

DIN V 42331

DIN

ICS 17.220.01

Vornorm**Technischer Bericht über Magnetometrie mit gepulsten Feldern
(IEC 62331:2003)**

Technical Report on Pulsed Field Magnetometry (IEC 62331:2003)

Gesamtumfang 28 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Eine Vornorm ist das Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt oder wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens vom DIN noch nicht als Norm herausgegeben wird. Zu dieser Vornorm wurde kein Entwurf veröffentlicht. Erfahrungen mit dieser Vornorm sind erbeten an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Nationales Vorwort

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 171 „Magnetische Legierungen und Stahl“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.

Einleitung

Zur Messung aller magnetischen Kenngrößen von magnetisch harten Werkstoffen (Dauermagneten) ist ein Magnetfeld erforderlich, dessen Stärke ausreicht, die Probe zu sättigen.

Die Erzeugung dieses magnetischen Feldes kann zum praktisch begrenzenden Faktor und bestimmend für das geeignete Messverfahren werden.

Supraleitende Magnete können sehr hohe statische oder langsam veränderliche magnetische Feldstärken erzeugen, jedoch sind sie wegen der hohen Anschaffungskosten auf Grund ihrer hohen Komplexität und ebenfalls wegen hoher Betriebskosten auf Grund der erforderlichen Kryogase weit von einer Ideallösung entfernt. Die Feldänderungen müssen langsam erfolgen, um ein „Quenching“ des supraleitenden Magneten zu vermeiden.

Langsam sich ändernde konventionell gewickelte Elektromagnete haben ein schwerwiegendes Problem der Wärmeerzeugung durch I^2R -Verlust. Dies kann gemildert werden durch Verwendung eines hochpermeablen Eisenjochs. Jedoch macht die Sättigung des Eisens es unmöglich, die Kennzahlen von Selten-Erd-Dauermagneten bei maximaler Hystereseschleife zu bestimmen.

Ein System mit gepulsten Feldern minimiert bei Verwendung herkömmlichen Leitermaterials die Wärmeeffekte durch begrenzte Dauer des anstehenden Feldes und durch Begrenzen der Wärmeerzeugung auf ein akzeptables Maß. Auf diese Weise können Felder bis 40 Tesla erzeugt werden.

Jedoch muss den Messgeräten und dem Messverfahren sorgfältige Beachtung geschenkt werden, damit den dynamischen Effekten, die im Zusammenhang mit der kurzen Zeitdauer des anstehenden Feldes stehen, Rechnung getragen wird.

Während in vielen Teilen der Welt auf dem Gebiet der Magnetometrie mit gepulsten Feldern gearbeitet wird, sind MACCHARETEC in Europa und EMAJ (Electronic Materials Manufacturers Association of Japan) die beiden Hauptgruppen von Anwendern. Das japanische Konzept unterstützt eine Norm mit festgelegten Probengrößen, Feldern und Frequenzen bei einer begrenzten Anzahl von Konfigurationen.

Das Anliegen dieses technischen Berichts ist es, die Grundzüge und praktischen Gesichtspunkte der Magnetometrie mit gepulsten Feldern zu beschreiben, damit die Möglichkeiten des zu behandelnden Verfahrens einschließlich seiner Anwendung auf kleine und große Magnete verschiedener Geometrien, und auf verschiedene eingesetzte Felder und Frequenzen voll ausgeschöpft werden können.

1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Technische Bericht gibt einen Überblick über Verfahren zum Messen an hartmagnetischen Werkstoffen mit Hilfe von Magnetometern mit gepulsten Feldern.

Die Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften von hartmagnetischen Werkstoffen wurden für geschlossene magnetische Kreise in IEC 60404-5 und für offene magnetische Kreise in IEC 60404-7 festgelegt. Die Messung der magnetischen Eigenschaften hartmagnetischer Werkstoffe bei höheren Temperaturen ist im Technischen Bericht IEC TR 61807 angegeben.

Magnetometer mit gepulsten Feldern wurden entwickelt, um durch schnelles Messen hohe Produktionsgeschwindigkeiten bei 100 % Qualitätskontrolle zu ermöglichen.

2 Magnetometer mit gepulstem Feld (PFM)

Ein Magnetometer mit gepulstem Feld kann aus folgenden Teilen bestehen:

- a) dem Feldgenerator bestehend aus
 - A) der Leistungsquelle (normalerweise ein kapazitives Entladungssystem)
 - B) Magnetisierungs-Solenoid
- b) Magnetisierungs- und Feldstärke-Detektoren (Messspulen)
- c) Messgeräte für transiente Vorgänge und Digitalisierungseinrichtung für
 - A) Integration
 - B) Digitalisierung
- d) Datenbearbeitungskomponenten für
 - A) Nullsignal
 - B) M , H -Schleifenpositionierung
 - C) Entmagnetisierungs-Korrektur
 - D) Tiefpassfilterung
 - E) Kalibrierungsfaktoren
 - F) Wirbelstrom-Korrektur

2.1 Allgemeine Grundzüge

Das Grundprinzip der Arbeitsweise des PFM wird dadurch bestimmt, dass man ein starkes transientes Magnetfeld mit Hilfe des benutzten Feld-Generators erzeugt und auf die zu messende Probe einwirken lässt. Die angewandte Feldstärke und die resultierende Magnetisierung der Probe werden aufgezeichnet und ausgewertet.

Während des Messzyklus durchsetzt der von der Probe erzeugte Fluss die J -Spule, deren Ausgangsspannung proportional zur zeitlichen Ableitung des durchsetzenden Flusses ist. Dieser Fluss ist großen Teils auf die Magnetisierung der Probe zurückzuführen, aber auch auf ein Null-Signal (siehe 7.1.1) und auf mögliche Wirbelströme (siehe 7.1.6) u.s.w. Folglich wird diese Spule als „ J -Spule“, gelegentlich auch als „ M -Spule“, bezeichnet. Tatsächlich handelt es sich um eine $d\Phi/dt$ -Spule. In diesem Schriftstück wird der Ausdruck „ J -Spule“ benutzt.

Bei der H -Spule ist das Ausgangssignal proportional zur zeitlichen Ableitung des sie durchsetzenden Flusses und ist weitgehend proportional der auf die Probe angewandten magnetischen Feldstärke. Diese Spule wird gewöhnlich als „ H -Spule“ bezeichnet, wenngleich sie tatsächlich eine dH/dt -Spule ist.

Die Ausgangssignale dieser beiden Spulen werden integriert (siehe 6.2). Im Fall des integrierten Signals der J -Spule wird das Null-Signal abgezogen und das Ergebnis wird kalibriert, so dass sich ein M' -Signal ergibt, d. h., die Magnetisierung der Probe wird im offenen magnetischen Kreis gemessen. Durch Kombinieren dieses Signals mit dem H -Signal wird eine M , H -Hystereseschleife erhalten.

Wenn die M' , H -Schleife korrigiert wird bezüglich des Entmagnetisierungseffektes beim Messen im offenen magnetischen Kreis (siehe 7.1.3), dann können die intrinsischen M , H - oder J , H -Schleifen-Daten erhalten werden.

Die beiden Signal-Kanäle, d. h. die Wege von der Messspule über die Integration, Digitalisierung und die Akkreditierung und Verarbeitung der Daten im Computer, sind allgemein als „ J' “- und „ H' “-Kanäle bekannt.

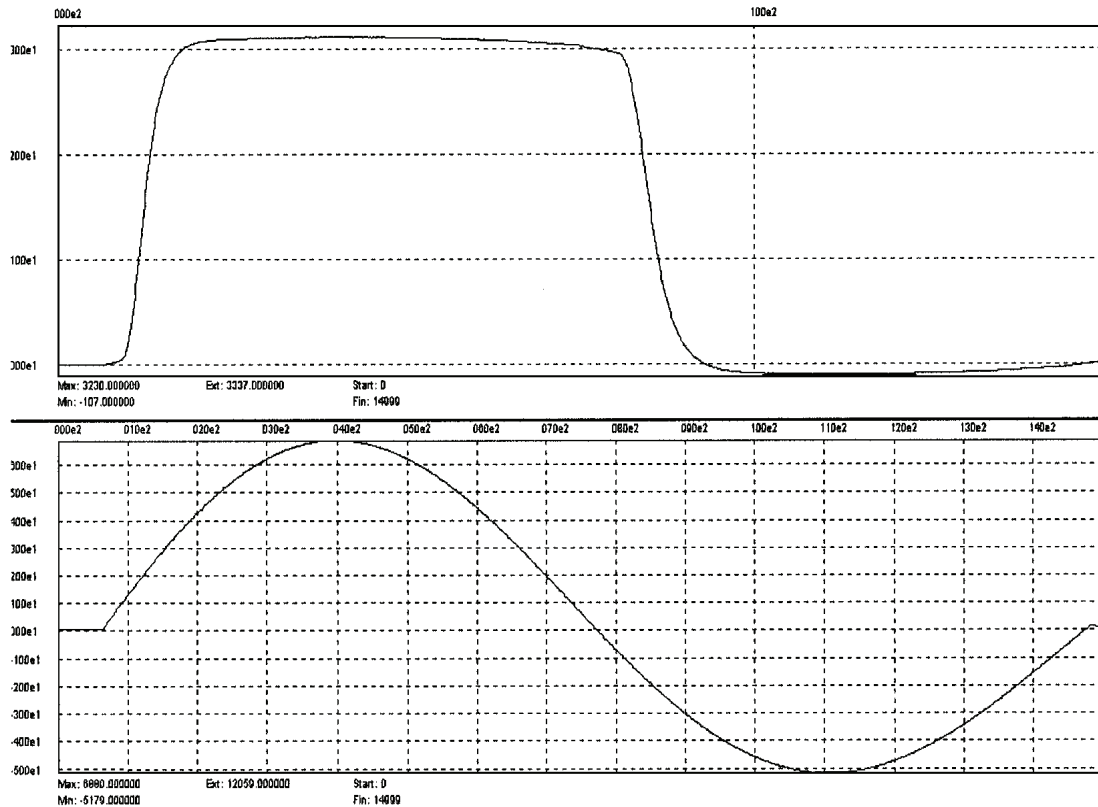


Bild 1 – M- und H-Zeitverläufe für einen Dauermagneten. Die untere Kurve ist der Zeitverlauf des angewandten Feldes H bei einer Feld-Generator-Konfiguration gemäß 3.2.2.1. Die obere Kurve gibt den Zeitverlauf der Probenmagnetisierung wieder; gesinterte Neodym-Eisen-Bor-Probe. PFM-Messung durch Hirst Magnetic Instruments mit Hilfe von Hirst-Magnetometer PFM11.

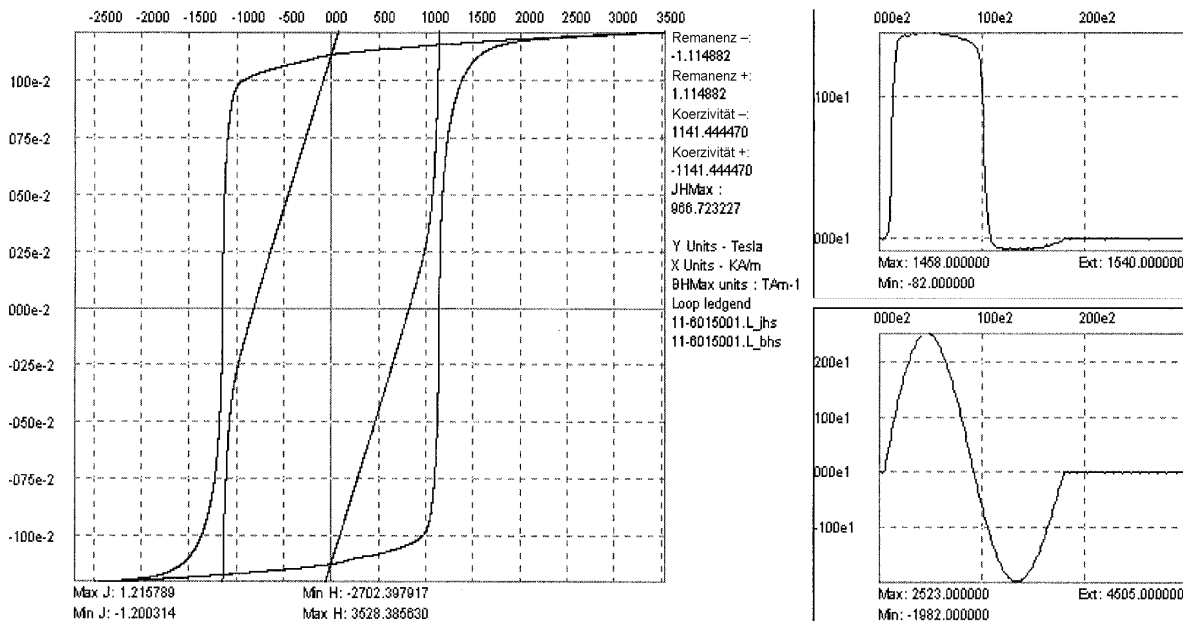


Bild 2 – J, H- und B, H-Schleife eines Dauermagneten. Die volle Hystereseschleife wird durch Plotten der J-Daten über die H-Daten, die im Bild 1 gezeigt sind, ohne Benutzung der Zeitdomänendaten erhalten. Die Zeitkurven von J und H sind rechts dargestellt (Hirst Ref. 1).

2.2 Probengröße

Da an den Proben im offenen magnetischen Kreis gemessen werden soll, gibt es keine unmittelbare Grenze für die Größe der prüfbaren Proben. Kleine und große Proben können gemessen werden, vorausgesetzt, die Aspekte des Wirbelstroms und der praktischen Messgerätewahl werden berücksichtigt (siehe 7.1.6).

Die in diesem Bericht präsentierten Ergebnisse gelten für Zylinderproben der maximalen Abmaße 30 mm Durchmesser mal 25 mm Länge und der minimalen Abmaße 5 mm Durchmesser mal 5 mm Länge, wenngleich dies nicht die praktische Begrenzung für das PFM-Verfahren ist.

Zylinderproben mit einem Durchmesser von weniger als 3 mm und einer Länge von 3 mm ebenso wie NdFeB-Zylinder von 40 mm Durchmesser und 30 mm Länge sind ebenfalls gemessen worden.

Die japanische Gruppe EMAJ (Electronic Materials Manufacturers Association of Japan) misst zylindrische Proben von 10 mm Durchmesser und 7 mm Länge und kubische Proben von 7 mm x 7 mm x 7 mm (siehe Bilder 14 bis 16).

3 Magnetfeld-Generator

3.1 Allgemeines

Der verwendete Magnetfeld-Generator besteht aus einem System, das es erlaubt, das Magnetfeld auf die Probe einwirken zu lassen.

Er besteht aus einer Leistungsquelle und einem Magnetisierungs-Solenoid. Die Leistungsquelle stellt den dem Magnetisierungs-Solenoiden zuzuführenden Magnetisierungsstrom zur Erzeugung des Magnetfeldes zur Verfügung.

3.2 Leistungsquelle

3.2.1 Allgemein

Die Leistungsquelle muss in der Lage sein, eine hohe elektrische Spannung (400 V bis 10 000 V, typischerweise 1 000 V bis 3 000 V) bei hohen Stromstärken (im Bereich 1 000 A bis 40 000 A, typischerweise 5 000 A bis 20 000 A) zu erzeugen, und dies in beiden Polaritäten.

Dies kann erreicht werden mit Hilfe eines der beiden folgenden Verfahren:

- a) Kondensatorentladung
- b) Direkte Netzversorgung

3.2.2 Kondensatorentladung

Die Einrichtung zur Kondensatorentladung ermöglicht das Aufladen von Kondensatoren mit elektrischer Energie über einen längeren Zeitraum, bevor innerhalb kurzer Zeit zur Lieferung hoher Stromstärken aus einer Quelle niedriger Impedanz entladen wird.

Für den Energiespeicher gilt:

$$E = \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (1)$$

Dabei ist

E = Energie in Joule

C = Kapazität in Farad

U_0 = Kondensatorspannung in Volt

Die Kapazität und die Energie der Kondensator-Entladungseinrichtung werden an das Magnetisierungs-Solenoid angepasst, so dass die geforderten Parameterwerte für Scheitelwert der Feldstärke, Feldvolumen, Feldhomogenität und Standzeit erreicht werden. Die erreichte maximale magnetische Feldstärke ist proportional zur Stromdichte, wobei der Proportionalitätsfaktor von der Geometrie des Puls-Magneten abhängt.

Die Entladung kann in den folgenden Moden angewandt werden:

- a) Sinuswelle (abfallend)
- b) Unidirektionale Pulse (halbe Sinuswelle)
- c) Zwei unidirektionale Pulse (abfallend)

3.2.2.1 Sinuswelle (abfallend)

Bei kommerziellen PFM müssen die Kosten minimiert werden und es ist daher erforderlich, die gewünschten Daten mit einem Minimum an Kondensator-Energie zu erreichen.

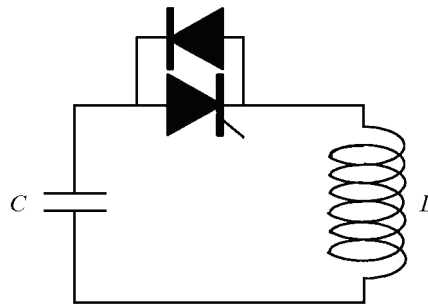


Bild 3 – Blockschaltbild für Sinuswelle (abfallend)

Der Strom $I(t)$ (siehe Bild 3) und somit die magnetische Feldstärke sind bestimmt durch

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \cdot e^{-\beta t} \sin \omega t \quad (2)$$

wobei ω gegeben ist durch

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (3)$$

Auf Grund der Verluste durch den Widerstand des Magnetisierungs-Solenoids ist der Scheitelwert der im Solenoid in Gegenrichtung erzeugten Feldstärke reduziert – abhängig vom Dämpfungsfaktor $\beta = R/2L$. Es ist deshalb erforderlich, eine höhere Anfangsfeldstärke anzuwenden, um die erforderliche Umkehrfeldstärke zu erreichen.

Das Sinuswellen-Verfahren hat den Vorteil eines kontinuierlichen Verfahrens, bei dem positive und negative Polarität angewandt und so Diskontinuitäten vermieden werden. Dies ist wichtig bei der Prüfung von elektrisch leitenden Werkstoffen, bei denen Wirbelstromeffekte berücksichtigt werden müssen (siehe 7.1.6)

3.2.2.2 Unidirektionale Pulse (halbe Sinuswelle)

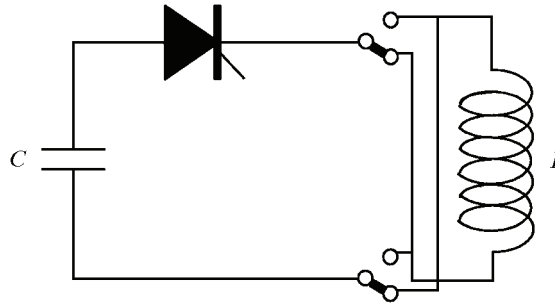


Bild 4 – Blockschaltbild für unidirektionale Pulse (halbe Sinuswelle)

Die Stromstärke (siehe Bild 4) wird bestimmt durch;

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \cdot e^{-\beta t} \sin \omega t \quad (4)$$

dabei ist:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (5)$$

Nach der ersten Halbperiode des Stromes verhindert das Sperrverhalten des Thyristors den Rückfluss der am Kondensator aufgebauten Umkehrladung.

Die resultierende Stromwellenform ist eine halbe Sinuswelle (0° bis 180°).

Durch Anwendung eines identischen Pulses der entgegengesetzten Polarität kann ein maximales positives und negatives Feld mit identischen Spitzenwerten der positiven und negativen Polarität aufgebracht werden.

Die Gesamtmessung wird vervollständigt durch zwei separate Entladungen. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass dieselben Spitzenwerte der positiven und negativen Felder erreicht werden. Jedoch werden zwei diskrete Pulse verwandt mit ihren inhärenten Stromstärkediskontinuitäten.

3.2.2.3 Unidirektionale Pulse (abfallend)

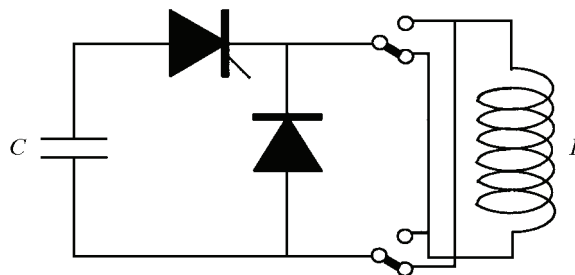


Bild 5 – Blockschaltbild für unidirektionale Pulse (abfallend)

Die Entladung wird bestimmt durch:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin \omega t \quad (6)$$

Vom Beginn der Entladung bis zum Zeitpunkt der Spitzenstromstärke kann auf Grund der Halte-Schaltung keine Umkehrenergie in die Kondensatorbatterie geladen werden. Von diesem Zeitpunkt an wird die Stromstärke bestimmt durch

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R \cdot t}{L}} \quad (7)$$

Dabei ist I_0 die Stromstärke zu dem Zeitpunkt, zu dem die Halte-Schaltung in den Vorwärts-Zustand übergeht.

Wie bei dem Verfahren nach 4.2.2.2 kann eine vollständige positive und negative Feldstärke-Halbwelle durch die Anwendung zweier Pulse, einer davon mit umgekehrter Polarität, erreicht werden.

Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass zwei Pulse benötigt werden. Es weist ebenfalls zwei sehr verschiedene dynamische Antworten auf die ansteigenden und die fallenden Schwingungsformen, wobei das dH/dt während des Zeitbereichs nach dem Spitzenwert niedriger ist.

Tabelle 1 – Vergleich von Verfahren zur Erzeugung des angewandten Feldes

	Feste Frequenz	Kontinuierlich	Einzel-Schwingungsfunktion	Identische positive und negative Felder
Sinusschwingung (abfallend)	Ja	Ja	Ja	Nein
Halbschwingung in einer Richtung	Ja	Nein	Ja	Ja
Schwingung in einer Richtung (abfallend)	Nein	Nein	Nein	Ja

Das bevorzugte Konzept ist die Sinusschwingung (abfallend) nach 4.2.2.1, insbesondere in Anbetracht möglicher Wirbelströme in elektrisch leitenden Proben. Es sollte angemerkt werden, dass das von EMAJ (Electronic Materials Manufacturers Association of Japan) bevorzugte Konzept das von 4.2.2.2, Puls einer Richtung (Halb-Sinusschwingung), ist.

3.2.2.4 Die Wiederholbarkeit der angewandten Spannung

Die Wiederholbarkeit der der Kondensatorbatterie zugeführten Spannung ist relativ unwichtig, vorausgesetzt, dass die Energie ausreicht, den getesteten magnetischen Werkstoff zu sättigen. Die Wiederholbarkeit ist jedoch sehr wichtig für die Korrektur des Null-Signals. Eine Wiederholbarkeit von $\pm 1 \%$ kann leicht erreicht werden und ist angemessen. Eine Wiederholbarkeit von $\pm 0,1 \%$ ist eher typischerweise erreichbar.

Die Feldstärke hängt ab vom Widerstand der Magnetisierungsspule. Die Temperaturänderung der Magnetisierungsspule kann einen geringfügigen Einfluss auf das Ergebnis haben und muss beachtet werden.

3.2.3 Direkt vom Netz gespeiste Versorgung

Einige weltweit existierende Hochmagnetfeld-Anlagen benutzen Leistungsquellen, die direkt an das Netz angeschlossen sind. Diese Systeme sind in der Lage, hohe Felder (20 T bis 40 T) für die Dauer von ungefähr einer Sekunde zu erzeugen.

Wenngleich diese Anlagen wertvolle Quellen darstellen, werden sie in diesem Bericht nicht berücksichtigt.

Es ist ebenfalls möglich, eine Leistungsquelle dieses Typs auf wesentlich verkleinerter Basis zu entwickeln. Die Schwierigkeit bei diesem Gerätetyp ist, dass er direkt mit dem Netz verbunden ist und nicht die Leistungs-Regelungsanforderungen erfüllen kann und daher wahrscheinlich nicht von großer Bedeutung sein wird.

3.3 Magnetisierungs-Solenoid

Das Magnetisierungs-Solenoid kann als herkömmliches Solenoid angesehen werden.

Die Konstruktion des Solenoids muss folgende Gesichtspunkte berücksichtigen:

3.3.1 Spitzenwert der angewandten magnetischen Feldstärke

Der Spitzenwert der angewandten magnetischen Feldstärke muss ausreichend hoch sein, um die Probe in positiver und negativer Richtung zu sättigen. Dies sollte einen Überschuss von + 10 % einschließen.

3.3.2 Das zu magnetisierende Volumen

Das Volumen des Magnetisierungs-Solenoids muss ausreichend groß sein, um die Probe und das Sensorspulen-System einzuschließen.

3.3.3 Feldhomogenität über das Volumen der zu prüfenden Probe

Die Feldhomogenität über den Probenraum ohne eingebrachte Probe sollte innerhalb von ± 1 % liegen.

3.3.4 Feldfrequenz

Die zeitliche Feldänderung dH/dt sollte so niedrig wie möglich gehalten werden, um entweder das Induzieren von merklichen Wirbelströmen in leitende Proben zu vermeiden oder um eine Wirbelstrom-Korrektur noch anwenden zu können.

Es sollte angemerkt werden, dass das von EMAJ (Electronic Materials Manufacturers Association of Japan) bevorzugte Konzept die Vermeidung von Wirbelströmen ist.

4 Magnetisierung und verwendete Feldstärke-Detektoren (Suchspulen)

4.1 Messung der Magnetisierung

Es ist erforderlich, korrelierte Werte der Magnetisierung der Probe und der dabei angewandten Feldstärke zu messen.

Dieses wird üblicherweise mit Suchspulen erreicht. Es ist möglich, andere Sensorformen wie z. B. Hallsensoren zu verwenden, die aber in diesem Bericht nicht berücksichtigt werden.

Es kann als vernünftig angesehen werden, einen Feldpuls auszulösen, während dessen man M registriert, und sobald das Magnetisierungs-Solenoid seine ursprüngliche Temperatur erreicht hat, einen zweiten (und möglichst identischen) Puls auszulösen und H zu messen. Dieses scheint jedoch das Verfahren unnötig kompliziert zu machen und eine Quelle für Verfahrensfehler darstellen. Gleichzeitiges Aufzeichnen von zwei Kanälen ist erforderlich.

Suchspulen können mit verschiedenen Geometrien konfiguriert werden, jedoch haben sie gemeinsame Eigenschaften. Wir benötigen also grundsätzlich:

- a) Magnetisierungssensor
- b) Feldstärkesensor

4.2 Der Magnetisierungssensor

Der Magnetisierungssensor besteht aus zwei (oder mehr) Spulen, die gegensinnig in Reihe geschaltet sind. Im Falle von zwei Spulen haben diese dieselbe Windungsfläche, aber verschiedene Verkettung mit dem Probenfluss und messen somit nur die Magnetisierung und nicht das angewandte magnetische Feld.