

# Berechnung der Einkopplung elektromagnetischer Felder in das Bordnetz unter Berücksichtigung von beliebigen Abschlüssen

Dr.-Ing. Stephan Frei, AUDI AG, Ingolstadt  
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Konschak, AUDI AG, Ingolstadt  
Dipl.-Ing. Heiko Wiechmann, AUDI AG, Ingolstadt

## Kurzfassung

Aufgrund kürzer werdender Entwicklungszeiten und der wachsenden Komplexität der Fahrzeugelektronik gewinnt die numerische Simulation der EMV immer mehr an Bedeutung. Die Berechnung der Einkopplung elektromagnetischer Felder in das Bordnetz ist aufgrund der hohen Komplexität aber noch eine große Herausforderung. Die unterschiedlichen Strukturgrößen von Karosserie und Leitungen erfordern eine sehr hohe Anzahl an Berechnungselementen und somit viel Rechenleistung. Zudem ist mit den gängigen Feldeberechnungsverfahren die Behandlung von nichtlinearen Abschlüssen nahezu ausgeschlossen.

Der Beitrag stellt ein hybrides Verfahren zur Berechnung der Feldeinkopplung in Leitungsstrukturen vor. Dieses Verfahren kombiniert 3D-Feldeberechnungsverfahren mit der Netzwerkanalyse. Es erlaubt mit reduziertem Rechenaufwand, die Einkopplung beliebiger Felder zu berechnen und auch nichtlineare Abschlüsse zu behandeln. Das Verfahren wird kurz vorgestellt und es werden Ergebnisse von Berechnungen an Labor- und Fahrzeugkonfigurationen gezeigt. Den Berechnungen werden Messungen gegenübergestellt.

## 1 Einführung

Durch die steigende Anzahl von elektronischen Komponenten in Kraftfahrzeugen spielt die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eine immer größere Rolle.

Durch die kommende Realisierung von sicherheitsrelevanten Funktionen im Fahrzeug durch elektronische Systeme wie z.B. „brake-by-wire“ oder „steer-by-wire“ werden die Anforderungen an die EMV eines Kraftfahrzeuges noch deutlich an Schärfe gewinnen.

Aus vielen Gründen kann durch Prüfungen alleine in Zukunft die Störfestigkeit eines Fahrzeugs nicht mehr sichergestellt werden. Neue Methoden müssen die Realisierung der EMV von Kraftfahrzeugen unterstützen, wobei der numerischen Simulation dabei eine besondere Bedeutung zukommen wird.

Aus Sicht der EMV-Simulation kann das Gesamtsystem Kraftfahrzeug in drei Komplexe aufgeteilt werden.

- metallische Oberflächen (wie z.B. die Fahrzeugkarosserie)
- Leitungsstrukturen
- elektronische Komponenten (i.d.R. die Abschlüsse der Leitung)

Die Verkabelung ist als die wesentliche Störsenke anzusehen, in die durch elektromagnetische Felder E-

nergie eingekoppelt werden kann. Betrachtet man dabei die Ausdehnung der Fahrzeugverkabelung mit einer Gesamtlänge von einigen tausend Metern, so ergibt sich eine sehr ausgedehnte Empfangsstruktur für elektromagnetische Energie.

Die direkte Einkopplung in Steuergeräte spielt im unteren und mittleren Frequenzbereich kaum eine Rolle, da die Abmessungen der Strukturen wesentlich kleiner als die Wellenlänge sind. Steuergeräte können näherungsweise als räumlich konzentrierte Schaltkreise betrachtet werden, welche die Leitungen abschließen. Bei der näherungsweisen Berechnung der Feldeinkopplung kann man sich also auf die Betrachtung der Verkabelung und der Karosserie beschränken.

Aber auch wenn die dielektrischen Materialien im Kfz vernachlässigt werden und nur die Daten der metallischen Karosserie und der Verkabelung für die Berechnung der Feldverteilung im Kraftfahrzeug herangezogen werden, ist die Berechnung der durch Feldeinkopplung hervorgerufenen Ströme und Spannungen an den Leitungsabschlüssen noch eine große Herausforderung. Dies liegt im Wesentlichen in den unterschiedlichen Größenordnungen der zu berechnenden Strukturen begründet. Die Ausdehnung der Fahrzeugkarosserie, die für die Feldeberechnung modelliert werden muss, bewegt sich im Bereich von einigen Metern. Der Fahrzeugleitungssatz hingegen, zeichnet sich durch Parameter wie Durchmesser und Leitungsabstände aus, die im Submillimeterbereich liegen können.

Bei der Erstellung eines detaillierten Modells von einem solchen Gesamtsystem für die numerische Feldberechnung, z.B. mittels der Momentenmethode (MoM) oder der Finite-Elemente-Methode (FEM), entstehen Gleichungssysteme mit einer sehr großen Anzahl an Unbekannten. Der Bedarf an Speicherplatz und Rechenkapazität zur Lösung solcher komplexen Systeme überfordert oft auch die Möglichkeiten von Großrechnern. Es ist also notwendig, Methoden einzusetzen, die es erlauben, die Anzahl der Unbekannten zu reduzieren [1].

In dieser Arbeit wird ein hybrides Verfahren, im Folgenden LCTL (**L**umped element **C**ircuits **T**ransmission **L**ine) genannt, vorgestellt bei dem der Berechnungsablauf in zwei Schritte aufgeteilt wird:

- 1) Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung der Felder, die in die Leitungsstrukturen einkoppeln. Die Feldverteilung, z.B. im Kraftfahrzeug, wird mittels eines 3D-Feldberechnungsverfahrens ermittelt. Die Momentenmethode (MoM) ist für Frequenzen bis zu 500 MHz gut geeignet. Da nur die metallischen Oberflächen diskretisiert werden müssen, erlaubt diese Methode die Modellierung der Fahrzeugkarosserie mit einer relativ geringen Anzahl von Elementen.
- 2) Ist die Feldverteilung im Bereich der Leitungsstruktur bekannt, kann die Einkopplung mit einem erweiterten leitungstheoretischen Ansatz berechnet werden. Leitungstheoretische Verfahren (Transmission Line-Theorie) werden im Automobilbereich seit längerem erfolgreich für die Berechnung der Leitungsüberkopplung (Crosstalk) eingesetzt [2,3]. Bei dem erweiterten Verfahren wird die Feldeinkopplung durch äquivalente Strom- und Spannungsquellen modelliert. Damit ist es mit Netzwerkberechnungsverfahren möglich, die Einkopplung von inhomogenen Felder in Leitungsstrukturen zu berechnen, die in ihrem Verlauf sowohl inhomogen als auch nichtlinear abgeschlossen sein dürfen.

## 2 Methode

### 2.1 Erweitertes TL – Verfahren zur Berechnung der Feldeinkopplung

Basierend auf dem Berechnungsablauf in Bild 1 wird im LCTL-Verfahren die zu analysierende Struktur zerlegt und schrittweise berechnet. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden näher erläutert.



Bild 1 Berechnungsablauf beim LCTL-Verfahren

#### 2.1.1 Segmentierung der Leitungsstruktur

Die gesamte Leitungsstruktur wird in einzelne Segmente zerlegt, wobei der Grad der Segmentierung von der Wellenlänge, der Inhomogenität der Leitung und des elektromagnetischen Feldes abhängt. Regeln für die Segmentierung sind in [4,5,6] zu finden.

Jedes Segment wird so durch seine eigene charakteristische Länge und die Impedanzmatrizen definiert (Bild 2). Da jedes Segment eine elektrisch kurze Leitung dargestellt, können die einzelnen Segmente durch konzentrierte Bauelemente nachgebildet werden.

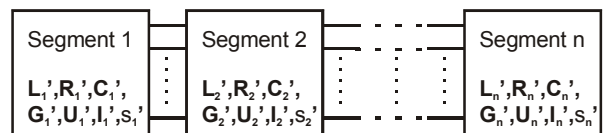


Bild 2 Unterteilung einer TL in kurze Segmente mit der Länge  $s_i$  mit individuellen TL-Parametermatrizen

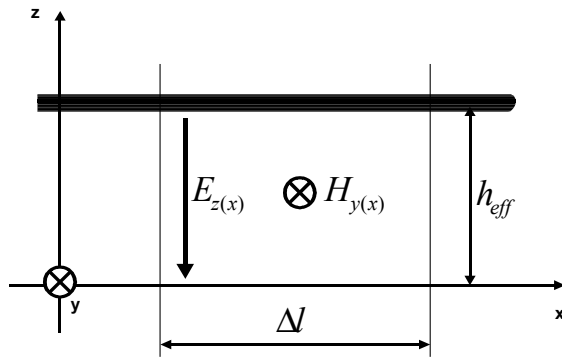
#### 2.1.2 Berechnung der Leitungsparameter

Entsprechend des geometrischen Aufbaus der Leitung müssen für jedes Leitungssegment die Leitungsparameter berechnet werden. Für einfache Leitungsanordnungen, wie z.B. ein Einzelleiter über einer Massefläche, können die Leitungsparameter  $L'$  und  $C'$  mit Hilfe analytischer Berechnungsverfahren bestimmt werden. Die LC-Matrizen komplexerer Leitungsanordnungen mit Dielektrika wurden mit einem auf der Method of Auxiliary Sources (MAS) beruhenden Verfahren berechnet. Die Leitungsparameter  $R'$  und  $G'$  werden über die Materialangaben für den Leiter bzw. das Dielektrikum bestimmt. Der Skineffekt kann be-

rücksichtigt werden, indem die Eindringtiefe bei der zu berechnenden Frequenz bestimmt und der effektive Leiterquerschnitt für die Berechnung von  $R'$  verwendet wird.

### 2.1.3 Feldberechnung

Mit einem 3D-Feldberechnungsprogramm wird die Feldverteilung entlang der Leitungsstruktur berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass die Leiterstruktur selbst nicht Bestandteil des Berechnungsmodells ist und somit bei der Feldberechnung unberücksichtigt bleibt. Für die Berechnung der äquivalenten Strom- und Spannungsquellen werden die elektrischen Feldkomponenten, die senkrecht zur Massefläche stehen, und die magnetischen Feldkomponenten, die parallel zur Massefläche verlaufen, herangezogen [7,8]. Die benötigten Feldkomponenten sind in Bild 3 dargestellt.



**Bild 3** Einzelner Leiter mit E- und H-Feld-Komponenten zur Berechnung äquivalenter Quellen

### 2.1.4 Berechnung der äquivalenten Strom- und Spannungsquellen

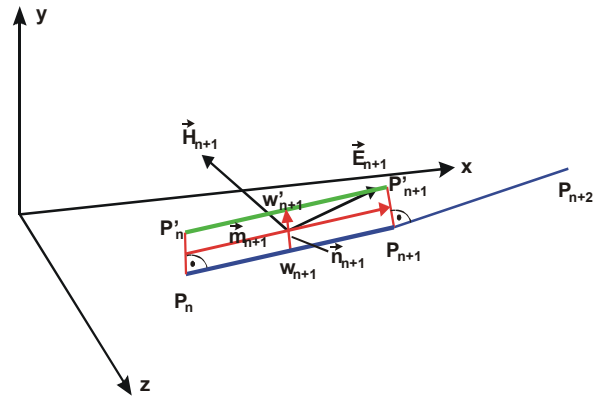
Voraussetzung für die Berechnung äquivalenter Strom- und Spannungsquellen ist, dass das Feld entlang eines Leitungssegmentes näherungsweise homogen ist. Mit Hilfe der folgenden Formeln können äquivalente Strom- und Spannungsquellen für ein 2-Leiter-System mit Orientierung in der xz-Ebene (Bild 3) im Frequenzbereich berechnet werden:

$$\underline{U}(x, \omega) = -j\omega \cdot \mu_0 \cdot \Delta l \cdot \int_0^{h_{eff}} \underline{H}_{y(x)} \cdot dz$$

$$\underline{I}(x, \omega) = j\omega \cdot C' \cdot \Delta l \cdot \int_0^{h_{eff}} \underline{E}_{z(x)} \cdot dz$$

In der Regel kann man die Integrale in den obigen Gleichungen durch eine einfache Multiplikation ersetzen. Dabei ergibt die Berechnung mit den Mittelwer-

ten der Feldstärken  $\overline{H}$  und  $\overline{E}$  eine ausreichende Genauigkeit der Ergebnisse (Feldstärken in der Mitte der Leitungssegmente). Die Beziehungen für Berechnungen im Zeitbereich finden sich in [4]. Sind die Signalleitungen und der Bezugsleiter (oder auch Massefläche) beliebig im Raum orientiert, ist die Berechnung der benötigten  $\overline{E}$ - und  $\overline{H}$ -Feldkomponenten komplexer. Durch vier Punkte im Raum ( $P_n, P'_n, P_{n+1}, P'_{n+1}$ ) lässt sich ein Leitungssegment aus zwei Leitern vollständig geometrisch beschreiben (Bild 4). Die Leitungen sind hier mit  $w_n$  und  $w'_n$  bezeichnet.



**Bild 4** Geometrie für ein Leitungssegment (2 Leiter  $w$  und  $w'$ ) im freien Raum, angeregt durch ein lokal homogenes Feld

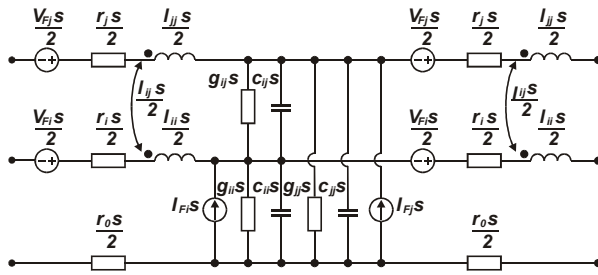
Die für die Berechnung benötigten Komponenten der Feldstärken, hier mit  $H_{TL}$  und  $E_{TL}$  bezeichnet, lassen sich wie folgt ermitteln:

$$\underline{H}_{TL} = (\vec{n} \times \vec{m}) \cdot \vec{H}$$

$$\underline{E}_{TL} = \vec{n} \cdot \vec{E}$$

Wird eine Fläche als Bezugsleiter verwendet, muss der Vektor  $P'_n - P_n$  senkrecht auf der Bezugsebene stehen und der Vektor  $P_{n+1} - P_n$  muss senkrecht auf dem Vektor  $P'_n - P_n$  stehen.

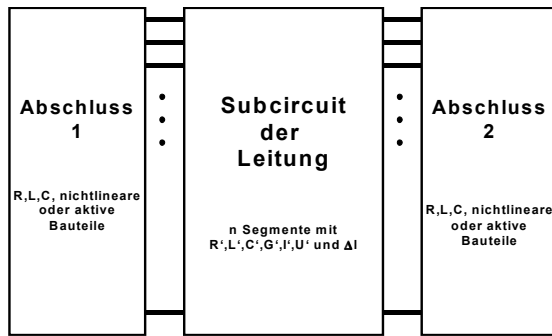
Bild 5 zeigt die Ersatzschaltung eines Mehrleiter-Systems (MTL), das durch äquivalente Strom- und Spannungsquellen für die Modellierung der Feldeinkopplung ergänzt wurde.



**Bild 5** T-Netzwerk für ein MTL Segment mit äquivalenten Quellen

### 2.1.5 Generieren der Ersatzschaltung

Sind die äquivalenten Strom- und Spannungsquellen berechnet, kann eine Ersatzschaltung der Leitung als Netzliste für SPICE generiert werden. Diese Netzliste wird als Subcircuit definiert und kann dann mit den Abschlüssen beschaltet werden.



**Bild 6** Leitungs-Netzwerk mit Abschlüssen

### 2.1.6 Berechnen der Ersatzschaltung

Die Spannungen bzw. die Ströme, die durch die Feld-einkopplung an den Abschlüssen der Leitungen hervorgerufen werden, können nun mit SPICE berechnet werden. Dabei kann jedes elektronische Bauteil, das in einer Bibliothek von SPICE oder einem SPICE-Derivat verfügbar ist, für die Modellierung der Abschlüsse verwendet werden.

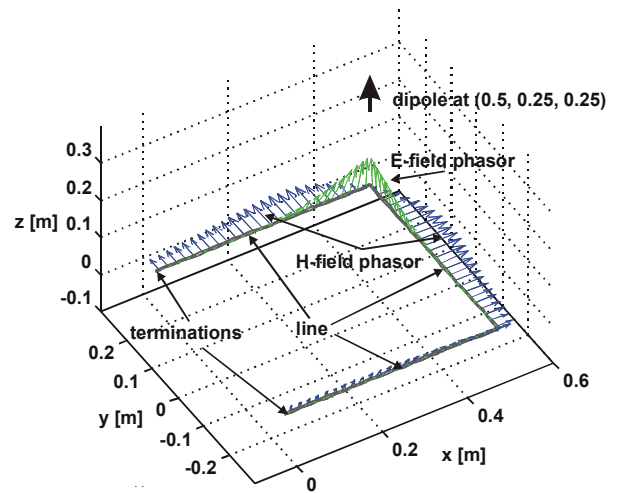
Die Berechnungsgeschwindigkeit für eine solche Ersatzschaltung ist sehr hoch. Eine Doppelleitung die durch mehr als 1000 Segmenten modelliert ist und komplexere Abschlüsse enthält, kann mit einem handelsüblichen PC ( Pentium III mit 700MHz und 256MB RAM ) in weniger als einer Minute berechnet werden.

## 3 Ergebnisse

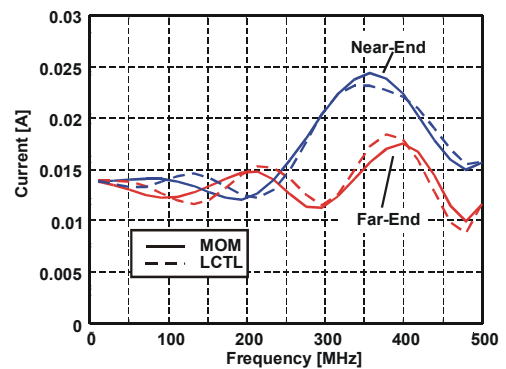
Das beschriebene Verfahren wurde anhand von unterschiedlichen Anordnungen auf seine Anwendbarkeit hin überprüft. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden präsentiert.

### 3.1 Berechnung von Leitungsstrukturen im freien Raum

Eine U-förmig verlegte Doppelleitung wurde im freien Raum von einem Dipol angeregt. Die Konfiguration mit den entsprechenden Feldern im Bereich der Leitung wird in Bild 7 gezeigt. Es ist zu sehen, dass die Felder stark inhomogen sind. In Bild 8 ist das Ergebnis für beide Abschlüsse dargestellt.



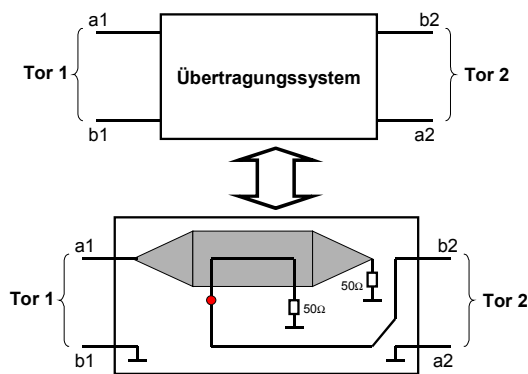
**Bild 7** U-förmige Leitung mit Dipol als Anregung (Leitungslänge: 1,5 m; Radius: 0,5 mm; Abstand zwischen den Leitungen: 1 cm; Abschlüsse: 400 Ohm)



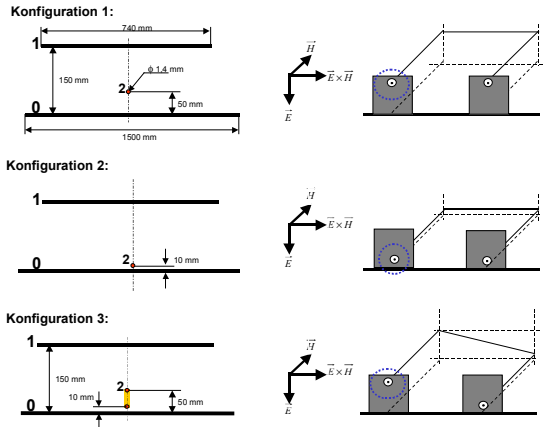
**Bild 8** Leitung im inhomogenen Feld

### 3.2 Berechnung von Leitungsstrukturen in der Streifenleitung

Zur Verifizierung des Berechnungsverfahrens wurden weiterhin verschiedene Leiterkonfigurationen in einer Streifenleitung berechnet und mit Messungen und Berechnungen der kompletten Anordnung mit der Momentenmethode verglichen. Die Messungen wurden in einer 50 Ohm Streifenleitung nach DIN ISO 11452-5 als Zweitormmessung (Bild 9) durchgeführt. Die Streifenleitung zusammen mit dem Sweep-Generator des Networkanalyzers dienten als Felderzeuger. Gemessen wurde der Spannungsabfall am Abschlusswiderstand, der ein Maß für die Feldeinkopplung darstellt.



**Bild 9** Der Streifenleitungsaufbau als Vierort

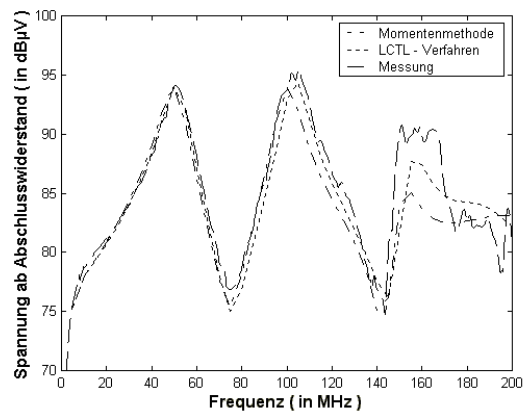


**Bild 10** In der Streifenleitung untersuchte Leitungs-konfigurationen

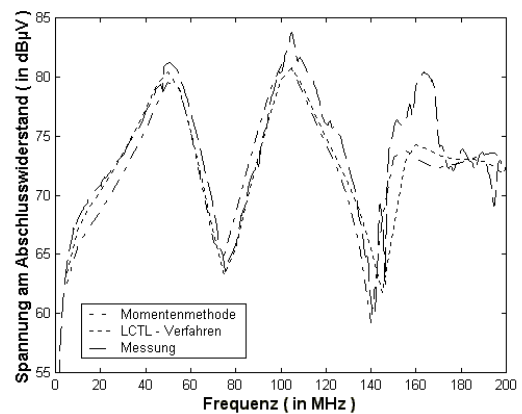
Die folgenden Leiterkonfigurationen wurden untersucht (Bild 10):

1. Koppelleitung in 5 cm Abstand zur Massefläche der Streifenleitung
2. Koppelleitung in 1 cm Abstand zur Massefläche der Streifenleitung

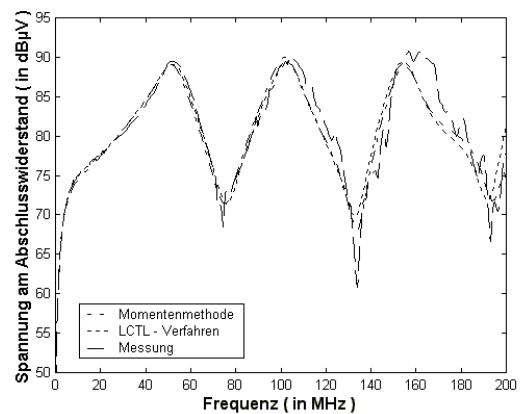
### 3. Koppelleitung mit variierender Höhe, inhomogene TL ( ortsabhängige Leitungsparameter )



**Bild 11** Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen für Konfiguration 1



**Bild 12** Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen für Konfiguration 2



**Bild 13** Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen für Konfiguration 3

In Bild 11 bis Bild 13 sind die Berechnungsergebnisse im Vergleich zu Messungen für die untersuchten Lei-

tungsstrukturen (Bild 10) in der Streifenleitung grafisch dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse mit dem LCTL-Verfahren zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen der Momentenmethode und den Messergebnissen. Die Abweichungen im oberen Frequenzbereich sind im Wesentlichen auf Einflüsse durch die geschirmte Kabine, in der die Streifenleitung bei der Messung stand, zurückzuführen. Die Kabine und deren Reflexionen wurden im Berechnungsmodell nicht berücksichtigt.

### 3.3 Berechnung von Leitungsstrukturen im Kraftfahrzeug

Im Folgenden werden Untersuchungen im Fahrzeug beschrieben. Die Einkopplung in die Leiter im Fahrzeuginnenraum wurde analysiert. Es wurde eine leere, unlackierte Karosserie gewählt, um Einflüsse durch die Inneneinrichtung, die durch die Momentenmethode nicht nachbildbar sind, auszuschließen. Diese Einflüsse werden Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Zur Felderzeugung dienten entweder eine auf dem Fahrzeugdach oder eine im Innenraum, in der Nähe des Schalthebels angebrachte Sendeantenne (Funkgerät im Innenraum). Die Antenne selbst ist als Monopol mit einer Länge von 0,5 m und einem Durchmesser von 1,5 mm ausgeführt.

Die folgenden beiden Leitungen wurden untersucht:

#### 1. Leitung A

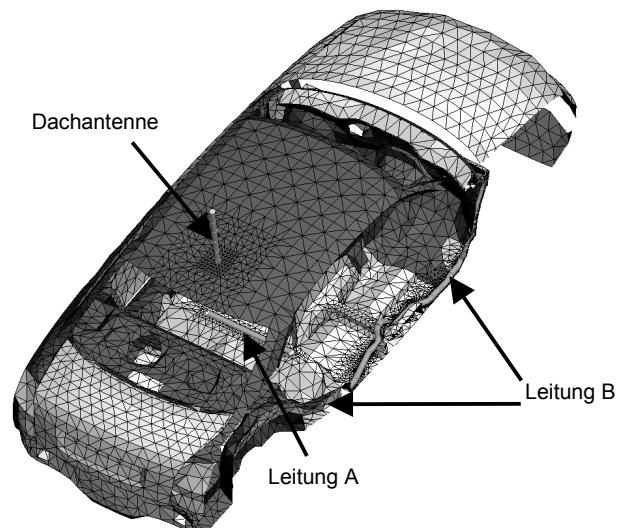
Leitung im Bereich der Rücksitzbank: Diese Leitung ist sehr kurz (59 cm), hat aber den Vorteil, dass der Diskretisierungsfehler aufgrund der einfachen Geometrie minimal ist.

#### 2. Leitung B

Leitung in Schwellernähe von der A-Säule zur Rücksitzbank verlaufend; Diese Leitung ist länger (207 cm), hier konnte der exakte Verlauf im Simulationsmodell aber nur annähernd nachgebildet werden.

Aufgrund der Diskretisierung der Fahrzeugkarosserie mit 15.400 Dreieckselementen können nicht alle Details des Fahrzeugs nachgebildet werden. Im Bereich der Leitung wurde zwar feiner diskretisiert, die Ausgangsbasis war aber nicht das Geometriemodell, sondern ein Netz mit etwa 9.000 Dreieckselementen. Geometriedetails wie Löcher, Kanten oder kleine Blechteile wurden also auch hier nicht berücksichtigt.

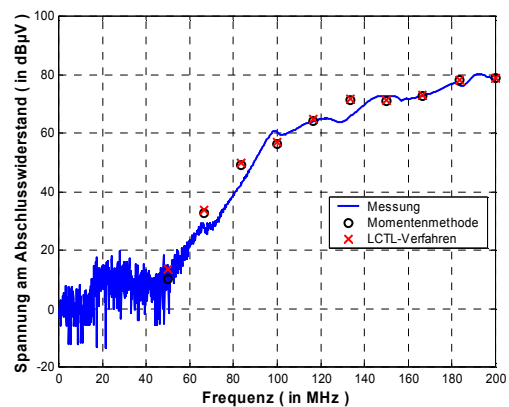
Die Position der Leitung in der realen Karosserie weicht also zwangsläufig von der Position der Leitung im Berechnungsmodell ab. Dies ist eine potentielle Fehlerquelle.



**Bild 14** Aufgeschnittenes Fahrzeugmodell mit Leitungen und Dachantenne

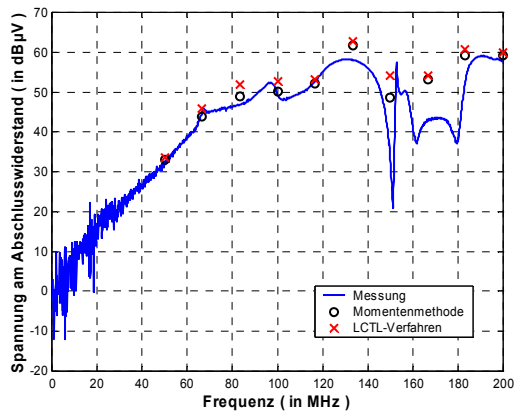
Der leitfähige Boden und die Wirkung der Absorber in dem Messraum wurden beim Berechnungsmodell nicht berücksichtigt, es ist aber davon auszugehen, dass die Umgebung besonders bei einer Außenantenne eine Rolle spielt.

In Bild 14 ist das Modell der untersuchten Konfiguration für die numerische Simulation mit Dachantenne dargestellt.

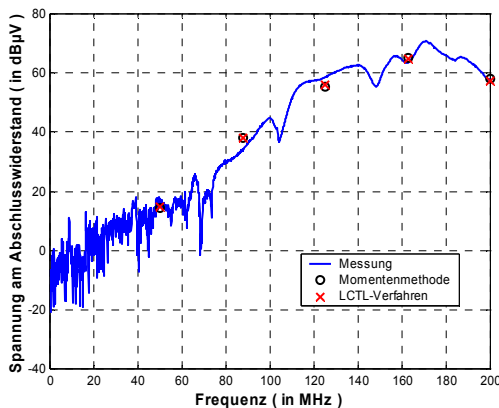


**Bild 15** Vergleich Messung, MoM-Rechnung, LCTL-Rechnung (Leitung A, Antenne innen)

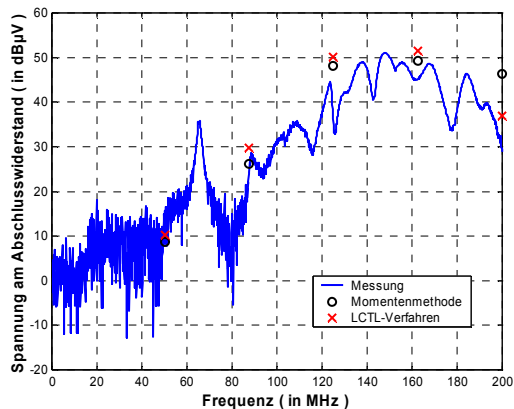
Für die Untersuchungen wurde die Spannung an den Abschlüssen der beiden Leitungen ermittelt. Die Simulationsergebnisse mit dem LCTL-Verfahren wurden ebenfalls wieder mit Messergebnissen und Berechnungsergebnissen der Momentenmethode verglichen (Bild 15 - Bild 18).



**Bild 16** Vergleich Messung, MoM-Rechnung, LCTL-Rechnung (Leitung B, Antenne innen)



**Bild 17** Vergleich Messung, MoM-Rechnung, LCTL-Rechnung (Leitung A Antenne außen)



**Bild 18** Vergleich Messung, MoM-Rechnung, LCTL-Rechnung (Leitung B, Antenne außen)

## 4 Diskussion

Die Vergleiche zeigen, dass es möglich ist, mit akzeptabler Genauigkeit die Einkopplung in Kraftfahrzeuge zu berechnen. Wenn ein Berechnungsmodell die Geometrie und die Oberflächenstromverteilung sehr gut nachbilden kann, sind die Ergebnisse sehr genau, wie die Berechnungen an Leitung A zeigen. Vergrößert man hier den Aufwand noch weiter, können die bereits sehr geringen Abweichungen zur Messung noch weiter minimiert werden, wobei auch die Messtechnik natürlich nicht beliebig genau ist.

Leider kann der Aufwand für eine präzise Modellerstellung sehr hoch sein. Im Fall von Leitung B wurden Abweichungen zum Messaufbau im Berechnungsmodell akzeptiert, aber auch hier sind die Ergebnisse für eine Bewertung des EMV-Verhaltens durchaus akzeptabel.

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass das LCTL-Verfahren grundsätzlich geeignet ist, um die Einkopplung in Leitungen im Fahrzeug zu berechnen. Dieses Verfahren bietet in der Praxis die folgenden wesentlichen Vorteile gegenüber der reinen Momentenmethode:

- Nahezu beliebige Abschlüsse können behandelt werden, d.h. jeder Abschluss, der auch von einem Schaltkreissimulationsprogramm berechnet werden kann.
- Sinusförmige und transiente Anregungen können betrachtet werden.
- Da die Oberflächenstromverteilung auf der Karosserie unabhängig von den Leitungen berechnet wird, kann diese für alle Leitungskonfigurationen verwendet werden. Änderungen der Leitungsführung oder Leitungsparameter können ohne eine komplette Neuberechnung des Stromvektors berücksichtigt werden.
- Eine einmal durchgeführte Berechnung einer Einkopplung in eine Leitung ist unabhängig von den Abschlüssen. Das erzeugte Leitungsmodell kann für beliebige Abschlüsse wiederverwendet werden.

## 5 Zusammenfassung

Es wurde ein hybrides Verfahren zur Berechnung der Feldeinkopplung in den Leitungssatz von Kraftfahrzeugen vorgestellt. Anhand von numerischen Untersuchungen im freien Raum, in der Streifenleitung und im Fahrzeug wurde die Anwendbarkeit des Verfahrens gezeigt. Die Simulationsergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

Im Vergleich zur reinen Momentenmethode bietet das aus dem LCTL-Verfahren resultierende Netzwerk die Möglichkeit, beliebige nichtlineare Abschlüsse zu be-

trachten. Praxisrelevante Zeitbereichs- und Frequenzbereichsanalysen können durchgeführt werden. EMV-Untersuchungen mit wechselnden Leitungsparametern und Verlegeorten, wie sie in der Praxis häufig notwendig sind, können, nachdem die Stromverteilung auf der Karosserie einmal berechnet wurde, sehr schnell erfolgen.

## 6 Literatur

- [1] J. P. Parmantier, Theory and Modelling for EMC in Extended Systems: Current Capabilities and Requirements, 13<sup>th</sup> International Zurich Symposium on EMC, 1999
- [2] P. Jennings, C.-M. Ting, System EMC Assessment using Transmission Line Theory, IEEE International Symposium on EMC, 1998
- [3] W. T. Smith, C. R. Paul, et al., Crosstalk Modeling for Automotive Harness, IEEE International Symposium on EMC, 1994
- [4] S. Frei, R. Jobava, Coupling of Inhomogeneous Fields into an Automotive Cable Harness with Arbitrary Terminations, 14<sup>th</sup> International Zurich Symposium on EMC, 2001
- [5] W. W. Everett, Lumped Model Approximations of Transmission Lines: Effect of Load Impedances on Accuracy, IEEE International Symposium on EMC, 1983
- [6] C. Wong, An Efficient Method to Evaluate Transmission Characteristics of Transmission Lines Using the Lumped Network Model, IEEE International Symposium on EMC, 1987
- [7] H.-D. Brüns, H. Singer, Coupling of Inhomogeneous Fields into Cables over Discretized Metallic Ground Planes of Finite Extend, IEEE International Symposium on EMC, 1996
- [8] H.-D. Brüns, H. Singer, Computation of Interference in Cables Close to Metal Surfaces, IEEE International Symposium on EMC, 1998