

# Optimierte Anordnung von Ferritkernen auf Leitungen für eine breitbandige Filterwirkung

Dipl.-Ing. Steffen Schulze, Würth Elektronik eiSos GmbH, Waldenburg, Deutschland  
Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland  
Prof. Dr.-Ing. Marco Leone, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland

## 1 Einleitung

Der Beitrag stellt eine Fortsetzung der Untersuchungen zur Wirkungsweise von Ferritkernen auf Kabelstrukturen dar. In [1] wurde eine messtechnische Methode zur Charakterisierung von ring- und zylinderförmigen Ferritkernen vorgestellt; mit dem Ziel, die Parameter eines elektrischen Ersatzschaltbildes für einen Ferritkern zu bestimmen. Durch elektrische Feldsimulation an einem dreidimensionalen Modell wurde die Methode validiert [2]. Später wurde eine Alternativmethode für die Ermittlung der Ersatzschaltbildparameter mit Hilfe von an Ringkernen breitbandig gemessenen Permeabilitäts- und Permittivitätsdaten beschrieben [3]. Das Vierpol-Ersatzschaltbild kann dann mit dem Leitungsersatzschaltbild eines Kabels kombiniert und die Leitungstheorie angewendet werden. Beispiele hierzu finden sich in [3] und [4]. Mit Hilfe der Leitungstheorie können die Strom- und Spannungsverteilung entlang der Leitung berechnet werden. Durch den Vergleich dieser Werte mit und ohne Ferritkern lässt sich ein Dämpfungsmaß angeben, welches von der Position entlang der Leitung, von der Position des Ferritkerns und von der Frequenz abhängt. Da das von der Leitung abgestrahlte Feld mit der Stromverteilung zusammenhängt, kann damit auf die Filterwirkung des Bauteils geschlossen werden. In [5] wurde zuletzt eine zum analytischen Ansatz alternative Methode, nämlich die numerische Berechnung der Stromverteilung mit Hilfe von LTspice® [6], anhand einer Übertragungsleitung mit einer darauf befestigten Ferrithülse vorgestellt. Die Validierung erfolgte mit Hilfe des theoretischen Ansatzes sowie numerisch mit CONCEPT-II. Die Berechnung mit Hilfe des SPICE Algorithmus ist sehr effizient. Deshalb wird in diesem Beitrag der Ansatz wieder benutzt. Die Wirkung eines einzelnen Ferritkerns ist abhängig von seiner Position entlang der Leitung sowie von der Frequenz. Für eine breitbandige Filterwirkung könnte man entlang der gesamten Leitungslänge Ferritkerne anordnen, was aber weder wirtschaftlich vertretbar noch einfach handhabbar ist. Aus diesem Grund wurde ein Mittelweg analysiert, welcher auf der Anordnung von drei identischen Ferrithülsen auf einer Leitung basiert. Ziel ist eine möglichst breitbandige Wirkung. Für die Positionen der Hülsen entlang der Leitung bietet das Golomb-Lineal einen Ansatz. Bei diesem Lineal gibt es keine zwei Markierungen an ganzzahligen Positionen mit dem gleichen Abstand zueinander. Die Position der drei Ferrithülsen wird so variiert, daß sie dem Golomb-Lineal der Ordnung 5 nahekommt.

## 2 Konfigurationen

Die untersuchte Anordnung besteht im Grundaufbau aus einem breitbandigen Rauschgenerator (Eurofins York CNE VI, 30 Hz...6 GHz), einer Metallbox und einem horizontal liegenden Draht mit 1 m Länge, der die beiden Gehäuse verbindet. Die verwendeten Ferrithülsen haben die Maße  $12\text{ mm} \times 6,1\text{ mm} \times 46\text{ mm}$  ( $D_a \times D_i \times L$ ) und eine Anfangspermeabilität von  $\mu_i = 620$  (Nickel-Zink-Ferrit). Die erste Konfiguration wurde in [5] schon einmal untersucht. Bei dieser Konfiguration war eine ähnliche Ferrithülse mit ihrer Stirnfläche in 10 cm Entfernung vom Generatorausgang platziert. Als Vergleich wird sie als „Konfiguration 1“ erneut herangezogen (siehe Bild 1). Der Innenwiderstand des Generators ist  $R_i = 50\ \Omega$  und die beiden Kapazitäten haben die Größe  $C_G = 17,2\text{ pF}$  und  $C_B = 7,7\text{ pF}$ . Die Ausgangsleistung betrug für alle Experimente 10 mW.

Bild 2 zeigt die für diesen Beitrag wichtigste Konfiguration mit drei Ferrithülsen im Abstand von 10 cm, 40 cm und 90 cm vom Generatorausgang. Die Abstände wurden so gewählt, dass sie

ungefähr einem Golomb-Lineal der Ordnung 5 und Länge 11 entsprechen. Golomb-Lineale sind nach Prof. S. Golomb benannt, der sie zuerst beschrieb und für die Bezeichnung von Graphen verwendete [7]. Seitdem sind weitere Anwendungen hinzugekommen, z.B. in der Auswahl von Funkfrequenzen, um Intermodulationsprodukte 3. Ordnung zu eliminieren, für Fehlerkorrekturcodes, für die optimale Platzierung von Radioteleskoparrays oder für das Anbringen von Mittelanzapfungen in Wicklungen von Stromwandlern mit mehreren Übersetzungsverhältnissen. Bisher wurden optimale Golomb-Lineale bis zur Ordnung 27 und Länge 553 konstruiert [8]. Optimal ist ein Golomb-Lineal dann, wenn die Ordnung  $m$  für eine gegebene Länge  $n$  maximal ist oder wenn die Länge  $n$  für eine gegebene Ordnung  $m$  minimal ist. Die Golomb-Lineale  $(m, n) = (1, 0) \vee (2, 1) \vee (3, 3) \vee (4, 6)$  sind zudem perfekt, d.h. es tritt jeder Abstand zwischen zwei Werten bis hin zur Länge  $n$  auf. Die zwei möglichen optimalen Golomb-Lineale der Ordnung 5 sind  $\{0, 1, 4, 9, 11\}$  und  $\{0, 2, 7, 8, 11\}$ . Ersteres wurde für die Positionierung der drei Ferrithülsen entlang der Leitung gewählt. Ziel ist es, mit möglichst wenig Materialeinsatz eine breitbandige Filterwirkung zu erzielen, indem sich die Ferrithülsen bei möglichst vielen Anregungsfrequenzen im Strommaximum befinden.

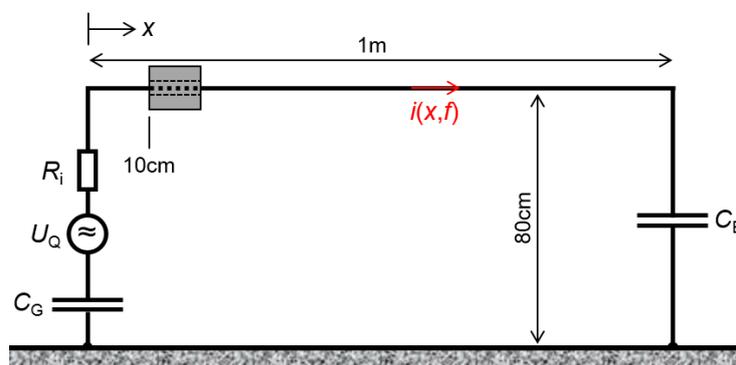


Bild 1: Schematisch dargestellte Anordnung mit einer Ferrithülse (Konfiguration 1)

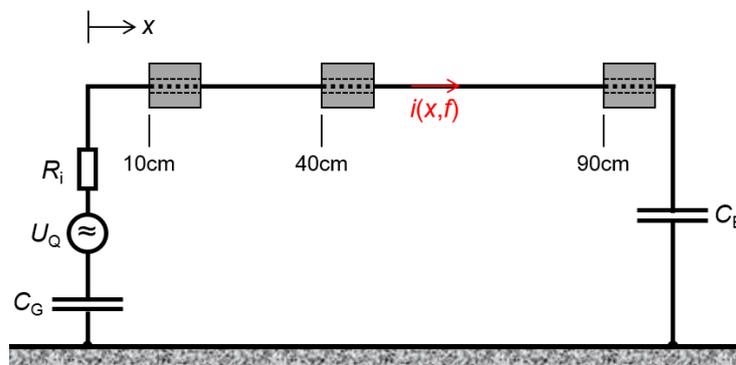


Bild 2: Schematisch dargestellte Anordnung mit 3 Ferrithülsen (Konfiguration 2)

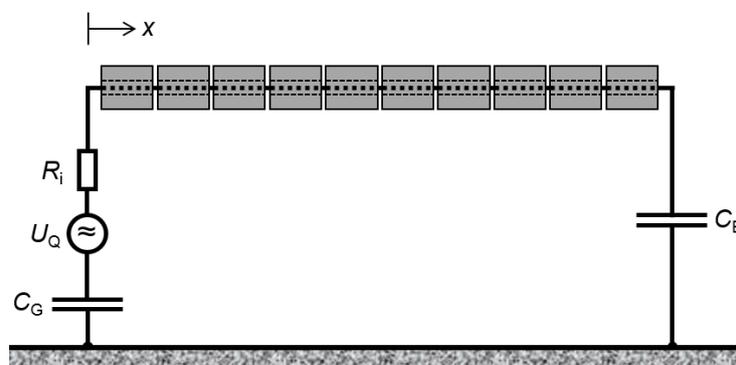


Bild 3: Schematisch dargestellte Anordnung mit voll ferritierter Leitung (Konfiguration 3)

Eine vollständige breitbandige Reduktion von Störsignalen auf der Leitung lässt sich erreichen, wenn die gesamte freie Länge der Leitung mit Ferriten umschlossen ist. Dieser Zustand ist in

Bild 3 angedeutet. Das vollständige Umschließen mit Ferritmaterial wird üblicherweise bei hochwertigen geschirmten Messkabeln angewandt, um Mantelwellen zu unterdrücken.

## 2 Ersatzschaltbild und SPICE-Implementierung

### 2.1 Elektrisches Ersatzschaltbild

Anhand von Konfiguration 1 soll das elektrische Ersatzschaltbild der Anordnung erläutert werden. Es wird in Bild 4 gezeigt. Die  $\ell_{TL} = 1\text{ m}$  Leitung wurde in 1 mm lange Abschnitte unterteilt, was 1/100 der Wellenlänge bei der höchsten Anregungsfrequenz  $f_{\max} = 3\text{ GHz}$  entspricht. Bei dieser Konfiguration gibt es somit  $N_1 = 100$ ,  $N_2 = 854$  und  $N_{Fe} = 46$  Segmente.

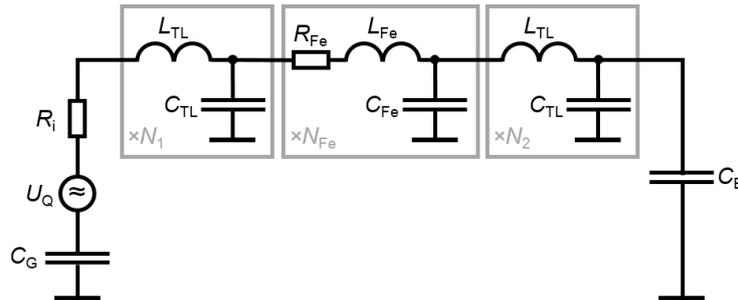


Bild 4: Leitungs-Ersatzschaltbild für Konfiguration 1 mit diskreten Elementen

Mit  $h_{TL} = 800\text{ mm}$  und  $D_{TL} = 1,5\text{ mm}$  ergeben sich die Leitungsbeläge der freien Enden zu [9]

$$L'_{TL} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{4h_{TL}}{D_{TL}}\right) = 1,53 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \quad (1)$$

und

$$C'_{TL} = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\ln\left(\frac{4h_{TL}}{D_{TL}}\right)\right]^{-1} = 7,26 \frac{\text{pF}}{\text{m}}. \quad (2)$$

Die Berechnung der Leitungsbeläge für den Abschnitt „Ferrithülse“ erfolgte nach der in [5] angegebenen Methode mit der komplexen Permeabilität und Permittivität des Nickel-Zink-Materials und dem Geometriefaktor  $K_{Fe} = 0,1077$ . Analog der Berechnung in [5] wurden die Leitungsbeläge für den Bereich zwischen der Innenseite der Ferrithülse und der Leitung sowie zwischen der Außenseite der Hülse und dem leitfähigen Boden ermittelt und zu den Ersatzelementen  $L_{Fe}$  und  $C_{Fe}$  kombiniert (Serienschaltung der Einzelparameter).

Für Konfiguration 3 entfallen die Abschnitte vor und hinter dem Ferrit und  $N_{Fe} = 1000$ .

### 2.2 SPICE-Implementierung

Das Generieren der Netzliste für die Simulation in LTspice® [6] wurde in [5] vollständig beschrieben. Für jede Konfiguration – inklusive der Leitung ohne Ferrit (Referenz) – und für jede Anregungsfrequenz wurde eine eigene Netzliste erstellt. Ausgewertet wurde jeweils die Stromamplitude in jeder Teilinduktivität, über eine Fourieranalyse in LTspice® bei der Grundfrequenz ermittelt. Insgesamt erfolgte die Simulation für 600 Frequenzen im Bereich von 1 MHz bis 3 GHz (Schrittweite 5 MHz).

## 3 Ergebnisse der Simulation

Mit Hilfe der berechneten Stromamplituden kann die Stromverteilung entlang der Leitung für jede Anregungsfrequenz veranschaulicht werden. Die Bilder 5 und 6 zeigen die Stromverteilung für jede Konfiguration bei den Frequenzen 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz und 3 GHz. Mit einer Ferrithülse bei 10 cm (Konfiguration 1) ist bei den meisten Frequenzen eine Reduktion der Stromamplitude zu verzeichnen. Falls eine Reduktion auftritt, dann ist der Trend

so, dass diese zu höheren Frequenzen hin größer wird, was durch den ansteigenden Betrag des Dämpfungsterms  $\alpha_{Fe}$  der Propagationskonstante  $\gamma_{Fe}$  begründet werden kann [4].

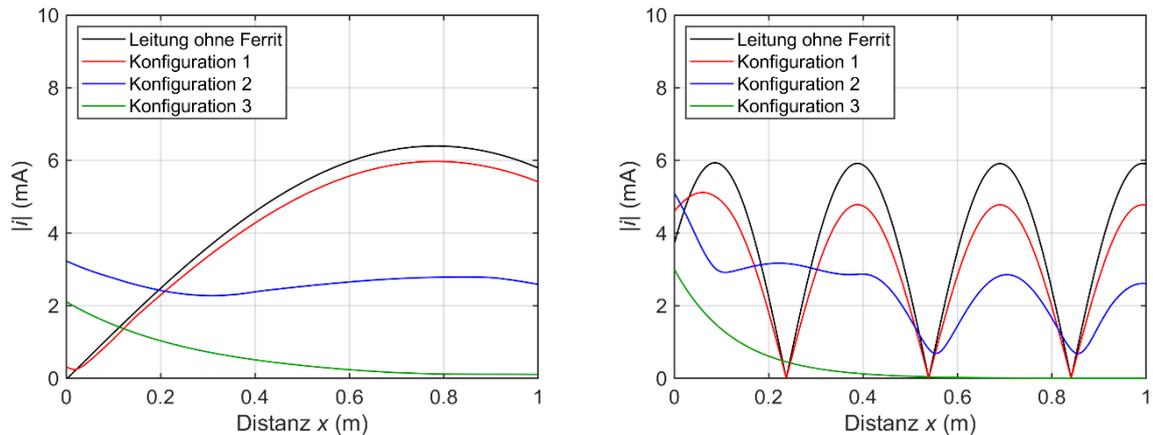


Bild 5: Simulierte Stromverteilung für alle Konfigurationen (links: 100 MHz, rechts: 500 MHz)

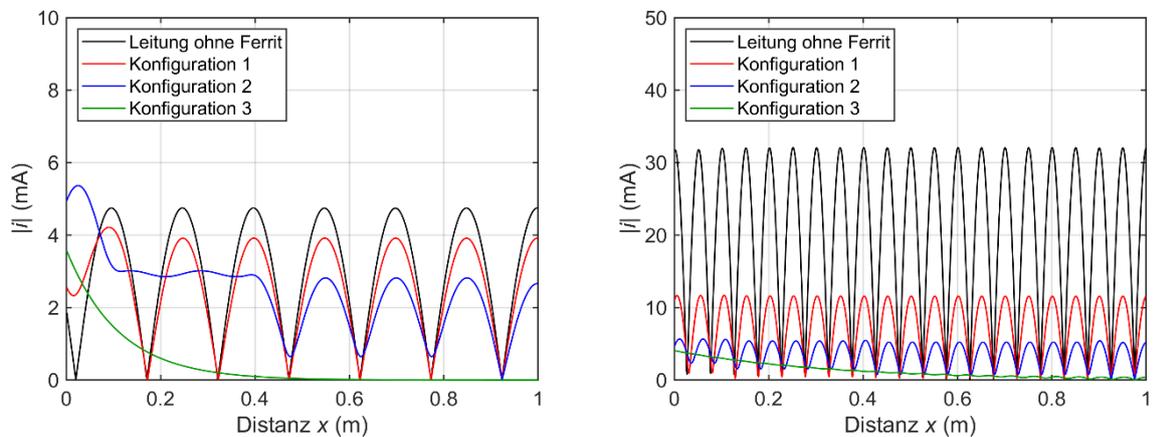


Bild 6: Simulierte Stromverteilung für alle Konfigurationen (links: 1 GHz, rechts: 3 GHz)

Für die hier interessante Konfiguration 2 ist bei den meisten Frequenzen eine stärkere Reduktion der Stromamplitude sichtbar, was im Vorfeld der Untersuchungen vermutet worden war. Der „stufenweise“ Abfall der Amplitude, vom Generator aus gemessen, ist ab ca. 250 MHz zu beobachten; nur bei 3 GHz tritt er nicht auf (siehe Bild 6 rechts). Die „Stufen“ befinden sich an den Positionen der beiden dem Generator am nächsten befindlichen Ferrithülsen. Zwischen  $x = 10$  cm und  $x = 40$  cm sind keine ausgeprägten Nullstellen in der Stromverteilung sichtbar. Dennoch sieht man auch hier eine Verringerung der Amplitude gegenüber Konfiguration 1. Bei Konfiguration 3 ist der erwartete exponentielle Verlauf der Stromamplitude  $|i(x)|$  zu erkennen.

Eine weitere Möglichkeit des Vergleichs der einzelnen Konfigurationen mit der Referenz bietet der Dämpfungsfaktor  $A_j$ . Er ist gegeben durch

$$A_j = 20 \cdot \log \left| \frac{i_{\text{Ref}}(x, f)}{i_{\text{Konf}_j}(x, f)} \right| \text{ dB} \quad (3)$$

Zur Veranschaulichung dient eine farbkodierte Darstellung für alle Positionen  $x$  und alle Frequenzen  $f$ . Rottöne stehen dabei für eine Dämpfung und Blautöne für eine Verstärkung der Stromamplitude. Es wurde jeweils die gleiche Skalierung der Werte benutzt. In Bild 7 links ist das Resultat für Konfiguration 1 zu sehen, mit horizontalen roten Linien im Abstand von 150 MHz. Dies entspricht exakt der  $\lambda/2$ -Resonanz der 1 m langen Leitung. Im Bereich vor der ersten Ferrithülse ( $x \leq 10$  cm) ist bei allen Frequenzen eine leichte Verstärkung des Signals zu beobachten. Global betrachtet dominiert aber eine geringe Dämpfung im Bereich hinter

dem ersten Ferrit bei allen Frequenzen, außer in den schmalen Frequenzbändern im Abstand von 150 MHz. Die maximale Dämpfung beträgt 58 dB.

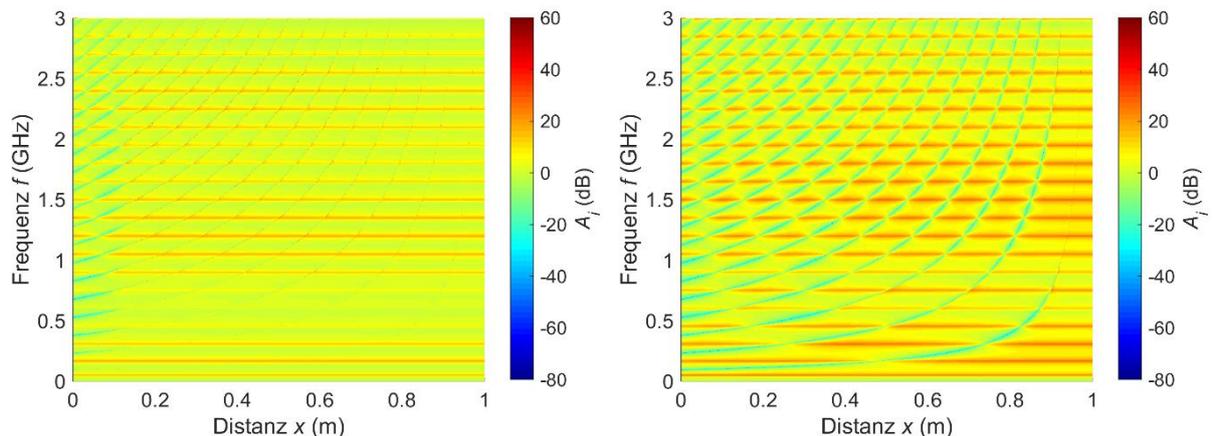


Bild 7: Darstellung des Stromdämpfungsfaktors  $A_i$  (links: Konfiguration 1, rechts: Konfiguration 2)

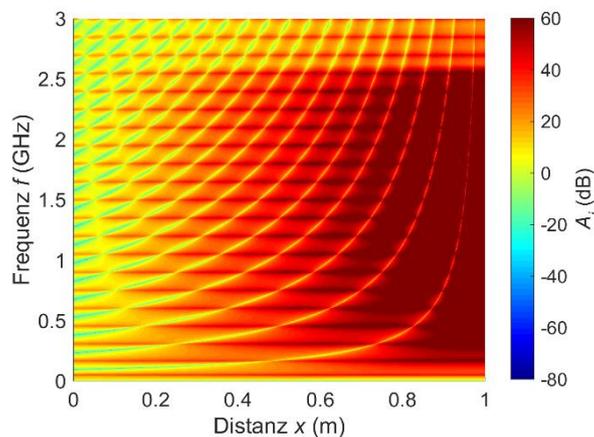


Bild 8: Darstellung des Stromdämpfungsfaktors  $A_i$  für Konfiguration 3

Bild 7 rechts zeigt den Dämpfungsfaktor für Konfiguration 2. Deutlich erkennt man auch hier die äquidistanten roten Linien mit einer etwas größeren Bandbreite als bei Konfiguration 1. Die Bereiche, in denen eine leichte Verstärkung auftritt (hellblau), werden mit steigender Frequenz häufiger; sind – bei einer einzelnen Frequenz betrachtet – aber sehr schmal. Die Punkte, an denen das Signal sehr verstärkt wird (dunkelblau), sind sehr klein und in der 2D-Darstellung nicht sichtbar. Sie liegen innerhalb der hellblauen Bereiche. Da für die Abstrahlung von der Leitung die Stromverteilung integral zu bewerten ist, spielt der Beitrag dieser Bereiche keine große Rolle. Die maximale Dämpfung beträgt 44,6 dB.

Abschließend wird in Bild 8 das Diagramm für Konfiguration 3 gezeigt. Auch für den Fall einer komplett ferritierten Leitung sind Resonanzbereiche erkennbar; ebenso die stärker werdende Dämpfung zum Ende der Leitung durch den exponentiellen Abfall der Stromamplitude. Der maximale Wert beträgt 93 dB.

#### 4 Messung der gestrahlten Störaussendung

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden vier Konfigurationen bezüglich der Störfeldstärke in einer Absorberhalle im Frequenzbereich von 30 MHz bis 3 GHz vermessen. Bild 9 zeigt als Beispiel den Prüflingsaufbau für die Konfiguration 2 mit drei Ferrithülsen. Die elektrische Feldstärke wurde in 10 m Entfernung zum Prüfling ohne Bodenabsorber in horizontaler und vertikaler Antennenpolarisation aufgezeichnet. Dabei wurde der Prüfling in 30° Schritten gedreht und die Antennenhöhe in Schritten von 30 cm variiert. Als Referenz diente wieder der Aufbau ohne Ferritkerne. Zusätzlich zu den Konfigurationen 1 und 2 wurde die zweite mögliche Anordnung der Ferrite untersucht, die das Golomb-Lineal der Ordnung 5

und Länge 11 ermöglicht. Die Hülsten hatten dabei die Abstände 20 cm, 70 cm und 80 cm vom Generatorausgang (Konfiguration 4). Konfiguration 3 wurde in Ermangelung einer ausreichenden Menge an Hülsten nicht messtechnisch nachgebildet.



Bild 9: Foto des Prüfobjekts in der Absorberhalle (Konfiguration 2)

Die Feldamplitude war bei horizontaler Antennenpolarisation wegen der Lage des Prüflings bei allen Konfigurationen bis ca. 1,3 GHz höher als die für vertikale Polarisation (siehe Bild 10). Auch bei dieser Untersuchung wurde wieder ein frequenzabhängiges Dämpfungsmaß als Differenz der Feldstärkepegel (in dB $\mu$ V/m) der jeweiligen Konfiguration zur Referenzmessung gebildet.

$$A_E = (L_{E,Ref} - L_{E,Konf_j}) \text{ dB} \quad (4)$$

Die Ergebnisse sind in den Bildern 11 und 12, getrennt nach horizontaler und vertikaler Polarisation, dargestellt.

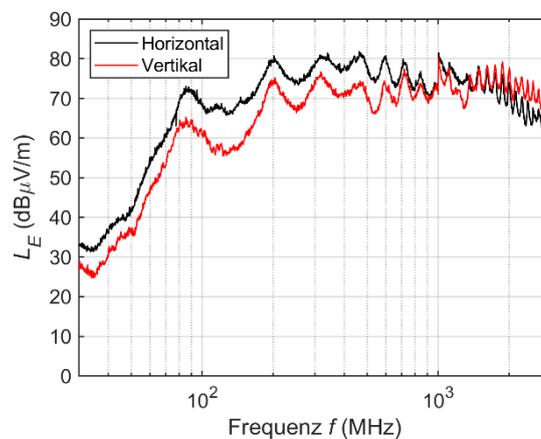


Bild 10: Maximaler Feldstärkepegel in 10 m Entfernung (Referenz ohne Ferrithülsten)

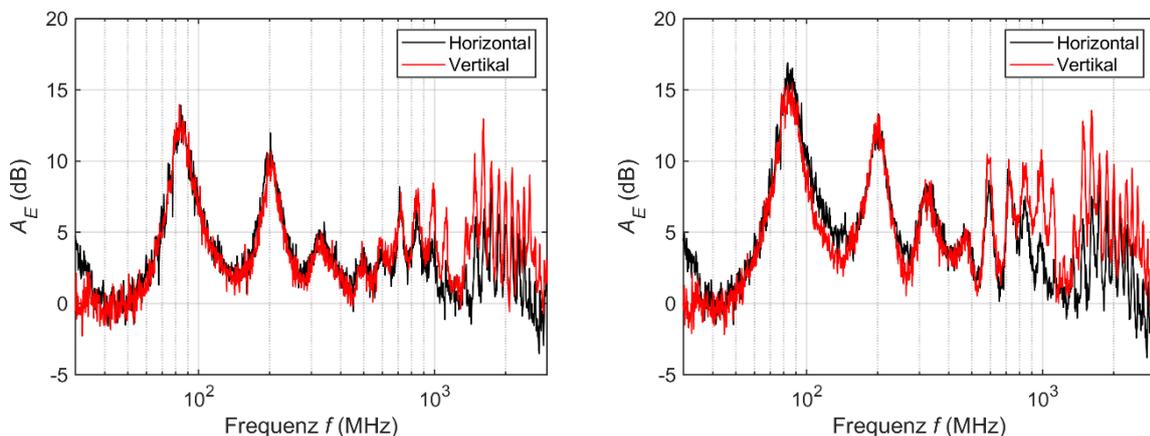


Bild 11: Dämpfungsfaktor für die elektrische Feldstärke (links: Konfiguration 1, rechts: Konfiguration 2)

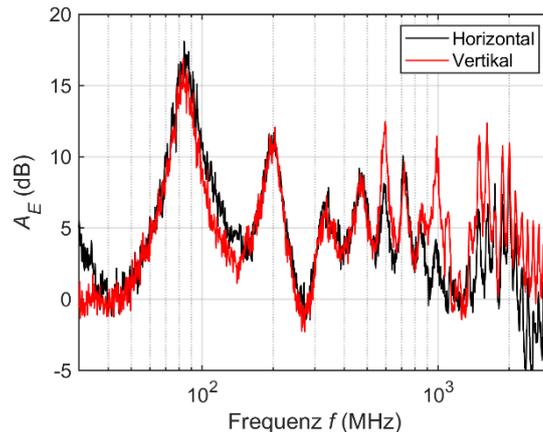


Bild 12: Dämpfungsfaktor für die elektrische Feldstärke (Konfiguration 4)

Die Dämpfung ist ab 40 MHz bis ca. 600 MHz für den horizontalen und vertikalen Feldanteil identisch. Darüber wird der vertikale Feldanteil stärker bedämpft. Das erste Dämpfungsmaximum für Konfiguration 1 (Bild 11 links) liegt bei 82 MHz und beträgt 14 dB. Das zweite Maximum tritt bei 200 MHz mit 12 dB auf. Auch im Frequenzbereich größer 1 GHz tritt noch Dämpfung auf, teilweise über 10 dB. Interessant ist der Abstand zwischen den Maxima, welcher ca. 120 MHz beträgt. Der Resonanzabstand korreliert mit der tatsächlichen elektrischen Länge des Prüflings von 1,25 m. Mit drei Ferritkernen (Konfiguration 2) lässt sich eine um durchschnittlich 3 dB höhere Dämpfung erreichen.

Die stärkere Dämpfung bei der Anordnung mit 3 Ferritkernen (Bild 11 rechts) gegenüber der mit nur einem Kern bestätigt das Ergebnis der Simulation in LTspice®. Man muss aber auch festhalten, dass der Unterschied oberhalb von 1 GHz nur noch gering ausfällt. Das gilt auch für Konfiguration 4 (siehe Bild 12). Zwischen den beiden Golomb-Lineal-Varianten gibt es keine signifikanten Unterschiede.

## 5 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag widmet sich der Optimierung der Filterwirkung von Ferrithülsen auf einer Leitung. Dazu wurde die Anzahl und Position identischer Ferrithülsen variiert. Um eine möglichst breitbandige Wirkung zu erzielen, wurde eine unregelmäßige Anordnung der Ferritkerne entlang der Leitung gewählt, und zwar gemäß dem Golomb-Lineal der Ordnung 5 und Länge 11. Dabei stellte sich heraus, dass mit drei Hülsen die Filterwirkung in den im Spektrum sichtbaren Dämpfungsmaxima um ca. 3 dB besser ist als mit nur einer Hülse. Es werden dabei maximale Dämpfungswerte von bis zu 17 dB gegenüber dem Fall ohne Ferrite erzielt. Zwischen den Dämpfungsmaxima, deren Abstand zueinander mit der elektrischen Länge der Struktur korreliert, ist die Abschwächung des Signals relativ gering, bis hin zu einer leichten Anhebung. Eine durchgehend hohe Dämpfung im gesamten Frequenzband ist nur möglich, wenn das gesamte Kabel vollständig mit Ferritkernen umschlossen wird.

## Literaturangaben

- [1] Al-Hamid, M.; Schulze, S.; Leone, M.: „A novel characterization method for cable ferrites using a TEM-waveguide test setup“. In: Proceedings of the 14th International Symposium on EMC, EMC Europe 2015, Dresden, Deutschland, 16.–22. August 2015, pp. 258–265
- [2] Schulze, S.; Al-Hamid, M.; Leone, M.: „Detailed study of different cable ferrite characterization methods using simulation and measurement“. In: Proceedings of the 16th International Symposium on EMC, EMC Europe 2017, Angers, Frankreich, 4.–8. September 2017
- [3] Schulze, S.; Al-Hamid, M.; Leone, M.: „Wirkung neuartiger Kabelferrite niedriger Permeabilität im Frequenzbereich bis 8 GHz“. In: Kongressband EMV 2020, Köln, 17.–19. März 2020, pp. 483–490

- [4] Schulze, S.; Al-Hamid, M.; Leone, M.: „Improved transmission-line model for a cable with an attached suppression ferrite”. In: Proceedings of the 17th International Symposium on EMC, EMC Europe 2018, Amsterdam, Niederlande, 27.–31. August 2018, pp. 828–832
- [5] Schulze, S.; Al-Hamid, M.; Leone, M.: “Network model of a transmission line with a cable ferrite for simulation in LTspice”. In: Proceedings of the Joint IEEE International Symposium on EMC, Signal & Power Integrity, and EMC Europe 2021, 26. Juli – 20. August 2021, pp. 1099–1104
- [6] Analog Devices LTspice®, <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [7] Golomb, S.: „How to number a graph,“ In: Graph Theory and Computing (ed. R. C. Read), Academic Press, New York, 1977, pp. 23–37
- [8] Wikipedia-Eintrag: [http://en.wikipedia.org/wiki/Golomb\\_ruler](http://en.wikipedia.org/wiki/Golomb_ruler)
- [9] Tesche, F. M.; Ianoz, M. V.; Karlsson T.: “EMC analysis methods and computational models,” John Wiley & Sons, Inc., Dezember 1996, ISBN: 978-0-471-15573-7