

Bo© Dräxlmaier

AUTOREN



Oliver Druhm

ist Teamleiter Konzeptentwicklung Bordnetze bei der Dräxlmaier Group in Vilsbiburg.



Michael Wortberg

ist Technologiestrategie bei der Dräxlmaier Group in Vilsbiburg.



Dr. Martin Gall

ist CTO der Dräxlmaier Group in Vilsbiburg.



Georg Scheidhammer

leitet das Ressort Strategie & Innovationen der Entwicklung bei der Dräxlmaier Group in Vilsbiburg.

NEUERUNGEN BEI DER FAHRZEUGKONSTRUKTION

Unbestreitbar bestimmt das autonome Fahren die Zukunft des Automobils. Dies liegt unter anderem am Wunsch der Kunden nach mehr Mobilität sowie den damit verbundenen Möglichkeiten, Individualität zu leben. Durch den hohen Grad der Automatisierung erhöhen sich aber zugleich die Sicherheitsanforderungen, weshalb Fahrzeuge zunehmend unter den Rahmenbedingungen der ISO 26262:2011 entwickelt werden.

Auch Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit führen zu Veränderungen bei der Automobilkonstruktion: Um Emissionen zu reduzieren, ist Leichtbau zu einem noch wichtigeren

Einflüsse der EMV auf die Bordnetzkonfiguration

Durch die gestiegenen funktionalen Sicherheitsanforderungen sowie den Einsatz neuer Materialien steht die Bordnetzentwicklung vor neuen konstruktiven Aufgaben. Doch wie kann diesen am besten begegnet werden? Dräxlmaier zeigt anhand aktueller Erkenntnisse mögliche Lösungsansätze auf.



Thema geworden, als es in der Vergangenheit ohnehin schon war. In Bezug auf die Bordnetzkonzeption ist dies jedoch der entscheidende Faktor: Da die neu eingesetzten Materialien im Karosseriebau nicht leitend sind und zudem keine abschirmenden Eigenschaften mehr haben, können sie sich nicht positiv auf die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) auswirken. Gerade die fehlende Leitfähigkeit führt in Bezug auf die Masseverteilung im Fahrzeug zu einer Schwäche in der konstruktiven Verfügbarkeit. Neue Massekonzepte sind daher unausweichlich.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf den Menschen stellen sich ebenfalls neue Herausforderungen. Diesem Thema widmet sich die ICNIRP (International Com-

mission on Non-Ionizing Radiation Protection), die Richtlinien für die zulässige elektromagnetische Feldausbreitung vorgibt. Durch die Übernahme in gesetzliche Vorschriften sind diese vielerorts verpflichtend einzuhalten.

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass die Sicherheit sowie die Umweltverträglichkeit eines Fahrzeugs eng mit dessen EMV in Verbindung stehen. Die Berücksichtigung dieser Faktoren gewinnt also für die gesamte Bordnetzauslegung an Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen gemäß der ISO 26262:2011 und der ICNIRP. Dieser Artikel wird daher den Fokus auf die Ausbreitung elektromagnetischer Felder sowie die Anwendung der ICNIRP-Richtlinien legen.

Interessant im Rahmen dieser Betrachtungen sind insbesondere dynamische Lasten, da sie Ströme verursachen, die wiederum wechselnde Magnetfelder erzeugen: Elektrische Fahrwerksfunktionen, geschaltete elektrische Heizlasten und die 48-V-Rekuperation mit Spitzenströmen über 600 A sind sowohl bezüglich ihrer Stromstärke als auch ihrer Dynamik eine Herausforderung für Bordnetzentwickler, da sich die daraus resultierenden Magnetfelder auf die Fahrzeuginsassen, aber auch auf Komponenten, wie beispielsweise Steuergeräte, auswirken.

Wie bereits angesprochen, wird sich durch den neuen Materialverbund auch

die Masseverteilung ändern. Dies führt dazu, dass das Verhalten der Stromausbreitung über die Masse immer schwerer vorherzusagen ist. Die Ausbildung von Magnetfeldern kann somit an unerwarteten Stellen im Fahrzeug auftreten.

Welche konstruktiven Lösungsansätze und Schutzmaßnahmen müssen beim Bordnetz der Zukunft berücksichtigt werden, um die neuen Herausforderungen erfolgreich zu meistern?

VERANSCHAULICHUNG DER FELDAUSBREITUNG

Zunächst ist es wichtig, ein Verständnis für das Stromverhalten und die damit einhergehende elektromagnetische Ausprägung zu entwickeln. Zwar sind Magnetfelder nicht sichtbar, durch Simulationen der Feldausbreitung können deren Auswirkungen jedoch sehr gut visualisiert und ausgewertet werden.

Die im Folgenden beschriebenen Betrachtungen am Modell setzen auf eine vereinfachte Darstellung, um die Simulation beherrschbar zu halten. Zum Einsatz kommen ein Bodenblech aus Stahl sowie eines aus Aluminium mit einer Stärke von jeweils 2 mm. Um darzustellen, wie sich der Strom ausbreitet, wurde eine Versorgungsleitung für ein fiktives Steuergerät (SG) modelliert, **BILD 1** (gelb). Die Einspeisung erfolgt am Punkt (+). Das Steuergerät ist vor Ort

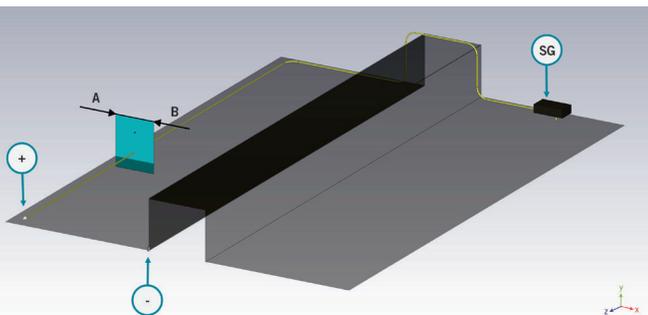


BILD 1 Schematische Darstellung des Simulationsaufbaus: (+) B+, (-) Masse, (SG) Steuergerät, Schnitt AB (Ebene für weitere Betrachtungen) © Dräxlmaier

mit dem Blech verbunden, das als Masse für die Stromrückführung dient. Der Masseabgriff erfolgt am Punkt (-). Nun ist der Stromkreis geschlossen. Zwischen den Punkten (+) und (-) können sich Stromquellen, wie zum Beispiel eine Batterie oder ein Generator, befinden. Die türkisfarbene Fläche zwischen A und B markiert die Schnittfläche, an der später verschiedene Leiteranordnungen hinsichtlich ihrer EMV betrachtet werden. An jedem Punkt wird die magnetische Flussdichte bei den für die ICNIRP relevanten Frequenzen (1, 10, 100, 500, 1k, 2k, 4k, 10k Hz) mittig über der Leiteranordnung berechnet, und zwar in einem Abstand von 50 mm zur Bodenblech-Oberkante. Die gewählte Stromstärke beträgt grundsätzlich 100 A. Die wichtigsten Fälle werden im Folgenden bildhaft dargestellt.

Zunächst jedoch ein Blick auf die Stromausbreitung: Hier zeigt sich ein interessantes, letztendlich aber nicht überraschendes Ergebnis: Mit steigender Frequenz nimmt der zum Masseanschluss über das Blech zurückfließende

Strom immer deutlicher den Weg entlang der zuführenden Leitung. Dies ist in **BILD 2** sehr gut anhand der zunehmend unterhalb der Leitung fokussierten Stromdichte erkennbar. Interessant ist auch das unterschiedliche Verhalten von Stahl und Aluminium – bei Letzterem bindet sich der Strom durch die fehlende magnetische Permeabilität sowie die bessere Leitfähigkeit viel schneller an die Leitungsführung.

Wie bereits erwähnt, birgt der Materialmix, wie er in modernen Fahrzeugen verbaut ist, zusätzliche Herausforderungen. Um dies zu simulieren, wurden Störstellen in das Aluminiumblech eingebracht, welche einen Widerstand von 1Ω besitzen. Wie in **BILD 3** zu erkennen ist, führt dies dazu, dass der Strom einen Umweg über die Anteile mit geringerem Widerstand wählt, sonst aber immer bestrebt ist, möglichst unterhalb der eigentlichen Leitung zu bleiben. Die magnetischen Felder spannen sich zwischen dem Hin- und Rückleiter umso weiter auf, je weiter die beiden Wege voneinander entfernt sind. Daraus lässt

sich leicht ableiten, dass jede Störstelle in der Karosserie zu EMV-Problemen führen kann, da sich gerade dort weit gespannte magnetische Felder bilden können. Diese lassen sich zwar nicht vermeiden, sie werden aber durch konstruktive Maßnahmen beeinflusst – leider nicht immer zum Positiven.

AUSWIRKUNGEN DER LEITERFORM

Es stellt sich nun die Frage, wie eine derartige Situation in den Griff zu bekommen ist. Hierzu wurden verschiedene Leiteranordnungen bei einer Frequenz von 1 kHz überprüft, darunter ein Einzelrundleiter, ein Doppelrundleiter, eine Einzelschiene sowie eine Doppelschiene. Die Leiter sind dabei jeweils über einem Bodenblech aus Stahl oder Aluminium montiert.

Ein erster interessanter Aspekt lässt sich schon aus der Betrachtung eines Rundleiters erkennen: Aluminium hat gegenüber Stahl bei der Optimierung der EMV Vorteile, da die magnetische Feldausbreitung wesentlich stärker zwischen dem Leiter und dem Blech fokussiert ist. Dies war aufgrund der vorherigen Stromdichtebetrachtungen durchaus zu erwarten. **BILD 4** kann entnommen werden, dass das Feld dennoch verhältnismäßig groß ist. Kommt eine Einzelschiene anstelle eines Rundleiters zum Einsatz, kann die Feldausbreitung noch etwas reduziert werden. Der konstruktiven Auslegung des Leiters wird somit eine wichtige Rolle hinsichtlich der EMV zuteil. Doch welche Maßnahmen können darüber hinaus ergriffen werden, um das Feld einzudämmen und gegebenen-

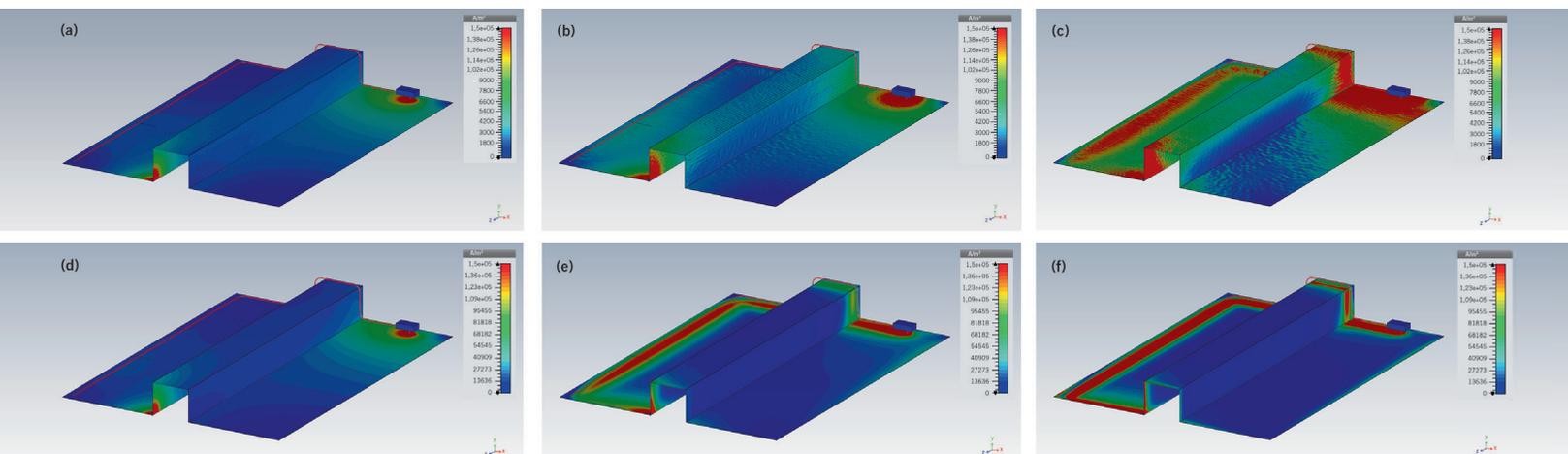


BILD 2 Stromdichte bei 5/50/200 Hz (oben Stahl/unten Aluminium) © Dräxlmaier

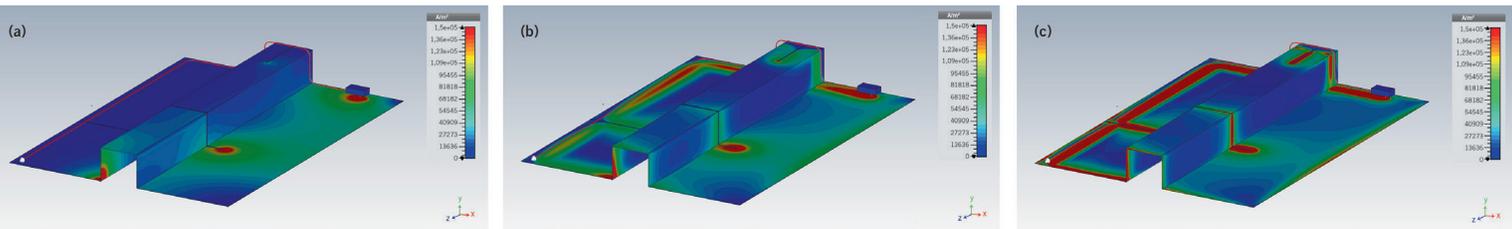


BILD 3 Stromdichte bei 5/50/200 Hz in einem Aluminiumblech mit Störstellen (© Dräxlmaier)

falls sogar Störstellen im Karosserieaufbau zu überbrücken?

NUTZEN EINER DOPPELSCHIENE

Vorteilhaft ist eine möglichst parallel geführte Versorgung für B+ und Masse. Zwei konstruktive Möglichkeiten wurden diesbezüglich simuliert: die Ausführung als Doppelrundleiter und als Doppelschiene, **BILD 5**. Beide Formen benötigen keine Masserrückführung über das Blech. Beim Doppelrundleiter ist bereits eine klare Reduktion des elektromagnetischen Felds zu erkennen, da dieses weitestgehend lokal um die beiden Leiter fokussiert ist. Die besten Feldeigenschaften weist aber eine Doppelschiene auf. Bei dieser Bauform fällt die Ausdehnung des Feldes extrem gering aus, weshalb sie sich auch für die Verlegung im Innenraum eignet. Die ICNIRP-Grenzwerte werden dabei eingehalten.

INHALT DER ICNIRP-RICHTLINIEN

Es gibt also konstruktive Möglichkeiten, die Ströme und somit die Magnetfelder, welche auf Insassen und Komponenten im Fahrzeug einwirken können, positiv zu beeinflussen. Dies ist nicht nur für die Funktion des Fahrzeugs von Bedeutung, sondern auch für dessen Insassen. Da die Reizübermittlung im menschlichen Körper über elektrische Ströme erfolgt, kann der Aufenthalt in magneti-

schen Feldern eine Auswirkung auf den Organismus haben. Die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection hat deshalb eine Richtlinie mit Grenzwerten herausgebracht: Die „ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)“ [1] beschreiben qualitativ die möglichen Auswirkungen von magnetischen und elektrischen Feldern im Frequenzbereich bis 100 kHz und geben Grenzwerte sowohl für Personen an, die ihnen beruflich ausgesetzt sind, als auch für Personen, die sich privat in ihnen bewegen. Zu Letzteren zählen beispielsweise Fahrzeuginsassen. Die Richtlinie, welche 1998 erstmals erschien und im Jahr 2010 mit zum Teil heraufgesetzten Grenzwerten neu aufgelegt wurde, ist insbesondere für Magnetfelder im industriellen und öffentlichen Umfeld konzipiert, wird aber im Automotive-Bereich in Form der strengeren ICNIRP-Richtlinie von 1998 ebenfalls umgesetzt. **BILD 6** zeigt die ICNIRP-Grenzwerte der magnetischen Flussdichte B in Tesla in Abhängigkeit der Frequenz für beide Fassungen. Bei quasi statischen Magnetfeldern wird mit 40 mT ein höherer Grenzwert vorgegeben, der mit steigender Frequenz bis auf 6,25 μ T absinkt (ICNIRP 1998).

Wie bereits oben beschrieben, geht im Automobil die magnetische Feldwirkung von stromdurchflossenen Leitungen aus. Da die Lastströme typischerweise sehr

dynamisch sind, ergeben sich viele transiente Lastübergänge.

MESSVERFAHREN IM AUTOMOTIVE-UMFELD

Die auftretenden Magnetfelder werden in der Automobilindustrie im Rahmen der Fahrzeug-Validierung mit einem standardisierten Messinstrument erfasst. Dieses zeigt direkt das Verhältnis des Messwerts zur laut ICNIRP maximal zulässigen Magnetfeldstärke in Prozent an. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Messungen erst an einem bereits umgesetzten Fahrzeugkonzept erfolgen können. Dies ist zum einen sehr kostenintensiv, zum anderen nehmen der Aufbau sowie die Vorbereitung des Prototyps viel Zeit in Anspruch. Hinzu kommt, dass auch die Messungen selbst sehr zeitintensiv sind. Erst müssen die jeweils vorgegebenen Fahrzeugbetriebszustände eingestellt werden, dann wird die Messsonde reihum an den einzelnen Messpunkten im Fahrzeug platziert. Nun kann man den Messwert in Prozent des ICNIRP-Grenzwerts ablesen und dokumentieren, wobei sichergestellt werden muss, dass der maximale Messwert im Bereich des Messpunkts ermittelt wird. Zudem ist es nötig, alle Maximalwerte zu dokumentieren. An einem einzelnen Sitzplatz gibt es bereits 13 Messpunkte, an denen jeweils zwei Messungen von jeweils 30 s durchzuführen sind. Geht

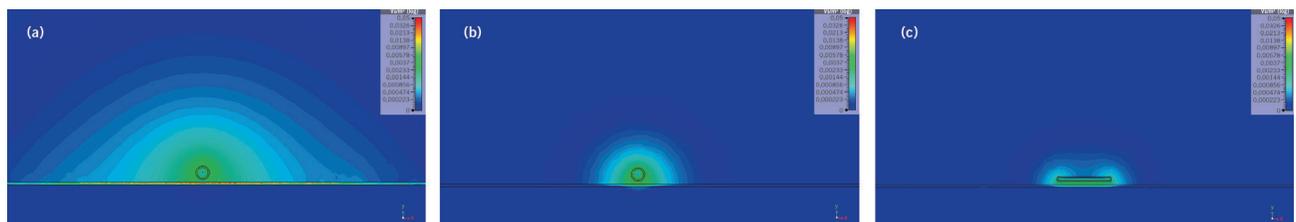


BILD 4 Feldausbreitung bei runden Einzelleitern über Stahl- und Aluminiumblech sowie bei einem Einzelfachleiter über Aluminiumblech bei jeweils 1 kHz (v. l. n. r.) (© Dräxlmaier)

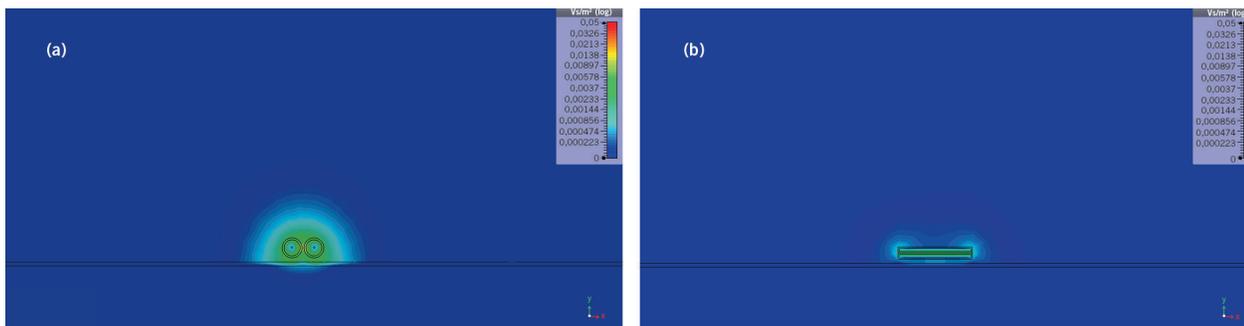


BILD 5 Feldausbreitung bei 1 kHz bei einem Doppellrundleiter und einer Doppelschiene (© Dräxlmaier)

man von vier Sitzplätzen aus, führt dies zu einer reinen Messzeit von 52 min. Da sich in einem Fahrzeug noch viele weitere Messpunkte befinden, ergibt sich, wie bereits angeführt, ein beträchtlicher Zeitaufwand für alle notwendigen Tests.

Die Zielsetzung muss sein, bereits im Vorfeld eine analytische Aussage darüber treffen zu können, ob ein Energiebordnetz potenziell zu Problemen hinsichtlich der emittierten Magnetfelder führt. Dabei setzen sich diese aus einem Kontinuum von unterschiedlichen Frequenzanteilen zusammen. Wichtig für das Verständnis der ICNIRP-Richtlinie ist es, dass die einzelnen Frequenzanteile additiv eingerechnet werden. Berechnet wird der Grenzwert in Prozent durch die Aufsummierung der Quotienten aus dem jeweiligen Frequenzanteil und dem für diesen geltenden Grenzwert:

$$GI. 1 \quad ICNIRP\% = \sum \frac{B(f)}{B_{Grenz(f)}} \times \cos \varphi$$

Diese Beziehung ist nichts anderes als die inverse Fourier-Transformation der mit dem Grenzwert gewichteten magneti-

schen Flussanteile. Ist die Übertragungsfunktion $I(f)$ nach $B(f)$ sowie das zeitliche Profil des Stromes $I(t)$ bekannt, so kann der zu erwartende Anteil des Grenzwertes in Prozent berechnet werden.

VERGLEICH DER ICNIRP-GRENZWERTE

Ein Beispiel verdeutlicht an dieser Stelle noch einmal die Unterschiede der beiden ICNIRP-Fassungen von 1998 und 2010. In **BILD 7** ist der Anteil der erlaubten Magnetfeldbelastung (in % der maximal erlaubten Belastung) für die Zuleitung zu einer Last aufgetragen, die bei 0,55 s eine kurze Stromspitze aufweist. Die Magnetfeldbelastung, welche mit der Sonde Narda ELT 400 (ICNIRP 2010) gemessen wurde, ist in **BILD 7** als ICNIRP%(t) aufgezeichnet (grün).

Die Belastung liegt im Mittel bei 3 % der erlaubten Belastung nach ICNIRP 2010 mit Transienten bis 9 % der erlaubten Belastung. Um daraus die Grenzwerte nach ICNIRP 1998 ableiten zu können, wird das Signal in den entsprechen-

den Frequenzbereich transformiert, die Grenzwerte werden umgewichtet und das Ergebnis wird zurücktransformiert. Das Resultat ist in **BILD 7** blau dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Transienten erheblich verstärkt werden. Zieht man einen Vergleich mit den ICNIRP%-Messwerten, die direkt von einer 1998er-Sonde stammen, so fällt auf, dass die Ausgabedaten dieser Sonde nochmals um bis zu 30 % höher liegen, als sich aus der Umrechnung ergibt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die nach dem älteren ICNIRP-Standard messende Sonde Rauschen erheblich verstärkt.

BESONDERHEITEN DER MESSUNG

Beim Einsatz der ICNIRP im Automotive-Umfeld sind mehrere Besonderheiten zu beachten. So zeigt sich bei einer Auswertung nach den ICNIRP-1998-Standards eine ausgeprägte Sensitivität bezüglich Strom-Transienten. Da die zur ICNIRP-Messung verwendete Sonde eine Schleppeizer-Max-Hold-Funktion aufweist, führen kurze Nadelspitzen wie in **BILD 7** in Verbindung mit einem singulären Transienten bereits zu einer Grenzwertüberschreitung (ICNIRP > 100 %). Ob der Grenzwert dauerhaft überschritten oder nur durch einen singulären Schalttransienten verursacht wird, lässt sich nicht unterscheiden. Zudem ist das Ergebnis sehr stark vom Lastszenario bei der Messung abhängig und insbesondere davon, ob sich zufällig Lasttransienten überlagern.

Es bleibt festzuhalten, dass die ICNIRP-Messung mit den Grenzwerten der 1998er-Norm im Automotive-Umfeld anzuwenden ist. Interpretationsmöglichkeiten bestehen aber bezüglich des Messszenarios und der tatsächlichen Auswirkung singulärer Transienten.

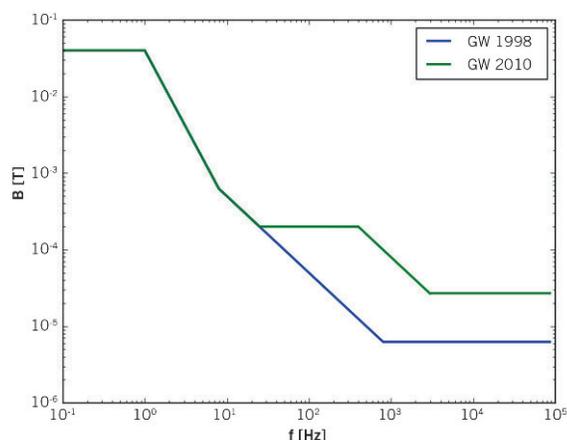


BILD 6 ICNIRP-Grenzwerte der magnetischen Flussdichte B in Tesla in Abhängigkeit der Frequenz für beide Fassungen der Richtlinie (1998/2010) (© Dräxlmaier)

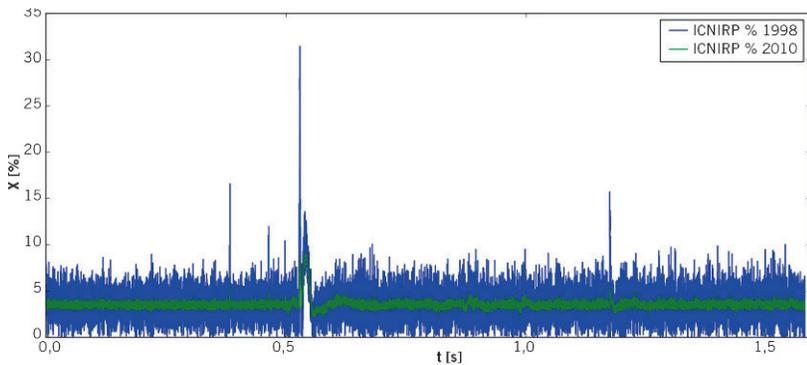


BILD 7 Vergleich von Messwerten nach ICNIRP 1998 und 2010 (© Dräxlmaier)

FLEXIBILITÄT DURCH SIMULATION

Aufgrund des Wandels in der Fahrzeugkonstruktion, insbesondere durch den Leichtbau zur Emissionsreduzierung, ist die elektromagnetische Verträglichkeit zu einem bestimmenden Thema geworden. Die zukünftigen Bordnetzkonzepte werden durch äußere Faktoren mehr als bisher beeinflusst. Dynamische Lasten durch neue Funktionen erzeugen immer mehr Stromflüsse im Bordnetz, die sich zudem ständig verändern. Da es besonders zeitintensiv ist, Messungen an einem bereits umgesetzten Fahrzeugkonzept durchzuführen – eine aussagekräftige Betrachtung der Magnetfeldausbreitung zugleich aber notwendig ist –, bieten sich Simulationen an. Nur wenn diese rechtzeitig durchgeführt werden, kann ein Bordnetzkonzept in einem frühen Stadium der Entwicklung noch angepasst werden. Dies spart gegenüber der erst später einsetzbaren Möglichkeit einer intensiven Messung nicht nur Kosten, sondern verschafft Entwicklern zugleich ein hohes Maß an Flexibilität in der Bordnetzkonzeption.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG

Die verwendeten Materialien, die Karoseriestructur und das Bordnetz können nie alleine betrachtet werden. Sie stehen vielmehr in einer engen Beziehung zueinander, was anhand der genannten Beispiele verdeutlicht werden konnte. Es spielt eine Rolle, ob Stahl oder Aluminium zum Einsatz kommt, wo Störstellen in der Karosserie vorhanden sind und an welcher Position der Leitungssatz verlegt wurde. Hinzu kommen die konstruktive Auslegung der B+-Versorgung sowie das Massekonzept. Auch ist die Form der Leiter von Bedeutung, da schon ein einzelner, möglichst flacher Leiter im

Vorteil gegenüber einem Rundleiter ist.

Eine weitere Maßnahme, um das Feld einzudämmen und gegebenenfalls sogar Störstellen im Karosserieaufbau zu überbrücken, liegt in einer möglichst parallel geführten Versorgung für B+ und Masse. Hierbei erweist sich eine in zwei Lagen geführte, möglichst flache Schiene – also eine Doppelschiene – als zielführend. Ihre sehr guten Feldeigenschaften sorgen für eine derart geringe Feldeausbreitung, dass sich diese Bauform sogar im Rahmen der ICNIRP für die Innenraumverlegung eignet. An dieser Stelle sollte allerdings noch angemerkt werden, dass die korrekte Anwendung der ICNIRP durchaus anspruchsvoll und weiterhin Gegenstand von Diskussionen ist. Von besonderer Bedeutung ist es daher, dass der Umgang mit Messergebnissen immer auch einer Plausibilitätsprüfung bedarf.

Nun gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse zu vertiefen. Hierzu müssen weiterführende Untersuchungen und Simulationen angestoßen werden, welche anschließend mit Messaufbauten zu überprüfen sind. Die Herangehensweise von Dräxlmaier ist es dabei, bereits frühzeitig, gemeinsam mit den Automobilherstellern, die Fahrzeug- und Bordnetzkonzeption abzustimmen, sodass am Ende des Prozesses eine optimierte elektromagnetische Verträglichkeit steht.

LITERATURHINWEISE

[1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (Hrsg.): ICNIRP Guidelines for limiting exposure to Time-varying electric and magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). 2010. Online: <http://www.icnirp.org/en/frequencies/low-frequency/index.html>. Aufgerufen am 27.04.2017



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelektronik-worldwide.com

You CAN get it...

Hardware und Software für CAN-Bus-Anwendungen...



PCAN-Diag FD

NEU

Diagnose eines CAN-FD- oder CAN 2.0-Busses auf physikalischer und Protokoll-Ebene ■ 2-Kanal-Oszilloskop ■ Aufzeichnung und Wiedergabe ■ Messung der Bitrate, Buslast und Terminierung

1290 €



PCAN-USB X6

Sechskanal-CAN-FD-Interfaces für den USB-Port mit Datenübertragungsraten bis 12 Mbit/s. Auslieferung mit D-Sub- oder M12-Anschlüssen inkl. Software & APIs.

ab 735 €



PCAN-Explorer 6

Professionelle Windows-Software zur Überwachung, Steuerung und Simulation von CAN-FD- und CAN 2.0-Bussen ■ Aufzeichnung und Wiedergabe ■ Automatisierung mit VBScript und Makros ■ Symbolische Nachrichtendarstellung

ab 510 €

Alle Preise verstehen sich zzgl. MwSt., Porto und Verpackung. Irrtümer und technische Änderungen vorbehalten.

www.peak-system.com

PEAK
System

Otto-Röhm-Str. 69
64293 Darmstadt
Tel.: +49 6151 8173-20
Fax: +49 6151 8173-29
info@peak-system.com