

# Nahfeldbasierte Charakterisierung eines schnellen Bus-Systems zur Bestimmung des Störpotentials und der Auslegung von Filtermaßnahmen

M. Sc., Robert Jan, Nowak, Technische Universität Dortmund, Deutschland  
Prof. Dr.-Ing., Stephan, Frei, Technische Universität Dortmund, Deutschland

## 1 Einleitung

Die Auswertung von Nahfelddaten ist ein vielversprechender Ansatz, um die EMV-Eigenschaften von elektrischen Komponenten und Systemen kontaktlos zu analysieren. Kritische Feldemissionen und die verursachenden Quellen können in einer beliebigen Messumgebung bestimmt werden. Zur Untersuchung von Leiterplatten sind insbesondere Stromrekonstruktionsverfahren wie [1] oder [2] von Interesse, da diese die tatsächliche Stromverteilung in einer untersuchten Struktur bestimmen und so die Ströme in den einzelnen Leiterbahnen identifizieren.

In diesem Beitrag geht es um Stromrekonstruktionsverfahren, welche die Kenntnis über die Geometrieinformationen zu den Leiterbahnen einer untersuchten Leiterplatte voraussetzen. Diese Verfahren erlauben es in vielen Fällen für kritische Leiterbahnen die Terminierungsimpedanzen zu bestimmen. Anhand dieser Daten ist eine gezielte Auslegung von Entstörmaßnahmen möglich [3]. In [2] und [3] wurden einfache Beispielanordnungen für die Anwendung von Stromrekonstruktionsverfahren gewählt, um die grundsätzlichen Potentiale zu analysieren. Hier wurde ein Leiter gezielt angeregt und die Phase der Nahfelddaten war bekannt. Ein großer Abstand zwischen den Leitern vereinfachte die Bestimmung der Stromverteilungen.

In Abgrenzung zu vorangegangenen Untersuchungen wird in dieser Arbeit eine realitätsnähere Leiterplattenstruktur untersucht und ihre Stromverteilung mit dem Verfahren aus [2] bestimmt. Hierzu wird im Vorfeld die Fragestellung diskutiert, welche Bedingungen eine Feldmessung erfüllen muss, um die notwendigen Daten zu bestimmen, mit denen eine genaue Rekonstruktion möglich ist. Gleichzeitig wird auch untersucht, welche Grenzen das in [2] vorgestellte Verfahren hat, bzw. für welche Strukturen eine befriedigende Rekonstruktion nicht mehr erwartet werden kann. Einen entscheidenden Einfluss hat die Wahl der Messsonde sowie die Positionierung. In [1] wird der Einfluss von Positionierungsfehler auf die rekonstruierten Ströme untersucht, wobei ideale Feldmessungen angenommen werden. Tatsächlich basiert jedoch der Messeffekt von Nahfeldsonden i.d.R. auf der Integration von Feldstärken in einem aktiven Bereich (bspw. der Induktion in eine Schleifenfläche bei einer magnetischen Nahfeldsonde). Daher liefert die gemessene Spannung an der Sonde lediglich eine integrale Aussage über das Feld im Sondenbereich. Dies führt zu einem systematischen Messfehler (vgl. [4]). Um solche Fehler zu reduzieren, sollten möglichst kleine Sonden verwendet oder spezielle Messtechniken angewendet werden, wie bspw. die Auswertung von Differenzen von leicht versetzten Feldmessungen [5]. Die Beschreibung der Feldverteilung über eine räumliche Faltung der Messwerte mit der Aufnahmecharakteristik der Feldsonde [6] ist ein weiteres Verfahren zur Fehlerminimierung. Die genannten Verfahren sind jedoch ungeeignet für schwache Feldquellen oder erfordern die Erfassung der Messdaten in einem äquidistanten Gitter, was zu sehr langen Messzeiten führen kann. Die in [2] vorgestellte Rekonstruktionsmethode kann mit wenigen Messdaten im Leiterbahnenbereich gute Ergebnisse erzielen. Dazu werden die Sondenspannungen mithilfe von skalaren Übertragungsfaktoren in Feldwerte übertragen. Um zu klären, welcher Einfluss die Wahl einer Feldsonde auf die Rekonstruktionsqualität hat, werden in diesem Beitrag Simulationen vorgestellt und diskutiert. Das Nahfeld einer SPI-Kommunikation von zwei Mikrocontrollern auf einer Leiterplatte wird gemessen und die Stromverteilung wird rekonstruiert. Aufgrund einer praxisnahen Signalerzeugung, einer phasenlosen Nahfeldmessung und einem kleinen Leiterabstand stellen diese Untersuchungen einen wichtigen Schritt hin zu realitätsnahen Konfigurationen dar und grenzen sich so gegenüber den vorherigen Betrachtungen ab. Anhand der bestimmten Rekonstruktionsergebnisse wird exemplarisch gezeigt, wie eine Maßnahme zur Unterdrückung von Störemissionen gezielt ausgelegt werden kann.

In dieser Arbeit wird zur Bestimmung der Stromverteilung die in [2] vorgestellte Rekonstruktionsmethode verwendet. Bei dieser Methode wird zwischen den Felddaten und der gesuchten Stromverteilung ein inverses Problem formuliert und gelöst. Für die Formulierung wird ein Feldmodell anhand der Leitergeometrie aufgebaut und bei der Lösung werden physikalische Bedingungen wie z.B. die Leitungstheorie berücksichtigt. Die Untersuchungen zu den Bedingungen, unter denen dieses Rekonstruktionsverfahren genaue Ergebnisse liefert, werden im zweiten Kapitel vorgestellt. Danach folgen im dritten Kapitel die Messung, Analyse und Diskussion des SPI-Kommunikation-Demonstrators. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2 Anforderungen an die Nahfeldmessung

Zunächst wird untersucht, wie die Rekonstruktionsqualität durch die Wahl der Nahfelddaten und durch den integralen Messcharakter von Feldsonden beeinflusst wird. Für diese Analyse wird eine Struktur aus zwei parallelen Leitern betrachtet. Mit einer Simulation in CONCEPT-II [7] werden Felddaten bestimmt, anhand welcher die Stromverteilung rekonstruiert wird. Um die Qualität der Rekonstruktionsergebnisse zu bewerten, wird für beide Leiter jeweils der RMS-Wert der relativen Abweichung zwischen der rekonstruierten Stromverteilung gegenüber der simulierten Stromverteilung bestimmt. Mit dieser Bewertungsgrundlage wird die Beeinflussung der Rekonstruktionsqualität untersucht. Zunächst wird die Beeinflussung durch die Wahl der Messhöhe betrachtet. Anschließend wird ein einfaches Sondenmodell eingeführt, mit welchem der Einfluss des integralen Messeffekt von Sonden untersucht wird. Ziel dieser Untersuchungen ist das Finden von Bedingungen respektive Grenzen, unter denen eine Rekonstruktion möglich ist bzw. der Fehler des rekonstruierten Stroms vertretbar gering ist.

### 2.1 Untersuchungsstruktur und Rekonstruktionsparameter

Die Anordnung der zwei parallelen Leitern L1 und L2 über einer idealen Massefläche wird für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet. Diese ist in Bild 1 dargestellt. Die Leitungslänge (100 mm), der Leiterdurchmesser (0,1 mm) und die Leiterhöhe über der Massefläche  $h_L$  (1,5 mm) sind konstant und der Leiterabstand  $d_L$  variiert. Das Verhältnis  $d_L/h_L$  wird als eine Einflussgröße auf die Rekonstruktionsqualität betrachtet. Die Leiter werden jeweils am Nahende mit idealen Spannungsquellen angeregt und am Fernende durch Widerstände (je  $200 \Omega$ ) nahezu reflexionsfrei abgeschlossen. Die Anregung wird so gewählt, dass sich in der Mitte der Leiter L1 und L2 die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  einstellen. Die folgenden vier Fälle werden bei 100 MHz analysiert:

1.  $I_1 = I_2$ : Amplituden gleich, gleiche Flussrichtungen (Common-Mode, CM)
2.  $I_1 = -I_2$ : Amplituden gleich, entgegengesetzte Flussrichtungen (Differential-Mode, DM)
3.  $I_1/10 = I_2$ : Amplituden unterschiedlich, gleiche Flussrichtungen
4.  $I_1/10 = -I_2$ : Amplituden unterschiedlich, entgegengesetzte Flussrichtungen

Für diese vier Fälle werden in den nachfolgenden Untersuchungen jeweils die Stromverteilungen rekonstruiert. Dafür wird an je 19 Punkten über den Leitern das elektromagnetische Feld ausgewertet. Wie in Bild 1 dargestellt, sind diese Punkte gleichmäßig mit einem Abstand von 5 mm voneinander verteilt. Die Distanz zwischen den Feldpunkten und den Leitern ist die Messhöhe  $h_M$ . Es wird von einer horizontal ausgerichteten Leiterplatte ausgegangen (Massefläche bei  $z = 0$ ). An den Messpunkten wird das horizontale magnetische Feld quer zum Leiter und das vertikale elektrische Feld (senkrecht zur Massefläche) bestimmt. Das inverse Problem der Stromrekonstruktion wird mit idealen, phasenbehafteten Felddaten gelöst. Hierbei wird ein Modell verwendet, bei dem die Leiter jeweils mit 201 horizontalen und 6 vertikalen Segmenten diskretisiert sind (Segmentlänge  $\leq 0,5$  mm).

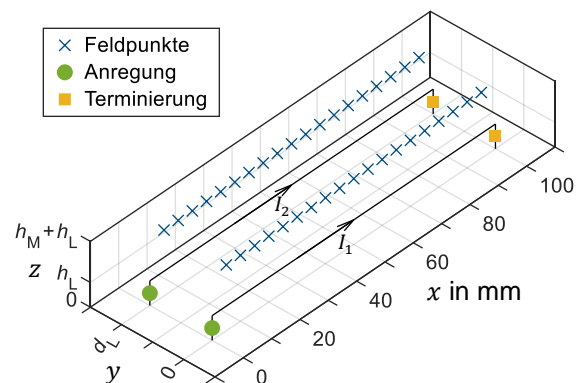


Bild 1: Die zur Einflussuntersuchung betrachtete Parallelleiteranordnung mit Messpunkten.

## 2.2 Einfluss der Messhöhe auf die Rekonstruktionsqualität

Zunächst wird der Einfluss der Messhöhe untersucht und geprüft, ob allgemeine Aussage wie in [5], dass eine möglichst kleine Messhöhe vom Vorteil ist, auch für Stromrekonstruktionsanalysen gilt. Dazu werden die Felddaten bei verschiedenen Messehöhen  $h_M$  bestimmt und für die Stromrekonstruktion genutzt. Es wird angenommen, dass die Sondenspannungen ohne Fehler gemessen werden können. Bei realen Untersuchungen ist zu beachten, dass das Sondersignal mit einem Rauschen überlagert wird. Daher kann die Messhöhe in realen Untersuchungen nicht beliebig groß gewählt werden, da mit zunehmender Distanz zur betrachteten Struktur die Feldstärke abnimmt und damit auch der Signal-Rausch-Abstand kleiner wird.

Der relative RMS-Fehler der rekonstruierten Ströme wird für verschiedene Leiterabstand-zu-Leiterhöhe-Verhältnisse ( $d_L/h_L$ ) bestimmt und ist in Bild 2 dargestellt. Der Rekonstruktionsfehlers des Stroms in Leiter L1 und L2 ist bei gleich starker Anregung ( $|I_1| = |I_2|$ ) in beiden Leitern nahezu identisch. Auffällig ist dabei, dass im CM-Fall ( $I_1 = I_2$ ) der Fehler bei abnehmenden Leiterabstand zunimmt, wohingegen für den DM-Fall ( $I_1 = -I_2$ ) auch bei kleinen Leiterabständen eine genaue Rekonstruktion möglich ist.

Bei den unterschiedlich großen Strömen ( $|I_1/10| = |I_2|$ ), ist erwartungsgemäß erkennbar, dass für den schwächer angeregten Leiter L2 die Abweichungen größer sind, daher werden diese im Folgenden ausschließlich diskutiert. In beiden Anregungsfällen ( $I_1/10 = \pm I_2$ ) nimmt der Fehler für kleiner werdende Leiterabstände ( $d_L/h_L < 1$ ) zu. Eine besondere Auffälligkeit ist im Bereich  $1 < d_L/h_L < 50$  zu beobachten: Hier liegt die Abweichung des bestimmten Stroms für L2 bei gleichen Flussrichtungen über bzw. bei entgegengesetzten Flussrichtungen unter dem Fehler des Stroms in L1. Für  $50 < d_L/h_L$  ist eine Konvergenz der Abweichung von L2 gegen die Abweichung von L1 zu erkennen. Entsprechend wird angenommen, dass ab diesem Abstand die Leiter hinreichend voneinander entfernt sind, sodass die Bestimmung der Leiterströme unabhängig voneinander stattfindet bzw. die Felder der jeweils anderen Leitung die Rekonstruktion nicht beeinflussen.

Entgegen der von [5] formulierter These fällt in allen vier Untersuchungsfällen auf, dass der Rekonstruktionsfehler mit steigender Messhöhe abnimmt. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten liegt in den Feldmodellen, welche zur Formulierung des inversen Problems in der Stromrekonstruktionsmethode genutzt werden, da sich diese von der Feldbeschreibung der CONCEPT-II-Simulation unterscheiden. Bei den verschiedenen Modellen werden trotz gleicher Quellgröße qualitativ und quantitativ minimal unterschiedliche Feldverläufe bestimmt. Daher ist es möglich, dass im umgekehrten Fall, bei dem die Feldstärke an einem Punkt vorgegeben ist, die verursachende Quellgröße bzw. der Leiterstrom bei den verschiedenen Modellen unterschiedlich groß ist. Unter Verwendung dieser These zeigt sich, dass die Feldmodelle für zunehmende Messhöhen eine bessere Übereinstimmung haben respektive in der unmittelbaren Nähe der Quelle unterschiedlich sind. Bei der Untersuchung von realen Strukturen ist eine solche Abweichung zwischen den Feldmodellen gegenüber der tatsächlichen Feldverteilung zu beachten. Am Beispiel einer

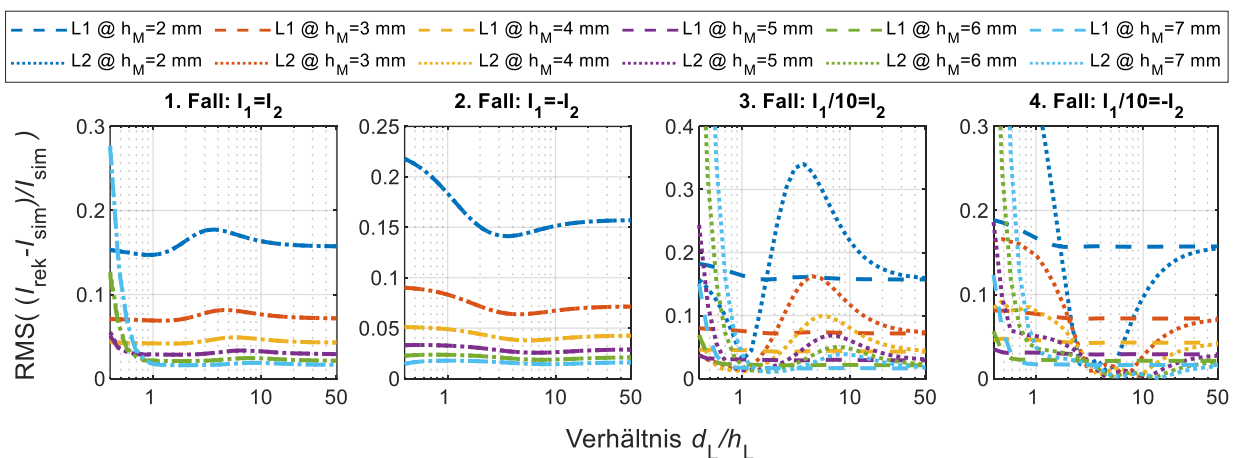


Bild 2: RMS-Werte der relativen Abweichungen der rekonstruierten Leiterströme  $I_{rek}$  gegenüber den simulierten Strömen  $I_{sim}$  dargestellt über das Leiterabstand-zu-Leiterhöhe-Verhältnis ( $d_L/h_L$ ) für verschiedene Messhöhen bei untersuchten Leiteranregungsszenarien.

breite Mikrostreifenleitung ist dies leicht zu veranschaulichen. In der unmittelbaren Nähe eines solchen Leiters ist aufgrund des Leiterplattensubstrats und des Leiterquerschnitts ein anderes elektrisches Feld zu erwarten als bei einem fadenförmigen Leiter im Vakuum. Um die Beeinflussung der Rekonstruktionsqualität durch solche Fehler gering zu halten, sollte daher die Messsonde nicht möglichst nah an die Leiterbahnen positioniert werden. Wie oben beschrieben, ist bei realen Untersuchungen jedoch auch zu beachten, dass aufgrund von Rauschen die Messhöhe nicht beliebig groß gewählt werden kann. Bei den betrachteten Konfigurationen scheint eine Messhöhe von 4 mm ein guter Kompromiss zu sein. Bei dieser Messhöhe sind die Abweichungen aufgrund der Feldmodellierung gering und es werden auch bei kleineren Leiterabständen die Ströme noch gut rekonstruiert. Darüber hinaus ist für diese Höhe keine untere Grenze für das Verhältnis  $d_L/h_L$  zu beobachten, ab welcher eine Rekonstruktion der beiden Ströme nicht mehr möglich ist.

### 2.3 Einfluss der Sondengröße auf die Rekonstruktionsqualität

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des integralen Messeffekts von Feldsonden auf die Rekonstruktionsqualität untersucht. Dazu werden einfache Sondenmodelle zur Nachbildung dieses Effekts eingeführt. Anhand dieser Modelle werden ähnlich wie oben für verschieden große Sonden die Qualität der Rekonstruktionsergebnisse diskutiert. Es wird eine Schleifensonde zur Messung des magnetischen Feldes und eine Monopolsonde zur Messung des elektrischen Feldes angenommen. Diese Sondenformen sind in Bild 3 dargestellt und der aktive Bereich ist jeweils grau gekennzeichnet.

#### 2.3.1 Modellierung der magnetischen und elektrischen Feldsonde

Zur Nachbildung des Messeffekts einer Schleifensonde, welcher auf der Induktion in eine Schleifenfläche durch das zu messende Magnetfeld basiert, muss das Integral der magnetischen Feldstärke über jene Schleifenfläche nachgebildet werden. Hierzu werden an 64 gleichverteilten Punkten innerhalb der Schleifenfläche, die als kreisrund mit dem Durchmesser  $D_S$  angenommen wird, die Feldstärken simuliert und das Mittel über diese Werte gebildet. Dieser Mittelwert wird als Sondenmesswert angenommen.

Der Strom, der in eine elektrischen Monopolsonde durch ein inhomogenes Feld eingepreßt wird, ist proportional zum Integral über die elektrische Tangentialfeldstärke entlang des Monopols [8], [9]. In Anlehnung daran, wird hier der Sondenmesswert als (ungewichtetes) Mittel der Feldstärken an 15 Punkten entlang des Monopols mit der Länge  $l_S$  bestimmt. Der so ermittelte Wert wird als Sondenmesswert betrachtet.

#### 2.3.2 Analysen der Feldsonden

In den folgenden Untersuchungen werden unter Verwendung der eingeführten Sondenmodelle für die oben beschriebene Parallelleiteranordnung Messdaten auf einer Messhöhe von 4 mm bestimmt. Hierbei werden Schleifendurchmesser und Monopollänge gleichzeitig variiert, wobei angenommen wird, dass für die Sondengröße  $S = D_S = l_S$  gilt. In Bild 4 wird der RMS-Fehler des rekonstruierten Stroms  $I_{rek}$  für Leiter L2 in Abhängigkeit von den Verhältnissen Sondengröße pro

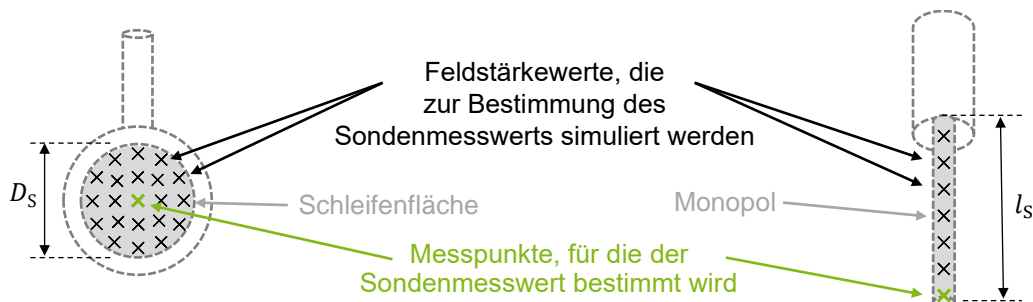


Bild 3: Schematische Darstellung einer magnetischen Schleifensonde (links) und einer elektrischen Monopolsonde (rechts) sowie die Darstellung von Feldmesspunkten, die zur Modellierung des Sondenmesswerts verwendet werden.

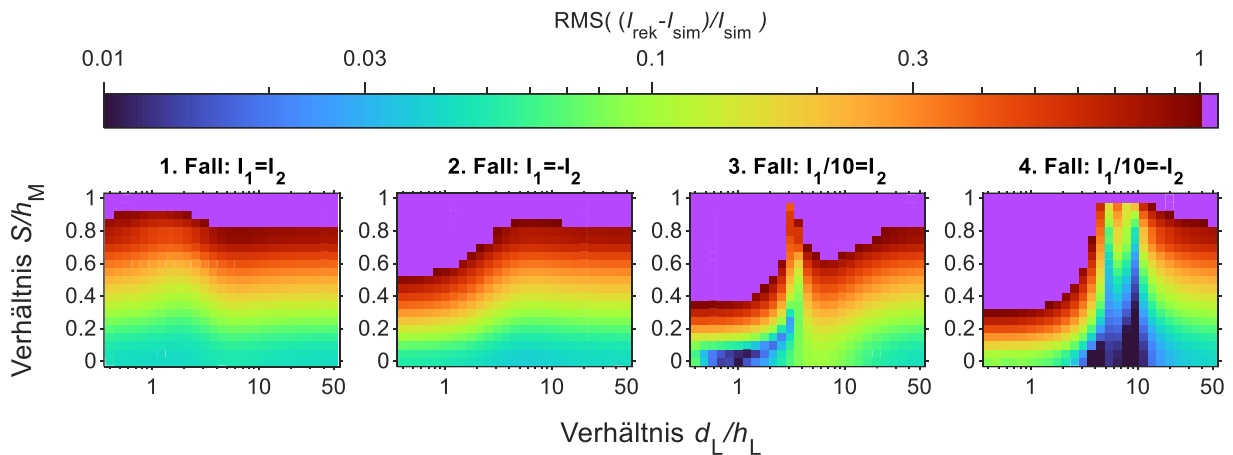


Bild 4: Falschfarbendarstellung des RMS-Wert der relativen Abweichung der rekonstruierten Stromverteilung  $I_{\text{rek}}$  gegenüber der simulierten Stromverteilung  $I_{\text{sim}}$  auf Leiter L2 für verschiedene Verhältnisse von Leiterabstand zu Leiterhöhen ( $d_L/h_L$ ) sowie Sondengröße zu Messhöhe ( $S/h_M$ ). RMS-Abweichungen größer als 1 sind in Violett dargestellt.

Messhöhe ( $S/h_M$ ) und Leiterabstand pro Leiterhöhe ( $d_L/h_L$ ). Hier nur der Fehler für Leiter  $L_2$  betrachtet, da dieser für den anderen Leiter bei gleichstarker Anregung identisch bzw. größer (im 3. Fall, bei  $I_1/10 = I_2$ ) ist. Die Referenz ist wie oben der simulierte Strom  $I_{\text{sim}}$ .

Erwartungsgemäß ist für alle Fälle zu beobachten, dass die Abweichungen bei steigender Sondengröße im Verhältnis zur Messhöhe ( $S/h_M$ ) zunehmen. Daneben zeigen sich in Abhängigkeit vom  $d_L/h_L$ -Verhältnis ähnliche Abweichungen, die auch in Bild 2 zu beobachten sind. Eine anfängliche Abnahme und anschließende Zunahme der Abweichung ist für den 3. Fall, insbesondere für kleine  $S/h_M$ -Verhältnisse zu sehen. Über alle betrachteten Anregungsfälle hinweg ist festzuhalten, dass im Fall  $S/h_M < 0,2$  der RMS der relativen Abweichung kleiner als 0,3 ist und für diese Konfigurationen eine geringfügige Beeinflussung der Rekonstruktionsqualität angenommen werden kann. Erst für  $S/h_M \geq 0,35$  ist ein RMS-Fehler größer als 1 zu beobachten.

Die Sondengröße sollte also möglichst klein gegenüber der Messhöhe gewählt werden [5]. Zusätzlich wird bestätigt, dass die untere Grenze des Verhältnisses  $d_L/h_L$  bis zu der eine relative genaue Rekonstruktion möglich ist, von der Sondengröße abhängt.

### 3 Untersuchung einer SPI-Kommunikation

Die im zweiten Kapitel vorgestellte Rekonstruktionsmethode wird zur Untersuchung der in Bild 5 dargestellten Leiterplatte genutzt, auf der eine SPI-Kommunikation zwischen zwei Mikrocontrollern (Microchip PIC24FJ64GU205) realisiert ist. Für die Kommunikation sind beide Mikrocontroller mit drei Leiterbahnen verbunden und es wurde 8 MHz als Taktfrequenz gewählt. Mit der Stromrekonstruktionsmethode wird lediglich für diese drei Leiterbahnen der Strom bestimmt. Auf Basis der bestimmten Ergebnisse wird das EMV-Verhalten des Systems durch ein Filter optimiert.

Zur Analyse wird wie oben die Nahfeldverteilung 4 mm über den Leitern gemessen (5,5 mm über der durchgängigen Massefläche der Leiterplatte). In Bild 5 sind die Messpunkte dargestellt, an denen das vertikale elektrische Feld (in z-Richtung) sowie die horizontalen Magnetfeldkomponenten (in x- und y-Richtung) gemessen werden. Zur Messung des elektrischen Feldes wird die Monopolsonde RS-E 10 von Rohde & Schwarz in Kombination mit dem Vorverstärker PA 303 von LANGER EMV verwendet. Das Magnetfeld

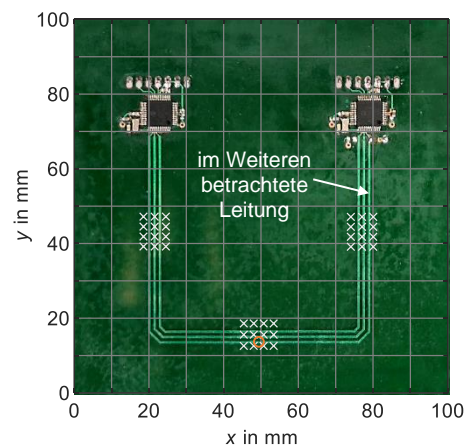


Bild 5: Foto des untersuchten Demonstrators mit der Markierung der verwendeten Messpunkte (Kreuze) und der Referenzstrommessung (Kreis).



wird mit der Schleifensonde RF-R 3-2 von LANGER EMV erfasst. Zur Signalaufnahme wird der Messempfänger ESRP3 von Rohde & Schwarz (Modus: TD-Scan, Detektor: Average, Filter: EMI, RBW: 100 Hz) verwendet.

Die Sondengröße ( $S = D_S = l_S$ ) beträgt in beiden Fällen ca. 2,2 mm. Damit gilt für das Verhältnis von Sondengröße-zu-Messhöhen-Verhältnis  $S/h_M \approx 0,55$ . Die untersuchten Leiterbahnen haben eine Breite von 0,6 mm und einen Abstand von 1,5 mm voneinander. Das zuvor eingeführte Leiterabstand-zu-Leiterhöhenverhältnis ist  $d_L/h_L \approx 0,96$ .

Im Rahmen einer Voruntersuchung werden zunächst Frequenzen bestimmt, für welche die Rekonstruktionsanalyse durchgeführt werden soll. Dazu wird an einem beliebig gewählten Punkt über den Leitern das elektrische Feld mit ein- bzw. ausgeschalteten Mikrokontrollern gemessen. Es werden 9 Frequenzen identifiziert, bei denen durch die SPI-Kommunikation wesentliche Anteile im Nahfeld zu beobachten sind und die im Weiteren untersucht werden. Die für diese Frequenzen aufgenommenen Feldstärken sind in Bild 6 dargestellt.

Für die ausgewählten Frequenzen werden die Nahfelddaten an den Messpunkten gemessen und für die Stromrekonstruktion verwendet. Bei der Rekonstruktion werden lediglich die drei Leiterbahnen zwischen den ICs betrachtet; alle anderen Leiter sowie die ICs werden für die Rekonstruktion vernachlässigt. Die drei Leiterbahnen werden mit 952 Segmente diskretisiert (Segmentlänge  $\leq 0,7$  mm). Für die Leiter werden jeweils ein Wellenwiderstand von  $100 \Omega$  und eine effektive Permittivität von 3,2 angenommen. Da die Nahfelddaten keine Phaseninformation enthalten, wird der in [2] vorgeschlagene iterative Algorithmus zur Rekonstruktion verwendet.

In Bild 7 sind die Rekonstruktionsergebnisse für die äußere Leiterbahn zusammen mit Referenzmessungen gezeigt. Als Referenz für den Strom dienen Messungen mit einer Tektronix CT6-Sonde und dem Messempfänger. In Bild 7(a) sind die gemessenen und rekonstruierten Ströme für die Position dargestellt, die in Bild 5 mit dem orangenen Kreis hervorgehoben ist. In Bild 7(b) sind die rekonstruierte Eingangsimpedanz  $Z_{in}$  und die Terminierungsimpedanz  $Z_T$  der äußeren Leiterbahn gezeigt. Zusätzlich ist die Terminierungsimpedanz bzw. die Eingangsimpedanz des terminierenden ICs dargestellt, welche mit einem Keysight E5071B Netzwerkanalysator auf einer baugleichen Leiterplatte gemessen wurde.

Wie in Bild 7(a) zu sehen ist, hat der rekonstruierte Strom gegenüber den Messwerten eine Abweichung von 6 dB. Bei der Berechnung der rekonstruierten Ströme fällt auf, dass die Abweichung zwischen dem rekonstruierten und dem gemessenen Werten eine starke Abhängigkeit von den Parametern des iterativen Solvers aufweist, der zur Lösung des inversen Problems in der Stromrekonstruktionsmethode verwendet wird. In ersten Folgeuntersuchungen zeigt sich, dass mit einem anderen Lösungsansatz die Abweichung auf unter 1 dB reduziert werden kann.

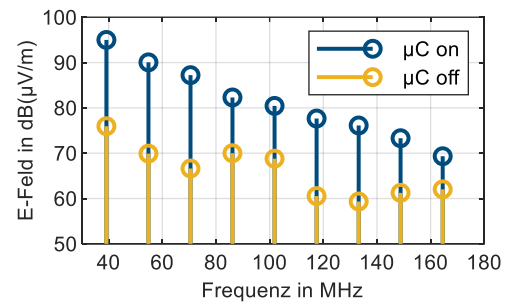


Bild 6: In der Voruntersuchung beobachtete Spektren.

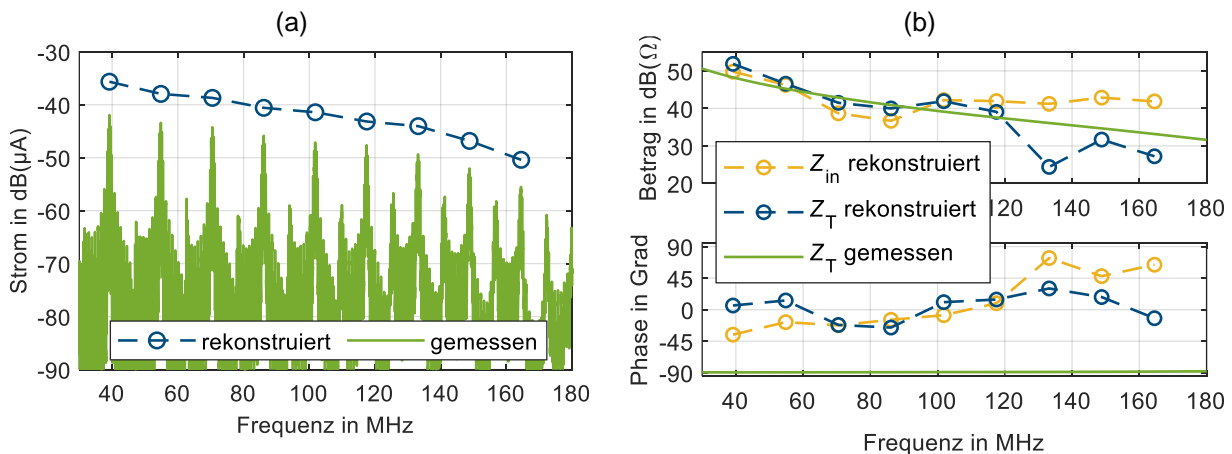


Bild 7: Gemessene und rekonstruierte Ergebnisse für den Strom (a) sowie die Eingangs- und Terminierungsimpedanzen (b) des äußeren Leiters vom SPI-Bus aus Bild 5.

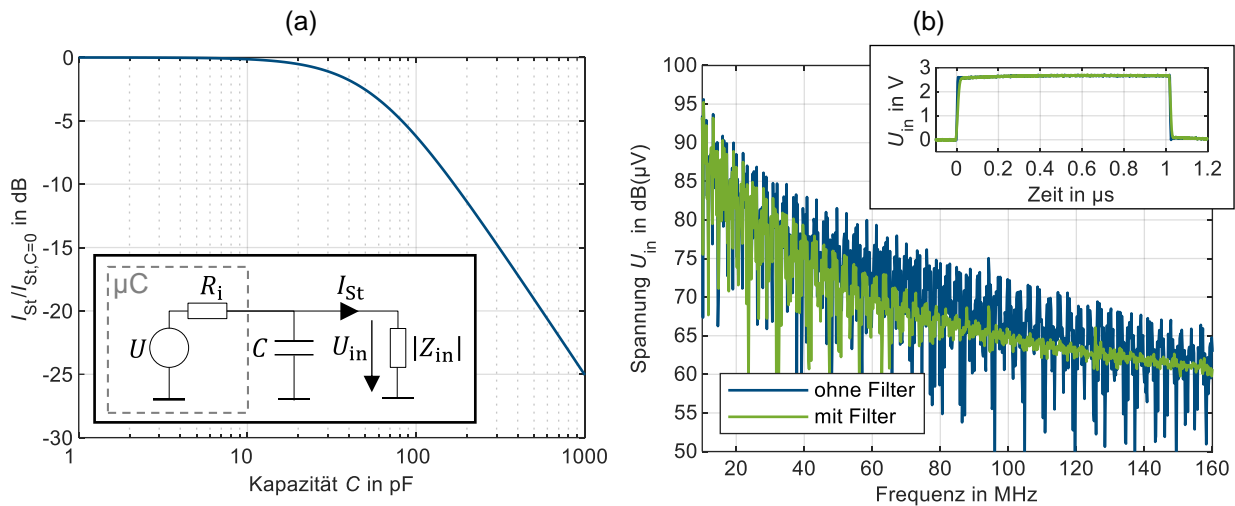


Bild 8: (a) Erwartete Dämpfung des Leitungsstroms bei 117,5 MHz in Abhängigkeit zur Kapazität des eingefügten Filterkondensators mit Darstellung des verwendeten Ersatzschaltbilds und (b) gemessene Spannung am Anfang der Leitung mit FFT für die Anordnung mit und ohne Filterkondensator.

Für den rekonstruierten Betrag der Terminierungsimpedanz lässt sich bis ca. 120 MHz eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten feststellen. Die rekonstruierte Phase der Terminierungsimpedanz weicht signifikant ab und ist nicht verwertbar.

Im Folgenden wird anhand des Rekonstruktionsergebnisses exemplarisch ein einfaches Filter gezielt ausgelegt, welches mögliche Störemission reduzieren soll, ohne dabei die Kommunikation zwischen den ICs deutlich zu beeinträchtigen. Als Filterelement wird ein Kondensator am Anfang der betrachteten Leiterbahn eingebracht, der das Spektrum oberhalb von 120 MHz um 6 dB reduzieren soll. Um diesen Kondensator auszulegen, wird ein Ersatzschaltbild aufgebaut, bei dem der IC-Ausgang als reale Spannungsquelle und die Leitung mit ihrer Terminierung durch die Eingangsimpedanz modelliert werden. Anhand des Datenblatts vom IC wird der Innenwiderstand der Quelle mit  $R_1 = 40 \Omega$  abgeschätzt. Für die Eingangsimpedanz  $Z_{in}$  der Leitung wird der für 117,5 MHz rekonstruierte Betrag von  $125 \Omega$  verwendet. Damit ergibt sich das in Bild 8(a) dargestellte Ersatzschaltbild. In Abhängigkeit zur gewählten Kapazität  $C$  des Filterkondensators wird der Störstrom  $I_{St}$  auf der Leiterbahn beschrieben mit

$$I_{St} = U \cdot \frac{1}{Z_{in} + R_1(1 + j\omega CZ_{in})} \quad (1)$$

Die erwartbare Dämpfung des Leiterbahnstroms durch den Kondensator wird mit dem Quotienten  $I_{St}/I_{St}|_{C=0}$  angegeben und wird in Bild 8(a) in Abhängigkeit zum Kapazitätswert dargestellt. Um die angestrebte Dämpfung von 6 dB zu erhalten, wird ein 100 pF-Keramikkondensator als Filterelement gewählt. Zur Bewertung des Filters wird am Anfang der Leitung die Spannung gemessen, die im Ersatzschaltbild in Bild 8(a) mit  $U_{in}$  benannt ist. Die Messung erfolgt mit einem aktiven Tastkopf an einem Oszilloskop (Teledyne LeCroy HDO6104A mit ZS1000-Tastkopf,  $1 \text{ M}\Omega \parallel 0,9 \text{ pF}$ ). Es werden jeweils Spannungssignale mit und ohne Filterkondensator erfasst. Die gemessenen Zeitbereichssignale sowie die mit der FFT bestimmten Spektren sind in Bild 8(b) dargestellt. Durch das Filter wird das Zeitbereichssignal nur marginal verändert. Daher ist eine Beeinflussung der Kommunikation auszuschließen. Entsprechend der Auslegung zeigt sich eine Abnahme des Spektrums bei 120 MHz um etwa 7 dB. Da die Eingangsimpedanz der Leitung nicht verändert wird, jedoch die Spannung beobachtbar abnimmt, folgt, dass der Strom auf der Leiterbahn durch das Filter reduziert wird.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine bekannte Methode zur nahfeldbasierten Rekonstruktion von Leiterbahnströmen in praxisnahen Konfigurationen untersucht. Dazu wird im ersten Teil der Einfluss der

Feldmessung auf die Rekonstruktionsqualität mit Simulationen analysiert. Hierbei wird quantifiziert wie der Abstand zwischen der Leiterplatte und den Feldmesspunkten sowie die Größe der verwendeten Feldsonden die Qualität der Stromrekonstruktion beeinflussen. Für verschiedene Leiterabstände wird gezeigt, dass ein sehr kleiner Abstand der Feldmessung zur untersuchten Struktur unvorteilhaft ist, da dies zu Rekonstruktionsfehler führen kann. Darüber hinaus wird der Best-Practice-Ansatz für Nahfeldmessungen bestätigt, möglichst kleine Feldsonden zu verwenden, sofern die Messdynamik ausreicht, da mit zunehmender Sondengröße auch der Rekonstruktionsfehler zunimmt. Es werden Sondengrößen und Messabstände vorgeschlagen, für die genaue Rekonstruktionsergebnisse erwartet werden können.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die SPI-Kommunikation zwischen zwei ICs als Praxisbeispiel untersucht, indem die Leiterbahnströme vom SPI-Bus mit der Rekonstruktionsmethode bestimmt werden. Die Rekonstruktionsergebnisse werden mit Messwerten verglichen. Der rekonstruierte Strom weicht um 6 dB ab, wobei in ersten Folgeuntersuchungen festgestellt wird, dass dieser Fehler durch den gewählten Solver verursacht wird. Der Betrag der Terminierungsimpedanzen der Leiterbahnen kann gut rekonstruiert werden, jedoch ist die Rekonstruktion der Phaseninformation nicht erfolgreich. Anhand der bestimmten Impedanzen wird exemplarisch ein Filter entworfen, welches mögliche Störemissionen reduzieren soll, ohne dabei die SPI-Kommunikation zwischen den ICs zu beeinträchtigen. Anhand von Messungen wird das entworfene Filter validiert. Insgesamt ist festzuhalten, dass die verwendete Stromrekonstruktionsmethode grundsätzlich praxistauglich ist, um Ströme und Impedanzen von Leiterbahnen zu bestimmen.

In weiteren Arbeiten sollten andere Lösungsansätze für das inverse Problem evaluiert werden, welches zur Bestimmung der Stromverteilung in Rekonstruktionsmethode formuliert wird. Bereits in ersten Folgeuntersuchungen wird beobachtet, dass so der Rekonstruktionsfehler erheblich minimiert werden kann.

## Literaturangaben

- [1] H. Weng, D. G. Beetner, R. E. DuBroff und J. Shi: Estimation of High-Frequency Currents From Near-Field Scan Measurements, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Bd. 49, Nr. 4, Nov. 2007, pp. 805–815, doi: 10.1109/TEMC.2007.908264.
- [2] R. Nowak und S. Frei: Investigation of an Iterative Method for Finding of Currents, Voltages and Termination Impedances of PCB Traces Based on Phase-less Near-field Data, 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Juli 2021, pp. 509–514. doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559240.
- [3] R. Nowak, A. Henke und S. Frei: Characterization of EMI Sources from Reconstructed Current Distributions Based on Phase-Less Electric and Magnetic Near-Field Data, 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Sep. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245636.
- [4] International Electrotechnical Commission: IEC 61967-6:2008 Ed1.1, Integrated circuits, Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 6: Measurement of conducted emissions – Magnetic probe method, Genf, Schweiz, 2008.
- [5] Y.-T. Chou und H.-C. Lu: Space Difference Magnetic Near-Field Probe With Spatial Resolution Improvement, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Bd. 61, Nr. 12, Dez. 2013, pp. 4233–4244, doi: 10.1109/TMTT.2013.2288089.
- [6] T. Claeys, G. A. E. Vandenbosch und D. Pissort: Analysis of Different Scalar Probe Compensation Methods for an Array of Near-Field EMI Probes, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Bd. 63, Nr. 2, Apr. 2021, pp. 344–352, doi: 10.1109/TEMC.2020.3008387.
- [7] Institut für Theoretische Elektrotechnik, Technischen Universität Hamburg: CONCEPT-II, build no. 50, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.tet.tuhh.de/concept/>
- [8] R. F. Harrington: *Field Computation by Moment Methods*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1993.
- [9] Y. Gao, A. Lauer, Q. Ren und I. Wolff: Calibration of electric coaxial near-field probes and applications, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Bd. 46, Nr. 11, Nov. 1998, pp. 1694–1703, doi: 10.1109/22.734563.