

Bestimmung der bordnetzgebundenen Störaussendung mit dem kapazitiven Spannungssensor

Dr.-Ing. Stephan Frei, AUDI AG, Ingolstadt

Kurzfassung

Für die erfolgreiche Kfz-EMV-Entwicklung sind leistungsfähige Komponentenmessverfahren von großer Bedeutung. Zur Zeit existieren eine Vielzahl an Verfahren, die alle für verschiedene Schwerpunkte entwickelt wurden. Zuverlässige und einfach einsetzbare Verfahren für feldgekoppelte Störungen im unteren Frequenzbereich fehlen. Dabei hat der untere Frequenzbereich für die EMV-Qualifizierung in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen.

Der Beitrag analysiert die Eigenschaften einer typischen Kfz-Antenne im unteren Frequenzbereich. Anhand einfacher analytischer Formeln werden die etablierten Verfahren untersucht und bewertet. Basierend auf dieser Analyse wird dargestellt, wie ein geeignetes Messverfahren aussehen kann. Die kapazitive Spannungsmessung stellt ein solches Verfahren dar. Dieses ist einfach anzuwenden und bildet das Verhalten der fahrzeugeigenen Antennen im unteren Frequenzbereich gut nach. Es wird gezeigt, wie durch eine zusätzliche Simulation das Komponentenmessergebnis auf das Verhalten in einem Kfz einfach übertragen werden kann.

1 Einleitung

Angesichts der zunehmenden Elektronikdichte im KFZ stellt die Absicherung der EMV eine wachsende Herausforderung dar. Leistungselektronik übernimmt immer mehr bisher rein mechanische Funktionen. Ausgefeilte Regelungen und Überwachungen von Motor-, Fahrwerk- oder auch Komfortsystemen verlangen immer schnellere Prozessoren. Mit der Integration von High-End-Infotainment-Systemen in die Fahrzeuge halten Rechenleistungen moderner PCs Einzug in die Fahrzeuge. Die entscheidenden Störquellen sind in der Regel die meist zahlreichen Fahrzeugantennen.

Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Labormessverfahren für die Störaussendung einer Komponente entwickelt. Diese sollen eine Aussage über die Einhaltung aller Anforderungen im Gesamtfahrzeug erlauben. Grundlage der meisten Verfahren ist, dass sie im wesentlichen die Abstrahlung über den Leitungssatz bewerten. Die Abmessungen der elektronischen Komponenten sind bis etwa 200 MHz meist relativ klein gegenüber der kürzesten betrachteten Wellenlänge.

Leider ist die Aussagesicherheit der Komponentenmessungen stellenweise ungenügend. Fahrzeugprobleme sind in Einzelfällen nicht sichtbar und Nachbesserungen nach Fahrzeugmessungen notwendig. Auch wird zum Teil Optimierungsbedarf aufgezeigt, der sich bei Fahrzeugmessungen schließlich als nicht notwendig erweist.

Dieser Beitrag erläutert zunächst wichtige Grundlagen zur Störaussendung über den Kabelbaum im KFZ bei niedrigen Frequenzen. Anschließend werden Probleme einiger Komponentenmessverfahren aufgezeigt. Mit einem neuen Verfahren, dem kapazitiven Spannungssensor, kann die Störaussendung von elektrischen Komponenten im unteren Frequenzbereich präzise und einfach bestimmt werden. Dieses Verfahren berücksichtigt die Natur der verschiedenen Kopplungen im Fahrzeug. Weiterhin besteht die Möglichkeit in Verbindung mit Simulationsmodellen für die Karosserie, den Leitungssatz und den Antennen eine bessere Vorhersagegenauigkeit zu erzielen.

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden zum Teil durch Computersimulationen gewonnen. Es wurde das Programm EMC Studio verwendet [1]. Das zugrunde liegende Berechnungsverfahren ist die Methode der Momente (MoM) bzw. MAS für 2D-Berechnungen.

2 Grundlagen

2.1 Summenspannungen- und Summenströme

Innerhalb der typischen Kfz-Leitungsbündel haben die einzelnen Leitungen nur relativ geringen Abstände zueinander. Die Karosserie als mechanischer Träger für einen großen Teil der Verkabelung nimmt elektrisch eine besondere Rolle ein. Sie ist die Bezugsmasse. Wenn Schleifen betrachtet werden

müssen, so zwischen den Bündeln und Karosserie. So ist es in den meisten Fällen zulässig und auch einfacher, die Spannungen und Ströme integral über den gesamten Bündelquerschnitt zu betrachten [2,3]. So wird in [4] gezeigt, dass bei einer Doppelleitungskonfiguration ein um mehr als 3 Zehnerpotenzen höherer Strom bei einer Gegentaktanregung - im Vergleich zu einer Gleichaktanregung - notwendig ist, um im Fernfeld Feldstärken identischer Größenordnung zu erreichen.

Im Folgenden wird von der Summenspannung und dem Summenstrom auf den Leitungsbündeln als die primären Störgrößen ausgegangen. Hierbei gilt für die Summenspannung \underline{V}_S (die Spannungen werden bezogen auf die Karosseriemasse gemessen):

$$\underline{V}_S(\omega) = \sum_{n=1}^N \underline{V}_n(\omega) \quad (1)$$

\underline{V}_n ist die Spannung der einzelnen Leiter $n=1\dots N$. Vektoriell addiert kompensieren sich dadurch entgegengesetzte Leitungsspannungen.

Analog lässt sich für den Summenstrom formulieren:

$$\underline{I}_S(\omega) = \sum_{n=1}^N \underline{I}_n(\omega) \quad (2)$$

\underline{I}_n ist hier der Strom der einzelnen Leiter.

Für Analysen kann ein Leitungsbündel dann in guter Näherung durch einen in Summenspannung und Summenstrom äquivalenten Einzelleiter ersetzt werden. Dies soll für die folgenden Untersuchungen auch genutzt werden.

2.2 Fahrzeugantennen für niedrige Frequenzen

Für eine sinnvolle Bewertung der Störaussendung ist besonders im unteren Frequenzbereich eine genaue Kenntnis der Störquellen notwendig. Bei niedrigen Frequenzen sind die Wellenlängen noch deutlich länger als die meisten Kfz-Strukturen und es kann sinnvoll zwischen elektrischen und magnetischen Störern unterschieden werden. Betrachtet man die Kfz-Verkabelung, kann bis maximal 30 MHz von entkoppelten elektrischen und magnetischen Feldern gesprochen werden.

In der Kfz-EMV sind in den meisten Fällen die Antennen die Störquellen. Praktisch alle Serienfahrzeuge verwenden elektrische Antennen für den Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich. Das bedeutet, dass diese Antennen besonders sensibel auf elektrische Felder reagieren. Die nahezu identische prinzipielle Funktionsweise dieser Antennen lässt sich anhand einer einfachen Struktur, wie in Bild 1 dargestellt, am besten verstehen.

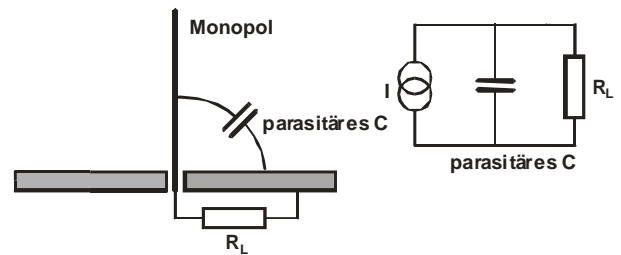


Bild 1 Funktionsweise einer einfachen elektrischen Antenne

Die elektrischen Feldlinien beeinflussen Ladungsverschiebungen in dem Monopol. Die Ladungen fließen über den Lastwiderstand R_L (Impedanzwandler) und die parasitäre Kapazität in den Bezugsleiter, im Kfz ist dies die Karosserie. Der fließende Strom

$$\underline{I}(\omega) = j\omega \underline{D} A_{eff}$$

ist abhängig von der dielektrischen Verschiebung D , die wiederum proportional der elektrischen Feldstärke E ist:

$$\underline{D} = \epsilon_0 \underline{E}$$

Für eine Stabkonfiguration kann die effektive Fläche A_{eff} über:

$$A_{eff} = \frac{C_p \cdot h}{\epsilon_0 \cdot 2}$$

mit

$$C_p = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln(h/r) - 1}$$

in den meisten Fällen gut abgeschätzt werden. h ist die Länge und r der Radius der Stabantenne.

Solange gilt:

$$R_L \gg \frac{1}{\omega C_p}$$

ist die Antenne selbstintegrierend. Die Spannung über R_L ist nur von der Feldstärke abhängig und unabhängig von der Frequenz.

In der Praxis ist die Antenne durch einen FET abgeschlossen, der die hohe Antennenimpedanz wandelt. Im Anschluss findet zum Teil noch eine Signalverstärkung um bis zu etwa 5 dB statt. Die Gesamtkapazität eines aktiven Antennensystems sollte nicht mehr als 20 pF betragen.

Auch sämtliche Antennen für das kommende DRM (Digital Radio Mondial) mit einer Maximalfrequenz von 30 MHz werden voraussichtlich nach diesem Prinzip arbeiten.

3 Koppelmodelle für niedrige Frequenzen

3.1 Ein allgemeines Koppelmodell

Für die schwache Verkopplung zweier Systeme bei niedrigen Frequenzen kann ein einfaches Modell formuliert werden, das die elektrische und magnetische Verkopplung nachbildet [5]. Das Ersatzschaltbild ist in Bild 2 dargestellt.

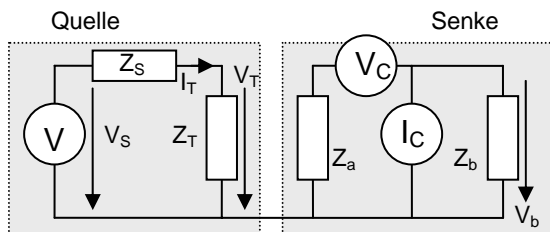


Bild 2 Allgemeines Ersatzschaltbild für die kombinierte elektrische und magnetische Verkopplung

Störquellenkreis und Störsenkenkreis sind elektrisch und magnetisch über gesteuerte Quellen miteinander verkopplert. Die elektrische Verkopplung wird dabei durch eine Stromquelle berücksichtigt, deren Amplitude von der Quellenspannung \underline{V}_T und der Koppelkapazität zwischen Quelle und Senke C_C primär abhängt:

$$\underline{I}_C = j\omega C_C \underline{V}_T \quad (3)$$

Die magnetische Verkopplung kann durch eine Spannungsquelle repräsentiert werden:

$$\underline{V}_C = j\omega M \underline{I}_T \quad (4)$$

Hier hängt die Spannungshöhe von dem Quellenstrom \underline{I}_T und der Koppelinduktivität M ab. Für die Spannungen \underline{V}_b und \underline{V}_a (Spannung über der Impedanz \underline{Z}_a) gilt allgemein:

$$\underline{V}_b = \frac{\underline{Z}_b}{(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b)} \frac{\underline{V}_s}{(\underline{Z}_s + \underline{Z}_T)} (j\omega C_C \underline{Z}_a \underline{Z}_T - j\omega M) \quad (5)$$

$$\underline{V}_a = \frac{\underline{Z}_a}{(\underline{Z}_a + \underline{Z}_b)} \frac{\underline{V}_s}{(\underline{Z}_s + \underline{Z}_T)} (j\omega C_C \underline{Z}_b \underline{Z}_T + j\omega M) \quad (6)$$

Interessant ist hier, dass die Effekte aus elektrischer und magnetischer Einkopplung sich sowohl addieren als auch subtrahieren können.

3.2 Berechnung der Koppelgrößen

Die Koppelgrößen C_C und M können in einigen Fällen analytisch abgeschätzt [5] oder durch numerische Verfahren genau berechnet werden. In [6]

ist ein Verfahren dargestellt, das es erlaubt, die Verkopplung zwischen beliebig geformten, leitfähigen 3D Strukturen zu bestimmen. Im Ergebnis erhält man die Kapazitäts- und Induktionskoeffizientenmatrizen \underline{C} und \underline{L} , die sämtliche statische Verkopplungen beschreiben.

4 Typische Verkopplungen im Kfz

4.1 Direkte Einkopplung in die Fahrzeugantenne

In vielen Praxisfällen lässt sich die Verkopplung zwischen einer Leitung oder einem Leitungssystem wie in Bild 3 dargestellt beschreiben. Nur die kapazitive Verbindung dominiert die Verkopplung zur Antenne.

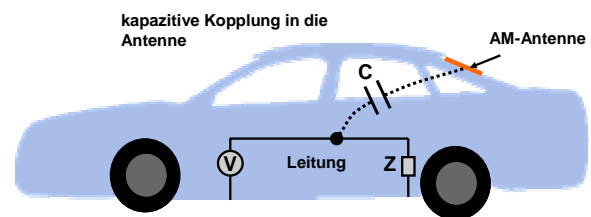


Bild 3 Einfaches Ersatzschaltbild für die elektrische Einkopplung in die Fahrzeugantenne

Durch Anpassung des Ersatzschaltbilds aus Bild 2 erhält man für die Spannung \underline{V}_T :

$$\underline{V}_T = \underline{V}_s \frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_s + \underline{Z}_T} \quad (7)$$

und für die Antennenspannung \underline{V}_A :

$$\underline{V}_A = \underline{V}_T \frac{j\omega C_C}{\frac{1}{R_A} + j\omega C_{AS}} \quad (8)$$

Man sieht deutlich, dass solange R_A (Eingangswiderstand des Verstärkers) sehr groß ist, wird die Spannung nur durch das Verhältnis zwischen C_C und C_{AS} (Gesamtkapazität des Antennensystems) bestimmt.

Für die kombiniert elektrische und magnetische Einkopplung in die Antenne erhält man das in Bild 4 dargestellte Ersatzschaltbild. Die Antennenspannung berechnet sich zu:

$$\underline{V}_A = \frac{j\omega C_A}{\left(j\omega C_{AS} + \frac{1}{R_A} \right) + j\omega C_A} \left(\frac{C_C}{C_A} \underline{V}_T \pm j\omega M \underline{I}_T \right) \quad (9)$$

Da die Orientierung der magnetischen Einkopplung nicht bekannt ist, ist eine Addition oder Subtraktion

der induzierten Spannungen möglich. Mit den Gleichungen (3) und (4) läßt sich (9) umformen zu:

$$\underline{V}_A = \frac{j\omega C_A R_A}{1 + j\omega R_A (C_{AS} + C_A)} \frac{V_S}{Z_S + Z_T} \left(\frac{C_C}{C_A} Z_T \pm j\omega M \right) \quad (10)$$

Der Ausdruck wird maximal oder zu null, wenn:

$$\underline{Z}_T = \pm j\omega M \frac{C_A}{C_C} \quad (11)$$

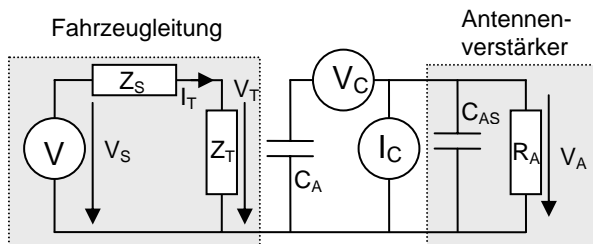


Bild 4 Ersatzschaltbild für die kombinierte elektrische und magnetische Einkopplung in die AM-Fahrzeugantenne

Wird also eine störende Leitung entsprechend imaginär abgeschlossen, scheint eine vollständige Kompensation von Störungen möglich. Sieht man sich die möglichen Werte für die Koppelgrößen im Fahrzeug an, so wird deutlich, dass bei realen Konfigurationen eine solche Kompensation aufgrund der Abschlussimpedanzen kaum möglich ist. Im Fahrzeug bewegen sich die Koppelgrößen meist innerhalb der folgenden Bereiche:

$$C_A \approx 3 \text{ pF} - 10 \text{ pF}$$

$$C_{AS} \approx 15 \text{ pF} - 40 \text{ pF}$$

$$C_C \approx 0,1 \text{ fF} - 10 \text{ fF}$$

$$M \approx 0,1 \text{ nH} - 1 \text{ nH}$$

Eine Induktivität kann für alle Frequenzen die Formel (11) für ein positives \underline{Z}_T erfüllen. Diese Induktivität muss sich für eine Minimierung oder Maximierung zwischen: $30 \text{ nH} < L_T < 100 \mu\text{H}$ bewegen. Eine Kapazität kann für eine einzelne Frequenz für ein negatives \underline{Z}_T die Bedingung erfüllen.

In den meisten Fällen ist aber $|Z_T|$ klein (für typische Werte bei 500 kHz beträgt $|Z_T|$ nur ca. 2 Ohm) und schon geringe Anschlussleitungslängen führen zu einer größeren Impedanz. In den meisten Fällen genügt es also, die elektrische Verkopplung zu betrachten. Die magnetische Einkopplung kann vernachlässigt werden.

Es sei hier noch angemerkt, dass aufgrund der Vereinfachung nicht alle Besonderheiten einer realen Fahrzeugkonfiguration modelliert werden. Es gibt

Fälle, in denen die vorgestellten Ersatzschaltbilder deutlich erweitert werden müssen.

In Bild 5 ist dargestellt, wie die Kopplung variieren kann, wenn die Position von Quelle und Abschlusswiderstand des Quellenkreises vertauscht werden. Einmal addieren sich die Kopplungen und einmal subtrahieren sie sich. Diese Untersuchungen wurden anhand eines Fahrzeugmodells mit dem Berechnungsprogramm EMC-Studio durchgeführt. In Bild 6 sind zum Vergleich Ergebnisse dargestellt, die mit der Formel (10) gewonnen wurden.

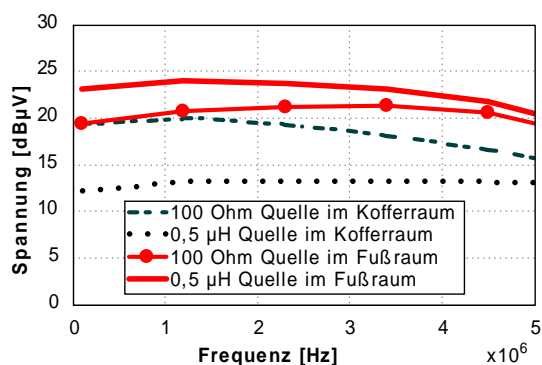


Bild 5 Antennenspannung in Abhängigkeit von der Position der Quelle bei identischer Leitungsposition. Durch Vertauschen von Quelle und Senke kann bei induktiver Last die Störaussendung deutlich variiert werden (Simulation mit MoM)

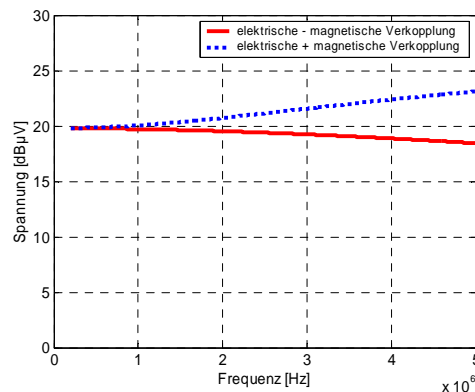


Bild 6 Konfiguration wie in Bild 5, mit 100 Ohm Abschlusswiderstand (Berechnung mit Formel (10))

Bild 5 untermauert das oben gesagte. Bei höherimpedanten Abschlüssen ist der Einfluss der magnetischen Verkopplung nur gering.

4.2 Indirekte Verkopplung im unteren Frequenzbereich

Neben der direkten elektrischen, magnetischen oder kombinierten Einkopplung treten im Fahrzeug natürlich auch komplexere indirekte Kopplungen auf.

So kann eine Leitung im Motorraum, die hier gemeinsam mit einer in den Innenraum übergehenden Leitung verläuft, auf diese beispielsweise zunächst kapazitiv einen Strom einkoppeln. Von dieser zweiten Leitung aus, die dann in den Innenraum verläuft, kann es zu einer kritischen Verkopplung mit der Antenne kommen.

5 Verkopplungen bei Labormessverfahren

5.1 TEM-Zelle

In der TEM-Zelle überwiegt aufgrund der Orientierung der zum Prüfling führenden Verbindungsleitungen die elektrische Verkopplung. Durch die Messung der Spannung an $R=50\ \Omega$ und dem $50\ \Omega$ Zellenabschluss sind die eingekoppelten Spannungen sehr gering. Auch findet keine Integration der Spannung statt, so dass die gemessene Spannung im Gegensatz zur Fahrzeugantenne von der Frequenz abhängig ist. In erster Näherung gilt mit (8):

$$\underline{V}_A = \frac{j\omega C_c R}{2} \underline{V}_T \quad (12)$$

5.2 Antennenmessverfahren

Das Antennenmessverfahren kommt im Prinzip dem Fahrzeugverhalten am nächsten. Hier gelten die Formeln für schwache Kopplung (8) bis (10), die bereits für das Fahrzeug hergeleitet wurden. Das Antennenmessverfahren ist somit gut geeignet für fahrzeugnahe Laboruntersuchungen. Bei Verkopplungen, die auf magnetische Wirkungen zurückzuführen sind, kann das Verfahren versagen.

5.3 Streifenleitung

Die Streifenleitung lässt sich im unteren Frequenzbereich sehr gut als eine verkoppelte Mehrfachleitung betrachten. Das Ersatzschaltbild in Bild 7 stellt die Verhältnisse in der Streifenleitung für niedrige Frequenzen dar.

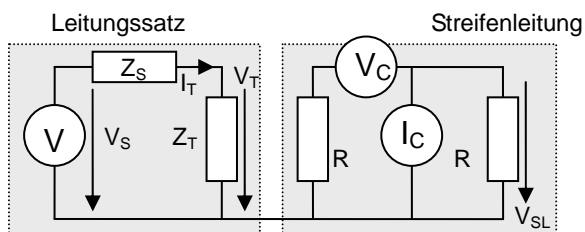


Bild 7 Ersatzschaltbild für die kombinierte elektrische und magnetische Einkopplung in die Streifenleitung

Die Spannung an der Streifenleitung kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\underline{V}_{SL} = \frac{1}{2} \frac{\underline{V}_S}{Z_S + Z_T} (j\omega C_c R Z_T - j\omega M) \quad (13)$$

R ist hier die Abschlussimpedanz der Streifenleitung mit $50\ \Omega$. Quelle und Senke (Messempfänger) befinden sich in der Regel an gegenüberliegenden Enden, so dass nur das Minuszeichen in (13) verbleibt.

Wenn in (13) der Wert in der Klammer zu null wird, heben sich im Idealfall elektrische und magnetische Verkopplung auf.

$$Z_T = \frac{M}{C_c R}$$

Durch 2D-Berechnung erhält man für die Streifenleitung:

$$C_c \approx 5\ \text{pF}, M \approx 100\ \text{nH}$$

Somit ergibt sich für Z_T für die Streifenleitung von ca. $400\ \Omega$. D.h., erst ab etwa $400\ \Omega$ Abschlussimpedanz im Quellenkreis überwiegt die elektrische Verkopplung. Im Gegensatz zum Fahrzeug dominiert bei niedrigen, typischeren Impedanzen die magnetische Verkopplung, was nicht dem Verhalten einer Fahrzeugantenne entspricht.

5.4 Der induktive Stromsensor

Der induktiven Stromsensor nimmt im Idealfall nur den anregenden Strom I_T auf. In einem Bündel wird der Summenstrom nach Formel (2) bestimmt. Die kapazitive Einkopplung ist bei niedrigen Frequenzen vernachlässigbar. Für die Charakterisierung der magnetischen Verkopplung ist der Stromsensor also sehr gut geeignet.

6 Der kapazitive Spannungssensor (CVP)

Bild 4 und die Formeln (9) zeigen deutlich, dass es für eine Bewertung der Störaussendung genügt, Spannung und Strom auf einer störenden Leitung zu kennen. Die Höhe der Kopplung im Fahrzeug hängt dann nur noch von fahrzeuggeometrieabhängigen Koppelimpedanzen ab. Es ist also ein direkter Ansatz für ein Komponentenmessverfahren die Größen V_T und I_T zu bestimmen. Wobei, wie oben dargelegt, V_T in der Regel die dominierende Größe ist. Wie beschrieben kann I_T mit dem induktiven Stromsensor gemessen werden.

In [7] wurde ein kapazitiver Spannungssensor (Capacitive Voltage Probe) vorgestellt (Bild 8), der für Labormessungen an Kfz-Komponenten sehr gut

geeignet und im Rahmen von CISPR 22 standardisiert ist.

In Bild 9 ist das zugehörige Ersatzschaltbild gezeigt, das dem, um die magnetische Einkopplung reduzierten, Ersatzschaltbild des Fahrzeugs (Bild 4) entspricht. Die in Formel (1) angegebene Summenspannung wird gemessen.

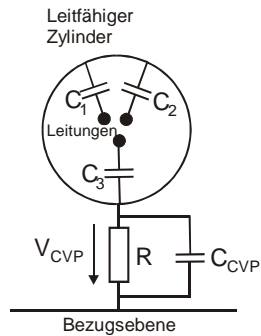


Bild 8 CVP (Schnittzeichnung)

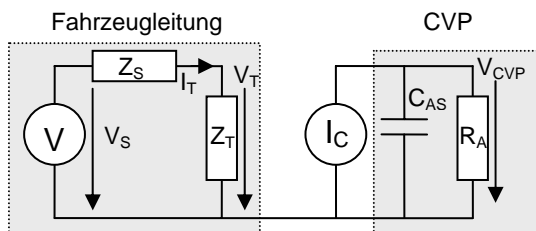


Bild 9 Ersatzschaltbild für die Einkopplung in den Spannungssensor

$$\text{Mit } C_C = \sum_{i=1}^N C_i \text{ und } V_{CVP} = V_T \frac{j\omega C_C}{1 + j\omega C_{CVP}}$$

ergibt sich aufgrund des hochohmigen Abschlusses R (realisiert durch einen FET) ein ähnliches Verhalten wie im Fahrzeug, entsprechend Formel (8).

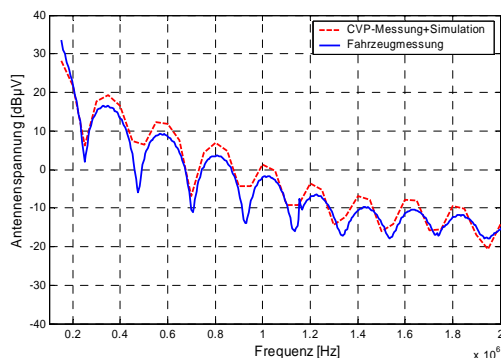


Bild 10 Anwendung der CVP; in Verbindung mit der Simulation ist eine sehr genaue Vorhersage des Verhaltens im Fahrzeug möglich

Bild 10 zeigt eine Messung mit der CVP, die durch entsprechende Skalierung mit dem durch Simulation bestimmten Verhältnis C_C/C_{AS} das Fahrzeugverhalten sehr gut nachbilden kann.

7 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass es sinnvoll ist, für eine Bewertung des EMV-Verhaltens auf Komponentenbasis zwischen elektrischer und magnetischer Verkopplung zu unterscheiden. Diese hängen primär von der Summenspannung und beschränkt vom Summenstrom auf dem anregenden Leitungs Bündel ab.

Die Eigenschaften einiger etablierter Komponentenmessverfahren wurden diskutiert. Durch die Verwendung eines kapazitiven Spannungssensors kann vor allem im unteren Frequenzbereich das Verhalten einer typischen Fahrzeugantenne gut nachgebildet werden. Dieser Sensor ist in seinem Verhalten dem Antennenmessverfahren bis 30 MHz aus CISPR 25 gut vergleichbar kann aber mit deutlich geringerem Aufwand angewendet werden.

8 Literatur

- [1] EMC Studio; www.emcos.com
- [2] G. Liu, D. J. Pommerenke, J. L. Drewniak, R. W. Kautz, C. Chen; Anticipating Vehicle-Level EMI Using A Multi-Step Approach; IEEE International EMC Symposium 2003
- [3] C. Chen; Predicting Vehicle-Level Radiated EMI Emissions Using Module-Level Conducted EMIs and Harness Radiation Efficiencies; IEEE International EMC Symposium 2001
- [4] C. R. Paul; Introduction to Electromagnetic Compatibility; Wiley-Interscience, 1992
- [5] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, T. Karlsson; EMC Analysis Methods and Computational Models; Wiley-Interscience, 1997
- [6] S. Frei, R. G. Jobava; Calculation of Low Frequency EMV Problems in Large Systems with a Quasi-Static Approach; Santa Clara, IEEE-Symposium 2004
- [7] S. Frei, T. Nägel, R. Jobava; Bestimmung der Störaussendung im KFZ durch die getrennte Betrachtung der elektrischen und magnetischen Verkopplungen; EMV-Düsseldorf 2004