

GFZ

Helmholtz-Zentrum
POTS DAM

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM

**DEUTSCHES
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

Eberhard Pulz

Entwicklung einer Kalibrier- einrichtung und eines Sensors für magnetische Feldmessungen in einem Frequenzbereich von 100Hz bis 1MHz

Zitierempfehlung

Pulz, E. (2018): Entwicklung einer Kalibriereinrichtung und eines Sensors für magnetische Feldmessungen in einem Frequenzbereich von 100Hz bis 1MHz, (Scientific Technical Report STR; 18/01), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.
DOI: <http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-18012>

Impressum

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
**DEUTSCHES
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

Veröffentlicht in Potsdam, Deutschland
März 2018

DOI: <http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-18012>
URN: urn:nbn:de:kobv:b103-18012



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
(CC BY SA 4.0) <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Eberhard Pulz

Entwicklung einer Kalibriereinrichtung und eines Sensors für
magnetische Feldmessungen in einem Frequenzbereich von 100Hz bis
1MHz

Scientific Technical Report STR 18/01

Inhalt

0. Abstact

1. Beispielmessungen
2. Einleitung
3. Auswahl einer geeigneten Spule
4. Auswahl eines geeigneten Spektrum-Analysators
5. Aufbau des Kalibriermessplatzes
6. Auswahl von geeigneten Sensoren
7. Technische Parameter
8. Danksagung
9. Literatur
10. Fotogalerie

Anlage AN200

HFRAE 5162

0. Abstract

A new calibration facility was developed, tested, and installed at the premises of the Geomagnetic observatory in Niemegk to test induction coil magnetometers (search coils) in the frequency range 100Hz to 1 MHz. The new calibration facility is based on a Braunbeck coil, which extends existing installations based on a three-dimensional Helmholtz coil and a cylindrical coil which cover only the frequency range from a few mHz to 100 kHz. The new calibration coil is primarily needed to test magnetic field sensors used by the Geophysical Instrument Pool Potsdam for the so-called Radio Magnetotelluric (RMT) method. The RMT method uses electromagnetic fields transmitted by radio stations to infer the electrical conductivity distribution of the shallow subsurface (~1 m to 50 m). We present theoretical calculations to determine the parameters of the new calibration coil, which could be confirmed with measurements using an OMICRON BODE 100 spectrum analyser. The new coil system was also tested by calibrating two existing magnetic field sensors (METRONIX MFS07 and SHFT-02e) with known response functions. We infer an overall accuracy of the new system of <0.05nT in amplitude and <0.5° in phase for frequencies < 700kHz and ≤0.05nT and ≤3° degrees for frequencies > 700kHz. We also developed, tested and calibrated a new magnetic field sensor, using a set of three orthogonal toroidal coils (based on the antenna AN 200). The initial results look promising. The overall noise figures surpass those of the Metronix SHFT-02e sensor. The amplitude characteristic is slightly non-linear though, varying between 5 and 75 mV/nT over the frequency range 10 kHz to 1 MHz.

1. Einleitung

Die bisher für den geophysikalischen Gerätepool zur Verfügung stehenden Kalibriersysteme für magnetotellurische Messungen [1, 2] haben einen Frequenzbereich bis zu 100kHz. Für Anwendungen der sogenannten Radio-Magnetotellurik (RMT) soll dieser Frequenzbereich bis zu einem MHz ausgedehnt werden. Die anregenden Quellen für die RMT sind Mittelwellensender. Mit dem Verfahren sollen die oberflächennahen Schichten erfasst werden. Das Problem bei der Entwicklung eines solchen Kalibriersystems liegt in der Spule, die eine sehr hohe Eigenfrequenz besitzen muß, um ein magnetisches Wechselfeld erzeugen zu können, das auch bei der Endfrequenz von 1MHz nur eine zu vernachlässigbare Phasenverschiebung aufweist. Außerdem muß die Feldhomogenität im inneren der Kalibrierspule genügend groß sein, um übliche (3-Komponenten) Sensoren vermessen zu können.

2. Auswahl einer geeigneten Spule

Die Eigenfrequenz einer Spule beträgt:

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

D.h. für eine hohe Eigenfrequenz muß die Spule sowohl eine kleine Eigeninduktivität als auch eine kleine Eigenkapazität haben. Während die Berechnung der Induktivität beliebiger Spulen noch relativ einfach ist, gestaltet sich die Berechnung der Kapazität als sehr schwierig. Man ist deshalb auf Experimente angewiesen.

Eine einfache Helmholtzspule müßte einen großen Durchmesser haben, um genügend homogen zu sein. Da die Induktivität einer Kreisspule proportional zum Durchmesser ist, würde eine große Helmholtzspule auch eine große Induktivität besitzen. Für eine Zylinderspule würden die gleichen Überlegungen gelten. Von früheren Experimenten existierte am Observatorium in Niemegek noch eine hölzerne Braunbeckspule [3](Abb.1). Der Spulenkörper wurde aus Holz gefertigt, denn wegen der Gegeninduktivität muß der Spulenkörper aus nichtleitenden Material bestehen. Sie wurde einlagig mit Kupferdraht ($\varnothing=2\text{mm}$) bestückt. Die Bestimmung der Eigenfrequenz (vgl. [1]) ergab 5,8MHz. Abgeschätzt wurde danach der mögliche Phasenfehler bei 1MHz und unterschiedlichen Vorwiderständen (Abb. 2,3). Nach Abb. 3, 10k Ω Vorwiderstand, beträgt der Phasenfehler etwa 0,5 $^\circ$ bei 1MHz. Die Messungen am SHFT-02e Sensor und den Vorwiderständen von 5 bzw. 10k Ω ergaben eine Phasendifferenz von etwa 2,5 $^\circ$, also schlechter als der erwartete Wert. Daraus kann man schlussfolgern, dass der tatsächliche Phasenfehler etwa bei 2,5x0,5 $^\circ$ liegt. Der tatsächliche Phasenfehler kann mangels eines kalibrierten Sensors nicht direkt gemessen werden. Die berechnete und gemessene Homogenität der Spule geht aus Abb.4 hervor. Sie ist für den vorgesehenen Zweck sehr gut geeignet.

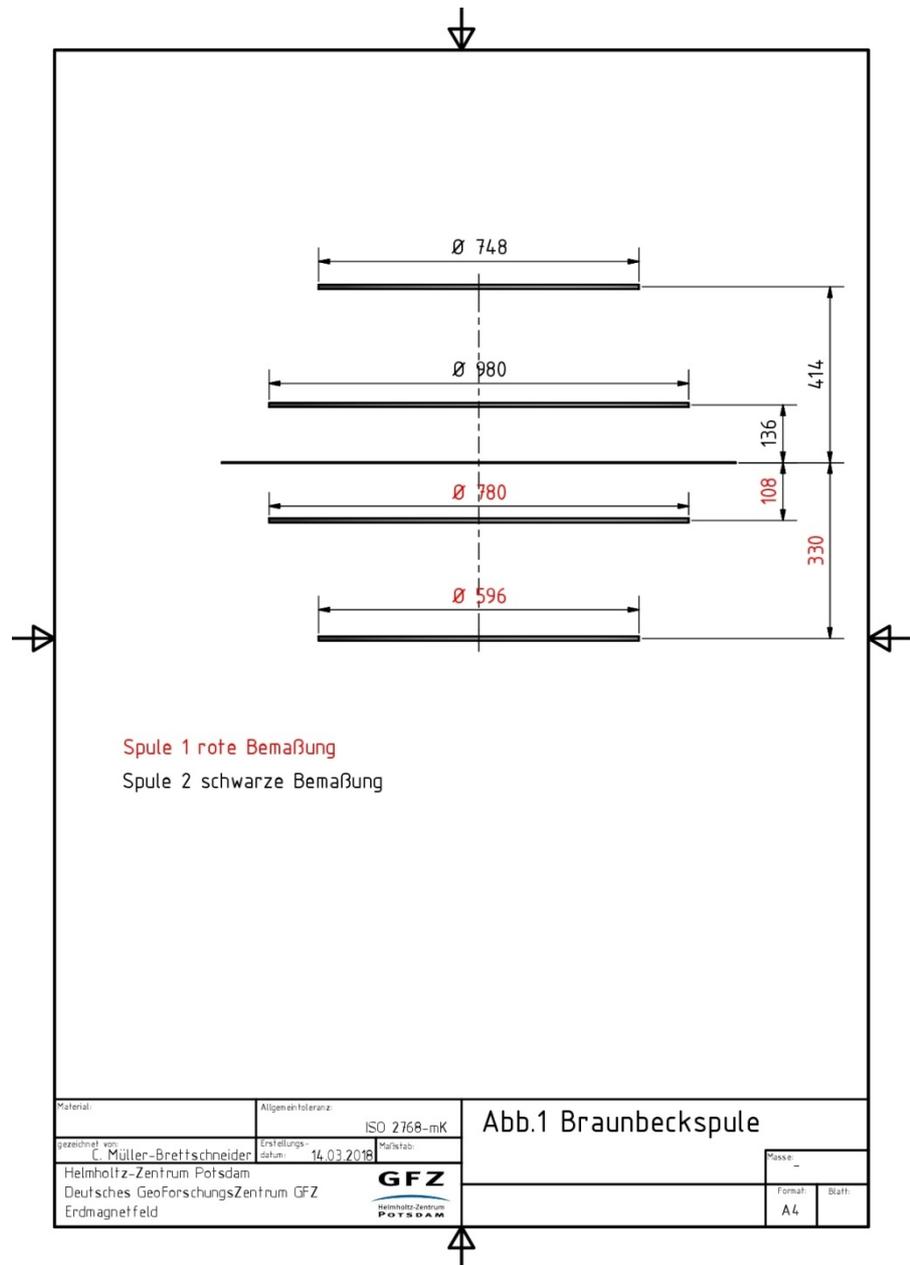
Da auch Spulentripel, bei denen die einzelnen Sensoren nicht voneinander getrennt werden können, vermessen werden sollen, wäre ein größeres Nutzvolumen wünschenswert. Daher wurde eine größere Braunbeckspule ebenso aus Holz gefertigt (Abb.1, Spule 2). Leider beträgt deren Eigenfrequenz nur 1,6MHz. Wegen des großen Vorwiderstandes erhält die Spule eine hervorragende Güte, so dass die theoretische Abschätzung nur 1 $^\circ$ Phasenabweichung ergab. Die Vergleichsmessungen zur kleineren Spule ergaben aber etwa 7 $^\circ$ Phasenabweichung bei 1MHz, d. h. der absolute Phasenfehler kann max. 10 $^\circ$ betragen.

Anmerkung: Die Maße der größeren Spule 2 wurden nach [3] bestimmt. Es wurde auch mit der angegebenen Formel aus [3] die Spulenkonstante bestimmt. Das Ergebnis erwies sich als falsch. Die anschließende Berechnung mit dem eigenen Programm [vgl. 1] sowohl zur Homogenität als auch zur Spulenkonstante ergab eine weitere Verbesserungsmöglichkeit: Verkürzung des Abstandes der äußeren Spulen um 10mm auf 404mm. Das Experiment bestätigte die eigenen Berechnungen.

In Tab. 1 sind alle Parameter zusammengestellt.

	Ohmscher Widerstand	Eigeninduktivität	Eigenkapazität	Eigenfrequenz	Spulenfaktor	Phasenabweichung bei 1MHz
Spule 1	0,4 Ω	0,014mH	53pF	5,8MHz	0,2412mA/nT	$\leq 3\text{grd}$
Spule 2	0,5 Ω	0,016mH	650pF	1,6MHz	0,303mA/nT	<10grd

Für die Realisierung eines ordentlichen Kalibriermessplatzes sollte die provisorische Holzspule durch eine Kunststoffversion mit einer Vorrichtung zur Sensoraufnahme ersetzt werden. Benutzt man zur Bewickelung noch stärkeren Kupferdraht bzw. dicke HF-Litze, so kann die Eigenresonanz noch geringfügig heraufgesetzt werden.



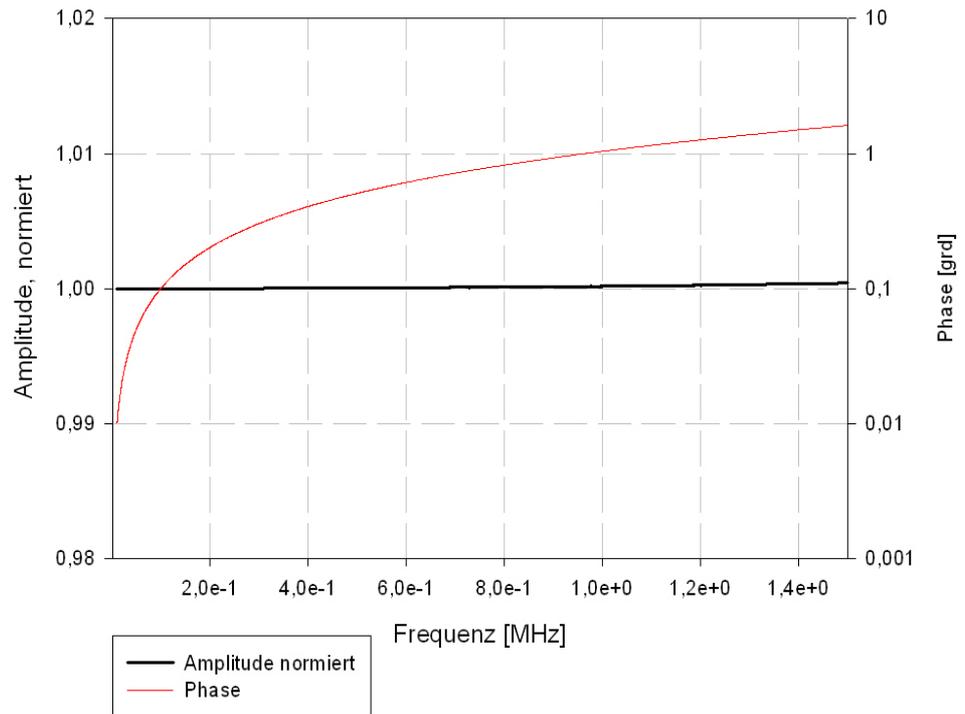


Abb.2 Berechnetes Bodediagramm der Braunbeckspule
(Durchmesser 78,5cm, 60,5cm)
1Windung, Eigenfrequenz=5,8MHz, Vorwiderstand 5kOhm

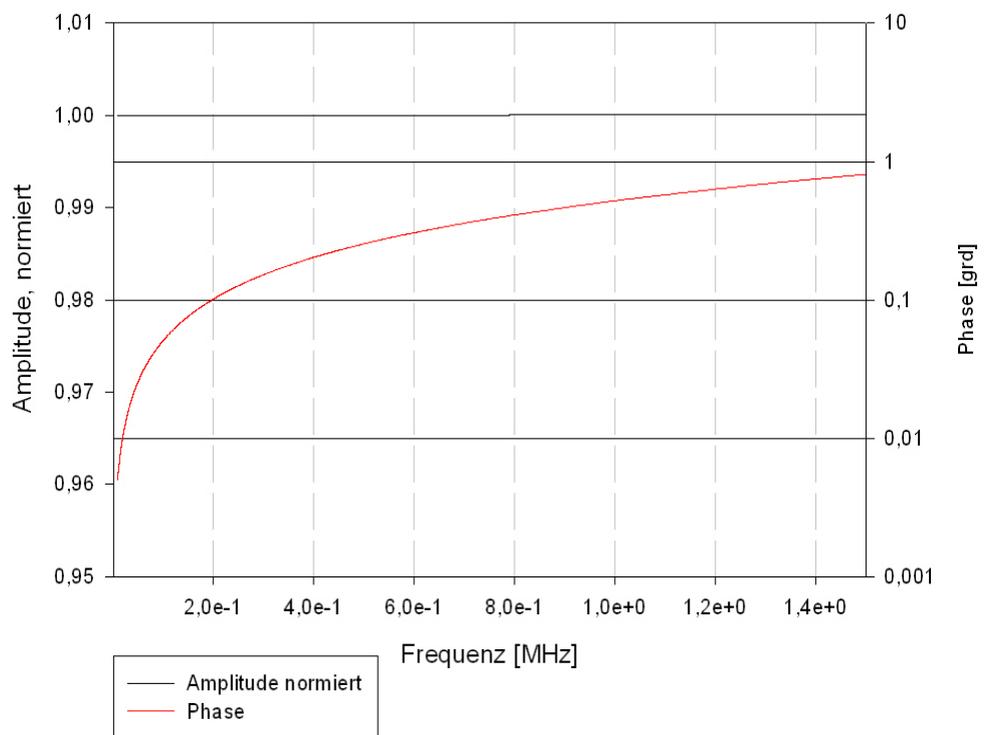


Abb. 3 Berechnetes Bodediagramm der Braunbeckspule
(Durchmesser 78,5cm, 60,5cm)
1Windung, Eigenfrequenz=5,8MHz, Vorwiderstand 10kOhm

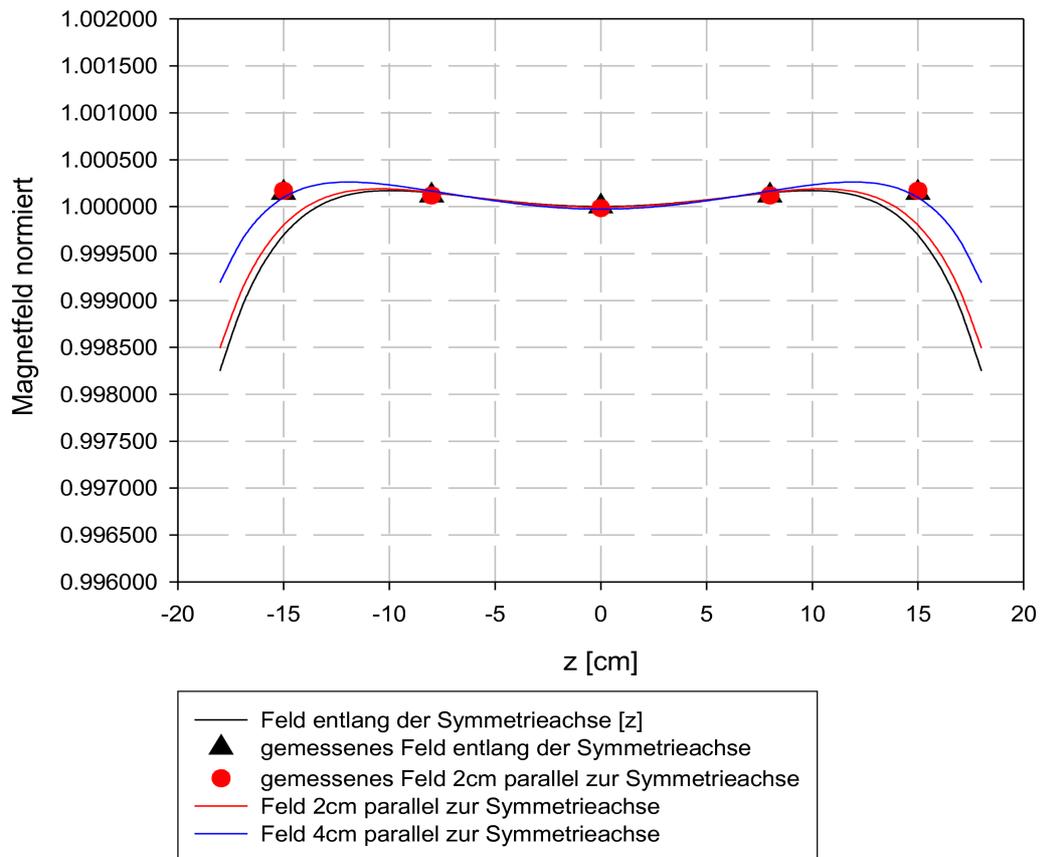


Abb. 4 Berechnetes und gemessenes Magnetfeld entlang der Symmetrieachse

3. Auswahl eines geeigneten Analysators

Mangels eines geeigneten Gerätes wurden die ersten Experimente mit dem GFZ eignen Netzwerkanalysator ZVL (Rhode&Schwarz) durchgeführt. Da dieses Gerät nur einen Eingang besitzt, ist es für die Kalibriermessungen ungeeignet. Lediglich die Amplitudenmessungen können verwendet werden. Nach ausführlicher Recherche wurden einige Geräte zur Probe angefordert. Nach einschlägigen Tests wurde der BODE 100 als geeignet ausgewählt. Es ist ein relativ preiswertes Gerät, dass in Verbindung mit einem Computer betrieben werden muß. Hier die wichtigsten OMICRON BODE 100 Parameter:

- Frequency range 10 Hz ... 40MHz
- Output 50Ohm -27dBm13dBm, waveform sinus
- Input sensitivity 100mV full range at attenuator 0dB
- Input attenuator 0dB.....40dB
- Input impedance 50 Ω or high impedance 1M Ω
- Receiver bandwidth 1Hz.....3kHz
- Anzahl der Messpunkte 50.....16500

4. Aufbau des Kalibriermeßplatzes

Der Messaufbau ist analog zum 100kHz Kalibriermessplatz [1], (Abb. 5). Die linke BNC-Buchse des BODE 100 liefert das Signal für das magnetische Prüffeld, das über einen induktionsfreien kalibrierten $10\text{k}\Omega$ Widerstand zur Braunbeckspule geleitet wird. Die Verbindungsleitung darf keinesfalls ein Koaxialkabel sein, sondern eine abgeschirmte verdrehte Litze. Über zwei induktionsarme 100Ω Widerstände und einer verdrehten Leitung wird das Vergleichssignal dem Eingang 1 des BODE 100 zugeführt. Der Eingang 2 dient der Übertragung des zu zu kalibrierenden Sensorsignals.

Die maximale Ausgangsspannung des BODE100 Analysators beträgt 13dBm an 50Ω .

Das entspricht einem Magnetfeld im Zentrum der Braunbeckspule Nr.1 von $0,4146\text{nT}$ und bei der Spule Nr.2 von 0.33nT . Die Amplitudencharakteristik in $[\text{mV/nT}]$ erhält man durch Multiplikation der in $[\text{mV}]$ vom Analysator gelieferten Amplitude mit dem Faktor 2,418 (Spule Nr.2: 3.03). Die Phase erfordert keine Umrechnung. Die Übertragung der Messdaten einer Kalibrierung erfolgt auf übliche Weise (LAN).

Je nach gewünschtem Frequenzbereich und dem output des zu prüfenden Sensors ist die Bandbreite/ der attenuator (Abschwächer) zu wählen. Startet man die Kalibrierung im Hz Bereich, muß die Bandbreite entsprechend klein gewählt werden. Der attenuator muß entsprechend des Sensorsignals optimal gewählt werden.

(vgl. Bedienungsanleitung)

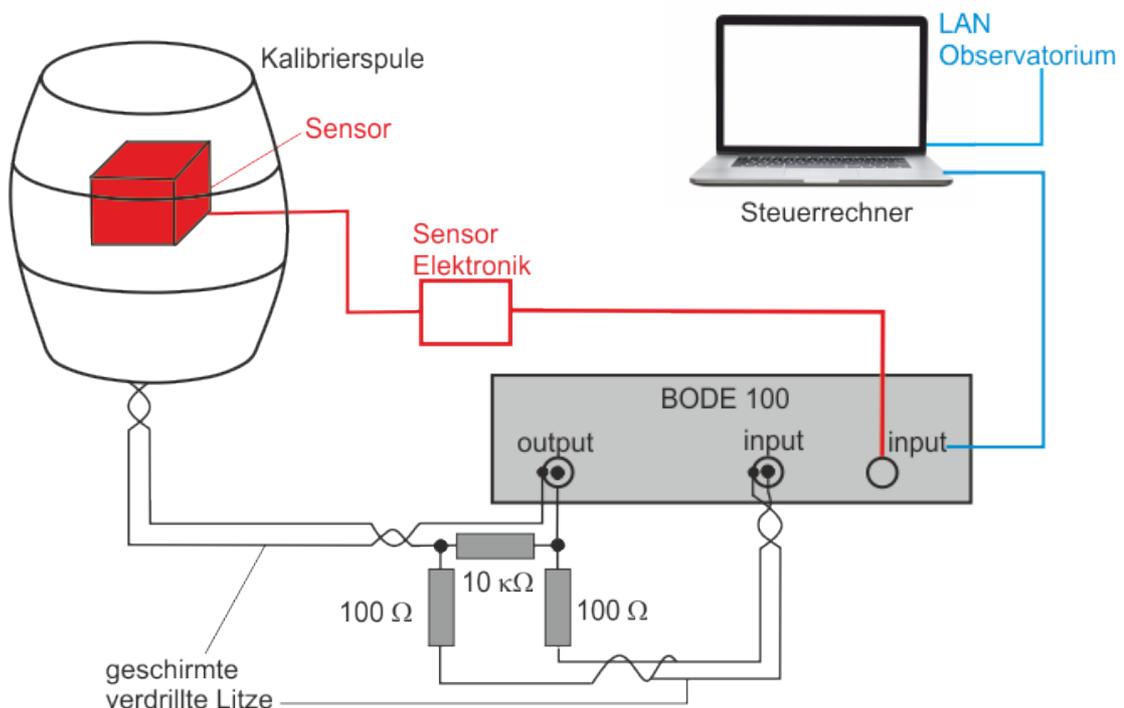


Abb. 5 Blockschaltbild

5. **Beispielmessungen**

In Abb.6 ist das Ergebnis der Kalibrierung der Induktionsspule vom Typ METRONIX MFS 07 (Ser.Nr.112) dargestellt. Der MFS-07 Sensor ist bis zu einer Frequenz von 50kHz spezifiziert. Die Kalibrierkurven des 100kHz Kalibrierplatzes (Zylinderspule) und des neuen Kalibrierplatzes Braunbeckspule sind sowohl in der Amplitude als auch in der Phase nahezu identisch. Die gute Übereinstimmung der Messungen ist bemerkenswert, denn der Sensor 112 ragte ca. 20cm aus der Braunbeckspule heraus. Der ferromagnetische Kern der MFS 07112 wirkt dabei integrierend.

Eine zweite Messung wurde mit der neuen, speziell für die RMT entwickelten Induktionsspule SHFT-02e (METRONIX) durchgeführt (Abb. 7). Der Versuchsaufbau garantiert nicht, dass Sensorachse und Spulenachse parallel liegen. Deshalb wurden die Messergebnisse aus 2 Messungen (Sensor um 180grd um die Symmetrieachse gedreht) gemittelt. Die Ergebnisse mit dem Steckverbinder oben/unten stimmen ab etwa 100kHz nicht mehr überein. Die Ursache für die Unterschiede liegen vermutlich am Sensor, denn die Versuchsbedingungen sollten hierfür ausreichend genau gewesen sein. Zum Vergleich wurde noch eine Messung mit der Spule 2 und 10kOhm Vorwiderstand eingefügt. Sowohl Amplitude als auch die Phase liegen erwartungsgemäß ab 100kHz unter den Ergebnissen der Spule 1. Die Messung mit der Y-Komponente ergab das gleiche Ergebnis (Abb. 8).

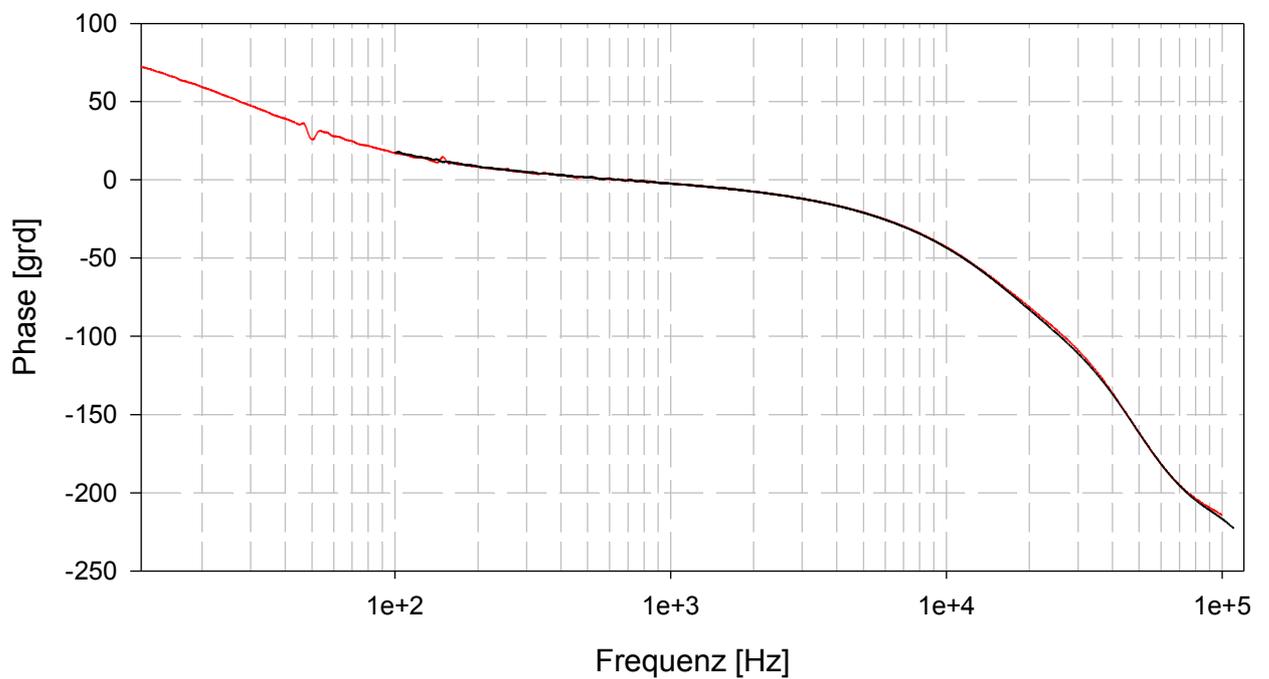
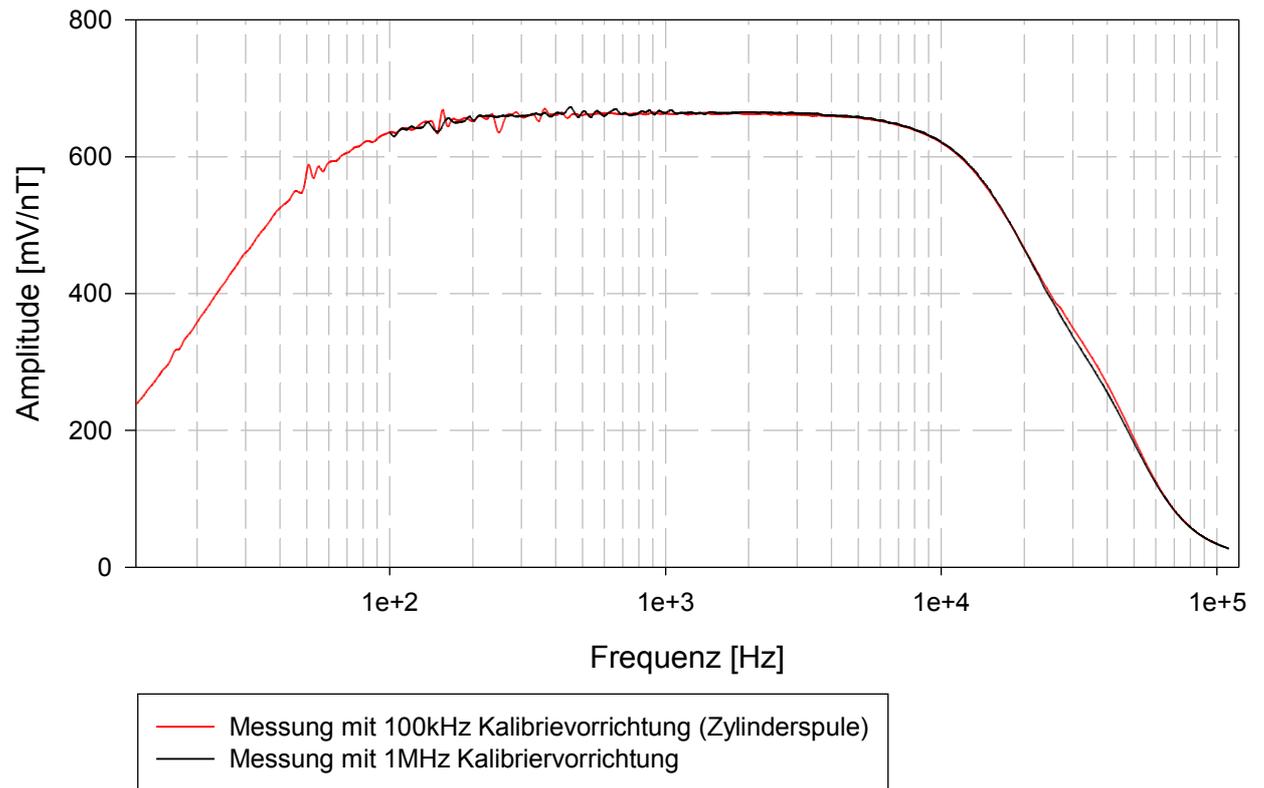


Abb. 6 Kalibration der Induktionsspule MFS 07112

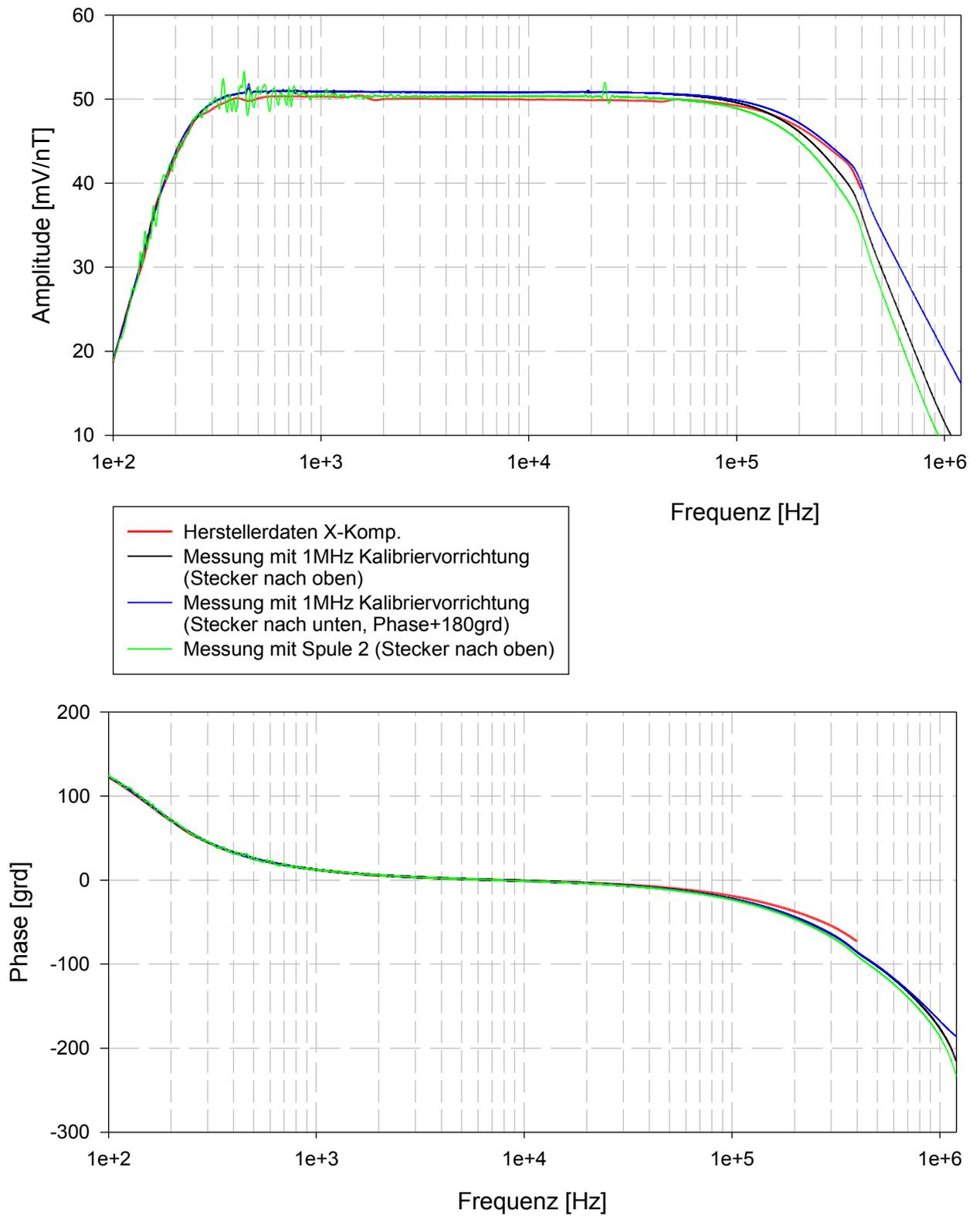


Abb. 7 Kalibration des Sensors SHFT-02e mit Hilfe der Braunbeckspulen und dem BODE-Analysator

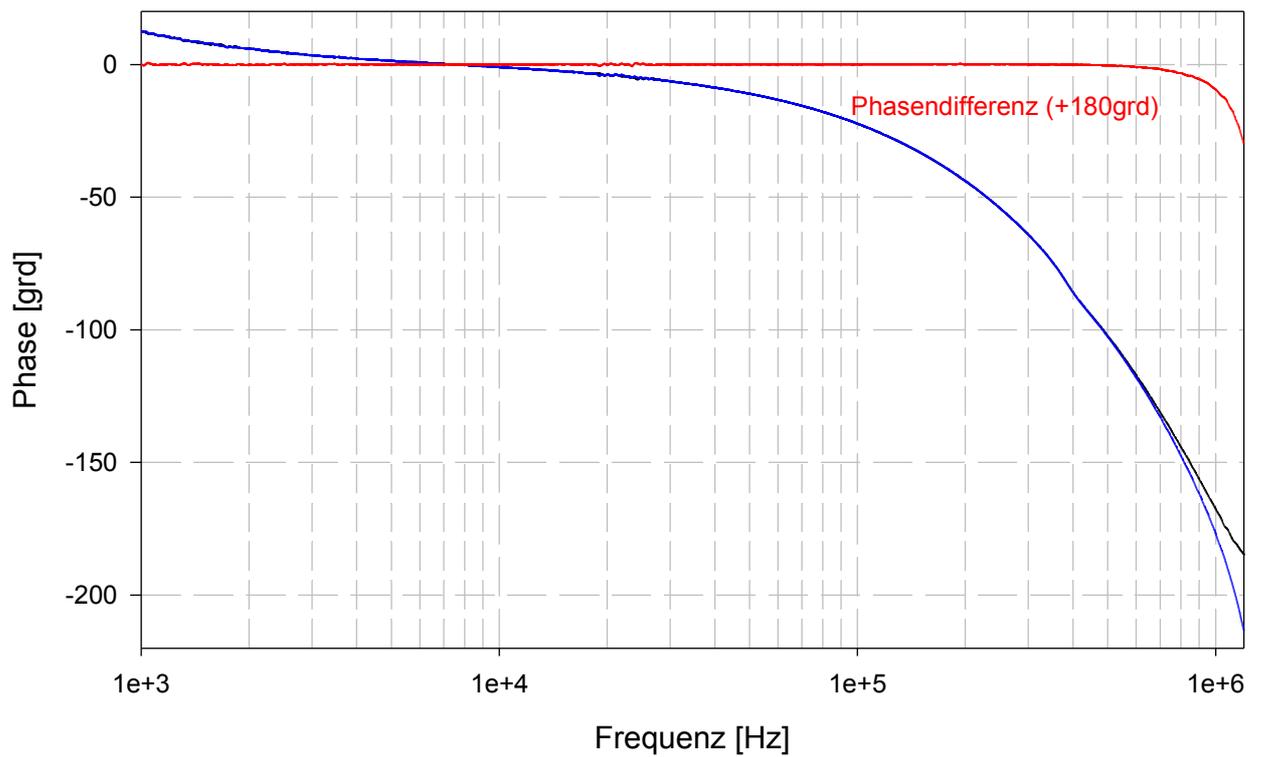
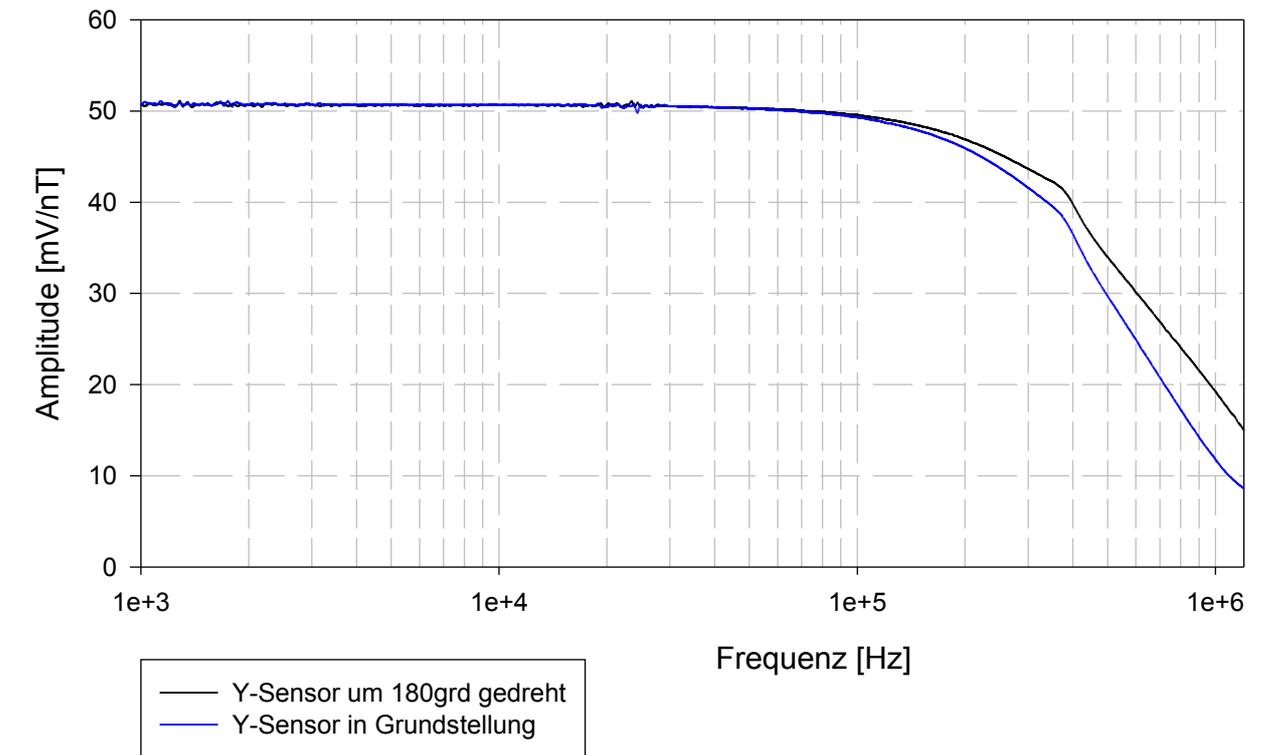


Abb. 8 Kalibration des Sensors SHFT-02e mit Hilfe der 1MHz Kalibriervorrichtung, Y-Komponente

6. Auswahl von geeigneten Sensoren für RMT Messungen

Neben dem Aufbau einer geeigneten Kalibriervorrichtung, bestand auch der Wunsch geeignete Sensoren zu entwickeln bzw. zu erwerben. In der zur Verfügung stehenden Zeit war eine komplette Neuentwicklung nicht möglich, deshalb wurde nach geeigneten Sensoren gesucht, die für diese Anwendung prinzipiell in Frage kommen könnten. Die Antenne AN 200 (vgl. Anlage) wurde erworben und für den Zweck umgerüstet. Die AN 200 ist eine Kreisspule (Durchmesser 220mm, ca. 30 Windungen). Sie wurde bedämpft, um die Amplitudencharakteristik mit einem deutlichen Maximum flacher zu bekommen. Dieser Antennentyp empfängt tatsächlich nur den magnetischen Anteil einer elektromagnetischen Welle und ist strikt richtungsselektiv. Er wird von Funkamateuren benutzt um elektrische Störsignale auszublenden und die Richtungscharakteristik verbessert weiter den Empfang. Damit hat dieser preiswerte Sensor die Eigenschaften die für die RMT gebraucht werden. Das Messergebnis mit der Braunbeckspule 1 ist in Abb. 9 wiedergeben. Dargestellt wurden nicht nur die Ergebnisse einer Einzelmessung, sondern gleichzeitig die Messungen an einem orthogonalem Tripel bestehend aus 3 AN200. Das Signal wurde über dem Dämpfungswiderstand abgegriffen und linear verstärkt. Alle unter den gleichen Messbedingungen dargestellten Ergebnisse korrespondieren sehr gut untereinander.

Zu Testzwecken wurde außerdem eine einzelne Antenne vom Typ HFRAE 5162 (Anhang) angeschafft und vermessen. Diese Antenne ist für einen Frequenzbereich von 50kHz bis 30MHz spezifiziert und dient der Messung von H-Feldern. Sie ist ebenfalls eine Rahmenantenne mit 250mm Durchmesser. Die Verbindung zum Verstärker erfolgt durch einen BNC-Stecker. Wie aus der Abb. 10 hervorgeht, unterscheiden sich die Resultate nicht wesentlich von der Antenne AN200. Jedoch liegen die Anschaffungskosten deutlich über die der AN 200.

Wichtig für den Betrieb der Sensoren ist das Signal/Rauschverhältnis. Ohne Abschirmkammer kann man diese Größe nur durch Vergleich bestimmen. Es wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

	SHFT-02e	AN200	HFRAE5162
200kHz	4,3	6,7	5,3
500kHz	1,9	7,5	5,0

Zusammenfassend lässt sich aus der experimentellen Arbeit mit den Sensoren feststellen, daß die Antenne AN200 das beste Signal liefert, und außerdem preiswert und leicht ist. Es muß noch ein Verstärker entwickelt oder erworben werden. Wenn ein mehr linearer Amplitudenverlauf erwünscht ist, könnte der Verstärker mit einer entsprechenden Amplitudencharakteristik entwickelt werden.

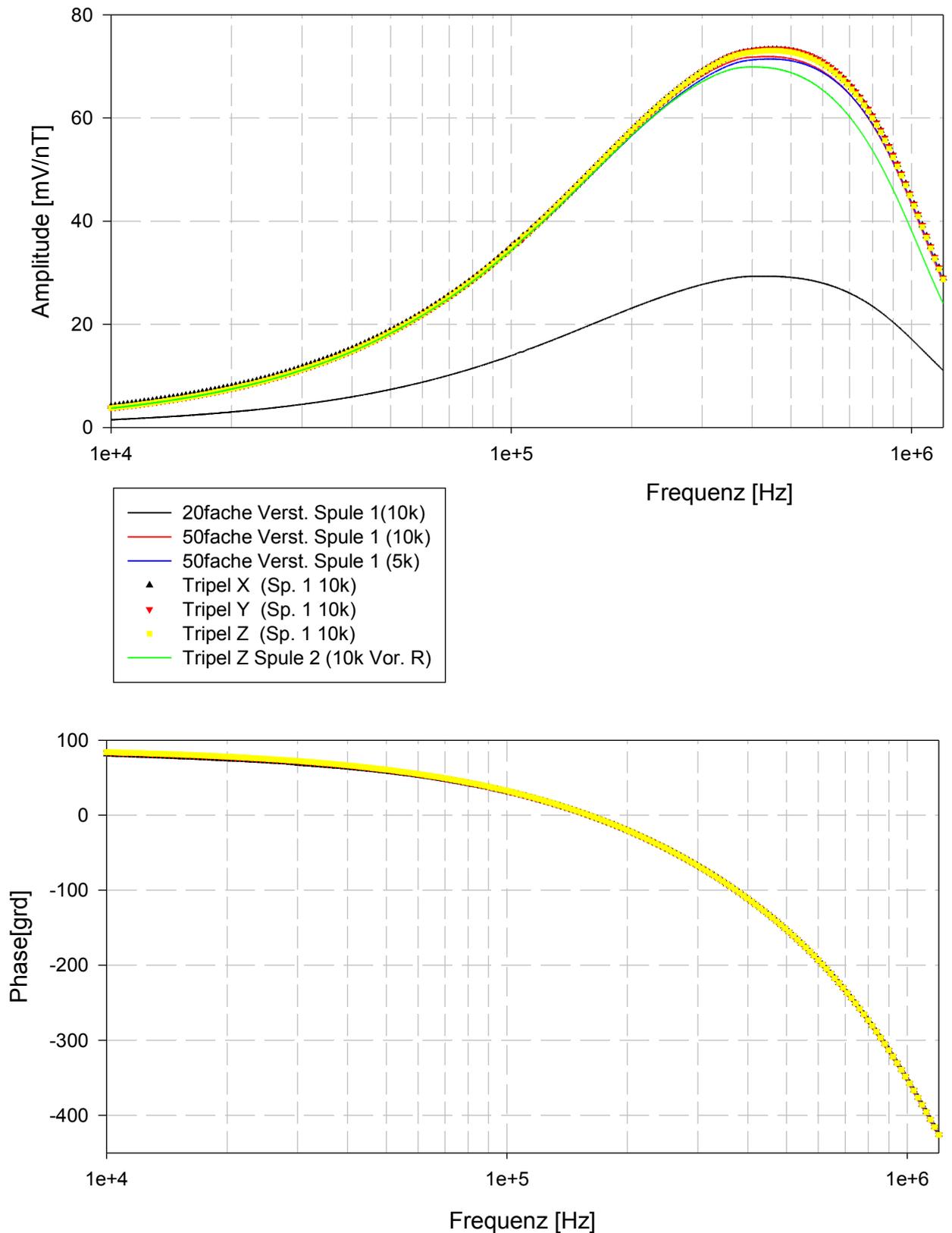


Abb. 9 Sensor AN200, bedämpft mit 510Ohm, Verstärkung 20, 50fach Bode-Analysator

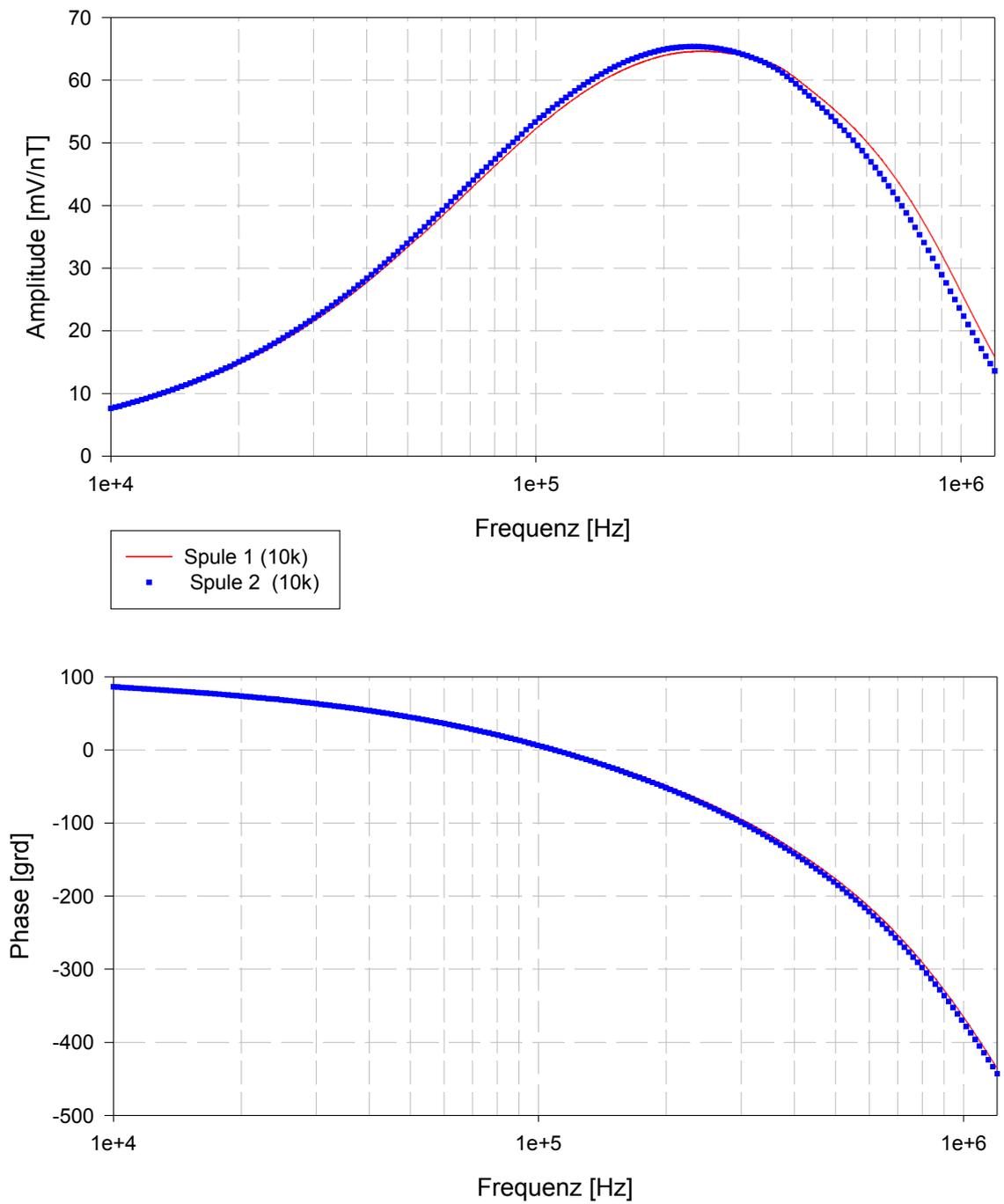


Abb. 10 Messung Sensor HFRAE5162
(bedämpft mit 470Ohm) 100fache Verst. linear

7. Technische Parameter des Kalibriersystems

Frequenzbereich	100Hz.....1MHz
Fehler	<0,5° in der Phase, <0.05nT in der Amplitude für den Frequenzbereich bis 700kHz ≤3° in der Phase, ≤0.05nT in der Amplitude ab 700kHz
Messzeit	sehr stark abhängig vom Frequenzbereich, und anderen Parametern 10kHz1,2MHz, Receiverbandbreite 300Hz, Mittlung 10fach, 201Meßpunkte, logarithmisch: 30sec

8. Danksagung

Für die interessante Aufgabenstellung möchte ich mich bei Prof. Dr. Oliver Ritter bedanken. Nachdem von mir schon zwei Kalibriermessplätze entwickelt wurden, war das eine Fortsetzung. Die Frequenz von einem MHz stellte allerdings eine neue Herausforderung dar. Leider war die zur Verfügung stehende Zeit recht knapp. Trotzdem hoffe ich, eine Lösung gefunden zu haben.

Niemegk, im März 2018

9. Literatur

- [1] E. Pulz, O. Ritter Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für
Induktionsspulenmagnetometer(searchcoils)
am GFZ
Scientific Technical Report STR 01/10

- [2] E. Pulz Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für
dreiachsige Fluxgate-Magnetometer
amGFZ
Scientific Technical Report STR 13/07

- [3] W. Braunbeck Die Erzeugung weitgehend homogener
Magnetfelder durch Kreisströme
Zeitschrift für Physik, 88,1934, S.399-402

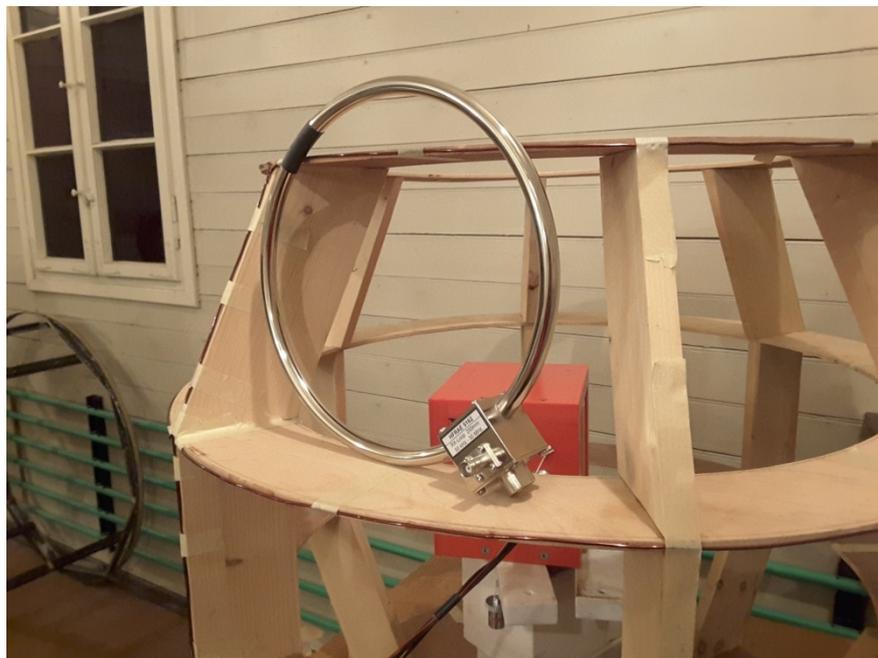
10. Fotogalerie



vorläufige Kalibrierspule mit Sensor SHFT-02e



Tripel mit 3 AN200



Antenne HFRAE 5162



Ansicht des Bildschirms

TECSUN

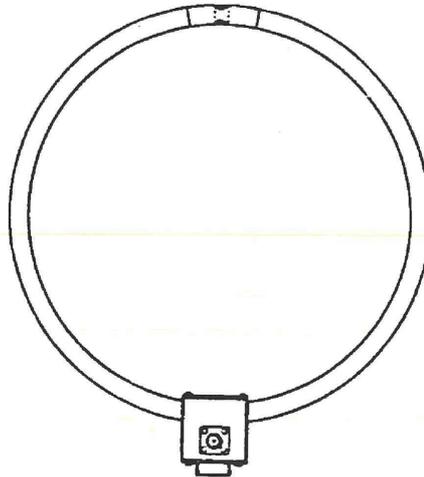


AN-200

TUNABLE MEDIUM WAVE LOOP ANTENNA

OWNER'S MANUAL

Passive Magnetische Empfangs-Rahmenantenne
Passive Magnetic RX Loop Antenna



Beschreibung:

Die Ringantenne für magnetische Felder ist für mittlere und hohe Feldstärken im Frequenzbereich 50 kHz - 30 MHz vorgesehen. Durch die passive Ausführung ist der Einsatz besonders einfach: H-Felder ab 20 dB μ A/m werden mit Messempfängern (50 Ω Eingang, dB μ V-Kalibrierung) zur Anzeige gebracht. Zum Spannungspegel in dB μ V wird das Wandlungsmaß für H-Felder addiert. Das Ergebnis ist die H-Feldstärke in dB μ A/m.

Für hohe Feldstärken können für die Anzeige breitbandige HF-Voltmeter mit 50 Ω eingesetzt werden. Die Spannungsanzeige wird in dB μ V umgerechnet ($20 \log U$ in μ V) und zum Antennen-Wandlungsmaß addiert. Wenn Fernfelder gemessen werden, wird zur Empfängeranzeige in dB μ V das Wandlungsmaß für E-Felder ($k E$) addiert. Ergebnis ist das fiktive E-Feld in dB μ V/m. Die Umrechnung von magnetischer Feldstärke in fiktive elektrische Feldstärke ist frequenzunabhängig 51.5 dB (= $20 \log (377 \Omega)$)

Description:

The Loop Antenna for magnetic fields was designed for medium to high-level field-strengths in the frequency range 50 kHz (10 kHz) to 30MHz. The application is without problems due to the passive structure without electronic components or power requirements: H fields from 20 dB μ A/m on are indicated with test receivers (50 ohm input, calibration in dB μ V) or, with slightly less sensitivity, with spectrum analysers. Add the log. antenna factor from the table ($k H$) to the dB μ V reading of the receiver to obtain the magnetic field-strength level in dB μ A/m.

For high field-strengths broadband voltmeters with 50 Ω input resistance (also power meters - observe overload risks) may be used. Voltage or power readings must be converted to voltage levels in dB μ V ($20 \times \log U$ [μ V]). Add the log. antenna factor $k H$ from the calibration table to obtain the magnetic field-strength level in dB μ A/m

If FAR-FIELD measurements are intended in units of dB μ V/m, read the voltage level in dB μ V across 50 Ω and add the E field antenna factor $k E$ from the table (it is 51.5 dB higher and provides the "fictitious E field level" in dB μ V/m).



ISSN 2190-7110