

# Steigerung der Empfindlichkeit bei Nah-Feld-Messungen an Metallgehäusen

Peter Reiser, Johnson Controls, R & D Center Electronics, Karlsruhe  
Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Universität Hannover  
Dietmar Giselbrecht, IEH, Universität Karlsruhe

## 1. Einleitung

Die Einhaltung der gesetzlichen Abstrahlungsgrenzwerte z.B. nach EN55011 für ISM Geräte oder CISPR 25 für Automobilkomponenten wird oft erst am Ende der Geräteentwicklung auf einem Freifeld oder in einer Absorberkammer überprüft. Dabei wird eine integrale Messung des gesamten Systems durchgeführt, wobei die Zuordnung auf lokale Schwachpunkte des Elektroniksystems in der Regel nicht möglich ist. Dafür kommen so genannte Schnüffelantennen zum Einsatz. Damit ist eine Ortung der Schwachstellen möglich. Außerdem bietet sich an, während der Entwicklungsphase gezielte EMV-Messungen und -Optimierungen durchzuführen. Dafür haben sich kleine Monopol- und Rahmenantennen etabliert. Aufgrund der unterschiedlichen Empfangscharakteristiken wird je nach Anwendung eine geeignete Sonde ausgewählt. Speziell bei der Qualifikation von Automobilkomponenten sind teilweise Empfindlichkeiten erforderlich, die mit den herkömmlichen Sensoren nicht erreicht werden, z.B. wenn sich ein Elektronikmodul direkt bei der Scheibenantenne befindet. Für den Fall, dass die Elektronik in einem metallischen Schirmgehäuse untergebracht ist, wird ein Sensor mit hoher Empfindlichkeit vorgestellt, der den bestehenden Satz der Nahfeldsonden ergänzt.

## 2. Schirmwirkung von Metallgehäusen

Die Schirmwirkung von Metallgehäusen ist von der Art des anregenden Feldes abhängig. Statische und langsam veränderliche Magnetfelder (bis einige kHz) werden von Metallgehäusen ohne ferromagnetisches Material kaum geschirmt [3], weil sie keine Elementarmagnete enthalten, die sich nach dem Feld ausrichten können. Alle anderen Felder (auch höherfrequente Magnetfelder) erfahren eine Schirmwirkung, die durch Wirbelströme in den Metallwänden verursacht wird [5]. Vor allem wenn diese Ströme um eine Öffnung fließen, erzeugt dies eine Auskopplung des magnetischen Feldes. In Bild 1 sind die Wandströme um einen Schlitz gezeigt, wenn eine ebene Welle auf eine unendlich ausgedehnte Metallwand trifft.

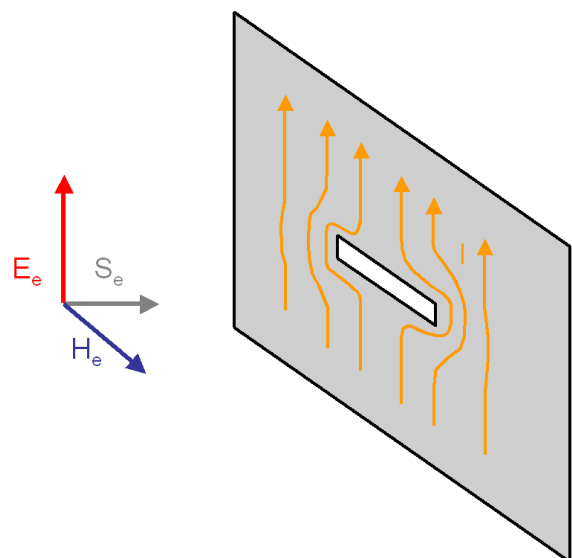


Bild 1: Wandströme um einen Schlitz

### 3. Auskopplung aus einem Schlitz

Die Auskopplung aus metallischen Gehäusen erfolgt über Öffnungen oder nicht ideal leitende Verbindungsstellen. Diese haben meist eine längliche Struktur, weshalb sie mit einem Schlitz angenähert werden können, dessen Abstrahlung im Folgenden näher untersucht werden soll. Zuerst wird ein magnetischer Elementardipol (Fitzgeraldscher Dipol) betrachtet (Bild 2) mit einem eingepprägten magnetischen Strom der Amplitude  $I_{M0}$ , der über der Länge  $\Delta$  konstant sein soll.

Dieser erzeugt folgendes Feld [6],

$$\underline{H}_r = \frac{I_{M0}\Delta \cos \vartheta}{2\pi r^2 Z_{F0}} \left[ 1 + \frac{1}{j\beta_0 r} \right] \cdot e^{-j\beta_0 r},$$

$$\underline{H}_\vartheta = \frac{j\beta_0 I_{M0}\Delta \sin \vartheta}{4\pi r Z_{F0}} \left[ 1 + \frac{1}{j\beta_0 r} - \frac{1}{(\beta_0 r)^2} \right] \cdot e^{-j\beta_0 r},$$

$$\underline{E}_\varphi = \frac{-j\beta_0 I_{M0}\Delta \sin \vartheta}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{j\beta_0 r} \right] \cdot e^{-j\beta_0 r},$$

wobei sich die Phasenkonstante  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$  aus der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$  ergibt und  $Z_{F0}$  der Freiraumwellenwiderstand ist.

Das Dipolmoment  $I_{M0}\Delta$  berechnet sich bei realer Spule mit der Fläche  $A$ , die in der  $xy$ -Ebene liegt, und dem konstanten Strom  $I_0$  zu

$$\underline{I}_{M0}\Delta = j\omega\mu_0 I_0 A.$$

Für das Nahfeld gelten  $\beta_0 r \ll 1$  und  $e^{-j\beta_0 r} \approx 1$  womit sich die Feldbeziehungen vereinfachen zu

$$\underline{H}_r = \frac{-j I_{M0}\Delta}{2\pi r^3 Z_{F0} \beta_0} \cos \vartheta,$$

$$\underline{H}_\vartheta = \frac{j I_{M0}\Delta}{4\pi r^3 Z_{F0} \beta_0} \sin \vartheta,$$

$$\underline{E}_\varphi = \frac{-I_{M0}\Delta}{4\pi r^2} \sin \vartheta.$$

Im Nahbereich dominieren die magnetischen Felder, weshalb Messungen mit

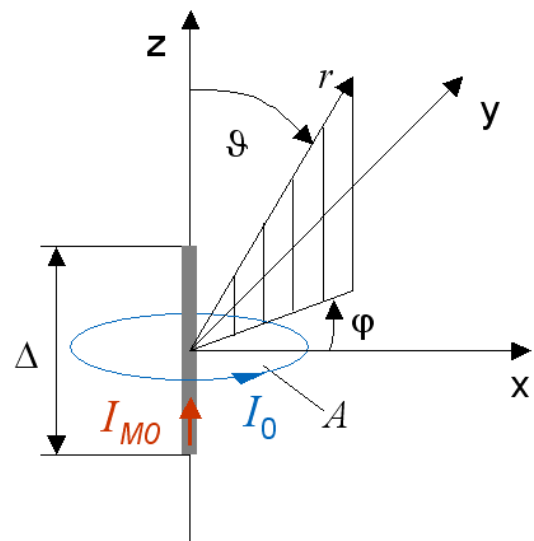


Bild 2: Magnetischer Elementardipol

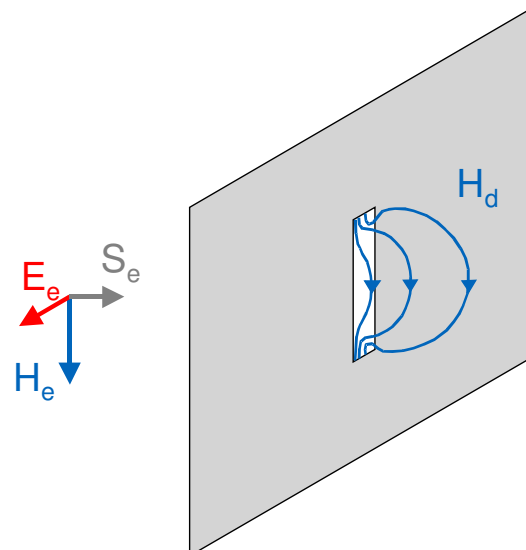


Bild 3: Durchgriff des magnetischen Feldes durch einen Schlitz

magnetischen Feldsonden zu bevorzugen sind. Die Felder zeigen eine starke Abhängigkeit vom Abstand  $r$  sowie vom Winkel  $\vartheta$ . Vorteilhaft hinsichtlich der Reproduzierbarkeit wäre ein Sensor, dessen Bauform einen festgelegten Abstand und Winkel vorgibt. Bild 3 zeigt schematisch das Durchgreifen des magnetischen Feldes durch einen Schlitz. Dabei wurde als Anregung eine ebene Welle angedeutet. Dies könnte ebenfalls durch ein langsam veränderliches Magnetfeld geschehen, das zum Schlitz senkrecht fließende Wirbelströme in der Metallwand induziert. Der oben beschriebene magnetische Elementardipol ist in Längsachse des Schlitzes ausgerichtet und das durchtretende magnetische Feld in der Ebene  $\varphi = 0$  dargestellt.

#### 4. Klassische Nahfeldsonden

Als Nahfeldsonden sind kleine Monopol-Antennen für das elektrische Feld und kleine Rahmenantennen für das magnetische Feld gebräuchlich. Die einfachste Bauweise einer Monopolantenne ist ein Koaxialkabel, dessen Innenleiter am Ende ein Stück über den umgebenden Schirm hinausragt. Die Rahmenantennen bestehen aus einer Spule mit einer oder mehreren Windungen, wie dies in Bild 4 für 2 Windungen dargestellt ist. Um die elektrische Beeinflussung zu minimieren, befinden sich die Leiter in einem metallischen Rohr. Dies muss aber an einer Stelle unterbrochen sein, da sonst das zu messende Magnetfeld Kurzschlussströme auf dem Metallrohr erzeugt. Diese bewirken wiederum ein Magnetfeld, das dem anregenden Feld entgegengesetzt ist. Der Strahlungswiderstand der Rahmenantenne ist näherungsweise [6]

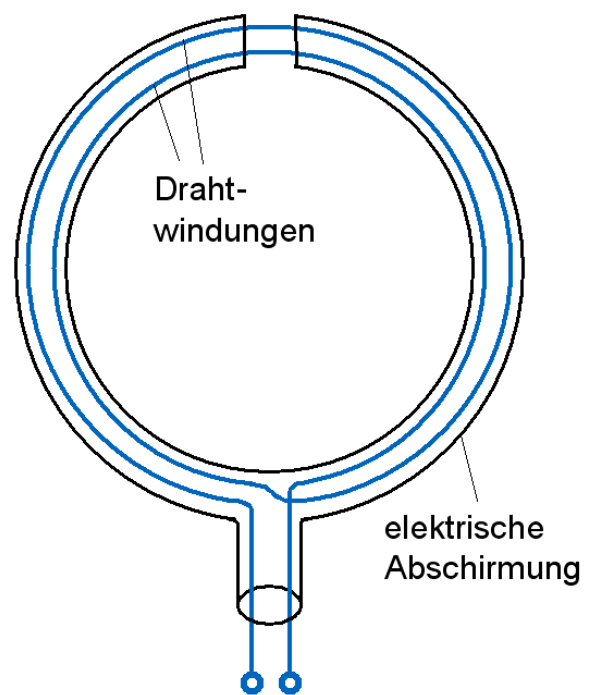


Bild 4: Rahmenantenne mit elektrischer Abschirmung

$$\frac{R_s}{\Omega} \approx 31000 \left( \frac{nA}{\lambda_0^2} \right)^2,$$

wobei  $A$  die Rahmenfläche,  $n$  die Windungszahl und  $\lambda_0$  die Wellenlänge ist.

Für niedrige Frequenzen ist der Strahlungswiderstand klein und nur für einen schmalen Frequenzbereich an die 50  $\Omega$ -Systeme angepasst. Dies ist ein allgemeiner Nachteil von Feldsonden, die direkt über Koaxialkabel mit den 50  $\Omega$ -Eingängen der HF-Messgeräte verbunden werden.

## 5. Ankopplung einer Striplinestruktur an einen Schlitz

Bild 5 zeigt schematisch den Aufbau des vorgeschlagenen Sensors [8], der über einem Schlitz angeordnet ist. Dabei führt ein Flachleiter am Schlitz vorbei.

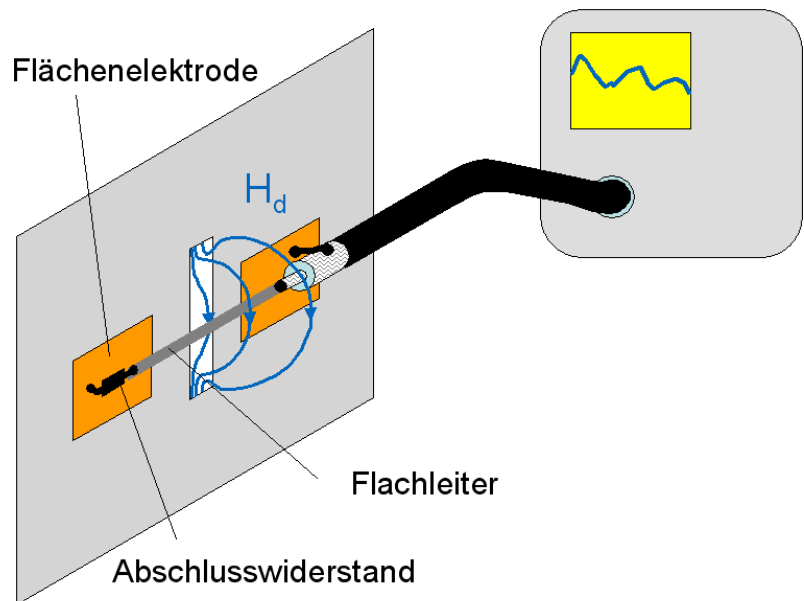
Das durchgekoppelte Magnetfeld umfasst den Leiter und induziert Längsströme in ihm. Damit diese Ströme in beiden Richtungen reflexionsfrei abfließen können, wird der Abstand zur metallischen Wand konstant gehalten. Vorteilhaft ist es, die Breite des Flachleiters und den Abstand zur Wand so zu

wählen, dass sich eine  $50\ \Omega$ -Striplinestruktur ergibt. Diese kann mit einem Koaxialkabel abgegriffen werden, indem der Innenleiter mit dem Flachleiter verbunden wird und die Metallwand (GND-Plane) kapazitiv an eine Flächenelektrode angekoppelt wird, die ihrerseits leitend mit dem Außenleiter des Koaxialkabels kontaktiert ist. Das Koaxialkabel ist am Ende über den  $50\ \Omega$ -Eingang eines Messempfängers abgeschlossen. Analog könnte das andere Ende des Flachleiters mit einem Koaxialkabel verbunden werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Ende dieses Koaxialkabels ebenfalls abgeschlossen ist, weil sonst an dieser Stelle Reflexionen auftreten.

Wird das zweite Koaxialkabel an den Mitlaufgenerator des Messempfängers angeschlossen, ist eine Überprüfung von EMV-Dichtungen möglich, wie dies in der Literatur beschrieben ist [2][7].

In Bild 5 geschieht der reflexionsfreie Abschluss der anderen Seite des Flachleiters über einen Abschlusswiderstand. Dieser ist zwischen dem Flachleiter und der zweiten Flächenelektrode geschaltet, die ihrerseits kapazitiv an die Metallwand angekoppelt ist.

Vorteil dieser Anordnung - im Vergleich zu klassischen Nahfeldsonden - ist die Anpassung über einen weiten Frequenzbereich. Nach unten ist dieser Frequenzbereich durch die Kopplungskapazität der Flächenelektroden begrenzt und nach oben durch den nichtidealen Übergang der Striplinestruktur auf das Koaxialkabel. Durch den reflexionsfreien Abschluss kann der Flächenleiter als eine Rahmenantenne mit einer Windung aufgefasst werden, die sich im Unendlichen schließt. Deshalb ist eine größere Aufnahme des magnetischen Feldes zu erwarten, als dies mit einer Rahmenantenne möglich ist. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass der Abstand  $r$  sowie der Winkel  $\vartheta$  aus Bild 2 fest vorgegeben sind, was die Reproduzierbarkeit der Messungen erhöht.



**Bild 5: Striplinestruktur über einem Schlitz**

## 6. Vergleich Striplinestruktur mit Rahmenantenne

### 6.1. Erzeugung der Störstrahlung

Für die Bestimmung der Empfangscharakteristiken ist sowohl eine elektrische als auch eine magnetische Störquelle notwendig, die ein möglichst kontinuierliches Störspektrum erzeugt. Diese werden zusammen mit der Stromversorgung im Gehäuse untergebracht, um Fehlmessungen aufgrund der Zuleitungen auszuschließen.

Als elektrische Störquelle kam ein Sender (Bild 6) mit einer 8 cm langen Stabantenne zum Einsatz, der kontinuierlich innerhalb von 30 ms einen Frequenzsweep von 80 MHz bis 1 GHz durchführt, mit Ausnahme eines kleinen Frequenzbereichs um 200 MHz. Das abgestrahlte Feld wird mit zunehmender Frequenz größer (Bild 9), was von der kurzen Antenne herrührt.

Die magnetische Störquelle wurde mit Hilfe eines umgebauten Anzeigergeräts realisiert (Bild 7). Dabei wurde der Beleuchtungskreis so verändert, dass er

mit der Gate-Source-Kapazität des ansteuernden Feldeffekt-Transistors einen Schwingkreis bildet, der seine Grundschwingung bei 70 MHz hat. In Bild 8 ist das PWM-Signal der Beleuchtung gezeigt, wobei deutlich die HF-Schwingungen auf den Flanken erkennbar sind. Die Oberschwingungen reichen bis in den GHz-Bereich. Obwohl damit kein kontinuierliches Frequenzspektrum erzeugt wird (Bild 9), sind genügend Stützstellen für eine Einschätzung der Nahfeld-Sensoren vorhanden.

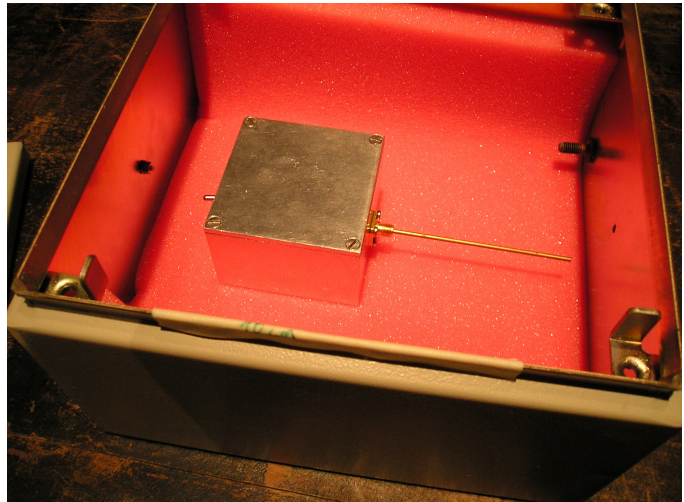


Bild 6: Sender mit Stabantenne im Gehäuse



Bild 7: Anzeigergerät mit Akkupack

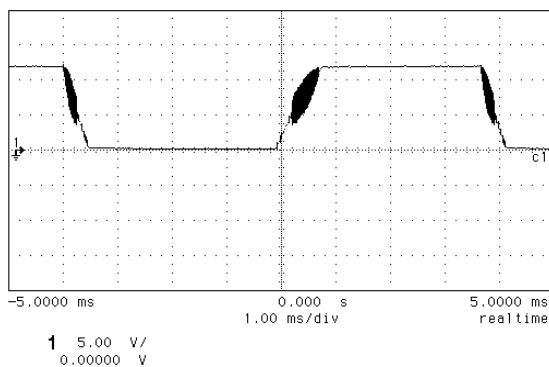


Bild 8: PWM-Signal im Beleuchtungskreis

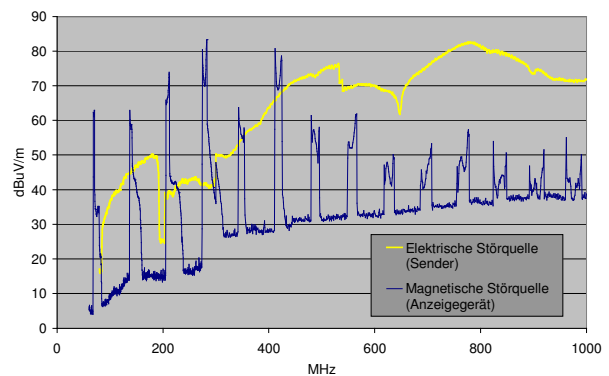


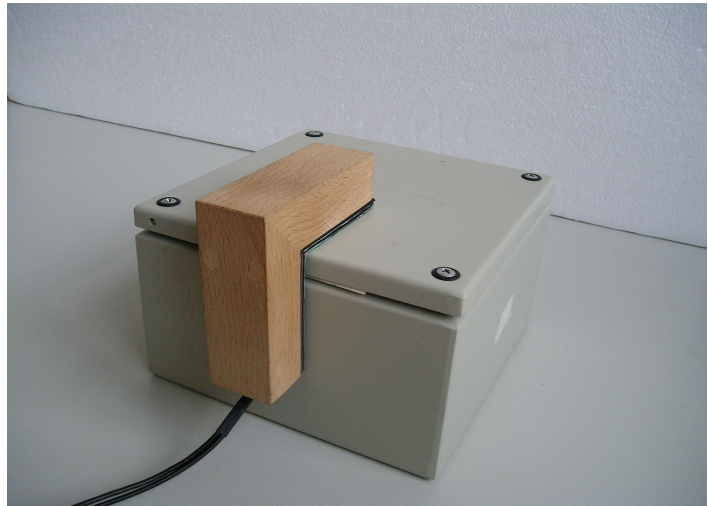
Bild 9: Abstrahlungsspektren der Störquellen

## 6.2. Messung am Metallgehäuse

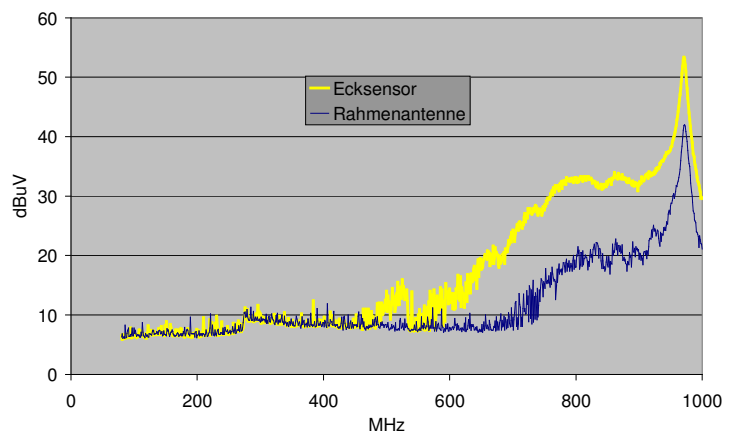
Bild 10 zeigt die Messung an einem Metallgehäuse mit dem vorgestellten Sensor, der in diesem Fall über Eck ausgeführt ist. Das Gehäuse hat am Deckel eine umlaufende EMV-Dichtung, deren Funktion an einer Seite gezielt durch ein 10 cm langes nichtleitendes Klebeband beeinträchtigt ist. In Bild 11 sind die aufgenommenen Störspektren dargestellt, wenn sich die elektrische Störquelle im Gehäuse befindet. Deutlich ist die höhere Empfindlichkeit des Eckensors im Vergleich zur Rahmenantenne zu erkennen.

Beide Sensoren erfassen bei 974 MHz die Schlitzresonanz, die man eigentlich für einen 10 cm langen Schlitz erst bei 1,5 GHz vermuten würde. Erklärbar ist dies zum einen durch die Breite des Schlitzes, der zur Verringerung der Resonanzfrequenz führt [9] und zum anderen durch die Begrenzung des Schlitzes mit EMV-Dichtungen, die nicht die Leitfähigkeit von Metallen aufweisen und deshalb den Schlitz praktisch verlängern.

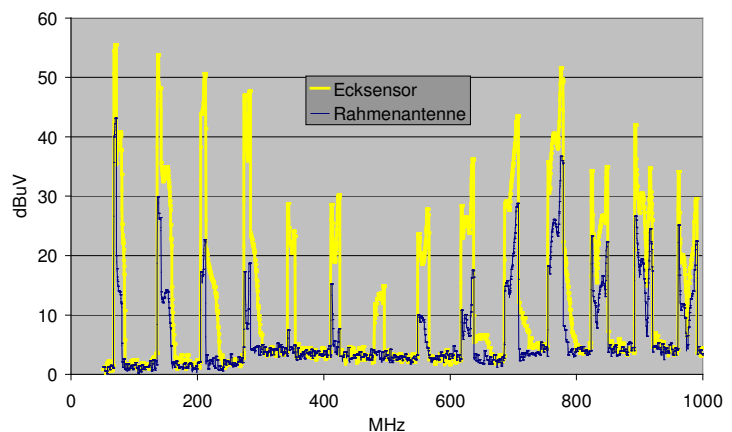
Bild 12 zeigt die Störspektren für die Anregung mit der magnetischen Quelle. Auch hier ist eine höhere Empfindlichkeit des Eckensors gegenüber der Rahmenantenne zu erkennen. Nicht bestimmbar ist die Schlitzresonanz, weil dafür das anregende Frequenzspektrum zu große Lücken aufweist.



**Bild 10: Neuer Sensor am Gehäuse**



**Bild 11: Spektren von Rahmenantenne und Ecksensor bei elektrischer Störquelle**



**Bild 12: Spektren von Rahmenantenne und Ecksensor bei magnetischer Störquelle**

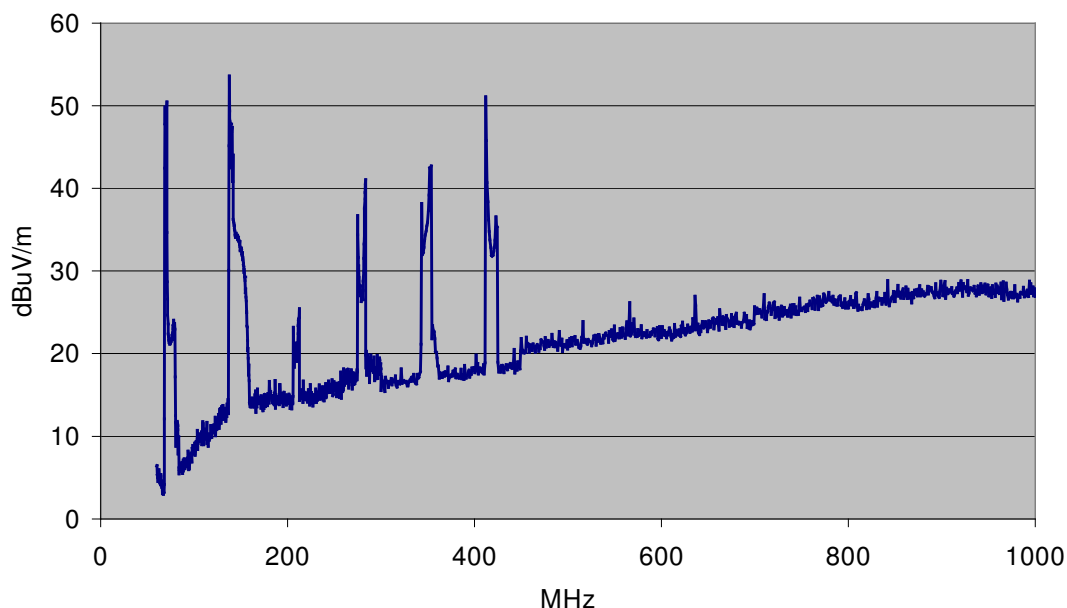
### 6.3. Vergleich mit genormten Abstrahlungsmessverfahren

Um unabhängig von äußeren Störereinflüssen zu sein, werden Abstrahlungsmessungen in der Regel in einer Absorberhalle durchgeführt, was deshalb sehr aufwändig ist. Der Antennenabstand beträgt für Messungen für die CE-Zertifizierung z.B. nach EN 55011 [1] 10 m und für Komponentenmessungen im Automobil z.B. nach CISPR 25 [4] 1 m. Die Empfangsantenne befindet sich dabei für den 10 m-Abstand ab 4,8 MHz und für den 1 m-Abstand ab 48 MHz im Fernfeld, wenn die Abschätzung des Fernfeldes [6]

$$r > \lambda_0 / 2\pi$$

zugrunde gelegt wird. Für diese Frequenzbereiche ist der direkte Vergleich zu Nahfeldmessungen nicht möglich, weil im Nahfeld elektrische oder magnetische Blindfelder existieren, die von den jeweiligen Feldsonden unterschiedlich aufgenommen werden. In Bild 13 ist das Messergebnis für 1 m-Messabstand nach CISPR 25 dargestellt, wobei sich im Gehäuse aus Bild 10 die magnetische Störquelle befand (Anzeigegerät) und die Fehlstelle in Richtung der Empfangsantenne zeigte.

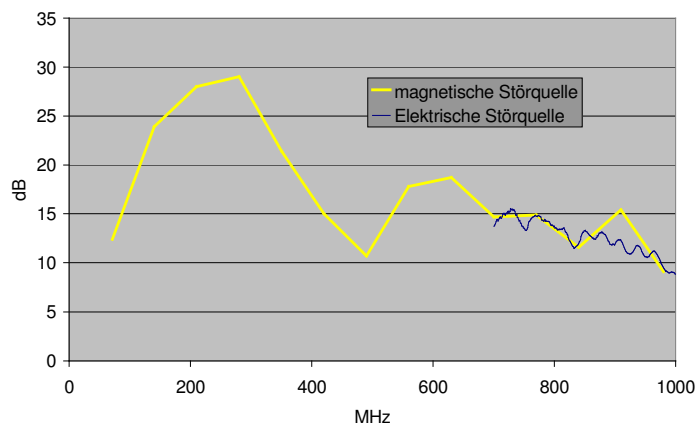
Ab ca. 500 MHz gehen die erzeugten Peaks nahezu im Rauschpegel unter. Aufgrund der Nähe der elektronischen Geräte im Automobil sind teilweise Grenzwerte erforderlich, die unter dem in Bild 13 gezeigten Rauschpegel liegen. Dann muss mit kleinerer Bandbreite gemessen werden, was zu einer drastischen Erhöhung der Messzeit führt. Mit beiden Nahfeldsensoren sind diese Störer deutlich zu sehen (Bild 12) wodurch eine EMV-Optimierung mit Nahfeldsonden zwei Vorteile hat. Erstens kann außerhalb einer Absorberkammer gemessen werden. Zweitens eine Zeitreduzierung, weil eine größere Messbandbreite gewählt werden kann. Außerdem sind im Automobil viele Beeinflussungen sowieso im direkten Nahbereich, weshalb sich Nahfeldsonden für EMV-Optimierungen gut eignen.



**Bild 13: Abstrahlspektrum für Anzeigegerät im Gehäuse mit Fehlstelle**

## 7. Relative Empfindlichkeit

Bild 14 zeigt die aus den Messwerten berechnete Steigerung der Empfindlichkeit beim Einsatz der vorgeschlagenen Nahfeldsonde im Vergleich zur Rahmenantenne. Bei der Anregung mit der magnetischen Störquelle wurde die Kurve bei den Stützstellen ermittelt. Bei Anregung mit der elektrischen Störquelle kann eine Aussage nur über 700 MHz getroffen werden, weil erst ab dieser Frequenz die Pegel beider Sensoren über dem Rauschpegel liegen (siehe Bild 11).



**Bild 14: Steigerung der Empfindlichkeit des Ecksensors im Vergleich zur Rahmenantenne**

## 8. Zusammenfassung

Die Abstrahlung bei elektronischen Systemen in geschirmten Gehäusen geschieht vor allem durch die Verbindungsstellen. Diese wirken als Schlitzstrahler und erzeugen ein magnetisches Nahfeld. Deshalb sind Rahmenantennen besonders geeignet, diese Felder zu messen. Schwierig dabei ist, dass die erfassten Pegel eine große Abhängigkeit von der Position der Sensoren aufweisen, was die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse in Frage stellt. Vorgestellt wurde ein neuer Sensor, der eine festgelegte Position am Gehäuse hat, was eine einfache Wiederholbarkeit der Messungen mit sich bringt und deshalb besonders für EMV-Optimierungen dienlich ist.

Nahfeldsensoren unterscheiden sich in der Empfindlichkeit und dem Frequenzgang, deshalb ist für jede Messaufgabe der optimale Sensor auszuwählen. Der vorgeschlagene Sensor ist eine Ergänzung zu den bestehenden Nahfeldsonden und eignet sich vor allem für Messungen an Metallgehäusen.

### Literatur

- [1] DIN EN 55011:2000-05, Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte), Funkstörungen – Grenzwerte und Meßverfahren, Beuth-Verlag, Berlin
- [2] Europäische Patentschrift: EP 1 248 508 B1, Verfahren, Anordnung und Sensor zum Prüfen der HF-Dichtigkeit eines Übergangs zwischen zwei aneinandergrenzenden Teilen
- [3] Habiger, E.; Sidhu, A.; Blasek, G.: Metallisieren von Kunststoffgehäusen unter EMV-, Umwelt- und Recyclingaspekten, Leuze Verlag
- [4] IEC CISPR 25, Funk-Entstörung zum Schutz von Empfängern in Fahrzeugen, Booten und Geräten – Grenzwerte und Messverfahren, Beuth-Verlag, Berlin
- [5] Kaden, H.: Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1959
- [6] Meinke, Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag, Berlin, 5. Auflage
- [7] Reiser, P.: Messverfahren zur Wartung von geschirmten Gehäusen, EMV2002, VDE-Verlag
- [8] Reiser, P.: Sensor für HF-Strahlung, Deutsche Patentanmeldung, 10 2005 011 505.5-35
- [9] Rothammel, K.: Antennenbuch, Deutscher Militärverlag, Berlin, 7. Auflage