



GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Scientific Technical Report

Eberhard Pulz und Oliver Ritter

**Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für
Induktionsspulenmagnetometer (search coils)
am GeoForschungsZentrum Potsdam**

GeoForschungsZentrum Potsdam

Scientific Technical Report 01/10

Inhalt

| | |
|--|----|
| 1. Einleitung | 3 |
| 2. Die Funktionsweise von Induktionsspulenmagnetometern | 3 |
| 3. METRONIX Induktionsspulenmagnetometer MFS05 | 5 |
| 4. Berechnung und Konstruktion der Kalibrierspule | 6 |
| 4.1 Berechnung der Magnetischen Flussdichte | 7 |
| 4.2 Berechnung der elektrischen Parameter | 7 |
| 4.3 Konstruktion der Spule | 10 |
| 5. Vergleich der experimentell ermittelten Spulenparameter mit den berechneten Parametern | 10 |
| 6. Aufbau des Kalibriermessplatzes | 12 |
| 7. Ergebnisse von Kalibriermessungen | 13 |
| 8. Zusammenfassung | 13 |
| Danksagung | 13 |
| Literatur | 14 |

Einleitung

Das Magnetfeld der Erde ist zeitlich nicht konstant. Magnetfeldvariationen entstehen durch elektrische Ströme in der Ionosphäre und Magnetosphäre, aber auch Blitzentladungen von Gewittern verursachen im Hohlleiter, der durch Erde und Ionosphäre gebildet wird, magnetische Wechselfelder. Diese Wechselfelder induzieren in einem elektrisch leitenden Medium wie der Erde elektrische Ströme. Auf diesem Induktionsvorgang, der durch die Maxwellgleichungen beschrieben wird, beruht die Methode der elektromagnetischen Tiefensondierung (Magnetotellurik).

In der Geophysik werden eine Vielzahl verschiedener Sensoren verwendet, um zeitlich variable magnetische Felder zu messen. Bauartbedingt eignen sich Induktionsspulen besonders zur Aufnahme von magnetischen Signalen mit einem Frequenzgehalt von wenigen mHz bis hin zu einigen kHz. Das Problem bei der Messung dieser Signale besteht darin, dass die Signalamplituden generell sehr klein sind, zusätzlich aber auch eine große Variabilität zwischen kleinsten und größten Amplituden auftritt (dynamic range).

Moderne Induktionsspulen sind daher optimierte Sensoren, die aus einer Vielzahl genau aufeinander abgestimmter Komponenten bestehen. Bei der täglichen Arbeit im Gelände sind Induktionsspulen extremen mechanischen Belastungen ausgesetzt, die zu äußerlich nicht erkennbaren Veränderungen von Systemparametern oder sogar zu Schäden führen können. Sensoren stehen immer am Anfang eines jeden Meßsystems, und fehlerhafte Sensoren führen unweigerlich zu später nicht korrigierbaren, falschen Messwerten. Die regelmäßige Kalibrierung und Funktionsüberprüfung der Induktionsspulen des Geophysikalischen Gerätepools Potsdam (GIPP) ist daher unerlässlich, um den hohen Standard der Magnetotellurikmessungen auch in Zukunft gewährleisten zu können.

2. Die Funktionsweise von Induktionsspulenmagnetometern

Das einfachste Induktionsspulenmagnetometer besteht aus einer Drahtschleife. Nach dem Faraday'schen Induktionsgesetz ist die in der Leiterschleife induzierte Spannung proportional zur Flussänderung in der Spule. Unter Annahme einer sinusförmigen Flussänderung $\Phi = \Phi_{\max} \cos(\omega t)$ erhält man für die induzierte Spannung U_0 :

$$U_0 = \omega \cdot n \cdot \Phi_{\max} = \omega \cdot n \cdot A \cdot \mu_0 \cdot H \quad (1)$$

Dabei ist μ_0 die Vakuumpemreabilität, $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz, A der Flächeninhalt der Spule, n die Anzahl der Windungen und H das magnetische Feld. Die Sensitivität der Spule ist definiert als:

$$S_0 = \frac{U_0}{f \cdot H} = \frac{1}{2} \pi^2 \cdot n \cdot D^2 \cdot \mu_0 \quad (2)$$

Die Sensitivität hängt also im wesentlichen von der Windungszahl n und dem Durchmesser D der Spule ab; eine Spule mit hoher Sensitivität hat also einen großen Durchmesser und viele Wicklungen. Zusätzlich haben die für den Bau einer Induktionsspule verwendeten Drähte einen Ohm'schen Widerstand, eine Induktivität und eine Kapazität, die sich negativ auf das Rauschverhalten der Spule auswirken und deren nutzbaren Frequenzbereich einschränken. In der Praxis bedeutet dies, dass eine breitbandige Spule mit ausreichender Sensitivität auch bei Verwendung von Bauteilen mit günstigen Eigenschaften weit über 100 kg wiegen und damit für den normalen Feldbetrieb zu unhandlich wäre.

Aus diesem Grund werden statt der bisher beschriebenen Luftspulen für geophysikalische Messungen Induktionsspulen mit einem hochpermeablen Kern verwendet. Bei diesen Spulen werden die Windungen auf einem zylinderförmigen, langgestreckten Stab aus ferromagnetischem Material aufgebracht. Das Material des Stabes bestimmt jetzt im wesentlichen die magnetischen Eigenschaften des Sensors, da die Sensitivität proportional zum Verhältnis der Permeabilität des Kernmaterials zur Vakuumpermeabilität ansteigt. Durch Verwendung entsprechender Materialien für den Kern können somit Sensoren mit geringem Gewicht und Abmessungen hergestellt werden, die trotzdem hohe Sensitivitäten aufweisen. Der Nachteil solcher Induktionsspulen besteht darin, dass die Übertragungseigenschaften in einem komplizierten, nicht linearen Zusammenhang zum verwendeten Kernmaterial stehen, der eine vollständig analytische Beschreibung des Sensors nahezu unmöglich macht. Ändert sich aber die Permeabilität des Kerns, z.B. durch mechanische Beanspruchung oder Temperaturschwankungen, wirkt sich das auch auf das Übertragungsverhalten des Sensors aus.

In moderne Induktionsspulenmagnetometer werden zusätzlich rauscharme Verstärker mit hohen Eingangsimpedanzen integriert. Die von der Fa. METRONIX hergestellten Magnetometer verfügen zusätzlich noch über eine sogenannte negative Rückkopplung. Dabei wird die Sensorausgangsspannung dazu benutzt, im Kern ein magnetisches Gegenfeld aufzubauen, das dem induzierten Feld entgegenwirkt. Der Zusammenhang aus Verstärkung A und magnetischer Rückkopplung M wird im Prinzipschaltbild in Abb. 1 dargestellt.

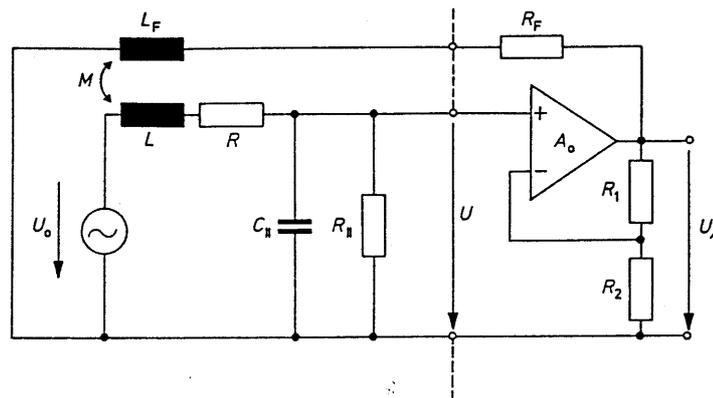


Abb 1: Prinzipschaltbild eines modernen Induktionsspulenmagnetometers mit rauscharmen Verstärker (A) und magnetischer Rückkopplung (M).

Der frequenzabhängige Verlauf der Ausgangsspannung U_A ist in Abb. 2 gezeigt. Er entspricht dem Verhalten eines Bandpassfilters, der durch folgende Gleichung beschrieben wird:

$$U_A = U_0 \frac{A \cdot F(\omega)}{1 + i\omega A \frac{M}{R_F} \cdot F(\omega)} \quad (3)$$

$F(\omega)$ ist dabei die Übertragungsfunktion eines aus den Komponenten L , R , C_{II} und R_{II} gebildeten Tiefpassfilters.

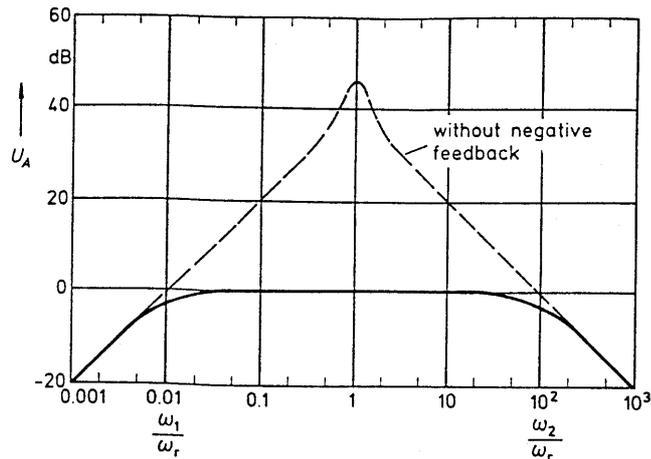


Abb 2: Amplitudengang eines Induktionsspulenmagnetometers mit (bzw. ohne) negative Rückkopplung.

3. METRONIX Induktionsspulenmagnetometer MFS05

Der GIPP verfügt über 30 Induktionsspulenmagnetometer vom Typ METRONIX MFS05. Bei der Herstellung der Magnetometer wird zwar auf Verwendung möglichst identischer Bauteile mit kleinen Toleranzen Wert gelegt, jedoch sind Unterschiede, die dann auch im Übertragungsverhalten der einzelnen Sensoren sichtbar werden, unumgänglich. Die theoretisch bestimmte (generische) Übertragungsfunktion eines solchen Sensors ist in Abb. 3 dargestellt.

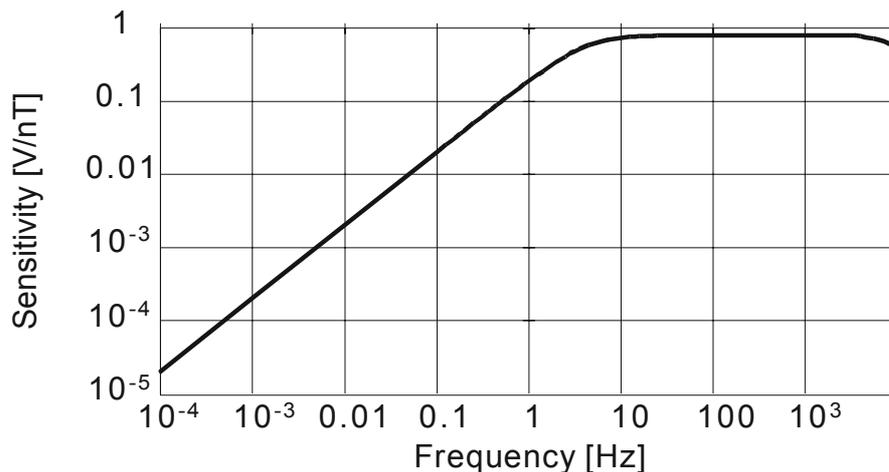


Abb 3: Theoretischer Amplitudengang eines Induktionsspulenmagnetometers MFS05 der Fa. METRONIX. Der nutzbare Frequenzbereich liegt zwischen 8000Hz und 1/4000 Hz. Im Bereich zwischen ca. 2kHz bis 10Hz liefert der Sensor eine dem induziertem Magnetfeld proportionale Ausgangsspannung von 0.8V/nT, für tiefere Frequenzen fällt die Sensorsensitivität mit 1/f ab.

Die Gesamtübertragungsfunktion für Amplitude und Phase lässt sich auch theoretisch berechnen. Die Formeln hierzu sind im METRONIX Handbuch [1] angegeben.

Während kleine Abweichungen von den theoretischen Werten durchaus zu erwarten sind, deuten größere Unstimmigkeiten auf eine Fehlfunktion des Sensors hin. Das Auffinden von defekten Sensoren ist natürlich ein wesentliches Ergebnis einer jeden Kalibrierung. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind exemplarisch für einige Sensoren in Kapitel 7 aufgeführt. Die Ergebnisse für alle Sensoren sind im Internet unter <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/MT/services/equip> abrufbar.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Güte und das Funktionieren der Sensoren ist deren Rauschverhalten. Abb. 4 zeigt eine von der Fa. METRONIX erstellte Kurve für das typische Sensorrauschen.

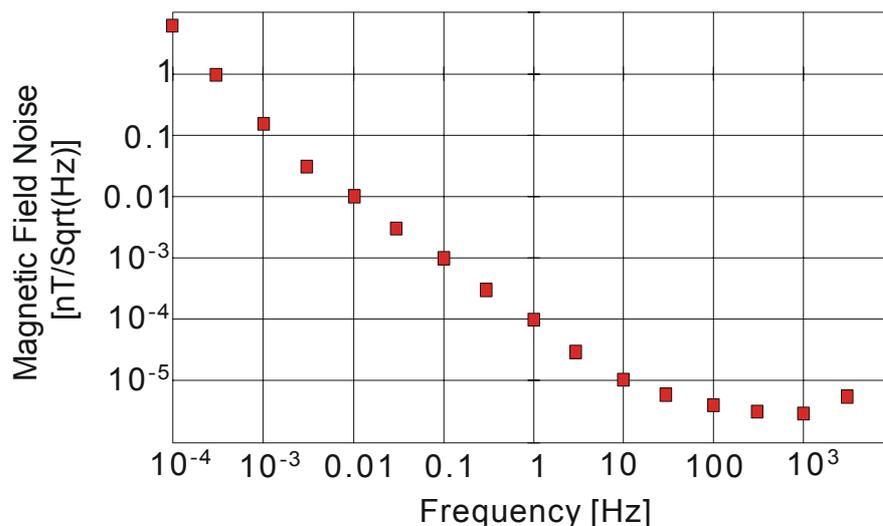


Abb 4: „Typisches“ Rauschverhalten des Induktionsspulenmagnetometers MFS05.

Die Messung des Rauschens für individuelle Sensoren wäre eine wünschenswerte Erweiterung der Kalibriereinrichtung in Niemeqk. Hierzu müssten die Ausgangssignale der Induktionsspulen in einer magnetfeldfreien Umgebung registriert werden, d.h. die Signale der natürlichen (und technisch erzeugten) Magnetfeldvariationen müssten abgeschirmt werden.

4. Berechnung und Konstruktion der Kalibrierspule

Die Kalibrierspule muss in der Lage sein, alle gängigen Typen von Induktionsspulen aufzunehmen und ein hinreichend homogenes Feld zu liefern. Es wurden Induktionsspulen gebaut, die Längen bis zu 3 m und Durchmesser bis zu 20 cm erreichen.

Aus dieser Vorgabe resultiert der Spulentyp: Nur eine Zylinderspule liefert bei handhabbaren Abmessungen ein homogenes Feld dieser Länge. Die zweite Vorgabe war die zu erreichende Frequenz. Gegenwärtig werden Induktionsspulenmagnetometer nur bis zu Frequenzen von 10 kHz verwendet.

In Zukunft aber könnten Frequenzen bis zu 100 kHz für die Magnetotellurik von Interesse sein. Deshalb sollte die Kalibriereinrichtung so ausgelegt werden, dass Tests bis 100 kHz durchgeführt werden können. Die Kalibrierspule muss daher eine Eigenfrequenz größer als 1 MHz besitzen. Das kann man nur durch einen kapazitätsarmen Aufbau erreichen. Aus der Hochfrequenztechnik sind kapazitätsarme Spulen in Kammerbauweise bekannt.

In Anlehnung an diese Technik wurde von H. Lühr (pers. Mitteilung 2000) eine Zylinderspule vorgeschlagen, die je eine Windung im Abstand von 8 cm besitzt. Aus Abb.5 kann man Details entnehmen. Zur Verlängerung der nutzbaren homogenen Länge wird die Distanz zwischen zwei Spulenringen zum Rand hin geringer. Der Spulendurchmesser wurde zu 30 cm festgesetzt. Er ist ein Kompromiss aus Werkzeug- und Materialparametern.

4.1 Berechnung der magnetischen Flussdichte

Zur Abschätzung der zu erwartenden Homogenität der Spule wurde die magnetische Flussdichte an verschiedenen Aufpunkten innerhalb der Spule berechnet.

Mit Hilfe des Biot-Savart'schen Gesetzes kann die magnetische Flussdichte von beliebigen stromdurchflossenen Leitern berechnet werden (z.B. in [2]).

$$\vec{H}(\vec{r}) = c' \int \frac{j \cdot \vec{r}}{r^2} d\tau \quad [\text{A/m}] \quad (4)$$

Mit j = Stromdichte $[\text{A/m}^2]$, r = Abstand $[\text{m}]$ des Aufpunktes vom Volumenelement $d\tau$ und $c' = 1/4\pi$. Wählt man den Aufpunkt auf einer Symmetrieachse, führt die Gleichung zu einem einfachen analytischen Ausdruck. Berechnungen von nichtsymmetrischen Konfigurationen bzw. die Wahl des Aufpunktes an einem beliebigen Punkt sind dagegen sehr kompliziert.

CROZIER [3] entwickelte aus dem Biot-Savart'schen Gesetz einen analytischen Ausdruck zur Berechnung der magnetischen Feldstärke an einem beliebigen Punkt (x, y, z) einer endlich ausgedehnten elliptischen Spule. Dieses Gleichungssystem wurde in Mathcad [4] programmiert. Nach einer Kontrolle an einfachen Beispielen wurden hiermit Helmholtz- und Faselau-Spulen berechnet.

Nach diesen erfolgreichen Tests konnte die Berechnung der Zylinderspule in Angriff genommen werden. Es wurde die magnetische Feldstärke einer Kreisspule für alle interessierenden Aufpunkte berechnet und dann durch Superposition die Zylinderspule nachgebildet.

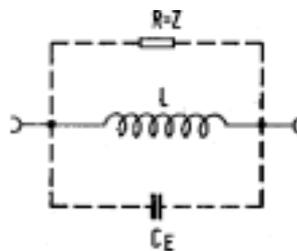
In Abb.6 wurde das Ergebnis der Berechnung für das Feld in Achsenrichtung in Spulenmitte ($z = 0 \text{ cm}$) dargestellt. Es wurde die magnetische Feldstärke an den Aufpunkten $x = 0, 2, 4, 6$ und 8 cm parallel zur Spulenachse berechnet und dargestellt. Während die magnetische Flussdichte in Achsennähe sehr homogen ist ($\leq 0.1\%$), wird sie mit zunehmenden Achsenabstand inhomogen. Für $x = 8 \text{ cm}$ hat man schon einen sinusförmigen Feldverlauf mit einer Amplitude von 0.5% . Alle modernen Induktionsspulen besitzen einen ferromagnetischen Kern, so dass nur die Homogenität in unmittelbarer Umgebung der Spulenachse von Bedeutung ist. In Abb.7 wurde die gleiche Berechnung 1 m außerhalb des Spulenzentrums ($z=100 \text{ cm}$) wiedergegeben. Dieses Feld ist nahezu identisch zum Feld in der Spulenmitte ($z=0$). In Abb.8 kann man sich einen Überblick über das senkrecht zur Spulenachse erzeugte magnetische Feld verschaffen.

Um ein Gefühl für den Einfluss des Abstandes zwischen 2 Stromringen auf die Homogenität einer Zylinderspule zu bekommen, wurden Variantenrechnungen mit Windungsabständen $a = 5, 7, 9 \text{ cm}$ durchgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnungen wurde in den Abb. 9 bis 12 dargestellt. Man erkennt in den Abbildungen eine deutliche Verbesserung der Homogenität für $x = 8 \text{ cm}$, wenn die Abstände der Spulenringe kleiner als 8 cm gewählt werden. Es wäre aber zu befürchten, dass die Eigenfrequenz so viel kleiner wird, dass eine Kalibrierung bis 100 kHz nicht mehr möglich ist.

Eine Spule dieser Größenordnung kann man nicht ohne Fertigungstoleranzen herstellen. Deshalb wurde diese Berechnung wiederholt, aber statt der Kreisringe wurden Ellipsen angenommen (Abweichung vom Durchmesser 3 mm, vgl. Abb. 13). Aus der Abb. erkennt man keinen dramatischen Einfluss auf die Homogenität der Kalibrierspule. Die Spulenkonstante im Mittelpunkt der Zylinderspule wurde zu 15,65 nT/mA ermittelt.

4.2 Berechnung der elektrischen Parameter

Die wichtigste elektrische Größe einer Kalibrierspule ist deren Eigenfrequenz, die den nutzbaren Frequenzbereich bestimmt. Resonanz tritt ein, wenn der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung $\varphi = 0$ beträgt. Jede Spule besitzt eine Induktivität und eine Kapazität mit dem Ersatzschaltbild:

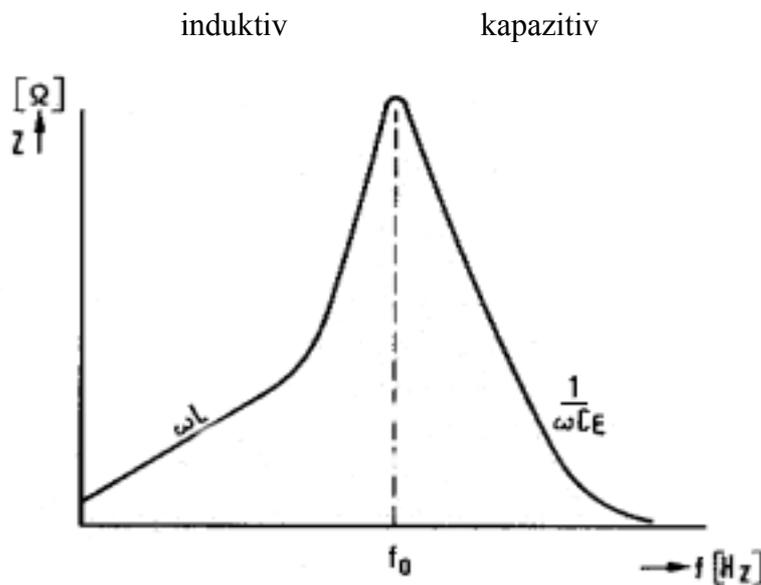


Spule mit Eigenkapazität und deren dielektrischen Verlusten

($Z =$ Scheinwiderstand, $C_E =$ Eigenkapazität) Resonanz tritt ein, wenn $\omega^2 \cdot LC_E = 1$. Daraus ergibt sich die Eigenresonanz der Spule zu

$$f_0 = f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_E}} \quad (5)$$

Bis zur Eigenresonanz besitzt die Spule rein induktives Verhalten und ab der Eigenresonanz rein kapazitives Verhalten (vgl. Skizze).



Spulenwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz

Es ist demzufolge die Induktivität und die Kapazität der Spule abzuschätzen. In der Literatur findet man zahlreiche Berechnungsformeln [z.B. 5, 6, 7] für die Induktivität.

Induktivität nach [6]:

$$L_1 = \frac{(2\pi r n)^2}{l} \quad [\text{H}] \quad (6)$$

$$L_1 = 62 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$

$$L_1 = 62 \mu\text{H}$$

r – Radius [cm]; n – Anzahl der Windungen; l – Länge der Spule [cm]
($r = 15\text{cm}$; $n = 56$; $l = 450\text{cm}$)

oder die verbesserte Formel nach Lorenz [6]:

$$L_2 = L_1 \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{2r}{l} \cdot \left(\frac{2k^2 - 1}{k^3} \cdot E + \frac{1 - k^2}{k^3} \cdot F - 1 \right) \quad (7)$$

mit $k = \frac{2r}{\sqrt{4r^2 + l^2}}$ und E, F elliptische Integrale von k

$$L_2 = 100 \mu\text{H}$$

Während die Gleichungen zur Berechnung der Induktivität noch auf soliden physikalischen und mathematischen Grundlagen basieren, sind die Formeln zur Berechnung der Kapazität rein empirisch abgeleitet worden. Sie gelten nur für bestimmte Spulenarten und Größen. Für eine Spule unserer Größenordnung ist die Berechnung äußerst schwierig und nur mit großen Fehlern möglich.

Es wurde eine Formel zur Berechnung der Kapazität eines langen Leiters gegen die Erdoberfläche ausgewählt [4]:

$$C \sim \frac{0,241 \cdot l'}{\log\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right)} [\text{pF}] \quad (8)$$

l' – Länge des Leiters [cm]; d – Drahtdurchmesser [cm]; h – Abstand

$$C \sim 580 \text{ pF}$$

Wegen der zu erwartenden Unsicherheit wurde ein kleines Experiment zur Ermittlung der Eigenfrequenz durchgeführt. Für zwei einfache Spulen wurden die Eigenfrequenzen theoretisch und experimentell bestimmt. Das Ergebnis ist in Tab.1 dokumentiert. Man kann feststellen, dass zwischen theoretisch ermittelten und den experimentell gewonnenen Werten keine gravierenden Unterschiede vorhanden sind.

Die Eigenfrequenz der Kalibrierspule berechnet sich aus den oben gewonnenen Werten zu 850 kHz (Induktivität nach Gl.6) bzw. 660 kHz (Induktivität nach Gl.7). Aus dem Bodediagramm (Abb.14) erkennt man, dass bei der angestrebten Arbeitsfrequenz von 100 kHz schon eine leichte Phasenverschiebung bei höheren Frequenzen zu erwarten ist.

Tabelle 1
Ergebnis des Experiments zur Bestimmung der elektrischen Spulenparameter

Spulendurchmesser 30 cm; 6 Windungen, Abstand der Spulenringe $a = 5$ cm
Spulendurchmesser 30 cm; 4 Windungen, Abstand der Spulenringe $a = 8$ cm

| | Induktivität | | Kapazität | | Eigenfrequenz | |
|--------------------|--------------|------------|-----------|-------|---------------|----------|
| | ber. | gem. | ber. | gem. | ber. | gem. |
| a = 5 cm 6 Wdg. | 9 μ H | 11 μ H | 55 pF | 35 pF | 7,1 MHz | 9,0 MHz |
| a = 8 cm 4 Wdg. | 4 μ H | 6 μ H | 42 pF | 30 pF | 12,4 MHz | 12,7 MHz |

4.3 Konstruktion der Spule

Von einem preiswerten Polyethylenabwasserrohr ausgehend, wurde die Konstruktion gestaltet. In den Abb. 15, 16 findet man Fotos der Spule.

Das Rohr hat einen Innendurchmesser von 26 cm und einen Außendurchmesser von 27 cm. Der lichte Innendurchmesser ist ausreichend für alle bekannten Induktionsspulen. Zur Fixierung der Spulenringe wurden PVC-Ringe angefertigt und durch Stege fixiert. Die Vermessung des Rohres ergab, dass es nicht überall exakt kreisförmig ist. Deshalb wurden die PVC-Ringe teilweise mit einem größeren Innendurchmesser gefertigt, so dass die Abweichungen vom Kreis des Polyethylenrohres sich möglichst nicht auf die Spulenform auswirkt. In einem der um 120° versetzten Stege befindet sich eine Nut zur Aufnahme der Drähte, so dass sich die Felder zwischen hin- und rückführenden Drähten so weit wie möglich aufheben. Fixiert wurden die Ringe und Distanzstücke durch Andrücken der äußeren Spulenringe.

Die Kalibrierspule ruht auf einem Gerüst von Längs- und Querträgern.

Zur Aufnahme der Prüflinge wurde ein Schlitten gefertigt. Er wurde so konstruiert, das Sensoren mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern immer exakt symmetrisch und mittig positioniert werden. Ein Vorbau zum Wechseln der Prüflinge vervollständigt die Kalibrierspule.

Die gesamte Konstruktion wurde im Westraum des "Magnetischen Labors" des Geomagnetischen Observatoriums des GFZ untergebracht.

Das Variationshaus ist mehr als 35 m vom magnetischen Labor entfernt. Selbst wenn Gleichfelder in der Spulenmitte von 10 nT erzeugt werden, ist der Einfluss am Ort des Variationshauses deutlich geringer als 10 pT. Gewöhnlich dient die Kalibrierspule jedoch zur Erzeugung von Wechselfeldern, die so hochfrequent sind, dass die Variationsmessungen ohnehin nicht gestört werden können.

5. Vergleich der experimentell ermittelten Spulenparameter mit den berechneten Spulenparametern

Nach Fertigstellung der Spule wurden zunächst die elektrischen Spulenparameter bestimmt. Der Ohm'sche Widerstand und die Induktivität konnten direkt mit dem LCR-Meter HP-4263A gemessen werden. Die Kapazität kann man dagegen nur indirekt über die Bildung von Schwingkreisen mit bekannten Kapazitäten bestimmen [7].

$$c = \frac{c_2 - c_1 \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2}{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 - 1} [pF] \quad (9)$$

mit c_1, c_2 Kapazität der Parallelkondensatoren in pF
 λ_1, λ_2 Resonanzwellenlänge der mit c_1 bzw. c_2 gebildeten Parallelschwingkreise

Die wirkliche Induktivität, d.h. Induktivität ohne Einfluss der Eigenkapazität, errechnet sich dann wie folgt [7]

$$L_w = \frac{281 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{c_2 - c_1} [mH] \quad (10)$$

Die Resonanzfrequenzen wurden mit Hilfe eines phasenempfindlichen Verstärkers (lock-in amplifier), PRINCETON 5302, bestimmt. Die Einkopplung der Energie erfolgte mit Hilfe einer Antenne elektromagnetisch. Ebenfalls elektromagnetisch wurde die Kalibrierspule auf Windungsschlüsse überprüft.

Die magnetische Flussdichte-Bestimmung erfolgte mit Hilfe von zwei verschiedenen Sensoren: 1. dem Fluxgate-Magnetometer MAG 03 von BARTINGTON und 2. einer kleinen Luftspule. In beiden Fällen wurde mit Wechselstrom gearbeitet (90 Hz - MAG 03 und 25 kHz - Luftspule). Die Amplituden wurden zwischen 10 nT und 1000 nT variiert. Auch hier wurde der phasenempfindliche Verstärker eingesetzt. Durch die Messanordnung (Abb.17) wurde der Einfluss der natürlichen Variation völlig ausgeschlossen.

In Tab.2 wurden die Ergebnisse zusammengefasst. Erwartungsgemäß stimmen die berechnete und gemessene Induktivität gut überein. Die berechnete und die gemessene Kapazität zeigen wie erwartet eine große Diskrepanz.

Tabelle 2
Vergleich der elektrischen Parameter

| | Ohm'scher Widerstand | Induktivität | Kapazität | Resonanzfrequenz | Skalenfaktor |
|-----------|----------------------------|--------------|-----------|------------------|-------------------|
| berechnet | | 100 μ H | 500 pF | 660/850 kHz | 15,65 nT/mA |
| gemessen | 4,6 Ω bei 15,5°C | 109 μ H | 90 pF | 1,6 MHz | 15,6 \pm 0,1 nT |

Die Resonanzfrequenz verschiebt sich damit zu höheren Frequenzen. Der angestrebte Einsatz bis 100 kHz ist somit gesichert. Im Rahmen der Messgenauigkeit von MAG 03 gibt es Übereinstimmung im Skalenfaktor.

In Abb.18 (MAG 03) und 19 (Luftspule) wurden die Ergebnisse der Flussdichtemessungen dargestellt. Die Messpunkte verteilen sich über die z-Achse und es wurde in $x = 0$, $x = \pm 2$ cm und $x = \pm 4$ cm gemessen. Während die MAG 03 Messungen keine Abweichungen zu den Berechnungen ergaben, zeigen die Messergebnisse der Luftspule Abweichungen von der angestrebten Homogenität bis zu 0.25 % (Messfehler ± 0.15 %). Weitere Messungen wurden für $x = \pm 6$ cm und $x = \pm 8$ cm durchgeführt. Da hier ein sinusförmiger Verlauf vorliegt, wurde in z-Richtung in der Mitte und in $z = \pm 75$ cm nicht nur an einem Punkt gemessen, sondern über einem Bereich von 10cm im Zentimeterabstand. Wie die Abb. 20, 21 zeigen, streuen die Messungen mit der Luftspule gegenüber den Berechnungen und den MAG 03 Messungen etwas mehr. In den Abb.22, 23 wurden weitere Messergebnisse für $z = \pm 75$ cm dargestellt.

Auch diese Messungen deuten auf keine Konstruktions- oder Fertigungsmängel hin.

Die zu prüfenden Induktionsspulen besitzen einen ferromagnetischen Flußverstärker und werden deshalb die Eigenschaften der Kalibrierspule verändern. Im ungünstigen Falle, kann dadurch die Eigenfrequenz drastisch abfallen, so dass die Kalibrierspule unbrauchbar wird.

Um das zu prüfen, wurde in der Kalibrierspule eine METRONIX-Induktionsspule platziert. Zusätzlich zu dieser Spule wurde in 20 cm Entfernung von der METRONIX-Induktionsspule der MAG 03-Sensor bzw. die Luftspule installiert.

Für beide Sensoren wurde die Frequenzantwort sowohl in Anwesenheit als auch in Abwesenheit der METRONIX- Induktionsspule gemessen. Wie aus den Abb. 24, 25 hervorgeht, kann man den Einfluss vernachlässigen. Im Frequenzbereich bis 1 Hz ist deutlich ein Anteil von natürlichen Variationen zu erkennen. Die Wirkung des Flussverstärkers macht sich hier bemerkbar.

Das Ergebnis aller Experimente beweist, dass die neue Kalibrierspule den Anforderungen gerecht wird. Sie erlaubt es, Kalibrierungen bis zu 100 kHz auszuführen.

6. Aufbau des Kalibriermessplatzes

Zur Durchführung von Kalibrierungen wurde der Spektrum/Netzwerk-Analysator SR785 vorgesehen. Er besitzt einen internen Signalgenerator und zwei Eingänge. Das Gerät erlaubt Messungen in einem Frequenzbereich von 1 μ Hz bis 100 kHz. Die Messanordnung wurde in Abb.30 skizziert. Für den Wechselstromeinsatz wurde extra der Shunt ausgewählt (induktionsarm). Das Ziel der Kalibrierung eines Induktionsspulenmagnetometers ist ein vollständiger Datensatz, der sowohl die Frequenzabhängigkeit der Phase als auch der Amplitude wiedergibt (FRF=Frequency Response Function).

$$FRF = \frac{\langle FFT1^* \rangle \cdot \langle FFT2 \rangle}{\langle FFT1^* \rangle \cdot \langle FFT1 \rangle} \quad (10)$$

FFT heißt Fast Fourier Transformation. Der Stern kennzeichnet die konjugiert komplexe Größe, und die Zahl bezieht sich auf den Eingang. Der Eingang 1 wurde als Referenzeingang gewählt.

Wie aus Abb.26 ersichtlich ist, wird der Wechselstrom über den Shunt (1 Ohm) zur Kalibrierspule geleitet. Als Quelle wird der interne Signalgenerator des SR785 genutzt. Der Ausgang des Generators hat eine Impedanz von 5 Ohm und kann Ströme bis +/-100mA liefern. Das Referenzsignal am Eingang 1 des Analysators wird am Shunt abgegriffen.

Der Analysator bietet die Möglichkeit der Pegelregelung am Eingang 1 (oder 2). D. h. man kann die Signalspannung am Eingang vorwählen. Durch Regelung der Generatorspannung wird dann der Referenzpegel konstant gehalten. Der Kalibrierspulenstrom ist somit auch bei Raumtemperaturänderungen konstant. Diese Option erlaubt die Angabe der Amplitude in absoluten Einheiten. Nach Gl. (10) wird die Amplitude nur in relativen Einheiten angegeben. Bei einem vorgewählten Pegel von 1 mV am Eingang 1 (Referenz) befinden sich die METRONIX-Spulen im Arbeitsbereich. Für die Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz in absoluten Einheiten erhält man dann:

$$A[mV/nT] = FRF / 15.65$$

Diese Formel wurde im Analysator programmiert, so dass als Ergebnis sofort die absoluten Zahlen zur Verfügung stehen.

Die Messung wurde soweit automatisiert, dass Mitarbeiter nach kurzer Einweisung in der Lage sind, beliebige Sensoren zu kalibrieren. Das Messprogramm liegt auf Diskette vor und versetzt nach dem Einlesen den Analysator in Betriebsbereitschaft (Anleitung siehe Anlage). Die Parameter Frequenz (Standardeinstellung 0.1 Hz bis 10 kHz), Amplitude (Standardeinstellung 1 mV = 15.65nT) und die Anzahl der Messpunkte (Standard 200) lassen sich leicht ändern. Die Dauer des Messablaufs richtet sich nach dem gewählten Frequenzbereich und der Anzahl der Messpunkte. Nach Beendigung der Messung wird das Resultat grafisch auf dem Bildschirm des Analysators dargestellt (Phase und Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz). Per Knopfdruck kann ein Abbild des Bildschirms geplottet werden. Nach der Eingabe eines Dateinamens können die Daten auf Diskette gespeichert werden und stehen somit zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

7. Ergebnisse von Kalibriermessungen

In den Abb. 24, 25 wurden bereits die Ergebnisse von Kalibriermessungen eines Fluxgate-Magnetometers und einer einfachen Luftspule dargestellt.

Die gemessene FRF des MAG 03 stimmt mit den Angaben des Herstellers überein. Da die Luftspule über kein Rückkopplungsnetzwerk verfügt, entspricht die gemessene FRF ebenfalls den Erwartungen.

In den Abb. 27 bis 30 werden Beispiele von Kalibriermessungen von METRONIX Induktionsspulenmagnetometern aus dem GFZ-Gerätepool gezeigt.

Die MFS05 besitzen einen Umschalter, so dass die Induktionsspulen in einem niederfrequenten (LF) Modus und einem hochfrequenten (HF) Modus betrieben werden können. Entsprechend müssen auch 2 Kalibriermessungen pro Gerät durchgeführt werden; im LF-Modus von 0,1 Hz bis 500 Hz und im HF-Modus von 1 Hz bis 10 kHz.

Während die LF-Messung etwa 2 Stunden dauert, ist die HF-Messung in weniger als 30 Minuten fertig. Die Frequency Response Function der Spule Nr. 46 in Abb. 27 ist ein Beispiel für ein intaktes Magnetometer. Die Spitzen bei $f = 50$ Hz und $f = 16.66$ Hz werden nicht durch das Magnetometer verursacht, sondern sind überlagerte Störpegel, die durch unser Stromnetz und die elektrifizierte Bahn(DB) hervorgerufen werden (50 Hz bis zu 10 nT Amplitude).

Signifikante Abweichungen von den Sollwerten zeigen die Spule Nr. 35 (Abb. 28) im LF-Modus und die Spule Nr. 45 (Abb. 29) im HF-Modus. Besonders problematisch ist, dass solch eine Fehlfunktion während eines Geländeeinsatzes nicht erkannt würde und somit fehlerbehaftete Messergebnisse weiterverarbeitet würden. Von 30 vermessenen Induktionsspulen hatte eine einen Kurzschluss, jeweils eine waren im LF-Bereich und HF-

Bereich unbrauchbar und bei 5 weiteren wurden deutliche Abweichungen im HF-Bereich ab 1 kHz festgestellt.

Ergebnisse, wie sie direkt mit dem Spektrumanalysator erzeugt werden, zeigen die Ausdrücke in Abb. 30a und b.

8. Zusammenfassung

Anfang des Jahres 2001 wurde am Geomagnetischen Observatorium Niemegk des GFZ eine Kalibriereinrichtung für Induktionsspulenmagnetometer in Betrieb genommen.

Vor Inbetriebnahme des Messplatzes wurde die Kalibrierspule umfangreichen Testmessungen unterzogen, die weitgehende Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen zeigten.

Mit einem Frequenzbereich von wenigen μHz bis 100 kHz reicht die Kalibriereinrichtung aus, um alle vorhandenen Typen von Induktionsspulenmagnetometern kalibrieren zu können.

Unmittelbar nach Fertigstellung der Kalibriereinrichtung wurden alle 30 Induktionsspulen vom Typ MFS05 des GFZ-Gerätepools vermessen. Bei einigen Sensoren wurden z.T. gravierende Fehlfunktionen festgestellt, was die Notwendigkeit eines solchen Messplatzes deutlich macht. Aufgrund des weitgehend automatisierten Meßvorgangs kann die Kalibriereinrichtung auch von Nichtspezialisten nach einer kurzen Einweisung bedient werden. Die Anpassung an andere Typen von Sensoren ist mit geringem Aufwand möglich. Deshalb kann die Kalibriereinrichtung auch für andere Magnetometertypen bzw. für fremde Institutionen von Interesse sein.

Danksagung

Prof. H. Lühr sei an dieser Stelle für seine Ideen und Diskussionen gedankt. Ausserdem möchten wir uns für die Diskussionen während der Mitarbeiterseminare, die unter Leitung von Prof. V. Haak stattfanden, bedanken. Dieser Gedankenaustausch trug wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei. Besonderen Dank schulden wir den Mechanischen Werkstätten in Potsdam und Niemegk. Hier gab es eine ausgezeichnete Zusammenarbeit während des gesamten Fertigungsprozesses.

Literatur

- [1] METRONIX-Handbuch
Firmenschrift
Broadband Induction coil
magnetometer MFS05
- [2] Philippow, Eugen
Grundlagen der Elektrotechnik
3. Auflage
Akademische Verlagsgesellschaft
Geest u. Porting KG
Leipzig 1970
- [3] Croizier, Stuart
Forbes, Lawrence K.
Doddrell, David M.
A novel, open access elliptical
cross-section magnet for paediatric MRI
Meas. Sci. Technol. 9 (1998), p. 113-119
- [4] Mathcad
<http://www.mathsoft.com>
- [5] Nührmann, Dieter
Das große Werkbuch Elektronik
4. Auflage
Franzis Verlag München, 1984
- [6] Blechschmidt, Erich
Präzisionsmessungen von Kapazitäten,
Induktivitäten und Zeitkonstanten
Band II
VEB Verlag Technik Berlin 1956
- [7] Pietsch, Helmut
Hilfsbuch für die Funktechnik
Greest und Porting, Leipzig 1957

z-comp. at the center of coil ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=8\text{cm}$)

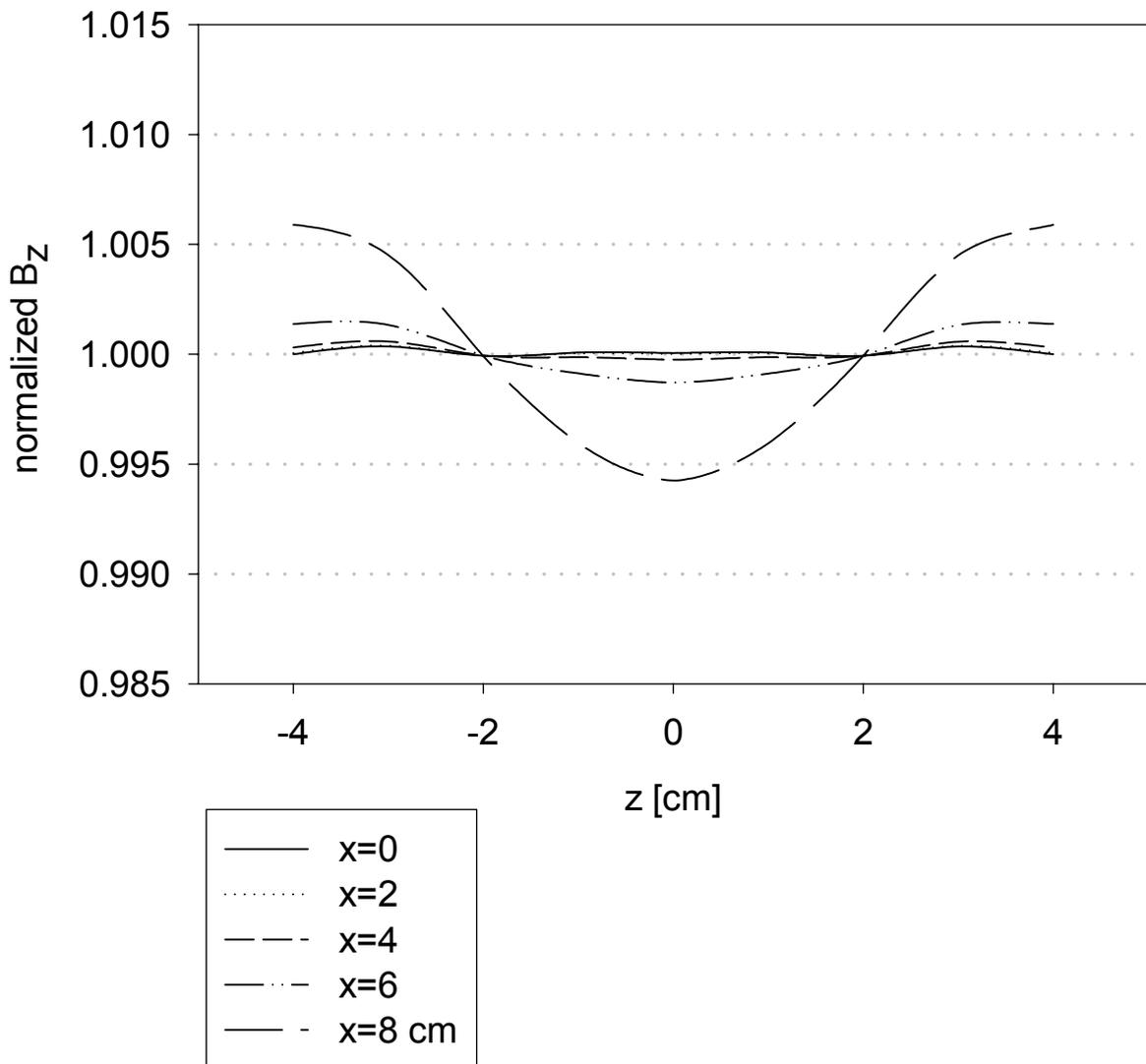


Abb.6 Magnetische Flußdichte

z-comp. ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=8\text{cm}$)
1m outside the coilmiddle

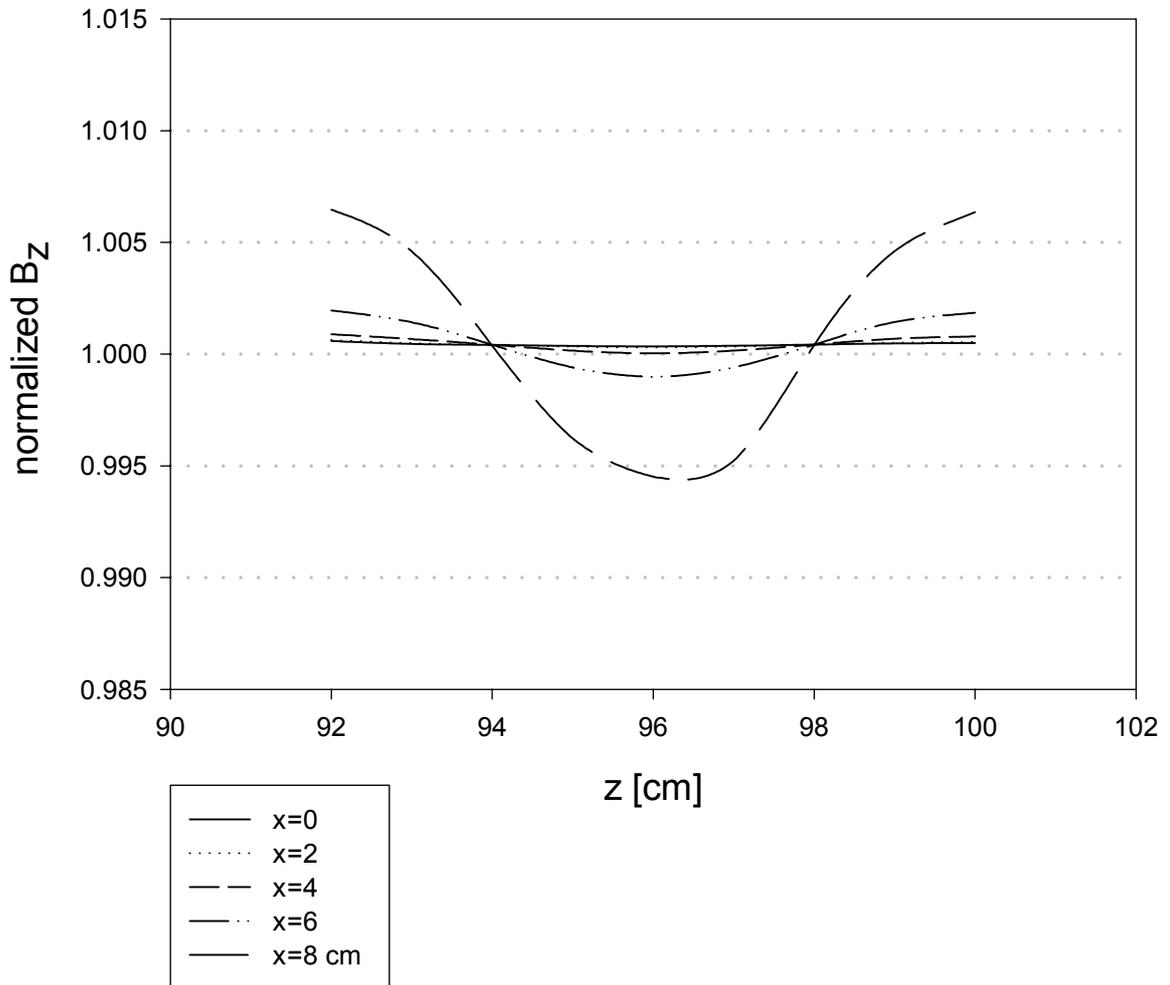


Abb.7 Magnetische Flußdichte außerhalb der Spulenmitte

x-comp. ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=8\text{cm}$)
 at the center of coil / 1m outside the coilmiddle

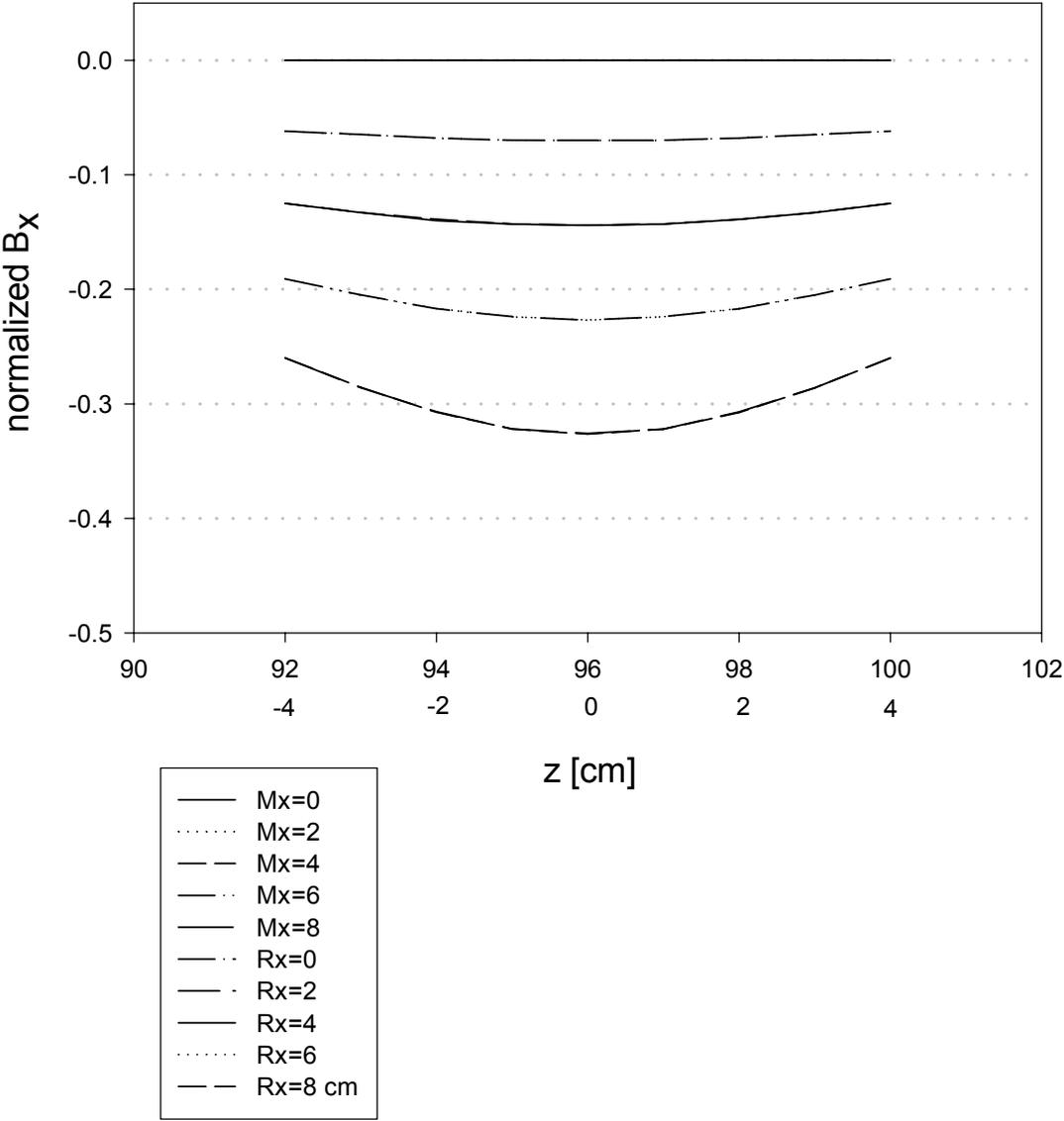


Abb.8 Magnetische Flußdichte senkrecht zur Spulenachse

z-comp. at the center of coil ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=9\text{cm}$)

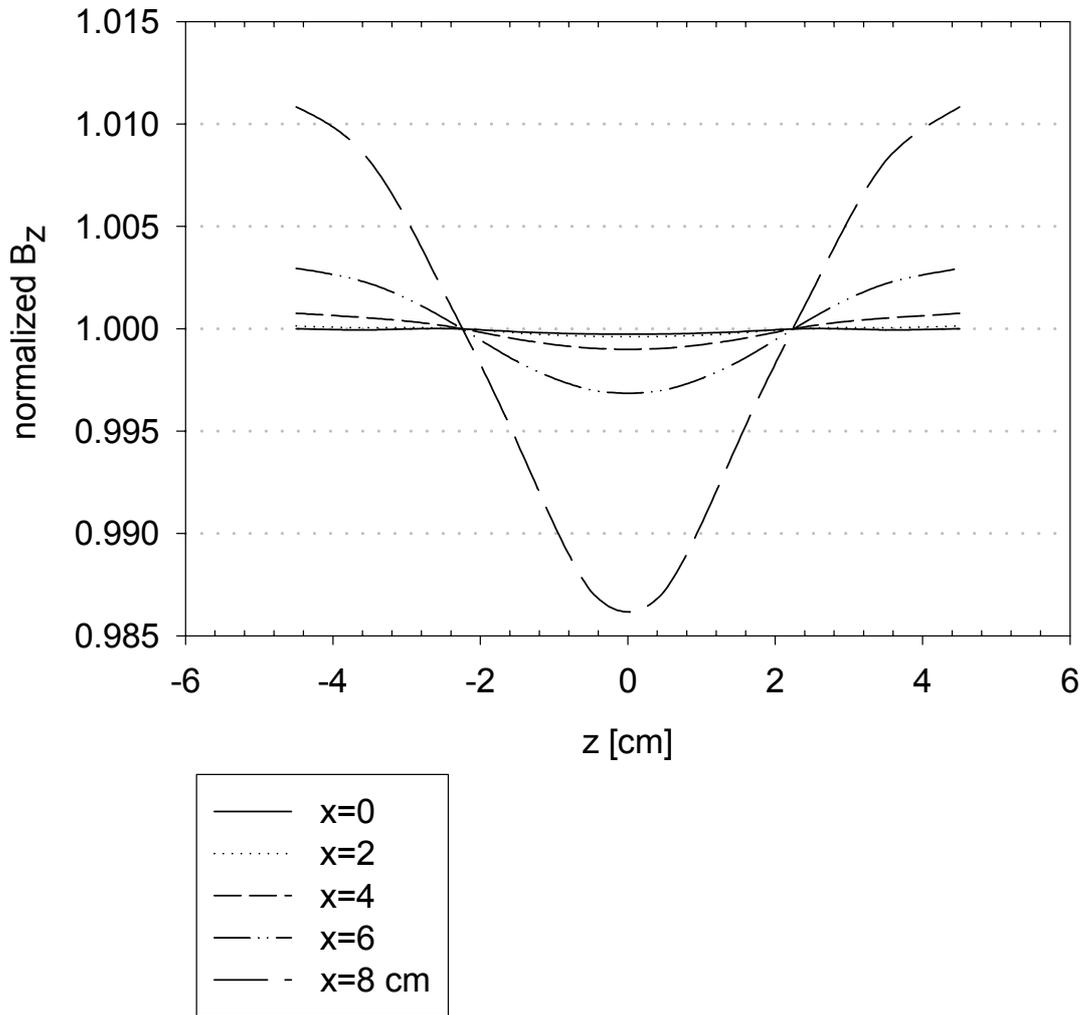


Abb.9 Magnetische Flußdichte für den Windungsabstand 9cm

z-comp. at the center of coil ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=7\text{cm}$)

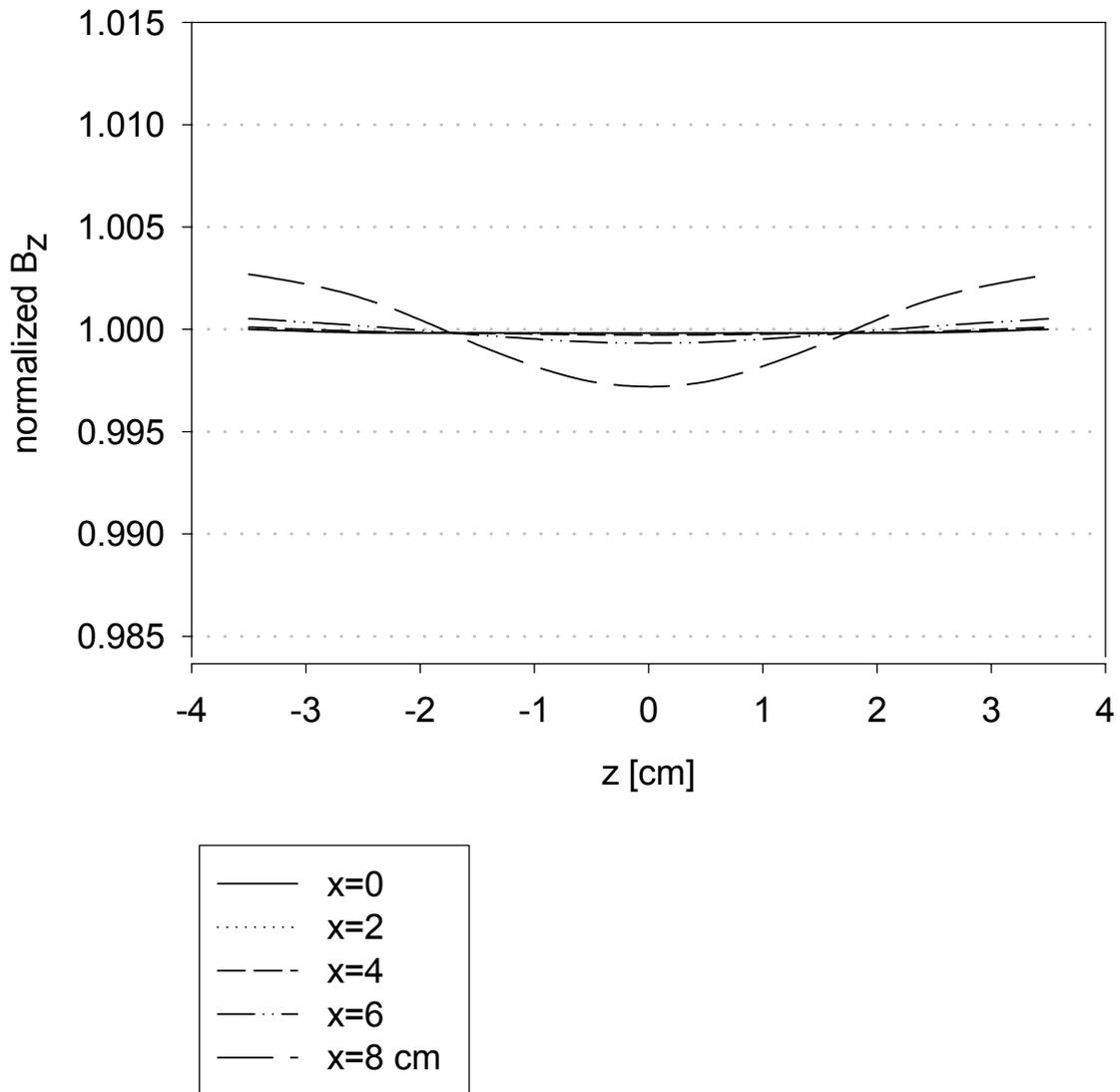


Abb.10 Magnetische Flußdichte für den Windungsabstand 7cm

z-comp. at the center of coil ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=5\text{cm}$)

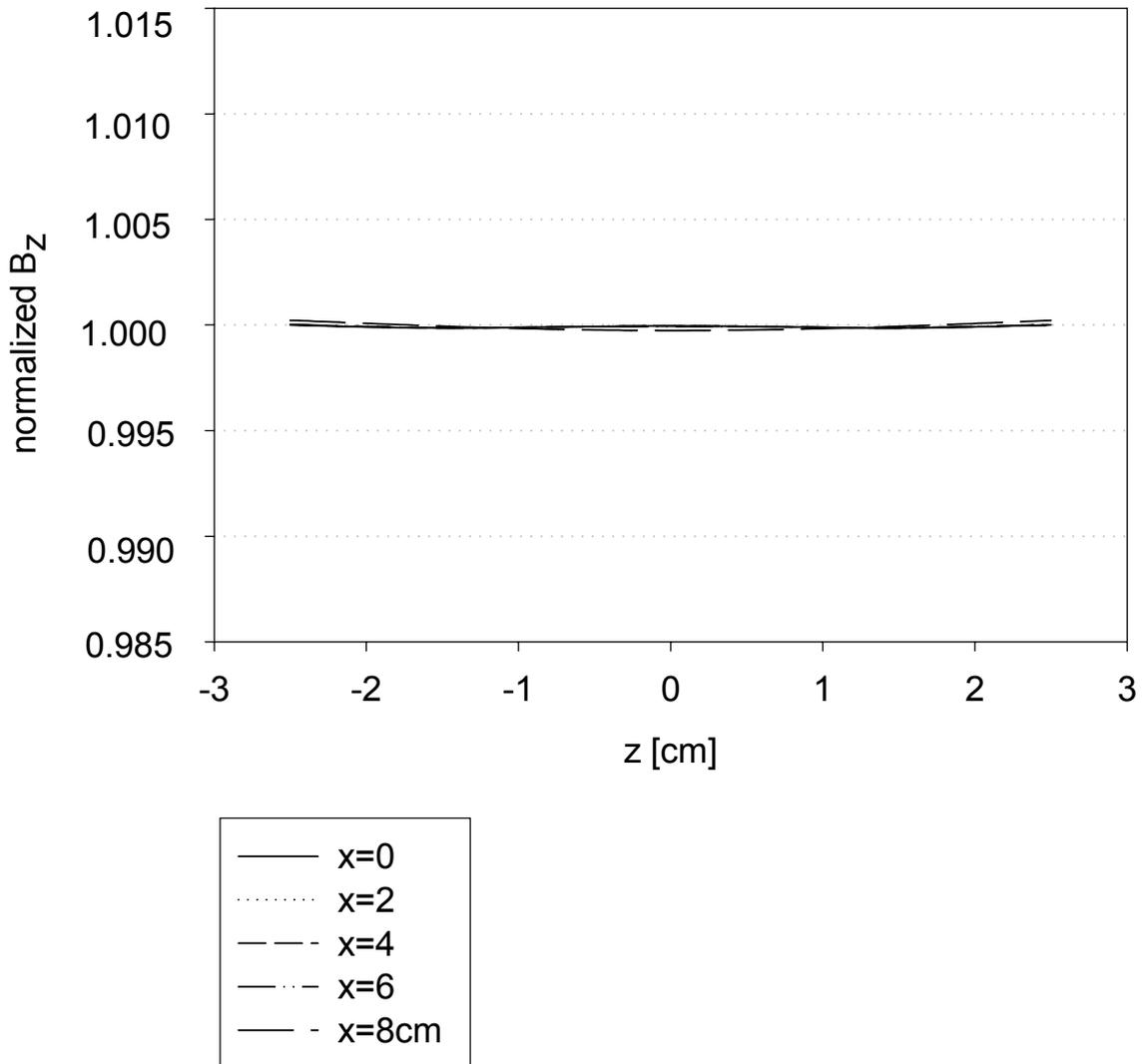


Abb.11 Magnetische Flußdichte für den Windungsabstand 5cm

x-comp. at the center of coil ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=5\text{cm}$)

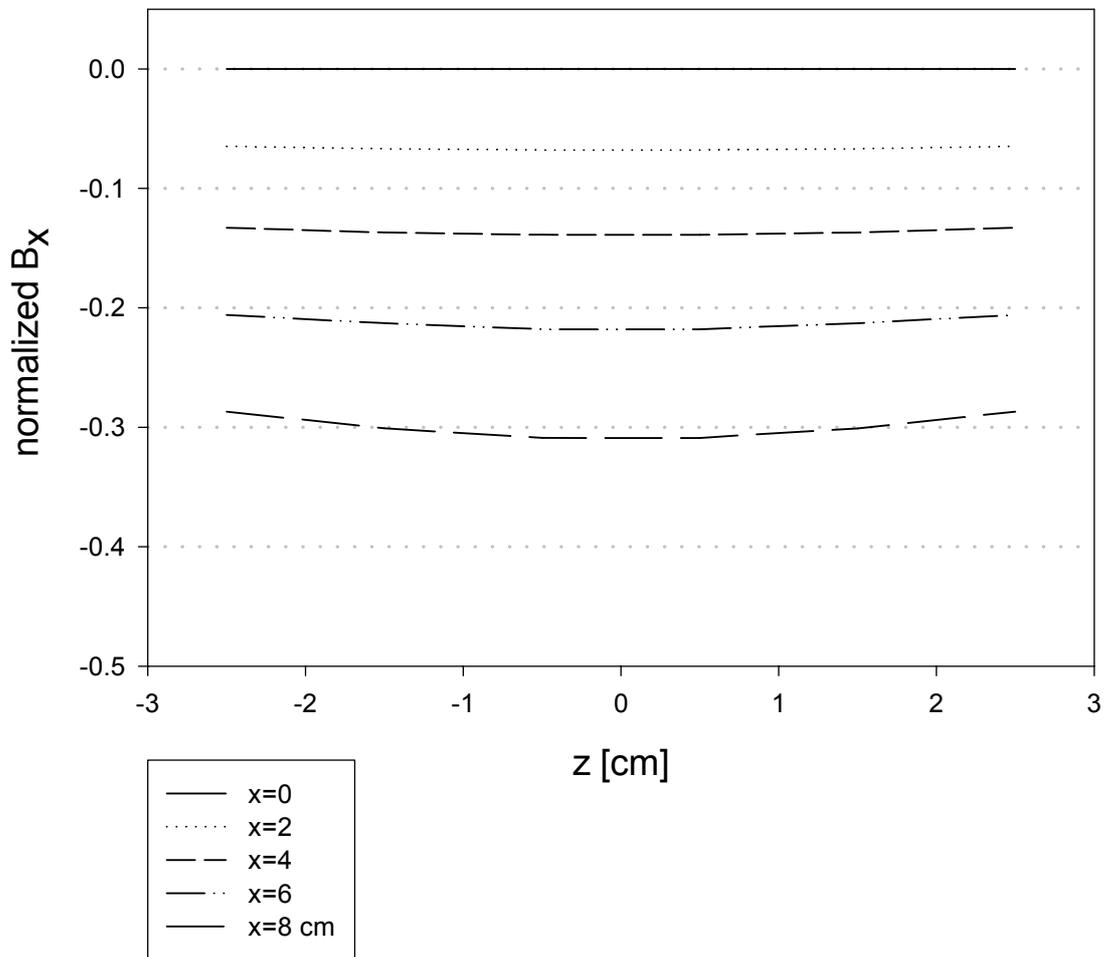


Abb.12 Magnetische Flußdichte senkrecht zur Spulenachse
Windungsabstand 5cm

z-comp. at the center of coil ($\varnothing=30\text{cm}$, $a=8\text{cm}$), elliptic

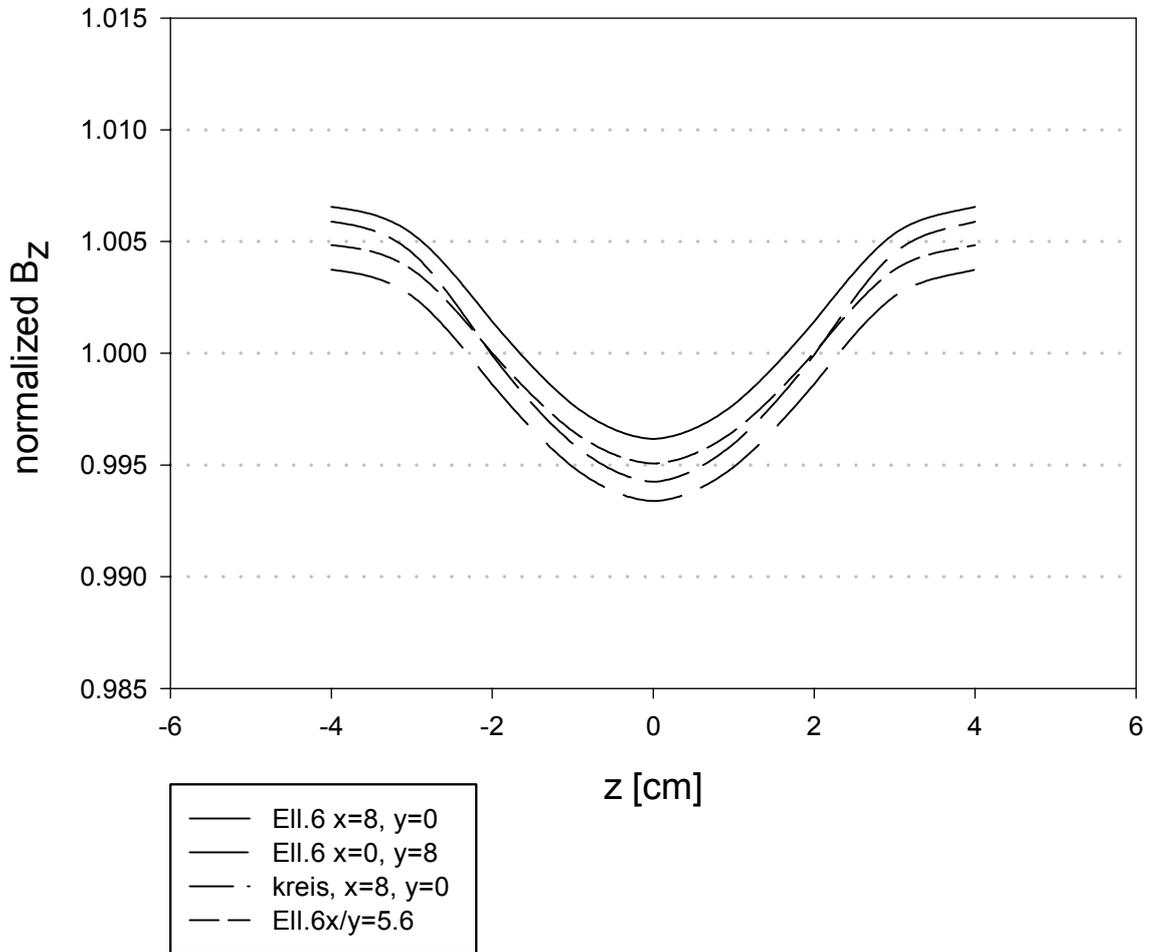


Abb.13 Magnetische Flußdichte für eine Ellipse

Amplitude response and phase response
for the estimated resonant frequency 850kHz

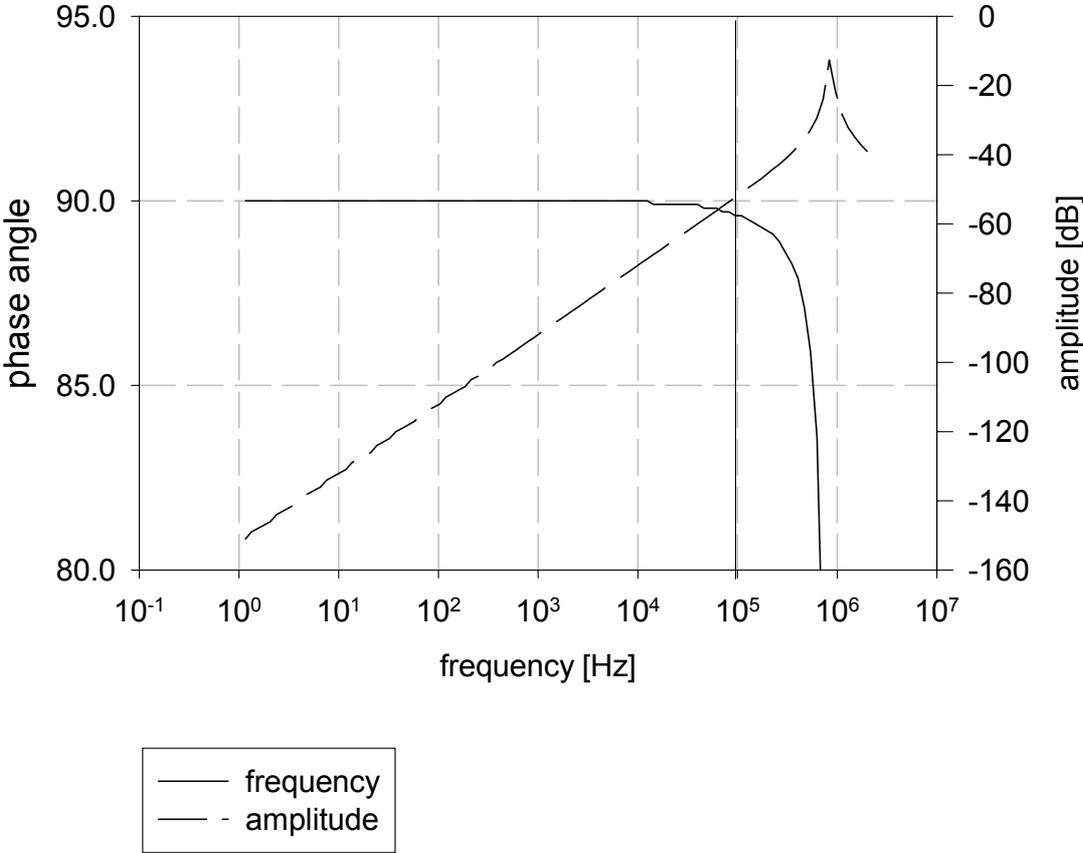


Abb.14 Bodediagramm zur abgeschätzten Eigenfrequenz

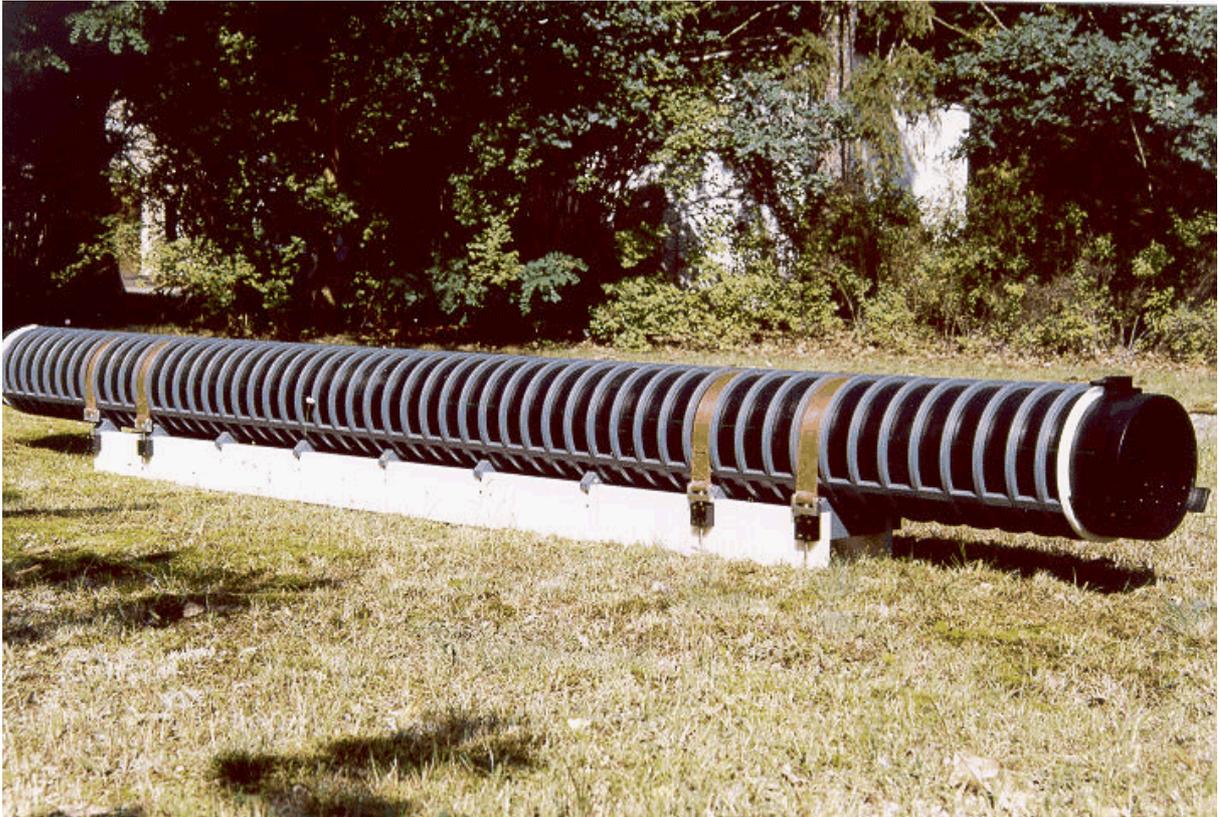
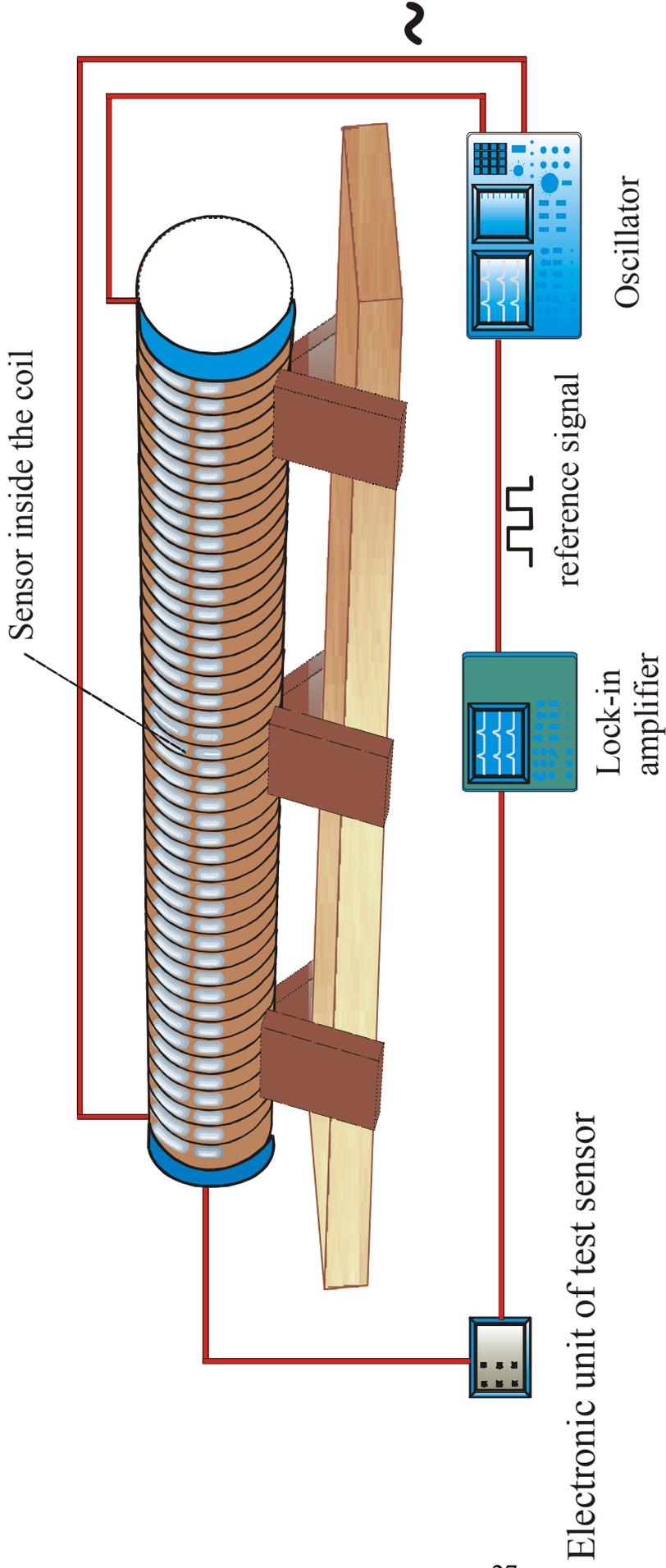


Abb. 15 Kalibrierspule vor der Aufstellung im Magnetischen Labor



Abb. 16 Kalibrierspule komplett montiert im Magnetischen Labor mit Induktionsspule



Electronic unit of test sensor

Lock-in amplifier

reference signal

Oscillator

Abb.17 Meßanordnung zur Ausschaltung der natürlichen magnetischen Variationen

Measured (MAG03) z-component

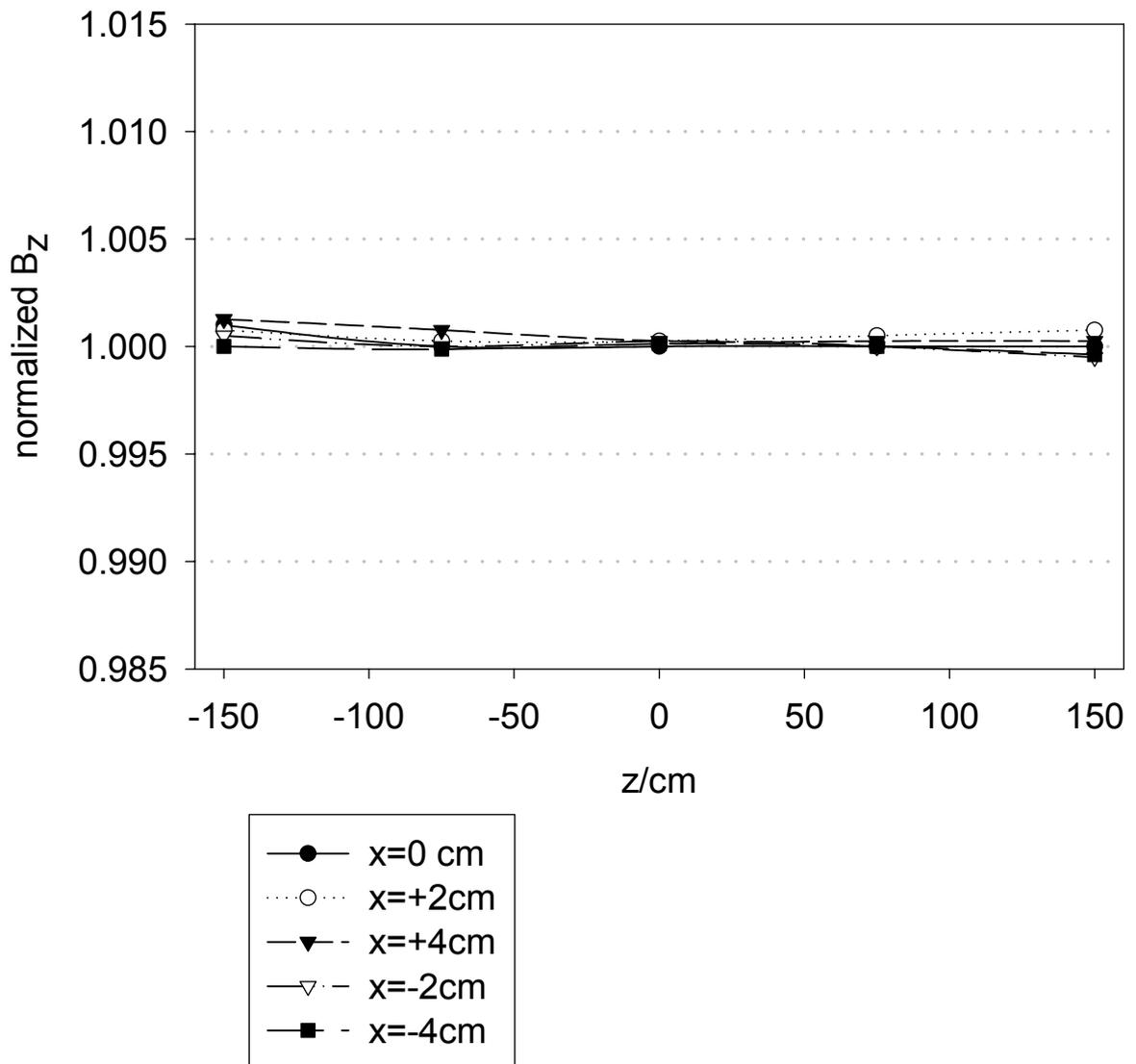


Abb.18 Gemessene magnetische Flußdichte

Measured (air coil) z-component

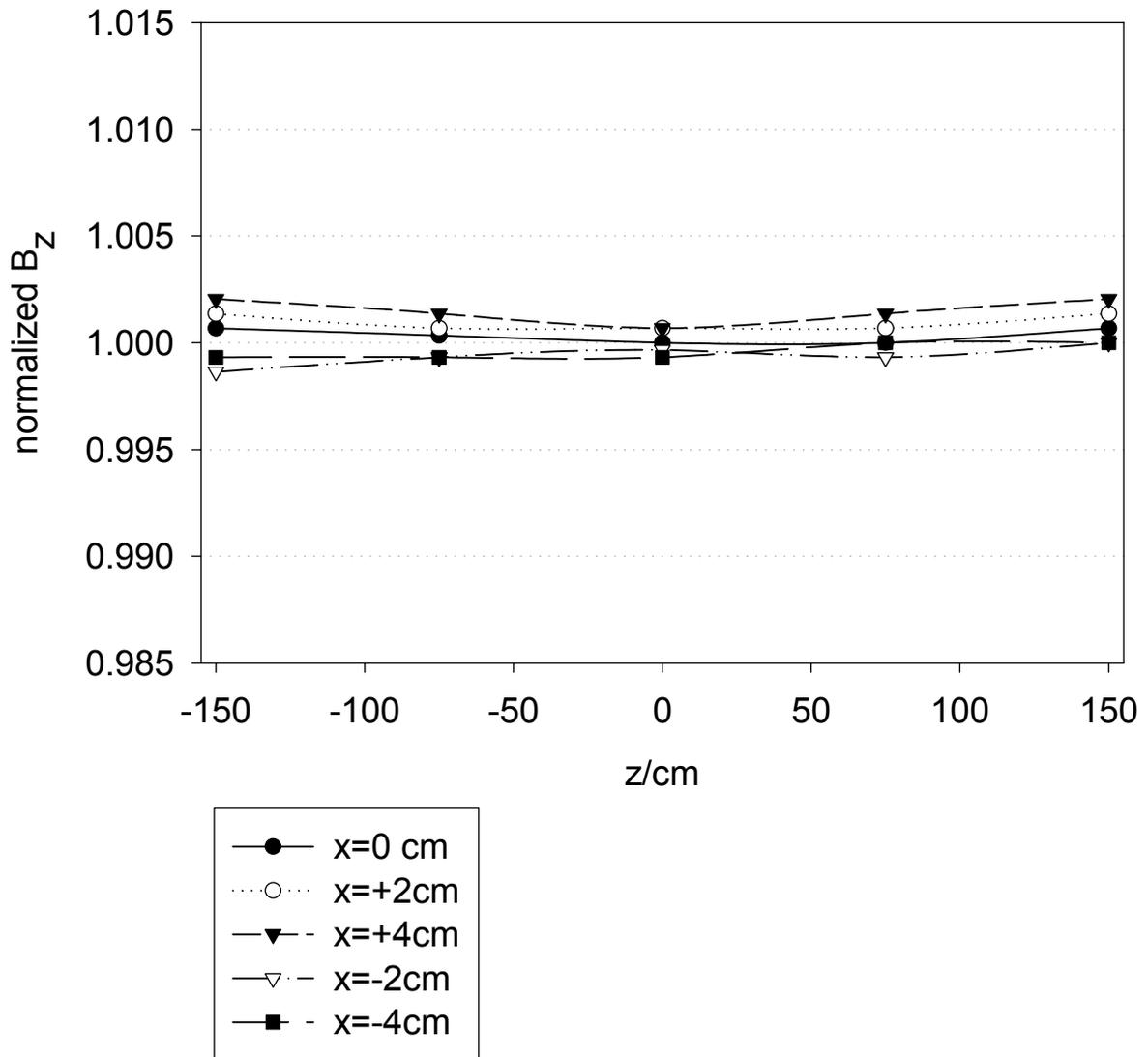


Abb.19 Gemessene magnetische Flußdichte

Comparison
between calculated and measured (MAG03) z-component

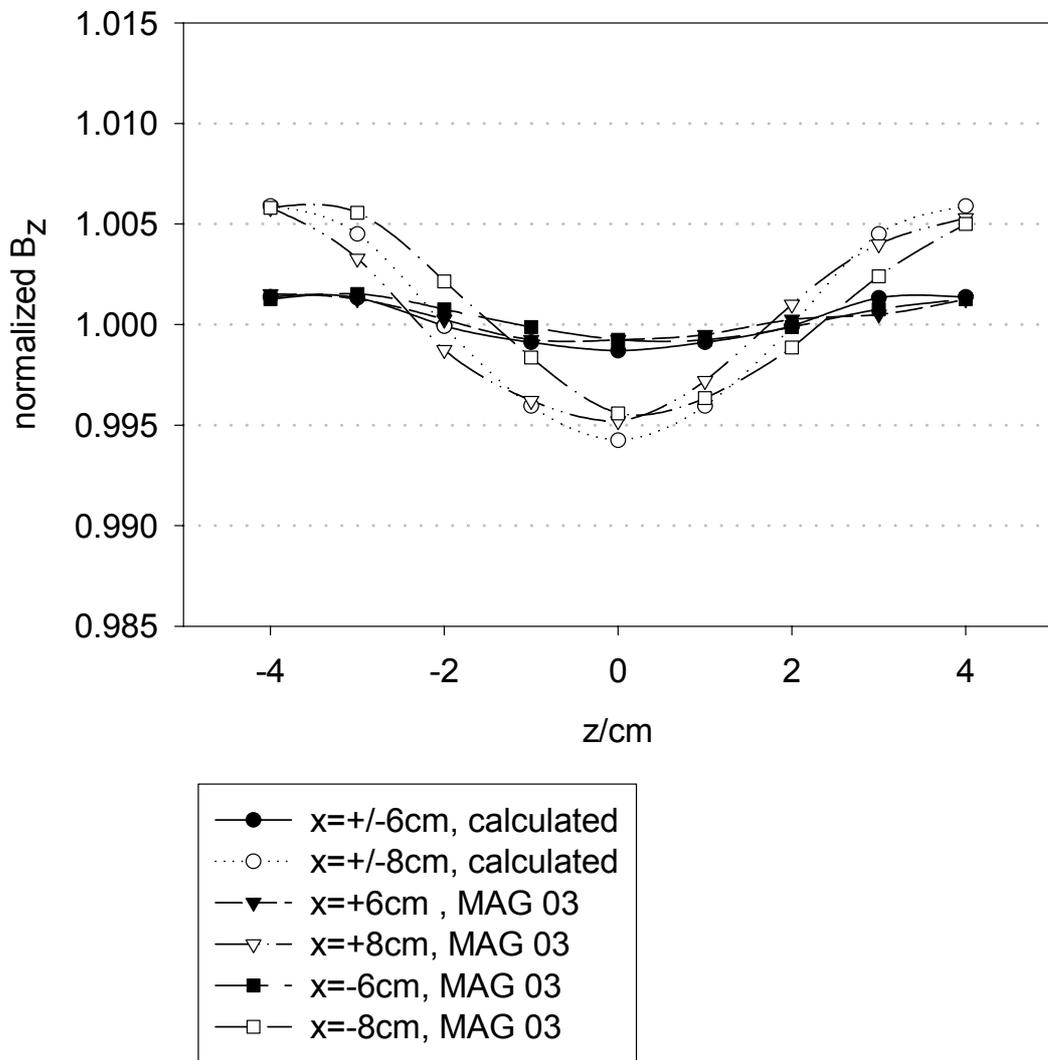


Abb.20 Vergleich zwischen berechneter u. gemessener magnetischer Flußdichte außerhalb der Zylinderachse

Comparison
between calculated and measured (air coil) z-component

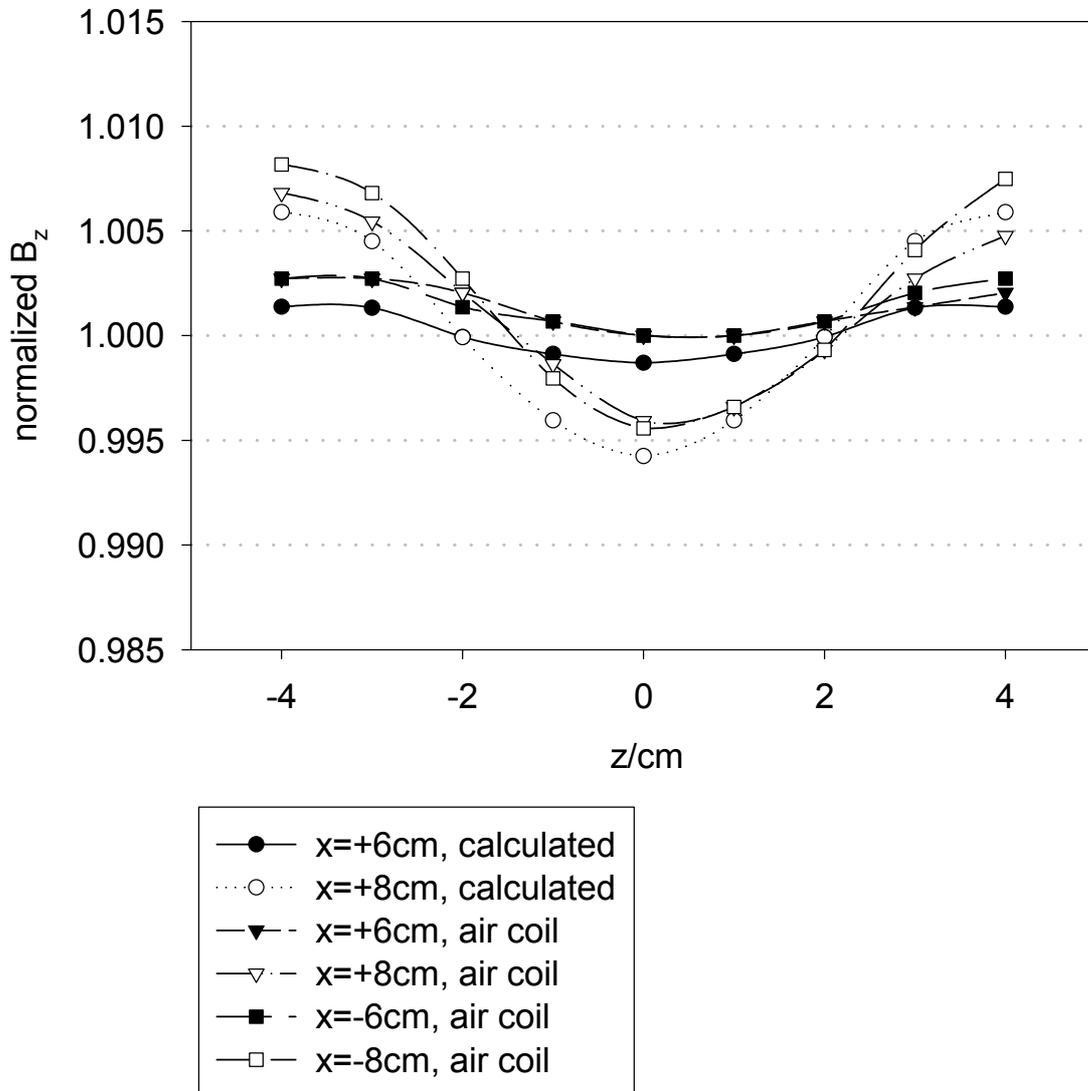


Abb.21 Vergleich zwischen berechneter u. gemessener magnetischer Flußdichte außerhalb der Zylinderachse

Comparison between calculated and measured (MAG03) z-component

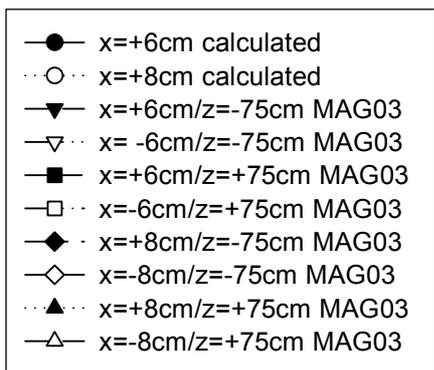
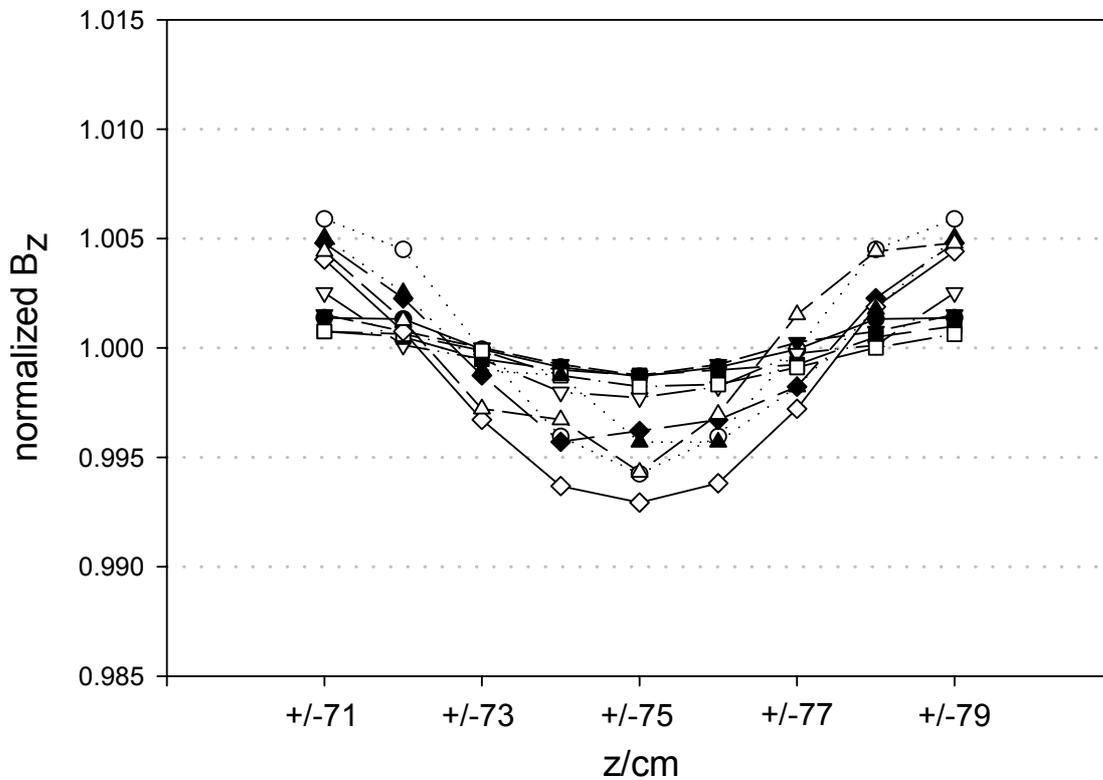


Abb.22 Vergleich zwischen berechneter u. gemessener magnetischer Flußdichte außerhalb der Zylinderachse für $x=\pm 6; 8\text{cm}$

Comparison between calculated and measured (Minicoil) z-component

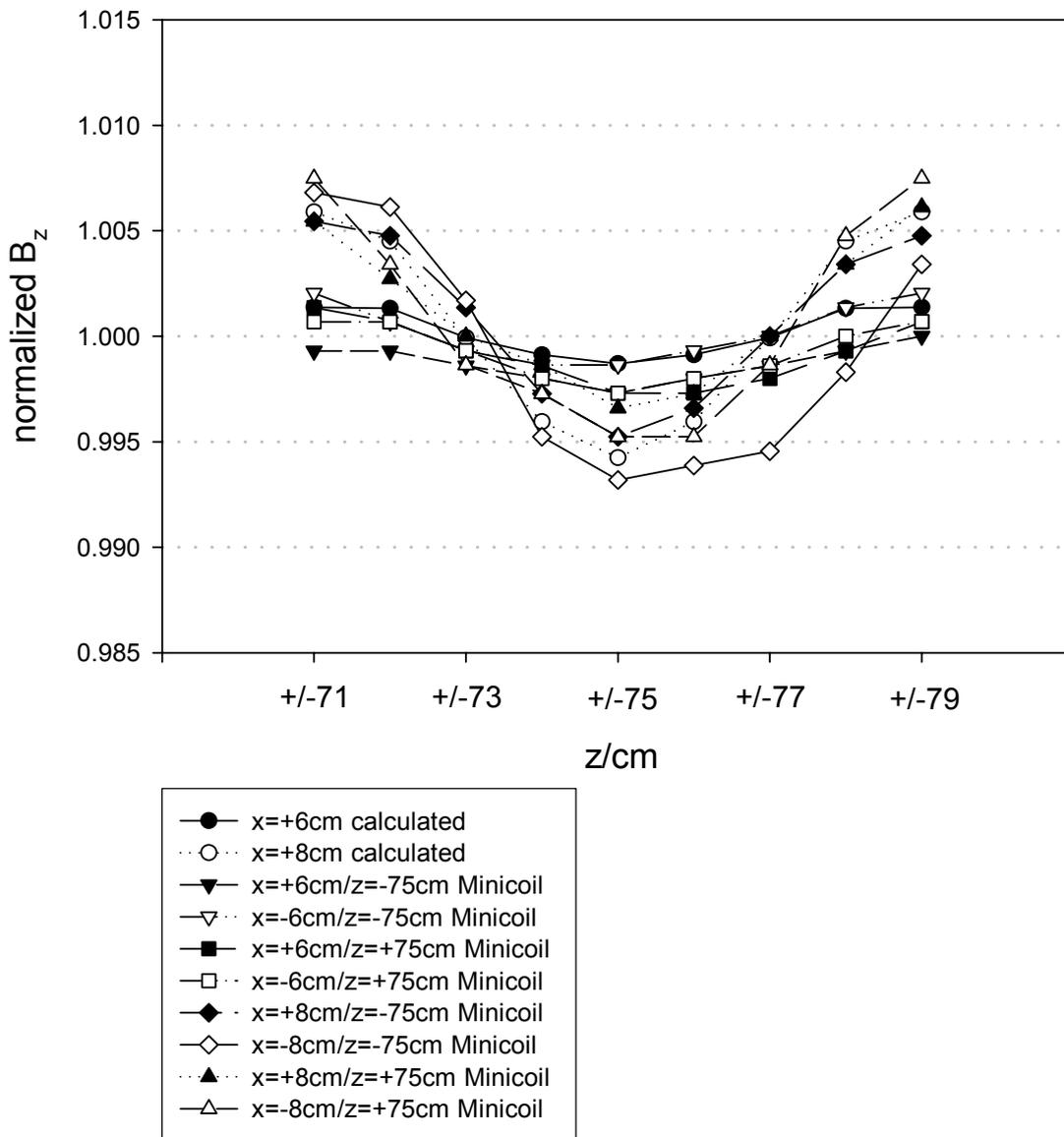


Abb.23 Vergleich zwischen berechneter u. gemessener magnetischer Flußdichte außerhalb der Zylinderachse für $x=+/-6,8cm$

Frequency Response Function from MAG03 without/with aMETRONIX-Sensor

(Distance between sensors 20cm)

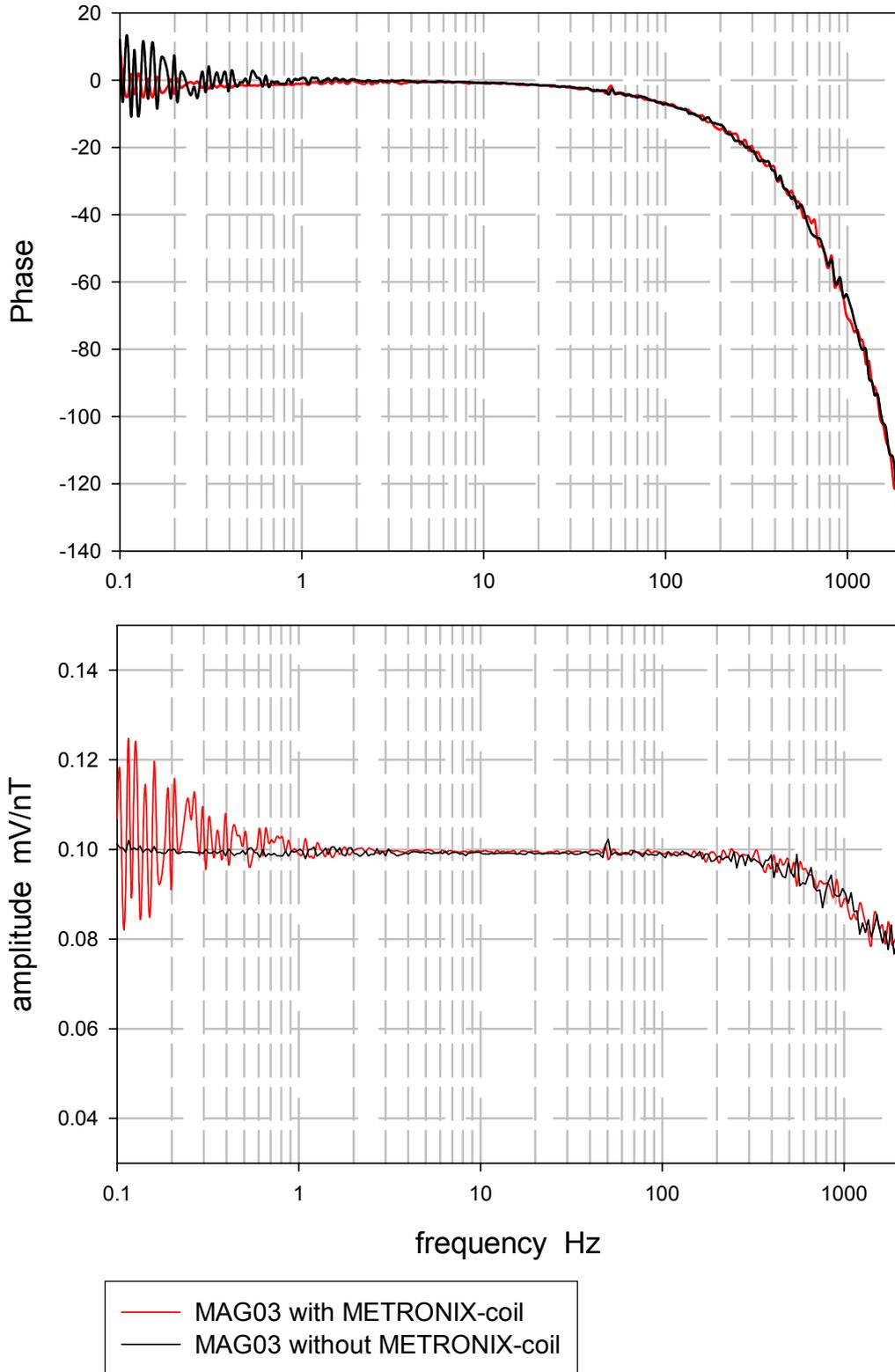


Abb.24 Frequency Response Function von MAG03
ohne/mit METRONIX-Sensor

Frequency Response Function from Aircoil without/with METRONIX-Sensor

(Distance between sensors 20cm)

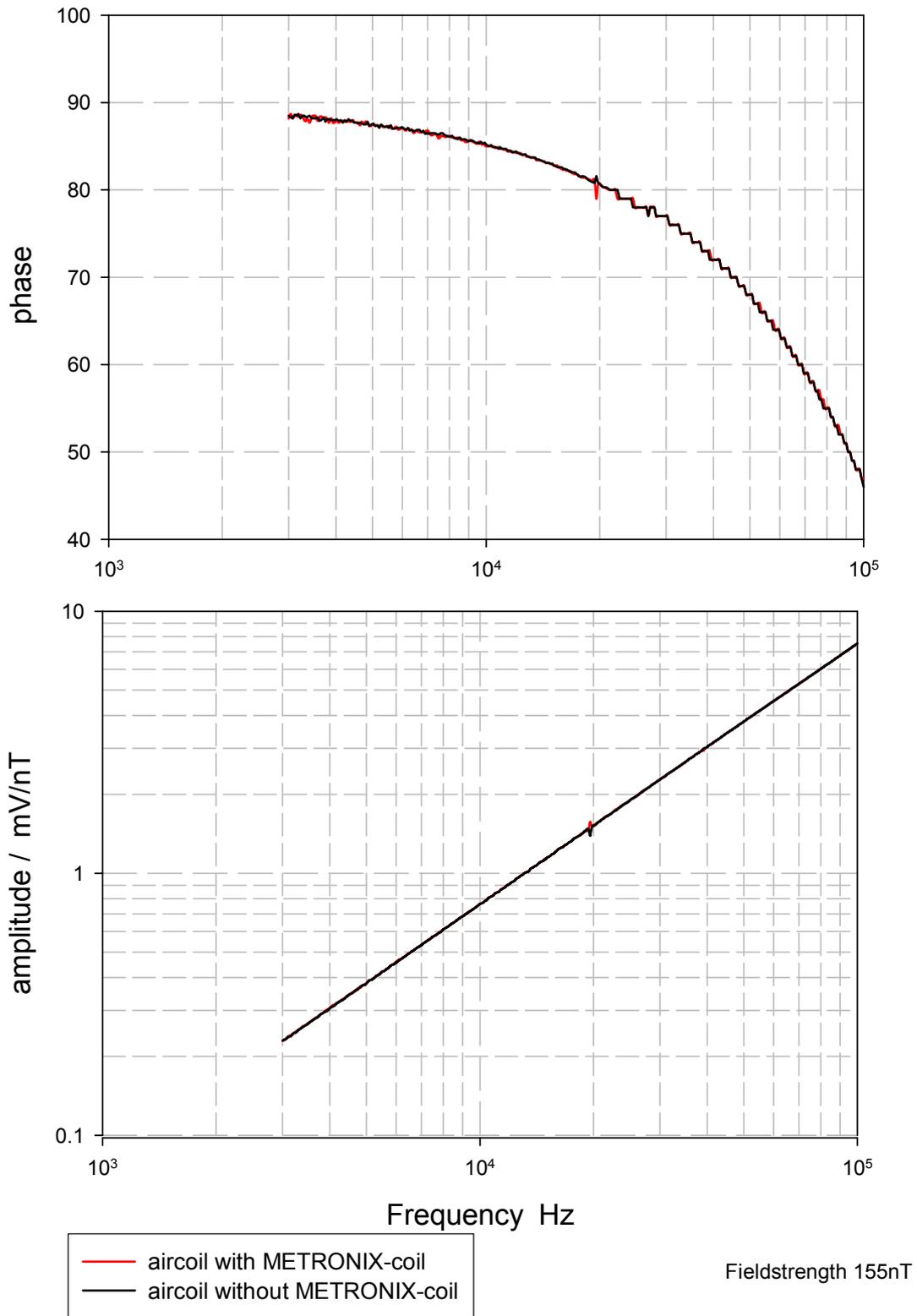


Abb.25 Frequency Response Function der Miniluftspule
ohne/mit METRONIX-Sensor

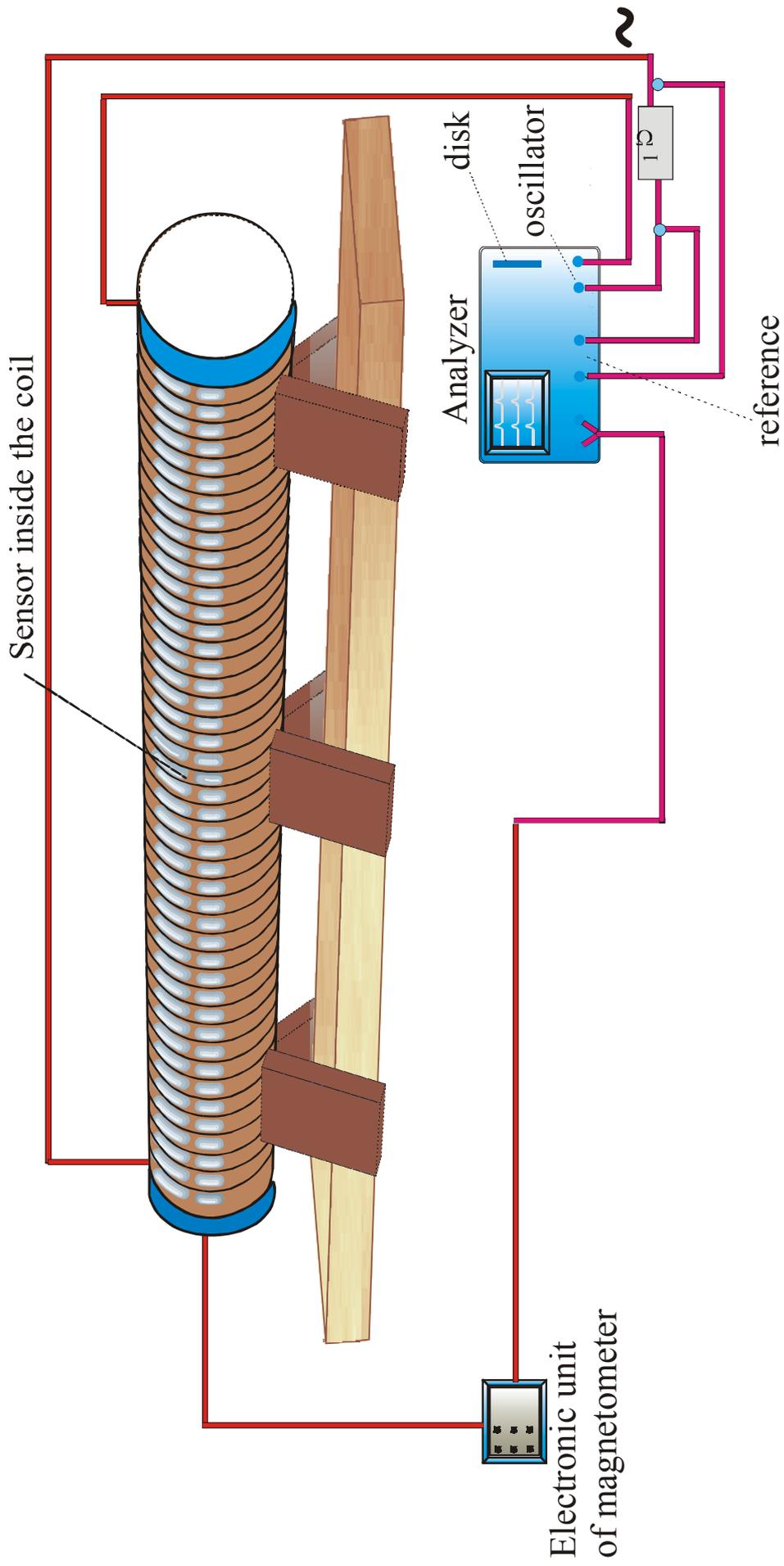


Abb.26 Aufbau zur Messung der Frequency Response Function mit dem Analytator SR785

Frequency Response Function of No.46

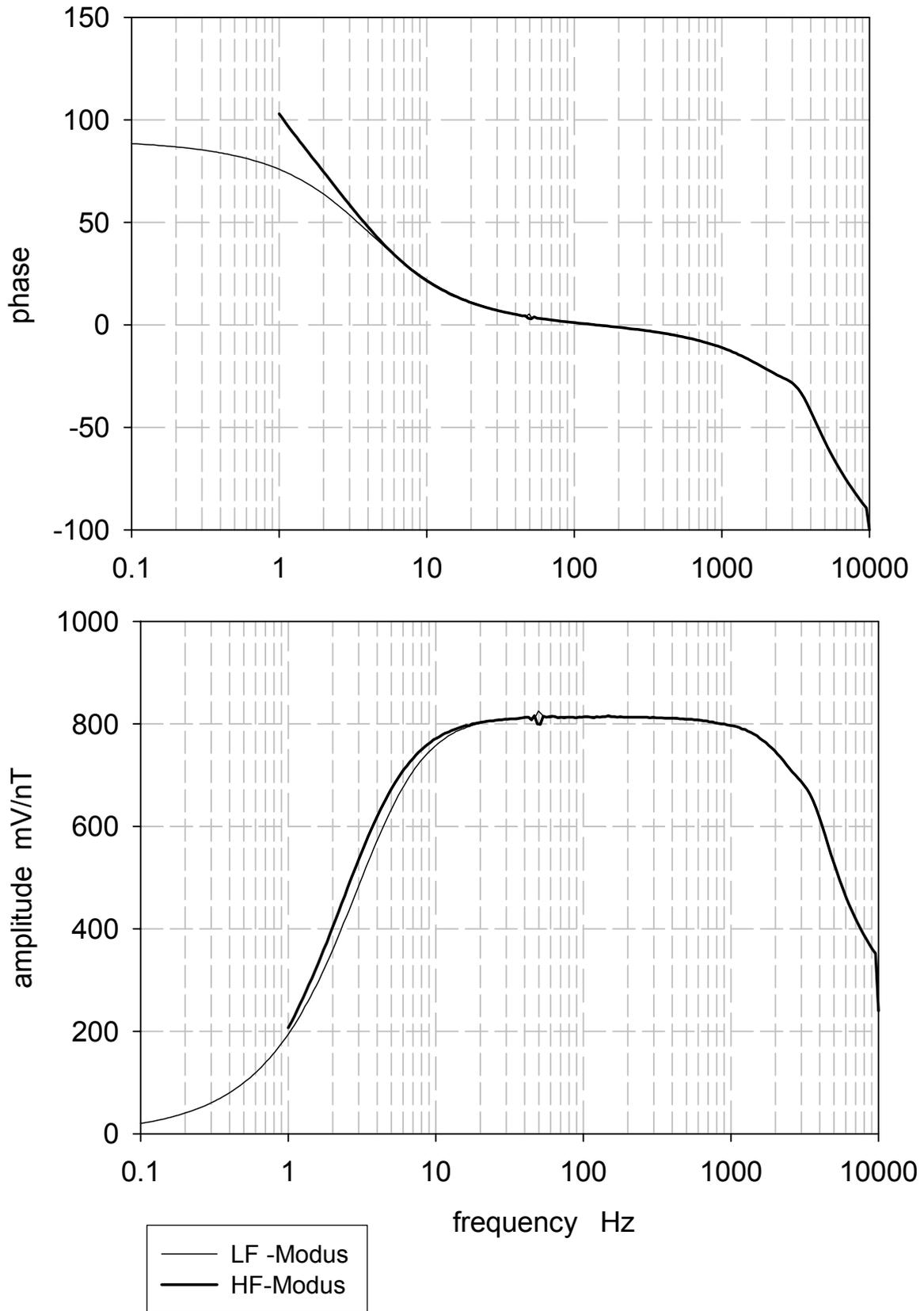


Abb.27 Phasen-/Amplitudencharackteristik
METRONIX GMS05 Nr.46

Frequency Response Function of Coil No. 35

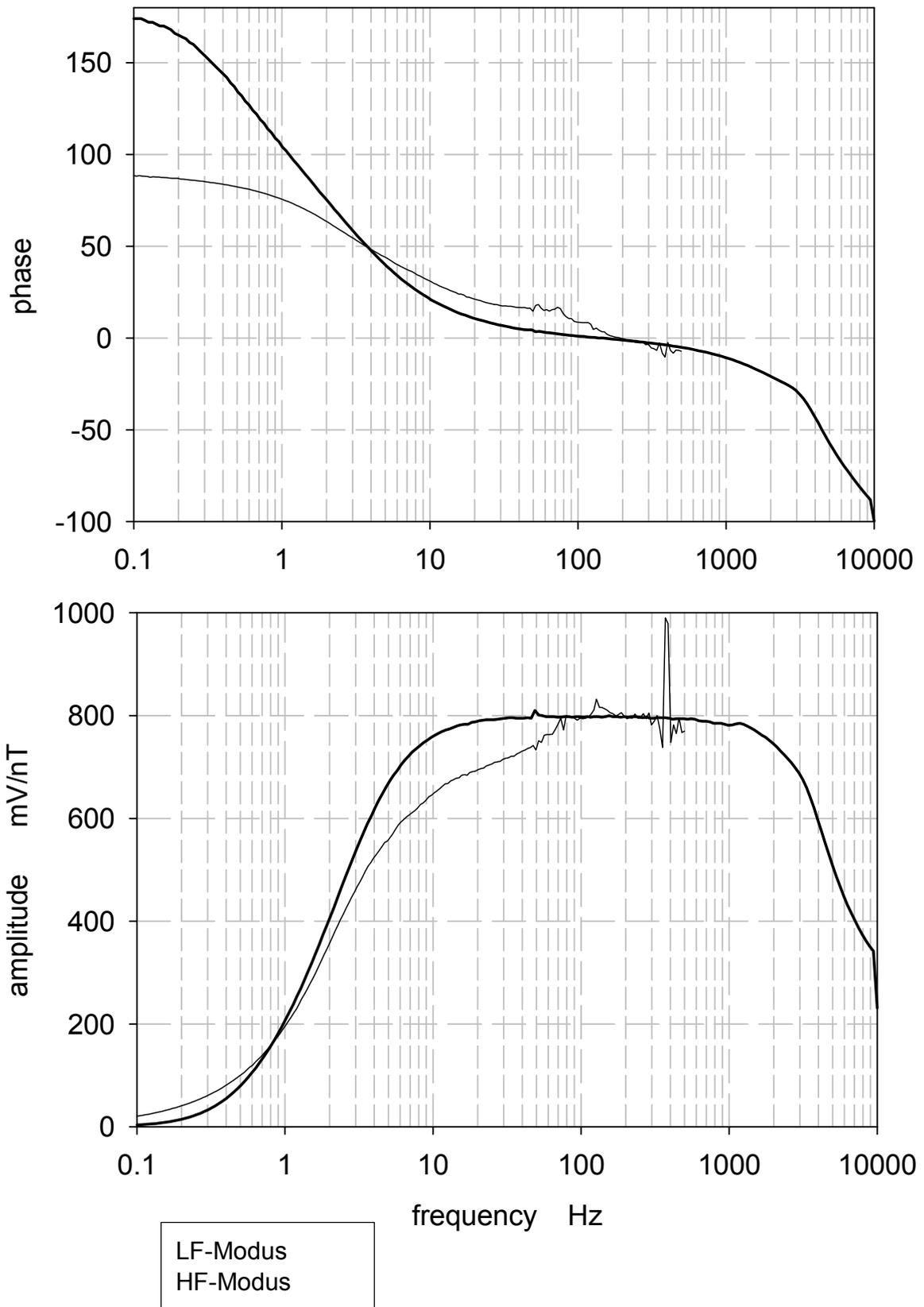


Abb.28 Phasen-/Amplitudencharakteristik
METRONIX GMS05 Nr.35

Frequency Response Function of Coil No.45

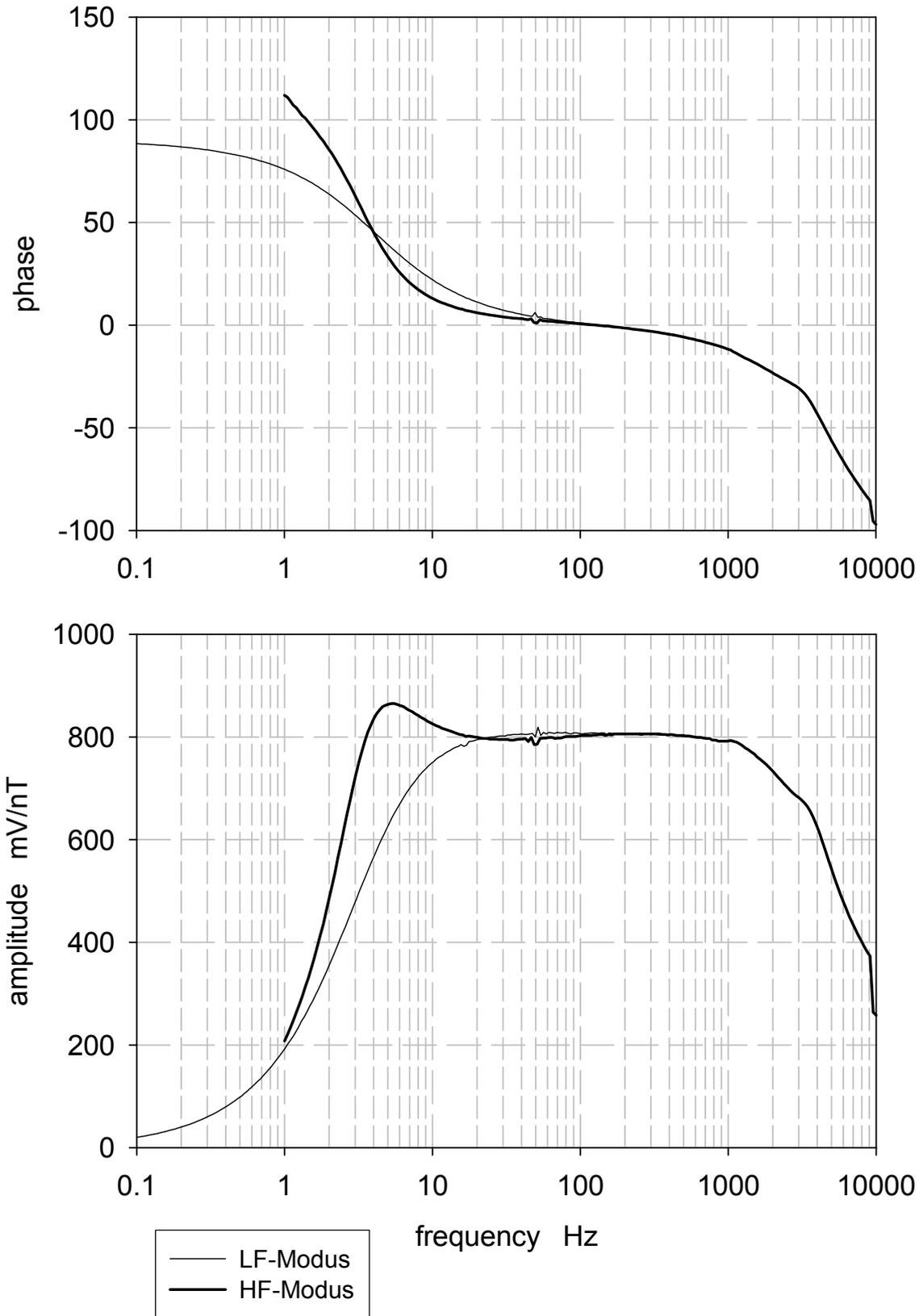
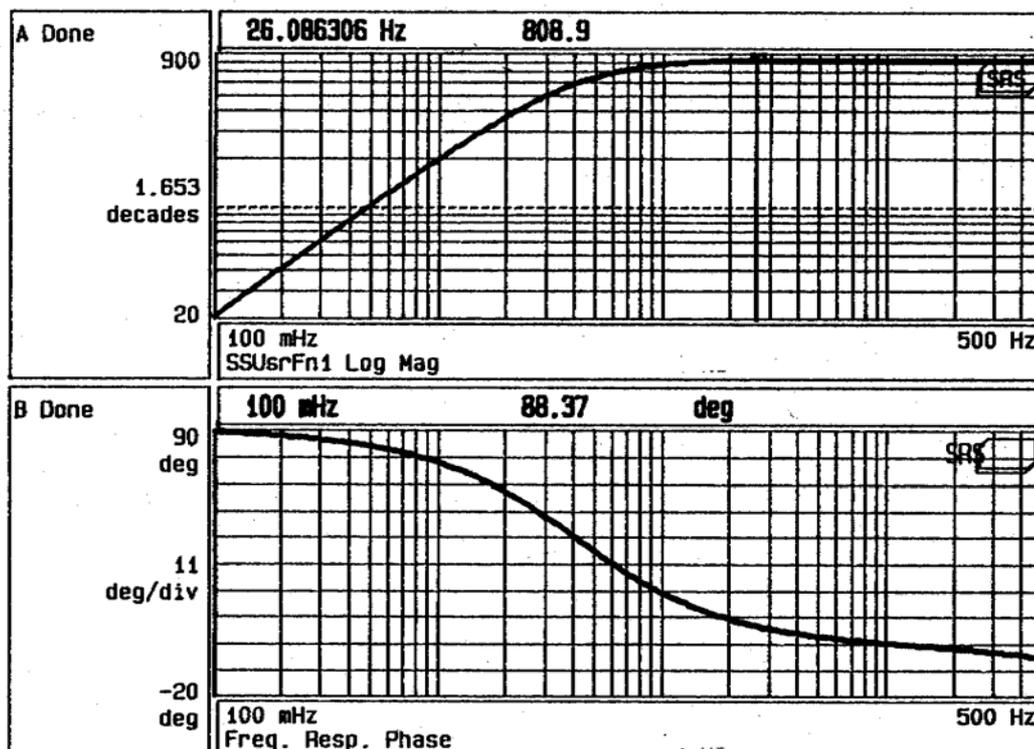
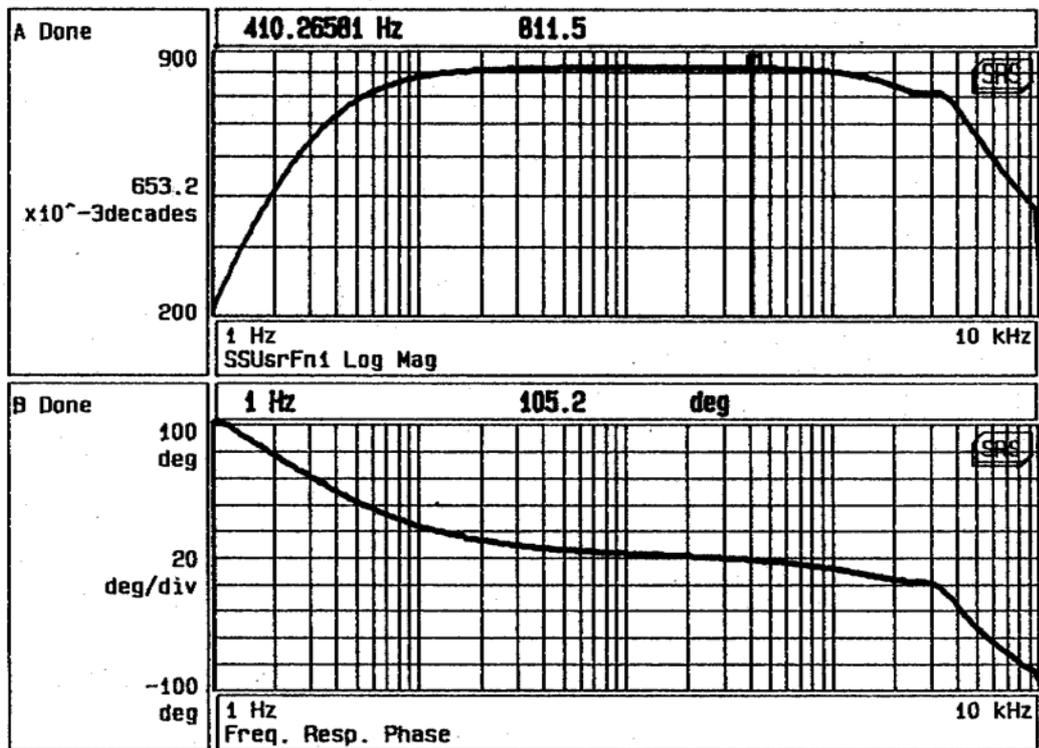


Abb.29 Phasen-/Amplitudencharakteristik
METRONIX GMS05 Nr.45



2/20/01 11:59:18

Abb.30a Phasen-/Amplitudencharakteristik
METRONIX GMS05 Nr.26, LF-Modus



2/20/01 09:38:57

Abb.30b Phasen-/Amplitudencharakteristik
METRONIX GMS05 Nr.26, HF-Modus

Anlage

Spulenvermessung

Die Spulen sind in zwei verschiedenen Frequenzbereichen zu vermessen:

1,0 Hz bis 10 kHz in Stellung HF (Schalter)

0,1 Hz bis 500 Hz in Stellung LF (Schalter)

Die HF-Messung dauert ca. 30 min. und die LF-Messung ca. 2,5 h. Die Einstellungen des Messablaufes für den Analysator SR 785 sind unter dem Datennamen COILCHEC gespeichert und können wie folgt eingelesen werden:

Taste drücken

Reaktion/Bemerkung

| | |
|---|---|
| [DISK] (im MENU-Feld) drücken | Es erscheint das Submenu am rechten Rand des Bildschirms |
| /Recall Settings/ /File Name/ [ALT] (im ENTRY Feld) [C] [O] [I] Buchstabentasten drücken bis der File Name eingegeben ist [ENTER] | Es erscheint das nächste Submenu |
| /Recall from Disk/ | Der Messablauf wird geladen und die eigentliche Messung kann beginnen |
| | Entsprechend vorgesehener Messung (HF, LF) den Frequenzbereich festlegen: |
| [FREQ] (im MENU-Feld) | Es erscheint das Submenu |
| /Stop Frequenz/ [1], [0] Drehknopf → /kHz/ [ENTER] | Jetzt unter ENTRY-Tastenfeld obere Grenzfrequenz eingeben (z.B. 10 kHz) (entsprechend Startfrequenz eingeben) |
| [START/RESET](im CONTROL-Tastenfeld) | Die Messung wird ausgeführt Nach Fertigstellung der Messung wird das Ergebnis in Form der beiden Grafiken auf dem Bildschirm dargestellt (Amplituden- und Phasenverlauf) |
| [DISK] (im Tastenfeld MENU) /File Name/ [5], [7], [ALT], [H], [F] [ENTER] | Speichern des Messergebnisses: Es erscheint das Submenu Die Nr. des Prüflings eingeben (z.B. 57 HF bzw. 57 LF) |
| andernfalls [ACTIVE DISPLAY](im CONTROL-Tastenfeld) drücken | Achtung !! Vor der Speicherung der Daten unbedingt darauf achten, daß das Amplituden-Diagramm aktiv ist. (Das Diagramm mit der hellen Kopfleiste ist aktiv.) |
| /Display to Disk/ | Akustisch und optisch wird die Speicheroperation dokumentiert |

| | |
|---|---|
| <p>[PRINT SCREEN] (im CONTROL-Tastenfeld)</p> | <p>Plotten der Diagramme: (Papier ist eingelegt und Plotter eingeschaltet!)</p> |
|---|---|

| | |
|---|---|
| <p>[ACTIVE DISPLAY] (im CONTROL-Feld)</p> <p>[DISPLAY SETUP] (im MENU-Feld)</p> <p>/Ymax/ über Tastenfeld neue obere Grenze eingeben und mit</p> <p>[ENTER] bestätigen</p> <p>/Ymin/ wie oben</p> | <p>Möchte man die Y-Skalen der Diagramme verändern, muss man wie folgt vorgehen: Auswahl des Diagramms (Das Diagramm mit der hellen Kopfleiste ist aktiv.)</p> <p>Es erscheint das Submenu</p> <p>(es ist auch möglich, die Grenzen mit Hilfe des Drehknopfes zu verändern)</p> |
|---|---|

| | |
|--|---|
| | <p>Anmerkung:</p> <p>[.....] bedeuten Tasten, wo die Funktion eingeschrieben ist</p> <p>[ALT] die Alt-Taste aktiviert die Tastenfunktion, die neben der Taste steht (z.B. Buchstaben für File Name Eingabe)</p> <p>/...../ bedeutet, das die Tastenleiste unmittelbar neben dem Bildschirm gemeint ist. Diese Tasten bedienen die Submenus.</p> |
|--|---|