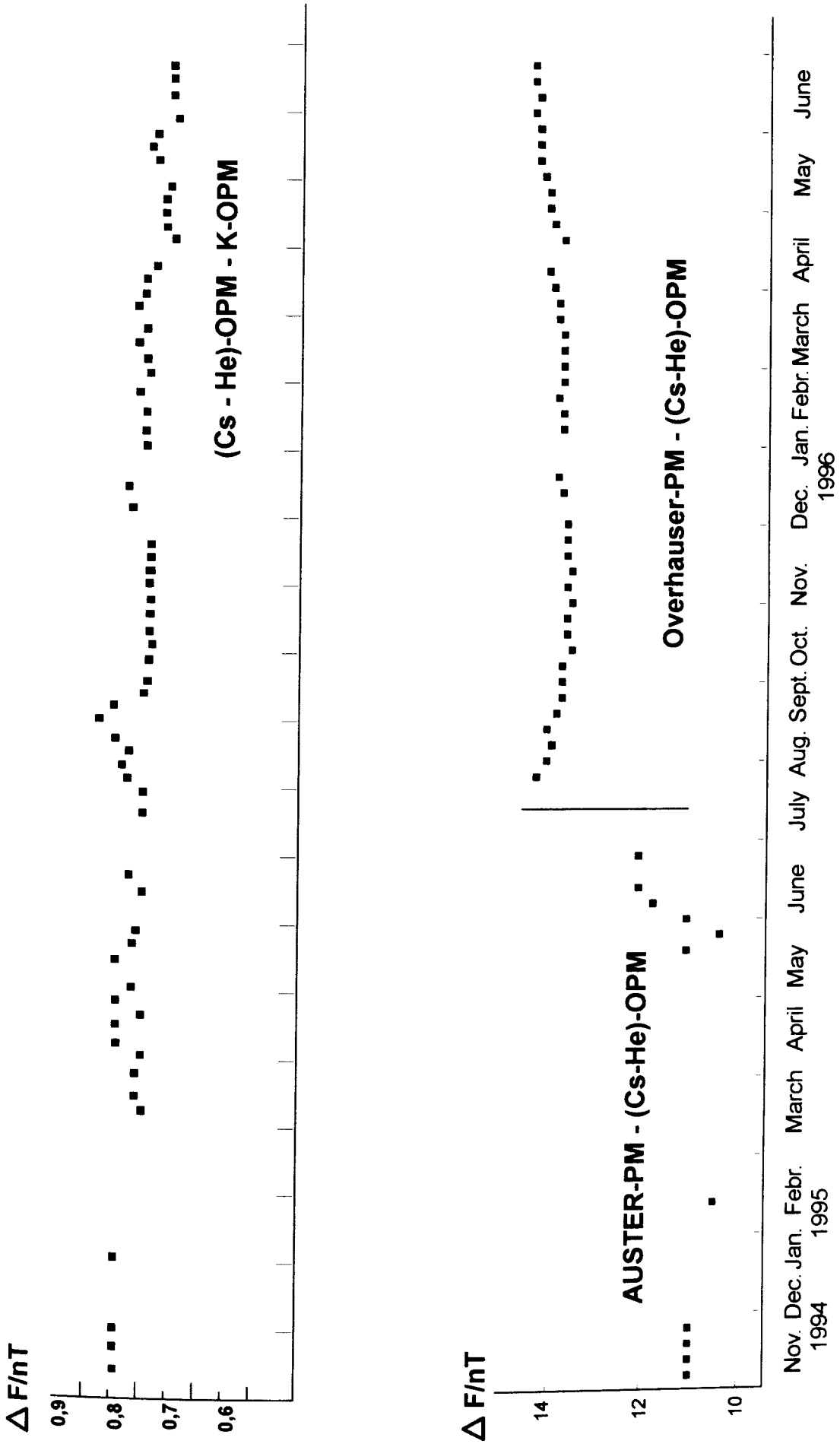


Fig. 8 : Differences between average values (00.00 Saturday to 24.00 Sunday=48h) from November 1994 to June 1996

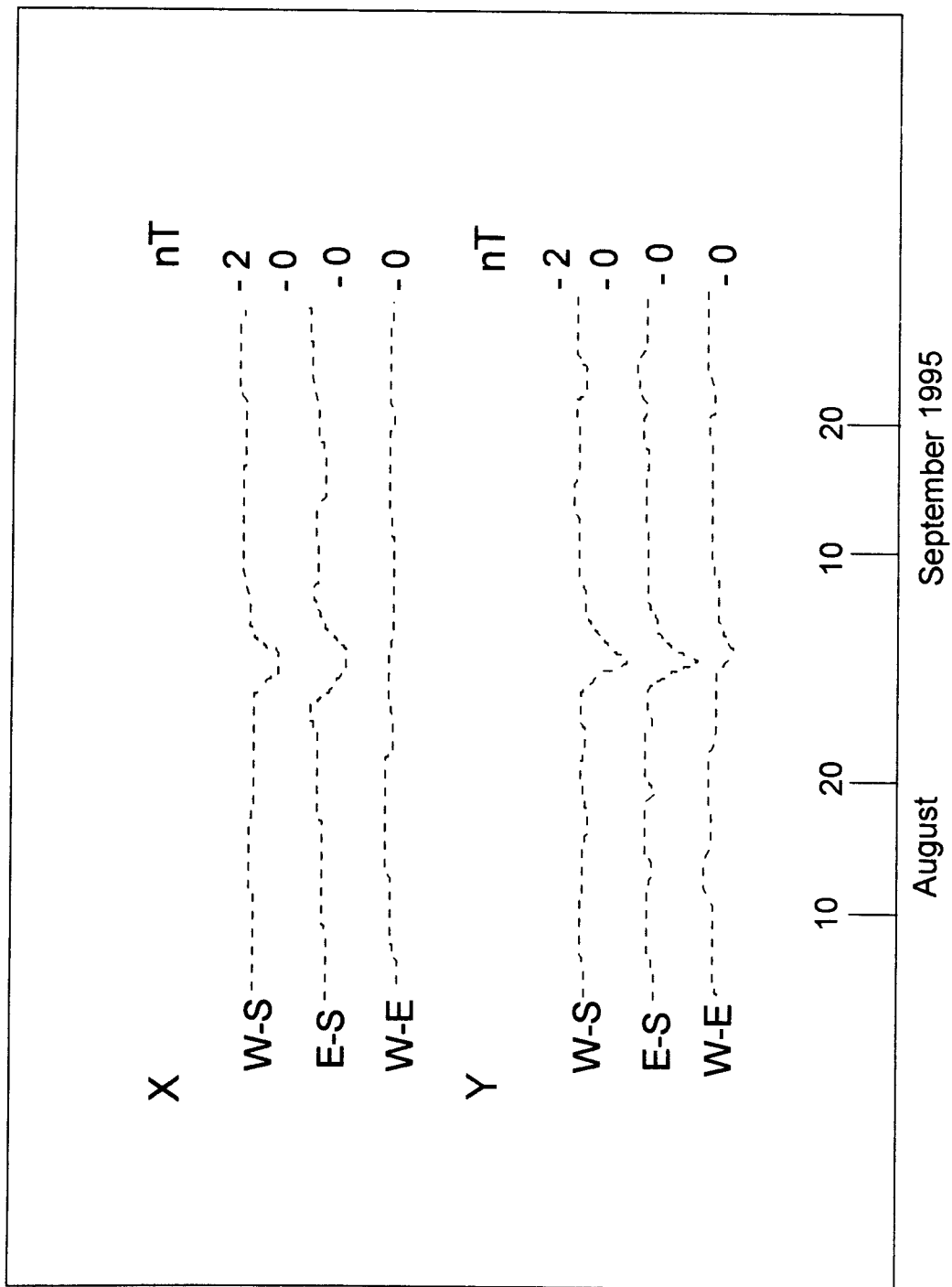


Fig. 9 Comparison of the Baselines of classical magnetometers

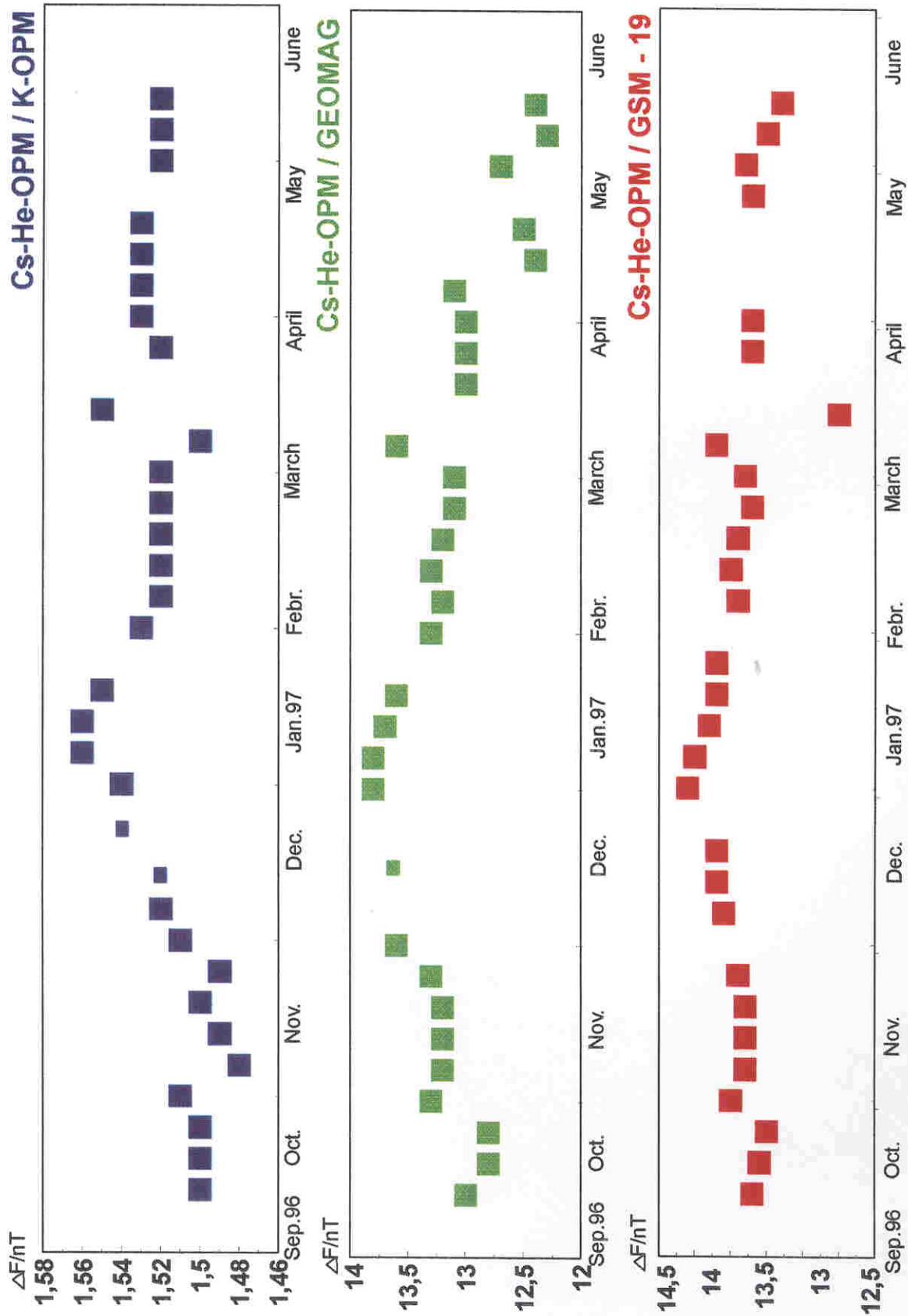


Fig. 10 : Differences between average values (0:00 Saturday to 24:00 Sunday = 48h) from September 1996 to May 1997