

Rekonstruktion von Betrag und Phase von Leiterbahnströmen aus phasenlos gemessenen Nahfelddaten

M.Sc. Robert Jan Nowak, Technische Universität Dortmund, Deutschland

M.Sc. Anika Henke, Technische Universität Dortmund, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, Deutschland

1 Einleitung

Zur messtechnischen Untersuchung von feldgebundenen Störemissionen werden im Allgemeinen Antennenmessungen durchgeführt. Diese Messungen sind jedoch mit hohem Aufwand verbunden. So wird beispielsweise eine Absorberkammer oder ein Freifeld als Messumgebung benötigt.

Die Untersuchung des elektromagnetischen Nahfelds von Komponenten könnte demgegenüber eine attraktive Alternative zur Analyse von Störquellen sein. Einerseits ist die Aufnahme von Nahfelddaten nicht an eine besondere Messumgebung gebunden. Andererseits existieren Methoden zur Auswertung, mit denen das Ergebnis einer Antennenmessung prognostiziert werden kann. Near-Field-to-Far-Field-Transformationen stellen dabei einen möglichen Ansatz dar [1]. Ein grundlegend anderer Ansatz ist die Verwendung von Quellenmodellen. Hierbei werden zum einen äquivalente Modelle verwendet, die primär das Fernfeld beschreiben [2], [3]. Auf der anderen Seite werden aber auch Modelle eingesetzt, durch welche die tatsächlichen Quellen in Form der Stromverteilung bestimmten werden. Teilweise basieren diese Stromrekonstruktionsmethoden auf der Momentenmethode [4]. Es ist aber auch möglich mit Dipolen entsprechende Modelle aufzubauen [5], [6].

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung und Evaluation der Stromrekonstruktionsmethode basierend auf Dipole. Dazu wird eine Methode vorgestellt, die anhand von phasenlosen elektrischen und magnetischen Nahfelddaten die Stromverteilung auf einer Leiterstruktur bestimmt. Anhand von gemessenen Daten werden Rekonstruktionsergebnisse bestimmt und diskutiert. Es wird gezeigt, wie mithilfe dieser Ergebnisse die betrachtete Struktur durch ihre Impedanzen charakterisiert wird. In einer exemplarischen simulatorischen Untersuchung wird anschaulich dargestellt, wie auf der Basis dieser Informationen eine Entstörungsmaßnahme ausgelegt werden kann.

Die hier präsentierte Rekonstruktionsmethode ist eine Fortsetzung der Arbeiten aus [5]. In [5] wird anlehnt an beispielsweise [2] und [3] die Methodik von [6] weiterentwickelt, um mithilfe eines iterativen Algorithmus phasenlose Nahfelddaten auszuwerten, wobei lediglich simulatorische Daten verwendet werden. Im Gegensatz dazu wird hier das gemessene Nahfeld einer Struktur als Datengrundlage verwendet. Außerdem wird die Methode um das Feldmodell aus [7] erweitert, welches die zusätzliche Auswertung des elektrischen Feldes neben dem magnetischen Feld für die Stromrekonstruktion ermöglicht. Während [7] dies nur auf Basis von Simulationsdaten diskutiert, wird in diesem Beitrag erstmalig der Ansatz für gemessenen Daten genutzt.

Für den hier präsentierten Ansatz werden einige Annahmen getroffen. So wird davon ausgegangen, dass die Lage der Leiter bekannt ist. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Ausbreitungseigenschaften sowie die Wellenwiderstände der Leiter bekannt sind.

2 Rekonstruktionsmethode für phasenlose Nahfelddaten

Die hier verwendete Rekonstruktionsmethode basiert neben dem Feldmodell auch auf Nebenbedingungen und der Erweiterung um ein iteratives Verfahren zur Auswertung von phasenlosen Nahfelddaten. Diese drei Komponenten werden hier kurz beschrieben.

Bei der Formulierung des Feldmodells werden lediglich die Leiterbahnen als Feldquellen angenommen. Wie in [6] gezeigt werden die Leiterbahnen durch Segmente mit einer homogenen Strombelegung diskretisiert. Dieser Strom wird als Ursache für das vom Segment hervorgerufene Feld angenommen. Die Superposition der verschiedenen Feldquellen führt formal zu den Feldmodellen

$$(a) \quad \mathbf{H} = \Psi_{\text{HI}} \cdot \mathbf{I}_S \quad \text{und} \quad (b) \quad \mathbf{E} = \Psi_{\text{EI}} \cdot \mathbf{I}_S, \quad (1)$$

wobei die Vektoren \mathbf{E} und \mathbf{H} die verschiedenen Komponenten des elektrischen und magnetischen Nahfeldes enthalten und im Vektor \mathbf{I}_S alle Segmentströme gelistet sind. Entsprechend der gewählten Modellansätze zur Beschreibung des Feldes sind die Matrizen Ψ_{EI} und Ψ_{HI} definiert. Im Weiteren wird das elektrische Feld durch Punktladungsquellen modelliert [7]. Das magnetische Feld wird auf Basis von Hertzischen Dipolen beschrieben [6].

Als grundlegende Nebenbedingung wird von der Strombelegung der Segmente gefordert, dass ihre Verteilung der Leitungstheorie entspricht. Wie in [6] gezeigt wird, werden die Ströme durch hin- und rücklaufenden Stromwellen substituiert, woraus folgende Beschreibung resultiert:

$$\mathbf{I}_S = \Psi_{\text{TL}} \cdot \mathbf{I}_W \quad (2)$$

Der Vektor \mathbf{I}_W enthält dabei die hin- und rücklaufenden Stromwellen und in der Matrix Ψ_{TL} sind die entsprechenden Exponentialausdrücke zur Abbildung der Segmentströme notiert. Zusätzlich sind in \mathbf{I}_W auch Ströme berücksichtigt, um kurze Leitungsabschnitte wie beispielsweise Vias durch eine homogene Stromverteilung darzustellen.

Grundlegend führt die Kombination der Substitution von (2) in die Feldmodelle von (1) zu Gleichungen, die bei bekannten Felddaten als inverses Problem betrachtet werden können. Zur simultanen Betrachtung von elektrischen und magnetischen Felddaten wird wie in [7] das folgende inverse Problem formuliert:

$$\left[\frac{1}{\|\mathbf{H}\|_2} \mathbf{H} \quad \frac{1}{\|\mathbf{E}\|_2} \mathbf{E} \right]^T = \left[\frac{1}{\|\mathbf{H}\|_2} \Psi_{\text{HI}} \quad \frac{1}{\|\mathbf{E}\|_2} \Psi_{\text{EI}} \right]^T \Psi_{\text{TL}} \cdot \mathbf{I}_W \Leftrightarrow \mathbf{F} = \Psi \cdot \mathbf{I}_W \quad (3)$$

Im Weiteren wird das inverse Problem verkürzt mit \mathbf{F} und Ψ zur Repräsentation der Felddaten und der Feldbeschreibung notiert.

Bei der Lösung von inversen Problemen ist grundlegend zu beachten, dass mindestens genauso viele oder mehr Felddaten vorliegen, wie Unbekannte respektive Einträge im Vektor \mathbf{I}_W existieren. Nur dann kann eine eindeutige Lösung für das Problem

$$\hat{\mathbf{I}}_W = \arg \min_{\tilde{\mathbf{I}}_W} \|\Psi \cdot \tilde{\mathbf{I}}_W - \mathbf{F}\|_2 \quad \text{mit} \quad \mathbf{K} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_W = 0 \quad (4)$$

gefunden werden. Bei diesem Problem wird angenommen, dass die Felddaten \mathbf{F} in Betrag und Phase bekannt sind. Außerdem wird eine weitere Nebenbedingung an das Rekonstruktionsergebnis gestellt: Durch die Matrix \mathbf{K} wird wie in [5] die Kontinuität von Strom und Spannung an den Übergangsstellen zwischen den durch die Leitungstheorie beschriebenen Bereichen gefordert.

Ist die Phaseninformation der Felddaten nicht bekannt, so kann das inverse Problem mit dem iterativen Algorithmus aus [5] gelöst werden. Dieser ist im Folgenden kurz beschrieben und erweitert auf die Formulierung aus (3). Ausgehend von einer initialen Feldverteilung $\mathbf{F}^{[0]}$ wird iterativ die Lösung von

$$\hat{\mathbf{I}}_W^{[i]} = \arg \min_{\mathbf{I}_W} \|\Psi \cdot \tilde{\mathbf{I}}_W - \mathbf{F}^{[i-1]}\|_2 \text{ mit } \mathbf{K} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_W = 0, \quad \forall i \in \mathbb{N}^* \quad (5)$$

bestimmt. Anhand der Lösung $\hat{\mathbf{I}}_W^{[i]}$ wird mit (1) und (2) eine komplexwertige Feldverteilung abgeschätzt, welche eine rekonstruierte Phaseninformation enthält:

$$\hat{\mathbf{F}}^{[i]} = \Psi \cdot \hat{\mathbf{I}}_W^{[i]} \quad (6)$$

Diese Information wird als Phasenverteilung für eine neue Feldverteilung

$$\mathbf{F}^{[i+1]} = |\mathbf{F}^{[i]}| \circ \exp(j \cdot \arg \hat{\mathbf{F}}^{[i]}) \quad (7)$$

angenommen. Hierbei wird das Hadamard-Produkt verwendet, um die komponentenweise Multiplikation darzustellen. Mit dieser wird im nächsten Iterationsschritt die Lösung von (5) bestimmt.

Für die erste Iteration ($i = 1$) muss die initiale Feldverteilung $\mathbf{F}^{[0]}$ definiert werden. Wie in [5] wird eine gleichverteilte zufällige Phasenverteilung zwischen $(-180^\circ, 180^\circ)$ angenommen und diese mit den gemessenen Beträgen der Felddaten \mathbf{H}_{mess} und \mathbf{E}_{mess} verknüpft:

$$\mathbf{F}^{[0]} = \left[\begin{array}{c} \frac{1}{\|\mathbf{H}_{\text{mess}}\|_2} \mathbf{H}_{\text{mess}} \\ \frac{1}{\|\mathbf{E}_{\text{mess}}\|_2} \mathbf{E}_{\text{mess}} \end{array} \right] \circ \exp \left(j \cdot [\varphi_k^{[0]}]_{k=1, \dots, M+N} \right), \quad \varphi_k^{[0]} \sim \mathcal{U}(-180^\circ, 180^\circ) \quad (8)$$

Dabei beschreiben M bzw. N die Anzahl der magnetischen bzw. elektrischen Felddaten. Um den iterativen Algorithmus abzubrechen, wird anhand von zwei numerischen Kriterien eine Abbruchbedingung definiert. Ähnlich wie in [5] wird zunächst die mittlere relative Änderung der berechneten Lösung des inversen Problems betrachtet:

$$\sigma_{\Delta I}^{[i]} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| \frac{\hat{I}_k^{[i]} - \hat{I}_k^{[i-1]}}{\hat{I}_k^{[i]}} \right|, \quad \hat{\mathbf{I}}_W^{[i]} = [\hat{I}_k^{[i]}]_{k=1, \dots, K} \quad (9)$$

K ist dabei die Anzahl der Einträge von $\mathbf{I}_W^{[i]}$. Daneben wird die mittlere (minimale) Änderung der rekonstruierten Phaseninformation ausgewertet:

$$\sigma_{\Delta \varphi}^{[i]} = \frac{1}{M+N} \sum_{k=1}^{M+N} \min \{ |\Delta \varphi_k^{[i]}|, 2\pi - |\Delta \varphi_k^{[i]}| \}, [\Delta \varphi_k^{[i]}]_{k=1, \dots, M+N} = \arg \hat{\mathbf{F}}^{[i]} - \arg \hat{\mathbf{F}}^{[i-1]} \quad (10)$$

In den Untersuchungen dieses Beitrages wird folgende Abbruchbedingung definiert:

$$\left(\sigma_{\Delta I}^{[i]} < 1\% \right) \wedge \left(\sigma_{\Delta \varphi}^{[i]} < \frac{2\pi}{1000} \right) \quad (11)$$

Anhand der Lösung des inversen Problems kann auch die Spannungsverteilung abgeleitet werden [6]. Hierzu wird lediglich der Wellenwiderstand benötigt, um die hin- und rücklaufenden Stromwellen in Spannungswellen zu übertragen. Wie in [6] gezeigt wird, können somit beispielsweise Terminierungsimpedanzen bestimmt werden.

3 Anwendung der Rekonstruktionsmethode

In diesem Kapitel wird die Rekonstruktionsmethode auf gemessene Nahfelddaten einer Leiterstruktur angewendet, die auch schon in [6] untersucht wurde. In Abbildung 1 ist diese dargestellt. Die drei verwendeten Leiter bestehen aus versilberten Kupferdrähten mit einem Durchmesser von 0,39 mm. Angeregt werden die Leiter über SMB-Buchsen bei $x = 30$ mm. Die Leiter sind am anderen Ende jeweils mit 50Ω abgeschlossen.

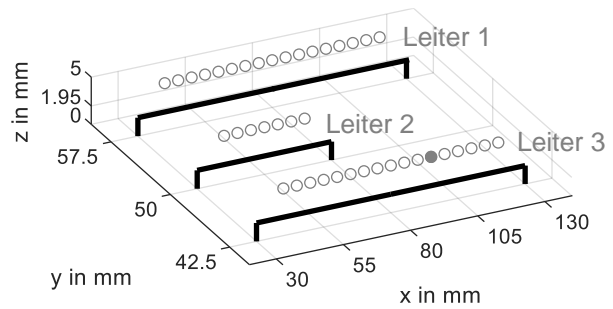
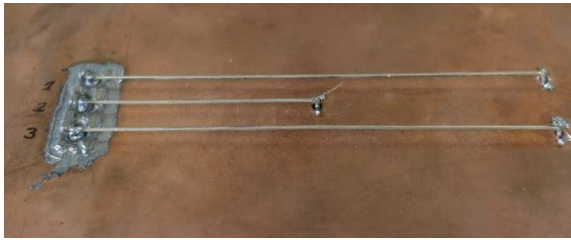


Abbildung 1: Betrachtete Leiterstruktur (links) und schematischer Aufbau mit geometrischen Angaben sowie Darstellung der Messpunkte und des Referenzpunktes als ausgefüllter Messpunkt (rechts).

In Abbildung 2 wird der Messaufbau schematisch dargestellt. Zur Anregung der Struktur sowie Messung des elektromagnetischen Nahfeldes wird der Vektornetzwerkanalysator (VNA) Keysight (Agilent) E5071B verwendet. Mithilfe des Powersplitters Mini-Circuits ZA3CS-400-3W-S werden die drei Leiter vom Tor 1 des VNAs phasengleich angeregt. Die Ausgangsleistung des VNAs beträgt dabei 0 dBm. Das Signal der Feldsonde wird verstärkt und am zweiten Tor des VNAs gemessen. Zur Messung des magnetischen Feldes wird die aktive Feldsonde MFA-R 0.2-75 mit integriertem Verstärker der Firma LANGER EMV eingesetzt. Für die Aufnahme des elektrischen Feldes werden die passive Sonde RS-E 10 von RHODE & SCHWARZ sowie der Vorverstärker PA 303 von LANGER EMV verwendet.

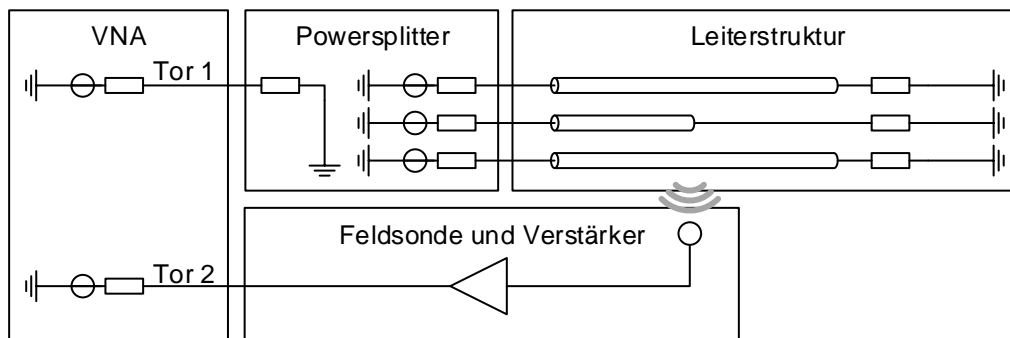


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Anregung der Leiterstruktur sowie der Feldmessung.

Das Nahfeld wird direkt über den Leitern an 41 Punkten gemessen, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Die Messpunkte sind im Abstand von 5 mm äquidistant verteilt und liegen 5 mm über der Massefläche. Es werden jeweils das vertikale elektrische Feld (in z -Richtung) sowie die horizontale Magnetfeldkomponente (in y -Richtung) gemessen.

Zur Auswertung der Messdaten wird ein zufälliger Punkt als Referenzpunkt ausgewählt. Dieser ist in Abbildung 1 als ausgefüllter Messpunkt hervorgehoben. Die Messwerte an diesem Punkt werden zur Kalibration des Aufbaus bzw. der Sonden verwendet. Später wird die Phasenlage des gemessenen Magnetfeldes an diesem Punkt als Referenzphase verwendet.

Zur Kalibration wird die Struktur in CONCEPT-II [8] aufgebaut und simuliert. Hierbei wird die Anregung durch Thevenin-Netzwerke approximiert. Mithilfe der simulierten elektrischen und magnetischen Feldstärke am Referenzpunkt wird der Übertragungsfaktor der Feldsonden bestimmt. Daneben wird die simulierte Stromverteilung im Weiteren als Referenz für die rekonstruierte Stromverteilung verwendet.

Die Felddaten werden im Frequenzbereich von 30 MHz bis 100 MHz aufgenommen. In Abbildung 3 und Abbildung 4 ist der Betrag des gemessenen elektrischen und magnetischen Nahfeldes dargestellt. Es wird zudem die Abweichung der Beträge gegenüber den Simulationsdaten angegeben. Hierbei ist grundsätzlich eine geringe Abweichung festzustellen. Auffällige Abweichungen der Felddaten sind beim magnetischen Feld über Leiter

1 und beim elektrischen Feld über Leiter 2 zu verzeichnen. Diese Abweichungen können durch Ungenauigkeiten der Positionierung der Feldsonde bei der Messung sowie Abweichungen zwischen dem realen Messaufbau und dem Simulationsmodell erklärt werden.

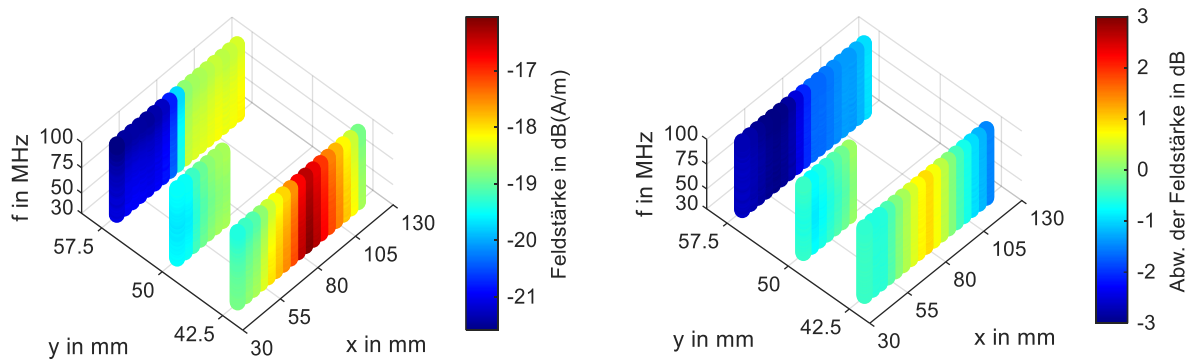


Abbildung 3: Betrag der gemessenen magnetischen Felddaten (links) und Abweichung gegenüber den simulierten Nahfelddaten (rechts).

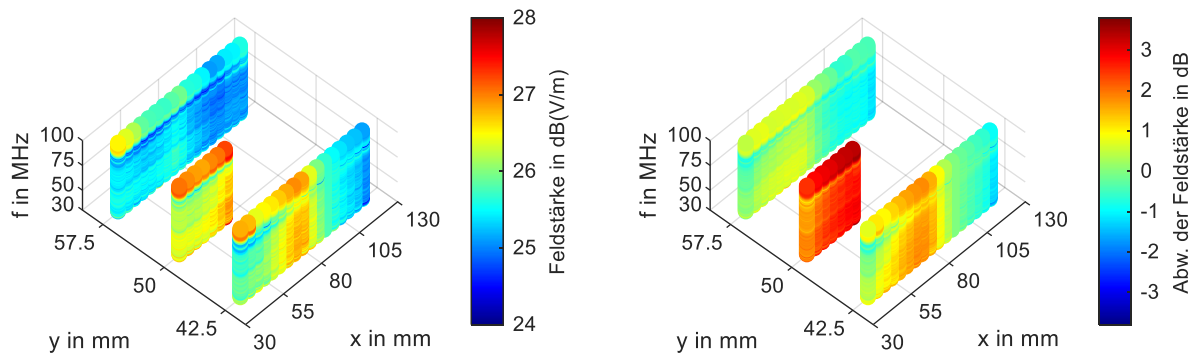


Abbildung 4: Betrag der gemessenen elektrischen Felddaten (links) und Abweichung gegenüber den simulierten Nahfelddaten (rechts).

Für die Stromrekonstruktion wird die gemessene Phaseninformation der Felddaten verworfen und eine zufällig gleichverteilte Phasenverteilung angenommen. Das Rekonstruktionsmodell besteht aus 250 horizontalen und 18 vertikalen Segmenten respektive Feldquellen. Durch diese feine Diskretisierung wird das Nahfeld der Anordnung hinreichend gut beschrieben. Wie auch schon in [6] werden für Leiter 1 und 3 jeweils zwei gleich langen Bereiche angenommen, in denen die Stromverteilung durch die Leitungstheorie beschrieben wird.

Zunächst werden die Rekonstruktionsergebnisse über den gesamten betrachteten Frequenzbereich bestimmt und untersucht. Hierbei wird einmalig eine initiale Phasenverteilung angenommen. Daher ist zu beachten, dass die präsentierten Ergebnisse nicht reproduzierbar sind. Die Stromverteilung wird für 71 Frequenzen rekonstruiert. Die Entwicklung der Kriterien der Abbruchbedingung sind in Abbildung 5 gezeigt. Beim 265. Iterationsschritt wird die Abbruchbedingung erfüllt. Die rekonstruierte Stromverteilung ist in Abbildung 6 dargestellt. Wie bei den Felddaten wird die Abweichung gegenüber den Simulationsdaten ebenfalls dargestellt.

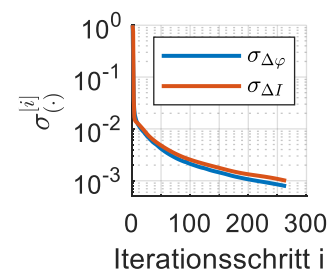


Abbildung 5: Entwicklung der Abbruchkriterien.

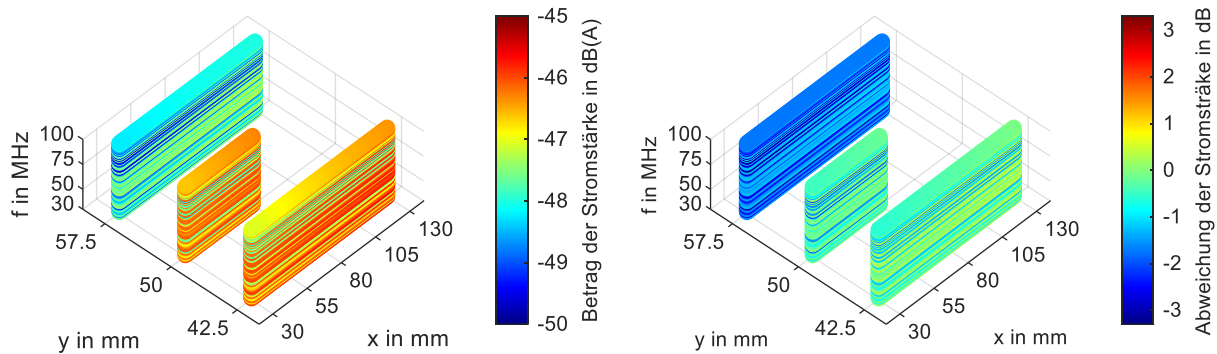


Abbildung 6: Rekonstruierte Stromverteilung auf Basis der gemessenen als phasenlos angenommenen Nahfelddaten (links) und Abweichung gegenüber der simulierten Stromverteilung (rechts).

Für Leiter 2 und 3 werden betragsmäßig ähnliche Stromverteilungen bestimmt, die rekonstruierte Stromverteilungen von Leiter 1 sind hingegen um etwa 3 dB geringer. Für Leiter 2 und 3 liegt die Abweichung im Bereich von ± 1 dB und ist damit sehr gering. Die Abweichung der Stromverteilung von Leiter 1 liegt im Bereich von 1 bis 3 dB. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichung ist in den verwendeten Felddaten gegeben: Die gemessenen magnetischen Felddaten über Leiter 1 zeigen eine ähnliche Abweichung. Auf Basis des Rekonstruktionsergebnisses werden auch die Eingangs- und Terminierungsimpedanz der Leiter bestimmt. Diese sind in Abbildung 7 dargestellt. Hierbei wird der Real- und Imaginärteil der Impedanzen über der Frequenz präsentiert.

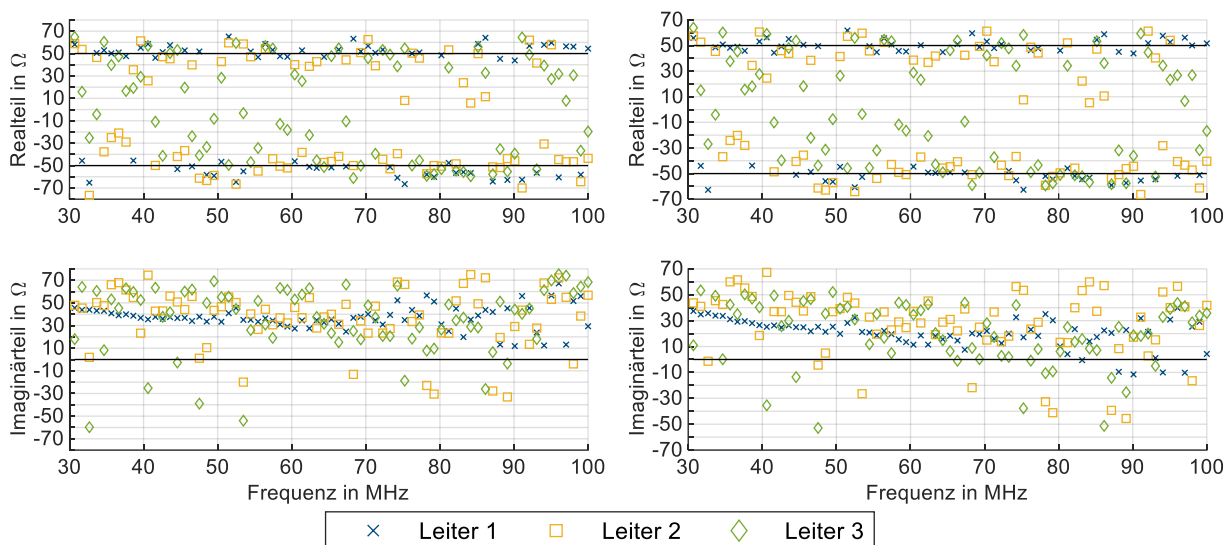


Abbildung 7: Rekonstruierte Eingangsimpedanzen (links) und Terminierungsimpedanzen (rechts) der Leiter dargestellt in Real- und Imaginärteil.

105 der 213 Ergebnisse für die Eingangs- bzw. Terminierungsimpedanz fallen dadurch auf, dass sie einen negativen Realteil beinhalten. Dieses Merkmal zeigt sich bei den verschiedenen Ergebnissen gleichermaßen für die Eingangs- und Terminierungsimpedanz. Jedoch ist anzumerken, dass die Realteile betragsmäßig geringe Abweichungen gegenüber dem erwarteten Widerstand von 50Ω aufzeigen. Eine mögliche Erklärung für diese nicht physikalischen Ergebnisse könnte in der rekonstruierten Phaseninformation liegen. Diese könnte einen Fluss der Wirkleistung vom Terminierungsnetzwerk zum Anregungsnetzwerk implizieren. Der Imaginärteil der rekonstruierten Impedanzen zeigt diese Auffälligkeit nicht: Nur vereinzelt beinhalten die rekonstruierten Impedanzen einen negativen Imaginärteil. Eine besondere Auffälligkeit zeigen die rekonstruierten Impedanzwerte gegenüber der rekonstruierten Stromverteilung: Obwohl die Stromverteilung auf Leiter 1 eine

größere Abweichung gegenüber den Referenzdaten zeigt, haben die bestimmten Impedanzen eine geringere Streuung als die Impedanzen von Leiter 2 oder 3. Nach der Untersuchung für den gesamten betrachteten Frequenzbereich werden nun die Nahfelddaten für 100 MHz umfassender ausgewertet. Hierzu werden 100 verschiedene zufällige initiale Phasenverteilungen angenommen und jeweils die Lösungen des iterativen Algorithmus bestimmt. Zudem wird vorgegeben, dass der iterative Algorithmus nach spätestens 300 Iterationsschritten abbricht. In Abbildung 8 werden die verschiedenen Lösungen sowie die Entwicklung der Kriterien der Abbruchbedingung gezeigt. Diese Daten werden für die verschiedenen Lösungen jeweils überlagert transparent dargestellt, um neben dem Datenwerten auch die Häufigkeit einer Lösung anhand der Farbinsintensität darzustellen.

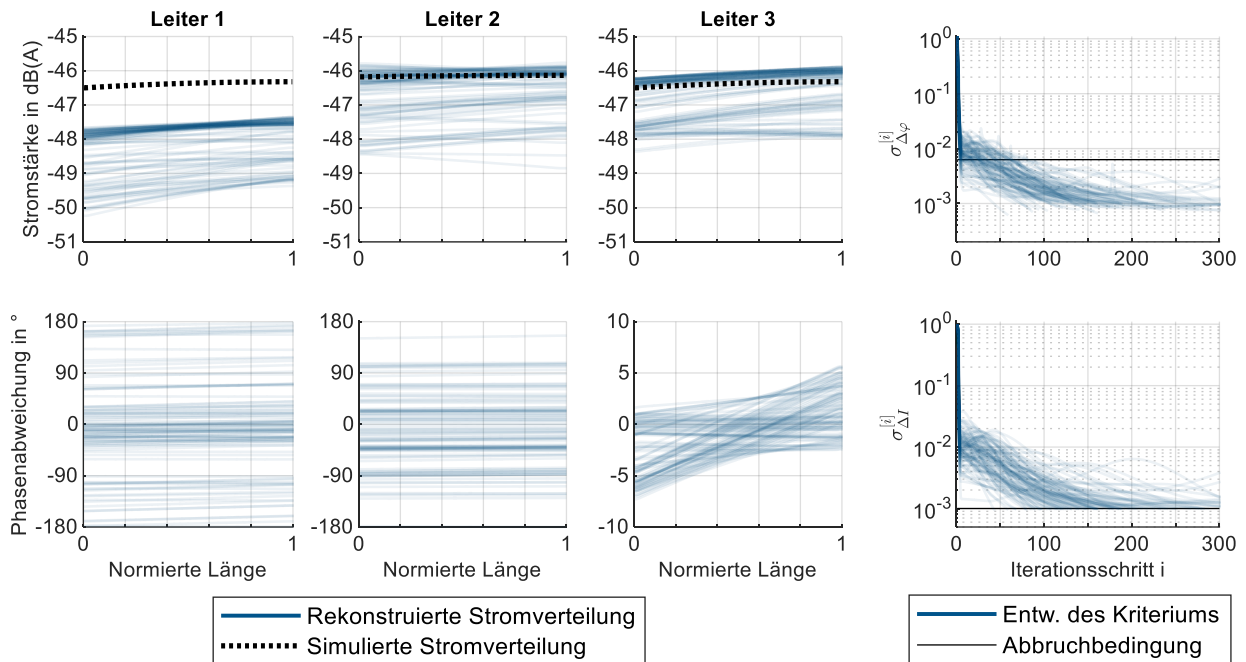


Abbildung 8: 100 verschiedene Rekonstruktionsergebnisse für verschiedene initiale Phasenverteilungen bei 100 MHz (links) und die Entwicklung der Abbruchkriterien des iterativen Algorithmus (rechts).

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass 91 von 100 Ausführungen des iterativen Algorithmus durch das Erfüllen der Abbruchbedingung terminiert werden. Da die Entwicklung der Kriterien aus (9) und (10) überwiegend eine monoton fallende Tendenz zeigen, ist von einer Konvergenz des iterativen Verfahrens auszugehen. Die verschiedenen bestimmten Stromverteilungen zeigen jedoch, dass der Algorithmus abhängig von den Startwerten in verschiedene Lösungen konvergieren kann.

Der Betrag der bestimmten Ströme zeigt für alle Leiter ein ähnliches Bild: Die Lösungen liegen in einem etwa 2 dB breiten Band und es kommt zu einer Häufung von Lösungen am oberen Rand des Bands. Insbesondere für Leiter 2 und Leiter 3 ist die Übereinstimmung dieser häufig auftretenden Lösungen mit der simulierten Stromverteilung sehr hoch. Bei Leiter 1 liegt das Band der Lösungen etwa 1 dB unterhalb der simulierten Stromverteilung. Insgesamt wird also der Betrag der Stromverteilung gut rekonstruiert.

Die rekonstruierte Phase des Stroms zeigt für die verschiedenen Leiter unterschiedliche Bilder. Während die Ergebnisse für Leiter 3 Abweichungen von nur wenige Grad zeigen, kommt es zu größeren Abweichungen für die anderen Leiter. Die Abweichungen für Leiter 2 begrenzen sich auf etwa $\pm 90^\circ$. Hierbei ist jedoch eine leichte Häufung von Rekonstruktionsergebnisse festzustellen, die eine Abweichung als $\pm 30^\circ$ haben. Zu einer ähnlichen Häufung kommt es auch für die bestimmten Phasenverteilungen von Leiter 1. Jedoch variieren hier die Ergebnisse über den gesamten Definitionsbereich der Phase.

Diese sehr unterschiedlichen Ergebnisse der Phasenverteilung für die verschiedenen Leiter können durch die Wahl der Referenzphase erklärt werden. Da der ausgewählte Referenzpunkt direkt über Leiter 3 liegt (vgl. Abbildung 1), kommt es aufgrund der örtlichen Nähe und der damit einhergehenden starken Kopplung zwischen Feld und Strom zu einem geringen Fehler der Phase. Hingegen ist die Kopplung zwischen Feld am Referenzpunkt und Strom in Leiter 2 schwächer. Die Vorgabe der Phasenlage wird somit dominiert von der zufälligen rekonstruierten Phaseninformation des Feldes direkt über den Leiter. Dies zeichnet sich bei Leiter 3 noch stärker ab. Eine Möglichkeit die rekonstruierte Phaseninformation zu optimieren, besteht in Verwendung der Information, dass die Leiter phasengleich angeregt werden.

4 Diskussion einer Entstörungsmaßnahme

In diesem Kapitel wird anhand der Rekonstruktionsergebnisse exemplarisch eine Maßnahme ausgelegt, welche die Störaussendung der betrachteten Anordnung reduziert. Als Störgröße wird das elektrische Feld in etwa 1 m Abstand in einer Höhe von 10 cm über der idealen Massefläche angenommen. Orientiert an den Koordinaten in Abbildung 1 wird das elektrische Feld am Punkt (0,08 m|1 m|0,1 m) ausgewertet. Ziel der Maßnahme ist die Reduktion der horizontalen und vertikalen elektrischen Feldkomponente. Die Untersuchungen erfolgen mit CONCEPT-II.

Als Maßnahme werden die Anregungsnetzwerke der Leiter um Kapazitäten erweitert, wie in Abbildung 9 gezeigt wird. Diese Kapazitäten sollen die Ströme, die im Originalaufbau über die Leiter fließen, zur Massefläche hin abführen. Entsprechend wird die horizontale elektrische Feldstärke gedämpft, die sich proportional zum Strom auf den Leitern verhält. Es wird aber auch die vertikale elektrische Feldstärke gedämpft. Zum einen kommt es zur Kompensation der Felder, die durch den Strom auf den vertikalen Pfaden des Anregungsnetzwerk und der Kapazität entstehen (bei 30 mm und 29,9 mm in Abbildung 9). Aber auch das Feld des vertikalen Strompfades der Terminierung (bei 80 mm bzw. 130 mm in Abbildung 9) wird reduziert, da dieser Strom geringer wird.

Die Kapazität soll so dimensioniert werden, dass ihre Impedanz mindestens um den Faktor 10 kleiner ist als die Eingangsimpedanz der Leitungen. Um konkrete Werte für die Eingangsimpedanz der Leiter zu erhalten, werden diese als Betragsmittelwert der rekonstruierten Impedanzen abgeschätzt. Diese Werte sind in Tabelle 1 gelistet. Zur Auslegung der Kapazität wird die gemittelte Impedanz von Leiter 3 gewählt, da diese gegenüber den anderen Leitern den geringsten Wert hat. Es folgt damit als notwendige Kapazität

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C} < \frac{Z_{in,mean}}{10} \Leftrightarrow C > \frac{10}{\omega \cdot Z_{in,mean}} \stackrel{f=30 \text{ MHz}}{\approx} 846 \text{ pF}. \quad (12)$$

In Abbildung 10 sind die simulierten elektrischen Felder des Originalaufbaus und des entstörten Aufbaus dargestellt. Wie oben beschrieben ist eine Reduktion sowohl für die horizontale als auch vertikale Feldkomponente möglich.

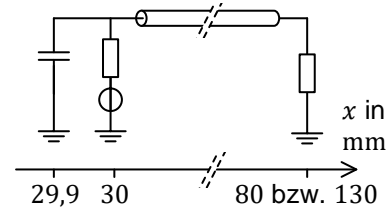


Abbildung 9: Schematische Darstellung der hinzugefügten Kapazität als Ableitungspfad.

	Leiter 1	Leiter 2	Leiter 3
Abschätzung Eingangsimpedanz	66,3 Ω	65,2 Ω	62,7 Ω

Tabelle 1: Mittelwert der Beträge der bestimmten Eingangsimpedanzen

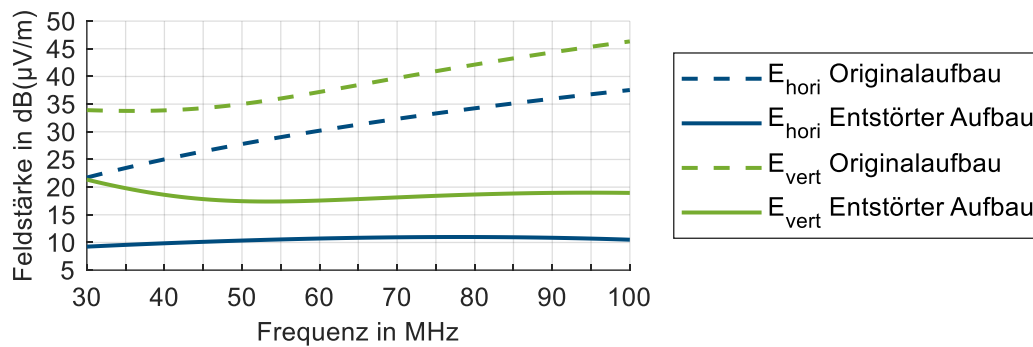


Abbildung 10: Horizontale und vertikale E-Feldkomponente des Originalaufbaus sowie des entstörten Aufbaus.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird eine Rekonstruktionsmethode zur Bestimmung der Stromverteilungen auf Leitern anhand von phasenlosen elektromagnetischen Nahfelddaten vorgestellt. Dieses Verfahren wird verwendet um gemessene elektrische und magnetische Felddaten einer Rundleiterstruktur im Frequenzbereich von 30 MHz bis 100 MHz auszuwerten. Die rekonstruierten Stromverteilungen zeigen eine hohe Übereinstimmung mit Simulationsdaten, die als Referenz angenommen werden. Darüber hinaus werden die Eingangs- und Terminierungsimpedanzen der Leiterstruktur aus den bestimmten Stromverteilungen abgeleitet und diskutiert. Auch hier zeigt sich grundsätzlich eine gute Qualität der Ergebnisse, wobei für den Realteil der Impedanzen teilweise ein falsches Vorzeichen identifiziert wird. In einer detaillierteren Auswertung der Daten zeigt sich zudem, dass die Phase der Leiterbahnströme gut rekonstruiert werden kann. Abschließend werden die Rekonstruktionsergebnisse genutzt, um exemplarisch eine Entstörungsmaßnahme auszulegen. Hierbei zeigt sich das Potential der Informationen, welche mithilfe der Rekonstruktionsmethode gewonnen werden können.

In weiteren Arbeiten kann die Rekonstruktionsmethode noch verbessert werden, um Ergebnisse zu vermeiden, die fälschlicherweise eine Impedanz mit negativen Realteilen annehmen. Neben einer näheren Untersuchung solcher Lösungen ist es sinnvoll, Nebenbedingungen zu definieren, die solche nicht physikalische Lösungen verhindern würde. Daneben gilt es, die Methode weiter zu evaluieren. Hierzu sollten auch komplexere Strukturen analysiert werden.

Literatur

- [1] V. Volski, B. Ravelo, V. A. E. Vandenbosch und D. Pissort: Investigation on planar near-to-far-field transformations for EMC applications. In *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lissabon* (2015).
- [2] Y.-F. Shu, X.-C. Wei, R. Yang, E.-X. Liu: An Iterative Approach for EMI Source Reconstruction Based on Phaseless and Single-Plane Near-Field Scanning. In *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Jg. 60 (2018), S. 937 – 944, doi: 10.1109/TEMC.2017.2756902.
- [3] J. Zhang und J. Fan: Source Reconstruction for IC Radiated Emissions Based on Magnitude-Only Near-Field Scanning. In *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Jg. 59 (2017), S. 557 – 566, doi: 10.1109/TEMC.2016.2638760.

- [4] Q. Huang, L. Li, X. Yan, B. Bae, H. Park, C. Hwang, und J. Fan: MoM-Based Ground Current Reconstruction in RFI Application. In *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Jg. 60 (2018), S. 937 – 944, doi: 10.1109/TEM.2018.2791539.
- [5] R. Nowak und S. Frei: Reconstruction of Current Distribution on a Given Conductor Structure Using Frequency Domain Near-Field Data without Phase Information. In *International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC EUROPE, Barcelona* (2019), S. 668 – 673, doi: 10.1109/EMCEurope.2019.8872074.
- [6] R. Nowak und S. Frei: Reconstruction of Current Distribution and Termination Impedances of PCB-Traces by Magnetic Near-Field Data and Transmission-Line Theory. In *International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC EUROPE, Amsterdam* (2018), S. 579 – 584, doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8485103.
- [7] A. Henke, R. Nowak und S. Frei: Potentiale der kombinierten H- und E-Feldmessung für die Bestimmung von Spannungs- und Stromverteilungen in Leiterbahnen. In *EMV Köln* (2020).
- [8] Institut für Theoretische Elektrotechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg: CONCEPT-II. Verfügbar unter <http://www.tet.tuhh.de/concept/> (Zugriff am 29.07.2019).