



Bei einem feldgebundenen Test auf elektromagnetische Verträglichkeit wird innerhalb einer Halbabsorberkammer mit leitfähigem Boden ein technisches System mittels Antennen elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt und sein Betriebszustand beobachtet. Umgekehrt ist es auch möglich, Störaussendungen des Systems zu messen.

AVMZ, Otto-von-Guericke-Universität, Lehrstuhl für EMV

## ANGEWANDTE PHYSIK

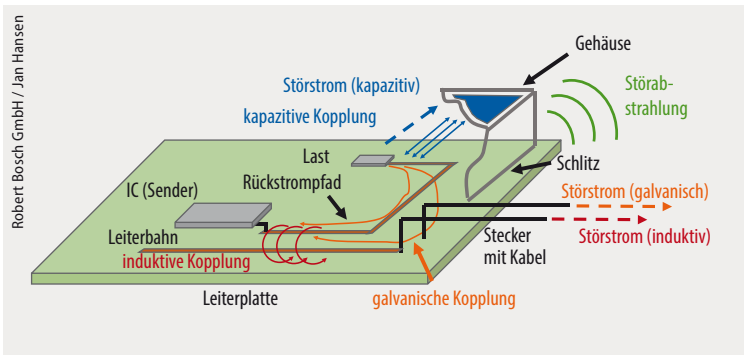
# Auf die Verträglichkeit kommt es an

Von der Kunst, elektromagnetische Felder und Wellen zu kontrollieren

Frank Gronwald, Jan Hansen, Christian Karch, Christian Schuster und Matthias Tröscher

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist ein Gebiet der Elektro- und Informationstechnik, das darauf abzielt, den störungsfreien, parallelen Betrieb der elektronischen und elektrischen Komponenten und Systeme unseres täglichen Lebens zu gewährleisten. Diese Systeme müssen in ihrer elektromagnetischen Umgebung funktionieren und dürfen keine anderen Systeme stören. Zudem geht es darum, neue Hardware durch Prüflabore zu zertifizieren, den Einfluss elektromagnetischer Felder auf den menschlichen Körper zu messen, Räume vor Spionage-Attacken abzuschirmen, elektrische Netze zu entstören oder Fluggeräte und deren Systeme vor Blitzeinschlägen zu sichern.

Nachdem Heinrich Hertz 1888 die Existenz elektromagnetischer Wellen bestätigen konnte, setzte eine rasante Entwicklung ihrer technischen Nutzung für Funkverkehr und Radar ein – maßgeblich unter anderem durch Guglielmo Marconi, Werner von Siemens und Christian Hülsmeier. Schon in den Anfangszeiten erforderte funktionierende und verlässliche Kommunikation mittels elektromagnetischer Wellen den Umgang mit Störungen, seien diese natürlichen Ursprungs oder durch den Menschen verursacht. Damit begann der Einsatz von nachrichten- und hochfrequenztechnischen Konzepten, um beispielsweise robuste Modulationsverfahren und geeignete Filtertechniken zu entwickeln. Seit den 1950er-Jahren gilt



**Abb. 1** In einem Steuergerät sendet ein integrierter Schaltkreis (IC) ein Signal über eine Leiterbahn an eine Last. In der Grafik sind auch die induktive, galvanische, kapazitive und Strahlungskopplung eingezeichnet.

das Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) als eigenständige Fachdisziplin.

Aufgrund der Komplexität der heutigen technischen Systeme und ihrer physikalischen Wechselwirkungen gilt es in der EMV meist, Disziplinen wie die Mechanik, Wärmelehre oder Plasmaphysik mit zu berücksichtigen. Als Forschungsdisziplin liefert die EMV Beiträge zur Messtechnik, zu Materialwissenschaften und zur Modellierung und Simulation multiphysikalischer Systeme. Auch viele Physikerinnen und Physiker leisten zu diesem höchst interdisziplinären Fachgebiet wichtige Beiträge.

### Gesucht: unerwünschte Kopplungen

Generell erfordert es die Analyse eines Problems der EMV, die elektromagnetische Wechselwirkung (Kopplung) zwischen Störquellen und Störsenken zu verstehen. Eine Störquelle bzw. -senke ist dabei jedes elektrotechnische oder elektronische System oder Produkt, das unerwünschte elektromagnetische Wirkungen in seiner Umgebung erzeugt bzw. diese aufnimmt. Für ein tieferes Verständnis werden auf Basis der klassischen elektromagnetischen Feldtheorie die Propagationspfade elektromagnetischer Wechselwirkung „von der Quelle bis zur Senke“ modelliert, die sowohl feldgebunden im freien Raum als auch leitungsgebunden entlang von Leitungsstrukturen existieren können [1].

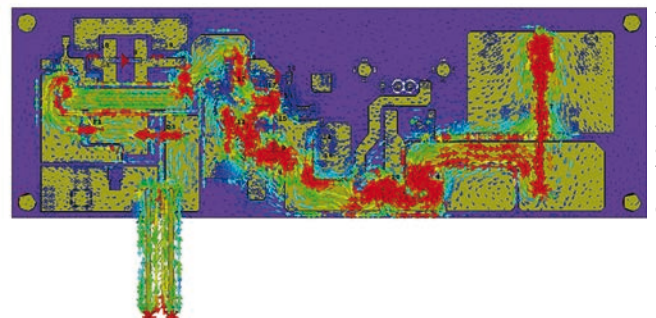
In einem Beispiel aus der Elektronik sind ein Sender, etwa ein integrierter Schaltkreis (IC), und eine Last, beispielsweise ein Speicherbaustein, durch eine Leiterbahn verbunden (**Abb. 1**). Der Sender emittiert ein getaktetes,

schnell umschaltendes Signal. Eine Fourier-Analyse zeigt, dass ein gepulster Sender zwei Dekaden oberhalb der Taktfrequenz, also bei der hundertsten Harmonischen, 40 dB weniger emittiert als bei seiner Nutzfrequenz, also immer noch ein Prozent. Um eine Störung des Radioempfangs zu vermeiden, verlangen EMV-Grenzwerte bei UKW-Frequenzen Emissionen deutlich unterhalb von einem Millivolt. Bei typischen Senderspannungen von einigen Volt und einer Taktfrequenz von einigen Megahertz sind daher Maßnahmen notwendig, um die Emissionen in diesem Frequenzbereich zu filtern. Die möglichen Störungen besitzen unterschiedliche Propagationspfade (Kopplungsmechanismen, **Abb. 1**):

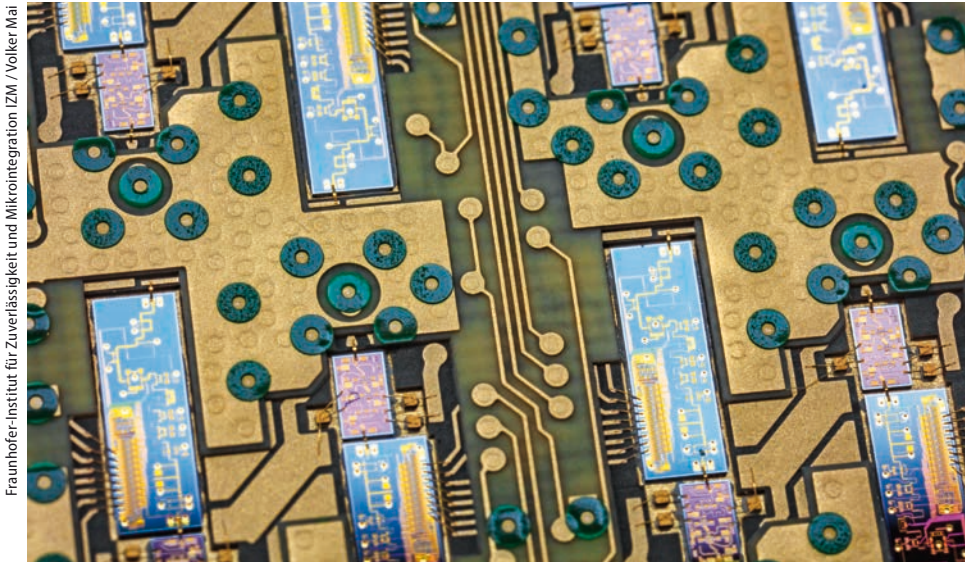
- **Induktive Kopplung:** Der Strom auf der Leiterbahn bildet mit seinem Rückstrompfad auf der Masselage der Leiterplatte eine Schleife, wodurch ein Magnetfeld entsteht. Dieses koppelt in andere Leiterschleifen ein und kann nahe des Steckers transiente Störungen auf Kabeln induzieren, die an die Leiterplatte angeschlossen sind.
- **Galvanische Kopplung:** Im Beispiel führt der Rückstrompfad auf der Masselage zu einer flächigen Stromverteilung. Durch den ohmschen Widerstand der Leiterplatte fällt die Spannung zwischen den beiden Steckerpins ab. Dies wirkt als Störquelle, die ein Signal auf den beiden mit den Steckerpins verbundenen Kabeln in Richtung der Störsenken auskoppeln kann.
- **Kapazitive Kopplung:** Unbeabsichtigte Kapazitäten innerhalb des Geräts erlauben Verschiebungsströme zwischen Bauteilen und Strukturen. Relevant werden sie, wenn größere Metallflächen dicht beieinander liegen. In **Abb. 1** sind es die Leiterbahn und das Gehäuse. Ein weiteres typisches Beispiel sind Kopplungen von Halbleiterschaltern auf darunterliegende Kühlbänke.
- **Strahlungskopplung:** Prinzipiell ist jede transient angeregte Metallstruktur eine Quelle von Störstrahlung. Elektrische oder magnetische Wechselfelder erzeugen z. B. zusammen mit einem Schlitz im Gehäuse einen Schlitzstrahler. Wenn die Frequenz des Senders mit den Schlitzabmessungen in Resonanz ist, kann eine sehr effektive Antenne entstehen. Bei einem hinreichend breitbandigen Sender tritt fast zwangsläufig Resonanz auf. Aus den physikalischen Eigenschaften der Koppelmechanismen folgen Regeln für ein gutes EMV-Design: So gilt es, die durch die Leiterbahn aufgespannte Fläche bzw. ihre Länge gering zu halten, ein möglichst leitfähiges Gehäuse zu verwenden und Schlitze zu minimieren. Kon-



**Abb. 2** Das Foto links zeigt die bestückte Leiterplatte eines Bulk Step-Down DC/DC Converters. Rechts sind die Ergebnisse einer nichtlinearen Schaltungssimulation gekoppelt mit 3D-Feldberechnung zu sehen. Stellen mit hoher Stromdichte (rot) und damit hoher magnetischer Feldstärke könnten EMV-Probleme verursachen.



Dasault-Systeme/Deutschland GmbH / Matthias Tröschler



**Abb. 3** Ein Ka-Band-Transmitter mit acht Kanälen auf PCB-Technologie-Basis ist ein Beispiel für integrierte Elektronik bei hohen Frequenzen. Das Ka-Band erstreckt sich von 26,5 bis 40 GHz.

struktionsbedingt und aufgrund anderer Randbedingungen lassen sich diese Regeln häufig nur eingeschränkt befolgen. Ein gutes EMV-Konzept vermeidet Propagationspfade von vornherein. Für die unvermeidbaren Propagationspfade sind geeignete, kostengünstige Maßnahmen nötig, z. B. das Unterdrücken hochfrequenter Ströme auf Leiterbahnen durch Kondensatoren oder Ferrite.

### Von Testverfahren ...

Auch wenn viele Erfahrungen existieren, um Propagationspfade zu erkennen, besteht immer die Gefahr, eine unerwünschte Kopplung zu übersehen. Daher sind sorgfältige Tests nötig. Bei EMV-Testverfahren zur Störfestigkeit werden elektromagnetische Störquellen durch sendende Antennen oder eine direkte Einspeisung von Strömen oder Spannungen in Leitungen nachgestellt. Während diese auf das System einwirken, wird dessen Betriebszustand beobachtet, um mögliche (Zer-)Störungen zu identifizieren. Bei der Entwicklung von Systemen, die selbst unbeabsichtigt als Störquellen fungieren können, dienen Testverfahren zur Störaussendung dazu, die feld- oder leitungsgebunden ausgesandten elektromagnetischen Felder zu messen. Diese dürfen die festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

EMV-Testverfahren müssen reproduzierbar sein und folgen festgelegten Standards und Normen. So finden feldgebundene Testverfahren in abgeschirmten Hallen statt, die mit elektromagnetischen Absorbern ausgestattet sind und ein ideales Freifeld nachbilden (**Abb.** auf Seite 35). Auch leitungsgeführte Testverfahren benötigen eine möglichst abgeschirmte Umgebung. Dies schließt spezielle Filter und normierte Impedanzen der Energieversorgung des Prüflings mit ein, die häufig in einem „Line Impedance Stabilizing Network“ (LISN) zusammengefasst sind.

Trotz der heute üblichen Automatisierung kann der EMV-Test eines einfachen Geräts mehrere Stunden dauern. Der vollständige Test eines komplexen Systems wie eines Luftfahrzeugs kann sich aufgrund der vielen zu prüfenden Parameterkombinationen über mehrere Wochen erstrecken. So wird das Prüfobjekt bei einem typischen

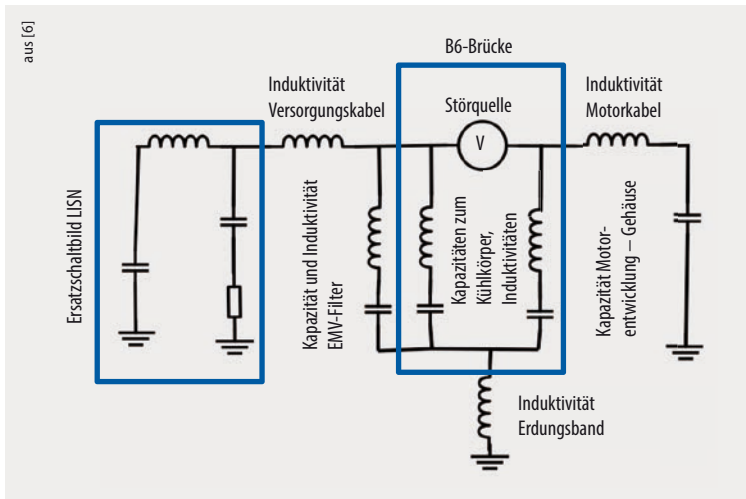
feldgebundenen Störfestigkeitstest aus verschiedenen Richtungen und Höhen, mit verschiedenen Polarisierungen und für verschiedene Frequenzen oder Pulsformen bestrahlt.

### ... und Simulationen

Neben diversen Messgeräten zählen Schaltungssimulatoren und elektromagnetische Feldberechnungsprogramme zu den wichtigsten Werkzeugen für EMV-Tests. Um Kosten zu sparen, erfolgt der Entwurf elektrotechnischer und elektronischer Systeme soweit wie möglich durch prädiktive Simulationen auf Basis der Maxwell-Gleichungen. Seit den 1970er-Jahren gibt es rechnergestützte numerische Methoden, die ab Mitte der 1980er-Jahre den kommerziellen Siegeszug in das industrielle Umfeld begonnen haben.

Für die numerische Lösung der Maxwell-Gleichungen existieren unterschiedliche Verfahren [2]. Bei allen wird der zu berechnende Raumbereich bzw. die zu berechnende Oberfläche mit diskreten Elementen vernetzt, sodass die Differentialgleichungen in ein System linearer Gleichungssysteme übergehen. Transiente Vorgänge lassen sich optimal mit Zeitbereichsverfahren beschreiben, etwa die Ausbreitung elektromagnetischer Störimpulse oder das Einschwingverhalten einer elektronischen Schaltung [3]. Auch breitbandige Simulationen sind mit Zeitbereichsmethoden meist effizienter, da ein einzelner Gauß-Puls ein definiertes (beliebig breites) Frequenzband auf einmal anregen kann. Anders sieht es bei stark resonanten Aufgabenstellungen aus, zum Beispiel bei Berechnungen der elektromagnetischen Abstrahlung einer Leiterplatte in einem Metallgehäuse. In diesem Fall kann eine Simulation im Frequenzbereich sinnvoller sein.

Kommerzielle Simulationswerkzeuge bieten heute viele unterschiedliche Techniken an – teils miteinander gekoppelt als Hybridverfahren. So wird bei EMV-Untersuchungen von Leiterplatten (**Abb. 2**) oft ein Ersatzmodell der 3D-Geometrie erstellt und simuliert, auf die Ergebnisse eine Modellreduktion angewendet und das resultierende Modell in eine Schaltungssimulation integriert. Dies ermöglicht wesentlich schnellere Berechnungen, die mit



**Abb. 4** Dieses Ersatzschaltbild aus 14 diskreten Elementen beschreibt die Emissionen eines Hochvoltinverters bis 100 MHz. Die Werte der Schaltungselemente lassen sich aus Messungen oder Simulationen bestimmen.

reinen 3D-Ansätzen nicht möglich wären. Drei Beispiele sollen die Breite des Anwendungsspektrums verdeutlichen.

### Verträgliche integrierte Schaltungen

Integrierte elektronische Geräte und Systeme mit ihren stetig wachsenden Möglichkeiten zur Datenverarbeitung und -übermittlung sind wesentlicher Bestandteil unserer digitalen Gesellschaft (Abb. 3). Ein wichtiger Aspekt dieser Systeme ist die Kontrolle von Spannungen und Strömen, die für die Übertragung von Signalen und die Energieversorgung nötig sind.

Ein Beispiel: Bei einem mittleren Leistungsverbrauch eines integrierten Schaltkreises von 100 Watt und einer Versorgungsspannung von 1 Volt fließen im Mittel 100 Ampere Strom, die an Milliarden von Transistoren ohne Spannungseinbuße über Aufbau- und Verbindungsstrukturen auf dem Chip verteilt werden sollen. Das ist nur möglich durch Berücksichtigung der „parasitären“, also nicht beabsichtigten und damit störenden Effekte bzw. deren Kompensation. Die Methoden und Bauelemente zur Stabilisierung der Spannungsversorgung zählen zur „Power Integrity“ [4]. Wesentliches Kennzeichen einer stabilen Spannungsversorgung ist ein niedriger Innenwiderstand vom IC aus gesehen (oft 100 mΩ und weniger). Meist sorgen die Zuleitungen über Leiterplatte, Package und IC-Verdrahtungen dafür, dass die Innenwiderstände mit der Frequenz steigen. Das führt zu hohen Spannungsabfällen und galvanischer Kopplung über den gemeinsamen Strompfad. Um das zu verhindern, werden hochgradig parallele Zuleitungen eingeführt („Vermassung“) und Entkoppel- bzw. Stützkondensatoren parallelgeschaltet.

Ein weiteres Beispiel: In den Anfangsjahren des PCs waren Datenraten auf den Verbindungsstrukturen von höchstens 1 Mbit/s üblich. Das bedeutet eine Pulsdauer von 1 μs und eine räumliche Ausdehnung von etwa 150 m (für eine relative Dielektrizitätszahl von 4). Das war weit entfernt von der Ausdehnung der Leiterplatten, sodass Ausbreitungseffekte keine Rolle spielten. Heutzutage sind Datenraten

von 10 Gbit/s Stand der Technik. Die entsprechende Pulsdauer von 100 ps bedeutet eine räumliche Ausdehnung von 1,5 cm. Effekte der Wellenausbreitung wie Phasenverzug, Reflexionen, Superposition usw. sind daher voll zu berücksichtigen. Zudem spielen ohmsche und dielektrische Verluste eine große Rolle, sodass die Signale meist am Sender vorverstärkt und am Empfänger entzerrt werden müssen. Da viele Quellen für induktive und kapazitive Kopplungen der elektrischen Leitungsführung vorliegen, kann Übersprechen zu Datenverlusten führen. Die Methoden zur Stabilisierung und Wiederherstellung des Signalpegels zählen zur „Signal Integrity“ [5]. Die wichtigsten Maßnahmen bestehen aus einer impedanzkontrollierten Signalführung, Vorverstärkung und Entzerrung der Signale sowie einer Schirmung gegen Übersprechen.

### Verträglichkeit im Automobil

Im Kraftfahrzeug gibt es dutzende Kleinmotoren für Fensterheber, Getriebesteller oder Scheibenwischer. Die Elektromobilität erfordert Wandler und Traktionsinverter und das autonome Fahren neben vielen Sensoren auch Bordcomputer mit digitalen Kommunikationssystemen.

Als Beispiel einer typischen Komponente aus der Fahrzeugelektronik dient hier die Emission eines Traktionsinverters für elektrische Fahrzeuge. Dieser wandelt den Batteriestrom in ein dreiphasiges Sinussignal um, das die elektrische Maschine des Fahrzeugs antreibt. Dazu wird eine Schaltung aus sechs getakteten Transistoren (B6-Brücke) verwendet. Diese Technologie kommt für die Mehrzahl aller Kleinmotoren in Fahrzeugen zum Einsatz und steht somit stellvertretend für viele elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug.

Unmittelbar störend für die EMV sind Resonanzen im Übertragungspfad. Sie können die Störquelle verstärken und so im EMV-Spektrum sichtbar machen. Bei Traktionsinvertoren entstehen Resonanzen meist durch LC-Schwingkreise, also eine Kombination parasitärer Induktivitäten und Kapazitäten, die im Koppelpfad eine Schwingung bei einer bestimmten Frequenz verursachen. Da die Störanregung bei getakteten Signalen mit steigender Frequenz abnimmt, sind Resonanzen bei niedrigen Frequenzen kritischer. Gemäß  $f_r = 1/2\pi \sqrt{LC}$  sorgen große Induktivitäten und Kapazitäten für niedrige Resonanzfrequenzen  $f_r$ . Die größte Induktivität des Systems ist Teil der Testumgebung und nicht des Inverters: Die batterie-seitige elektrische Terminierung des Systems bildet die elektrische Wirkung der im Auto verlegten Kabelstränge zur Batterie mittels einer großen Induktivität nach. Die größte Kapazität resultiert aus der Wicklung der elektrischen Maschine (Motor) gegenüber ihrem Gehäuse. Nächstkleinere Induktivitäten und Kapazitäten beschreiben entsprechend höhere Resonanzen.

Um das Spektrum einer von allen Automobilherstellern geforderten Emissionsprüfung zu bestimmen, ist der Frequenzbereich von 150 kHz bis 108 MHz maßgeblich. Dort lassen sich alle Resonanzen eines Hochvoltinverters auf LC-Resonanzen zurückführen. Das zugehörige Ersatzschaltbild besitzt nur 14 diskrete Elemente und beschreibt

das Emissionsspektrum des Inverters (**Abb. 4**) [6]. Als Störquelle fungiert die B6-Brücke, die als Spannungsquelle im Frequenzbereich darstellbar ist und über die Versorgungsleitungen galvanisch in das „Line Impedance Stabilizing Network“ koppelt. Parallel dazu bilden diskret verbaute Filterkapazitäten sowie parasitäre Kapazitäten der Transistoren zum Kühlkörper des Inverters die nächstliegenden (kapazitiven) Koppelpfade. Leiterstrukturen, die Magnetfelder erzeugen, lassen sich durch serielle Induktivitäten charakterisieren, ebenso wie das Erdungsband zwischen Gehäuse und Messtisch. Die Kabel in Richtung des „Line Impedance Stabilizing Network“, das durch eine große Induktivität, zwei Kapazitäten und einen Widerstand zu beschreiben ist, sowie zur elektrischen Maschine sind ebenfalls Induktivitäten.

Beachtlicherweise gilt dieses Modell universell für alle Hochvoltinverter ähnlicher Bauform. Die beschriebenen Resonanzkreise sind immer vorhanden, wenn auch Resonanzfrequenzen und Güte von der konkreten Bauform abhängen. Das Ersatzschaltbild stellt die wesentlichen Koppelpfade transparent dar. Die Verkleinerung der parasitären Kapazitäten des Motors sowie der Transistoren sind die wesentlichen Hebel, um die Emissionen zu reduzieren: Die Resonanzen wandern zu höheren Frequenzen, bei denen die Störleistung kleiner und ihre Auswirkung damit geringer ist. In der Praxis kollidiert diese Anforderung mit den im Gerät auftretenden Strömen, für die eine größere Bauform mit höheren Kapazitäten einfacher umzusetzen ist. Die Werte dieser Kapazitäten lassen sich in frühen Entwicklungsphasen, in denen eine konkrete Geometrie des Geräts noch nicht vorliegt, bereits abschätzen und so eine Aussage über die Emissionen treffen.

Wenn allerdings in einer neuen Bauform neue Koppelpfade auftreten, verliert das Ersatzschaltbild seine Gültigkeit und liefert falsche Voraussagen. Bei der Entwicklung neuer Plattformen ist es daher zwingend, das Gesamtgerät auf Basis der Maxwell'schen Gleichungen zu simulieren. Dies ist deutlich aufwändiger als das Erstellen des Ersatzschaltbildes.

### Blitzschutz in der Luftfahrt

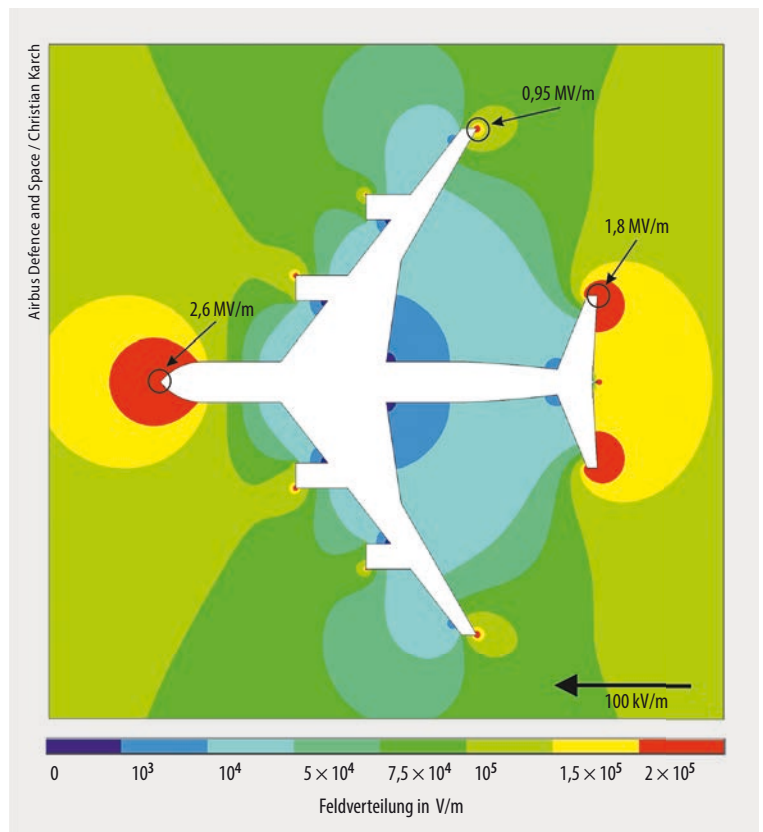
Etwa einmal pro Jahr wird ein Passagierflugzeug im Schnitt von einem Blitz getroffen – häufig unbemerkt. Allerdings können die Folgen eines Blitzeinschlags bis hin zum kurzzeitigen Ausfall einiger Instrumente oder einer lokalen Schädigung der äußeren Flugzeugstruktur reichen. Da Flugzeuge heutzutage immer mit redundanten Systemen ausgelegt sind, ist der Ausfall sicherheitsrelevanter Systeme höchst unwahrscheinlich. Dennoch gilt es, die Flugzeuge bestmöglich gegen die Folgen eines Blitzeinschlags zu schützen.

Ein Flugzeug wird im elektrischen Feld einer Gewitterwolke polarisiert. Das externe elektrische Feld kann um bis zu einen Faktor 100 an stark gekrümmten Oberflächen steigen (**Abb. 5**). Daher reichen Gewitterfelder von nur 30 bis 300 kV/m aus, um Korona-Entladungen zu verursachen. Hierdurch können sich Fangentladungen an Flugzeugextremitäten entwickeln und zum Blitzeinschlag in das Flugzeug führen.

Eine Blitzentladung ist durch die maximale Stromamplitude  $I_{max}$ , die Ladung  $Q$ , die spezifische Energie  $W/R = \int I^2 dt$  und die Stromsteilheit  $dI/dt$  charakterisiert. Der Scheitelwert des Blitzstroms von 100 bis 200 kA ist vor allem für den maximalen Spannungsfall des Objekts maßgebend. Die elektrische Ladung bis etwa 25 C, der direkte thermische Energieeintrag des Plasmas und die spezifische Energie sind für den Energieumsatz des Blitzes entscheidend. Weiter verursachen sie das Schmelzen der metallischen Strukturen am Fußpunkt des Blitzlichtbogens. Die spezifische Energie der transienten Komponenten bis 2,0 MJ/Ω beeinflusst insbesondere die Erwärmung blitzstromdurchflossener Strukturen; sie determiniert die thermomechanische Schädigung der Struktur. Die Stromsteilheit bis 140 kA/μs ist für die Höhe induzierter Spannungen verantwortlich.

Es gibt zwei Gruppen von Effekten eines Blitzeinschlags: Direkte Effekte sind thermomechanische Schädigungen, die durch Interaktion des Blitzlichtbogens mit der Struktur auftreten. Sie entstehen durch thermische Effekte wie Joulesche Erwärmung und transiente mechanische Kräfte, etwa durch magnetische Kräfte oder Schockwellen, während der Anstiegszeit des Blitzstroms. Einige Mechanismen sind mathematisch gut zu modellieren und zu berechnen. Andere stehen im Fokus aktueller Untersuchungen [7].

Indirekte Effekte sind Störungen und Beschädigungen der elektrischen Geräte und der Verkabelung, die vor allem durch die induktive Einkopplung des Blitzstroms und dabei induzierte Überspannungsprozesse auftreten. Die äußere Hülle des Flugzeugs schützt als Faradayscher Käfig die



**Abb. 5** In der Feldverteilung um ein Flugzeug bei einem externen Feld von 100 kV/m ist der Spitzeneffekt deutlich sichtbar.

C. Karch et al., „Full-Scale HV Radome Initial Leader Attachment Tests“, ICOLSE 2019



**Abb. 6** Beim Hochspannungstest eines Satcom-Radomes beträgt die Ladungsspannung des Generators rund 1,2 Megavolt.

Passagiere, kann aber die Einkopplung in die Leitungen und Elektronik nicht vollständig unterbinden. Inzwischen stellen indirekte Effekte aufgrund effektiver Abschirmungen und redundanter Systeme kein Problem mehr dar. Allerdings ist die numerische Analyse aller möglichen Kopplungsmechanismen in komplexen Flugzeugnetzwerken mit einer Kabellänge von insgesamt bis zu 300 Kilometer extrem anspruchsvoll, obwohl die elektromagnetische Einkopplung „nur“ im kHz- bis MHz-Bereich erfolgt.

Zudem sind viel mehr elektronische Teile verbaut – beispielsweise für die Triebwerkssteuerung, Bordnetzüberwachung oder Kommunikation. Daher sind sowohl deterministische als auch statistische Modelle der Leitungs- und Feldtheorie notwendig, um die Effekte einer Blitzentladung zu simulieren. Die statistische Modellierung hilft, unbekannte und/oder unkontrollierbare Parameter zu berücksichtigen und zufällige Störungen zu erkennen. Am Boden erfolgen experimentelle Hochspannungs- und

Hochstromtests, um natürliche Blitzentladungen nachzubilden (**Abb. 6**). Allerdings gilt es, diese Ergebnisse mittels aufwändiger Simulation auf den Flugbetrieb umzurechnen.

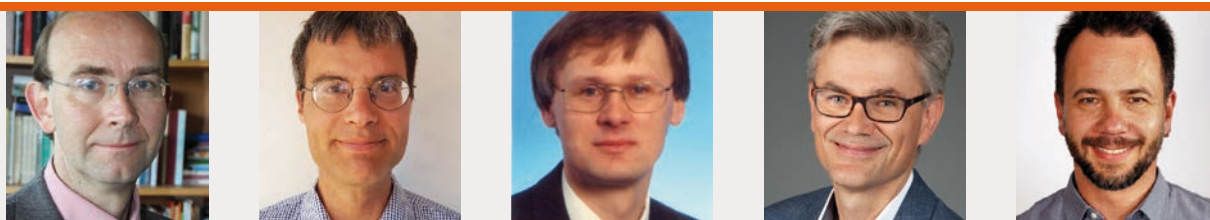
### Ausblick

Für die EMV wird es neue anspruchsvolle Aufgaben in der Schaltungs-, Kommunikations-, Automobil- und Luftfahrttechnik geben. Ein besonderes Augenmerk verdient die zunehmende Vernetzung und Digitalisierung der individuellen Mobilität. Autonom fahrende und miteinander kommunizierende Fahrzeuge verlangen leistungsfähige, vielfach vernetzte technische Systeme, die höchst zuverlässig operieren und Entscheidungen für die Menschen treffen. Sollten in solchen Systemen aufgrund unzureichender elektromagnetischer Verträglichkeit Fehlfunktionen auftreten, können die Konsequenzen katastrophal sein. Um diese Herausforderungen zu lösen, sind neue Ideen für Messtechnik, Modellierung und Simulation sowie Entstörung nötig. Die EMV ist und bleibt daher ein im wahrsten Sinne des Wortes „spannendes Feld“ für Physiker und Ingenieure!

### Literatur

- [1] C. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, Wiley, New Jersey (2006)
- [2] H.-D. Brüns, C. Schuster und H. Singer, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility **49**, 2 (2007)
- [3] T. Weiland, Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik, Band 31 (1977), S. 116
- [4] M. Swaminathan, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine **2**, 60 (2013)
- [5] T. Beukema, IEEE Communications Magazine **48**, 174 (2010)
- [6] P. Hillenbrand et al., Understanding Conducted Emissions from an Automotive Inverter Using a Common-mode Model, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (2015)
- [7] C. Karch, A. Arteiro und P. P. Camanho, Int. J. Solids Struc. **162**, 217 (2019)

## Die Autoren



Von links nach rechts: **Frank Gronwald** (FV Gravitation und Relativität) ist Diplom-Physiker und leitet an der Universität Siegen den Lehrstuhl für Zuverlässigkeit Technischer Systeme und Elektrische Messtechnik. **Jan Hansen** (FV Halbleiterphysik / Kristalline Festkörper und deren Mikrostruktur) ist Diplomphysiker und leitet bei der Robert Bosch GmbH ein Team, das EMV-Simulationen für verschiedene Geschäftsbereiche des Konzerns durchführt. **Christian Karch** (FV Theoretische u. Mathematische Grundl. der Physik) ist Diplomphysiker und bei Airbus Defence and Space als Experte für EM-Design und Lightning Effects mit Schwerpunkt Computational Electromagnetics and Multiphysics tätig. **Christian Schuster** ist Diplomphysiker und leitet das Institut für Theoretische Elektrotechnik an der Technischen Universität Hamburg (TUHH). Seit 2020 ist er Vorstandsmitglied der IEEE EMC Society. **Matthias Tröschler** ist Diplomphysiker und bei der Dassault Systèmes Deutschland GmbH als High Tech Sales Expert tätig. Seit 2016 ist er stellvertretender Vorsitzender des IEEE German EMC Chapters.

**Prof. Dr. Frank Gronwald**, Zuverlässigkeit Technischer Systeme und Elektrische Messtechnik, Universität Siegen, Hölderlinstr. 3, 57068 Siegen, **Dr. sc. techn. Jan Hansen**, Robert Bosch GmbH, Postfach 30 02 40, 70442 Stuttgart, **Dr. Christian Karch**, Airbus Defence and Space GmbH, Rechliner Straße, 85077 Manching, **Prof. Dr. sc. techn. Christian Schuster**, Institut für Theoretische Elektrotechnik, Hamburg University of Technology (TUHH), Harburger Schloss Str. 20, 21079 Hamburg und **Dr. techn. Dipl.-Phys. Matthias Tröschler**, Dassault Systemes Deutschland GmbH, Bad Nauheimer Str. 19, 64289 Darmstadt