

Wirkung neuartiger Kabelferrite niedriger Permeabilität im Frequenzbereich bis 8 GHz

Dipl.-Ing. Steffen Schulze¹, Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid², Prof. Dr.-Ing. Marco Leone²

¹ Würth Elektronik eiSos GmbH, Waldenburg, Deutschland

² Institut für Medizintechnik, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland

1 Einleitung

Für die kabelgebundene Filterung von Störsignalen kommen Ferrithülsen und Ferritringe in unterschiedlichen Geometrien zum Einsatz. Störsignale können schmalbandige Oberwellen von systeminternen Taktfrequenzen oder das breitbandige Spektrum steiler Flanken von Wide-Bandgap-Halbleiterschaltern sein. Die verwendeten ferro- bzw. ferrimagnetischen Materialien beschränken sich derzeit auf gesinterte Spinell-Ferrite auf Basis von Eisenoxid mit Anteilen von Nickel, Mangan, Magnesium oder Zink, sowie auf amorphe und nanokristalline Materialien auf Basis von Eisen. Eine weitere bekannte Struktur von Ferriten ist die mit hexagonalem Gitter. Aufgrund der starken Anisotropie und der kleinen Atomabstände ist die ferromagnetische Resonanzfrequenz von hexagonalen Ferriten üblicherweise sehr hoch. Die maximal erzielbare Anfangspermeabilität im Frequenzbereich von wenigen Kilohertz ist umso kleiner, je höher die ferromagnetische Resonanzfrequenz ist [1].

Die Wirkung polykristalliner hexagonaler Ferrite als Entstörmaterial im EMV-relevanten Frequenzbereich bis 8 GHz wird im vorliegenden Beitrag anhand eines generischen Prüflings untersucht und mit einem Standard-Ferritmaterial verglichen.

2 Testmuster und Materialparameter

Untersucht wurden jeweils zwei Muster aus dem Standard-Ferritmaterial mit der Zusammensetzung NiZnFe₂O₄ (NiZn) und aus der Materialkategorie hexagonale Ferrite (X-Hex). Die Zusammensetzung der hexagonalen Ferrite entspricht der Form XFe₁₂O₁₉, wobei X für ein Erdalkalimetall aus der II. Hauptgruppe des PSE steht. Die für die Testmuster verwendeten Erdalkalimetalle sind Strontium und Barium.

| Nr. | Material | Größe in mm $D_a \times D_i \times \ell_{fe}$ | $\mu_{r,i}$ @ 1 MHz | $\epsilon_{r,i}$ @ 1 MHz |
|-----|----------|--|------------------------|-----------------------------|
| 1 | NiZn 1 | 30,6×18,7×12 | 17,2 | 4,8 |
| 2 | NiZn 2 | 30,9×18,6×12 | 12,2 | 3,2 |
| 3 | Ba-Hex | 31,1×18,7×12,2 | 11,3 | 3,8 |
| 4 | Sr-Hex | 31,1×18,8×12,1 | 6,5 | 6 |

Tabelle 1: Geometrische und elektrische Parameter der untersuchten Ringkerne

In Tabelle 1 sind jeweils die geometrischen Parameter (Innen- bzw. Außendurchmesser D_i , D_a und Länge ℓ_{fe}) als auch die relative Permeabilität $\mu_{r,i}$ und Permittivität $\epsilon_{r,i}$ der vier Ferritmaterialien bei der Messfrequenz von 1 MHz angegeben. Alle Werte liegen in der gleichen Größenordnung. Die primären Materialparameter weisen jedoch eine Frequenzabhängigkeit auf. Dieser Aspekt kommt in der Darstellung als komplexe Permeabilität und Permittivität zum Ausdruck. Am genauesten lässt sich die Abhängigkeit mit Hilfe eines Netzwerkanalysators und einer Luftleitung, dessen Impedanz der Referenzimpedanz des Netzwerkanalysators entspricht, ermitteln. In die

Luftleitung wird ein passender Ringkern des zu untersuchenden Materials eingefügt (Abb. 1). Die gemessenen Streuparameter werden dann mit Hilfe des Nicolson-Ross-Weir-(NRW) Algorithmus [2] in die komplexe Permeabilität und Permittivität umgerechnet. Die untersuchten Materialien wurden im Frequenzbereich von 1 MHz bis 10 GHz in einer koaxialen 50 Ω -Luftleitung (Länge: 50 mm) vermessen.



Abb. 1: Koaxiale 50 Ω -Luftleitung mit eingefügter Ringkernprobe

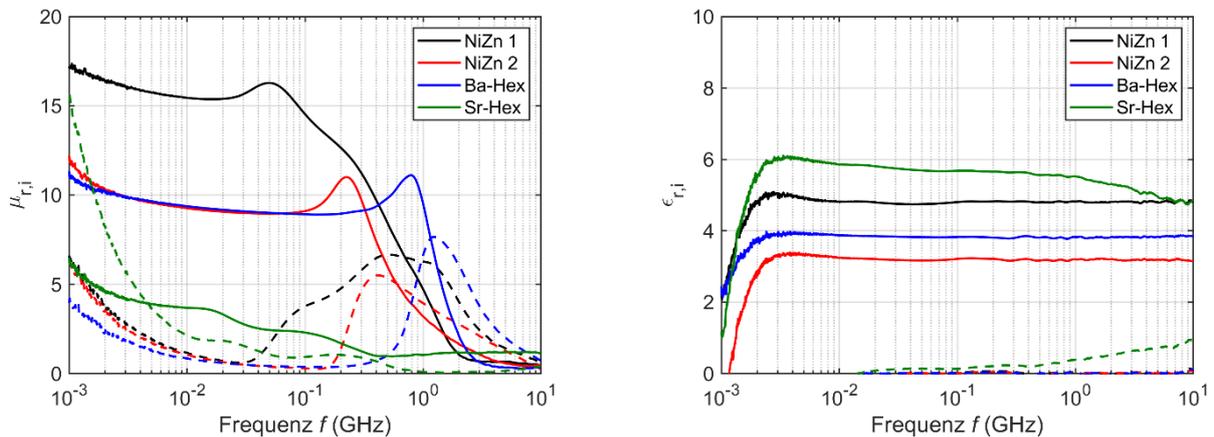


Abb. 2: Komplexe Permeabilität (links) und Permittivität (rechts) im Frequenzbereich 1 MHz bis 10 GHz (— Realteil, ---- Imaginärteil)

Abb. 2 zeigt die gemessenen Verläufe der komplexen Materialparameter. Bei den beiden NiZn-Mischungen wie auch bei dem Barium-Hexaferrit (Ba-Hex) ist im Realteil der Permeabilität der Übergangsbereich mit der Resonanzspitze klar zu erkennen, bis zu dem der Wert annähernd konstant bleibt. Beim Strontium-Hexaferrit (Sr-Hex), welcher die kleinste Anfangspermeabilität aufweist, ist der Übergangsbereich nicht ausgeprägt. Ab ca. 2 GHz ist das Verhalten der vier Mischungen nahezu identisch. Man erwartet ab dieser Frequenz für die Ringkerne eine gleichmäßige Wirkung als Filter zur Störunterdrückung auf einem Kabel. Die gemessenen Verläufe weichen in Richtung der unteren Frequenzgrenze deutlich vom theoretischen Verhalten ab. Dies ist insbesondere am Imaginärteil der Permeabilität zu erkennen. Er kennzeichnet die Verluste im Material und ist im statischen Fall Null. Die Abweichung der Messwerte ist im NRW-Algorithmus [2] begründet, wenn mit kurzen Probekörperlängen gearbeitet wird, die die Luftleitung nur zum Teil ausfüllen. Der Phasenwinkel der Streuparameter und damit die für den Algorithmus benötigte Gruppenlaufzeit können dann nicht genau bestimmt werden.

Der Realteil der Permittivität ist über den betrachteten Frequenzbereich nahezu konstant; mit Ausnahme der beschriebenen Ungenauigkeit unterhalb von 3 MHz. Der Imaginärteil ist für alle verwendeten Mischungen sehr klein. Dies ist gleichbedeutend mit einer sehr geringen elektrischen Leitfähigkeit und damit sehr geringen Wirbelstromverlusten. Die Hauptverlustmechanismen sind demnach Relaxationsprozesse im Kristallgitter sowie Blochwandresonanzen. Spinresonanzen treten erst oberhalb des hier untersuchten Frequenzbereiches auf [3].

3 Wirkung der Ferritringe an einem generischen Prüfling

Für die Untersuchung der Wirksamkeit der Ferritringe zur Störunterdrückung wurde der gleiche generische Prüfling verwendet wie in [4]. Er ist in Abb. 3 dargestellt. Die Ferritringe wurden für die einzelnen Messungen der abgestrahlten elektrischen Feldstärke an 3 Positionen entlang des 1 m langen Drahtes angebracht: 0 cm, 10 cm, 50 cm. Die Position $x = 0$ cm ist direkt am Ausgang des Signalgenerators, welcher unabhängig von der Frequenz mit einer Leistung von 10 dBm den Draht speiste.

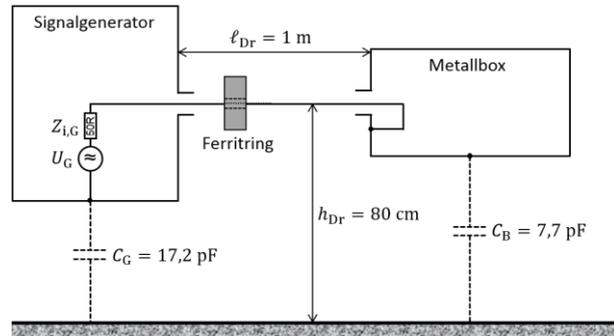
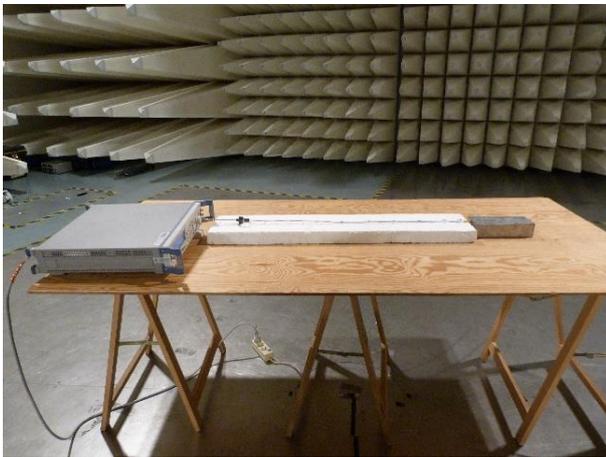


Abb. 3: Aufbau des generischen Prüflings, bestehend aus einem HF-Generator, einem Metallgehäuse und einem Verbindungsdraht mit 1 m Länge

Die elektrische Feldstärke wurde im Abstand von 3 m für zwei sich überlappende Frequenzbereiche aufgezeichnet. Dabei blieb die Ausrichtung des Prüflings zur Antenne unverändert. Er wurde nicht gedreht. Für den Frequenzbereich 30 MHz...3 GHz wurde ohne Bodenabsorber gemessen und die Messantenne in 30 cm Schritten von 1 m bis 4 m für beide Polarisierungen verfahren (siehe Abb. 4 links). Anschließend wurde das Maximum der Feldstärke bei jeder Frequenz und aus beiden Polarisierungen ermittelt. Für den Frequenzbereich 1 GHz...8 GHz kamen Bodenabsorber zum Einsatz und die Messantenne wurde in 1 m Höhe fixiert. Damit war bei dieser Messreihe der systematische Fehler am kleinsten. Die axiale Toleranz der manuell positionierten Ferritringe kann mit ± 2 mm angenommen werden. Für die genaue Zentrierung auf dem Draht kam eine Kunststoffhülse zum Einsatz, auf die der Ferritring geschoben wurde.

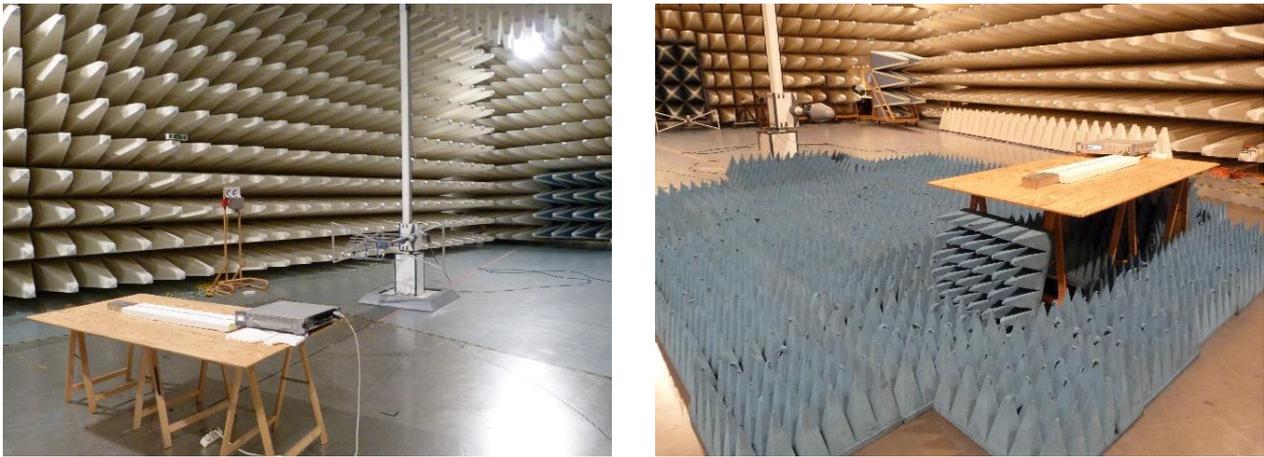


Abb. 4: Messaufbau für den Frequenzbereich 30 MHz bis 3 GHz (links) und 1 GHz bis 8 GHz (rechts)

Als Referenz wurde jeweils das abgestrahlte Feld des Prüflings ohne Ferritring aufgezeichnet. Durch Differenzbildung der Feldstärkepegel mit und ohne Ferrit ergibt sich ein Dämpfungswert $A = (L_{E,Ref} - L_{E,Fe})$ in Dezibel. Wie Abb. 5 zeigt, gibt es eine unterschiedliche Wirkung der vier Ferritmischungen nur in den Resonanzbereichen. Die Dämpfungswerte schwanken im Maximum von -12 dB bis $+8,5$ dB.

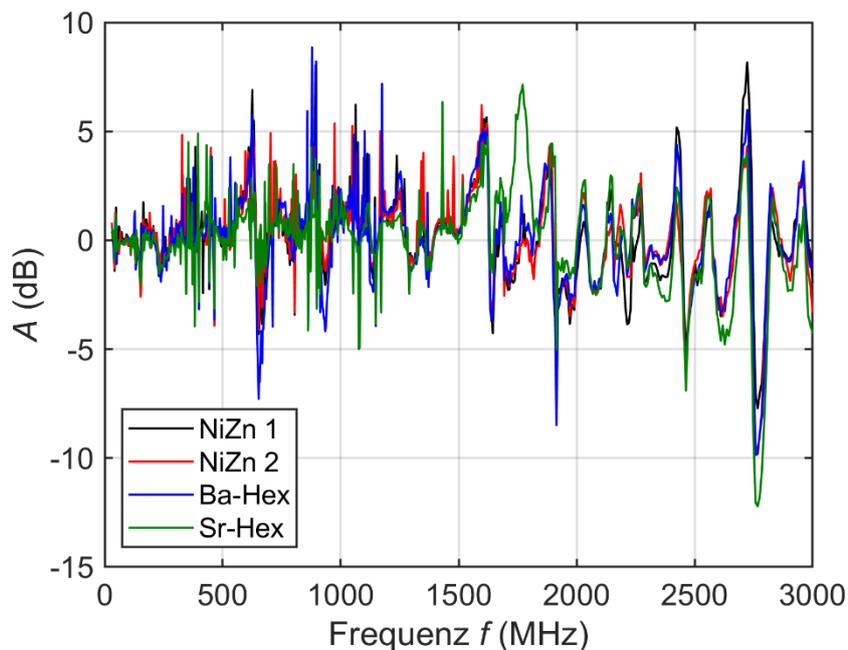


Abb. 5: Vergleich der gemessenen Dämpfungswerte (gestrahlte Emission) für den Frequenzbereich 30 MHz bis 3 GHz und eine Ferritposition von 10 cm

Schaut man sich für den Sr-Hex-Ferrit die Abhängigkeit von der Ferritposition an (Abb. 6), fällt auf, dass breitbandig betrachtet die Wirkung am besten ist, wenn sich der Ferrit in der Mitte des Drahtes befindet. Die Verstärkung des abgestrahlten Feldes in den Resonanzbereichen fällt geringer aus als in den anderen beiden Positionen.

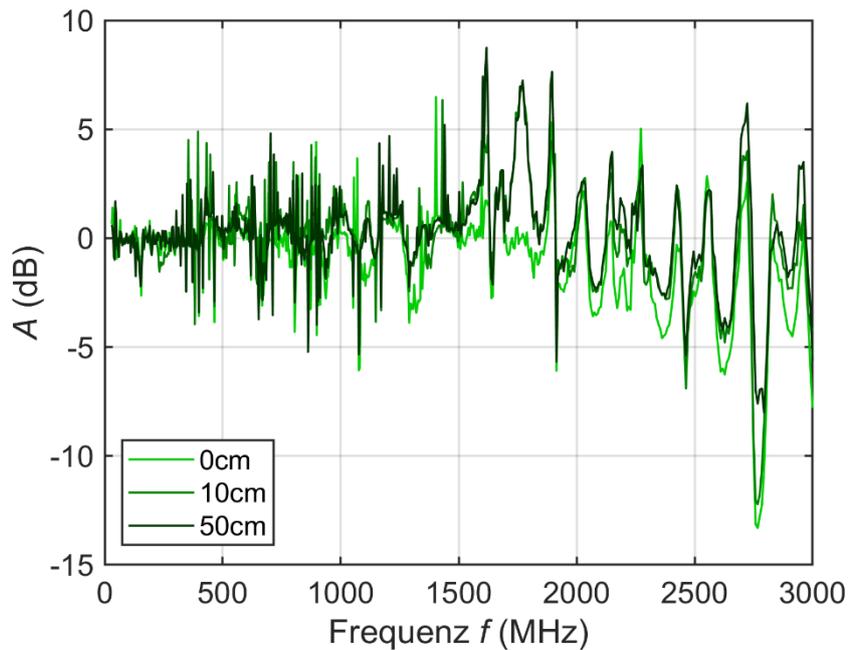


Abb. 6: Vergleich der Dämpfungswerte vom Strontium-Hexaferrit für den Frequenzbereich 30 MHz bis 3 GHz und variable Ferritposition

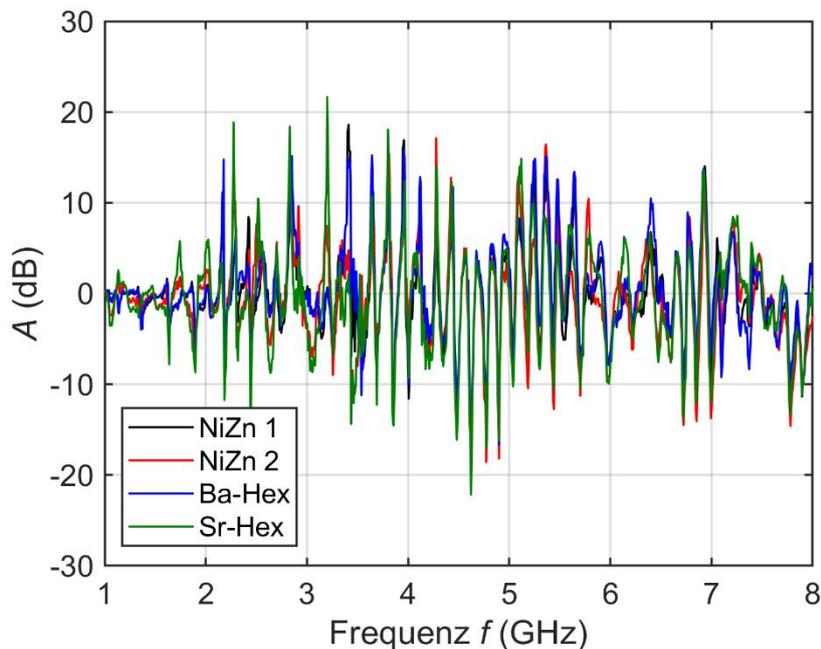


Abb. 7: Vergleich der Dämpfungswerte für den Frequenzbereich 1 GHz bis 8 GHz und eine Ferritposition von 10 cm

Wie schon bei Betrachtung der Materialparameter vermutet, ist die Wirkung der Ferritmischungen oberhalb von 2 GHz kaum noch unterscheidbar, was man auch gut am Dämpfungsverlauf in Abb. 7 sieht. Ein identisches Bild ergibt sich für die beiden anderen getesteten Positionen entlang der Leitung. Aufgrund der Verschiebung der Leitungsresonanzen, wenn ein induktiv wirkendes Bauteil zur Störunterdrückung verwendet wird, und der Differenzbildung der Feldstärkepegel ergibt sich ein Dämpfungsverlauf mit schmalen Spitzen in positiver wie negativer Richtung. Die maximale Dämpfung beträgt 21,7 dB bei 3,2 GHz und die maximale Verstärkung 22,2 dB bei 4,6 GHz, jeweils für den Strontium-Hexaferrit. Eine Verringerung der aus

Sicht der EMV kritischen Verstärkung von Störsignalen über einen weiten Frequenzbereich ist nur möglich, wenn viele Kabelferrite in geringem Abstand entlang der Leitung angeordnet werden. Es wurde bei vergangenen Untersuchungen auch schon festgestellt, dass die Filterwirkung umso höher ausfällt, je länger die einzelne Ferrithülse ist. Außerdem sollte der Innendurchmesser der Hülse dem Durchmesser des Kabels angepasst sein. Die hier verwendeten Ringkerne haben einen Innendurchmesser von ca. 19 mm und der Draht ist 1 mm dick. Dieses Verhältnis ist nicht optimal, aber es war von höherer Priorität, identische Geometrien von verschiedenen Materialmischungen zu vergleichen.

4 Theoretische Betrachtung

In [4] wurde die Leitungstheorie angewandt, um die Stromverteilung entlang eines horizontal über einer Massefläche angeordneten Drahtes, auf dem ein Kabelferrit platziert ist, zu beschreiben. Die kapazitiven Abschlussimpedanzen auf beiden Seiten wurden mit einbezogen (siehe Abb. 3). Da für die hier betrachteten Ferritmischungen neben der Permeabilität auch die Permittivität bekannt ist, kann das Ersatzschaltbild der Ferritringe genauer angegeben werden. Neben den Serienelementen Widerstands- und Induktivitätsbelag (R'_{fe}, L'_{fe}) sind nun auch die Querelemente Leitwerts- und Kapazitätsbelag (G'_{fe}, C'_{fe}) frequenzabhängig definiert. Man kann einen Ringkern wie eine Toroidspule mit nur einer Windung ($N = 1$) betrachten. Der Durchmesser des Wicklungsdrahtes entspricht dabei dem Innendurchmesser D_i des Ringkerns. Der Eigeninduktivitätsbelag einer Toroidspule mit rechteckigem Querschnitt berechnet sich zu [5]

$$L'_{tor} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right). \quad (1)$$

Darin kann man $K_{fe} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right)$ als Geometriefaktor des Kerns definieren. Die gleiche Beziehung findet man für den Induktivitätsbelag eines Koaxialkabels ohne Dielektrikum. Multipliziert man den Impedanzbelag der Toroidspule $Z'_{toroid} = j\omega L'_{toroid}$ mit der komplexen relativen Permeabilität $\underline{\mu}_r = \mu'_r - j\mu''_r$ und trennt nach Real- und Imaginärteil, ergeben sich der Induktivitäts- und Widerstandsbelag der Toroidspule mit Ferritkern:

$$L'_{fe} = \mu_0 \cdot \mu'_r \cdot K_{fe} \quad (2)$$

$$R'_{fe} = \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu''_r \cdot K_{fe} \quad (3)$$

In ähnlicher Weise kann man den Kapazitätsbelag ermitteln. Für zwei konzentrische Zylinder gilt [6]:

$$C'_{zyl} = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right)\right]^{-1} \quad (4)$$

Die Multiplikation mit der komplexen relativen Permittivität $\underline{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ und Trennung nach Real- und Imaginärteil führt auf den Kapazitäts- und Leitwertsbelag mit Dielektrikum:

$$C'_{fe} = \epsilon_0 \cdot \epsilon'_r \cdot K_{fe}^{-1} \quad (5)$$

$$G'_{fe} = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon''_r \cdot K_{fe}^{-1} \quad (6)$$

Um die Ersatzelemente zu erhalten, werden die Beläge mit der Länge ℓ_{fe} der Ferrithülse multipliziert. Die Stromverteilung entlang des Drahtes bei $f = 3,2$ GHz, bei einer Speiseleistung von 10 mW und einer Ferritposition (Strontium-Hexaferrit) von $x = 10$ cm ist in Abb. 8 dargestellt. Die Maximalamplitude beträgt ohne Ferrit 5,2 mA. Mit Ferrit liegt

sie bei 10,9 mA direkt vor dem Ferrit. Im Abschnitt zwischen Generator und Ferrithülse wird der Strom verstärkt und im Abschnitt zwischen Ferrithülse und Lastkapazität wird er in den Maxima bis auf 1,5 mA gedämpft. Man kann nun für jede Frequenz f und jede Position x das Verhältnis der Stromamplituden mit und ohne Ferrit berechnen:

$$A_i(x, f) = 20 \cdot \log \left| \frac{i_{\text{Ref}}(x, f)}{i_{\text{Ferrit}}(x, f)} \right| \text{ dB} \quad (7)$$

Dieser Dämpfungsfaktor für den Strom ist auch ein Maß für die Dämpfung des abgestrahlten Feldes, da die Feldamplitude proportional zur Stromamplitude ist. Der horizontale Draht kann vereinfacht als mittig gespeister Dipol angesehen werden. Trägt man den Dämpfungsfaktor über der Frequenz für die Position $x = 0,5 \text{ m}$ auf, entsteht der Verlauf in Abb. 9. Es sind gut die schmalbandigen Resonanzbereiche erkennbar; die Anzahl der Resonanzen pro Frequenzband entspricht der der Messung (vgl. Abb. 7). Insgesamt überwiegt in der theoretischen Betrachtung ein Dämpfungseffekt bis maximal 48 dB.

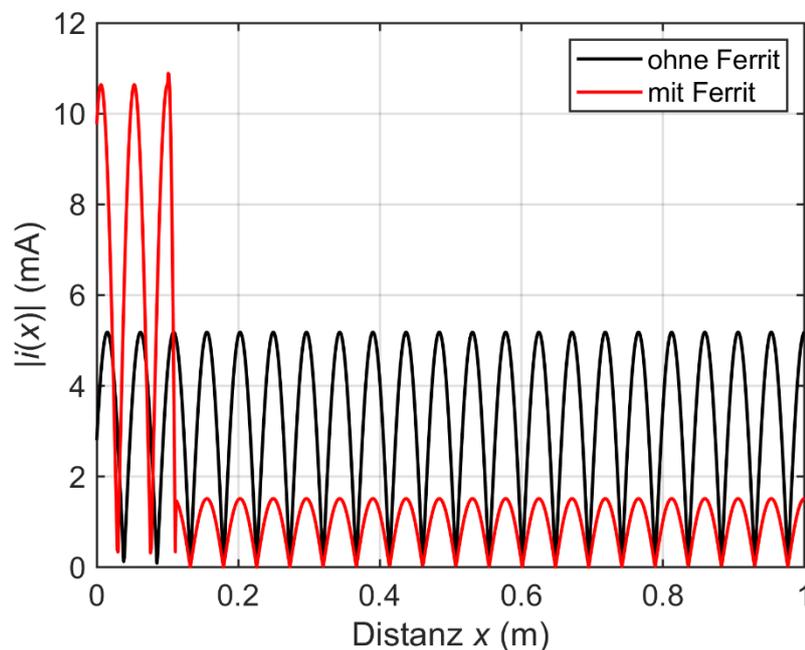


Abb. 8: Betrag der Stromstärke entlang des Drahtes für eine Frequenz von 3,2 GHz

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde die Wirkung von Ferritringen mit hexagonaler Kristallstruktur mit herkömmlichen Nickel-Zink-Ferriten gleicher Geometrie und ähnlicher Permeabilität verglichen. Dabei wurde der Frequenzbereich von 30 MHz bis 8 GHz betrachtet, in dem sich Störsignale, die sich entlang von Kabeln ausbreiten, befinden können. Dazu gehören z. B. Funkfrequenzen und deren Oberwellen oder das Spektrum steiler Schaltflanken in Wide-Bandgap-Halbleitern. Wird nur ein einzelner Ferrit auf der Leitung angebracht, wird die Stromverteilung aufgrund zusätzlicher Reflexionen am Filterelement so verändert, dass in bestimmten Frequenzbereichen die maximale Stromamplitude abgeschwächt und in anderen Frequenzbereichen verstärkt wird. Die Lage und Breite dieser Frequenzbereiche hängt von der Leitungslänge, den Abschlussimpedanzen und der Position des Kabelferrites ab. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die Wirkung der hexagonalen Ferritmischungen nicht von der Standardmischung mit kubischer Kristallstruktur unterscheidet, wenn die Kerngeometrie

identisch ist und die Materialparameter Permeabilität und Permittivität ein ähnliches Frequenzverhalten aufweisen.

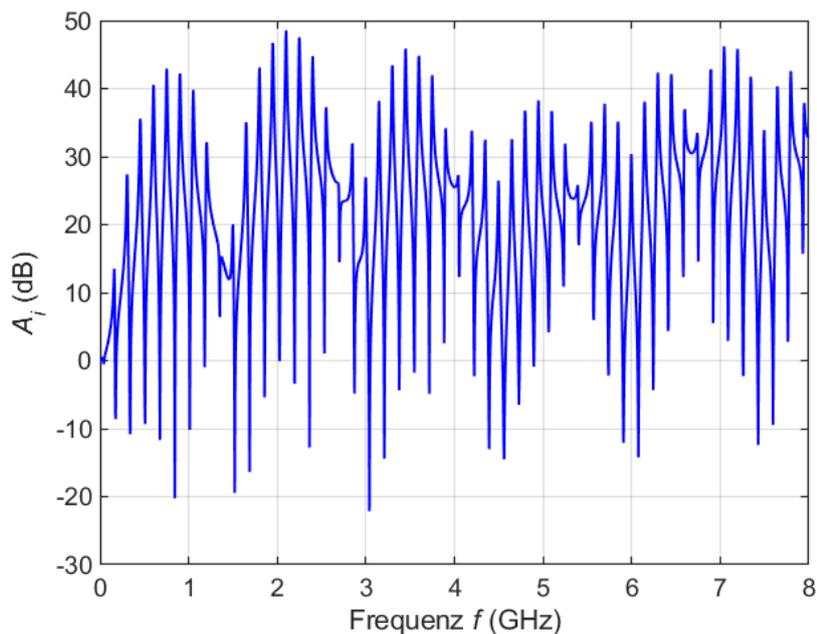


Abb. 9: Dämpfungsfaktor des Stromes in der Mitte des Drahtes ($x = 0,5$ m)

6 Literatur

- [1] J. L. Snoek, „Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above one Mc/s“, *Physica* 14, Mai 1948, S. 207-217
- [2] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, B. F. Riddle et al., „Measuring the permeability and permittivity of lossy materials: solids, liquids, metals, building materials and negative-index materials“, NIST Technical Note 1536, Februar 2005
- [3] P. Q. Peñaranda, „Synthese, Charakterisierung und Applikation von Ti-substituierten Hexaferriten“, Dissertation, TU Ilmenau, Januar 2019, S. 14
- [4] S. Schulze, M. Al-Hamid, M. Leone, „Improved transmission-line model for a cable with an attached suppression ferrite“, In: *Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Amsterdam, 27.-30. August 2018, S. 828-832
- [5] E. B. Rosa, „The self-inductance of a toroidal coil of rectangular section“, *Bulletin of the Bureau of Standards*, Washington, August 1907, S. 143
- [6] D. C. Giancoli, „Physik“, Pearson Education, München, 2006, S. 824