

Fluxgate-Gradiometer für hochauflösende Magnetometrie

Herbert Wrobel, Yury Tavrín, Martin Wenk und Johann H. Hinken

Eine Veröffentlichung der Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)

Zusammenfassung

Höchst empfindliche Fluxgate-Magnetometer werden so kombiniert, dass sie ein hoch-balanciertes Gradiometer ergeben. Dieses System blendet natürliche und technisch erzeugte magnetische Störungen aus. So ist es möglich, das extrem niedrige Eigenrauschen des magnetischen Sensors während der Messungen in ungeschützter Umgebung wirklich auszunutzen. Dann ist die magnetische Störungsichte kleiner als $5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei Frequenzen größer als 10 Hz. Es ist möglich, extrem kleine magnetisierte Eisenpartikel in erheblichen Abständen zu detektieren: $60 \mu\text{g}$ in 10 mm und einige mg in 100 mm Entfernung.

Einführung

Einige Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung basieren auf der Messung sehr schwacher und langsam veränderlicher Magnetfelder. Dies sind insbesondere die folgenden drei Verfahren:

Die „Eiseneinschlussprüfung“ (MRM, magnetic remanence method) detektiert kleinste ferromagnetische Einschlüsse in nicht-ferromagnetischer Umgebung, zum Beispiel ferromagnetische Partikel in kritischen Bauteilen von Flugzeugturbinen [1].

Die „Wirbelstromprüfung bei niedrigen Frequenzen“ (LFEC, low frequency eddy current) erlaubt es, Defekte in größeren Tiefen unter der Oberfläche metallischer Prüfobjekte zu erkennen, als es mit der herkömmlichen Wirbelstromprüfung möglich ist [2].

Das „Thermoelektrische Prüfverfahren mit magnetischer Auslesung“ (TEM), das Potential bietet, um Seigerungen [3], Oberflächenzonen mit lokaler Überhitzung durch Bearbeitung mit schadhafte Werkzeugen [4] und Bereiche mit Materialermüdung vor der Ribbildung [5] in nicht-ferromagnetischer Umgebung zu erkennen. Für weitere Details siehe [6].

Die gemeinsame messtechnische Grundlage dieser drei Verfahren soll im folgenden beschrieben werden.

Die magnetische Feldstärke oder die magnetische Flussdichte, die dem Menschen zugänglich ist, erstreckt sich über mehrere Größenordnungen, siehe Bild 1. Wegen ihres geringen Eigenrauschens können normal leitende Magnetometer zum Messen von Magnetfeldern bis herunter zu einigen pT verwendet werden. Kleinere Magnetfelder können nur durch supraleitende SQUIDs (superconducting quantum interference device) detektiert werden.

Das Messen kleiner Magnetfelder ist von Bedeutung für medizinische Anwendungen, die zerstörungsfreie Prüfung, die Physik, dabei insbesondere auch die Geophysik und weitere Gebiete von Wissenschaft und Technologie.

Beispiele für normal leitende Magnetometer sind Induktionsspulen, Hall-Effekt-Bauelemente, Magnetoresistance- und Giant Magnetoresistance-Bauelemente, Fluxgate-Magnetometer und Cäsium-Magnetometer. SQUIDs benötigen zum Betrieb eine kryogene Kühlung, das bedeutet etwa 4 K für SQUIDs aus herkömmlichen Supraleitern und etwa 77 K für SQUIDs aus Hochtemperatursupraleitern.

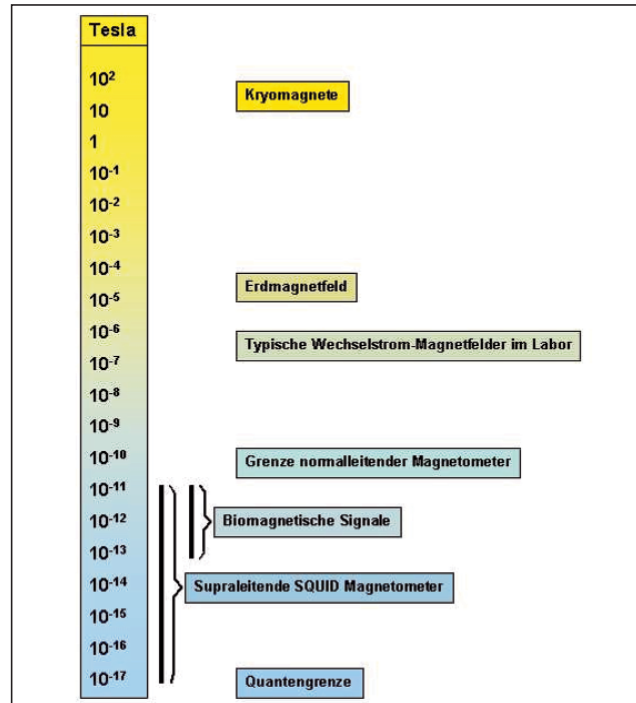


Bild 1: Magnetische Flussdichte und ihre Größenordnungen

Bei der Messung kleiner magnetischer Felder ist neben dem Eigenrauschen des magnetischen Sensors das Umgebungsrauschen der wichtigste Einfluss, der vermieden werden muss. Dieses Umgebungsrauschen kann die natürliche Schwankung des Erdmagnetfeldes sein. Es kann auch eine technische Störung sein, zum Beispiel verursacht durch Wechselstrom in Stromnetzen.

Eine Methode, um externe Störungen oder das Hintergrundfeld auszuschließen, ist die Verwendung magnetisch abgeschirmter Räume. Als ein Beispiel wird in [7] ein System beschrieben, das aus einem Fluxgate-Magnetometer im Inneren eines abgeschirmten Raumes besteht. Eine zweite Methode, das Hintergrundfeld auszuschließen, ist die Verwendung von zwei magnetischen Sensoren. Wenn sie geeignet platziert werden und das Hintergrundfeld homogen ist, macht die Differenz der beiden Signale das Hintergrundfeld zu Null und lässt jenes Magnetfeld übrig, dass von einer Quelle in der Nähe der Sensoren stammt. Mehr als zwei Sensoren zu verwenden, kann vorteilhaft sein, man erhält dann ein Gradiometer höherer Ordnung. Die Referenz [8] zeigt ein Beispiel eines SQUID-Gradiometersystems zweiter Ordnung aus Hochtemperatursupraleitern.

SQUIDs sind wegen ihres Bedarfs an kryogener Kühlung ziemlich kompliziert zu handhaben. Für praktische Anwendungen scheinen deshalb Fluxgate-Magnetometer mit geringstem Eigenrauschen vorteilhafter zu sein. Ferner sind magnetisch abgeschirmte Räume teuer und begrenzen die Größe der zu testenden Objekte. Deshalb ist die Gradiometermethode zur Ausblendung von Hintergrundfeldern oft von Vorteil. Aus diesen Gründen wird im folgenden ein Fluxgate-Gradiometer zweiter Ordnung beschrieben.

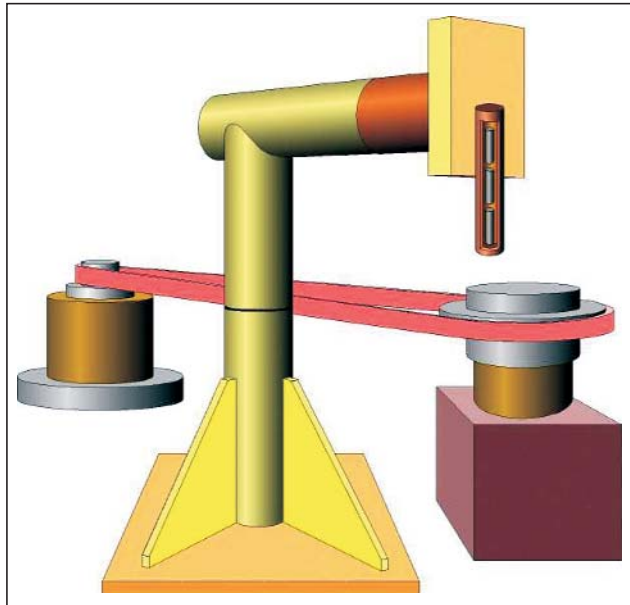


Bild 2: Skizze des Messplatzes

Aufbau des Messplatzes

Die Schlüsselkomponenten des Messplatzes sind die Fluxgate-Magnetometer. Sie sind stabförmig mit kreisförmigem Querschnitt. Die Fluxgates messen diejenige Komponente des magnetischen Feldes, die parallel zu ihrer Achse ist.

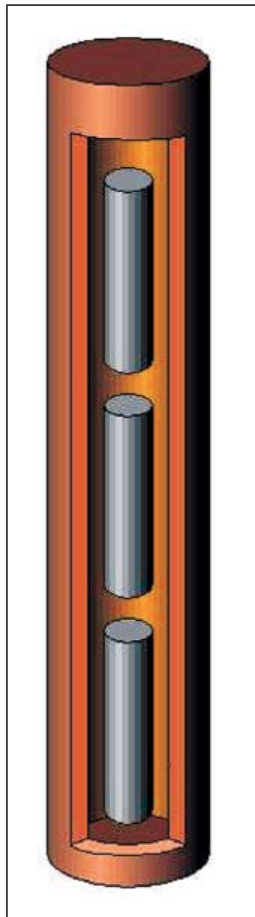


Bild 3: Prinzipdarstellung des Fluxgate-Gradiometers

Bild 2 zeigt eine Skizze der Messeinrichtung. Das Testobjekt wird z.B. auf einem Drehtisch platziert. Der Drehtisch besteht aus nichtmagnetischem Material. Eine Halterung, ebenfalls aus unmagnetischem Material, hält das Fluxgate-Gradiometer.

Bild 3 ist eine Prinzipskizze des Fluxgate-Gradiometers. Es besteht aus drei Fluxgate-Sensoren, die auf einer Achse montiert sind. Die Einrichtungen zur mechanischen Balancierung der Sensoren sind in Bild 3 nicht gezeigt.

Bild 4 zeigt das Blockdiagramm des Messsystems. Die drei Fluxgate-Sensoren sind vom Typ Bartington MAG-03IEL 100 in Verbindung mit dem Netzteil

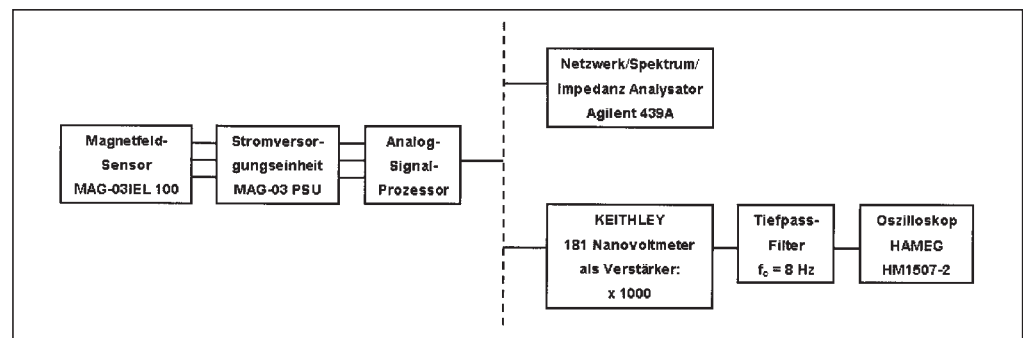


Bild 4: Blockdiagramm des Messsystems

MAG-03 PSU. Der Analog-Signal-Prozessor führt die mathematischen Operationen durch, um aus den drei Einzelkanälen das Gradientensignal zweiter Ordnung zu erhalten. Dieses Signal kann dann entweder an einen Spektrumanalysator oder über Verstärker und Tiefpassfilter an ein Oszilloskop gegeben werden. Die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters ist 8 Hz.

Dieses Gradiometer arbeitet nur zufriedenstellend, wenn es hochgradig balanciert ist. Diese Balancierung ist notwendig, um das Hintergrundsignal so weit wie möglich zu reduzieren. Die Balancierung beinhaltet eine mechanische Balancierung durch Stellschrauben im Fluxgate-Gradiometer. Sie beinhaltet ebenfalls eine elektronische Balancierung der einzelnen Signalzweige im Signalprozessor. Im folgenden Abschnitt sind die Messergebnisse beschrieben. Sie resultieren aus einer derartigen Balancierung, dass das Hintergrundfeld, das von der nahegelegenen elektrischen Eisenbahn stammt, minimal ist. Die Eisenbahnlinie ist ungefähr 200 m entfernt. Ihr elektrischer Strom und deshalb auch ihr Magnetfeld hat eine Frequenz von 16 2/3 Hz.

Erste Messergebnisse

Bild 5 zeigt das Störspektrum B_N , wie es ohne ein Testobjekt erhalten wird. Die Abbildung zeigt einen Bildschirmausdruck des Spektrumanalysators und zusätzlich eine vertikale Achse der magnetischen Flussdichte. Die horizontale Frequenzachse erstreckt sich von 0 bis 100 Hz. Werte unter 10 Hz sind jedoch nicht signifikant. Bild 5 zeigt den Mittelwert von 16 Messungen. Die obere Kurve zeigt das Signal eines Einzelsensors, die untere das des Gradiometers. Man erkennt, dass die Gradiometerschaltung z.B. das 16 2/3-Hz-Signal der elektrischen Eisenbahn ca. um den Faktor 10^3 , entsprechend 60 dB unterdrückt.

Ebenfalls wird die 50-Hz-Linie unterdrückt. Diese stammt vom üblichen Stromversorgungsnetz der unmittelbaren Umgebung. Gleichermäßen sichtbar ist ihre Oberwelle bei 100 Hz.

Abgesehen von den diskutierten Peaks ist das Spektrum ziemlich glatt. Die Magnetische Flussdichte hat Werte von ca. 5 pT bei 10 Hz und ca. 2,5 pT bei 100 Hz, jeweils gemessen in einer Bandbreite von 1 Hz. Entsprechend dem Datenblatt liegt das Eigenrauschen eines einzelnen Sensors typischerweise bei ca. 2,5 pT/sqrt(Hz) bei einer Signalfrequenz von 10 Hz. Bild 5 zeigt, dass das Hintergrundfeld auf ungefähr das Doppelte dieses Wertes reduziert ist. Das bedeutet, dass das Gradiometer nahe bei der Grenze arbeitet, die durch das Eigenrauschen der einzelnen Sensoren vorgegeben ist. Bemerkenswert ist, dass der Störpegel des Flux-

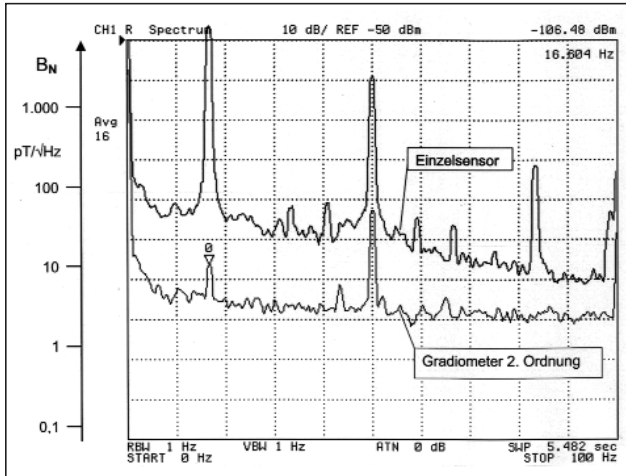


Bild 5: Störpektrum B_N der Magnetischen Flussdichte für Einzelsensor und Gradiometer. Frequenzbereich: 0 ... 100 Hz

gate-Gradiometers auf diese Weise soweit reduziert wurde, dass er fast in der gleichen Größenordnung wie der eines vergleichbaren SQUID-Systems aus Hochtemperatursupra-leitern liegt.

Im folgenden wird ein elementares Beispiel beschrieben, das eine Vorstellung von den Möglichkeiten des Messsystems gibt. Ein Partikel reinen Eisens mit einer Masse von ungefähr 160 μg wurde bis in die Sättigung durch einen starken Permanentmagneten magnetisiert. Dann wurde es auf dem nichtmagnetischen Drehtisch, wie in Bild 2 gezeigt, platziert. Der Tisch wurde gedreht und das Ausgangssignal, entsprechend dem unteren Zweig des Blockdiagramms in Bild 4, auf ein Oszilloskop gegeben. Das Ergebnis wird in Bild 6 gezeigt als eine Kombination von drei Einzelergebnissen für verschiedene Distanzen zwischen dem Partikel und der Unterkante des untersten Sensors. Die Distanzen sind 6 mm, 11 mm und 14 mm für die drei Signale in Bild 6. Für das kleinste Signal ist das Signal-Rausch-Verhältnis ungefähr 13 dB. Die Übertragung dieses Ergebnisses auf geringfügig andere Bedingungen führt zu folgender Feststellung: In einer Distanz von 10 mm unter der Unterkante des untersten Sensors kann ein Eisenpartikel von 60 μg gut erkannt werden. Es sollte sich ein Signal-Rausch-Verhältnis von 6 dB ergeben. In Distanzen von ungefähr 100 mm können Eisenpartikel von einigen Milligramm erkannt werden.

Schlussfolgerungen

Auf der Basis empfindlichster Fluxgate-Sensoren wurde ein Fluxgate-Gradiometer entwickelt. Die verbleibenden Reststörungen in ungeschirmter Laborumgebung sind kleiner als 5 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ für Frequenzen größer als 10 Hz. Das System ist in der Lage, Eisenpartikel bis zu einer minimalen Größe von 60 μg in Abständen von 10 mm gut zu detektieren. Eisenpartikel bis zu einer minimalen Größe von einigen Milligramm können bei einem Abstand von 100 mm detektiert werden. Es bestehen gute Chancen, daß die Leistungsfähigkeit des Systems in Zukunft noch verbessert wird.

Die Autoren bedanken sich bei Karl Schreiber von Rolls Royce Ltd. & Co. KG und Jörg-Henrik Gerlach von der Hochschule Magdeburg-Stendal (FH) für ihre Unterstützung.

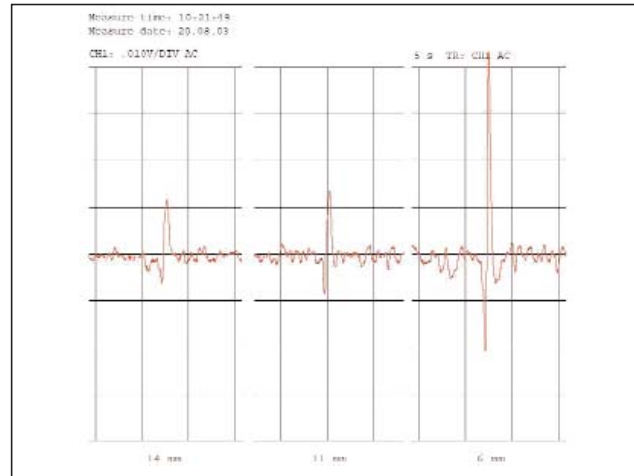


Bild 6: Signale eines Eisenpartikels der Masse 160 μg . Kombination von 3 Oszilloskopspuren für verschiedene Distanzen d zwischen dem Eisenpartikel und der Unterkante des untersten Magnetsensors. Für die Signale von links nach rechts gilt $d = 14$ mm, 11 mm und 6 mm. Vertikale Achse: 10 mV/Teilstrich entsprechend 100 pT/Teilstrich

Referenzen

- [1] Tavrin, Y.; Hinken, J.: First routine aircraft NDT with SQUID gradiometer. 7th European Conf. on Nondestructive Testing (ECNDT) (1998), S. 3246-3253
- [2] Tavrin, Y.; Krivoy, G.; Meurtin, M.; Hinken, J.: Detection of Deep-Lying Subsurface Cracks by SQUID-Based Low Frequency Eddy Current Techniques. A short communication of FINO AG, Juli 2001. See also www.finoag.com/fitm/n11.html
- [3] Tavrin, Y.; Hinken, J.: Thermoelectric SQUID method for the detection of segregations. AIP Conference Proceedings 509 Band 19B (2000), S. 2085-2092
- [4] Tavrin, Y.; Hinken, J.; Eckerbom, L.: First Detection of an Overheating Zone by the Thermoelectric SQUID Method. An information of F.I.T. Messtechnik GmbH, May 2000. See also www.finoag.com/fitm/n8.html
- [5] Tavrin, Y.; Nagy, P.B.; Hinken, J.: Detection of Fatigue in Aluminium with the Thermoelectric SQUID Method: A First Attempt. SPOT BEAM Issue No. 26, November 1999. See also www.finoag.com/fitm/n4.html
- [6] <http://www.elektrotechnik.hs-magdeburg.de/home/profs/hinken/forschung.htm>
- [7] Kreuzbruck, M.v.; Allweins, K.; Heiden, C.: Wirbelstromprüfsystem mit integriertem Fluxgate-Magnetometer. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Jahrestagung 2000, Innsbruck, 29.-31. Mai 2000, Proceedings, 871-881
- [8] Tavrin, Y.; Hinken, J.: High-Resolution Magnetometry based on Unshielded SQUID System. SPOT BEAM Issue No. 24, February 1998, second printing 1999. See also www.finoag.com/fitm/n1.html