

Optimierung der virtuellen EMV Absicherung durch Erstellung von leitungsgeführten Störquellenmodellen aus Messungen

Referentin: Janne Hein, BMW AG & Technische Universität München, München, Deutschland, janne.hein@bmw.de

Co-Autoren: Johannes Hippeli, BMW AG, München, Deutschland, johannes.hippeli@bmw.de; Thomas F. Eibert, Technische Universität München, München, Deutschland, eibert@tum.de

1 Abstract

Es wird eine Methodik zur Entwicklung und Verwendung von leitungsgeführten Störquellenmodellen auf Komponentenebene präsentiert, welche für die virtuelle EMV Absicherung auf Komponenten- und Fahrzeugebene eingesetzt werden kann. Bisher sind Störquellenmodelle für Fahrzeugkomponenten kaum verfügbar. Ohne komponentenspezifische Modelle können nur vergleichende Analysen durchgeführt werden oder Tendenzen bestimmt werden. Das Ziel ist eine Methodik, mit deren Anwendung für jede E/E-Komponente mit Hilfe des Normaufbaus der leitungsgeführten Emissionsmessung ein leitungsgeführtes Störmodell für virtuelle EMV Analysen generiert werden kann. Für welche Art von Störungen die Methodik anwendbar ist und welche messtechnischen Voraussetzungen dafür benötigt werden, wird diskutiert. Ein konkretes Anwendungsbeispiel wird mit Hilfe von Simulationen untersucht und die Vorteile der Verwendung von Störquellenmodellen für die EMV Absicherung werden präsentiert.

2 Motivation

Das elektromagnetische Verhalten von Elektro- und Hybridfahrzeugen weist auf Grund der Vielzahl an elektromagnetischen Phänomenen und der Kombination von 230 V Netz, HV-DC Bordnetz und 12 V/48 V Bordnetz im Fahrzeug eine sehr hohe Komplexität auf. EMV Simulationen bringen den Vorteil, dass gezielte Analysen auf Komponenten- und Fahrzeugebene bereits in sehr frühen Entwicklungsstadien durchgeführt werden können. Die virtuellen Analysen ergänzen den stark messtechnisch geprägten Absicherungsprozess und führen zu einer durchgängigen, verlässlichen und effizienten Absicherungsstrategie und zu einer Qualitätssteigerung der Fahrzeuge. Für die Fahrzeugzulassung müssen die gesetzlichen Anforderungen nach [1] und [2] für das Gesamtfahrzeug im Straßenverkehr eingehalten werden. Die Normen beschreiben die Anforderungen und Prüfverfahren für die Elektromagnetische Verträglichkeit für Kraftfahrzeuge und Subsysteme. Das Ziel ist eine bestmögliche EMV-Konzipierung auf Komponentenebene, wodurch auf Systemebene Bestätigungs- und Abnahmemessungen für das Gesamtfahrzeug ausreichen. Durch geeignete und präzise Anforderungsbeschreibungen der Komponenten kann ein zielführendes EMV-Verhalten auf Gesamtfahrzeugebene erreicht werden. Mit Hilfe der entwickelten Methodik soll für die Komponente ein generisches Störquellenmodell durch Messungen auf Komponentenebene erstellt werden. Das generierte Modell kann dann im Systemmodell als Störquelle verwendet werden und somit für die virtuelle Fahrzeugabsicherung benutzt werden.

Die große Anzahl wissenschaftlicher Publikationen zur Störquellenbeschreibung zeigt das große Interesse an einer Charakterisierung leitungsgebundener Störquellen für die EMV-Analyse, z.B. in [3], [4], [5], [6]. In dieser Arbeit wird ein Verhaltensmodell vorgestellt, welches ebenso Gleichtakt- wie Gegentaktstörungen repräsentiert und unabhängig von

der Last, jedoch abhängig von der Umgebung (z.B. Streukapazitäten, Massebezug, elektromagnetische Umgebung) funktioniert. Die Anwendung der Methodik zur Bestimmung eines leitungsgeführten Störquellenmodells wird für Komponenten mit zwei Anschlussleitungen gezeigt und die Überprüfung des generierten Modells wird mit Hilfe von Szenarien in der Schaltungssimulation durchgeführt. Des Weiteren werden die Grenzen des Störquellenmodells diskutiert und die Vorteile der Verwendung von Störquellenmodellen für die EMV Absicherung aufgezeigt.

3 Methodik zur Erstellung von Störquellenmodellen

Die Methodik soll ermöglichen, für jede beliebige Komponente ein generisches Störquellenmodell messtechnisch zu ermitteln, wie in Bild 1 veranschaulicht. Das Störquellenmodell besteht aus einer Störspannungsquelle und einer Impedanz je Anschluss und bildet periodische, leitungsgeführte EMV Störungen einer Komponente in einem gemessenen Betriebspunkt und unabhängig von der angeschlossenen Last nach. Dafür werden zwischen den Anschlüssen der Komponente leitungsgeführte Emissionsmessungen durchgeführt und aufgrund der Messergebnisse auf die Störquelle bzw. Impedanz zurückgeschlossen. Bild 2 zeigt schematisch den Ablauf der Methodik. Für die Erstellung des generischen Störquellenmodells wird ein Messaufbau erstellt und die leitungsgeführten Emissionen eines Messobjekts werden mit zwei verschiedenen Lasten bestimmt. Anschließend können durch das Lösen eines Gleichungssystems die Eigenschaften des Störquellenmodells ermittelt werden.

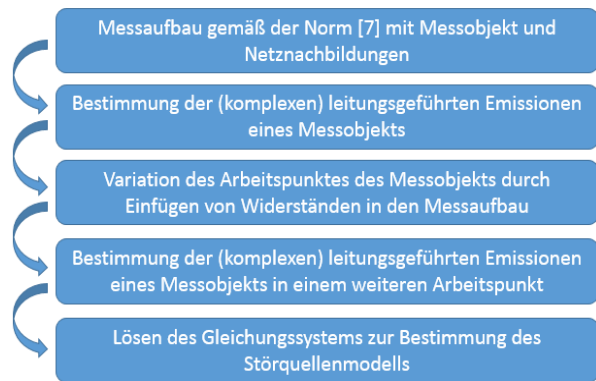
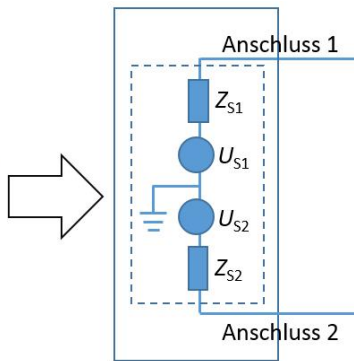


Bild 1: Störquellenmodell für Komponenten

Bild 2: Methodik zur Modellerstellung

Die Anwendung der Methodik wird im Folgenden für eine Komponente mit zwei Anschlüssen gezeigt und mit Hilfe von Schaltungssimulation überprüft. Für die Störquellenmodellerstellung wird eine Schaltung mit einer Quelle mit Innenwiderstand, zwei Netznachbildungen und einem Port für den Messeanschluss in einem Schaltungssimulator aufgebaut. Der Prüfaufbau für die Messung der leitungsgeführten Emissionen ist der Norm [7] entnommen. Bild 3 zeigt die Schaltung des Messaufbaus für die Erstellung eines generischen Störmodells für ein Messobjekt mit zwei Anschlüssen und zwei Netznachbildungen. Die verwendeten Netznachbildungen sind in [8] beschrieben. Die Netznachbildungen können zum einen mit Hilfe einer Schaltungssimulation oder zum anderen durch gemessene S-Parameter berücksichtigt werden. Für die Anwendung der Methodik werden die S-Parameter der Netznachbildung anschließend in Z-Parameter transformiert, um ein äquivalentes T-Ersatzschaltbild zu generieren. Dadurch sind die

äquivalenten Impedanzen Z_1 , Z_2 und Z_3 der Netznachbildungen zur einfacheren Berechnung von Strömen und Spannungen verfügbar. Die Impedanz Z_{var} kann hinzugeschaltet werden und dienen zur Arbeitspunktvariation. Das T-Ersatzschaltbild ermöglicht eine Berechnung der Spannungen U_{N1} und U_{N2} am Eingang der Netznachbildungen über den Spannungsteiler. Dafür werden die zu messenden Spannungen U_{M1} und U_{M2} als komplexwertiges Störspannungsspektrum benötigt.

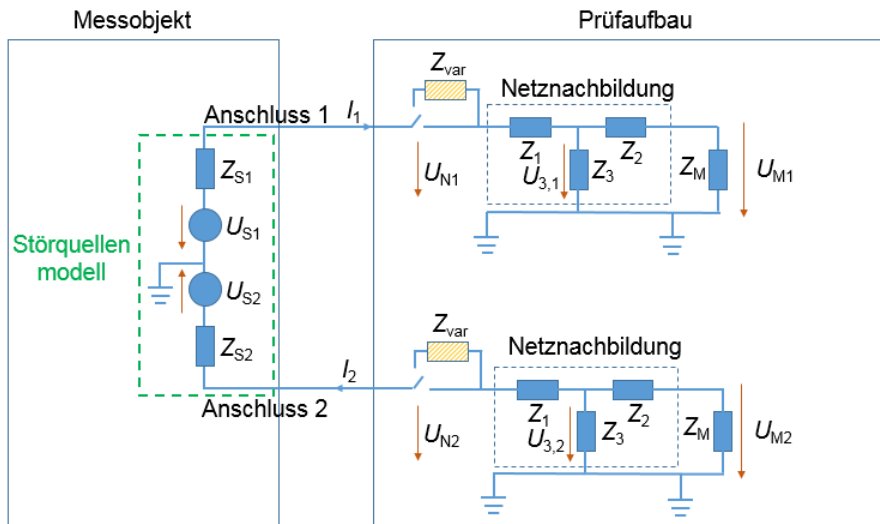


Bild 3: Messaufbau für die Bestimmung der leitungsgeführten Emissionen eines Messobjekts

Der nächste Schritt ist die Bestimmung der leitungsgeführten Emission des Messobjekts. Die Spannungen U_{M1} und U_{M2} werden mit Hilfe eines Zweikanal phasenkohärenten Messempfängers mit FFT-Methode [9] am Widerstand $Z_M = 50 \Omega$ bestimmt und dienen als Input für die Modellentwicklung. Für die leitungsgeführte Störquelle werden die Quellenspannung und die Quellenimpedanz gesucht. Die Quelle und deren Impedanz werden für eine leichtere Berechnung der Maschengleichungen in einer Reihenschaltung beschrieben. Zur Berechnung der Störquellen und Impedanzen aus Bild 3 werden die Kirchhoffschen Maschengleichungen verwendet. Die Indizes A_1 und A_2 stehen für die unterschiedlichen Lasten für die Quelle, wobei der erste Arbeitspunkt für die Schaltung ohne Z_{var} bestimmt wird und für die Berechnungen im zweiten Arbeitspunkt die Widerstände Z_{var} in die Schaltung integriert werden. Die Spannungen $U_{N1,A1}$ und $U_{N2,A1}$ berechnen sich mit

$$U_{N1,A1} = U_{3,1,A1} \frac{Z_1 + Z_x}{Z_x} \quad (1)$$

$$U_{N2,A1} = U_{3,2,A1} \frac{Z_1 + Z_x}{Z_x} \quad (2)$$

$$Z_x = \frac{1}{\frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_2 + Z_M}} \quad (3)$$

für den Messaufbau aus Bild 3 ohne Berücksichtigung der Widerstände Z_{var} . Die Ströme lassen sich mit

$$I_{1, A1} = \frac{U_{N1,A1}}{Z_1 + Z_x} \quad (4)$$

$$I_{2, A1} = \frac{U_{N2,A1}}{Z_1 + Z_x} \quad (5)$$

berechnen. Für die Schaltung aus Bild 3 gelten die Maschengleichungen

$$0 = -Z_{S1}I_1 + U_{N1} \quad (6)$$

$$0 = U_{S2} + Z_{S2}I_2 + U_{N2} \quad (7)$$

Da in jeder Maschengleichung zwei Unbekannte existieren, werden zwei Arbeitspunkte gemessen, um die Unbekannten ermitteln zu können. Hierfür werden bekannte Widerstände Z_{var} in den Messaufbau aus Bild 3 eingefügt. Je Messanschluss wird dann für beide Arbeitspunkte eine Messung der Spannungen U_{M1} und U_{M2} durchgeführt: $U_{M1,A1}$ und $U_{M2,A1}$ ohne die Berücksichtigung von Z_{var} im Messaufbau sowie $U_{M1,A2}$ und $U_{M2,A2}$ mit den eingefügten Widerständen Z_{var} im Messaufbau. Die Berechnungen können für den zweiten Arbeitspunkt analog zur ersten Berechnung durchgeführt werden:

$$U_{N1,A2} = U_{3,1,A2} \frac{Z_{var} + Z_1 + Z_x}{Z_x} \quad (8)$$

$$U_{N2,A2} = U_{3,2,A2} \frac{Z_{var} + Z_1 + Z_x}{Z_x} \quad (9)$$

$$I_{1, A2} = \frac{U_{N1,A2}}{Z_{var} + Z_1 + Z_x} \quad (10)$$

$$I_{2, A2} = \frac{U_{N2,A2}}{Z_{var} + Z_1 + Z_x} \quad (11)$$

Auf Basis der vier berechneten Spannungen $U_{N1,A1}$, $U_{N2,A1}$, $U_{N1,A2}$ und $U_{N2,A2}$ kann anschließend durch die Anwendung der Kirchhoffschen Maschengleichungen die Störspannungsquelle und Quellenimpedanz des Messobjekts berechnet werden. Die Lösung des Gleichungssystems dient der Bestimmung des Störquellenmodells. Es ergibt sich für die gesuchten Größen des Störquellenmodells

$$Z_{S1} = \frac{U_{N1,A2} - U_{N1,A1}}{I_{1,A1} - I_{1,A2}} \quad (12)$$

$$U_{S1} = Z_1 I_{1,A1} + U_{N1,A1} \quad (13)$$

sowie

$$Z_{S2} = \frac{U_{N2,A2} - U_{N2,A1}}{I_{2,A1} - I_{2,A2}} \quad (14)$$

$$U_{S2} = Z_2 I_{2,A2} + U_{N2,A1} \quad (15)$$

4 Test der Methode mit Hilfe von Schaltungssimulationen

Die zuvor beschriebene Methodik wird mit Hilfe von Schaltungssimulationen überprüft. Die Schaltung für den Messaufbau der leitungsgeführten Emissionen eines Messobjekts aus Bild 3 wird hierfür in der Schaltungssimulation verwendet. Für die Anwendung der Methodik und die anschließende Modellvalidierung werden bekannte Quellen und Impedanzen für ein Messobjekt definiert und die leitungsgeführten Emissionen am Port des Messempfängers bestimmt. Es resultieren die Spannungen U_{M1} und U_{M2} am Messempfängerausgang der Netznachbildungen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 120 MHz. Diese Störspannungsspektren dienen als Inputparameter für die Berechnungen für den Test der Methode mit Hilfe von Schaltungssimulationen.

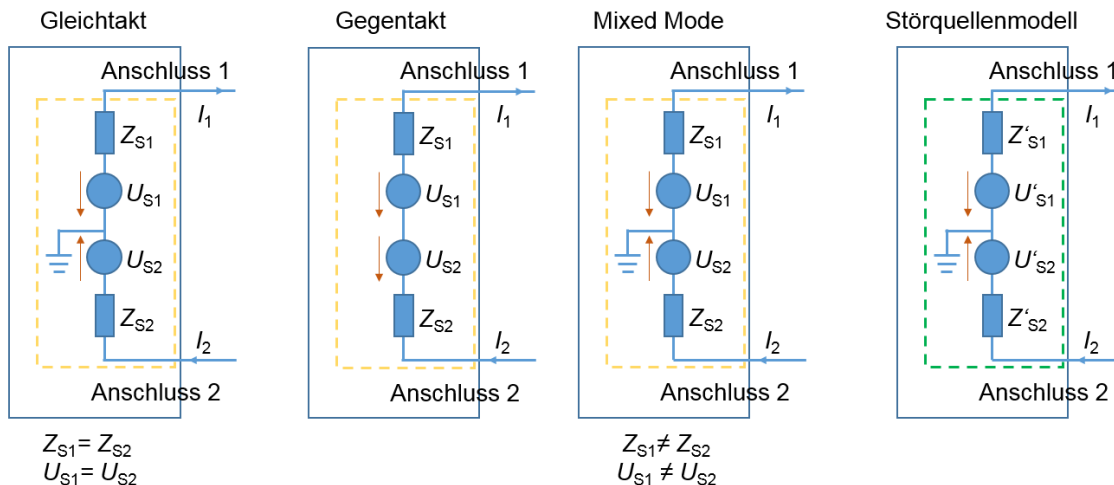


Bild 4: Szenarien für Originalmodelle und äquivalentes Störquellenmodell

Die Parameter U_{S1} , Z_{S1} , U_{S2} und Z_{S2} beschreiben das anfängliche Störquellenmodell und sind im Simulationsmodell aufbauend auf Bild 3 definiert. Die Spannungen $U_{M1,A1}$ und $U_{M2,A1}$ sowie $U_{M1,A2}$ und $U_{M2,A2}$ sind mit Hilfe der Simulation am Ende der Netznachbildungen generiert und dienen als Input für die Berechnung des Störquellenmodells. Für den zweiten Arbeitspunkt sind die Widerstände $Z_{var} = 50 \Omega$ in der Schaltung hinzugefügt. Mit U'_{S1} , Z'_{S1} , U'_{S2} und Z'_{S2} sind die berechneten Parameter des Störquellenmodells definiert. Für die Untersuchung werden eine reine Gleichtakt-, eine Gegentakt- und eine Mischung von Gleich- und Gegentaktanregung untersucht, wie Bild 4 veranschaulicht. Die Analyse ergab eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten Störquellenparameter U'_{S1} , Z'_{S1} , U'_{S2} und Z'_{S2} mit den anfänglich definierten Parametern U_{S1} , Z_{S1} , U_{S2} und Z_{S2} . Vergleiche der Werte ergaben eine minimale Abweichung ab der 4. Nachkommastelle, welche auf Rundungsfehler in der Berechnung der Störquellenparameter zurückzuführen ist. Die Analyse der unterschiedlichen Störquellenmodelle ergab, dass das gewählte Störquellenmodell mit zwei unabhängigen Spannungsquellen und Impedanzen das Verhalten von reinen Gleichtakt-, Gegentakt sowie gemischten Störspektren nachbilden kann.

4.1 Analyse von Phasenoffsets zwischen zwei Messungen

Die absolute Phasenlage der Störspannungen zwischen zwei Messungen, in diesem Fall für die zwei sequentiellen Messungen mit unterschiedlichen Lasten, kann in der Praxis im

Gegensatz zur Simulation bei unbekanntem Signalen nicht geeignet getriggert werden. Daher muss untersucht werden, ob das Störquellenmodell auch mit unterschiedlichen Phasenoffsets zwischen den Messungen in unterschiedlichen Arbeitspunkten die richtigen Ergebnisse liefert. Hierfür werden in der Schaltungssimulation unterschiedliche Phasenoffsets für die Bestimmung der Spannungen im zweiten Arbeitspunkt hinzugefügt. Die Berechnungen für das Störquellenmodell werden auf der Grundlage der bestimmten Spannungen $U_{M1,A1}$ und $U_{M2,A1}$ sowie $U_{M1,A2}$ und $U_{M2,A2}$ analog zu den vorherigen Analysen durchgeführt. Ein Vergleich der generierten Störquellenparameter mit den Parametern des Originalmodells macht deutlich, dass die Werte des generierten Störquellenmodells auf Grund des hinzugefügten Phasenoffsets im zweiten Arbeitspunkt von den anfänglich in der Simulation definierten Parametern abweichen. Es lässt sich dennoch zeigen, dass das ermittelte Störquellenmodell das gleiche Verhalten zeigt, wie die anfänglich definierte Störquelle. Die Analyse ergab eine sehr gute Übereinstimmung der Spannungen am Messausgang für das Originalmodell und für das generierte Störquellenmodell. Geringfügige Abweichungen der Spannungen $U_{M1,A1}'$ und $U_{M2,A1}'$ sowie $U_{M1,A2}$ und $U_{M2,A2}$ treten aufgrund von Rundungsfehlern in der Rechnung ab der 7. Nachkommastelle auf.

4.2 Lastunabhängigkeit

Das Komponentenmodell soll unabhängig von den Lastverhältnissen im Fahrzeug (Kabelbaumlänge, angeschlossene Lasten etc.) funktionieren. Eine weitere Anforderung ist daher die Lastunabhängigkeit des Störquellenmodells, da das generierte Modell auch in unterschiedlichen Umgebungen das gleiche Verhalten wie das Originalmodell zeigen soll. Die Lastunabhängigkeit wird untersucht, indem dem Störquellenmodell anstelle der Messwiderstände Z_M aus Bild 3 unterschiedliche Lasten hinzugefügt werden. Zuvor galt $Z_M = 50 \Omega$. Es wird untersucht, ob das Störquellenmodell mit unterschiedlichen Lastfällen (z.B. $Z_M = 20 \Omega$ und $Z_M = 100 \Omega$) das gleiche Verhalten zeigt wie das Originalmodell. Der Vergleich der Spannungen am Messausgang der Netznachbildungen zeigt für beide Modelle eine sehr gute Übereinstimmung. Abweichungen der Spannungen $U_{M1,A1}$ und $U_{M2,A1}$ sowie $U_{M1,A2}$ und $U_{M2,A2}$ treten auch hier nur ab der 7. Nachkommastelle auf.

4.3 Kapazitive Kopplung im Massepfad

In der realen Messumgebung treten neben den Gegentaktstörungen auch Gleichtaktstörungen auf. Der Einfluss des Massepfads muss daher im Modell genauer untersucht werden. Die Annahme für das Störquellenmodell, dass es sich hier um einen Kurzschluss handelt, ist zur Vereinfachung angenommen. Der Massepfad kann in der Realität über eine kapazitive Kopplung zum Gehäuse entstehen, welche auch im Störquellenmodell als Kapazität gegen Masse untersucht werden muss. Daher wird im Simulationsmodell aus Bild 3 zur Analyse des Einflusses des Massepfads eine zusätzliche Kapazität hinzugefügt. Die Berechnungen des Störquellenmodells werden analog durchgeführt. Sie ergeben komplexe Widerstände für Z_{S1}' und Z_{S2}' . Diese können zur Überprüfung des Störquellenmodells als Reihenschaltung von Widerständen und Kapazitäten und Induktivitäten definiert werden, wie Bild 5 zeigt. Der Vergleich der Spannungen $U_{M1,A1}$ und $U_{M2,A1}$ sowie $U_{M1,A2}$ und $U_{M2,A2}$ aus Bild 3 ergab für beide Modelle eine sehr gute Übereinstimmung.

Abweichungen können nur ab der 7. Nachkommastelle aufgrund von Rundungsfehlern entdeckt werden.

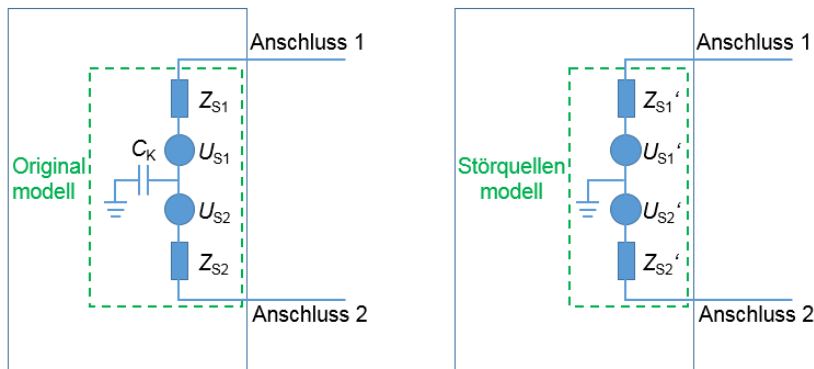


Bild 5: Originalmodell und äquivalentes Störquellenmodell für die Analyse der kapazitiven Kopplung

5 Diskussion der Methodik & Ausblick

Die Integration von Emissionsmodellen für Komponenten in Simulationsmodelle hilft die virtuelle EMV Absicherung auf Systemebene zu stärken. Anstelle von vergleichenden Analysen mit beliebig gewählten Störanregungen können mit komponentenspezifischen Störquellenmodellen genauere Simulationsergebnisse erzielt werden. Bei der präsentierten Methodik wird das Messobjekt als Blackbox angenommen ohne genaue Analyse der Funktion der Schaltung innerhalb der Komponente. Zur Veranschaulichung der Methodik werden konkrete Anwendungsbeispiele gezeigt. Das Störquellenmodell wird durch die abgegebenen leitungsgeführten Störungen definiert und ist abhängig von der elektromagnetischen Umgebung im Messaufbau. Für die Bewertung des generierten Störquellenmodells ist es wichtig, die Art der Störungen, welche mit Hilfe der Methodik definiert werden können und ihre Berücksichtigung im Modell zu diskutieren. Eine wichtige Einschränkung des hier präsentierten Störquellenmodells ist, dass es nur für zwei Anschlüsse der Komponente gültig ist. Die präsentierte Methodik zeigt beispielhaft die Bestimmung der leitungsgeführten Störungen eines einfachen Messobjekts mit zwei Anschlüssen. Eine Erweiterung der Methodik von zwei Anschlüssen auf weitere Anschlüsse ist für die Anwendung der Methodik auf kompliziertere Komponenten nötig. Dies ließe sich durch eine sternförmige Anordnung zusätzlicher Quellen und Koppelimpedanzen je Anschluss realisieren. Dafür muss auch der Einsatz von Messsystemen mit mehreren Anschlüssen untersucht werden und die Verifizierung der Methode für Mehrpole in der Simulation und unter Laborbedingungen getestet werden. Für die Rückrechnung und Bestimmung der komplexen Quellen und Impedanzen wird neben dem in der Norm geforderten Absolutwert auch die Phase der leitungsgeführten Emissionen benötigt. Die Bestimmung von Absolutwert und Phase ist simulativ gut durchführbar, birgt jedoch Schwierigkeiten in der messtechnischen Umsetzung. Mit Hilfe des FFT-Messverfahrens nach Betrag und Phase der Störspannungen kann dies z.B. mit dem TDEMI Xtreme durchgeführt werden. Bedingung ist hier, dass die zwei Ports phasenkohärent messen. Für komplexere Messobjekte müssen entweder mehrere Empfänger phasensynchron zusammen geschaltet werden oder es muss ein Messgerät mit mehr als zwei phasenkohärenten Ports genutzt werden. Das mit Hilfe der hier präsentierten Methodik generierte Störquellenmodell beschreibt außerdem nur deterministische Störungen und kann daher keine stochastischen Emissionen abbilden, was für die EMV-Analyse und die Bewertung der Komponente beachtet werden muss.

6 Zusammenfassung & Fazit

Die präsentierte Analyse zeigt mit Hilfe von Schaltungssimulation, wie aus Messungen ein Quellmodell für virtuelle Analysen erstellt werden kann und wie die Quelle bestmöglich zu charakterisieren ist. Die Methodik zur Erstellung von Störquellenmodellen wurde schrittweise beschrieben und die dazugehörigen Berechnungsschritte wurden präsentiert. Die Arten der Störungen, welche mit Hilfe der Methodik definiert werden können und ihre Berücksichtigung im erstellten Modell wurden diskutiert. Die virtuelle EMV Absicherung kann durch die Erstellung von Störquellenmodellen gestärkt werden, da anstelle von vergleichenden Analysen oder Tendenzbestimmungen ohne komponentenspezifische Modelle konkrete Simulationsergebnisse für das elektromagnetische Verhalten von Komponenten generiert und analysiert werden können.

7 Literaturverzeichnis

- [1] IEC 61851-1 I, „Electric vehicle conductive charging system,“ IEC International Electrotechnical Commission, Genf, 2013.
- [2] UN Vehicle Regulations, „ECE R10: Revision No.5: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility“, 2014.
- [3] D. Zhang, D. Y. Chen, M. J. Nave und D. Sable, „Measurement of noise source impedance of off-line converters,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 15, Issue: 5, pp. 820 - 825, 2000.
- [4] K. Y. See und J. Deng, „Measurement of noise source impedance of SMPS using a two probes approach,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 19, Issue: 3, pp. 862–868, 2004.
- [5] Q. Liu, F. Wang und D. Boroyevich, „Modular-Terminal-Behavioral (MTB) model for characterizing switching module conducted EMI generation in converter systems,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 21, Issue: 6, pp. 1804–1814, 2006.
- [6] H. Rebholz, Modellierung leitungsgebundener Störgrößen in der Komponenten- und Fahrzeugmessung, Universität Stuttgart: Dissertation, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, 2010.
- [7] CISPR 25, „Vehicles, boats and internal combustion engines Radio disturbance characteristics Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers“.
- [8] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, „V-Netznachbildung ESH3-Z6,“ 2006.
- [9] GAUSS INSTRUMENTS GmbH, „TDEMI eXtreme“.