



Frank Gräbner

EMV-gerechte Schirmung

Magnetmaterialien für die Schirmung –
Praxisbeispiele – Gerätedesign

2. Auflage



Springer Vieweg

EMV-gerechte Schirmung

Frank Gräbner

EMV-gerechte Schirmung

Magnetmaterialien für die Schirmung –
Praxisbeispiele – Gerätedesign

2., erweiterte und korrigierte Auflage

Mit 150 Abbildungen und 12 Tabellen

Ass. Prof.(BG) Dr.-Ing. Frank Gräbner
Nordhausen, Deutschland

ISBN 978-3-8348-2638-1
DOI 10.1007/978-3-8348-2639-8

ISBN 978-3-8348-2639-8 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2011, 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur ersten Auflage

Hauptziel dieses Buches ist die Darstellung einer Verbesserung der Schirmung durch neu entwickelte Materialien.

Dem Ingenieur der nächsten Jahrzehnte wird mit dem entwickelten Verfahren einer neuartigen EMV-Schirmungsphilosophie durch Nutzung von Absorbermaterialien, bestehend aus Volumenmaterialien oder Nanomaterialien, eine Möglichkeit gegeben, die EMV-Arbeit durch einfache Schirmregeln zu erleichtern.

Die physikalischen Grundlagen dieser Materialien sind nicht neu, jedoch aus einem anderen Blickwinkel diskutiert worden.

In einer Zeit der sehr schnellen Einführung neuer Technologien und scheinbar unbegrenzten technischen Möglichkeiten steht der Entwickler von Geräten und Anlagen unter Druck, die komplexen EMV-Kopplungswege zu verstehen und ein Gerät sehr schnell zu entstören. Für diese „leidgeprüften“ Fachleute ist dieses Buch geschrieben und es soll Ihre Arbeit etwas erleichtern.

Viele der Aufgaben und Lösungen sind in Auswertung praktischer Versuche und Forschungsprojekte entstanden. Es sei den vielen Forschergruppen wie zum Beispiel des Institutes IMG Nordhausen, des Kompetenzzentrums BRUNEL IMG GmbH und der Hörmann IMG GmbH (Herr Hungsberg, Herr Kallmeyer, Herr Hildenbrandt und Herr Hesse) in Nordhausen, der Technischen Universität Ilmenau (Herr Prof. Dr. Dr. Knedlik, Herr Dr. Teichert vom FB Werkstoffe der Elektrotechnik), der FH Telekom Leipzig, dem ehemaligen HITK Hermsdorf (Frau Pawlowski) und den Kollegen des TITK Rudolstadt (Herr Pflug und Herr Dr. Schrödner) gedankt.

Nordhausen/Harz,
im März 2011

Frank Gräbner
Ass. Prof. (BG) Dr.-Ing.

Vorwort zur zweiten Auflage

Die Motivation der zweiten Auflage liegt im stärker wachsenden Anspruch der Fachleute nach Schirmung mit Nutzung von Magnetmaterialien.

Grund dafür sind die Normenaktualisierungen der Fachgrundnormen Störemission Funkstörfeldstärke im Industriebereich/Wohnbereich.

Die obere Frequenzgrenze von 1000 Megahertz gilt nicht mehr. In Abhängigkeit von den internen Frequenzen der Störer kann eine Emissionsfrequenzgrenze von mehr als 6000 Megahertz angenommen werden.

Diese Regelung meldet einen Bedarf nach neuen Schirmkonzepten an, welche in diesem Buch mittels Praxisbeispiele dargestellt werden.

Auch ein neues Kapitel „Formelwerk Schirmung“ im Anhang ergänzt das Buch um einen wichtigen Beitrag.

Diese Formelsammlung soll in komprimierter Form dem „Schnellleser“ die Grundlagen der verschiedenen Schirmeffekte nahe bringen.

Der Autor bedankt sich besonders bei der Begleitung des Buches durch das MediaDesignbüro Fromm aus Selters/Taunus.

Nordhausen/Harz,
im Oktober 2012

Frank Gräbner
Ass. Prof. (BG) Dr.-Ing.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
1.1 EMV-Gesetz-Normung	1
A. Grundlagen	3
2 Volumenmaterialien	3
2.1 Einleitung	3
2.2 Mikroskopische und Makroskopische Eigenschaften von Spinellferriten	6
2.3 Modelle der klassischen Feldtheorie (Maxwell) im Vergleich zur Landau-Lifschitz-Theorie	12
2.4 Betrachtungen zu HF-Verlusten in Ferrit Compounds und Ferritschichten ...	15
2.5 Dielektrische Messungen an Magnetmaterialien	22
2.6 Relaxation in Ferritvolumenmaterialien	26
2.7 Textur in Ferritvolumenmaterialien	30
2.8 Füllgrad von Ferrit in Volumenmaterial	33
2.9 Feldanpassung des Volumenmaterials	34
2.10 Das Spinellsystem NiZn-Ferrit	39
3 Nanomaterialien	47
3.1 Schichtanalyse, Anisotropiekonstante und Korngröße von ferrimagnetischen Schichten	47
3.2 Spinwellenverluste in Ferritschichten	49
3.3 Einfluss der Anisotropiekonstanten auf den HF-Verlust der NiZn-Ferritschicht	53
3.4 Schichtanalyse, Anisotropiekonstante und Korngröße von ferrimagnetischen Schichten	56
3.5 Wirbelstromeffekte in metallischen Magnetfilmen	59
3.6 Höchstfrequenzdämpfungsversuche, HF-Materialbewertung.....	64
3.7 Relaxationseffekte von Magnetmaterialien im kHz-Bereich	66
3.8 NF-Verluste	69
3.9 Abscheidung von ultradünnen Hematitschichten	70
3.10 Magnetspektroskopische Analyse	72
3.11 Hohlleitmessplatz	76
3.12 Röntgendiffraktometrische Analyse.....	77
3.13 RF-Analyse bis 20000 MHz	77
3.14 Verhältnis der Granulengröße zur Schichtdicke einer Fe-Nanoschicht	78
3.15 Mehrfachschichtsysteme	84
3.16 Kittelfrequenz	86

3.17	Wolmannfrequenz	86
3.18	Snoekfrequenz	86
3.19	Radareffekte	87
3.20	Magnetische Nanopartikel	89
B.	Praxisbeispiele	95
4	Schirmung mittels Nanomaterialien.....	95
4.1	Messung der komplexen Permeabilität von Nanoschichten mit einem Permeameter	96
5	NF-Schirmung	99
6	Doppelschirm	101
7	Polymergehäuse	103
8	Schirmbeispiel: Innenauskleidung eines 2,4-GHz-Low-Noise- Verstärker-Gehäuses zur Unterdrückung höherer Moden	110
9	Metallgehäuse mit Magnetmaterialien	113
9.1	Dämpfung der Hohlraumresonanzen mit Hilfe absorbierender Magnetlamine	117
9.2	Hohlraumresonanzen	118
9.3	Beschichtete Gehäuse	120
9.4	Absorbierendes Material als Einschub	121
9.5	Ferrithaltige Dickschichten für neue EMV-Metallgehäuse	123
9.6	Ferritvolumengehäuse	125
9.7	Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessungen	132
10	Leiterplattenschirmung	141
10.1	Technischer Aufbau der Teststrukturen/neuartigen EMV-Höchstleiterplatten	141
10.2	Elektromagnetische Störaussendung (EMV) mit alter und neuartiger Leiterplatte	142
10.3	Auswertung	149
10.4	Zusammenfassung	154
11	Schirmdämpfung an Schichten für Leitungen	159
11.1	Messung mit Stripline	159
11.2	Anwendung: Flachbandkabel	162
11.3	Zusammenfassung	163
12	Textilschirmmaterial	164
13	Schirmdämpfung eines Drahtgeflechtes	169
	Literatur	171
	Anhang: Formelwerk Schirmung	174
	Sachwortverzeichnis	186

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

$\vec{A}, B$	– Vektor, Effektivwert
A	– insbesondere Fläche
$\vec{A}$	– Tensor
a	– Gitterkonstante
$\vec{B}, B$	– magnetische Flussdichte, Effektivwert
c	– Lichtgeschwindigkeit
$\vec{D}$	– elektrische Flussdichte
D	– Teilchengröße, Kristallit
d_i	– Dicke des Materials
d_{si}	– Schichtdicke
d	– Netzebenenabstand
$\vec{E}$	– elektrische Feldstärke
E	– Energie
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	– Einheitsvektoren
f	– Frequenz
$\vec{H}, H$	– magnetische Feldstärke, Effektivwert
ΔH	– Halbwertsbreite der FMR
$\vec{H}_{zo}$	– mittlere magnetische Feldstärkekomponente in z-Richtung
$\vec{H}_o$	– statische Vormagnetisierungsfeldstärke
$\vec{H}_a$	– Anisotropiefeldstärke
I	– elektrischer Strom
$\vec{J}$	– Stromdichte
$\underline{k}$	– Wellenzahl, $\underline{k} = k' - j k''$
K_u	– Anisotropiekonstante, gesamt
$\vec{M}$	– Vektor der Magnetisierung
M_o	– Sättigungsmagnetisierung
m	– Masse
S	– Oberfläche
$\vec{S}$	– Spinvektor
$S_{11}, S_{12}, S_{22}, S_{21}$	– komplexe Streumatrixelemente
T	– Temperatur
t	– Zeit
U	– reelle Funktion
U	– Skalar (beliebig)
V	– Volumen
x	– Inversionsgrad
Z	– Flächenwiderstand
Z	– Impedanz
Z_o	– Feldwellenwiderstand der Luft

Griechische Buchstaben

α	– Dämpfungskonstante der Relaxation
d	– Eindringtiefe
γ	– Dämpfungskonstante elektromagnetisches Feld
γ_0	– Inversionskonstante
ε	– Permittivität
ε_0	– elektrische Feldkonstante
ε_r	– relative Permittivität
m	– Permeabilität
m_0	– magnetische Feldkonstante
m_r	– relative Permeabilität
κ	– elektrische Leitfähigkeit
χ	– magnetische Suszeptibilität
ρ	– Flächenladungsdichte
ω_0	– Eigenfrequenz der Rezessionsbewegung des Magnetisierungsvektors
γa	– Ausbreitungskonstante
τ	– Relaxationszeitkonstante
β	– Phasenkonstante
λ	– Wellenlänge
μB	– Bohrsches Magneton
γ_0	– Gyrotropiekonstante
ω_m	– Eigenfrequenz des Sättigungsmagnetisierungsvektors
Δ	– allgemeine Differenz
τ	– Relaxationszeitkonstante

Abkürzungen

AC	– Wechselstrom
CISPR	– Internationales Komitee für Radioelektronik
CRAM	– Currentless Radiation Absorption Material
DC	– Gleichstrom
EMC	– engl. EMV
EMI	– Elektromagnetische Emission
EMS	– Elektromagnetische Störfestigkeit
EMV	– Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	– Europäische Norm
ESD	– Elektrostatische Entladung
FFT	– Schnelle Fouriertransformation
FMR	– Ferromagnetische Resonanz
HCP	– horizontale Koppelplatte
HF	– Hochfrequenz
IEC	– Internationale Norm
MOM	– Momenten Matrix Methode
PFC	– Power Factor Correction
RAM	– Radiation Absorption Material
TLM	– Transmission Line Matrix Methode
UMTS	– Universal Mobile Telecommunication System
VDE	– Verein Deutscher Elektrotechniker

1 Einleitung

Dieses Buch wendet sich an Ingenieure, Naturwissenschaftler, Studenten, Forscher und praktische Fachleute. Die Elektromagnetische Verträglichkeit entwickelt sich seit den Anfängen in den 1950er bis 1960er Jahren infolge der Impulsprobleme in der Automatisierungstechnik/Steuerungstechnik.

Einen großen Aufschwung und ein Hoch erreichte die EMV mit dem Deutschen EMV-Gesetz (EMVG) im Jahr 1996. Seit dieser Zeit ist es der Industrie allgemein bekannt, dass Geräte in einer elektromagnetischen Umgebung störungsfrei und störsicher arbeiten müssen.

Entwickler verschiedener Industriezweige beschäftigen sich intensiv mit dem Entstören bzw. EMV-Härten von elektrischen Geräten/Anlagen. Das Verständnis der Kopplungen in einer Baugruppe/Gerät und das daraus folgende EMV-Phänomen wird an einfachen Schirmbeispielen unter Nutzung von HF-Materialien deutlich.

Dieses Buch soll in einer komprimierten Darstellung von Grundlagen der Materialien und der Lösungen der Anwendung dieser Spezialmaterialien zur Schirmung den Fachleuten ein Herangehen auf hohem wissenschaftlich-technischem Niveau an die Problematik der Störphänomene ermöglichen. Es sollen Anregungen gegeben werden, in welcher Art und Weise Materialien genutzt werden können, woraus sich die Möglichkeiten zur Entstörung ableiten lassen. Denn ein „Ideales Schirmmaterial als Lösung für alle Probleme“ gibt es nicht. Deshalb ist die Kenntnis der Wechselwirkung eines speziellen Materials mit den EMV-Feldern wichtig und im Buch hochaktuell dargestellt.

Es werden dem Leser an Beispielen die Wirkung der Materialien für die Schirmung erklärt und in Schirmregeln sehr konzentriert aufgezeigt.

Der Fachmann soll sich mit Hilfe der vorgestellten Beispiele mit den EMV-Phänomenen beschäftigen und über ein Eindringen in die Effekte selbst Lösungen zur speziellen Schirmung vorgeben können. Auf zu umfangreiche theoretische Erklärungen wird in diesem Buch verzichtet, jedoch werden die wichtigsten Grundlagen genannt.

1.1 EMV-Gesetz-Normung

Moderne Geräte zur Kommunikation, Navigation und Datenübertragung, wie zum Beispiel Handys, GPS-Empfänger usw., arbeiten im Frequenzbereich unterhalb 6 GHz. Der leitungsgebundene Signaltransport innerhalb der Geräte wird jedoch von der Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle begleitet, sodass die Belastung durch elektromagnetische Strahlung immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Die Geräte unterliegen somit den gesetzlichen Vorschriften zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Während mit dem „Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG)“ vom 18.9.1998 eine wichtige Richtlinie zur Kontrolle der Funktionstüchtigkeit von Geräten in Kraft gesetzt und dann bis 2001 mehrmals überarbeitet wurde, besteht ein

Bedarf zur Einhaltung und Kontrolle der Gewährleistung des Personenschutzes in elektromagnetischen Feldern (DIN VDE 0848 Teil 2).

Als europäische Normen stehen hier die EN 50081 (1+2) von 1992 und 1993 zur elektromagnetischen Verträglichkeit, Fachgrundnorm Störaussendung, sowie EN 50082 (1+2) von 1997 und 1995 elektromagnetische Verträglichkeit, Fachgrundnorm Störfestigkeit (das heißt Beeinflussbarkeit durch EMV), als Grundnormen fest.

Da die Zahl der elektrischen Geräte und insbesondere mobiler Telekommunikations-(Handys) und Navigationsgeräte ständig wächst und diese einer ständigen technischen Weiterentwicklung unterworfen sind, ist es erforderlich, diese betriebssicherer zu machen. Dies erfordert, um bestehende Frequenzen nicht zu beeinflussen, neue höhere Frequenzbereiche zu nutzen (derzeit nutzen die Handys 0,9 und 1,8 GHz, UMTS wird bei 2,4 GHz übertragen). Ein Ziel muss also eine optimale Schirmung von Geräten sein, die solche Strahlung aussenden (bis auf die Sendeanenne, die aber richtungsabhängig abstrahlt).

Die Nutzung dieser hohen Frequenzen wirft aber im Vergleich zu Geräten mit niedrigeren Frequenzen (< etwa 100 MHz, wobei es wohlgemerkt keine klare Grenze gibt) neue Probleme auf im Vergleich zu niedrigeren Frequenzbereichen:

- Die hohen Frequenzen bewirken in Metallgehäusen oder metallisierten Gehäusen wegen des so genannten Skineffektes (das heißt vereinfacht, die elektrische Leitung erfolgt nicht mehr über den gesamten Querschnitt der Metallschicht des Metalls, sondern konzentriert sich auf die Oberfläche) Mehrfachreflexionen.
- Darüber hinaus führt diese HF-Belastung zu einer Reduktion der Betriebssicherheit anderer elektronischer Komponenten, in die eine HF-Welle eingekoppelt werden kann.

A. Grundlagen

2 Volumenmaterialien

2.1 Einleitung

In der Forschung und Entwicklung von neuartigen HF-Materialien für die Gehäusetechnik und in der Werkstoffentwicklung ist man an der Beschreibung der vielfältigen resistiven, dielektrischen und magnetischen Materialeigenschaften interessiert [50]. Ziel dieses FuE-Projekts ist es, die EMV-Eigenschaften von Gehäusen zu verbessern. Es ist eine erhöhte Schirmdämpfung bei gleichzeitiger Glättung der Innenfeldstärkeresonanzen zu erreichen. Elektronik soll ohne innere Feldüberhöhung in Metallgehäusen sicher funktionieren. Dazu sind neue HF-Ferritmaterialien zu entwickeln. Der Schwerpunkt dieses Forschungsprojektes liegt auf der genauen Erarbeitung der Wechselwirkung von EMV-Störenergie mit dem Ferritmaterial, Aufbau eines HF-Ferritmaterials und Test der EMV-Eigenschaften der HF-Materialien bzw. der neuartigen Gehäuse.

Man unterteilt die HF-Materialien grob in RAM- (Resistive Radioabsorbing Material) und CRAM- (Currentless Radioabsorbing Material) Materialien [1]. Der Unterschied der CRAM- und RAM-Materialien liegt darin, dass die RAM von Strom durchflossen sind und die CRAM nicht. Die Unterteilung ist deutlicher in Bild 1 zu sehen.

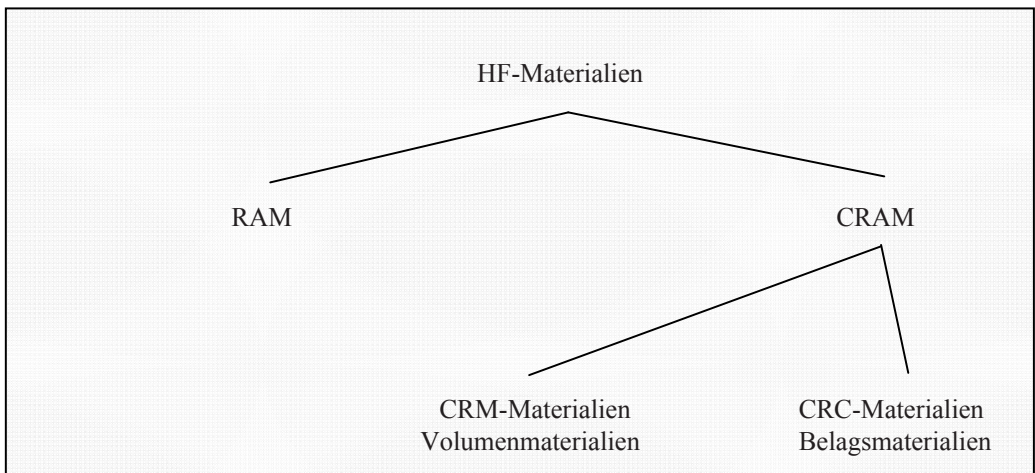


Bild 1: Grafik nach Mikhailowski [1] zur Einteilung der HF-Materialien

Unter den RAM-Materialien versteht man die leitfähigen HF-Materialien, unter den CRAM-Materialien die eingeschränkt leitfähigen Materialien.

Das Ferrit-Compound-Material ordnet sich also in das CRAM-Material speziell unter den CRM(Currentless Radiofrequency Material)-Materialien ein. Die Schichtdicken der Volumen-

materialien betragen ungefähr $> 100 \mu\text{m}$. Die noch zu diskutierenden ferrimagnetischen Schichten ordnen sich in die CRC- (Currentless Radiofrequency Coating) Materialien ein. Sie bilden als nicht bulk Material eine Sondergruppe.

Ein Unterschied zwischen den RAM- und den CRAM-Materialien liegt in der mathematischen Beschreibung. Die RAM-Materialien besitzen eine mathematisch kontinuierliche Raum-Zeit-Betrachtung. Es fließt Strom durch das Material, auch wenn die Leitfähigkeit frequenzabhängig ist. Schwierig zu betrachten sind die leitfähigen Schichten. Insbesondere die nanoskalinen leitfähigen Schichten. Einfacher sind die graphithaltigen Schaumstoffabsorber (Kegel bzw. Laminate) zu betrachten. Bei dieser Art der RAM-Materialien ist rein praktisch „nur“ auf eine Leitfähigkeitsbetrachtung zu achten.

Schwieriger sind die CRAM-Materialien, auch Spin-Materialien genannt, zu betrachten. Da eine diskrete mathematische Raum-Zeit Betrachtung erforderlich ist, kann man nicht mehr einfache kontinuierliche Modelle zu Hilfe ziehen [1]. Man muss die schwierigen Verhältnisse der diskreten Gittermodelle zum Beispiel der Ferritkristalle betrachten. Eine umfangreiche werkstoffphysikalische Betrachtung der CRAM-Materialien – wie im Kapitel 1.2 zu sehen – ist somit unumgänglich.

Hauptgegenstand der vorliegenden Arbeit ist somit die Beschreibung der Wechselbeziehung mikroskopische/makroskopische Werkstoffeigenschaft – HF-Verhalten. Rein kontinuierliche Betrachtungen wie bei den Graphit-Absorbern sind nicht hilfreich.

Ein Wort sei noch zum Unterschied zwischen ferrimagnetischen Volumenmaterialien (bulk) und den ferrimagnetischen Schichten gesagt. Die Betrachtung der ferrimagnetischen Schichten ist ein Beitrag zur Grundlagenforschung. Viele Artikel zu den ferrimagnetischen Schichten mit einer Schichtdicke $< 1 \mu\text{m}$ existieren nicht. Nach Perthel [2] gehen die Effekte der herkömmlichen Festkörperphysik (Verhältnisse der Spin – Kristallwechselwirkung) in die Effekte der statistischen Nahordnung (Spin – Spin Wechselwirkung der Schicht) über. Wir haben es mit der Spinwellenabsorption zu tun. Die Betrachtungen in dieser Arbeit können nur ein Anfang zur Charakterisierung der HF-Verhältnisse in dünnen ferrimagnetischen Schichten sein.

Hauptziel bei der Modellierung von ferrimagnetischen Volumen bzw. Schichtmaterialien ist der hohe HF-Verlust als $\mu'_{\text{rel}}(f)$ bzw. als Reflektionsfaktor $r(f)$, der sich in einem optimalen Messsignal für die HF-Visualisierung äußern soll. Die Betrachtungen beschränken sich auf einen Frequenzbereich von 30 MHz bis 1000 MHz. Im Ausblick (Kapitel 2.4) wird auf den Frequenzbereich $> 1000 \text{ MHz}$ eingegangen.

In der theoretischen Modellierung wurde das kontinuierliche Modell von Landau und Lifschitz (LL) zur Beschreibung der diskreten Verhältnisse im Volumenmaterial behandelt. In der Schichtmodellierung wurde das LL-Modell mit Dämpfungsterm angewandt.

Der neuartige wissenschaftliche Ansatz dieser Arbeit ist das Einsetzen von Werkstoffgrößen wie das magnetische Moment, die Korngröße, die Anisotropie in das theoretische Modell und die daraus folgende Analyse der HF-Verhältnisse im Material. Diese Herangehensweise wurde auch bei der extrem aufwendigen Schichtmodellierung verfolgt.

Wichtig für die Modellierung der Materialien ist der strukturelle Aufbau der Ferritmaterialien selbst. Ohne Kenntnis der Werkstoffeigenschaften der Ferrite ist das HF-Material nicht entwi-

ckelbar. Einfachere Wechselbeziehungen ohne tiefergehende Werkstoffbetrachtungen wie bei den Graphitabsorbern sind nicht nutzbar.

Ziel der Entwicklung eines sicheren passiven elektromagnetischen Schutzsystems zur Erreichung der elektromagnetischen „Immunität“ ist die Erhöhung der Schirmdämpfung und die Sicherstellung einer hohen Funktionssicherheit elektronischer Systeme.

Das Problem in den heutigen Metallgehäusen liegt in der sich stark verringernden Schirmdämpfung von Baugruppenträgern ab 500 MHz und in den vorhandenen inneren Reflektionen und Resonanzen von elektromagnetischer Strahlung bei Vorhandensein einer inneren elektromagnetischen Quelle. Wenn sich ein sensibles Bauelement/Baugruppe in einem Resonanzpunkt befindet, so kann es beeinflusst werden.

Der Lösungsansatz für ein solches Schutzsystem besteht darin, Materialverbundsysteme mit ausgeprägten HF-absorbierenden Eigenschaften zu entwickeln, die anstelle oder in Kombination mit bisher üblichen Metallisierungen oder Metallschirmungen, die den erheblichen Nachteil gehäuseinterner Reflektionen und Feldüberhöhungen haben, eingesetzt werden können.

Ihre Eigenschaft betreffend müssen diese Materialien schicht- und haftfähig auf metallischen und nichtmetallischen Untergründen sein, sie müssen hohe Permeabilität und hohe Dielektrizität aufweisen und kombinierbar oder einmischbar sein mit Kunststoffen, die für die Herstellung von Gehäusen verwendet werden.

Eine wirksame HF-Absorption bzw. Dämpfung muss bereits mit Schichtstärken unterhalb 1 mm (ideal $< 0,1$ mm) erreichbar sein.

Die neu zu entwickelnden Materialien sollen mit ihren besonderen elektrischen/magnetischen Eigenschaften in der Informationsgesellschaft des 21. Jahrhunderts die immer höheren Anforderungen an eine störunempfindliche Elektronik zu meistern helfen.

Ziel der Arbeit ist einen hohen Grad an Zuverlässigkeit in der informationsverarbeitenden Elektronik durch eine neue Art des Gehäuseaufbaus zu erreichen. Neue Materialien, welche besondere elektrische/magnetische HF-Eigenschaften haben sollen, besitzen die Aufgabe, das einfache Metallgehäuse der Informationselektronik durch einen Materialverbund abzulösen, der aus Metall/HF-absorbierendem dünnem Werkstoff oder einem Polymer-Absorber-Festgemisch besteht.

Somit leiten sich aus dem Ziel Werkstoffe mit besonderen, noch nicht vorhandenen Eigenschaften ab wie:

- hohe HF-Dämpfung
- hohe ϵ'' - und μ'' -Werte
- geringe Dicke
- besondere mechanische Werte: geringe Härte, bohrbar
- möglichst geringe Änderung der elektromagnetischen Eigenschaften bei Spannungsbeanspruchung
- Aggregatzustand: fest, flüssig, oder als Laminat auftragbar/klebbbar.

2.2 Mikroskopische und Makroskopische Eigenschaften von Spinellferriten

Die Kenntnis des Kristallaufbaus von Mikrowellenferriten ist von großer Bedeutung, da auch die Absorptionseffekte ihre Ursprünge in atomaren bzw. kristallinen Struktureigenschaften haben. Mit physikalischen Modellen, ausgehend von den Werkstoffgrundlagen, lassen sich die Aufnahmeeffekte von HF-Energie, die Umwandlungseffekte und die resultierenden Energieformen (Wandbewegung der Domänen, gequantelte Spinwellen, Relaxationseffekte, Resonanzeffekte, dynamische Drehbewegungen usw.) beschreiben.

Ferrite sind Materialien mit einem hohen resultierenden magnetischen Moment [5]. Dies äußert sich in dem Vorhandensein eines Differenzenmoments bzw. eines resultierenden Spins im Material [3]. Die ferrimagnetischen Materialien sind sehr vielfältig und in den verschiedensten Strukturen vorhanden. In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Ferritarten aufgeführt.

In diesem Kapitel soll der Aufbau der Ferrite möglichst einfach dargestellt werden. Die Ferrite sind in folgende Hauptgruppen eingeteilt:

- Spinelle
- Granate
- Magnetoplumbine
- Ferrite des Typs Y mit Hexagonalstruktur
- Ferrite des Typs W mit Hexagonalstruktur
- Orthoferrite

Tabelle 1: Anwendung und Eigenschaften der wichtigsten Ferritgruppen

Eigenschaft	Gruppe a	Gruppe b	Gruppe c	Gruppe d	Gruppe e	Gruppe f
Kristall	kubische Einheitszelle	kubisch kompliziert	hexagonale Einheitszelle	hexagonal symmetrisch	hexagonal, bestehend aus 3 Spinellstrukturen	Orthoferrite
Strukturtyp	2+ 3+ Me Me O x 3-x 4	2+ 3+ (Me) (Me) O 3 5 4	2+ 3+ (Me) (Me) O 1 12 19	Folge von T und S Spinellen	Folge von M, Y und S Spinellen	
Vertreter	Mangan Zink Ferrit NickelZink- Ferrit	Seltene Erden	Sr Ferrite	Ba Me Fe O 2 2 12 22	Ba Me Fe O 2 2 24 41	
Frequenz- bereich	1 Mhz– 1 GHZ	1,5–3,5 GHZ	1–25 GHZ	500 MHZ	> 1 GHZ	
Technische Anwendung	UKW, EMV	Nachrichten- technik	Mikrowel- lentechnik	Feldgesteu- ertes Bau- element	Mikro- wellenm.	keine tech- nische An- wendung

Die Beschreibung des genauen Aufbaus der genannten Ferrite würde das Thema dieser Arbeit mit Kenntnis der Grundzusammenhänge sprengen, deshalb werden nur die wichtigsten Eigenschaften in Tabelle 1 angegeben [4, 5]. Auf die für den interessanten Frequenzbereich wichtigste Gruppe, die Gruppe der Spinelle, wird stärker eingegangen.

Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit der Ferritgruppe der Spinelle. Zur besseren Einschätzung der Ferriteinkristalle und deren Eigenschaften seien folgende Betrachtungen zum NiZn-Ferrit aufgeführt.

Das in der teilweise inversen Spinellstruktur kristallisierende NiZn-Ferrit stellt sich in der folgenden Art und Weise dar. Eine vereinfachte Darstellung der Spinellstruktur [6] zeigt Bild 2.

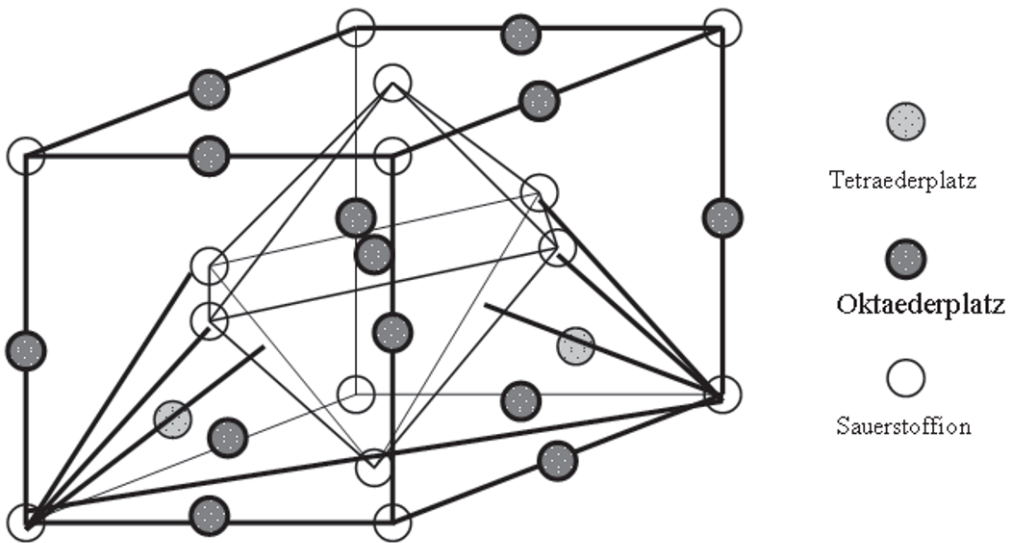
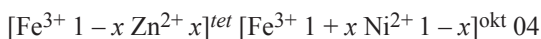


Bild 2: Vereinfachte Spinellstruktur nach Philippow

Spinelle der allgemeinen Formel A_2BO_4 bestehen aus einer kubisch dichtesten Kugelpackung der Sauerstoffatome [9], in der die Hälfte der oktaedrischen Lücken und $1/8$ der tetraedrischen Lücken mit den Metallatomen besetzt sind. Für den Fall, dass die tetraedrischen Lücken ausschließlich von den zweiwertigen A-Atomen besetzt sind, spricht man vom normalen Spinell. Besetzen die zweiwertigen A-Atome dagegen die oktaedrischen Lücken und die Hälfte der dreiwertigen B-Atome die tetraedrischen Lücken, so spricht man vom inversen Spinell. Für die technisch interessanten Ferrite liegen in der Regel jedoch intermediäre Spinelle mit Übergängen zwischen der normalen und der inversen Verteilung vor.

Für die hier interessierenden NiZn-Ferrite gilt folgende allgemeine chemische Formel:



Die aufgeführten Spinelleigenschaften gelten für das Einkristall. Die realen Verhältnisse im Vielkristall unterscheiden sich stark von den Werkstoffeigenschaften der Einkristalle. Auch die HF-Eigenschaften der Einkristalle unterscheiden sich von den Vielkristallen.

Beim Vergleich der mathematisch physikalischen Modelle [6, 13, 14] zum theoretischen Resonanzverhalten der Ferrite in Abhängigkeit von den verschiedenen Konstanten $K1$, $K2$, M , H_0 , τ , Mo , vom Winkel der Einstrahlung des HF-Feldes bei texturierten Ferriten [17] und von den experimentellen Ergebnissen der HF-Verluste von Polykristallen bzw. von Ferrit-Compositen [1, 2, 5] sind Widersprüche zu verzeichnen.

Widerspruch 1

Nach Kupizka [10] gibt es Unterschiede der theoretischen Absorption von $\chi''(H)$ zur praktischen Messung. Die theoretische Kurve $\chi''(H)$ weist stark überhöhte Peaks auf. Die gemessenen $\chi''(H)$ Kurven besitzen diese Spitzen nicht und sehen stark abgeflacht aus.

Widerspruch 2

Nach [4] kann ebenso festgestellt werden, dass die theoretischen Resonanzfrequenzen in realen polykristallinen Proben selten mit den theoretisch berechneten Größen übereinstimmen.

Die realen gesinterten Ferrite [11] sind nun als Polykristall gefertigt worden. Wie ist nun ein Polykristall eines Ferrites aufgebaut?

Nach Blumenauer [12] ist eine polykristalline Probe wie folgt aufgebaut:

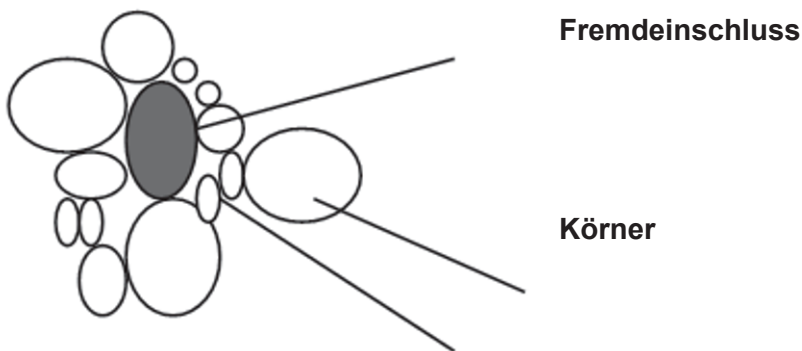


Bild 3: Aufbau eines Polykristalls ohne vorhandene Textur

In realen Kristallen sind Fremdeinschlüsse bzw. bei nicht ausreichenden Sintertemperaturen ($T < 1200\text{ °C}$) ebenso Fremdphasen vorhanden. Alle Körner sind bei nicht texturierten Proben regellos verteilt und mit unterschiedlichen Korngrößen (minimale Größe bis zu 10 nm [11]) im Polykristall angeordnet.

Die allgemeine Literatur [8] geht nicht von einer Teilchengröße, sondern von einer Teilchengrößenverteilung aus, in der eine Teilchengröße den höchsten Anteil hat. Die Korngröße und Korngrößenverteilung wird im nächsten Kapitel näher behandelt.

In Bild 4 ist die Schliffdarstellung eines MnZn-Ferrit-Polykristalls zu sehen.

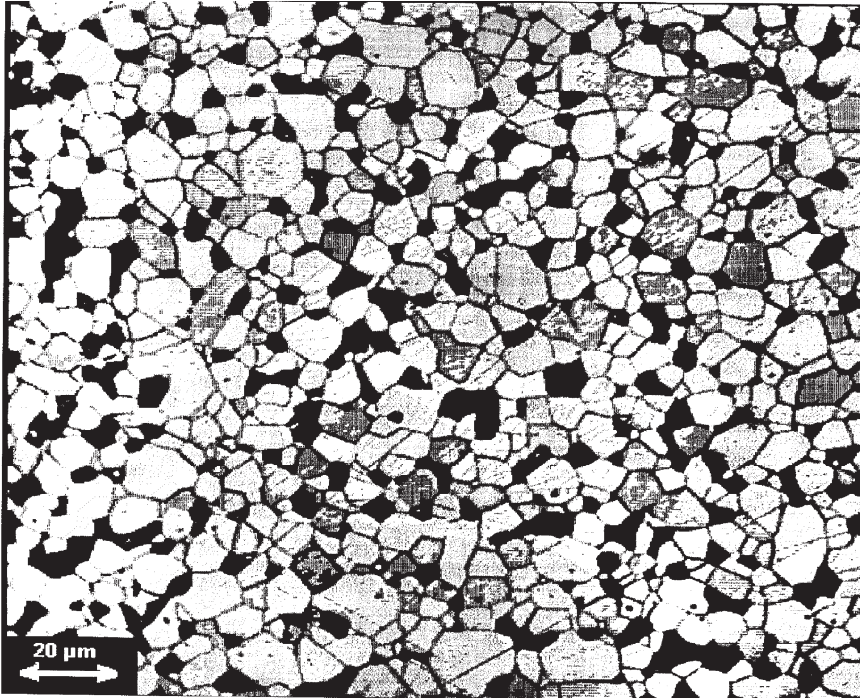


Bild 4: Gefüge MnZn-Ferrit (Quelle: HITK Hermsdorf)

Nun sollen mit Hilfe der Eigenschaften des polykristallinen Ferrites die Widersprüche diskutiert werden.

Zu den Widersprüchen:

Die gestellte Frage ist nun nach Betrachtung einer Beispielorientierung der Körner in einem Polykristall zu beantworten. Die Gesamtverlustpermeabilität je Frequenz im Polykristall ist ein Mittelwert aller Teilpermeabilitäten μ_i'' der Kristallite.

Die Verluste aller verschieden orientierten und verschieden verteilt großen Körner und die damit verbundenen auch verschiedenen Resonanzverlustcharakteristika sind zu superpositionieren.

Es wurde veranschaulicht, dass eine Summe von Teilpermeabilitäten wirkt, die im Mittelwert keine so eindeutige Resonanzkurve ergibt wie in den Verhältnissen des Einkristalls bzw. wie in den bisherigen theoretischen Betrachtungen vermutet wurde.

Die Mittelwertkurve dieser Summe der Teilverluste der einzelnen als „Ferriteinkristalle“ aufgefassten Körner im Polykristall ergibt gegenüber einer „ferrite single crystal“ Verlustkurve bzw. gegenüber der theoretischen Vorbetrachtung zwei Aussagen:

- Verbreiterung des Resonanzcharakters der Permeabilität (Ursache ist die Mittelung der Absorptionspeaks)
- Verschiebung der Resonanzfrequenz

Wenn zusätzlich zu den erklärten Mechanismen der Mittelung der Teilverlustprozesse mit dem Ergebnis einer Verbreiterung der Resonanzkurve noch eine magnetische Ausdünnung in einem Polymer-Ferrit-Werkstoff hinzukommt, so ist kaum ein Resonanzverhalten in einer mit der Frequenz linear steigenden Permeabilitätskurve zu vermuten. Vorhanden ist jedoch auch im Polykristall die Resonanzeigenschaft der Verluste.

In einem Polykristall sind die dipolaren Wechselwirkungen der Kristallite zu beachten, ebenso sind im Volumen die Löcher, Poren [11] und Risse in Erwägung zu ziehen. Es kommt in realen Materialien zur Verschiebung des Resonanzfeldes H_i . Das innere Resonanzfeld wird normal aus den Größen K_1 (Anisotropiekonstante 1. Ordnung) und M berechnet. Nun kommen noch V (Volumen der Gesamtprobe) und v (Volumen der Poren) hinzu.

Da auf die Größe des inneren Feldes reale Materialgrößen Einfluss haben, ist zu schlussfolgern, dass über die Gyrotropiekonstante γ und in Verbindung mit der „normalen“ Resonanzfeldstärke H_{res} die Verschiebung der Resonanzfrequenz nach Okamura berechnet werden kann. Somit konnten über den Aufbau des Vielkristalls die Widersprüche 1 und 2 diskutiert werden.

Ausgehend von den Diskussionen zum Aufbau von Polykristallen sollen die mittlere komplexe Permeabilitätskomponente $\mu''(H)$ Polyk in Polykristallen angestellt werden. Aufbauend auf die Verhältnisse im Polykristall [12] wird die Gaußverteilung [8, 18] der Orientierung der Körner [16] angenommen.

$$\mu''_{Polyk.}(H) = \frac{1}{0,08\pi} \sum_{i=0}^{\infty} \mu''(H) K_{ERF} \quad (1)$$

K_{ERF} – Wahrscheinlichkeitskonstante

$\mu''(H)$ – mittlere komplexe Permeabilität jedes Kornes i
i Average

Schlussfolgernd ist zum HF-Verlust im Polykristall zu sagen, dass die Wahrscheinlichkeit der Körnerausrichtungen und der Mittelwert aller Kornverluste eine wichtige Rolle bei den Gesamtverlusten spielen.

Neben der Betrachtung des realen Falles Polykristall ist die Analyse einer möglichen Textur [30] wichtig. Bei Ba-Ferriten und Co_2Z besitzen die texturierten Materialien gegenüber den nichttexturierten Materialien die höheren komplexen Permeabilitätsverluste μ'' [9, 10].

Dieser Fakt, der für gesinterte Ferrite, aber auch für Ferritverbundmaterialien gilt, soll auch für Ferrit Compounds bzw. für Ferrit-Compound-Folien untersucht werden.