

Gerätevergleich zwischen Metronix MFS05 und EMI BF-4 Magnetometern sowie SPAM MkIII und Quanterra Q4120 Datenloggern

Steven Golden

Institut für Meteorologie und Geophysik der J.W.Goethe-Universität
Frankfurt am Main

1 Einleitung

Dieser Artikel sollte nicht als „Warentest“ aufgefaßt werden, sondern stellt einen Gerätevergleich im Hinblick auf einen sehr speziellen Einsatzzweck dar: Die Messung natürlicher Magnetfelder im unteren ELF-Bereich (hier etwa 8–200 Hz), in erster Linie zur Untersuchung von Sferics. Um sich über die Eignung der verschiedenen Geräte zu diesem Einsatzzweck ein Bild zu machen, wurden mehrere Vergleichsmessungen mit natürlicher Anregung bei parallel ausgelegten Magnetometern durchgeführt. Obwohl die Geräte ursprünglich teils für andere Einsatzzwecke konzipiert wurden, haben sich alle vier als prinzipiell für ELF-Messungen geeignet herausgestellt und waren im Sommer 2000 zu diesem Zweck erfolgreich im Einsatz [1]. Die Datenqualität ist jedoch unterschiedlich und spiegelt – wie zu erwarten – die unterschiedlichen Optimierungen der Geräte auf ihre ursprünglichen Einsatzzwecke wieder. Weiterhin wurden unabhängig davon Nachkalibrierungen der MFS05-Magnetometer mittels ihrer integrierten Kalibriereinrichtung durchgeführt. Diese dienen insbesondere einem Vergleich der Spulen-Übertragungsfunktionen im LF- und HF-Modus des MFS05-Magnetometers.

2 Die eingesetzten Geräte

Der SPAM MkIII-Datenlogger [4] wurde primär für den Einsatz bei AMT-Messungen konzipiert. Metronix MFS05-Magnetometer [2] lassen sich daran direkt anschließen. Der Anschluss von EMI BF-4-Magnetometern erfordert eine zusätzliche Adaptereinheit. Diese muss neben passenden Anschlüssen auch die Spulenversorgungsspannung bereitstellen, die sich bei MFS05- und BF-4-Magnetometern unterscheidet. Der Q4120-Datenlogger [3] wurde ursprünglich für seismische Registrierungen im Observatoriumsbetrieb konzipiert. Er ist im Langzeit-Betrieb sehr zuverlässig, hat aber einen höheren Stromverbrauch als der für den mobilen Einsatz konzipierte SPAM MkIII-Datenlogger. Der Anschluss von Magnetometern erfordert beim Q4120-Datenlogger prinzipiell eine zusätzliche Adaptereinheit. Es wurde am Institut eine Adaptereinheit angefertigt, die sich für den Einsatz beliebiger Kombinationen der beiden Magnetometer- und Datenlogger-Typen eignet. Durch gleichzeitige Messungen

mit MFS05-Magnetometern an der SPAM MkIII – einmal mit, und einmal ohne zwischengeschalteter Adaptereinheit – wurde überprüft, ob der Einsatz der Adaptereinheit zusätzliche Messfehler verursacht. Solche Messfehler konnten dabei nicht festgestellt werden.

3 Vergleichsmessungen mit natürlicher Anregung

Im November 1999 wurden in einem elektromagnetisch besonders ruhigen Gebiet nahe Vielbrunn im Odenwald zwei Vergleichsmessungen mit natürlicher Anregung durchgeführt. Dazu wurden die unterschiedlichen Induktionsspulen-Magnetometer parallel zueinander in N-S-Richtung eingegraben und registrierten simultan für jeweils mindestens zwei Stunden natürliche Signale. Abbildung 1 zeigt schematisch die zwei angewandten Messaufbauten. Bei der ersten Messung wurden jeweils ein BF-4 und ein MFS05-Magnetometer über die Adapterbox an einem Q4120-Datenlogger betrieben. Parallel dazu wurden zwei MFS05-Magnetometer an einem SPAM-Datenlogger betrieben. Bei der zweiten Messung wurden am selben SPAM-Datenlogger ein MFS05-Magnetometer direkt, und ein BF-4-Magnetometer über die Adapterbox betrieben.

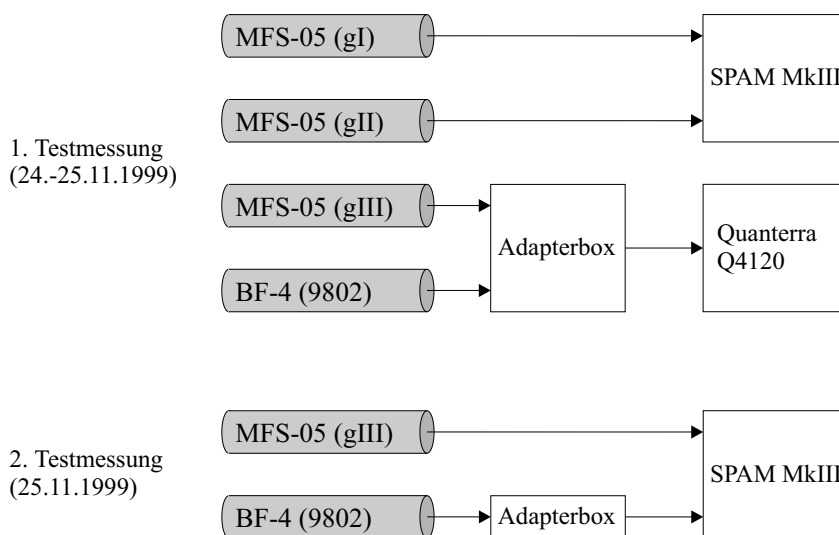


Abbildung 1: Messaufbauten zur Übertragungsfunktions-Messung mit natürlicher Anregung.

Da das von entfernten natürlichen Quellen stammende anregende Feld über die kurzen Distanzen zwischen den Magnetometern hinweg als homogen betrachtet werden kann, sind alle Abweichungen zwischen den einzelnen Aufzeichnungen auf unterschiedliche Geräte-Eigenschaften zurückzuführen. Diese Abweichungen setzen sich aus einem korrelierten Anteil aufgrund unterschiedlicher Geräte-Übertragungsfunktionen und aus einem unkorrelierten Anteil aufgrund des Geräte-Rauschens zusammen.

Die Übertragungsfunktion zwischen zwei Geräten läßt sich über eine Kreuzspektrumanalyse gewinnen. Bei dieser Analysemethode wird generell eines der zwei betrachteten Eingangssignale als fehlerfrei angenommen, während das andere Eingangs-

signal als fehlerbehaftet betrachtet wird. Eine Verletzung dieser Annahme führt zu einer Verzerrung der bestimmten Übertragungsfunktion, die umso größer ausfällt, je stärker der wahre Fehler in dem als fehlerfrei angenommenen Eingangssignal enthalten ist. Ist die Verteilung des Fehlers auf beide Kanäle unbekannt, so kann man die Bestimmung der Übertragungsfunktion zweimal vornehmen, wobei die Rollen der beiden Eingangskanäle ausgetauscht werden. Nur bei fehlerfreien Daten werden sich die Ergebnisse der beiden Analysen decken. Bei unterschiedlich starken Fehlern wird die Verzerrung der Übertragungsfunktion dann am größten ausfallen, wenn der als fehlerfrei angenommene Kanal tatsächlich mit dem Kanal mit dem größeren Fehler zusammenfällt. Besitzt man eine Vorinformation über die ungefähre Gestalt der wahren Übertragungsfunktion, so kann man auf diese Weise feststellen, welcher der beiden Eingangskanäle stärker fehlerbehaftet ist.

Abbildungen 2 und 3 zeigen die Ergebnisse zweier solcher Kreuzspektrumanalysen. Es wurden dazu jeweils zwei Mess-Signale von einem MFS05-Magnetometer und von einem BF-4-Magnetometer miteinander verglichen. Dabei wurde einmal der Ursprung des gesamten Geräterauschens dem MFS05-Magnetometer zugeschrieben. Das andere Mal wurde das gesamte Geräterauschen dem BF-4-Magnetometer zugeschrieben. Die resultierenden Übertragungsfunktionen decken sich nur bei den Netzharmonischen, also in Spektralbereichen mit besonders hoher Anregungsenergie und damit gutem Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Es ergibt sich für die Annahme rauschfreier MFS05-Daten eine Übertragungsfunktion, die der Erwartung gemäß den bereits aus Herstellerangaben bekannten Übertragungsfunktionen entspricht. Für die Annahme rauschfreier BF-4-Daten hingegen zeichnet die Übertragungsfunktion die Kohärenzkurve nach. Man kann daraus folgern, dass der größere Anteil des Geräterauschens von dem BF-4-Magnetometer her stammt.

Eine Wiederholung dieser Analyse, einmal bei Anschluss beider Magnetometer an einem Q4120-Datenlogger und einmal bei Anschluss an einem SPAM MkIII-Datenlogger, lieferte konsistente Ergebnisse. Allerdings tritt beim Anschluss beider Magnetometer an einem SPAM MkIII-Datenlogger ein Maximum in der Übertragungsfunktion bei 4 Hz auf, das beim Anschluss an einem Q4120-Datenlogger fehlt. Der Grund für diese Diskrepanz ist unklar – Möglicherweise ist dies ein Hinweis auf einen Mangel des Messaufbaus bei tiefen Frequenzen.

Neben einem Vergleich der beiden Magnetometer interessierte auch ein Vergleich der beiden Datenlogger. Abbildung 4 zeigt gestapelte Spektren, die aus zeitgleich von einem SPAM MkIII- und von einem Q4120-Datenlogger über zwei baugleiche MFS05-Magnetometer aufgezeichnete Daten gewonnen wurden. Bei tiefen Frequenzen stimmen beide Spektren gut überein. Bei hohen Frequenzen fällt das über den SPAM MkIII-Datenlogger aufgezeichnete Spektrum weiterhin gleichmäßig ab, während das über den Q4120-Datenlogger aufgezeichnete Spektrum weniger stark abfällt – ja sich beinahe auf ein konstantes Plateau einstellt. Der abrupte Abfall des Q4120-Spektrums oberhalb von 100 Hz geht auf den Anti-Alias-Filter des Q4120-Datenloggers zurück. Beim SPAM MkIII-Datenlogger lag die Abtastrate bei dieser Messung deutlich höher, so dass die Auswirkung des Anti-Alias-Filters im gezeigten Spektralbereich nicht mehr sichtbar ist.

Der Unterschied im Spektrum könnte als Anzeichen auf ein stärkeres Rauschen des Q4120-Datenloggers bei hohen Frequenzen interpretiert werden. Auf Grund der unterschiedlichen Abtastrate von SPAM MkIII- und Q4120-Datenloggern und Unsicher-

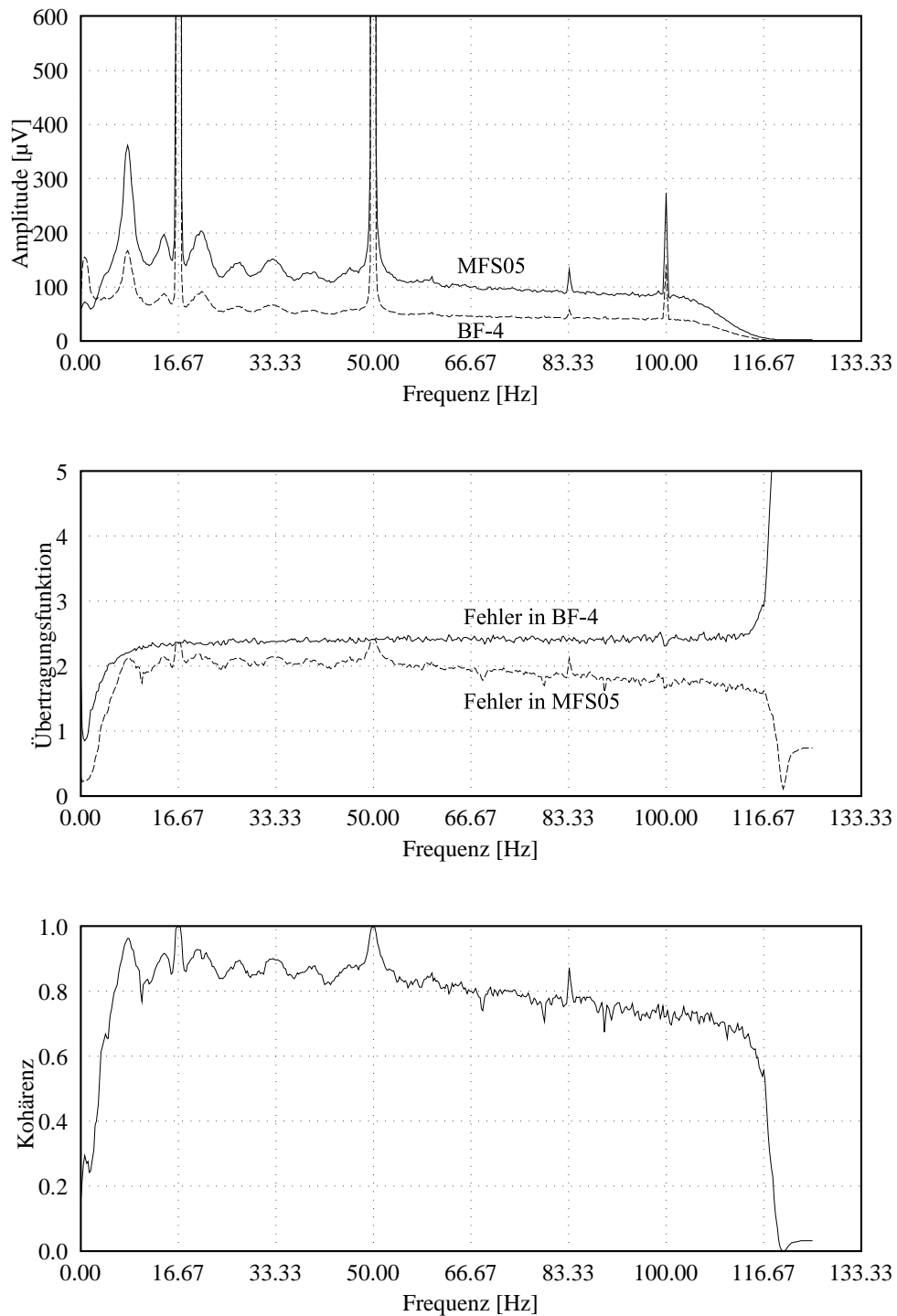


Abbildung 2: Vergleich eines Metronix MFS05-Magnetometers und eines EMI BF-4-Magnetometers, die gleichzeitig an einem Quanterra Q4120-Datenlogger angeschlossen waren (siehe Text).

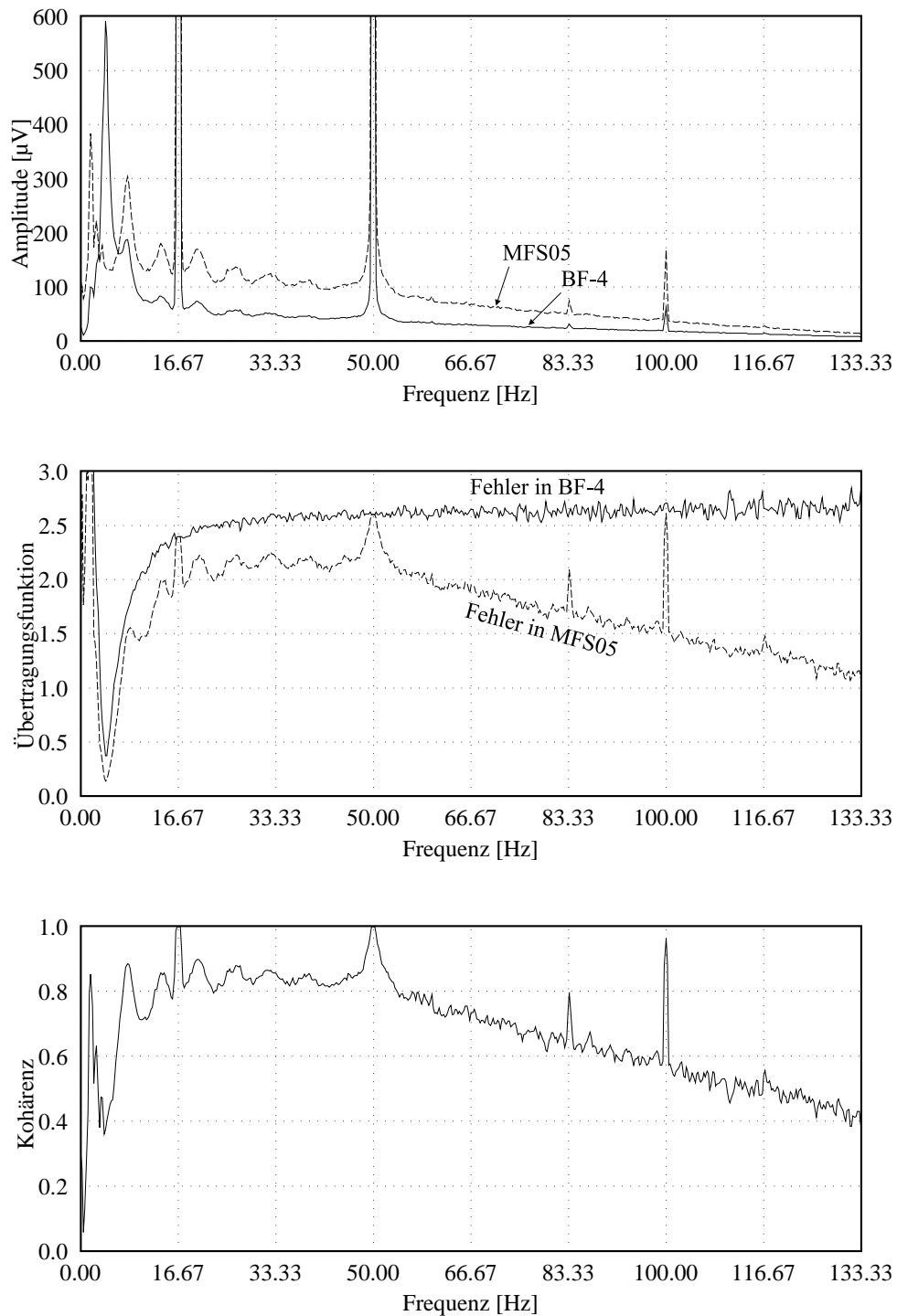


Abbildung 3: Vergleich eines Metronix MFS05-Magnetometers und eines EMI BF-4-Magnetometers, die gleichzeitig an einem SPAM MkIII-Datenlogger angeschlossen waren (siehe Text).

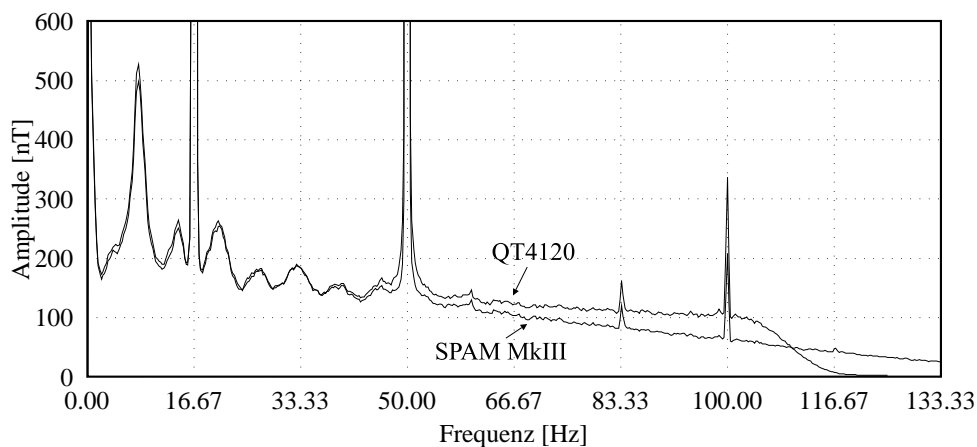


Abbildung 4: Vergleich zwischen dem SPAM MkIII-Datenlogger und dem Quanterra Q4120-Datenlogger. Beide Geräte zeichneten simultan Messdaten von baugleichen MFS05-Magnetometern auf.

heiten beim Resampling der Zeitreihen auf eine gemeinsame Abtastrate wurde bislang vorsichtshalber auf eine Kreuzspektrumanalyse verzichtet. Mit dem aufgezeichneten Datensatz sollte aber prinzipiell das Nachholen einer solche Analyse möglich sein.

4 Nachkalibrierung der MFS05-Magnetometer mit künstlicher Anregung

Dieser Abschnitt gehört streng genommen nicht zum Gerätevergleich, sondern stellt kurz das Ergebnis einer Nachkalibrierung mehrerer MFS05-Magnetometer zur Bestimmung ihrer Übertragungsfunktionen im HF-Modus vor. Dazu wurden im Frühjahr 1999 mehrere MFS05-Magnetometer gleichzeitig in Parallelauslage an einer SPAM MkIII angeschlossen. Über die Sensorbox der SPAM MkIII läßt sich ein Kalibriersignal einspeisen, welches auf die Kalibriereingänge der angeschlossenen Magnetometer weitergeleitet wird. In den MFS05-Magnetometern wird das Kalibriersignal auf das Eingangssignal der integrierten Rückkopplungsspule addiert, die so als integrierte Kalibrierspule wirkt. Zeichnet man das Mess-Signal vom Magnetometer auf einem Kanal des Datenloggers auf, und das von einem Funktionsgenerator eingespeiste Kalibriersignal auf einem zweiten, so kann man durch eine Kreuzspektrumanalyse die Übertragungsfunktion zwischen diesen beiden Signalen bestimmen und daraus auf die Übertragungsfunktion des Magnetometers schließen. Das einzige Problem, das dabei auftritt, ist, dass die Übertragungsfunktion zwischen eingespeistem Kalibriersignal und dem zusätzlich auf die Messspule einwirkenden Magnetfeld bekannt sein muss. Für Frequenzen unterhalb von ca. 1 kHz ist diese Übertragungsfunktion laut Metronix ein konstanter Verstärkungsfaktor. Oberhalb von ca. 1 kHz treten jedoch zusätzliche kapazitive Effekte innerhalb des Magnetometers auf, die eine Verwendung der integrierten Kalibriereinrichtung nicht mehr empfehlenswert erscheinen lassen.

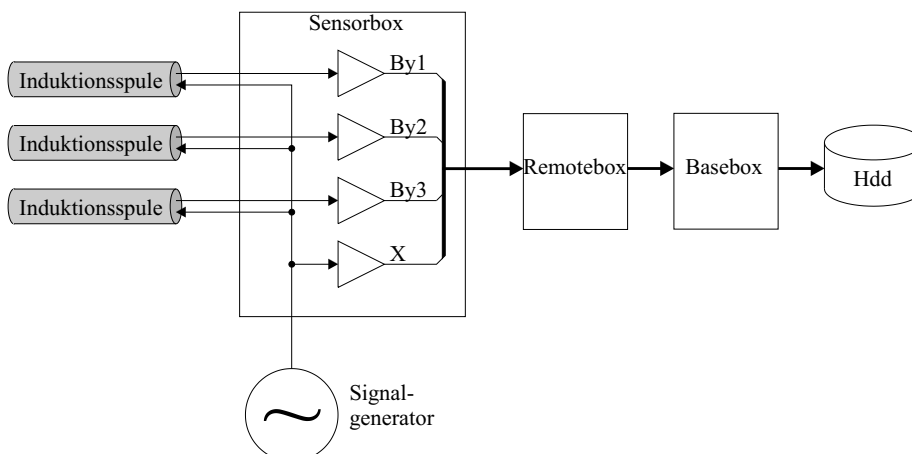


Abbildung 5: Messaufbau zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen mehrerer Metronix MFS05-Magnetometer mit einer synthetischen Anregung durch Einspeisung eines Signals aus einem Funktionsgenerator in die Kalibrierungseingänge der Magnetometer.

Die MFS05-Magnetometer lassen sich in zwei Betriebsmodi betreiben: Im normalerweise verwendeten LF-Modus wird das Signal von der Mess-Spule über eine Frequenzweiche in zwei Bänder aufgeteilt. Die hohen Frequenzen werden einem konventionellen Vorverstärker, die tiefen Frequenzen einem Chopper-Vorverstärker zugeführt. Danach werden die beiden Signalanteile wieder aufaddiert. Alternativ kann im sog. HF-Modus der Chopper-Vorverstärker ausgeschaltet werden, um hochfrequentes Rauschen zu mindern. Dies führt jedoch zu einer Veränderung der Übertragungsfunktion.

Im Rahmen dieser Untersuchung interessierte die Übertragungsfunktion der Magnetometer im HF-Modus. Angegeben waren sie jedoch nur für den LF-Modus. Die HF-Übertragungsfunktionen ließen sich nun in zwei Schritten bestimmen: Zunächst wurde die Übertragungsfunktion im LF-Modus bestimmt und mit der angegebenen Übertragungsfunktion verglichen. Bei Übereinstimmung konnte davon ausgegangen werden, dass alle Teilkomponenten des Messaufbaus zuverlässig funktionierten und insbesondere die Übertragungsfunktion für die Rückkopplungseinrichtung stimmte. Nun wurde die Messung im HF-Modus wiederholt um die eigentlich gesuchte Übertragungsfunktion zu bestimmen.

Diese Messungen führten bei allen Magnetometern, bis auf einem, zu den zu erwartenden Ergebnissen. Nur bei dem Magnetometer Nr. 100 ließ sich die angegebene Übertragungsfunktion für den LF-Modus nicht reproduzieren, und auch die Übertragungsfunktion für den HF-Modus wies einen unerwarteten Verlauf auf. Es musste davon ausgegangen werden, dass sich die Übertragungsfunktion des Magnetometers Nr. 100 – z.B. aufgrund eines Transportschadens – verändert hatte. Zur Zeit dieser Untersuchungen wurde das fragliche Magnetometer am Institut für AMT-Messungen eingesetzt. Dabei ergaben sich an einem Messort, an dem zweimal mit unterschiedlichen Magnetometern gemessen wurde, unterschiedliche AMT-Übertragungsfunktionen. Ein Reprozessing der von dem fraglichen Magnetometer betroffenen Daten mit der neu bestimmten Übertragungsfunktion beseitigte diese Ungeheimtheit.

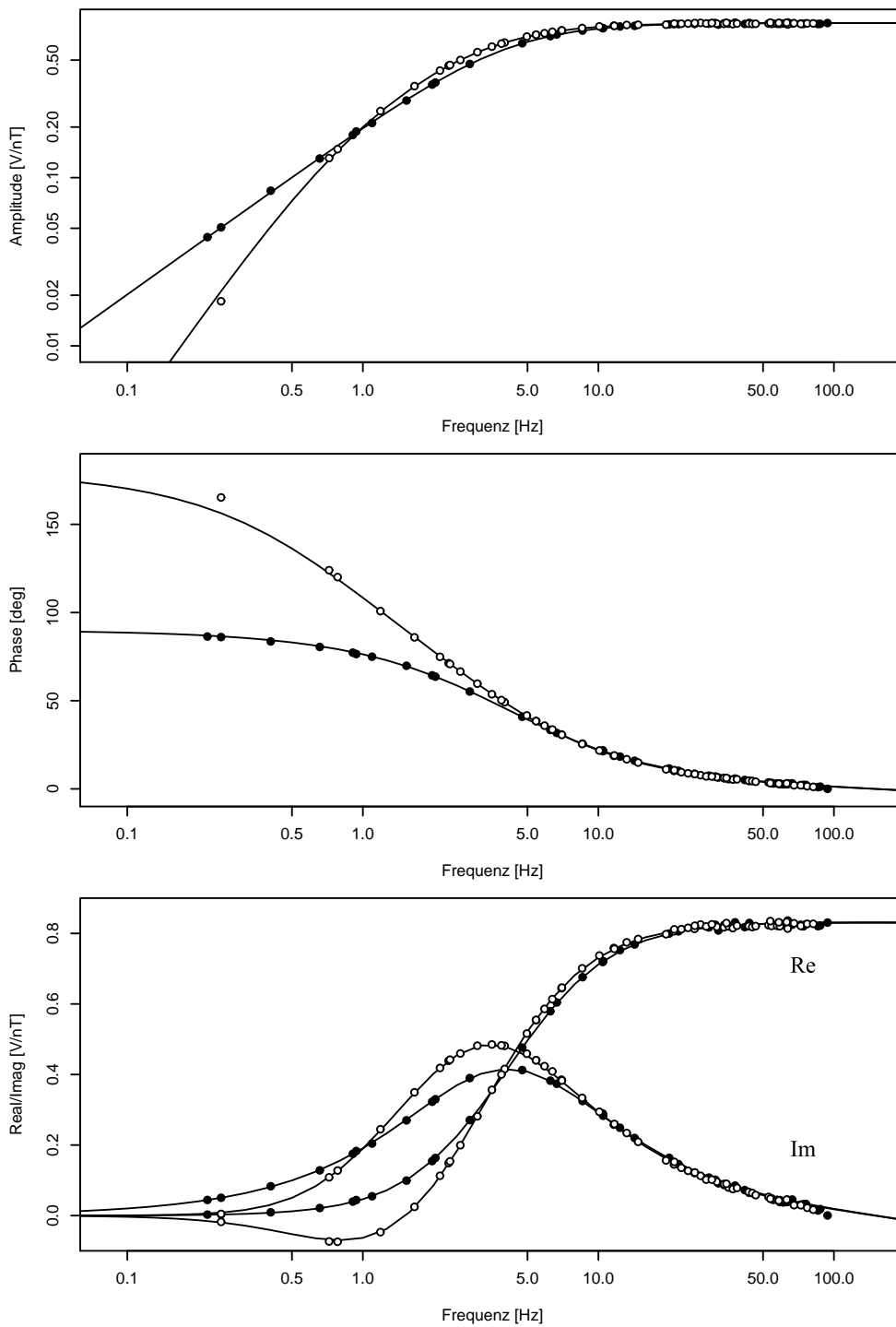


Abbildung 6: Übertragungsfunktion des Metronix MFS05-Magnetometers Nr. 079 („rot I“). Messdaten für den LF-Modus sind mit schwarzen, für den HF-Modus mit weißen Kreisen dargestellt. Durchgezogene Linien zeigen angepasste Modellfunktionen (siehe Text).

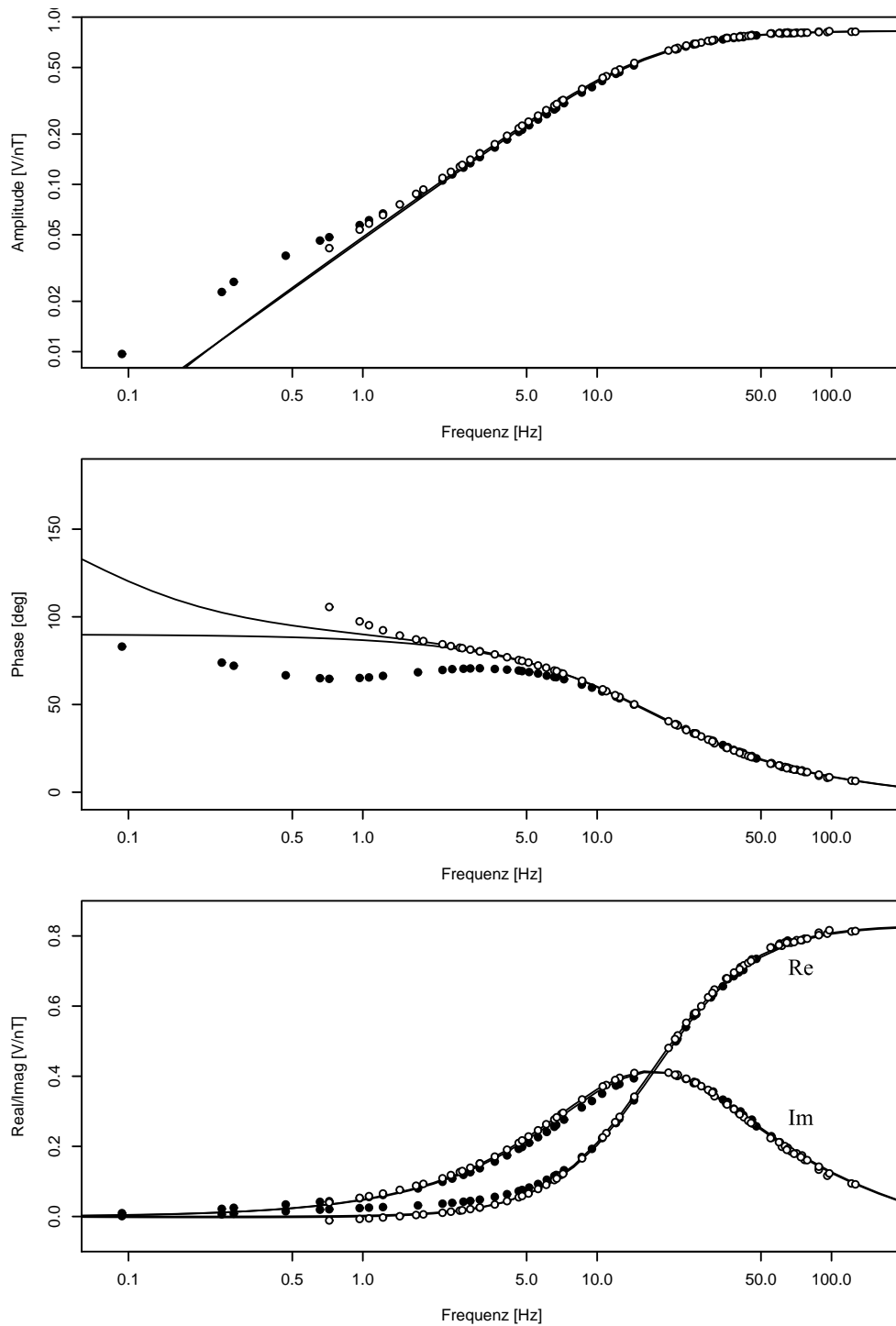


Abbildung 7: Übertragungsfunktion des Metronix MFS05-Magnetometers Nr. 100 („gelb II“). Messdaten für den LF-Modus sind mit schwarzen, für den HF-Modus mit weißen Kreisen dargestellt. Durchgezogene Linien zeigen den Versuch, wie bei den übrigen Magnetometern eine Modellfunktion (siehe Text) anzupassen, was allerdings bei diesem Magnetometer nur teilweise gelang.

5 Zusammenfassung

Es zeigte sich, dass das MFS05-Magnetometer und der SPAM MkIII-Datenlogger dem EMI BF-4-Magnetometer und dem Quanterra Q4120-Datenlogger im ELF-Bereich auf Grund niedrigeren Rauschens in diesem Frequenzbereich überlegen sind. Dies bedeutet nicht, dass sie generell die besseren Instrumente sind. In tieferen Frequenzbereichen könnten die Rollen leicht vertauscht sein, dies war jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Auch bedeutet es nicht, dass BF-4 und Q4120 für den Einsatz als ELF-Messgeräte völlig ungeeignet wären, denn wie eingangs erwähnt, haben sich alle vier Geräte zu diesem Zweck durchaus bewährt. Die Unterschiede zwischen den Geräten passen gut zu den laut Herstellerangaben unterschiedlichen ursprünglichen Einsatzzwecken. EMI z.B. empfiehlt für den ELF-Bereich nicht ihre Magnetometer BF-4, sondern BF-6 einzusetzen. In der Praxis kann man jedoch oftmals nicht auf das für eine Messung optimale Gerät zurückgreifen, sondern muss mit dem auskommen, was zur Verfügung steht.

Die Nachkalibrierung der MFS05-Magnetometer war ein voller Erfolg: Sie ergab nicht nur ein klares Bild von den HF-Übertragungsfunktionen, sondern half auch, eine zuvor unentdeckte Veränderung an einem der Frankfurter Magnetometer festzustellen und damit eine andere AMT-Messung zu „retten“. Es wird daher vorgeschlagen, solche Nachkalibrierungen häufiger durchzuführen. Die Methode mit der integrierten Kalibriereinrichtung ist einfach genug, um im Feld auch während Messkampagnen durchgeführt zu werden. So lassen sich Veränderungen der Übertragungsfunktionen, z.B. durch Transportschäden, rechtzeitig erkennen. Eine gründliche, absolute Neukalibrierung kann die Methode nicht liefern. Dazu muss weiterhin auf große Kalibrierespulen zurückgegriffen werden. Doch läßt sich durch einfache Nachkalibrierungen mit der integrierten Kalibriereinrichtung leichter erkennen, ob eine gründliche Neukalibrierung wieder notwendig geworden ist.

Wir danken dem GFZ-Potsdam für die Bereitstellung eines Quanterra Q4120-Datenloggers und Steve Constable für die Bereitstellung zweier EMI BF-4 Magnetometer.

Literatur

- [1] Golden, S. (2001): Messung der Absorption atmosphärischer ELF-Impulse. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Geophysik der J.W.Goethe-Universität, Frankfurt am Main.
- [2] Metronix Instruments and Electronics Corp.: Broadband Induction Coil Magnetometers MFS05 – Hardware Description and Operating Manual. Braunschweig.
- [3] Quanterra, Inc.: Quanterra Q4120 Operation. Preliminary Draft. 325 Ayer Road, Harvard, Ma.
- [4] Ritter, O., Ritter, P., Dawes, G. und Darcy, N. (1996): S.P.A.M. MkIII – User Manual. Draft. University of Edinburgh, Department of Geology and Geophysics.