

Verbesserung der Korrelation zwischen dem BCI- und dem Antennenprüfverfahren für Kfz-Komponenten durch Anpassung von Verstärkerleistung und Position der BCI-Zange

Dipl.-Ing. Seyyed Ali Hassanpour Razavi, Technische Universität Dortmund

M.Sc. Sergey Miropolsky, Technische Universität Dortmund

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

1 Einleitung

Die Störfestigkeit von Kfz-Systemen kann anhand von verschiedenen Verfahren nach ISO 11452 analysiert werden. Für eine Freigabepfung wird häufig eine Antennenprüfung in einer elektromagnetisch abgeschirmten Messumgebung ohne Reflexionen gefordert (ALSE) [1]. Die hohen Kosten für die Anschaffung und der Platzbedarf eines Absorberraums sind bei diesem Prüfverfahren problematisch. Alternativ ist die Stromeinspeisung (BCI) [2] ein gerne verwendetes Kfz-Prüfverfahren, bei dem die Störung mittels eines HF-Transformators induktiv in den Kabelbaum eingekoppelt wird. Die Stromzange fungiert als Primärwicklung und die zu testende Leitung als Sekundärwicklung. Der Hauptvorteil des BCI-Verfahrens gegenüber der Feldeinkopplung in der Absorberkabine ist der geringere Aufwand. Damit können Systementwickler die Auswirkungen von Störungen auf ein System und die relative Störfestigkeit von verschiedenen Designs einfacher während der Entwicklung untersuchen und bewerten [3]. Die Vergleichbarkeit zwischen dem Antennenprüfverfahren und dem BCI-Verfahren wird in verschiedenen Veröffentlichungen diskutiert [4] [5]. Leider ist die Korrelation bei Anwendung nach Norm oft gering. Dieser Beitrag zeigt eine Möglichkeit, die Korrelation erheblich zu verbessern. Dies geschieht durch eine frequenzabhängige Anpassung der Position der BCI-Zange und der eingespeisten Leistung. In theoretischen Analysen werden Verfahren für die Positionierung der BCI-Zange und zur Bestimmung der einzukoppelnden Leistung erarbeitet. Ziel ist es immer, Ströme in den Leitungsabschlüssen mit den gleichen Amplituden wie mit einer Prüfantenne in der Absorberkabine zu erzeugen.

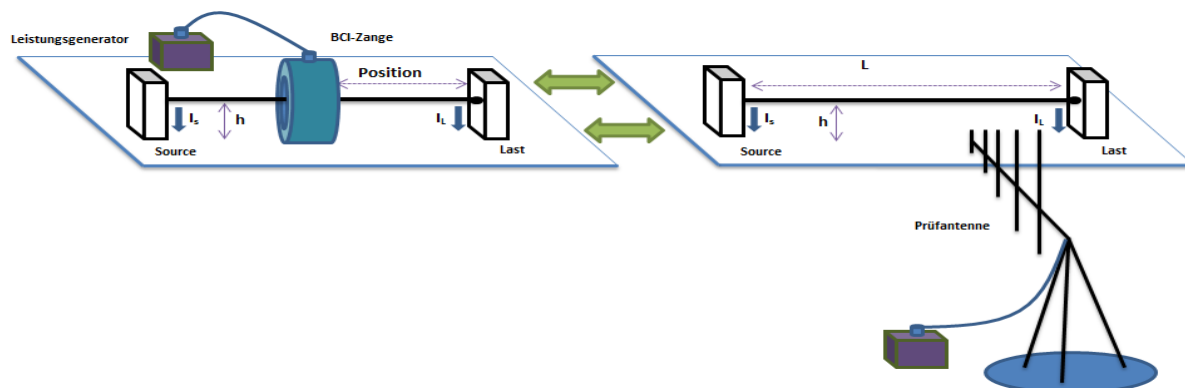


Abbildung 1: BCI und Antennenprüfung

2 Modellierung

In den folgenden Abschnitten werden Modelle vorgestellt, die für die simulationsbasierten Untersuchungen notwendig sind. Modelle für die Feldeinkopplung in Einfachleitungen werden für die ersten Grundsatzuntersuchungen benötigt. Hierbei geht es nicht darum, einen realen Aufbau mit hoher Genauigkeit zu untersuchen, sondern es sollen prinzipielle Zusammenhänge dargestellt werden.

2.1 Modellierung der Feldeinkopplung

Die Wirkung einfallender elektromagnetischer Felder auf Leitungen kann für bestimmte Strukturen analytisch berechnet werden [6]. In Abbildung 2 (links) ist eine einfache Struktur dargestellt, die hier als repräsentativ für einen Kfz-Elektroniksystemaufbau nach ISO angesehen wird. Die Struktur besteht aus einer nicht isolierten Einzelleitung über einer unendlich ausgedehnten Massefläche mit einer Länge von 1.5 m und einer Höhe von 5 cm über die Fläche. Der Leitungsdurchmesser beträgt 1.5 mm. Die Modellierung der Feldeinkopplung basiert auf der Leitungstheorie. Es wird davon ausgegangen, dass die felderzeugende Einrichtung aus [1] eine ebene Welle erzeugt. Die Polarisierung der Antenne kann als vertikal oder horizontal angenommen werden.

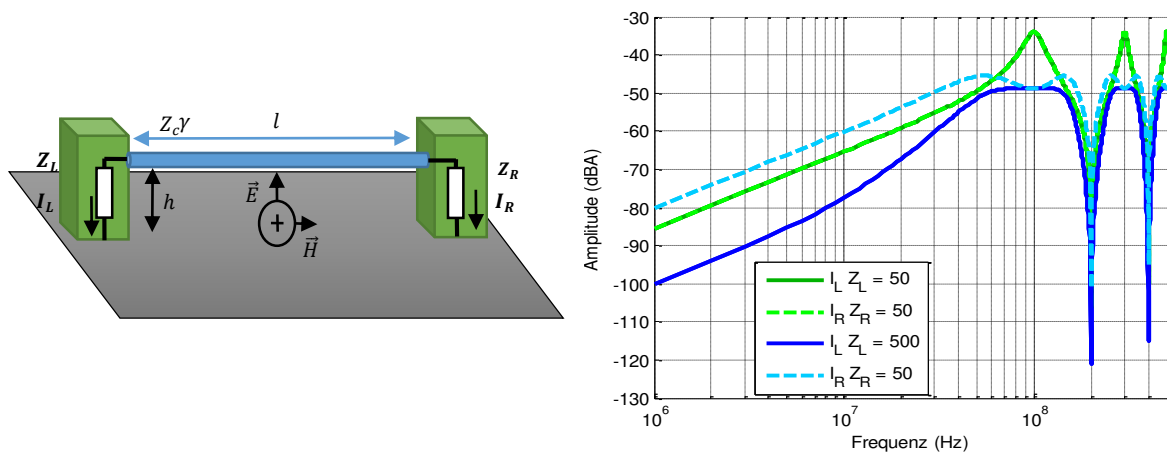


Abbildung 2: Stromverläufe für verschiedene Abschlusswiderstandskombinationen (grün und blau) verursacht durch eine einfallende ebene Welle (Vertikale Polarisierung)

Die Feldeinkopplung kann laut [1] mit einer Antenne in horizontaler und in vertikaler Polarisierung durchgeführt werden. Es wird zunächst exemplarisch von einer vertikalen Polarisierung eines homogenen elektrischen Feldes ausgegangen. Für eine Einfachleitung über Masse mit den beliebigen Terminierungen Z_L und Z_R können die eingekoppelten Ströme dann durch die folgenden Gleichungen bestimmt werden [6] :

$$I_R = \frac{2hE}{\cosh(\gamma l) (Z_L + Z_R) + \sinh(\gamma l) \left(Z_c + \frac{Z_R Z_L}{Z_c} \right)} \left[1 - \cosh(\gamma l) - \sinh(\gamma l) \left(\frac{Z_L}{Z_c} \right) \right] \quad (1)$$

$$I_L = \frac{2hE}{\cosh(\gamma l) (Z_L + Z_R) + \sinh(\gamma l) \left(Z_c + \frac{Z_R Z_L}{Z_c} \right)} \left[\cosh(\gamma l) - 1 + \sinh(\gamma l) \left(\frac{Z_R}{Z_c} \right) \right] \quad (2)$$

In Abbildung 2 sind die eingekoppelten Ströme in den beiden Terminierungen der Leitung für zwei verschiedene Impedanzkonfigurationen (blau: 500/50 Ω und grün: 50/50 Ω) exemplarisch dargestellt. Die elektrische Feldstärke wird zu 10 V/m angenommen.

2.2 BCI-Modellierung

In vielen Veröffentlichungen werden Methoden zur Modellierung von BCI-Stromzangen zur Einkopplung auf Ein- und Mehrfachleitungen vorgestellt.

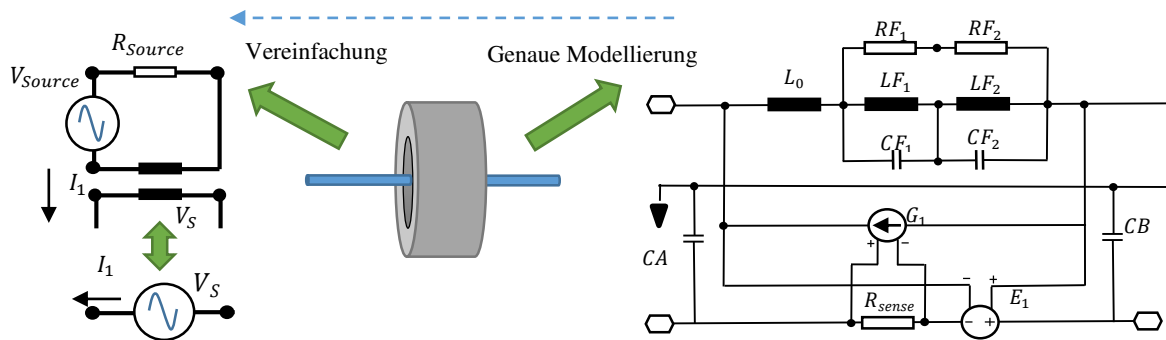


Abbildung 3: Vereinfachung - BCI-Modell

In [7] wurde ein auf Messung basierendes BCI-Zangenmodell gezeigt (Abbildung 3 – rechts), mit dem die Einkopplung auf eine Einfachleitung simuliert werden kann. Damit kann die Einkopplung durch eine BCI-Zange bis 500 MHz hinreichend genau beschrieben werden. Zange und Leitung können im Wesentlichen als gekoppelte Induktivitäten verstanden werden. Solange die BCI-Zange in dem Frequenzbereich betrieben wird, bei der das induktive Verhalten dominant ist, genügt für Grundsatzuntersuchungen ein einfaches Modell aus einer gekoppelten Induktivität.

Die Wirkung der Koppelinduktivität kann als eine gesteuerte Spannungsquelle beschrieben werden [8], damit kann das BCI-Modell durch eine einfache Spannungsquelle ersetzt werden, um die Anzahl der Variablen für Untersuchungen möglichst gering zu halten. Abbildung 3 (links) zeigt den vereinfachten Modellansatz mit einer gekoppelten Induktivität und einer Spannungsquelle. Ein Vergleich zwischen Simulationen mit beiden Modellen zeigt eine gute Übereinstimmung bei den eingespeisten Strömen (Abbildung 4).

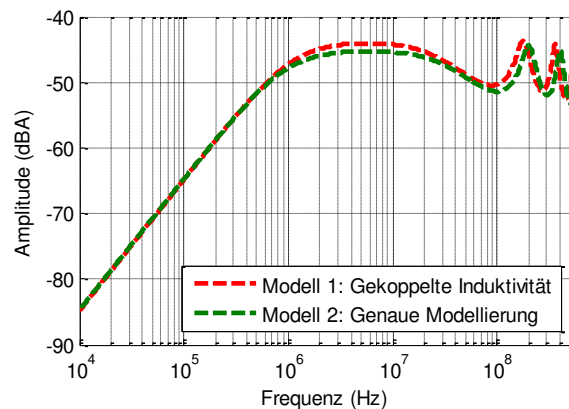


Abbildung 4: Vergleich – BCI-Modelle

Somit ist das vereinfachte Modell für Simulationen im betrachteten Frequenzbereich geeignet.

3 Frequenzabhängige Anpassung durch Minimierungsverfahren

Basierend auf der Netzwerktheorie werden zwei Minimierungsverfahren entwickelt, die durch Variation der BCI-Position und der Einspeiseleistung die Abweichung zwischen den eingekoppelten Strömen in den beiden Prüfverfahren minimieren. Die Untersuchung findet an einem Aufbau mit einer Spannungsquelle V_S , zwei Einfachleitungen mit den bekannten Leitungseigenschaften (γ, Z) und zwei Ersatzimpedanzen (Z_L, Z_R) als Leitungsterminierung (Abbildung 5) statt. Auf den Einsatz besonders genauer Leitungsmodelle wird hier verzichtet, da die entwickelten Methoden von dem Leitungstyp unabhängig sind und davon ausgegangen wird, dass die Ergebnisse auf beliebige Leitungen übertragen werden können.

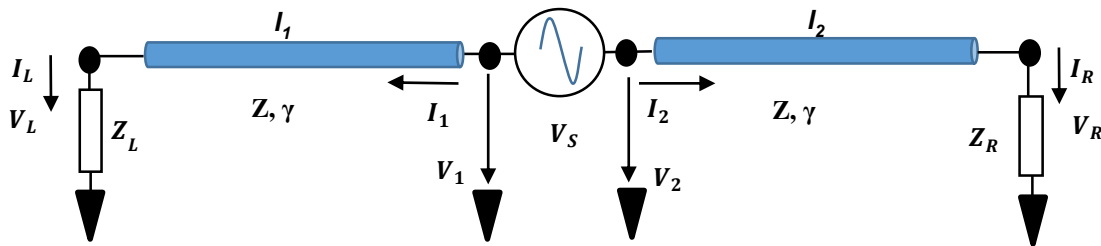


Abbildung 5: In der Systemmatrix abgebildete Konfiguration

3.1 Aufstellung der Systemmatrix

Mit Hilfe der MNA (Modified Nodal Analysis) und der Leitungstheorie, wird für die in Abbildung 5 dargestellte Struktur, die Systemmatrix (3) im Frequenzbereich aufgestellt. Die Spannungen und die Ströme am Anfang und am Ende der Leitungen stehen durch die ABCD-Matrix in Beziehung. Die Systemmatrix beinhaltet alle Informationen für die Berechnung der eingekoppelten Terminierungsströme. Die Systemmatrix A kann einfach um eine gekoppelte Induktivität erweitert werden.

$$A = \begin{pmatrix}
 \cosh(\gamma l_1) & 0 & -Z \sinh(\gamma l_1) & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{1}{Z} \sinh(\gamma l_1) & 0 & \cosh(\gamma l_1) & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \cosh(\gamma l_1) & 0 & Z \sinh(\gamma l_1) & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{Z} \sinh(\gamma l_1) & 0 & -\cosh(\gamma l_1) & 0 & 0 \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix}$$

$x^T = (V_1 \quad V_2 \quad I_1 \quad I_L \quad I_R)$
 $b^T = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad V_S)$
 $Ax = b$

The diagram includes several callouts:

- Leitung 1** (blue box) points to the first two rows of the matrix.
- Leitung 2** (yellow box) points to the last two rows of the matrix.
- Terminierungen** (green box) points to the last two columns of the matrix, labeled $-Z_L$ and $-Z_R$.
- Quellenmasche** (orange box) points to the fifth row of the matrix.
- Eingespeiste Ströme** (green box) points to the last two columns of the matrix.

3.2 Bestimmung der äquivalenten Position und Einspeiseleistung für BCI

Um die optimale Position und Quellenspannung für die Einspeisung von definierten Stromamplituden in den beiden Abschlüssen der Leitung zu bestimmen, wurden zwei Methoden verwendet, die im Folgenden beschrieben werden. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die eingespeisten Ströme für eine Referenzeingangsleistung durch die beiden Prüfverfahren. Die unterschiedlichen Verlaufsfunktionen sind auf die verschiedenen Koppelmechanismen zurückzuführen.

3.2.1 Brut-Force-Suche nach der minimalen Abweichung (bf)

Mit einem einfachen iterativen Verfahren wurden die BCI-Parameter für eine minimale Abweichung zur Antennenprüfung bestimmt.

Die Gesamtabweichung ergibt sich aus der Überlagerung der prozentualen Abweichung der Stromamplituden in beiden Terminierungen. In dem Fehlerraum wird nach dem Minimum gesucht. Beim ersten Suchvorgang wird das Minimum innerhalb der Position-Spannungsebene mit einer großen Schrittweite bestimmt. Im Bereich des somit gefundenen Minimums wird die Schrittweite verkleinert und die Suche wiederholt. Diese Prozedur kann nach gewissen Kriterien, wie zum Beispiel eine maximale Anzahl an Iterationen, abgebrochen werden.

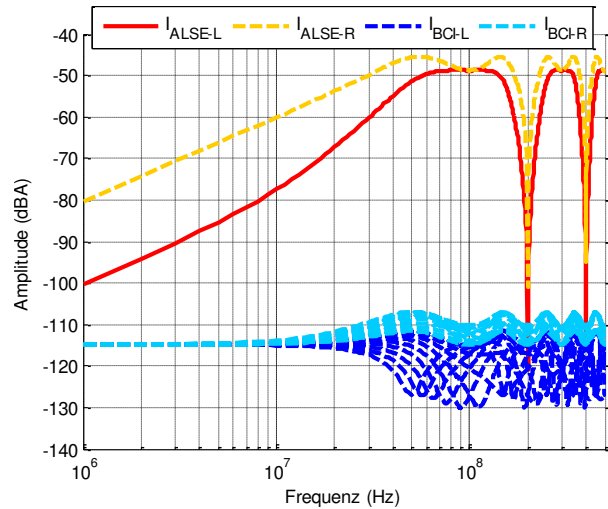


Abbildung 6: Vergleich (ALSE: Elektrische Feldstärke 10 V/m – BCI: Quellenspannung 1V)

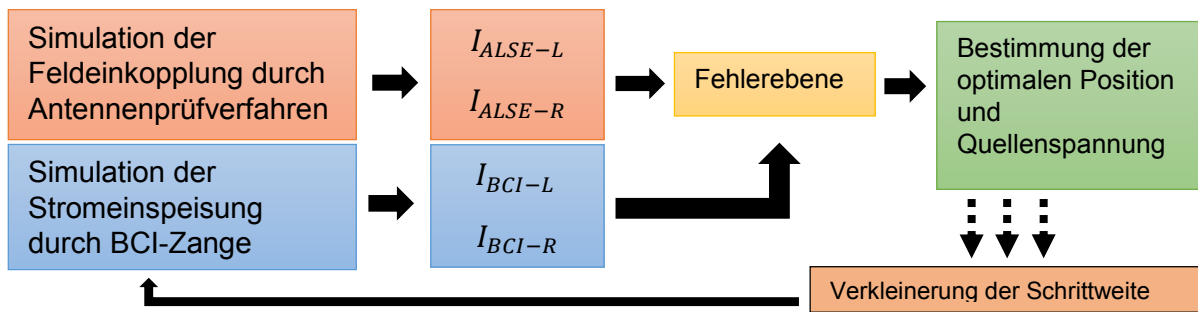


Abbildung 7: Verlauf - Anpassung

In Abbildung 8 ist exemplarisch ein auf der Position-Spannungsebene aufgestellter Fehlerraum bei $f = 120$ MHz dargestellt.

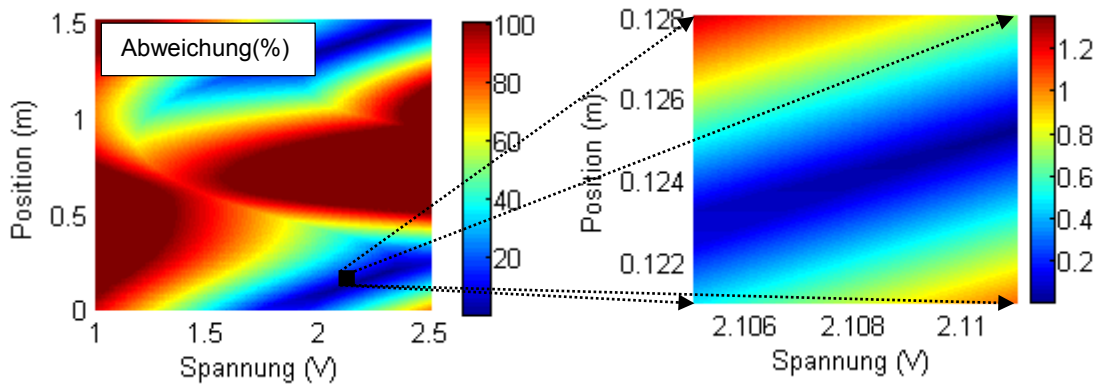


Abbildung 8: Suche im Ausschnitt mit der geringsten Abweichung- BF (Position-Spannung)

Schon anhand der Kontourplots ist es zu erkennen, dass die Suche nach einer kleineren Abweichung durch weitere Ausschnittvergrößerungen fortgesetzt werden kann. Ein wichtiger Aspekt bei der Suche nach dem Minimum in dem Fehlerraum ist das Vorhandensein von mehreren Lösungsregionen in dem Frequenzbereich ab 100 MHz. Es ist zu sehen, dass in dem dargestellten Fehlerraum mindestens zwei lokale Minima existieren.

3.2.2 Minimierung der Fehlerfunktionen (Least-Squares-Verfahren)

Mit einem zweiten Verfahren wurde numerisch die Fehlerfunktion minimiert und so die optimale Position bestimmt. Der Ablauf ist in Abbildung 9 dargestellt.

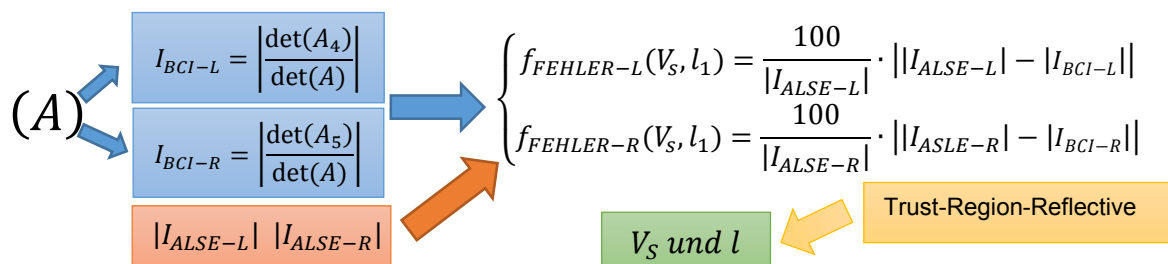


Abbildung 9: Verfahren zur numerischen Lösung des Gleichungssystem

Im ersten Schritt werden mittels des Cramer-Verfahrens mit Hilfe der Systemmatrix und angenommenen Startwerten für die noch unbekannt Variablen (V_S, l_1) die eingespeisten Ströme in den Terminierungen berechnet. Im zweiten Schritt werden aus den vorgegebenen Strömen durch die Feldeinkopplung der Antenne zwei prozentuale Fehlerfunktionen gebildet. Die Fehlerfunktionen bestehen aus den Differenzen zwischen den gegebenen ALSE-Stromamplituden und den BCI-Strömen an den jeweiligen Enden der Leitungen. Die zwei Fehlerfunktionen bilden ein Gleichungssystem, das sich mit verschiedenen numerischen Methoden lösen lässt. Trust-Region-Reflective-Verfahren [9] erweist sich hier als einfach aber leistungsstark zur Bestimmung der unbekannt Variablen. Um große Sprünge bei der Bestimmung der Zangenposition zu vermeiden, wird eine gefundene Lösung für das Gleichungssystem als der Anfangswert für die nächste Frequenz eingesetzt.

4 Anwendung und Verifikation der Verfahren

Die beiden entwickelten Verfahren, nämlich die Brut-Force-Suche (bf) und das Lsq-Verfahren (lsq), werden auf zwei Konfigurationen mit verschiedenen Impedanzverhältnissen (K1: 500 Ω /50 Ω und K2: 50 Ω /50 Ω) angewandt, um die Gültigkeit und mögliche Anwendungsgebiete zu zeigen. Dargestellt ist hier die Untersuchung an einer Einzelleitung über Masse (Länge = 1.5 m, Höhe = 5 cm, Durchmesser = 1.5 mm). Die vorgegebenen Signale und die Nachbildung der Stromverläufe sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 zu sehen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Simulationsergebnissen besonderes bei den gleichen Impedanzverhältnissen. Abbildung 12 stellt die minimale Abweichung für verschiedene Impedanzverhältnisse bis 500 MHz dar.

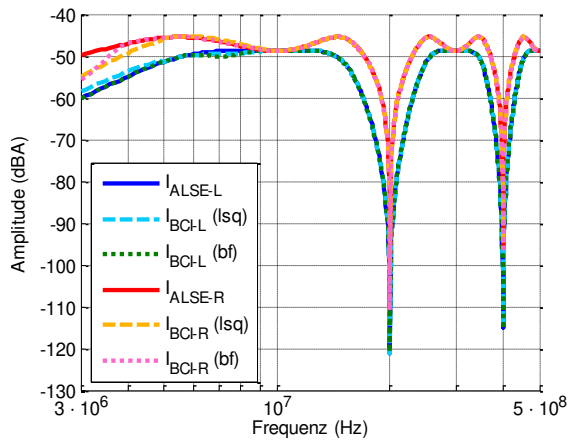


Abbildung 10: Verifikation- Brute-Force und Least-Squares (K1: 500 Ω/50 Ω)

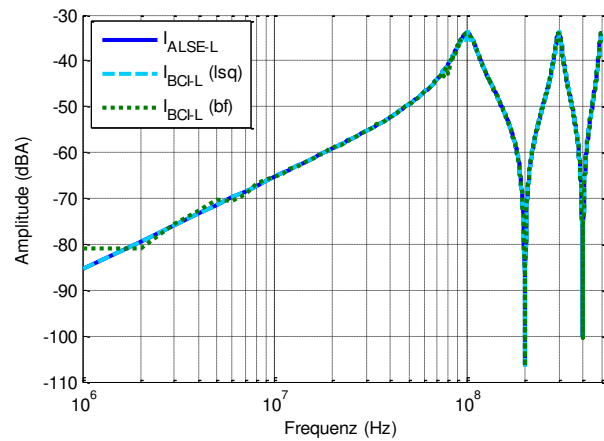


Abbildung 11: Verifikation- Brute-Force und Least-Squares (K2: 50 Ω/50 Ω)

Es ist ersichtlich, dass die ALSE-Ströme ab etwa 150 MHz für alle Impedanzverhältnisse gut nachgebildet werden können. Die Nachbildung der Ströme im Niederfrequenzbereich kann mit größeren Abweichungen verbunden sein, denn die Verschiebung der BCI-Position und die Variation der Speisespannung reichen für eine Anpassung der beiden Stromverläufe nicht aus.

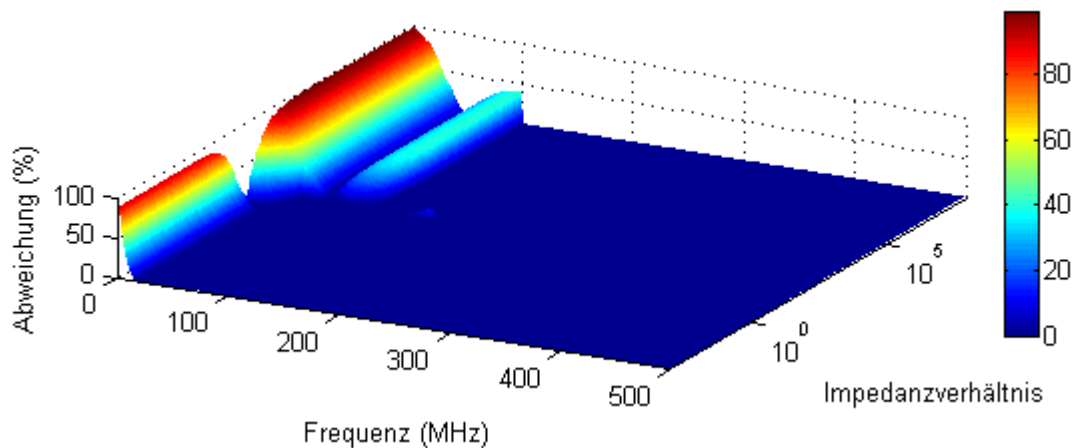


Abbildung 12: Verifikation- Verschiedene Impedanzverhältnisse ($10^{-3} - 10^8$)(Abweichung %)

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Methode vorgestellt, um die Feldeinkopplung in ein Kabel durch eine Antennenprüfung nach ISO 11452-2 in einer Absorberkammer durch eine BCI-Prüfung nach ISO 11452-4 durch Verschieben der Position der BCI-Zange und Anpassung der Verstärkerleistung besser nachzubilden. Beide Verfahren werden modelliert und anhand der Modelle wurden Untersuchungen durchgeführt. Zur Bestimmung der Position und Eingangsleistung der BCI-Zange werden zwei Verfahren vorgeschlagen. Mit den entwickelten Verfahren kann eine frequenzabhängige Anpassung der Position und Leistung für verschiedene Impedanzverhältnisse durchgeführt werden.

Bisher wurden die Untersuchungen nur an einfachen Leitungsstrukturen in der Simulation durchgeführt. In der Zukunft sollen auch Kabelbündel berücksichtigt werden. Weiterhin ist es für die Auswahl der Position der Zange und der Einspeiseleistung noch notwendig, die Impedanz der Kabelabschlüsse zu kennen, was in der Praxis ein Problem darstellt. Hier müssen noch praxistaugliche Verfahren entwickelt werden, um die notwendigen Impedanzdaten zu erhalten. Inwieweit die noch nicht berücksichtigten Phasenbeziehungen eine Rolle spielen ist noch zu untersuchen.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des CATRENE-Projekts CA310 EM4EM (Electromagnetic Reliability and Electronic Systems for Electro Mobility) durchgeführt. Diese individuelle Forschung wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der Nummer 16 M3092 I gefördert. Die Autoren sind allein für den Inhalt verantwortlich.

7 Literatur

- [1] ISO 11452-2: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy -- Part 2: Absorber-lined shielded enclosure.
- [2] ISO 11452-4: Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy, part 4: Bulk current injection (BCI).
- [3] S. Pignari und F. G. Canavaro, „On the equivalence between radiation and injection in BCI testing,“ IEEE Int. Symp. On Electromagn. Compat. Proceedings, pp. 179- 182, May 1997.
- [4] F. Grassi, G. Spadacini, F. Marliani und S. A. Pignari, „Use of Double Bulk Current Injection for Susceptibility Testing of Avionics,“ IEEE Trans. Electromagn. Compat, Vol 50, pp. 524-535, August 2008.
- [5] D. A. Hill, „Current Induced on Multiconductor Transmission Lines by Radiation and Injection,“ IEEE Trans. Electromagn. Compat, Vol 34, pp. 445-450, November 1992.
- [6] C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Line, Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1994.
- [7] S. Frei und S. Miropolski, Modeling of Bulk Current Injection (BCI) Setups for Virtual Automotive IC Tests, EMC Europe: Wroclaw, 2010.
- [8] M. F. Sultan, „Modeling of a bulk current injection setup for susceptibility threshold measurements,“ IEEE Int. Symp. On Electromagn. Compat. Proceedings, pp. 188-195, 1986.
- [9] T. Coleman und Y. LI, „An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds,“ SIAM Journal on Optimization, p. 418–445, 1996.