Frank Gräbner

EMV-gerechte Schirmung

Magnetmaterialien für die Schirmung – Praxisbeispiele – Gerätedesign

3. Auflage

Springer Vieweg

EMV-gerechte Schirmung

Frank Gräbner

EMV-gerechte Schirmung

Magnetmaterialien für die Schirmung – Praxisbeispiele – Gerätedesign

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Springer Vieweg

Frank Gräbner
Nordhausen, Deutschland

ISBN 978-3-658-10722-2 ISBN 978-3-658-10723-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-10723-9

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, 2016
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.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur dritten Auflage

Die aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der EMV und der Schirmung mittels magnetischer Materialien sind der Hauptgrund für die 3. Auflage dieses Buches. Einerseits ist die EMV Normenwelt in einem Umbruch. Das heißt, dass immer mehr Normen die höheren Quellfrequenzen beachten und die Frequenzobergrenze über 3 GHz schieben. Im Gegensatz zu diesen technischen Gegebenheiten und den vorhandenen (diesen neuen Frequenzbereichen nicht entsprechenden) Ferrit-Entstörmaterialien sind kaum neuen EMV-Magnetmaterialien auf dem Markt vorhanden. Neue EMV-Ferrite der hexagonalen Kristallsysteme tragen diesen neuen Anforderungen Rechnung. Im Kapitel „EMV Zukunftsferrite – hexagonale Volumenmaterialien“ werden diese hexagonalen Materialien vorgestellt,

Auch sind weitere Schirmregeln im Anhang des Buches aufgeführt.

Wie in der 1. und 2. Auflage des Buches hat das Lektorat Technik des Springer Vieweg Verlags – vertreten durch Frau Broßler und Herrn Dapper – und das Designbüro Fromm – vertreten durch Frau Fromm – die Entwicklung dieses Buches sehr stark geprägt und den Autor bei der Ausarbeitung sehr unterstützt. Dafür sei herzlich gedankt.

Nordhausen/Harz im Oktober 2015

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 dargestellte 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.

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.

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

$\vec{A}$, A	Vektor, Effektivwert
$\underline{A}$	insbesondere Fläche
$\overleftarrow{A}$	Tensor
a	Gitterkonstante
$\vec{B}$, B	magnetische Flussdichte, Effektivwert
c	Lichtgeschwindigkeit
$\vec{D}$	elektrische Flussdichte
D	Teilchengröße, Kristallit
d_i	Dicke des Materials
d	Eindringtiefe
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
$\vec{H}_{z0}$	mittlere magnetische Feldstärkekomponente in z-Richtung
$\vec{H}_0$	statische Vormagnetisierungsfeldstärke
$\vec{H}_\mathrm{a}$	Anisotropiefeldstärke
I	elektrischer Strom
$\vec{J}$	Stromdichte
$\vec{k}$	Wellenzahl, $\underline{k} = k' - \mathrm{j}k''$
K_u	Anisotropiekonstante, gesamt
m	Masse

$\vec{M}$	Vektor der Magnetisierung
$\vec{M}_0$	Sättigungsmagnetisierung
M_0	magnetische Feldkonstante
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_0	Feldwellenwiderstand der Luft

Griechische Buchstaben

α	Dämpfungskonstante der Relaxation
β	Phasenkonstante
γ	Dämpfungskonstante elektromagnetisches Feld
γ_0	Gyrotropiekonstante
γ_0	Inversionskonstante
γ_a	Ausbreitungskonstante
Δ	allgemeine Differenz
ε	Permittivität
ε_0	elektrische Feldkonstante
ε_r	relative Permittivität
μ	Permeabilität
μ_r	relative Permeabilität
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	Wellenlänge
μ_B	Bohrsches Magneton
ρ	Flächenladungsdichte
τ	Relaxationszeitkonstante
χ	magnetische Suszeptibilität
ω_0	Eigenfrequenz der Rezessionsbewegung des Magnetisierungsvektors
ω_m	Eigenfrequenz des Sättigungsmagnetisierungsvektors

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

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 EMV-Gesetz-Normung 2

Teil I Grundlagen

2 Volumenmaterialien 5
2.1 Einleitung 5
2.2 Mikroskopische und Makroskopische Eigenschaften von Spinellferriten 8
2.3 Modelle der klassischen Feldtheorie (Maxwell) im Vergleich zur Landau-Lifschitz-Theorie 14
2.3.1 Klassische Feldtheorie nach Maxwell 14
2.4 Betrachtungen zu HF-Verlusten in Ferrit Compounds und Ferritschichten 16
2.4.1 FMR-Inversionsgrad in Ferritvolumenmaterialien 16
2.4.2 Fehlerdiskussion 20
2.5 Dielektrische Messungen an Magnetmaterialien 24
2.5.1 Auswahl des Messverfahrens 24
2.5.2 Resonator-Messverfahren 24
2.5.3 Beschreibung des Messplatzes 24
2.5.4 Durchführung der Messung 26
2.6 Relaxation in Ferritvolumenmaterialien 27
2.6.1 Spinelle besitzen ebenso Mechanismen zur Relaxation 28
2.6.2 Experimentelle Betrachtungen 29
2.7 Textur in Ferritvolumenmaterialien 29
2.7.1 Erzeugung einer Textur 31
2.7.2 Theoretische Betrachtungen zum Zusammenhang zwischen Textur und HF-Verlust 32
2.8 Füllgrad von Ferrit in Volumenmaterial 33

2.9 Feldanpassung des Volumenmaterials 35
2.9.1 Schelkunov Formel 37
2.9.2 Fehlerbetrachtung der Messanordnung 37
2.9.3 Zusammenfassung 38
2.10 Das Spinellsystem NiZn-Ferrit 40
2.10.1 Werkstoffanalysen von Ferritcompounds 40
2.10.2 Korngrößenverteilung, Änderung der Korngröße 42
2.10.3 Modellierungsziel der Schichtsynthese 43
2.10.4 Art der Spinwellenmodi in Abhängigkeit von der Schichtdicke 43
2.10.5 Zusammenfassung 46

3 Nanomaterialien 47
3.1 Schichtanalyse, Anisotropiekonstante und Korngröße von ferrimagnetischen Schichten 47
3.2 Spinwellenverluste in Ferritschichten 49
3.2.1 Spinwellenanregung 52
3.3 Einfluss der Anisotropiekonstanten auf den HF-Verlust der NiZn-Ferritschicht 53
3.3.1 Theoretische Betrachtungen zum Spinwellenverlust 53
3.3.2 Experimentelle Betrachtungen zum Spinwellenverlust 56
3.4 Schichtanalyse, Anisotropiekonstante und Korngröße von ferrimagnetischen Schichten 56
3.4.1 Absorptionsdämpfung der ferritischen Schicht 56
3.5 Wirbelstromeffekte in metallischen Magnetfilmen: Snoeklimit für Schichtsysteme/Einzelschichten 58
3.5.1 Schelkunoff-Gleichung 62
3.6 Höchstfrequenzdämpfungsversuche, HF-Materialbewertung 63
3.7 Relaxationseffekte von Magnetmaterialien im kHz-Bereich 66
3.7.1 Blochwandrelaxationen 66
3.7.2 Blochwandwirbelstromrelaxationen – kHz-Effekte 66
3.8 NF-Verluste 68
3.8.1 Materialanalyse 68
3.9 Abscheidung von ultradünnen Hematitschichten 70
3.10 Magnetspektroskopische Analyse 71
3.10.1 Analyse der Probeschichten 72
3.10.2 Spinwellenspektrumcharakterisierungsdefinitionen 73
3.11 Hohlleitermessplatz 75
3.11.1 Ergebnisse 75
3.12 Röntgendiffraktometrische Analyse 76
3.13 RF-Analyse bis 20.000 MHz 76
3.14 Verhältnis der Granülengröße zur Schichtdicke einer Fe-Nanoschicht 76
3.15 Mehrfachschichtsysteme 83

3.16 Kittelfrequenz . . . 83
3.17 Wolmannfrequenz . . . 86
3.18 Snoekfrequenz . . . 86
3.19 Radareffekte . . . 87
3.20 Magnetische Nanopartikel . . . 88
3.20.1 Theoretische Betrachtungen . . . 90
3.20.2 Experimentelle Betrachtungen . . . 92

Teil II Praxisbeispiele

4 Schirmung mittels Nanomaterialien . . . 97
4.1 Messung der komplexen Permeabilität von Nanoschichten mit einem Permeameter . . . 98
4.1.1 Permeabilitätsmessungen . . . 100

5 NF-Schirmung . . . 101

6 Doppelschirm . . . 103
6.1 Doppelschirm . . . 104

7 Polymergehäuse . . . 105
7.1 Bisherige Materialergebnisse . . . 109
7.2 Gehäuseergebnisse . . . 111
7.3 Zusammenfassung . . . 111

8 Schirmbeispiel: Innenauskleidung eines 2,4-GHz-Low-Noise-Verstärker-Gehäuses zur Unterdrückung höherer Moden . . . 113

9 Metallgehäuse mit Magnetmaterialien . . . 117
9.1 Dämpfung der Hohlraumresonanzen mit Hilfe absorbierender Magnetlaminate . . . 121
9.2 Hohlraumresonanzen . . . 122
9.3 Beschichtete Gehäuse . . . 123
9.4 Absorbierendes Material als Einschub . . . 125
9.5 Ferrithaltige Dickschichten für neue EMV-Metallgehäuse . . . 126
9.5.1 Schlickerschichten . . . 127
9.5.2 Schlickerschichten mit leitfähiger Beschichtung . . . 127
9.5.3 Schichten aus ferrithaltiger Spachtelmasse . . . 128
9.6 Ferritvolumengehäuse . . . 129
9.6.1 Ferritvolumengehäuse für neue EMV-feste Kfz-Sensorgehäuse 129
9.6.2 Prinzip der vergleichenden Schirmdämpfungsmessung . . . 133
9.7 Ergebnisse der Schirmdämpfungsmessungen . . . 135

10 Leiterplattenschirmung 143
10.1 Technischer Aufbau der Teststrukturen/neuartigen EMV-Höchstleiterplatten 143
10.2 Elektromagnetische Störaussendung (EMV) mit alter und neuartiger Leiterplatte 143
10.3 Auswertung 151
10.4 Zusammenfassung 151
10.4.1 Experimentelle Ergebnisse und Applikationen 157

11 Schirmdämpfung an Schichten für Leitungen 159
11.1 Messung mit Stripline 159
11.2 Anwendung: Flachbandkabel 161
11.3 Zusammenfassung 162

12 Textilschirmmaterial 165
12.1 Zusammenfassung/Ausblick 167

13 Schirmdämpfung eines Drahtgeflechtes 169

Teil III Neuartige Zukunftsferrite – hexagonale Volumenmaterialien

14 Grundproblem der heutigen EMV-Ferrit-Entstörmaterialien 173
14.1 Einleitung 175
14.2 Theoretische Betrachtungen 176
14.3 Experimentelle Untersuchung 177
14.4 Zusammenfassung neuartige Hexaferrite der Zukunft 180

15 Anhang: Formelwerk Schirmung 181
15.1 Grundgesetz der elektromagnetischen Schirmung nach Schelkunov . . 181
15.2 Schirmung gegen magnetostatische Felder 181
15.3 Schirmung gegen elektrostatische Felder 182
15.4 Schirmung gegen quasistatische Magnetfelder 182
15.5 Schirmung gegen magnetische Wechselfelder (Skineffekt) 183
15.6 Erweitertes Schirmungsgesetz nach Schwab 183
15.7 Absorptionsdämpfung 183
15.8 Multiple Reflektionsdämpfung 184
15.9 Schirmungdämpfung in Abhängigkeit von der Oberflächenleitfähigkeit 184
15.10 Erweitertes Schirmdämpfungsgesetz nach Perumalraj und Dasaradan [58] unter Beachtung realer Aperturen von Drahtaufbauten realer Schirme mit Löchern 184
15.11 Schirmdämpfung von Löchern und Aperturen 186
15.12 Nahfeldreflektionsdämpfung R an einer ebenen Platte 186

15.13 Schirmdämpfungsgesetz unter Beachtung des Wellenleitereffektes und Aperturen nach Tee Tang [61], Nahfelder, Fernfelder 187
15.14 Cut-off-Frequenz von Länge und Tiefe von Rechteckstrukturen (wellenleiterähnlich) 188
15.15 Eckeneffekt 189
15.16 Transiente Schirmdämpfung 189
15.17 Schirmregeln 190

Literatur 193

Sachverzeichnis 197

Einleitung

1

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.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

F. Gräbner, *EMV-gerechte Schirmung*, DOI 10.1007/978-3-658-10723-9_1

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 Sendeantenne, 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) Mehrfachreflektionen.
- Darüber hinaus führt diese HF-Belastung zu einer Reduktion der Betriebssicherheit anderer elektronischer Komponenten, in die eine HF-Welle eingekoppelt werden kann.

Teil I
Grundlagen

Volumenmaterialien

2

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 [43]. 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 Abb. 2.1 zu sehen.

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 Volumenmaterialien betragen ungefähr $> 100\,\mu m$. 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

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

F. Gräbner, *EMV-gerechte Schirmung*, DOI 10.1007/978-3-658-10723-9_2

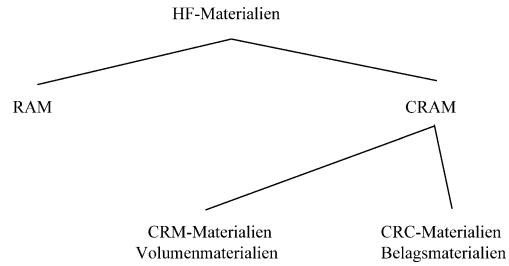

Abb. 2.1 Grafik nach Mikhailowski zur Einteilung der HF-Materialien. (Quelle: [1])

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 Abschn. 2.2 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 $< 1\,\mu m$ existieren nicht. Nach Perthel in [2] gehen die Effekte der herkömmlichen Festkörperphysik (Verhältnisse der Spin-Kristall-Wechselwirkung) 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 $\mu''_{\mathrm{rel}}(f)$ 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 bis 1000 MHz. Im Ausblick (Abschn. 2.4) wird auf den Frequenzbereich > 1000 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 aufwändigen 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 entwickelbar. 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/klebbar.