

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.

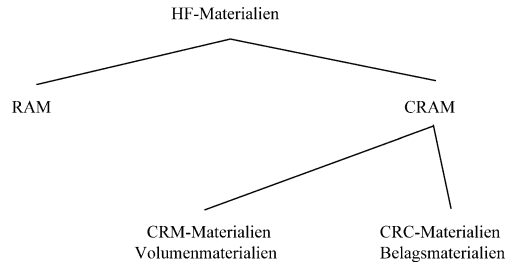
Man unterteilt die HF-Materialien grob in RAM (Resistive Radioabsorbing Material)- und CRAM (Currentless Radioabsorbing Material)-Materialien [1]. Der Unterschied der CRAM- und RAM-Materialien liegt darin, dass die RAM von Strom durchflossen sind und die CRAM nicht. Die Unterteilung ist deutlicher in 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 $> 100 \mu\text{m}$. Die noch zu diskutierenden ferromagnetischen 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

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



Schaumstoffabsorber (Kegel bzw. Lamine) 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 $< 1 \mu\text{m}$ existieren nicht. Nach Pethel 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 $\mu''_{\text{rel}}(f)$ 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 bis 1000 MHz. Im Ausblick (Abschn. 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 aufwändigen Schichtmodellierung verfolgt.

Wichtig für die Modellierung der Materialien ist der strukturelle Aufbau der Ferritmaterien 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 verringernenden 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.

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 Tab. 2.1 sind die wichtigsten Ferritarten aufgeführt.

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

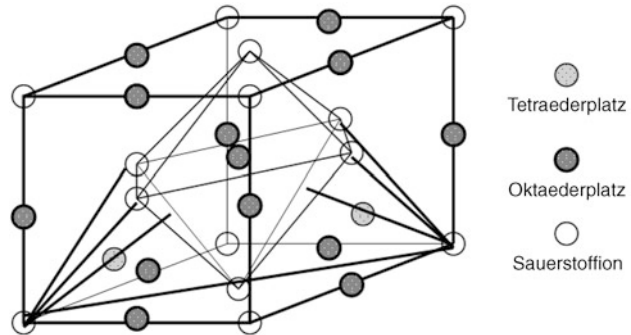
- Spinelle
- Granate
- Magnetoplumbine
- Ferrite des Typs Y mit Hexagonalstruktur
- Ferrite des Typs W mit Hexagonalstruktur
- Orthoferrite

Die Beschreibung des genauen Aufbaus der genannten Ferrite würde das Thema dieser Arbeit mit Kenntnis der Grundzusammenhänge sprengen, deshalb werden nur die

Tab. 2.1 Anwendung und Eigenschaften der wichtigsten Ferritgruppen

Kristall	Strukturtyp	Vertreter	Frequenzbereich	Technische Anwendung
Kubische Einheitszelle	$\text{Me}_x^{2+} \text{Me}_{3-x}^{3+} \text{O}_4$	Mangan, Zink, Ferrit Nickel, Zink, Ferrit	1 MHz–1 GHz	UKW, EMV
Kubisch kompliziert	$(\text{Me})_3^{2+} (\text{Me})_5^{3+} \text{O}_4$	Seltene Erden	1,5–3,5 GHz	Nachrichtentechnik
Hexagonale Einheitszelle	$(\text{Me})_1^{2+} (\text{Me})_{12}^{3+} \text{O}_{19}$	Sr Ferrite	1–25 GHz	Mikrowellentechnik
Hexagonal symmetrisch	Folge von T und S, Spinellen	$\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$	500 MHz	Feldgesteuertes Bauelement
Hexagonal, bestehend aus 3 Spinellstrukturen	Folge von M, Y und S, Spinellen	$\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$	> 1 GHz	Mikrowellenm.
Orthoferrite				Keine technische Anwendung

Abb. 2.2 Vereinfachte Spinellstruktur nach Philippow



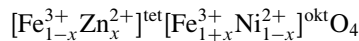
wichtigsten Eigenschaften in Tab. 2.1 angegeben [4, 5]. Auf die für den interessanten Frequenzbereich wichtigste Gruppe, die Gruppe der Spinelle, wird stärker eingegangen.

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 Abb. 2.2.

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.

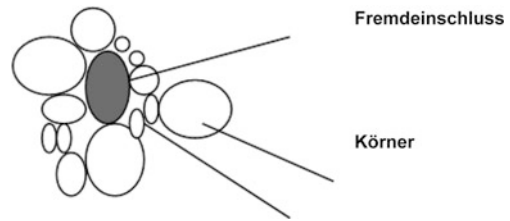
Für die hier interessierenden NiZn-Ferrite gilt folgende allgemeine chemische Formel:



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 K_1 , K_2 , M , H_0 , τ , M_0 , vom Winkel der Einstrahlung des HF-Feldes bei texturierten Ferriten [16] und von den experimentellen Ergebnissen der HF-Verluste von Polykristallen bzw. von Ferrit-Compositen [1, 2, 5] sind Widersprüche zu verzeichnen.

Abb. 2.3 Aufbau eines Polykristalls ohne vorhandene Textur



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 in Abb. 2.3 dargestellt aufgebaut.

In realen Kristallen sind Fremdeinschlüsse bzw. bei nicht ausreichenden Sintertemperaturen ($T < 1200^\circ\text{C}$) 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 Abb. 2.4 ist die Schlifffdarstellung eines MnZn-Ferrit-Polykristalls zu sehen.

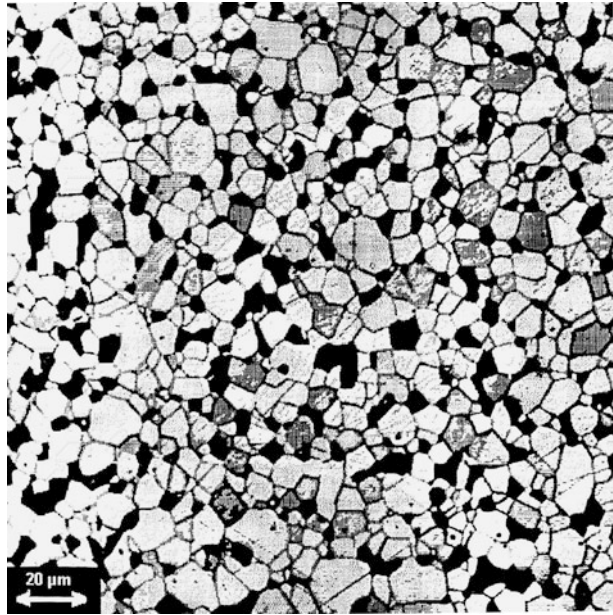
Nun sollen mit Hilfe der Eigenschaften des polykristallinen Ferrites die Widersprüche diskutiert werden.

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.

Abb. 2.4 Gefüge MnZn-Ferrit. (Quelle: HITK Hermsdorf)



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 „nor-

malen“ 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 $\mu''_{\text{Polyk}}(H)$ in Polykristallen angestellt werden. Aufbauend auf die Verhältnisse im Polykristall [12] wird die Gaußverteilung [8, 18] der Orientierung der Körner [16] angenommen.

$$\mu''_{\text{Polyk}}(H) = \frac{1}{0,08\pi} \sum_{i=0}^{\infty} \mu''(H) K_{\text{ERF}} \quad (2.1)$$

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 [29] 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.

Die Erklärung der Zusammenhänge zwischen Resonanzabsorption und Texturercheinungen [10] folgt in Kap. 2 und Abschn. 2.7.

Die realen Verhältnisse im Vielkristall unterscheiden sich stark von den Werkstoffeigenschaften der Einkristalle. Auch die HF-Eigenschaften der Einkristalle unterscheiden sich somit von den Vielkristallen.

Basierend auf den im letzten Kapitel beschriebenen mikroskopischen und makroskopischen Werkstoffeigenschaften sind die im nächsten Kapitel aufgeführten HF-Wechselwirkungen zu erklären.

Die Ferrite sind stark magnetisch. Es sollen nun, basierend auf den Werkstoffeigenschaften, die HF-Verluste näher betrachtet werden.

Die Kenntnis des Kristallaufbaus von Mikrowellenferriten ist von großer Bedeutung, da auch die Absorptionseffekte ihre Ursprünge in atomaren, molekularen und kristallinen Struktureigenschaften haben.

Mittels der mikroskopischen und makroskopischen Werkstoffgrößen

M Magnetisierung resultierend aus den Untergitterplätzen der Anionen der Untergitter der verschiedenen Ferritkristalle (Granat, Spinell, ..., hexagonale Strukturen)

γ Inversionsgrad, Änderung der Gitterplätze

d	mittlere Korngröße
a	Gitterabstand
P_s	Korngrößenverteilung und Orientierung
T	Relaxationszeitkonstante
K_1	Anisotropiekonstante
K	Texturkonstante
...	

ist ein Einfluss auf den HF-Verlust nach dem folgenden Magnetdynamikmodell im folgenden Kapitel zu nehmen.

Die HF-Wechselwirkungen in ferritischen Volumenmaterialien sind sehr vielfältig. In diesem Kapitel werden die Theorien der Verlustarten der Domänen (Relaxation, Resonanz) und die Pinningverluste nicht betrachtet.

Wir gehen ideal von einem Eindomänenverhalten aus. Ebenso werden die mechanischen Effekte wie die Wandlung der piezomagnetischen Erscheinung in den elastischen Stress nicht weiter diskutiert.

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) beschreiben. Nach Kenntnis der physikalischen Modelle werden messbare Parametergleichungen aufgestellt, die eine allgemeine Beschreibung der Phänomene zulassen.

Basierend auf diesen makroskopischen Gleichungen ist nun im Idealfall ein Begriff wie die Absorption zu erklären. In unserem Fall ist die HF-Absorption als Gesamtphänomen bisher nicht zu beschreiben, was mit der Vielzahl der verschiedenen Prozesse zu begründen ist. Auch eine Beschreibung der eindeutigen Ursachen (zum Beispiel Niederfeldverluste) ist in der Literatur oft nicht angegeben. Diese Arbeit soll eine Hilfe bei der Suche nach dem Universalbegriff Absorption sein.

Unter Beachtung der Absorption sind thermodynamische Probleme bei Mikrowellen-Ferrit-Polymeren zu diskutieren. Dies ist ein neuer Anwendungsfall der Ferritstoffe. Eine erste Darstellung der Energieumwandlung von HF-Energie im Volumenferrit soll die vereinfachte Tab. 2.2 erklären.

Ebenso sind die HF-Wechselwirkungen in Schichten/Schichtsystemen repräsentativ zu betrachten: In Tab. 2.2 ist zu sehen, dass viele Effekte eine Rolle im Volumenmaterial des HF-Ferrites spielen. Einige Effekte werden in dieser Arbeit einzeln theoretisch und experimentell betrachtet. Leider vermischen sich die Effekte und gehen im Frequenzbereich fließend ineinander über. Es ist kaum möglich, mit nur einer Werkstoffgrößenänderung nur einen HF-Effekt zu beeinflussen. Es sind nur die wichtigsten Spinwellenverlustarten genannt.

Ziel der Betrachtungen muss es aber sein, die Wirksamkeit der Beeinflussung der einzelnen mikroskopischen und makroskopischen Werkstoffeigenschaften auf den Gesamtverlust, der sich in Tab. 2.2 aus den gesamten Teilverlusten zusammensetzt, einzuschätzen.

Tab. 2.2 Verschiedene Verlustarten nach den Frequenzbereichen geordnet

HF-Effekt im Ferrit	Frequenzbereich
Bloch-Wandverluste	< 1000 Hz
NF-Relaxationsverluste	rund 1 kHz
NFMR	MHz-Bereich bis GHz
Natürliche Spinwellen	MHz-Bereich bis GHz
Spinwellen	ab 800 MHz
FMR	GHz
Spinwellen Relax.	GHz
Austauschverlust	100 GHz

2.3 Modelle der klassischen Feldtheorie (Maxwell) im Vergleich zur Landau-Lifschitz-Theorie

Magnetische Materialien für die Höchstfrequenztechnik und Mikrowellentechnik sind seit vielen Jahren theoretisch und experimentell betrachtet worden. Die berühmten russischen Physiker Landau und Lifschitz haben 1932 die Theorie der Ferromagnetischen Resonanz erarbeitet.

Der berühmte Physiker Kittel hat in den USA in den 1960er Jahren die Kittelsche Resonanzfrequenz von magnetisierten Materialien vorhergesagt. Der klassische Feldtheoretiker Maxwell kann ebenso zu zeitlich dynamischen Aussagen der Feldausbreitung in isotropen/nichtisotropen Materialien zitiert werden. Nicht zuletzt wird auch dem bekannten Physiker Michael Faraday der ambivalente Satz nachgesagt: „Jedes Material ist magnetisch, es kommt nur darauf an, wie stark.“

2.3.1 Klassische Feldtheorie nach Maxwell

Im folgenden Kapitel sollen Aussagen zum Resonanzverhalten einer magnetisch leitfähigen Eisenschicht (Fe) mittels der klassischen Maxwelltheorie dargelegt werden [83].

Es gelten die allgemeinen maxwellschen Gleichungen in Differentialform. Vereinbarung:

- Die Größen E, B, H, D, k und r seien vektorielle und komplexe Größen.
- Die Materialgrößen seien linear, homogen und isotrop.
- Das Material sei Fe.

$$\Delta E = \mu\kappa(\partial E/\partial t) + \mu\varepsilon(\partial^2 E/\partial t^2) \tag{2.2}$$

$$\Delta H = \mu\kappa(\partial H/\partial t) + \mu\varepsilon(\partial^2 H/\partial t^2) \tag{2.3}$$

$$E = E_0 e^{j(\omega t - kr)} \tag{2.4}$$

$$H = H_0 e^{j(\omega t - kr)} \tag{2.5}$$

$$(2.2) + (2.3) + (2.4) + (2.5): \quad \mu\varepsilon\omega^2 - \mu\kappa j\omega - k^2 = 0$$

EMV-gerechte Schirmung

Magnetmaterialien für die Schirmung - Praxisbeispiele -
Gerätedesign

Gräbner, F.

2016, XIX, 200 S. 167 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-10722-2