

Erhöhung der Korrelation zwischen BCI- und Antennenprüfverfahren durch Bestimmung von Abschlussimpedanzen mittels potenzialfreier Messung mit Stromsensoren

Dipl.-Ing Seyyed Ali Hassanpour Razavi, Technische Universität Dortmund
M.Sc. Alexander Zeichner, Technische Universität Dortmund
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund

1. Einleitung

Der Nachweis der Störfestigkeit gegen gestrahlte Felder muss häufig durch eine Antennenprüfung (ALSE, [1]) in einer elektromagnetisch abgeschirmten Messumgebung mit geringen Reflexionen erbracht werden. Hohe Kosten und ein entsprechender Raumbedarf für die Absorberkabine sind mit diesem Verfahren verbunden. Außerdem kann die kalibrierte Feldstärke für bestimmte Frequenzen und Polarisierungen sehr empfindlich auf kleine Änderungen des Aufbaus reagieren [1]. Dies erhöht deutlich den Zeitaufwand und die Komplexität des ALSE-Verfahrens und erschwert die Reproduktion eines Messergebnisses. Als Alternative bietet sich das Strominjektionsverfahren (BCI, [2]) an, bei dem ein Magnetfeld in der BCI-Zange einen HF-Strom in einen Kabelbaum induziert. Obwohl der Aufbau des Prüflings, des Prüfkabelbaumes und anderer Peripheriegeräte auf dem Prüftisch (Abbildung 1- rechts) in beiden Verfahren identisch erfolgt, ist leider die Vergleichbarkeit der Verfahren oft nicht gegeben [3,4]. In Abbildung 1-links sind die gemessenen Stromverläufe am Ende einer Einfachleitung in einem Testaufbau nach Norm für die beiden Testmethoden gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass verschiedene Koppelmechanismen in den beiden Verfahren zu verschiedenen Störstromverläufen am DUT (Device Under Test)-Eingang führen.

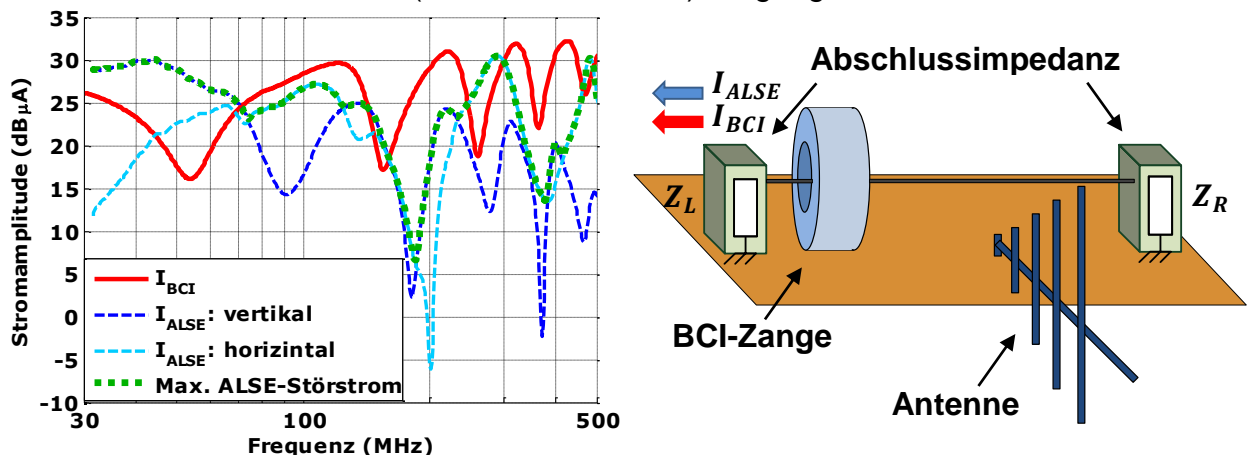


Abbildung 1: Einkoppelte Störströme bei ALSE (blau, 100 V/m) und BCI (rot, 100 mA) am Ende einer Einfachleitung ($Z_{Rechts} = 50\Omega$, $Z_{Links} = 470\Omega$) (links). Vereinfachte Struktur der Messaufbauten nach ISO-11452 (rechts)

Die Ströme am DUT-Eingang und evtl. auf der Seite der für den Betrieb des DUT notwendigen „Load-Box“ sind für einen Ausfall verantwortlich. Die unterschiedlichen Amplituden können durch eine frequenzabhängige Anpassung der eingespeisten Leistung angepasst werden. Durch eine Verschiebung der BCI-Zange entlang der Leitung, bekommt man einen weiteren Freiheitsgrad, der die Anpassung des Stroms sogar auf beiden Seiten erlauben kann. Damit kann die Korrelation zwischen den BCI-

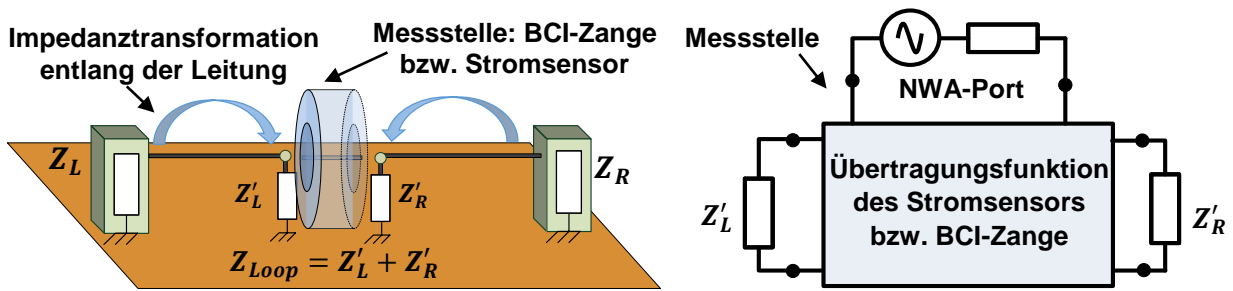


Abbildung 2: Die Schleifenimpedanz (Z_{loop}) aus der Sicht der Messstelle (links), Vereinfachung der Messstruktur mit einem Stromsensor und der Einfluss der Übertragungsfunktion auf Messdaten

und Antennenprüfverfahren deutlich erhöht werden. In [5] sind zwei Verfahren für die Bestimmung der Position und der Einspeiseleistung der BCI-Zange vorgestellt. Für die Auswahl dieser Parameter ist es notwendig, die Impedanz der Abschlüsse zu kennen, was in der Praxis ein Problem darstellt. Eine direkte Bestimmung der Abschlussimpedanzen ist nicht zielführend, da der zusätzliche Messaufwand zu hoch wäre. Die Bestimmung der Abschlussimpedanz sollte im tatsächlichen Testaufbau mit einer potenzialfreien Messmethode durchgeführt werden können. Induktive Verfahren sind hierfür besonders geeignet. In diesem Beitrag werden Verfahren für die induktive Impedanzmessung an einer Testleitung unter Verwendung eines Stromsensors oder der BCI-Einkoppelzange als Messmittel vorgestellt und ausführlich diskutiert.

2. Indirekte Messung von Abschlussimpedanzen

In diesem Abschnitt werden vier Verfahren zur Impedanzmessung vorgestellt. Das zuletzt vorgestellte Verfahren bestimmt über die mit einem verschiebbaren Stromsensor gemessene Stromamplitudenverteilung entlang der Leitung direkt die Abschlussimpedanzen. Die ersten beiden Verfahren bestimmen mit Hilfe von einem Netzwerkanalysator (NWA) und Stromsensoren die sogenannte Schleifenimpedanz (Z_{loop}), die als die Summe der beiden transformierten Abschlussimpedanzen auf der rechten und der linken Seite der Leitung zu der Messstelle definiert wird. In Abbildung 2-links ist die zu messende Schleifenimpedanz an einer Position entlang der Einfachleitung dargestellt. In Abbildung 2-rechts ist die Bedeutung der Übertragungsfunktion der Messzange dargestellt. Aus diesem Grund muss für eine genaue Berechnung der Schleifenimpedanz die frequenzabhängige Übertragungsfunktion des Sensors aus der Messung herausgerechnet werden. Für die Berechnung der einzelnen Abschlussimpedanzen wird die Impedanztransformation entlang der Einfachleitung mit aus der Geometrie oder der Messung einfach zu bestimmenden Leitungsparametern für die Aufstellung eines Gleichungssystems verwendet. Im Falle von zwei unbekanntem Abschlussimpedanzen werden mindestens zwei Messungen benötigt. Durch die Periodizität der Schleifenimpedanz entlang der Leitung kann die zweite Messung trotz einer anderen Position zu der gleichen Impedanz führen. In diesem Fall sind die Gleichungen linear abhängig und liefern keine eindeutige Lösung. Für eine eindeutige Lösung muss der zweite Messpunkt zu linear unabhängigen Gleichungen führen. Jede zusätzliche Messung an einer anderen Stelle entlang der Leitung führt zu einem überbestimmten Gleichungssystem, was bei einem verrauschten Messdatensatz zu einer Erhöhung der Genauigkeit der geschätzten Abschlussimpedanzen führen kann.

2.1. Single-Probe Verfahren (SPV)

In einem Aufbau nach [2], wie in Abbildung 3 skizziert, wird die BCI-Zange (bzw. ein Stromsensor) mit einem NWA verwendet. Der gemessene 1-Port-S-Parameter (Reflektion) am Sensoranschluss beinhaltet die Schleifenimpedanz gewichtet mit der Übertragungsfunktion des Stromsensors.

Die Extraktion der Schleifenimpedanz aus den Rohdaten erfolgt durch das Deembedding der BCI-Übertragungsfunktion. Um die parasitären Effekte möglichst zu vermeiden, werden im ersten Schritt, wie in Abbildung 4-links dargestellt, in einem Kalibrierverfahren nach [6] die S-Parameter des Aufbaus gemessen. Das 3-Port-Model der BCI-Zange wird anschließend durch das De-embedding von Leitungen und Messwinkeln aus der Messung gewonnen. Im Gegensatz zum Kalibrierverfahren in [2], bei dem die Kalibration in einem Kalibrierhalter erfolgt, werden in diesem Model die parasitären kapazitiven Kopplungen zwischen den metallischen Oberflächen in dem Kalibrierhalter nicht mehr in dem Model enthalten sein.

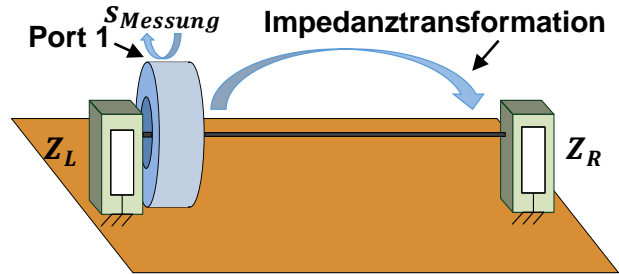
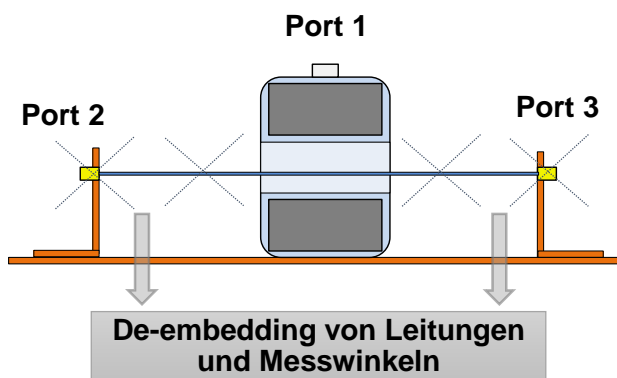


Abbildung 3: Reflexionsmessung mit BCI-Zange



Kalibrieraufbau

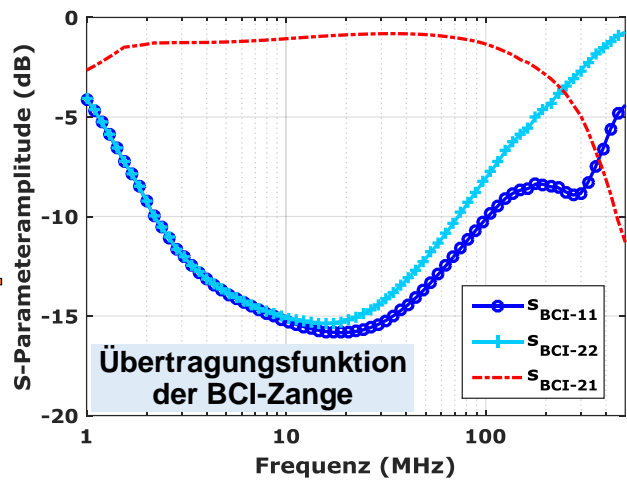


Abbildung 4: Modellierung der BCI-Zange anhand der S-Parametermessung (links), der 2-Port-S-Parameterdatensatz (S_{BCI}) als die Übertragungsfunktion der BCI-Zange (rechts)

Um die Übertragungsfunktion der BCI-Zange durch einen 2-Port Datensatz zu beschreiben (S_{BCI}) und das De-embedding der BCI-Zange aus der Messung mittels der Kettenmatrix zu ermöglichen, wird das 3-Port-Single-Ended-Model in einen 2-Port-Datensatz (siehe Abbildung 4-rechts), bestehend aus einem Single-Ended-Port (BCI-Anschluss) und einem differentiellen Port für die beiden anderen Ports, konvertiert [7]:

$$s_{BCI-11} = s_{11}, \quad s_{BCI-22} = \frac{1}{2} (s_{22} - s_{23} - s_{32} + s_{33}) \quad (1)$$

$$s_{BCI-12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_{12} - s_{13}), \quad s_{BCI-21} = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_{21} - s_{31}), \quad (2)$$

Für die Berechnung der T-Parameter und anschließende Kaskadierung der Datensätze muss die 1-Port Messung ($s_{Messung}$) zu einem 2-Port Datensatz ($S_{Messung}$) erweitert

werden. Dazu wird mathematisch ein virtueller Port ohne Kopplung zum Messdatensatz und idealer Reflektion hinzugefügt.

$$\mathbf{S}_{\text{Messung}} = \begin{pmatrix} S_{\text{Messung}} & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Durch die Konversion der Datensätze in T-Parameter ($\mathbf{T}_{\text{Messung}}$ und \mathbf{T}_{BCI}), kann die Schleifenimpedanz, ebenfalls in T-Parameter Form (\mathbf{T}_{loop}), wie folgt berechnet werden

$$\mathbf{T}_{\text{Messung}} = \mathbf{T}_{\text{BCI}} \mathbf{T}_{\text{loop}} \rightarrow \mathbf{T}_{\text{loop}} = \mathbf{T}_{\text{BCI}}^{-1} \mathbf{T}_{\text{Messung}} \quad (4)$$

Die T-Parameter werden anschließend in Z-Parameter, die der zu bestimmenden Schleifenimpedanz entsprechen, konvertiert.

2.2. Double-Probe Verfahren (DPV)

In diesem Verfahren werden eine BCI-Zange und ein Stromsensor (bzw. zwei Stromsensoren) zur Bestimmung der Schleifenimpedanz verwendet (Abbildung 5). Hierzu wird von einem Transformatormodell für die Koppelzangen ausgegangen.

Abbildung 6 zeigt den Kalibrierenaufbau und die gemessene Transmission zwischen allen vier Anschlüssen anhand einer 4-Port-S-Parametermessung. Im eigentlichen Testaufbau sind der dritte und vierte Port nicht mehr zugänglich, denn die beiden Enden sind mit Impedanzen abgeschlossen. Die dargestellte Transmission dient hier nur zur Verdeutlichung des Übertragungsverhaltens. Die Messstruktur wird zur Aufnahme eines 2-Portdatensatzes im Testaufbau eingesetzt (S_{Messung}). In einem Kalibrierungsverfahren nach [8] wird der Einfluss der Messstruktur mittels zweier zusätzlicher Messungen mit bekannten Abschlussimpedanzen direkt aus den Messergebnissen eliminiert.

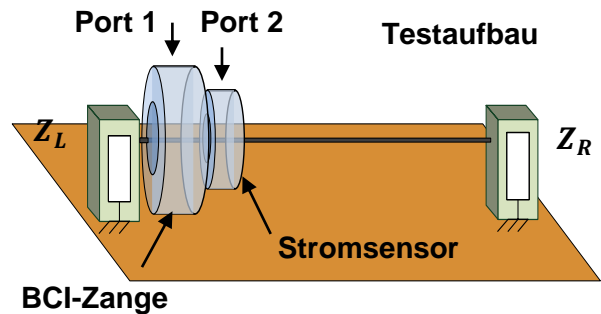


Abbildung 5: Positionierung der Sensoren in einem Testaufbau

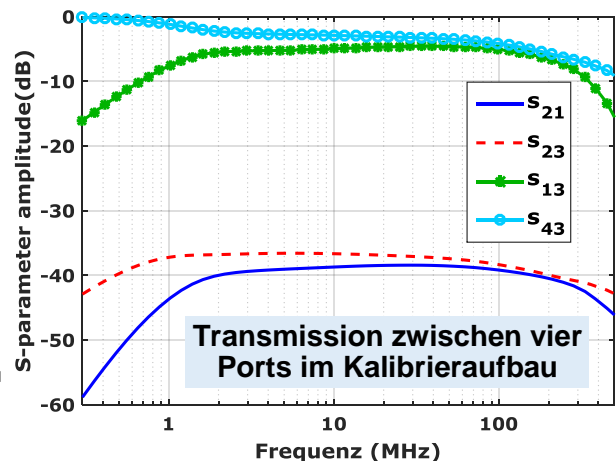
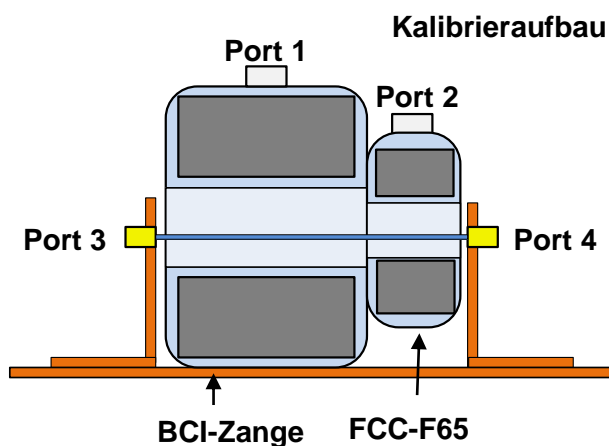


Abbildung 6: Kalibrierenaufbau für De-embedding der Messstruktur (links). Gemessene Transmission zwischen den vier Ports im Kalibrierenaufbau (rechts)

Im ersten Schritt werden die beiden Zangenanschlüsse im Kalibrierenaufbau mit einem NWA verbunden. Der dritte Port des Aufbaus wird kurzgeschlossen. Der vierte Port wird mit einem SMA-Kurzschluss und $50\ \Omega$ terminiert. Die beiden 2-Port-S-Parameterdatensätze können zur Charakterisierung der beiden Sensoren verwendet

werden, denn sie beinhalten die Einflüsse der gekoppelten Induktivitäten (Transformator) und die zusätzlich hinzugefügten Impedanzen durch die Sensoren in der Schleife. Beim Einklemmen der Sensoren an einer beliebigen Stelle entlang der Leitung wird die Schleifenimpedanz (Z_{Loop}) aus der Sicht dieses Punktes wie folgt berechnet:

$$Z_{loop} = 50 \frac{S_{50\Omega}}{S_{KS} - S_{50\Omega}} \left(\frac{S_{KS}}{S_{Messung}} - 1 \right), \quad \text{mit } S_{KS/50\Omega} = \frac{S_{21(KS/50\Omega)}}{1 - S_{11(KS/50\Omega)}} \quad (5)$$

S_{KS} und $S_{50\Omega}$ sind die gemessenen S-Parameter-Werte, wenn der Kalibrierungsaufbau jeweils mit einem Kurzschluss und 50Ω terminiert wird.

2.3. Extended Double-Probe Verfahren (EDPV)

Im Gegensatz zum DPV wird in diesem Verfahren der gesamte Testaufbau, inklusive beider Messzangen und Leitungen bis zu den Anschlüssen der Abschlussimpedanzen, anhand einer 4-Port-S-Parametermessung charakterisiert. Hierzu werden im ersten Schritt alle vier vorhandenen Anschlüsse (Zangenanschlüsse und Leitungsanschlüsse) mit dem NWA verbunden. Der so gemessene 4-Port-Datensatz dient als Kalibrationsdatei und beinhaltet alle notwendigen Informationen, die den gesamten Aufbau ohne Abschlussimpedanzen charakterisieren. Im nächsten Schritt werden der dritte und vierte Port des Testaufbaus mit den DUT terminiert. Die beiden Zangenanschlüsse werden hier zur Aufnahme eines 2-Port-Datensatzes eingesetzt. Mit einem Deembedding-Verfahren, welches im Folgenden beschrieben wird, können aus dem 2-Portdatensatz mit Hilfe der Kalibrationsdatei die Charakteristiken der Messzangen und der Leitungen mathematisch eliminiert werden. Ähnlich dem Vorgehen aus SPV müssen die Datensätze zunächst in die ABCD- bzw. T-Parameterdarstellung konvertiert werden. Durch Inversenbildung des Setup-Datensatzes und Kaskadierung mit dem Messdatensatz ergibt sich ein neuer 2-Port Datensatz, der in Z-Parameter Darstellung konvertiert wird. Im Gegensatz zum SPV beinhalten die so gewonnenen 2-Port-Z-Parameter nicht mehr die Schleifenimpedanz sondern getrennt die angeschlossenen Einzelimpedanzen auf der linken ($Z_L = Z_{11}$) und rechten ($Z_R = Z_{22}$) Seite des Aufbaus.

2.4. Current-Distribution Verfahren (CDM)

Der ortsabhängige Störstrom- und Störspannungsverlauf ist unter anderem abhängig von den Abschlussimpedanzen. Über das Verhältnis zwischen Stromminimum (I_{min}) und -maximum (I_{max}) m entlang einer als verlustlos angenommenen Leitung, die länger ist als ein Viertel der Wellenlänge (d.h. bei 1,5 m Leitungslänge ab ca. 50 MHz), kann bei bekanntem Z_0 die Abschlussimpedanz einer Leitung bestimmt werden [9]:

$$\frac{1-m}{1+m} = \frac{Z_{L/R} - Z_0}{Z_{L/R} + Z_0}, \quad \text{mit } m = \frac{I_{min}}{I_{max}} \quad (6)$$

In diesem Verfahren wird eine BCI-Zange zur Stromeinkopplung in den Aufbau eingesetzt (Abbildung 7-links). Ein Stromsensor wird zur Messung des Stromamplitudenverlaufs verwendet. Mit einem Spektrumanalysator wird der Strom entlang der Leitung aufgenommen. Durch eine Datennachbearbeitung in Matlab und die Interpolation der Messdaten wird die Stromamplitude für jeden beliebigen Punkt berechnet. Durch die Bestimmung des Anpassungsfaktors (m) und der Position des ersten Stromminimums (l_{1min}) wird die komplexe Abschlussimpedanz wie folgt berechnet

$$Z_{L/R} = Z_0 \frac{\frac{1}{m} - j \tan(\beta l_{1min})}{1 - j \frac{1}{m} \tan(\beta l_{1min})} \quad (7)$$

β und Z_0 sind die Phasenkonstante und der Wellenwiderstand der Leitung. Der simulierte Stromverlauf entlang einer Beispielkonfiguration für ein 400 MHz-Störsignal ist in Abbildung 7-rechts dargestellt. Der größte Vorteil in diesem Verfahren ist, dass jede Abschlussimpedanz separat eindeutig bestimmt werden kann.

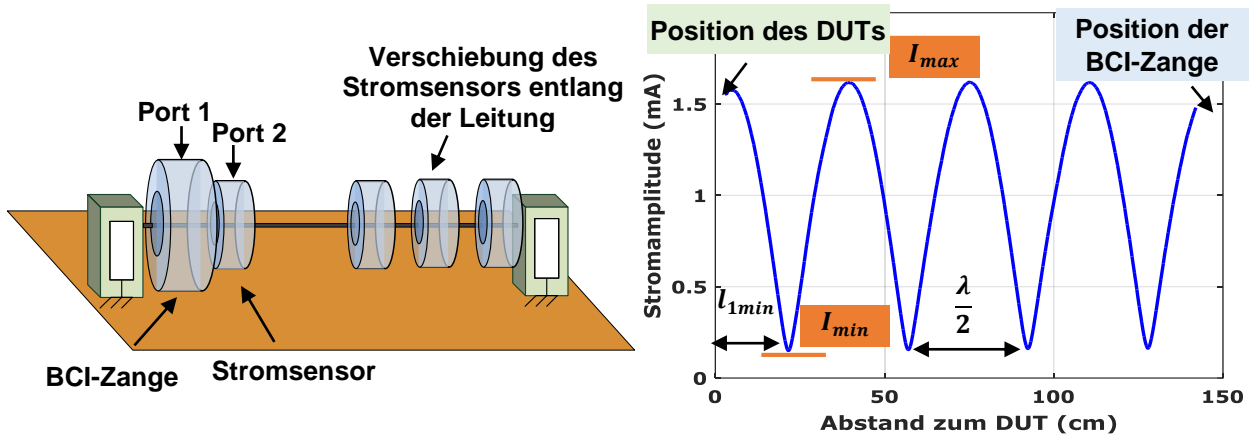


Abbildung 7: Bestimmung der Stromverteilung mit einem Stromsensor (links). Simulierter Stromverlauf in einem Testaufbau mit einer hochohmigen Abschlussimpedanz (rechts)

3. Anwendungsbeispiel und Ergebnisse

Für die messtechnische Verifizierung wurde ein 1,5 m lange Einfachleitung 5 cm über der Massefläche zwischen zwei leitfähigen niederimpedanten Blechplatten an Koaxialanschlüssen montiert. Der Aufbau wird auf der linken Seite mit einem 50Ω -Widerstand und auf der rechten Seite mit einer 470Ω und 10Ω -Widerstand terminiert. Die Abschlussimpedanz auf der rechten Seite wird als unbekannt angenommen. Der Wellenwiderstand und die Ausbreitungskonstante der Leitung werden mathematisch berechnet. In Abbildung 8 ist der Vergleich zwischen den indirekt und den direkt gemessenen Abschlussimpedanzen für die Amplitude und die Phase dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Korrelation bis 200 MHz für SP- und DP-Verfahren. Das CD-Verfahren eignet sich aufgrund der bereits erwähnten Einschränkung der Länge nur für höhere Frequenzen. Für das EDP-Verfahren ergeben sich gute Resultate ab ca. 100 MHz. Vorteil des CD- und EDP-Verfahrens sind die separat ermittelbaren Abschlussimpedanzen.

4. Diskussion

Die Ursache für die Abweichungen zwischen den tatsächlichen und gemessenen Impedanzen ist hauptsächlich auf Mess- und Deembeddingfehler zurückzuführen. Die eigentliche Abschlussimpedanz am Ende der Einfachleitung ist in dem vorgeschlagenen Testaufbau nicht eindeutig ermittelbar. Der als Abschlussimpedanz dargestellte Verlauf besteht im Wesentlichen aus einem Widerstand und einem parasitären LC-Glied. Die Messergebnisse reagieren sehr empfindlich auf die parasitären kapazitiven Kopplungen zwischen metallischen Oberflächen und dem Test-/Kalibrierlaufbau im höheren

Frequenzbereich. Die Qualität der durch das Kalibrieren gewonnenen Deembedding-Informationen wird von den parasitären dominanten Kapazitäten stark beeinträchtigt. Das Einbringen eines Stromsensors in den Aufbau und die Inhomogenität in der Nähe von Leitungsenden müssen bei der Bestimmung von Z_o und γ der Einfachleitung und bei der Impedanztransformation berücksichtigt werden. Trotz des induktiven Verhaltens der Stromsensoren, ist die zusätzlich hinzugefügte Kapazität des metallischen Sensoraufbaus dominant und führt zu einer Verringerung des Wellenwiderstands. Die geringe Dynamik der Stromsensoren gegenüber Änderungen der Schleifenimpedanz wirkt nachteilig auf den Einsatz dieser Verfahren. Außerdem berücksichtigt das vorgeschlagene Kalibrierverfahren im DPV nicht die hinzugefügte Induktivität durch die gemessene Leitung in der Schleifenimpedanz. Die Verwendung kleinerer Stromsensoren und bessere Deembedding-Verfahren könnten die Messgenauigkeit erhöhen.

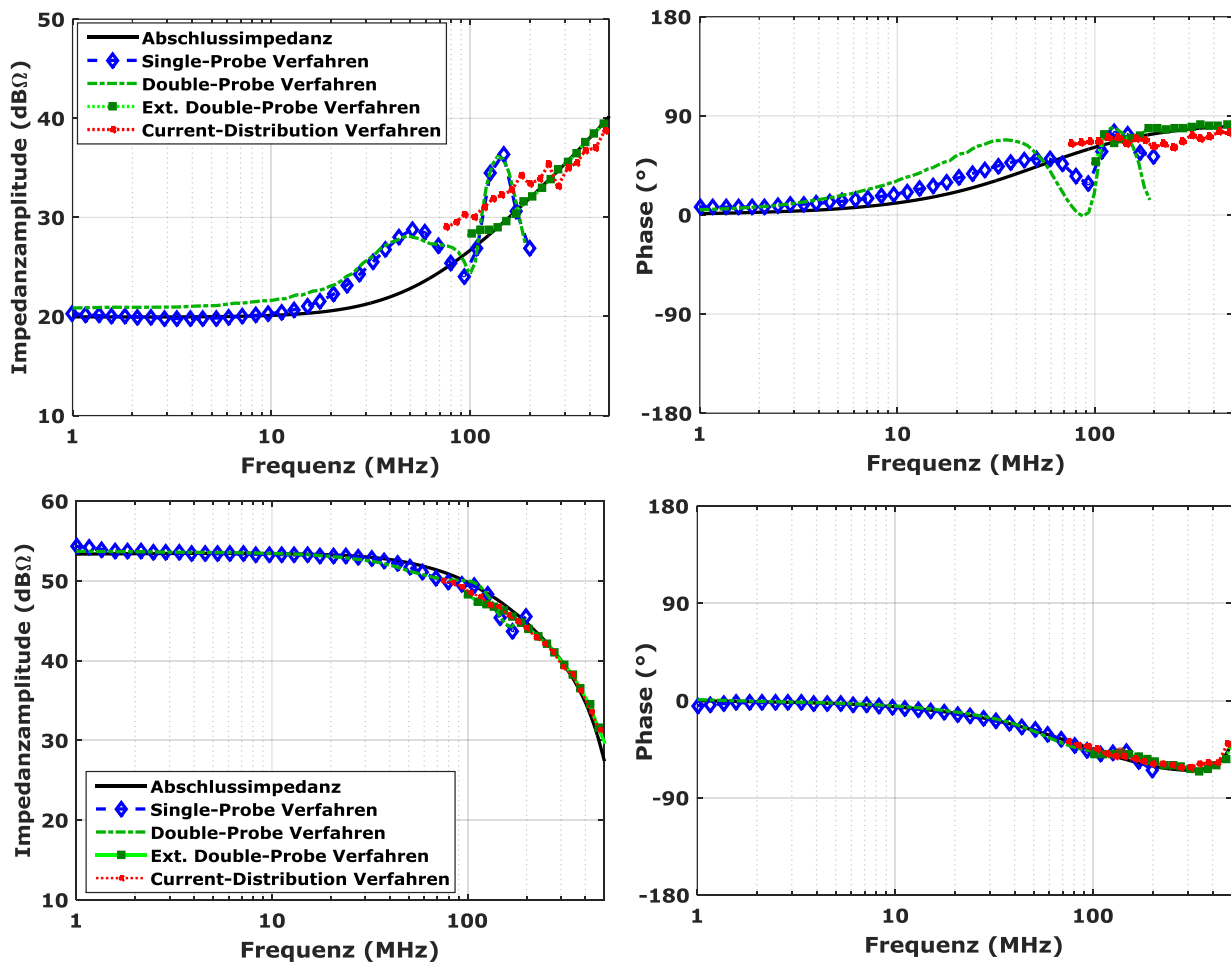


Abbildung 8: Bestimmung der Amplitude und der Phase einer niederohmigen (10Ω , oben) und einer hochohmigen Abschlussimpedanz (470Ω , unten) mit Hilfe von SPV, DPV, EDPV und CDV

5. Zusammenfassung und Ausblick

Um das BCI- und das Antennenprüfverfahren nach ISO 11452 vergleichbarer machen zu können, müssen die eingespeisten Leistungen angepasst werden. Für die Berechnung der äquivalenten Leistung müssen die Abschlussimpedanzen bekannt sein. In diesem Beitrag wurden vier praxistaugliche Methoden zur Bestimmung der Abschlussimpedanzen in einem Prüfaufbau vorgestellt. Die Impedanzen, z.B. am Eingang eines

DUTs, können potentialfrei mittels Stromsensoren oder einer BCI-Zange gemessen werden. Für die hier vorgestellten Single-Probe-, Double-Probe- und Extended Double Probe-Verfahren müssen die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen der verwendeten Stromsensoren durch ein Deembedding-Verfahren aus den Messdaten eliminiert werden. Das Current-Distribution Verfahren verwendet die Stromverteilung entlang der Leitung, um die Abschlussimpedanz zu bestimmen. Das Potential dieser Methoden wurde für eine hochohmige und eine niederohmige Abschlussimpedanz aufgezeigt. In einem Aufbau sind normalerweise die beiden Abschlussimpedanzen unbekannt. Inwieweit bei SPV und DPV die zwei Unbekannten durch Messungen an zwei Positionen und Lösen eines Gleichungssystems bestimmt werden können, ist noch zu untersuchen. Der Einsatz des EDPVs für den Niederfrequenzbereich soll in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden. Bisher wurden die Untersuchungen an einfachen Leitungsstrukturen durchgeführt. In Zukunft sollen Leitungsbündel berücksichtigt werden.

6. Danksagung

Die Arbeit für diesen Konferenzbeitrag wurde teilweise im Rahmen des Programms „Rationale Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen – progres.nrw – Programmbereich Innovation und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) – Ziel 2 – Programm 2007-2013, Phase VI, als Teil des Projekts ZAESAR (Referenznummer 64.65.69-EM-2009A) gefördert.

Literatur

- [1] ISO 11452-2: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated EM energy -- Part 2: Absorber-lined shielded enclosure.
- [2] ISO 11452-4: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated EM energy, Part 4: Bulk Current Injection.
- [3] J. W. Adams, J. Cruz, and D. Melquist, "Comparison measurements of currents induced by radiation and injection," IEEE Transaction on Electromagnetic compatibility , Vol. 34, No. 3, pp. 360–362, Aug. 1992.
- [4] F. Grassi, G. Spadacini, F. Marliani, S. A. Pignari, „Use of Double Bulk Current Injection for Susceptibility Testing of Avionics“, IEEE Transaction on Electromagnetic compatibility, Vol. 50, No. 3, Aug 2008, pp. 524-535.
- [5] A. Hassanpour Razavi, S. Miropolsky, S. Frei, „Verbesserung der Korrelation zwischen dem BCI- und dem Antennenprüfverfahren für Kfz-Komponenten durch Anpassung von Verstärkerleistung und Position der BCI-Zange “ EMV-Düsseldorf, 2014.
- [6] A. Hassanpour Razavi, S. Miropolsky, S. Frei, „Measurement-Based Circuit Modeling of Conducted and Radiated Automotive Immunity Test Setups“, EMC Europe: Gothenburg, 2014.
- [7] Scorpion Three and Four Port S-parameter Measurements: Calibrations and Mixed-Mode Parameters Application Note, Anritsu Company, 2002.
- [8] G. Liu, Y. Ding, C. Chen, R. Kautz, J. Drewniak, D. Pommerenke, M. Koledintseva, „A Dual-Current-Probe Method for Characterizing Common-Mode Loop Impedance“, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, USA, 2003
- [9] O. Zinke, H. Brunswig. „Lehrbuch der Hochfrequenztechnik“, Springer, 1965.