

Untersuchung des Effektes von Ferritkernen auf Kabelstrukturen

Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid¹, Dipl.-Ing. Steffen Schulze², Prof. Dr.-Ing. Marco Leone¹

¹ Institut für Medizintechnik, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland

² Würth Elektronik eiSos GmbH, Waldenburg, Deutschland

1 Einleitung

Der in [1] vorgestellte Ansatz zur Charakterisierung von Ferritkernen bildete eine grundlegende Neuerung auf dem Gebiet der messtechnischen Bestimmung der elektrischen Parameter dieser Bauteile. Die patentierte Methode verwendet einen geschlossenen koaxialen TEM-Leiter, der Abstrahlung verhindert [3]. Es werden die elektrischen Parameter wie Dämpfungskoeffizient oder Impedanz so ermittelt, dass sie unabhängig von der im späteren Einsatz tatsächlich vorliegenden Kabelgeometrie sind. Dies ist mit der herkömmlichen Methode mit einer am Ende kurzgeschlossenen Drahtschleife nicht möglich. In [2] wurde die neue Messmethode auf verschiedene Ferritkerngeometrien angewendet und außerdem die Wirkung dieser Bauteile, speziell im Frequenzbereich oberhalb von 1GHz, messtechnisch untersucht.

In diesem Beitrag wird eine gegenüber der derzeitigen, auf einer Drahtschleife basierenden, Messmethode konstruktiv verbesserte Anordnung vorgestellt. Sie erlaubt eine höhere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Weiterhin wird untersucht, wie sich ein Kabelferrit auf die Stromverteilung entlang einer analytisch beschreibbaren Übertragungsleitung auswirkt. Dabei werden die nach der in [1] beschriebenen Methode ermittelten Ferritparameter mit einem analytischen Ansatz nach [5] kombiniert.

2 Alternativer Messadapter

In Abb. 1 links ist der derzeit von vielen Herstellern von Kabelferriten verwendete Messaufbau dargestellt. Ein flexibler Draht wird durch die Ferrithülse geführt und am Ende nach Masse kurzgeschlossen. Auch wenn der Draht – der Bauteilgeometrie angepasst – so kurz wie möglich ist, ist die Wiederholgenauigkeit der Messung wegen des flexiblen Drahtes gering. Deshalb wurde ein konstruktiv verbesserter Messadapter konzipiert und aufgebaut. Er ist in Abb. 1 rechts zu sehen, einmal leer und einmal mit aufgesteckter Ferrithülse. Er besteht im Wesentlichen aus drei Teilen, die aus Kupfer gefertigt sind. Die 15x7cm² Kupferplatte bildet den Rückleiter, der mit zwei SMA-Flanschadaptern verbunden ist. Damit lässt sich eine 2-Tor-Messung mit dem Netzwerkanalysator oder eine 1-Tor-Messung mit unterschiedlichen Abschlussimpedanzen realisieren. Der Innenleiter mit einem Durchmesser von 4mm besteht aus zwei Teilen, die sich zusammen mit der Grundplatte zum finalen Adapter zusammenstecken lassen. Dadurch wird es möglich, einen Ferrit mittig zu platzieren, wie in Abb. 1 zu sehen.

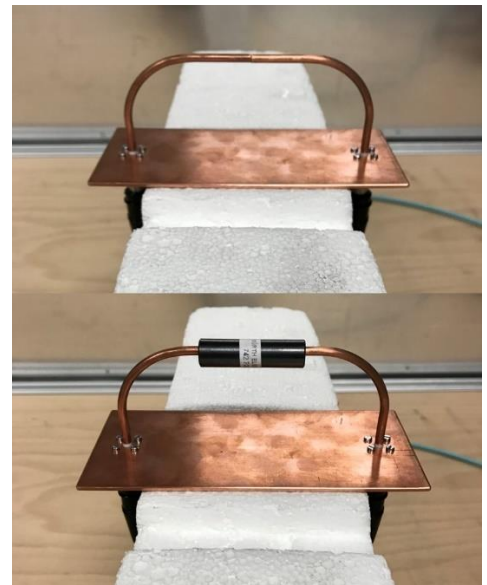
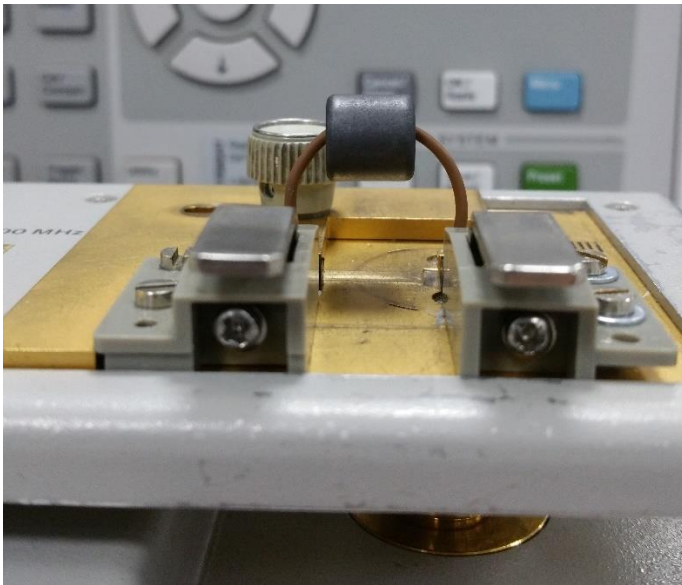


Abb. 1: Derzeitiger Messaufbau mit flexibler Drahtschleife (links) und stabile Anordnung (rechts)

Der Betrag der Eingangsimpedanz bei zwei verschiedenen Abschlussimpedanzen (Kurzschluss und 50Ω) ist in Abb. 2 dargestellt. Die schwarzen Linien geben die Eingangsimpedanz des leeren Messadapters wider. Erwartungsgemäß hat die auf den Eingang transformierte Abschlussimpedanz mit Beginn des Resonanzbereiches ab ca. 100MHz nur noch einen geringen Einfluss. Der Unterschied wird mit Ferrit ($12\text{mm} \times 6,1\text{mm} \times 45\text{mm}$, NiZn, $\mu_r=1500$) noch geringer. Außerdem sind die Resonanzen stark bedämpft (rote Linien in Abb. 2).

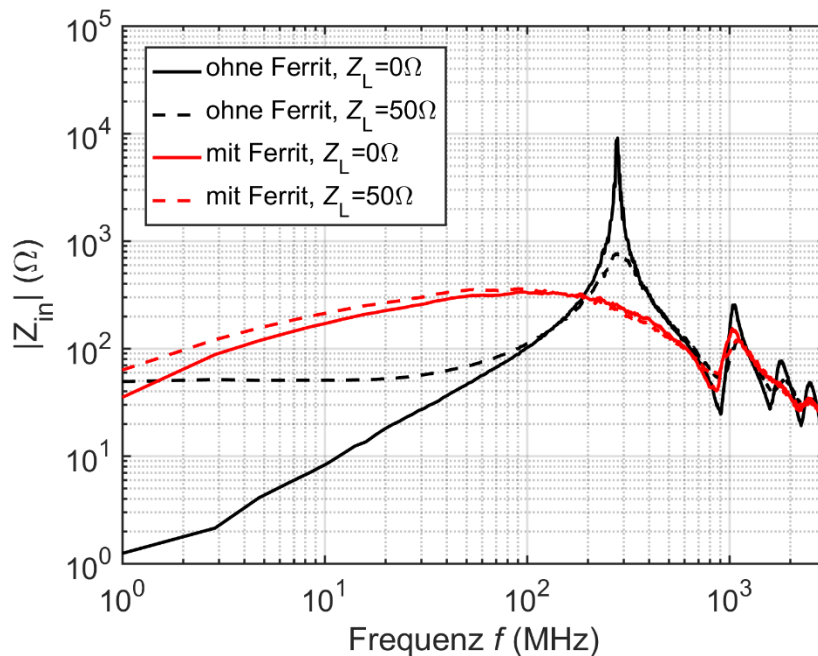


Abb. 2: Betrag der Eingangsimpedanz mit und ohne Ferrithülse und für verschiedene Abschlussimpedanzen

Der Verlauf der Eingangsimpedanz stimmt mit dem im Datenblatt für dieses Bauteil bis ca. 100MHz überein. Der Unterschied besteht in der Länge des Innenleiters (hier: 215,5mm) gegenüber 165mm bei der Messung mit der flexiblen Drahtschleife.

3 Validierung des analytischen Ferritmodells

Der Algorithmus für die Ermittlung der Ferritparameter, der in [1] beschrieben wurde, benötigt die an der koaxialen TEM-Zelle mit eingefügtem Kabelferrit gemessenen Streuparameter. Dabei wurde festgestellt, dass es beim Transmissionsparameter S_{21} deutliche Abweichungen zwischen Messung und analytischem Modell schon oberhalb von nur 200MHz gibt. Das analytische Modell suggerierte oberhalb dieser Frequenz eine scheinbar höhere Transmissionsdämpfung als in der Realität vorhanden ist. Dies kann dadurch begründet werden, dass im theoretischen Ansatz angenommen wird, dass der Raum zwischen Innen- und Außenleiter über die Länge des Testobjekts homogen mit Ferritmaterial gefüllt ist. In der Realität jedoch wird ein Teil des elektromagnetischen Feldes um das Testobjekt herum direkt zum Ausgangstor geleitet und nicht im Ferritmaterial absorbiert.

Um die Anwendbarkeit des neuen Ansatzes über den gesamten betrachteten Frequenzbereich bis 3GHz zu validieren, wurde mit Hilfe einer Simulationssoftware [4] eine vereinfachte, analytisch beschreibbare, Leitungsstruktur zusammen mit einem Kabelferrit modelliert. Sie ist in Abb. 3 dargestellt. Die Massefläche hat die Abmaße 20cm x 10cm und der Draht mit einem Durchmesser von 1mm befindet sich in 5cm Höhe mittig über der Massefläche. Um die Vergleichbarkeit mit der Theorie zu erhöhen, wurde für alle Leiter eine unendlich hohe elektrische Leitfähigkeit (PEC) angenommen.

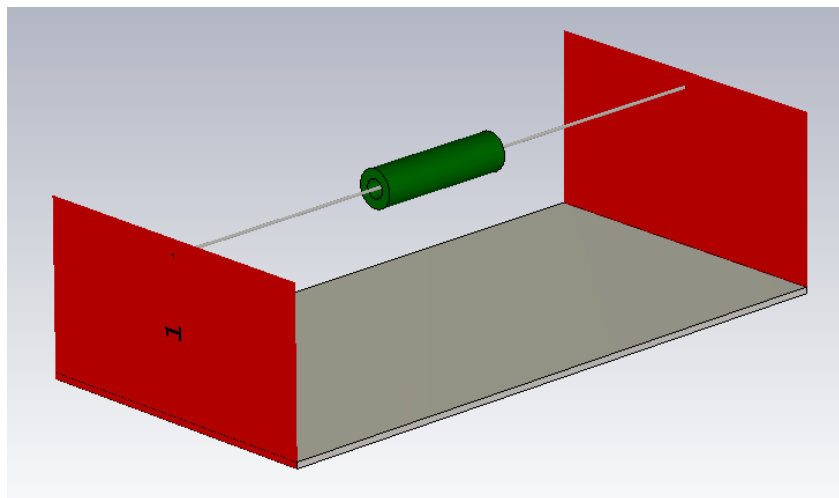


Abb. 3: Numerisches Modell einer Übertragungsleitung mit einem 45mm langen, mittig platzierten, NiZn Ferrit

Die Leitungsbeläge des Aufbaus sind:

$$L'_{TL} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h_w}{d_w}\right) = 1,06 \mu\text{H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (1)$$

$$C'_{TL} = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot h_w}{d_w} \right) \right]^{-1} = 10,5 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1} \quad (2)$$

Im Mittelteil wurden die nach [1] ermittelten längenbezogenen Parameter der Ferrithülse zu den Leitungsbelägen der Übertragungsleitung addiert. Über die Bildung der Kettenmatrix konnten schließlich die 50Ω-Streuparameter der Anordnung berechnet werden. Abb. 4 zeigt diese in der Betragsdarstellung im Frequenzbereich von 1MHz bis 3GHz. Aufgrund der Symmetrie sind die Streuparameter paarweise identisch. Die Übereinstimmung in den Kurven ist sehr gut, so dass das analytische Ferritmodell als hinreichend genau im bewerteten Frequenzbereich angesehen werden kann. Die resultierenden Abweichungen sind dadurch erklärbar, dass der theoretische Ansatz mit einer unendlich ausgedehnten Massefläche, und damit einem geringeren Induktivitätsbelag als in der Simulation, rechnet.

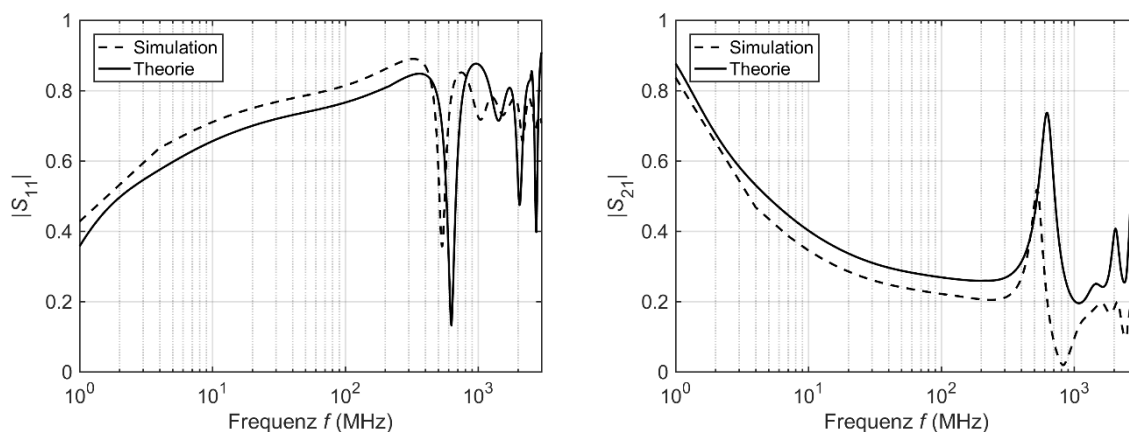


Abb. 4: Vergleich zwischen Theorie und Simulation für den Reflexionskoeffizienten (links) und den Transmissionskoeffizienten (rechts)

4 Wirkung von Ferriten an einem generischen Prüfling

Mit Hilfe eines generischen Prüflings wurde die Wirkung eines Kabelferrites auf die Stromverteilung entlang einer Verbindungsleitung untersucht. Die Anordnung ist in Abb. 5 dargestellt. Der Aufbau besteht aus einem breitbandigen HF-Generator (im Bild links), einem geschlossenen leeren Metallgehäuse und einem Verbindungsdraht von $l_{TL} = 1\text{m}$ Länge und $d_w = 1\text{mm}$ Durchmesser zwischen den beiden Objekten. Auf der Seite des Metallgehäuses geht der Draht durch eine koaxiale Durchführung in der Gehäusewand und ist auf der Innenseite über 50Ω mit dem Gehäuse verbunden. Diese vereinfachte Anordnung soll ein elektronisches Gerät nachbilden, das mit einem Hilfsgerät über eine geschirmte Leitung verbunden ist. Die 50Ω Abschlussimpedanz steht dabei für eine schlechte Verbindung des Kabelschirmes mit dem leitfähigen Gehäuse. Der gesamte Aufbau, in 75cm Höhe über einer ausgedehnten Metallfläche, ist nicht geerdet, so dass aus Sicht des auf der Verbindungsleitung angeregten Gleichtaktstromes die Abschlussimpedanzen Z_Q und Z_L resistiv-kapazitiven Charakter besitzen.

Das elektrische Ersatzschaltbild der Anordnung zeigt Abb. 6. Die Kapazitäten C_G und C_B wurden mit Hilfe von [4] und einem quasistatischen Solver zu jeweils 7pF berechnet.

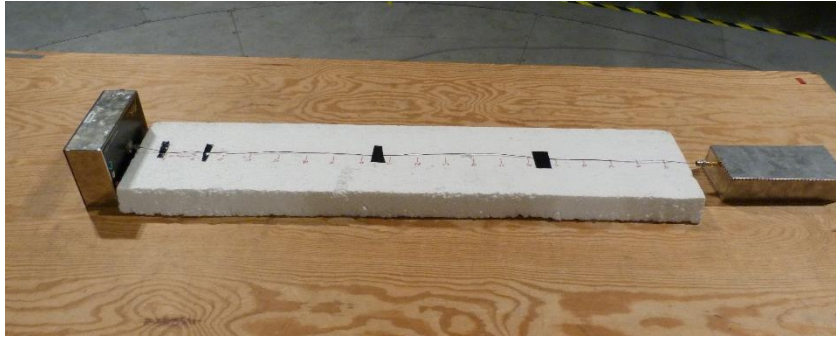


Abb. 5: Aufbau des generischen Prüflings, bestehend aus einem HF-Generator, einem Metallgehäuse und einem Verbindungsdraht mit 1m Länge

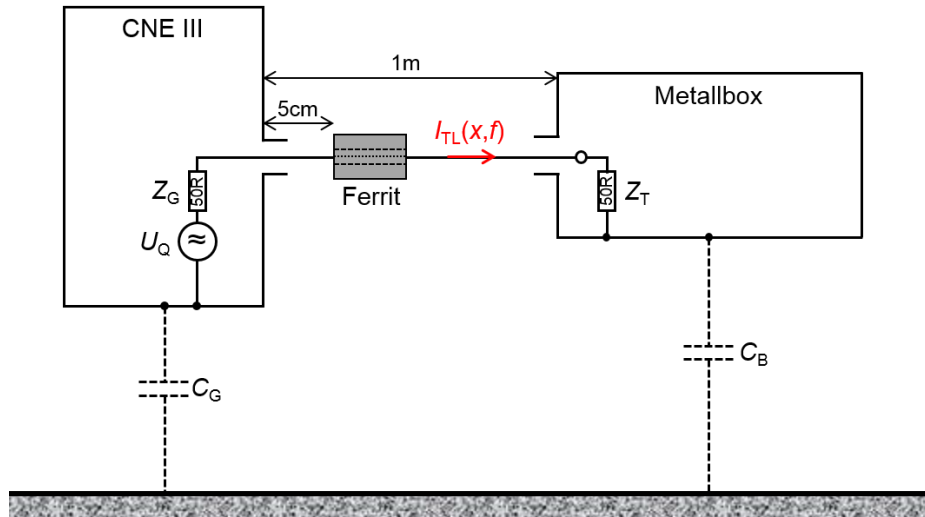


Abb. 6: Schema des generischen Prüflings mit elektrischem Ersatzschaltbild

Für die Berechnung der Stromverteilung entlang der Leitung bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen wurde der Ansatz aus [5] verwendet. Er verwendet die in [6] ermittelten Streuparameter eines Kabelferrites. Der Ansatz in [6] orientiert sich bezüglich der Messanordnung am Standard DIN EN 55017 [7].

Der verwendete Kabelferrit hat quaderförmige Außenmaße (25mm × 25mm × 28mm) und einen Innendurchmesser von 13mm. Er besteht aus einem Nickel-Zink-Material mit einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 620$. Die mit Hilfe des koaxialen Messadapters aus [1] ermittelten Streuparameter dieses Testmusters wurden auf die neue Referenzimpedanz, welche der Wellenimpedanz der beschriebenen Anordnung entspricht, umgerechnet. Sie hat einen Wert von

$$Z_{TL} = 60\Omega \cdot \cosh^{-1}\left(\frac{2 \cdot h_w}{d_w}\right) = 484,7\Omega \quad (3)$$

Dabei wurde für h_w ein Wert von 81cm eingesetzt. Der Reflexionsfaktor auf der Quellseite ist

$$r_Q = \frac{Z_Q - Z_{TL}}{Z_Q + Z_{TL}} = \frac{Z_G + (j\omega C_G)^{-1} - Z_{TL}}{Z_G + (j\omega C_G)^{-1} + Z_{TL}} \quad (4)$$

und auf der Lastseite

$$r_L = \frac{Z_L - Z_{TL}}{Z_L + Z_{TL}} = \frac{Z_T + (j\omega C_B)^{-1} - Z_{TL}}{Z_T + (j\omega C_B)^{-1} + Z_{TL}} \quad (5)$$

Der Ferrit soll sich für die folgenden Betrachtungen immer in einer Entfernung von $\ell_1 = 5\text{cm}$ zum Ausgang des HF-Generators befinden. Die normierte Stromstärke ohne Ferrit ist nach [5]

$$\left| \frac{I_{TL,oF}(x, f)}{I_0} \right| = \left| \frac{1 - r_L \cdot e^{-j2\beta(\ell_{TL} - x)}}{1 - r_Q \cdot r_L \cdot e^{-j2\beta \cdot \ell_{TL}}} \right| \quad (6)$$

$\beta = 2\pi \cdot f/c$ ist die Phasenkonstante der Übertragungsleitung. Mit eingefügtem Kabelferrit ändert sich die Stromverteilung, sowohl vor als auch hinter dem Bauteil. Es sei $\ell_2 = \ell_{TL} - \ell_{Fe} - \ell_1 = 92,2\text{cm}$ die freie Länge der Leitung hinter dem Ferrit. Die normierte Stromamplitude hinter dem Ferrit ist dann

$$\left| \frac{I_{TL,mF,L}(x, f)}{I_0} \right| = \frac{\left| S_{21,Fe} \cdot (1 - r_L \cdot e^{-j2\beta(\ell_{TL} - x)}) \right|}{\left| (1 - r_Q S_{11,Fe} \cdot e^{-j2\beta \ell_1}) \cdot (1 - r_L S_{11,Fe} \cdot e^{-j2\beta(\ell_{TL} - \ell_1)}) - r_Q r_L S_{21,Fe}^2 \cdot e^{-j2\beta \ell_{TL}} \right|} \quad (7)$$

Die normierte Stromverteilung entlang der Leitung ohne Ferrit für Frequenzen von 1MHz bis 1GHz zeigt Abb. 7. Deutlich sind die Resonanzstellen zu sehen. Die erste Resonanz tritt bei 61,6MHz auf und hat bei $x = 0,5\text{m}$ eine relative Amplitude von 8,1. Mit Ferrit ist diese Resonanz zu 55,2MHz verschoben und hat dort eine relative Amplitude von 4,3 (siehe Abb. 8). Für $x = 0,5\text{m}$ hat der Strom beim 2-, 4- und 6-fachen der ersten Resonanz ein Minimum.

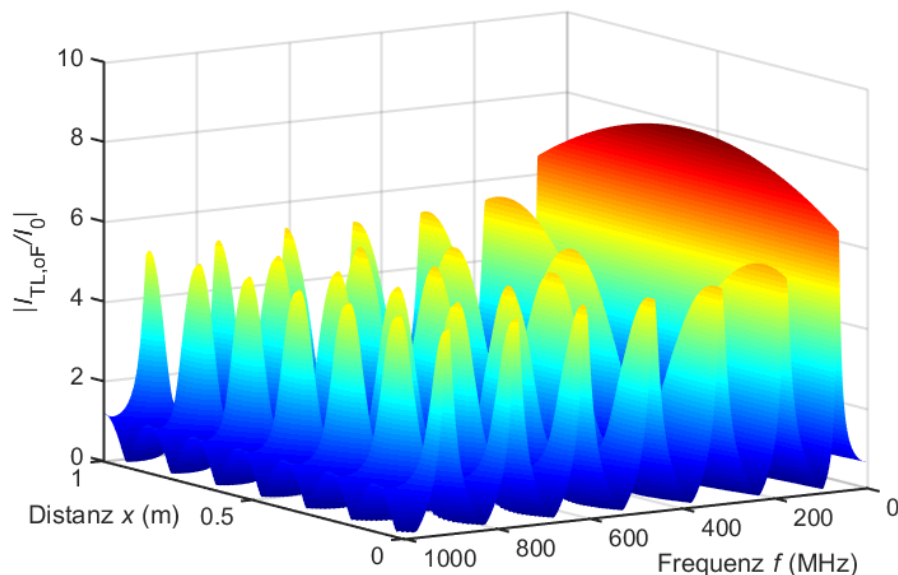


Abb. 7: Normierte Stromverteilung ohne Ferrit

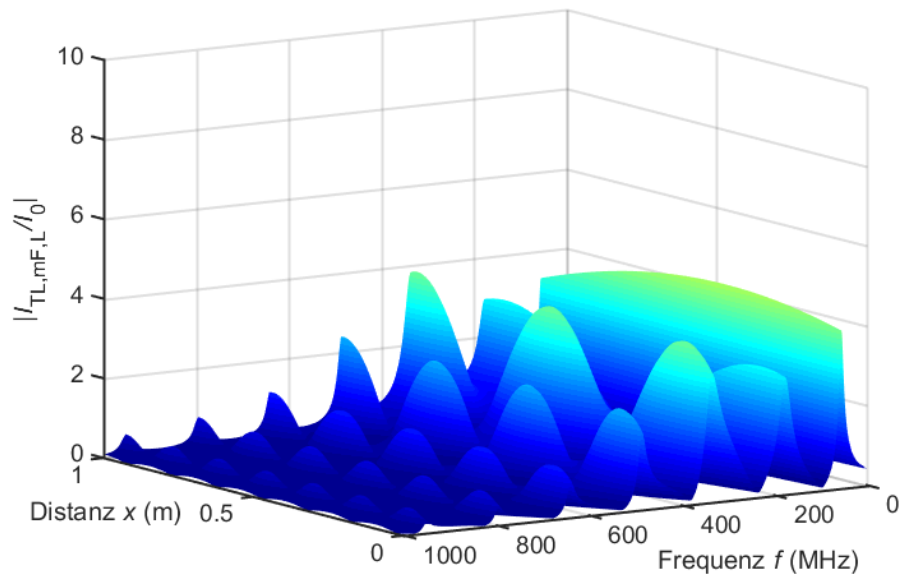


Abb. 8: Normierte Stromverteilung mit Ferrit

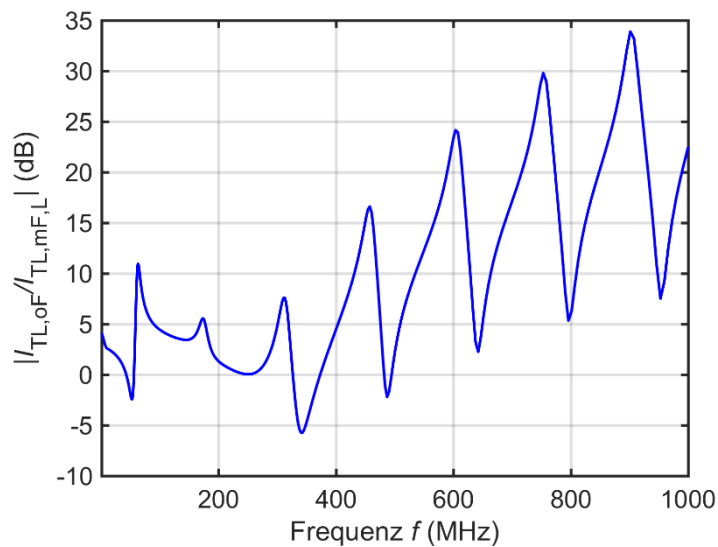


Abb. 9: Frequenzabhängige Dämpfung durch den Ferrit

Abb. 9 zeigt die resultierende Dämpfung in Dezibel für jede Frequenz. Sie ist ortsunabhängig, da sich die Terme mit x im Exponenten von Gleichung (6) und (7) herauskürzen. In 3 schmalen Frequenzbändern (52MHz, 342MHz, 487MHz) tritt eine Verstärkung auf. Stellt man die Stromamplitude ortsabhängig für eine bestimmte Frequenz dar, ergibt sich ein Verlauf aus Maxima und Minima, wie in Abb. 10 gezeigt. Bei der Frequenz 461MHz tritt die vierte Leitungsresonanz auf. Bei dieser Frequenz beträgt die Dämpfung durch den Ferrit 16dB. Diese Dämpfung wirkt sich direkt auf das von der Leitung abgestrahlte Feld aus.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine zur weit verbreiteten Messmethode mit einer Drahtschleife alternative Messanordnung beschrieben, die einfach zu handhaben ist und sehr gut reproduzierbare Messergebnisse liefert. Der Einfluss der Struktur ist jedoch in den Streuparametern enthalten und kann nicht – wie bei Verwendung der in [1] beschriebenen TEM-Zelle – herausgerechnet werden. Mit Hilfe der Streuparameter eines Kabelferrites wurde für einen generischen Prüfling die Stromverteilung analytisch berechnet, wenn sich der Ferrit nahe der Störquelle befindet. Mit Kenntnis der Abschlussimpedanzen auf Quell- und Lastseite ist es theoretisch möglich, die für eine bestimmte Störfrequenz optimale Position des Kabelferrites zu finden.

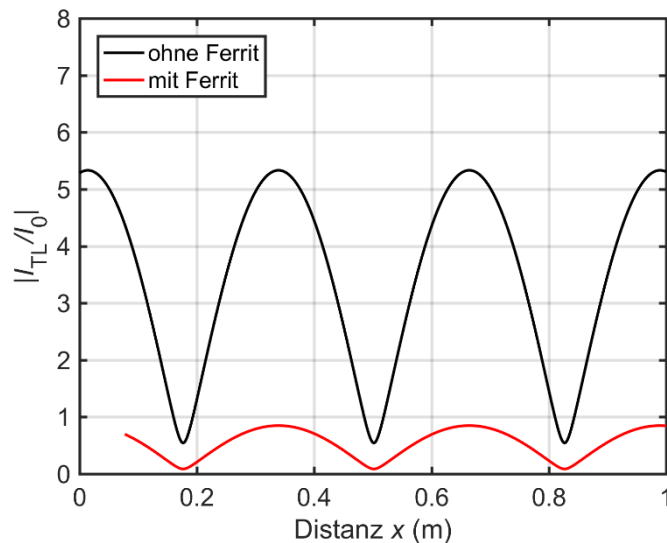


Abb. 10: Vergleich der ortsabhängigen Stromamplitude bei $f = 461\text{MHz}$, mit und ohne Ferrit

6 Referenzen

- [1] M. Al-Hamid, M. Leone, S. Schulze, "A novel characterization method for cable ferrites using a TEM-waveguide test setup", EMC Europe 2015, Dresden, 16.-22. August 2015
- [2] M. Al-Hamid, M. Leone, S. Schulze, "Wirkung von Kabelferriten oberhalb von 1GHz durch eine neue Betrachtung der elektrischen Parameter", In: Kongressband EMV 2016, Düsseldorf, 23.-25. Februar 2016, S. 113-120
- [3] Patent DE 10 2015 106 072 B3, 29. September 2016
- [4] CST STUDIO SUITE®, <https://www.cst.com/products/csts2>
- [5] J. Urabe, K. Fujii, A. M. Bin Harun, Y. Matsumoto, A. Sugiura, "A study of EMI suppression characteristics of ferrite cores", In: Kongressband des 17. Internationalen Zürich Symposiums zur EMV, 2006
- [6] J. Urabe, K. Fujii, Y. Dowaki, Y. Jito, Y. Matsumoto, A. Sugiura, "A method for measuring the characteristics of an EMI suppression ferrite core", IEEE Transactions on EMC, Vol. 48, No. 4, November 2006
- [7] DIN EN 55017: "Verfahren zur Messung der Entstöreigenschaften von passiven EMV-Filtern", 2011