

Anwendung eines Expertensystems zur Sicherstellung einer EMV-gerechten Leitungsverlegung im Kraftfahrzeug

Dr. - Ing. T. Rinkleff, Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland

Prof. R. Jobava, EMCOS, Tiflis, Georgien

Dr. - Ing. D. Schleicher, Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland

Dipl. - Ing. C. Lippert, Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Dr. - Ing. S. Frei, Audi AG, Ingolstadt, Deutschland

Kurzfassung

Lange vor dem Bau erster Prototypen werden im Fahrzeugentwicklungsprozess die Positionierung aller elektrischen Komponenten und eine vorläufige Leitungsverlegung festgelegt. Da das Bordnetz einen maßgeblichen Einfluss auf die EMV-Eigenschaften eines Fahrzeugs hat, muss dieses nach EMV-Gesichtspunkten entwickelt werden. Für eine manuelle Überprüfung sind moderne Fahrzeugbordnetze mit weit über tausend Leitungen und mehreren hundert Steuergeräten, Sensoren und Aktuatoren zu umfangreich. Verstärkt wird diese Problematik durch die große Variantenvielfalt in den Ausstattungen. Um eine vollständige Leitungsstrangüberprüfung dennoch durchführen zu können, wurde ein computergestütztes Expertensystem entwickelt, mit dem automatisch die Bordnetzdaten auf Einhaltung der gängigen EMV-Anforderungen abgetestet werden können. Durch den Einsatz eines Expertensystems können, lange bevor die ersten Prototypen verfügbar sind, EMV-relevante Bordnetzprobleme aufgedeckt und beseitigt werden.

1 Einleitung

In der Fahrzeugentwicklung besteht der zunehmende Zwang, in immer kürzeren Entwicklungsintervallen neue Fahrzeuge oder Fahrzeugderivate auf den Markt zu bringen. Dieses lässt sich bei der ständig steigenden Anzahl von Elektronikkomponenten nur realisieren, wenn mit neuen Techniken in einer frühen Entwicklungsphase EMV-Probleme erkannt, abgeschätzt und, wenn nötig, sofort durch Maßnahmen beseitigt werden. Eine wesentliche Rolle nimmt dabei die Simulation ein, die in einem Entwicklungsstadium, in dem nur virtuelle Daten verfügbar sind, eine Abschätzung von EMV-Problemen ermöglicht.

Eine numerische Betrachtung aller Aspekte im Kraftfahrzeug ist derzeit nicht durchführbar, da moderne Fahrzeuge sehr komplexe Elektrik- und Elektronikumfänge besitzen und infolgedessen viele verschiedene EMV-Phänomene in ihnen auftreten. Um die Simulation trotzdem sinnvoll einzusetzen, muss durch eine Vorauswahl von potentiell EMV-kritischen Konfigurationen die Anzahl der Berechnungen auf ein überschaubares Maß reduziert werden. Bei den über hundert elektrischen Komponenten und den zwei bis vier Kilometer Leitung in Fahrzeugen ist eine manuelle Untersuchung der virtuellen Daten nach EMV-Gesichtspunkten nicht durchzuführen. Aus diesem Grund wurde ein Expertensystem entwickelt, das eine automatische Überprüfung der vorhandenen Fahrzeugdaten ermöglicht.

In Zukunft soll das Expertensystem den Anwender in die Lage versetzen, eine grobe EMV-

Risikoabschätzung durchzuführen. Zur Bewertung der gefundenen Risikobereiche im Fahrzeug reicht es nicht aus, einen potentiellen Risikobereich zu identifizieren, mitunter muss durch eine Simulation eine genauere Betrachtung erfolgen. Dafür ist es erforderlich, Berechnungsfunktionen innerhalb des Expertensystems bereitzustellen. Für Störaussendungsrechnungen im AM-Bereich ist dieses realisiert worden. Die Entwicklung und Implementierung von weiteren Berechnungsmethoden für andere EMV-Fragestellungen ist notwendig, damit es beispielsweise einem Bordnetzkonstrukteur ermöglicht wird, den Leitungsstrang während der frühesten Entwicklungsphase kontinuierlich auf EMV-Tauglichkeit hin zu überprüfen.

2 Expertensystem

2.1 Allgemein

Ein Expertensystem ist ein Programm, das innerhalb eines speziellen Themengebietes die Schlussfolgerungsfähigkeit eines Experten zur Lösung von Problemen besitzt, indem es eine Reihe einfacher Regeln abarbeitet. Die Struktur von Expertensystemen ist unabhängig vom Themengebiet stets identisch (siehe **Bild 1**).

Die zentrale Komponente ist die Wissensbasis, die das gesammelte Wissen enthält, mit welchem das Expertensystem seine Schlussfolgerungen zieht. Die Wissensbasis wird über eine Wissenserwerbskomponente erweitert und verändert. Die Eingabe des Wissens er-

folgt durch einen Experten oder Anwender über die Benutzerschnittstelle.

Beim Einsatz des Expertensystems interagiert der Anwender über die Benutzerschnittstelle mit den Problemlösungs- und Erklärungskomponenten. Mit der Problemlösungskomponente wird das Expertenwissen angewendet, dadurch lassen sich Daten manipuliert und Schlüsse aus den vorliegenden Daten ziehen. Die Erklärungskomponente vermittelt dem Anwender, welche Daten manipuliert oder welche Schlussfolgerungen gezogen wurden.

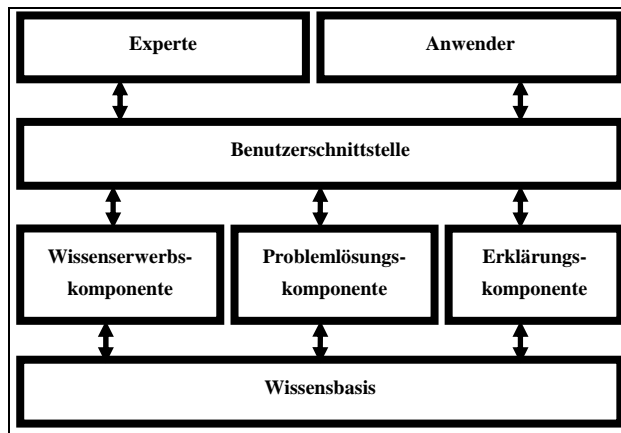


Bild 1 Allgemeiner Aufbau eines Expertensystems

2.2 EMV-Expertensystem

In den EMV-Entwicklungsabteilungen des Volkswagen-Konzerns wird ein auf EMV-Fragestellungen optimiertes Expertensystem als Hilfsmittel eingesetzt, um frühzeitig im Entwicklungsprozess Problemstellen zu entdecken [1].

2.2.1 Wissensbasis

Zur Wissensbasis gehört nicht nur das Wissen, wie eine EMV-Schwachstelle zu erkennen ist, sondern auch Informationen über das jeweilige Fahrzeug, welches analysiert werden soll.

In der Kraftfahrzeug-EMV sind die Leitungen und damit das gesamte Bordnetz der Hauptkoppelpfad für zahlreiche EMV-Phänomene wie Störfestigkeit oder Störaussendung. Das Bordnetz von Fahrzeugen mit seiner Position im Raum und Pin-Leitungsbelegung aller elektrischen Komponenten wird durch die jeweilige Entwicklungsabteilung in elektronischer Form erstellt und dient als wesentlicher Teil der Wissensbasis im Expertensystem. Weitere Eingangsdaten für die Wissensbasis sind Position, Form und Funktionsbereich aller Antennensysteme (FM, AM, GSM, etc.) sowie die Karosserie. In den meisten Projekten stehen Karosserie, Antennensystem und Bordnetz relativ früh in elektronischer Form zur Verfügung. Das liegt zum einem an ihrer zentralen Bedeutung im Entwicklungsprozess und zum anderem daran, dass sie wei-

testgehend vom Fahrzeughersteller selbst oder mit einem einzigen Lieferanten in Zusammenarbeit erstellt werden.

Eigentliche Störquellen und Störquellen sind die elektrischen Komponenten im Fahrzeug. Daten über die Komponenten und über jeden Pin lassen sich im EMV-Expertensystem berücksichtigen. Bisher sind EMV-relevante Informationen über die Pins nicht immer verfügbar, da diese selten eingefordert und verwendet wurden. Der Nutzen von Angaben über die elektrischen Eigenschaften der Pins hat sich mit dem Einsatz des Expertensystems und der damit verbundenen größeren Testtiefe im frühen Entwicklungsstadium deutlich erhöht. Zu den Pin-Informationen, die im Expertensystem abgelegt werden, gehören unter anderem Signalart, Flankensteilheit, Periodendauer, NF-Ersatzschaltbild sowie Spannungs- und Stromwerte in verschiedenen Zuständen der Komponente.

Ein wichtiger Teil der Wissensbasis ist das Wissen der Experten, das in vielen Regeln abgefasst jeweils einzelne Wissensaspekte beinhaltet. Mit den Regeln lassen sich nicht nur EMV-Problemstellen aufdecken, sondern auch fahrzeugspezifische Daten manipulieren bzw. ergänzen. Eine Manipulation ist notwendig, um Zusatzinformationen aus den vorhandenen Daten abzuleiten oder um Objekte mit ähnlichen EMV-Eigenschaften in gemeinsame Gruppen zu gliedern. Die Bordnetzdaten besitzen zunächst keine Informationen über die elektrischen Signale auf den einzelnen Leitungen. Die Nomenklatur der Bordnetzdaten ist häufig an die DIN 72552 angelehnt, Masseleitungen werden deswegen häufig als Klemme 31 bezeichnet. Es gibt aber Fälle, in denen Akronyme für Karosseriemasse, Sensormasse oder Motormasse verwendet werden, um Masseleitungen zu kennzeichnen. Durch Anwenden einer einzelnen Regel, die nach den entsprechenden Akronymen sucht, lassen sich mit Hilfe des EMV-Expertensystems allen Masseleitungen die elektrische Eigenschaft Masse zuordnen. Folglich können sich EMV-relevante Regeln, die Masseleitungen berücksichtigen, auf die neue Eigenschaft Masse beziehen. Falls in einem anderen Fahrzeugprojekt andere Akronyme für Masseleitungen Verwendung finden, muss lediglich die Regel angepasst werden, die den Kabeln die Eigenschaft Masse zuweist. Die eigentliche Regel, die das EMV-Wissen enthält und oft sehr viel komplexer ist, kann vom Vorgängerprojekt übernommen werden.

Ein Beispiel für eine EMV-relevante Regel, die sich auf die Masse bezieht, stellt die Forderung dar, dass die Masseanbindung von Steuergeräten zum Massebolzen eine festgelegte maximale Leitungslänge nicht überschreiten darf.

2.2.2 Wissenserwerbskomponente

Die fahrzeugspezifischen Daten werden durch verschiedene Importierfunktionen in das Expertensystem

eingelassen. Zu den Daten gehören Informationen über das Bordnetz, die Antenne und die Karosserie sowie die Pin-Beschreibungen der Elektronikkomponenten.

Um Regeln von Experten in die Wissensbasis einzubringen, wird sich der Programmiersprache CLIPS bedient. Diese Programmiersprache besitzt eine Syntax, die speziell auf das Programmieren von Regeln für Expertensysteme ausgelegt ist [2]. Die Schwierigkeit beim Schreiben von Regeln besteht oft darin, das EMV-Wissen mit intelligenten Parametern zu versehen. Beispielsweise ist es offensichtlich, dass Leitungen, auf denen gepulste Signale übertragen werden, nicht in der Nähe der AM-Antennenstruktur verlegt sein sollten. Fraglich dabei ist, welcher Abstand noch kritisch bei Überkopplungsproblemen ist. Der thematische Inhalt lässt sich durch die Programmiersprache CLIPS in einer Regel mit vier Zeilen programmieren. Eine derartige Regel teilt alle Leitungen in vier Gruppen ein (siehe **Bild 2**). Eine Leitung gehört entweder der Gruppe der durch die Regel erfassten oder der nicht erfassten Leitungen an. Jede Leitung kann sich unabhängig von der Regel in Fahrzeuguntersuchungen als Störaussendungs-kritisch oder nicht -kritisch erweisen. Eine optimale Regel ist dadurch gekennzeichnet, dass die Menge der erfassten Leitungen identisch mit den im Fahrzeug tatsächlich kritischen Leitungen ist. Die Formulierung einer solchen Regel stellt bei der Komplexität der verschiedenen EMV-Belange im Fahrzeug eine große Herausforderung dar. Eine Überprüfung der durch eine Regel als kritisch erkannten Leitungen ist deswegen häufig notwendig.

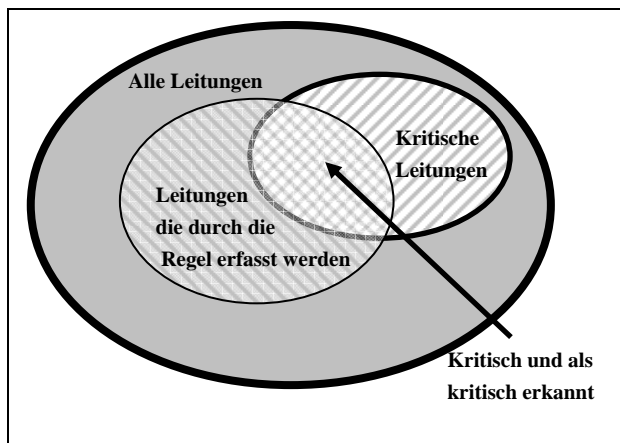


Bild 2 Eine EMV-Regel teilt die fahrzeugspezifischen Daten in vier Gruppen ein. Eine optimale Regel weist nur Leitungen als kritisch aus, die sich unter der Regelthematik in Fahrzeugmessungen als kritisch erweisen würden.

Neben dem maximalen Abstand von Leitungen zu den verschiedenen Antennen gibt es eine große Zahl weiterer Aspekte, die Einfluss auf die EMV-Eigenschaften eines Fahrzeuges haben und die sich mit dem Expertensystem abprüfen lassen. Dazu gehören unter anderem galvanische Kopplungen, Parallel-

verlegungen zu und maximale Abstände von bestimmten Leitungen sowie Leitungsparameter (z.B. Verdrillung und Schirmung). Auch die Detektion und Visualisierung der verschiedenen Subnetze, wie beispielsweise der CAN - oder LIN - Netze, ermöglicht das Expertensystem.

2.2.3 Problemlösungs- und Erkenntniskomponente

Beim Anwenden des Expertensystems durch einen Benutzer kommen die Problemlösungskomponente und Erkenntniskomponente zum Einsatz. Mit der Problemlösungskomponente werden die im Vorfeld verfassten Regeln auf das Projekt oder Teilprojekt (bestehend aus Bordnetz, Antennen, etc.) angewendet. Trifft eine Regel zu, wird mit Hilfe der Erkenntniskomponente eine Antwort generiert, die in Grundzügen bei der Regelerstellung durch den Experten vorgegeben wurde. Um beim Beispiel der gepulsten Leitung in der Nähe der Antenne zu bleiben, könnte die Warnung lauten:

„Die Leitung mit dem Namen „X“, auf der gepulste Signale mit Flankensteilheiten von „Z“ geführt werden, hat einen minimalen Abstand von „Y“ zur AM-Antenne und lässt ein EMV-Störaussendungsproblem im AM-Bereich erwarten.“

Eine solche Regel kann auf viele Leitungen in einem Bordnetz zutreffen. Im Verletzungsfall wird für jede betroffene Leitung eine Antwort generiert mit den jeweiligen Werten für Leitungsname „X“, Flankensteilheit „Z“ und Abstand „Y“ der Antenne zur Leitung. Der Experte gibt beim Programmieren der Regel die Schwellwerte für die Flankensteilheit und den Abstand zur AM-Antenne vor. Ein sinnvolles Wertepaar für die Regel könnte eine Flankensteilheit kleiner als $0,2 \text{ V}/\mu\text{s}$ und maximale Abstände von 1 bzw. 2 m der Leitung zur AM-Antenne sein. In **Bild 3** sind zwei Kreissegmente mit 1 m bzw. 2 m Radius um die Heckscheiben-Antenne eines typischen Limousinenfahrzeugs angedeutet. Alle Leitungen, die ganz oder teilweise innerhalb des Kreises liegen und eine Flankensteilheit größer als $0,2 \text{ V}/\mu\text{s}$ besitzen, werden durch die Regel gemeldet. Die Regel setzt voraus, dass neben Antenne und Bordnetz die Pin-Informationen der Elektronikkomponenten im Fahrzeug bekannt sind. In diesem Fall ist zu erwarten, dass bei einem kompletten Bordnetz mit ca. 2500 Leitungen eine zweistellige Anzahl von Leitungen die Regel verletzen (Abstand 1 m) und potentielle Verursacher von Störaussendungsproblemen sind.

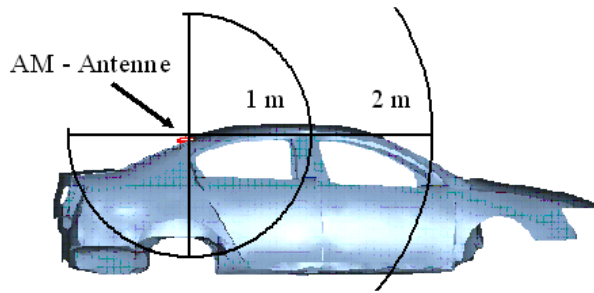


Bild 3 Darstellung eines Limousinenfahrzeugs mit einer AM-Heckscheibenantenne. Die Kreissegmente geben Abstände von 1 m bzw. 2 m zur AM-Antenne an.

Sind keine Pin-Informationen verfügbar, könnte eine analoge Regel nach Leitungen suchen, die in einem Abstand von 1 bzw. 2 m zur AM-Antenne verlaufen. Dies trifft allerdings auf ca. 20 % aller Leitungen für einen Abstand von 1 m bzw. ca. 45 % aller Leitungen für einen Abstand von 2 m zu. Die meisten der Leitungen, die innerhalb eines solchen Abstandes liegen, verursachen kein Störaussendungsproblem. Nur alleine anhand des Abstands zur AM-Antenne ohne zusätzliche Hinweise könnten mit Hilfe des Expertensystem kaum zielführende Schritte unternommen werden, um die Störaussendung nachhaltig zu verbessern. Deswegen wurde im verwendeten EMV-Expertensystem die Möglichkeit vorgesehen, Berechnungen durchzuführen.

3 Berechnungen im Frequenzbereich 150 kHz bis 1,8 MHz

3.1 Voraussetzungen

Mit Hilfe der Bordnetzgeometrie, der AM-Antenne, der Karosserie und der Beschreibung jedes Pins können die 2500 Leitungen im Fahrzeug, wie oben beschrieben, auf eine handhabbare Zahl von potentiell störaussendungskritischen Leitungen reduziert werden. Steile Flanken und eine Leitungsverlegung im Umfeld der AM-Antenne sind kein hinreichendes Merkmal für ein Störaussendungsproblem. Als hartes Kriterium gelten die Grenzwerte in den Technischen Lieferbedingungen. Treten Grenzwertüberschreitungen auf, ist mit einem gestörten Empfang von AM-Sendern zu rechnen. Im Volkswagen-Konzern liegt der Fahrzeug-Grenzwert im Frequenzbereich 150 kHz bis 300 kHz bei 10 dB μ V und im Frequenzbereich 500 kHz bis 1,8 MHz bei 0 dB μ V an der Antenne. Mit einer automatisierten Simulation im Expertensystem lässt sich das Störspektrum an der Antenne aus den vorhandenen Daten berechnen und damit ein zu erwartendes Problem im Rahmen der Simulationsgenauigkeit nachweisen [3].

Im folgenden wird an einem Beispiel die AM-Berechnung im Expertensystem erläutert. Zur abschließenden Verifikation der Berechnungsergebnisse

dient eine Fahrzeugmessung. Betrachtet wird eine Verbindung zwischen Versuchsmustern eines Beispielsteuergerätes (SG) zu einem Aktuator (AKT). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass beide Versuchsmuster in der hier vorgestellten Form nicht in Serienfahrzeugen eingesetzt werden. Sowohl Messung als auch Berechnung erfolgten in einem Limousinenfahrzeug mit Heckscheibenantenne für den AM-Bereich. Die Leitungsverlegung und die Position der AM-Antenne ist in **Bild 4** zu erkennen.

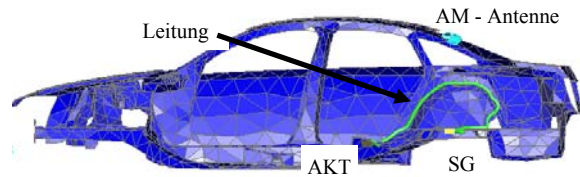


Bild 4 Darstellung der betrachteten Verbindung vom Beispielsteuergerät (SG) zum Aktuator (AKT) sowie der AM-Antenne

Der AKT wird über ein pulsweitenmoduliertes Signal (PWM-Signal) vom SG angesteuert, das Tastverhältnis des Signals variiert zur Steuerung des AKT. Die Leitung zwischen SG und AKT hat eine Länge von 2,55 m und einen minimalen Abstand von 0,45 m zur AM-Antenne.

3.2 Berechnung

Die Störeinkopplung U_S in die Antenne berechnet sich aus dem Produkt von Eingangssignal U_1 und Übertragungsfunktion H vom Steuergerät in die Antenne:

$$U_S(f) = |H(f)| \cdot |U_1(f)|.$$

3.2.1 Eingangssignal

Das Frequenzspektrum des Eingangssignals $U_1(f)$ ergibt sich aus den Pin-Informationen. Vom zu untersuchenden PWM-Signal sind die Periodendauer ($T = 50 \mu\text{s}$), das Tastverhältnis ($\kappa = 0,4$), die Spannung ($U_{\text{max}} = 12 \text{ V}$) bekannt. Die Flankensteilheit beträgt $0,23 \mu\text{s}$, es wird vorausgesetzt das Anstiegszeit (t_r) und Abfallzeit (t_f) der Flank identisch sind. Durch eine Fourier-Transformation des Eingangssignals $U_1(t)$ ergibt sich das gesuchte Frequenzspektrum $U_1(f)$. Für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 MHz ist das aus den Pin-Informationen abgeleitete Spektrum in **Bild 5** dargestellt.

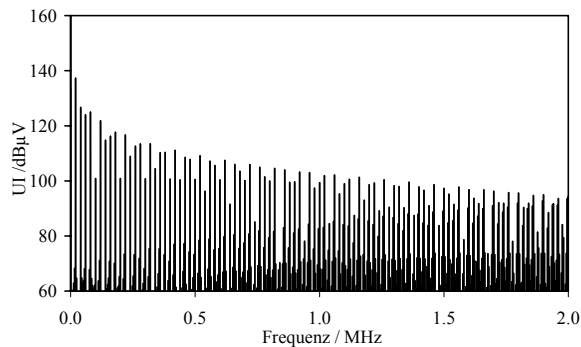


Bild 5 Berechnetes Frequenzspektrum des PWM-Signals

Die äquidistanten Maxima in Bild 5 werden durch die Periodendauer T des PWM Signals verursacht und haben einen Abstand von 20 kHz.

3.2.2 Übertragungsfunktion

Die Übertragungsfunktion soll für den Bereich 0 Hz bis 2 MHz berechnet werden. Eine Skizze des Berechnungsmodells ist in **Bild 6** dargestellt. Im Frequenzbereich bis 2 MHz sind alle vorkommenden berechnungsrelevanten Abmessungen gegenüber der Wellenlänge elektrisch kurz.

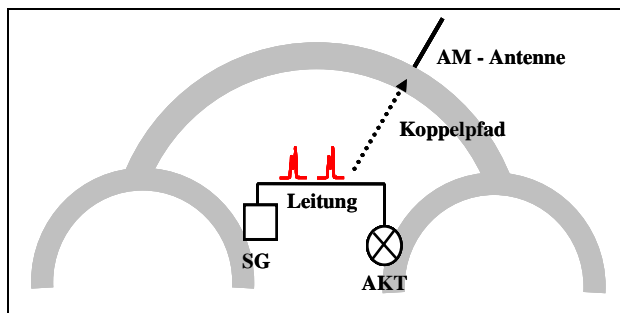


Bild 6 Skizze des Berechnungsmodells

Zur Bestimmung einer worst-case Übertragungsfunktion werden für alle wesentlichen Elemente Ersatzschaltbilder ermittelt. Die Impedanz Z_L des Aktuators ist aus den Pin-Informationen bekannt, sie beträgt 50Ω . Das Steuergerät wird durch eine Spannungsquelle nachgebildet. Das verwendete Ersatzschaltbild für den AM-Antennenempfänger (Z_A) ist ein parallel geschaltetes RC-Glied mit $100 \text{ k}\Omega$ und 20 pF .

Die AM-Antenne im Fahrzeug ist unempfindlich gegenüber Magnetfeldern, aber stark empfindlich gegenüber elektrischen Feldern. Die Kopplung zwischen Leitung und Antenne lässt sich daher mit einer einzigen Kapazität beschreiben. Das stark vereinfachte Ersatzschaltbild ist in **Bild 7** dargestellt.

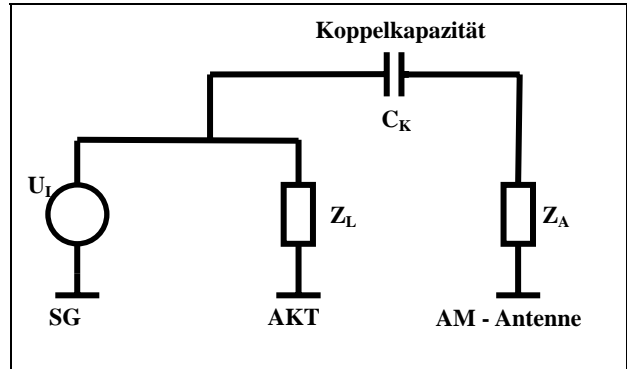


Bild 7 Ersatzschaltbild für den Frequenzbereich 0 Hz bis 2 MHz

Die Koppelkapazität C_K zwischen Antenne und Leitung muss berechnet werden. Für diesen Zweck gibt es im Expertensystem einen speziellen Solver, der auf die Berechnung niederfrequenter Ersatzschaltbilder ausgelegt ist. Dieser Solver kann innerhalb weniger Minuten die gesuchte Koppelkapazität ermitteln und ist daher geeignet, eine größere Anzahl von Leitungs- und Antennenkonfigurationen in annehmbarer Zeit zu betrachten.

In der Berechnung werden bewusst die elektrischen Eigenschaften der Leitung und der Antenne vernachlässigt. Falls die Berechnungsgenauigkeit nicht gut genug ist, lässt sich das Ersatzschaltbild um Ersatzschaltungen für Leitung und Antennenstruktur erweitern (siehe [4]). Ein derart verfeinertes Ersatzschaltbild ist mit dem jetzigen Expertensystem noch berechenbar, es müsste auf alternative Berechnungstools ausgewichen werden.

Im hier vorliegenden Beispiel (Bild 4) ergibt sich für die Koppelkapazität zwischen Antenne und Leitung $C_K = 1,3 \text{ fF}$. Die sich ergebende Übertragungsfunktion $H(f)$ ist in **Bild 8** dargestellt.

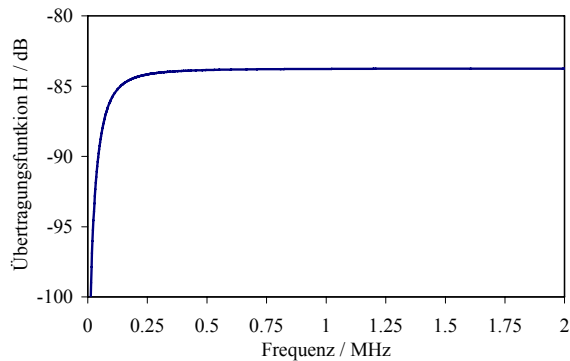


Bild 8 Berechnete Übertragungsfunktion $H(f)$ zwischen Beispielsteuergerät und Antenneneingang der AM-Antenne

Die Ersatzschaltung aus Bild 7 verliert ihre Gültigkeit, wenn die Abmessungen der an der Berechnung beteiligten Komponenten nicht mehr vernachlässigbar klein gegen die Wellenlänge sind. Bei typischen Fahrzeuglängen von etwa 4 m ist dieses ab etwa 4 MHz der Fall.

3.2.3 Störeinkopplung

Da sowohl Übertragungsfunktion als auch Eingangssignal bekannt sind, lässt sich die Störeinkopplung in die AM-Antenne durch das Produkt aus beiden Funktionen bestimmen. In **Bild 9** sind die berechnete, die gemessene Störaussendung und der Grenzwert dargestellt. Sowohl aus der Messung als auch aus der Berechnung folgt die Aussage, dass der AM-Radioempfang durch Betrieb der Beispiellektronik deutlich gestört werden würde. Die gezeigte Messung ist eine im Entwicklungsprozess durchgeführte Messung, auf Basis derer die Beispiellektronik nach EMV-Gesichtspunkten optimiert wurde. Die Berechnung erfolgte im Expertensystem auf Basis der vorhandenen Daten.

Da das Vorgehen für eine AM-Berechnung immer gleich ist, kann die Berechnung ein Teil einer EMV-Regel sein, so dass dem Anwender nur Leitungen gemeldet würden, deren berechnete Störabstrahlung an der AM-Antenne zu Grenzwertüberschreitungen führen.

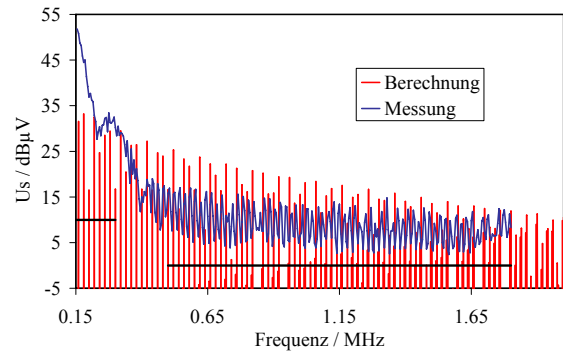


Bild 9 Dargestellt sind die berechnete Störeinkopplung und gemessene Störeinkopplung in die AM-Antenne, sowie der zu unterschreitende Grenzwert.

4 Ergebnis

In der EMV-Entwicklungsabteilung des Volkswagen-Konzerns wird ein Expertensystem eingesetzt, mit dem frühzeitig EMV-Risiken aufgedeckt werden können. Dafür ist es allerdings notwendig, dass entsprechende Daten dem Experten System zur Verfügung stehen. Da es oft nicht ausreicht, nur mit analytischen Mitteln die Daten zu betrachten, wurde anhand eines Beispiels gezeigt, wie eine weiterführende Berechnung die Aussagegenauigkeit verbessern kann. In Zukunft sollen weitere analytische und numerische Methoden in das Expertensystem implementiert werden, um in der virtuellen Prototypenphase noch mehr EMV-Probleme erkennen und anschließend abstellen zu können.

Literatur

- [1] Richter, M.; Frei, S.; Lippert, C.: EMV-Prozesse und Tools für eine baureihenübergreifende Elektronikentwicklung. Ingolstadt: GMM-Fachtagung 2005
- [2] Giarrantano, J.; Riley, G.: Expert systems. Boston: PWS Publ. 1994
- [3] Pfeiffer, H.: Programmierung und Verifikation von neuen Berechnungsalgorithmen für ein Expertensystem zur schnellen Abschätzung von EMV-Störaussendungsproblemen in Kraftfahrzeugen. Diplomarbeit der Fachhochschule Computersimulation St. Pölten 2005
- [4] Frei, S. Jobava, R. G.: Calculation of Low Frequency EMV Problems in Large Systems with a Quasi-Static Approach. Santa Clara: IEEE-Symposium 2004