

Kompakte Streifenleitung zur Antennenkalibrierung im Frequenzbereich von 150 kHz bis 2 MHz

Dr.-Ing. Robert Geise, Prof. Dr. Achim Enders, Oliver Kerfin, M. Sc., Martin Harm, M. Sc.
Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit
Braunschweig, Deutschland, r.geise@tu-braunschweig.de

1 Einleitung

Für die messtechnische Kalibrierung wie auch für die Funktionsprüfung von Antennen ist die Bereitstellung genau bekannter Referenzfelder eine grundlegende Voraussetzung. In dieser Publikation wird eine kompakte Streifenleitung vorgestellt, die zur Erzeugung von Kalibrierfeldern in einem spezifizierten Frequenzbereich von 150 kHz bis 2 MHz geeignet ist. Aufgrund ihrer Mobilität kann die Leitung auch für Funktionsprüfungen in situ, d. h. an dem Ort, an welchem die zu untersuchende Antenne auch während des regulären Betriebs montiert ist, eingesetzt werden.

Um ein hohes Prüfvolumen z. B. für die Untersuchung von großen Loop-Antennen zu erreichen, ist die Auslegung der Streifenleitung auf eine möglichst hohe Feldhomogenität oberhalb des Streifenleiters ausgerichtet. Damit unterscheidet sich die hier gezeigte Streifenleitung grundlegend von typischen Streifenleitungsanordnungen, bei denen eine homogene Feldverteilung lediglich zwischen der Groundplane und dem Streifenleiter angestrebt wird. Mögliche Anwendungen des hier gezeigten Konzepts sind u. a. im Bereich der Avionik bei der Funktionsprüfung von ADF-Antennen (ADF, engl. *automatic direction finder*) gemäß der Norm RTCA DO-179 sowie in der Energietechnik bei der Kalibrierung von Loop-Antennen zur Messung niederfrequenter Magnetfelder zu finden.

Die Geometrie der Streifenleitung ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Aufbau besteht aus einem 6 cm breiten Messing-Streifenleiter, der in einem Abstand von 4,5 cm über einer metallischen Groundplane positioniert ist. Die Groundplane ist aus einer Aluminium-Wabenplatte hergestellt, wodurch die Streifenleitung trotz ihrer Länge von 205 cm gleichzeitig leicht sowie unempfindlich bei einem Transport ist und sich dementsprechend ideal für ortsungebundene Einsätze eignet. Das links abgebildete getaperte Ende der Groundplane geht auf eine spezifische Einbausituation der Streifenleitung in einer gegenüber externen Störeinflüssen geschirmten Kabine zurück, in welcher die Leitung vorzugsweise verwendet wird.

Die Streifenleitung wird über zwei N-Steckverbinder, Anschluss #1 und Anschluss #2, an das zu nutzende Messequipment angeschlossen. Im Rahmen der nachfolgend vorgestellten Untersuchungen ist der Anschluss #1 jeweils mit einer Signalquelle verbunden; Anschluss #2 wird mit einem variablen ohmschen Widerstand abgeschlossen. In den Messungen wie auch in den Simulationen erfolgt eine Auswertung der elektrischen und magnetischen Felder an den sieben in Abbildung 1 rot markierten Positionen.

In Abschnitt 2 dieses Betrags wird ein theoretisches Modell für Feldstärken oberhalb der Streifenleitung entwickelt. Mit diesem Modell können die magnetischen und elektrischen

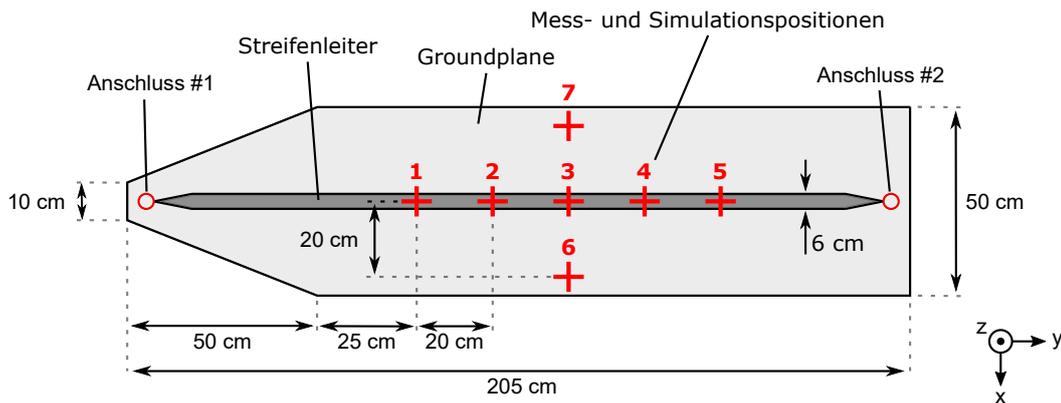


Bild 1: Geometrie der Streifenleitung und Positionen für die Bestimmung der elektrischen und der magnetischen Feldstärken

Feldstärken analytisch abgeschätzt werden, um Mess- und Simulationsergebnisse zu validieren. Dabei wird der Einfluss des gewählten Abschlusswiderstandes an Anschluss #2 auf das elektrische sowie das magnetische Feld oberhalb der Leitung diskutiert. Das Vorgehen zur messtechnischen Charakterisierung der Streifenleitung wird in Abschnitt 3 beschrieben. Hierzu erfolgt die Messung der elektrischen Feldstärke mit einem elektrooptischen Sensorsystem, das magnetische Feld wird mit einer Loop-Antenne aufgezeichnet. Ergänzend zu der messtechnischen Untersuchung erfolgt eine 3D-Feldsimulation der Leitung mittels der Simulationssoftware CST Microwave Studio [1]. Das entsprechende Simulationsmodell wird in Abschnitt 4 vorgestellt. Die Gegenüberstellung der analytischen Abschätzung, der Mess- sowie Simulationsergebnisse erfolgt in Abschnitt 5. Anhand dieses Vergleichs werden sowohl die Funktionalität der Streifenleitung als autarker Feldgenerator im Allgemeinen als auch die zuvor vorgestellte theoretische Modellierung der Leitung validiert. Abschnitt 6 gibt abschließend einen Ausblick auf zukünftige, weiterführende Untersuchungen an der hier vorgestellten Streifenleitung.

2 Theoretisches Modell der Streifenleitung

Die theoretische Modellierung der Streifenleitung beinhaltet die Bestimmung des Magnetfeldes mit Hilfe der Spiegeltheorie, wie im folgenden Abschnitt erläutert. Die Berechnung des elektrischen Feldes erfolgt über den Feldwellenwiderstand, welcher in Abschnitt 2.2 diskutiert wird.

2.1 Analytischer Ausdruck für das Magnetfeld

Die magnetische Feldstärke oberhalb der Streifenleitung kann aufgrund des niedrigen Frequenzbereichs, d. h. für den damit gegebenen quasi-statischen Fall, mit Hilfe der Bildtheorie abgeschätzt werden. Dabei wird die in Abbildung 2 gezeigte Geometrie zugrunde gelegt.

Das H-Feld außerhalb eines langen stromdurchflossenen Leiters im Ursprung $r = 0$ ist

$$H(r) = \frac{I}{2\pi r} . \quad (1)$$

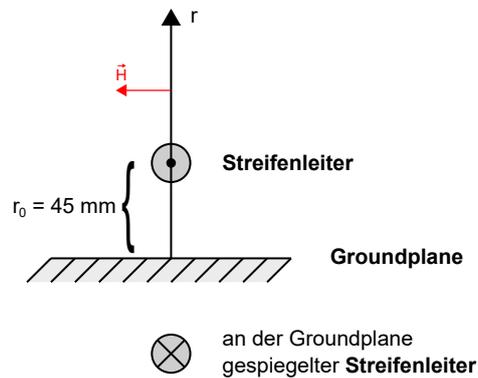


Bild 2: Vereinfachte Geometrie der Streifenleitung zur Abschätzung der magnetischen Feldstärke

Das resultierende Feld oberhalb der Streifenleitung kann in der Symmetrieebene (Positionen 1 bis 5 gemäß Abbildung 1) durch Substitution der Randbedingung der Groundplane mit einem gespiegelten Leiter wie folgt berechnet werden:

$$H(r) = \frac{I}{2\pi(r - r_0)} - \frac{I}{2\pi(r + r_0)} \quad (2)$$

Bei den in Abschnitt 3 beschriebenen Magnetfeldmessungen bzw. bei den entsprechenden Simulationen in Abschnitt 4 wird der Streifenleitung an Anschluss #1 eine Eingangsleistung von $+10 \text{ dBm} = 0,01 \text{ W}$ zugeführt. Der Strom in einem ideal angenommenen Streifenleiter beträgt bei dieser Leistung und einem Abschlusswiderstand von 50Ω

$$I = \sqrt{0,01 \text{ W} \cdot \frac{1}{50 \Omega}} = 0,014 \text{ A} \quad (3)$$

In einer Höhe von 20 cm oberhalb der Groundplane ergibt sich die magnetische Feldstärke damit gemäß Gleichung (2) zu

$$H(r = 20 \text{ cm}) = 5,32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (4)$$

Da bei der Streifenleitung die Feldlösung die TEM-Mode ist, kann das elektrische Feld aus dem Magnetfeld über den Feldwellenwiderstand berechnet werden. Dies sowie der Umstand, warum in Gleichung (3) der Abschluss- und nicht der Leitungswellenwiderstand verwendet wird, werden im folgenden Abschnitt erläutert.

2.2 Leitungswellen-, Abschluss- und Feldwellenwiderstand

Der Feldwellenwiderstand Z_{Feld} der Streifenleitung ergibt sich aus dem Verhältnis des elektrischen Feldes zum magnetischen Feld. Das elektrische Feld hängt von der Spannung zwischen dem Streifenleiter und der Groundplane, das Magnetfeld von dem Strom auf der Streifenleitung ab. Bei einer idealen Streifenleitung sind Spannung und Strom über den Leitungswellenwiderstand Z_{Leitung} verknüpft.

Nach [2] kann das Verhältnis von Z_{Leitung} zu dem Freiraumwellenwiderstand Z_0 aus der Geometrie der Streifenleitung berechnet werden. Für das Verhältnis des Abstandes zwischen der Groundplane und dem Streifenleiter zur Breite des Streifenleiters von $\frac{4,5 \text{ cm}}{6 \text{ cm}} = 0,75$ ergibt sich das Verhältnis des Freiraumwellenwiderstands zum Leitungswellenwiderstand zu

$$\frac{Z_0}{Z_{\text{Leitung}}} = 3,390. \quad (5)$$

Dementsprechend folgt für den Leitungswellenwiderstand

$$Z_{\text{Leitung}} = \frac{Z_0}{3,390} = \frac{377 \Omega}{3,390} \approx 110 \Omega. \quad (6)$$

Der Leitungswellenwiderstand der Streifenleitung weicht folglich von der 50Ω -Bezugsimpedanz des gängigen HF-Equipments ab. Aufgrund der geringen elektrischen Länge der Leitung in dem untersuchten Frequenzbereich bis maximal 2 MHz wird das Verhältnis von Spannung zu Strom hauptsächlich durch den verwendeten Abschlusswiderstand an Anschluss #2 der Leitung definiert. Als Folge stimmen die gemessene bzw. die simulierte Verteilung des elektrischen und des magnetischen Feldes nur dann mit der Feldverteilung einer idealen unendlich langen Leitung überein, wenn eine 110Ω -Abschlussimpedanz genutzt wird: Ausschließlich für diesen Fall ergibt sich der ermittelte Feldwellenwiderstand zu $Z_{\text{Feld}} = Z_0 = 377 \Omega$. Für alle anderen Abschlusswiderstände ergibt sich ein Feldwellenwiderstand abweichend von Z_0 :

$$Z_{\text{Feld}} = 3,390 \cdot Z_{\text{Abschluss}}. \quad (7)$$

Hieraus folgt der Feldwellenwiderstand bei Verwendung eines standardmäßigen 50Ω -Abschlusses zu 170Ω . Das elektrische Feld folgt aus dem Magnetfeld dementsprechend mit

$$E(r) = H(r) \cdot Z_{\text{Feld}}. \quad (8)$$

3 Messtechnische Charakterisierung der Streifenleitung

Die Absolutwerte für die elektrische und für die magnetische Feldstärke sowie die Feldhomogenität oberhalb der Streifenleitung werden mit Hilfe eines elektro-optischen Sensorsystems (eine nähere Beschreibung ist in [3] zu finden) und mit einer geschirmten Loop-Antenne ermittelt bzw. bewertet. Zur Aufnahme der Messgrößen wird ein vektorieller Netzwerkanalysator genutzt. Um aus den Messwerten auf die tatsächlich vorliegenden, absoluten Feldstärken schließen zu können, werden sowohl das elektro-optische Sensorsystem als auch die Loop-Antenne in einer TEM-Zelle kalibriert.

3.1 Messaufbau zur Bestimmung der Feldstärken oberhalb der Streifenleitung

Der elektro-optische Sensor wie auch die Loop-Antenne werden bei den Messungen in einem Abstand von 20 cm oberhalb der Groundplane positioniert; der elektro-optische Sensor wird dabei kopolar zur z-Komponente des elektrischen Feldes, die Loop-Antenne kopolar zur x-Komponente des magnetischen Feldes ausgerichtet. Die jeweiligen Messungen erfolgen an den in Abbildung 1 gekennzeichneten Positionen.

Die Messungen erfolgen in einem Frequenzbereich von 150 kHz bis 2 MHz mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator ENA 5080 von Keysight Technologies. Bei den Messungen ist Port 1 des Netzwerkanalysators über einen HF-Verstärker 50A220 von Amplifier Research mit dem Anschluss #1 der Streifenleitung und Port 2 mit dem elektro-optischen Sensorsystem bzw. der Loop-Antenne verbunden. Aufgenommen werden die Übertragungsgrößen $S_{21, \text{Leitung, Elopt}}(f)$ und $S_{21, \text{Leitung, Loop}}(f)$. Anschluss #2 der Leitung wird mit einem koaxialen 50Ω bzw. 110Ω -Widerstand abgeschlossen. Abbildung 3 zeigt die Realisierung der Streifenleitung sowie das Setup zur messtechnischen Charakterisierung der Streifenleitung mittels des elektro-optischen Sensors bzw. mit der Loop-Antenne.

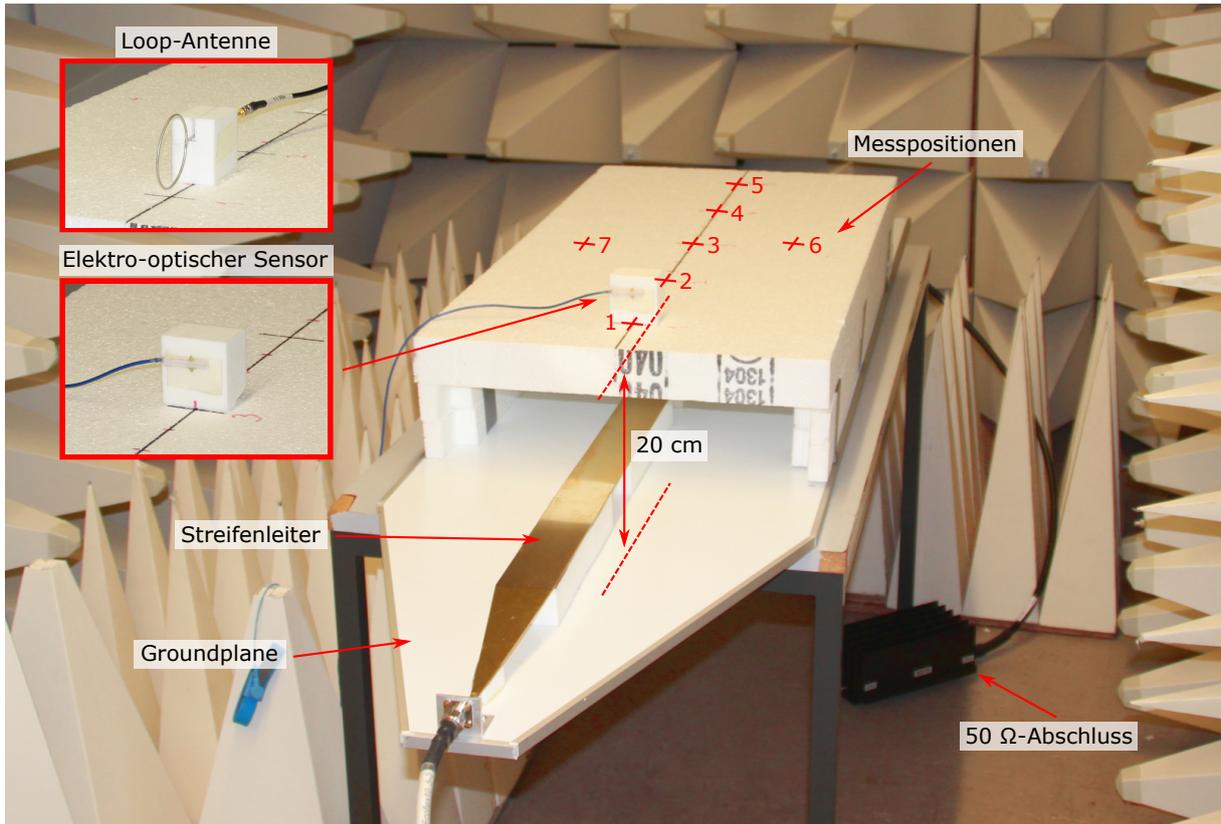


Bild 3: Setup zur messtechnischen Charakterisierung der Streifenleitung

3.2 Kalibrierung des elektro-optischen Sensors und der Loop-Antenne

Die Kalibrierung des elektro-optischen Sensors und der Loop-Antenne erfolgt in einer μ TEM- [3] bzw. TEM-Zelle mit einer jeweiligen Septumhöhe h_{Septum} . Hierzu werden die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen $S_{21, \text{Cal, Elopt}}(f)$ bzw. $S_{21, \text{Cal, Loop}}(f)$ vom Eingang der TEM-Zelle zum Anschluss des Sensors bzw. der Antenne mit Hilfe des vektoriellen Netzwerkanalysators ENA5080 gemessen.

Der Antennenfaktor des elektro-optischen Sensors $AF_{\text{Elopt}}(f)$ ist definiert als

$$AF_{\text{Elopt}}(f) = \frac{E_{\text{Mess}}(f)}{U_{\text{Mess}}(f)} = \frac{1}{h_{\text{Septum}} \cdot S_{21, \text{Cal, Elopt}}(f)}, \quad (9)$$

für den Antennenfaktor $AF_{\text{Loop}}(f)$ der Magnetfeldantenne gilt analog

$$AF_{\text{Loop}}(f) = \frac{H_{\text{Mess}}(f)}{U_{\text{Mess}}(f)} = \frac{1}{h_{\text{Septum}} \cdot 377 \Omega \cdot S_{21, \text{Cal, Loop}}(f)}. \quad (10)$$

Mit diesen Antennenfaktoren lassen sich das elektrische Feld $E_{\text{Leitung}}(f)$ und das magnetische Feld $H_{\text{Leitung}}(f)$ aus den mit dem Netzwerkanalysator (Ausgangsleistung $P_{\text{VNA, Out}}$) an der Streifenleitung gemessenen Größen ermitteln:

$$E_{\text{Leitung}}(f) = \sqrt{P_{\text{VNA, Out}} \cdot 50 \Omega} \cdot AF_{\text{Elopt}}(f) \cdot S_{21, \text{Leitung, Elopt}}(f), \quad (11)$$

$$H_{\text{Leitung}}(f) = \sqrt{P_{\text{VNA, Out}} \cdot 50 \Omega} \cdot AF_{\text{Loop}}(f) \cdot S_{21, \text{Leitung, Loop}}(f). \quad (12)$$

4 Feldsimulation der Streifenleitung

Zur Validierung der Streifenleitung und der Messtechnik für die elektrischen und magnetischen Felder wird die Struktur in CST Microwave Studio simuliert. Das Simulationsmodell und exemplarisch die Komponente des elektrischen Feldes in z-Richtung bei einer Simulationsfrequenz von 500 kHz und bei einer an Port 1 eingespeisten Leistung von +45 dBm sind in der Abbildung 4 zu sehen. In dem Simulationsmodell ist die Einspeisung mit einem diskreten Port mit vorgegebener Spannung, entsprechend der einzuspeisenden Leistung, realisiert. Der Abschlusswiderstand wird bei den Simulationen durch die Impedanz des Ports 2 vorgegeben und beträgt bei den dargestellten Feldbildern 110Ω .

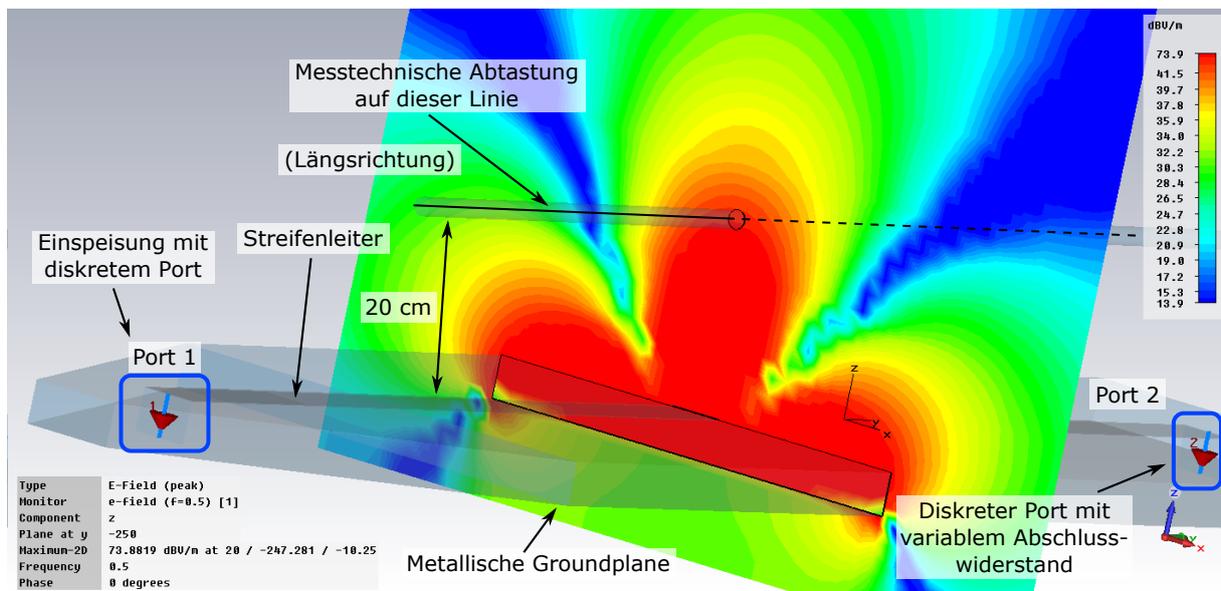


Bild 4: Simuliertes elektrisches Feld in Querrichtung der Streifenleitung

5 Analytisches Modell, Messung und Simulation – Feldstärken im Vergleich

Die in den vorangegangenen drei Kapiteln beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Feldstärken werden in diesem Abschnitt gegenübergestellt. Aus Dynamikgründen wird die Streifenleitung bei der Messung der elektrischen Feldstärke mit einer Leistung von +45 dBm gespeist. Die Messung der Magnetfelder erfolgt bei einer Leistung von +10 dBm. Diese Leistungen werden äquivalent auch für die theoretische Modellierung wie auch für die Simulation in CST verwendet.

Abbildung 5 und 6 zeigen die elektrische bzw. die magnetische Feldstärke an den Positionen 1 bis 7.

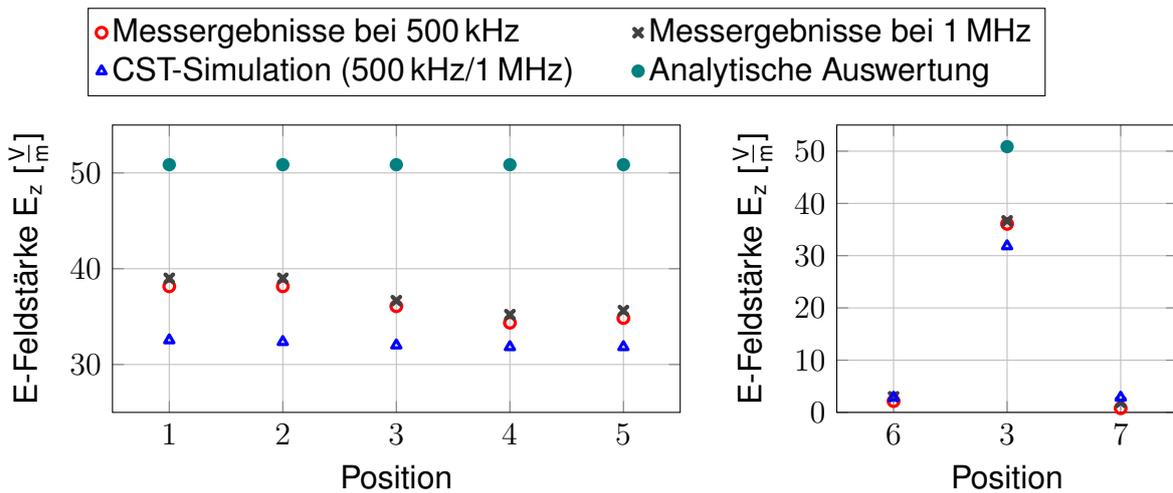


Bild 5: Elektrische Feldstärke in Längs- und Querrichtung bei einem Abschlusswiderstand von 50Ω

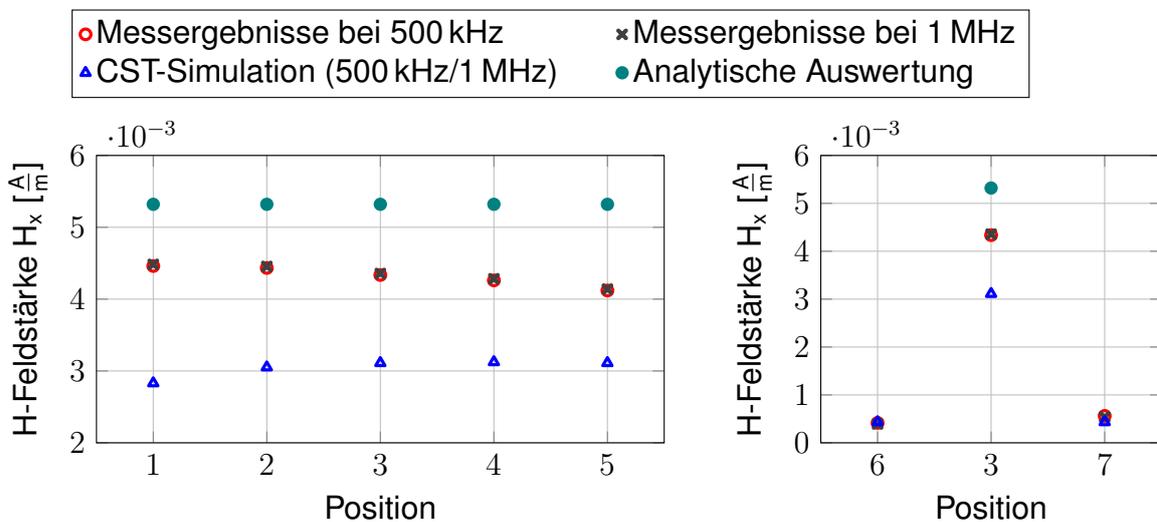


Bild 6: Magnetische Feldstärke in Längs- und Querrichtung bei einem Abschlusswiderstand von 50Ω

Alle drei Methoden zur Ermittlung der Feldstärke liefern gut übereinstimmende Ergebnisse mit einer maximalen Abweichung von weniger als 6 dB. Diese Kongruenz der Feldstärkewerte validiert die Funktionalität der Streifenleitung zur Bereitstellung von Referenzfeldern. Derartige Referenzfelder können beispielsweise für die Funktionsprüfung von ADF-Antennen und auch für die Kalibrierung von Feldsonden verwendet werden. Insbesondere für die Kalibrierung großer Loop-Antennen für den Einsatz im niederfrequenten Bereich, bei denen elektromagnetische Verkopplungen in herkömmlichen TEM-Zellen einen Unsicherheitsfaktor darstellen, ist die Streifenleitung sehr gut geeignet; aufgrund der hohen Feldhomogenität in Längsrichtung gilt dies auch für Objekte mit Längsabmaßen bis etwa 1 m.

Abbildung 7 zeigt die gemessenen und simulierten Feldwellenwiderstände sowie die Werte gemäß Gleichung (7) für Abschlussimpedanzen von 50Ω bzw. 110Ω . Auch hier zeigt sich, dass die frequenzunabhängigen Referenzfelder der TEM-Mode über den Bereich von 10 kHz bis 2 MHz bereitgestellt und mit hoher Genauigkeit in situ gemessen werden können.

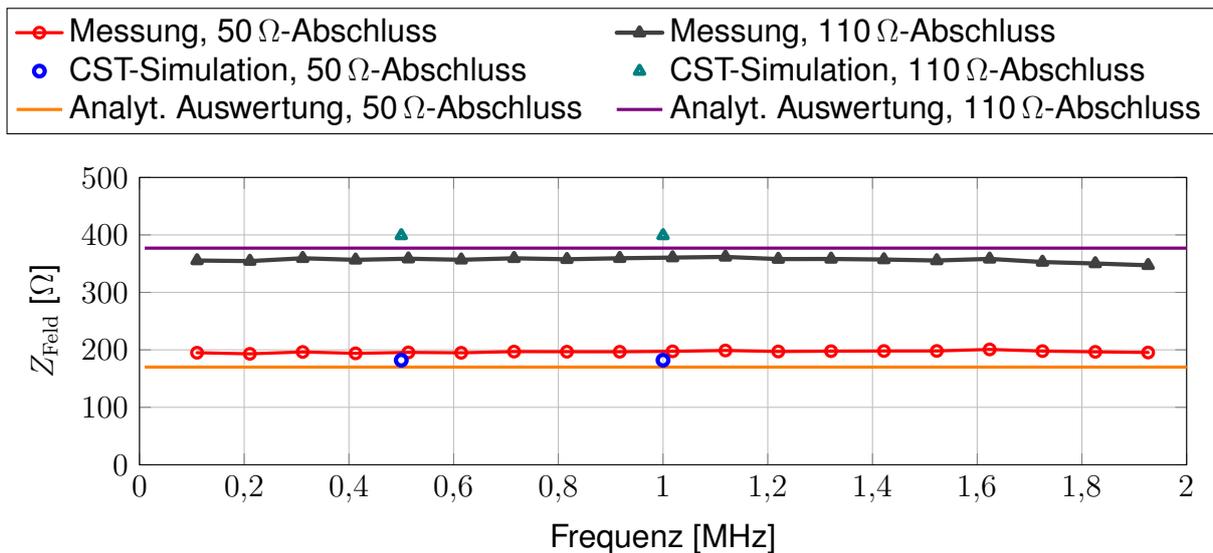


Bild 7: Feldwellenwiderstand der Streifenleitung für Abschlusswiderstände von 50 Ω und 110 Ω

6 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Streifenleitung zur Erzeugung niederfrequenter Referenzfeldstärken wurde realisiert und mess- sowie simulationstechnisch validiert. Abhängigkeiten des Feldwellenwiderstandes von dem Abschlusswiderstand der Leitung wurden theoretisch diskutiert und messtechnisch erfasst.

Soll ein Prüfling mit TEM-Feldverhältnissen beaufschlagt werden, so ist die Streifenleitung mit ihrer Leitungswellenimpedanz von 110 Ω abzuschließen. Auch in typischen 50 Ω-Umgebungen beträgt die Fehlanpassung am Eingang der Leitung dabei lediglich –8,5 dB.

Zukünftige Untersuchungen beschäftigen sich mit einer Festlegung von Prüfvolumina für unterschiedliche Objektgrößen, die aufgrund der Inhomogenität der Felder in Querrichtung erforderlich ist (vgl. Abbildungen 5 und 6).

Literatur

- [1] CST MICROWAVE STUDIO®, User Manual Version 2017, Nov. 2017, CST GmbH, Darmstadt, Germany, www.cst.com.
- [2] HILBERG, Wolfgang: *Charakteristische Größen elektrischer Leitungen: eine Einführung in die Berechnung von Wellenwiderständen, Kapazitäts- und Induktivitätsbelägen homogener elektrischer Leitungen vom Zylinder- und Kegeltyp*. Stuttgart : Verl. Berliner Union [u.a.], 1972. – ISBN 3–408–53061–0
- [3] THIELE, L. ; GEISE, R. ; SPIEKER, H. ; SCHÜÜR, J. ; ENDERS, A.: Electro-optical-sensor for near-field measurements of large antennas. In: *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, 2010. – ISSN 2164–3342, S. 1–5