

# Simulation leitungsgebundener Störungen in Leistungselektronik

Teil 2 der Serie zu besserem EMV-Verständnis durch Simulation: Um Emissionen elektronischer Baugruppen näher bestimmen zu können, bietet die ANSYS Electromagnetics Suite einige Möglichkeiten.

CHRISTIAN RÖMELSBERGER \*

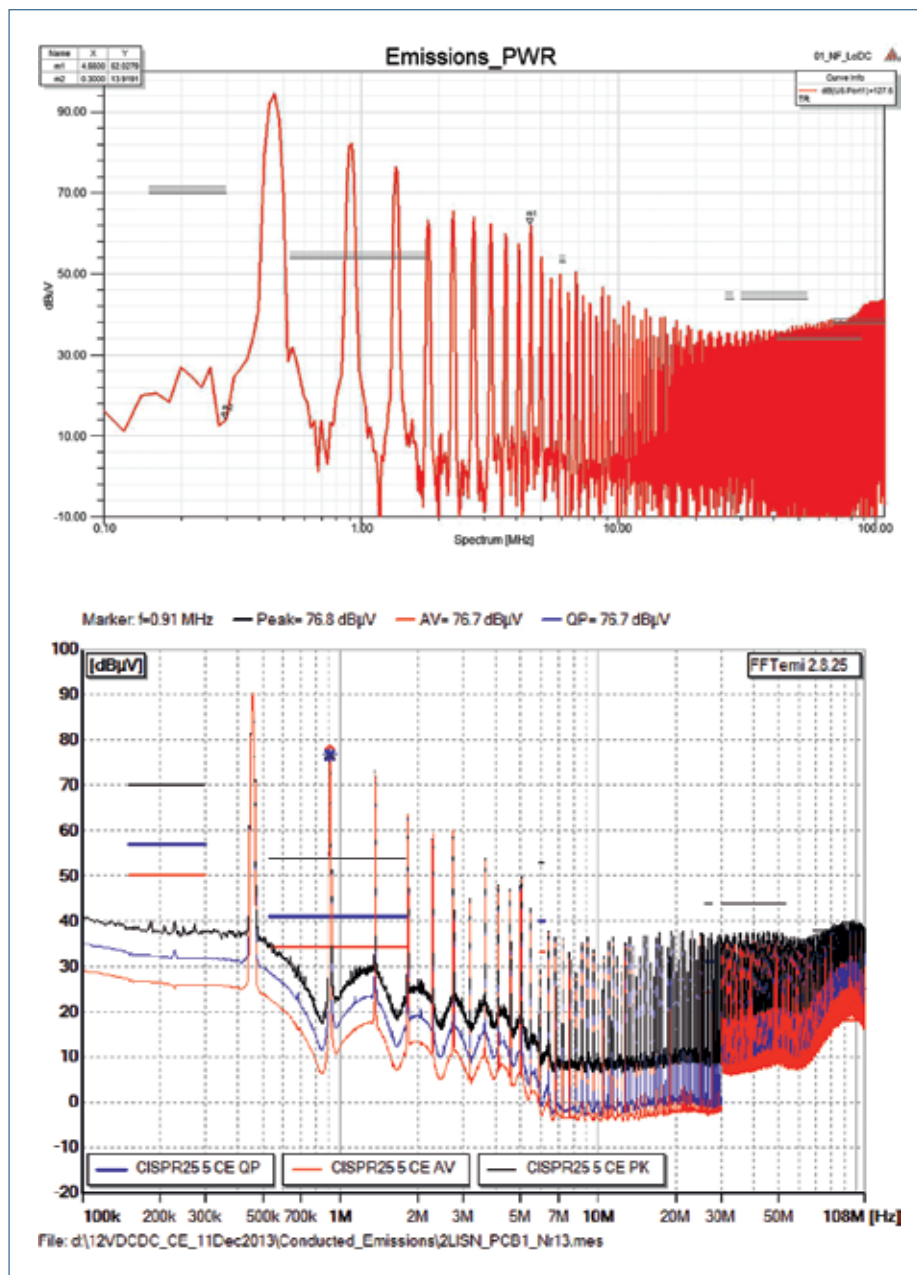


Bild 1: Das simulierte und das gemessene Emissionsspektrum eines SEPIC-Wandlers.

In Teil 1 der Serie wurde gezeigt, wie elektromagnetische Feldsimulation behilflich ist, EMV-Schirmmaßnahmen schon in einer frühen Designphase zu testen, ihre Einschränkungen zu verstehen und optimale Schirmkonzepte zu finden. In diesem zweiten Artikel soll nun darauf eingegangen werden, welche Möglichkeiten die ANSYS Electromagnetics Suite bietet, um Emissionen elektronischer Baugruppen zu bestimmen.

Damit können zuverlässige Vorhersagen über das Verhalten eines realen Schaltungsaufbaus gemacht werden, die weit über Leiterplatten-Design-Rules hinausgehen. Somit lassen sich Tests durchführen und Schwächen des Layouts erkennen und beseitigen. Zudem kann abgeschätzt werden, welche Schirmmaßnahmen notwendig sind. Zusätzlich lassen sich mit Simulationen auch schwer bzw. praktisch gar nicht messbare Größen darstellen, um ein tiefer gehendes Verständnis zu erlangen, das für Designverbesserungen oft benötigt wird.

Elektromagnetische Störungen werden durch mehrere Effekte und deren Wechselspiel hervorgerufen. Um dies zu illustrieren, sollen die Emissionen eines DC-DC-Wandlers (Schaltnetzteil) betrachtet werden (Bild 1). DC-DC-Wandler finden in der Elektronikentwicklung vielseitige Anwendung. Sie dienen zum effizienten Wandeln von Gleichspannungen und Gleichströmen und werden in vielen elektronischen Baugruppen zur lokalen Stromversorgung verwendet. Auch in Fahrzeugen finden Sie Einsatz, um etwa Energie zwischen Batterie und Boardnetz zu transportieren.

Je nach Verwendungszweck gibt es Schaltnetzteile mit verschiedenen Topologien, unter anderem Step-up, Step-down, SEPIC



\* Christian Römelsberger  
... ist Experte im Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Simulation bei CADFEM.

(Single Ended Primary Inductor Converter), Ćuk oder Flyback. Die Funktionsweise eines Schaltnetzteils basiert wie viele leistungselektronische Schaltungen auf Schaltern (Leistungstransistoren wie MOSFETS oder IGBTs), die schnell getaktet ein- und ausgeschaltet werden, Dioden als Ventile und Kapazitäten und Induktivitäten als Energiespeichern. Im einfachsten Fall eines Step-Up- beziehungsweise eines Step-Down-Wandlers wird, wenn der Schalter geschlossen ist, eine Induktivität mit magnetischer Energie geladen. Wenn der Schalter dann geöffnet wird, treibt die Induktivität Strom durch eine Diode, die als Ventil dient. Bei anderen Topologien wie SEPIC, Ćuk oder Flyback sind oft mehrere Energiespeicher beteiligt. Das Funktionsprinzip ist aber sehr ähnlich. Die Ausgangsspannung kann über die Pulsweite des Schalters geregelt werden.

### Schaltvorgänge führen zu Störungen

Das Schalten führt zu Signalen bei dieser Schaltfrequenz, die als Störungen wahrgenommen werden. Natürlich gibt es weitere Störungen bei Vielfachen (Harmonischen) dieser Grundfrequenz. Die Störungen bei höheren Frequenzen resultieren zum einen aus den harmonischen Anteilen der Darstellung von Rechtecksignalen zum anderen aus parasitären (ungewollten, realen) Eigenschaften der Bauteile und des Schaltungsaufbaus: Alle Strompfade, auch die Zuleitungen der Schalter und der Kondensatoren, haben parasitäre Induktivitäten, in denen durch die steilen Schaltflanken für den Strom beim Öffnen des Schalters große Spannungen induziert werden. Dies führt wiederum dazu, dass zum Beispiel parasitäre Kapazitäten im Schalter geladen werden. Auf diese Weise werden parasitäre Schwingkreise an-

geregt, die bei hohen Frequenzen schwingen, da die parasitären Induktivitäten und Kapazitäten typischerweise klein sind.

Um all diese Effekte und deren Wechselwirkung abzubilden, bietet die ANSYS Electromagnetics Suite den Aufgabenstellungen angepasste Feld- und Schaltungssimulatoren. Hierbei wird mit Hilfe eines Feldsimulators wie ANSYS Q3D Extractor das Übertragungsverhalten des realen Schaltungsaufbaus berechnet. Dies enthält parasitäre Induktivitäten, Kapazitäten und Widerstandsbeläge im Schaltungslayout, aber auch Kopplungen an die Umgebung, beispielsweise eine kapazitive Kopplung an eine Fahrzeugkarosserie oder die Kupferoberfläche des Experimentiertisches für EMV-Messungen.

### Feldsimulation als virtuelle Messung

Die Feldsimulation des Layouts kann als virtuelle Messung mit einem Vektor-Netzwerkanalysator angesehen werden. Dieses n-Tor-Netzwerk zwischen externen Terminals und den einzelnen Bauteilen soll in einem Analogsimulator (Schaltungs-/Systemsimulation) mit den Bauteilen und den externen Quellen und Lasten verknüpft werden, um in einer transienten Simulation die Signale (Strom- und Spannungsverläufe) an verschiedenen Bauteilen zu ermitteln. Die Verdrahtung in der Systemsimulation kann mit der Bestückung der leeren Platine verglichen werden. ANSYS Q3D Extractor bietet die Möglichkeit, sowohl DC-Widerstände und -Induktivitäten zu berechnen als auch Wirbelstromverdrängungseffekte und so erhöhte Widerstandsbeläge und induktive Kopplungen im AC-Fall zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung dieser beiden Regimes ist notwendig, um das reale Verhalten leistungs-

elektronischer Schaltungen gut abzubilden. Denn einerseits liegt der Arbeitspunkt für Schaltnetzteile typischerweise bei DC oder geht für Wechselrichter nicht über den Kilohertzbereich hinaus und andererseits ist das EMV-Verhalten bei hohen Frequenzen stark durch induktive Kopplungen und Wirbelstromverdrängungseffekte geprägt.

Für die Bestimmung des Verhaltens von passiven Bauteilen – wie Kondensatoren und Induktivitäten, die meist Zukaufbauteile sind – erweist es sich als nützlich, Impedanzmessungen durchzuführen, zum Beispiel mit Hilfe eines Netzwerkanalysators, und daraus Verhaltensmodelle zu extrahieren. Für Kondensatoren besteht ein einfaches Verhaltensmodell aus der Reihenschaltung einer idealen Kapazität, einer idealen Induktivität (ESL) und eines Widerstandes (ESR). Hier können, wie im ersten Teil der Artikelserie beschrieben, die parasitäre Induktivität und Widerstand als der Induktivitäts- und Widerstandsbelag der Zuleitung des Kondensators angesehen werden. Die kapazitive Kopplung zwischen den Spulenwindungen einer Induktivität führt entsprechend zum parasitären Verhalten dieses Bauteils.

### Bauteilbibliothek für EMV-Simulationen

Die ANSYS EM Suite bietet sowohl die Möglichkeit, mit Hilfe eines Tuning-Werkzeugs per Hand diese Schaltkreisparameter zu extrahieren, als auch eine automatisierte Verhaltensmodellgenerierung auf Basis von Touchstone-Files der Messdaten durchzuführen. Auf diese Weise kann der Anwender eine Bibliothek von häufig verwendeten Bauteilen aufbauen, die in EMV-Simulationen schnell nutzbar sind.

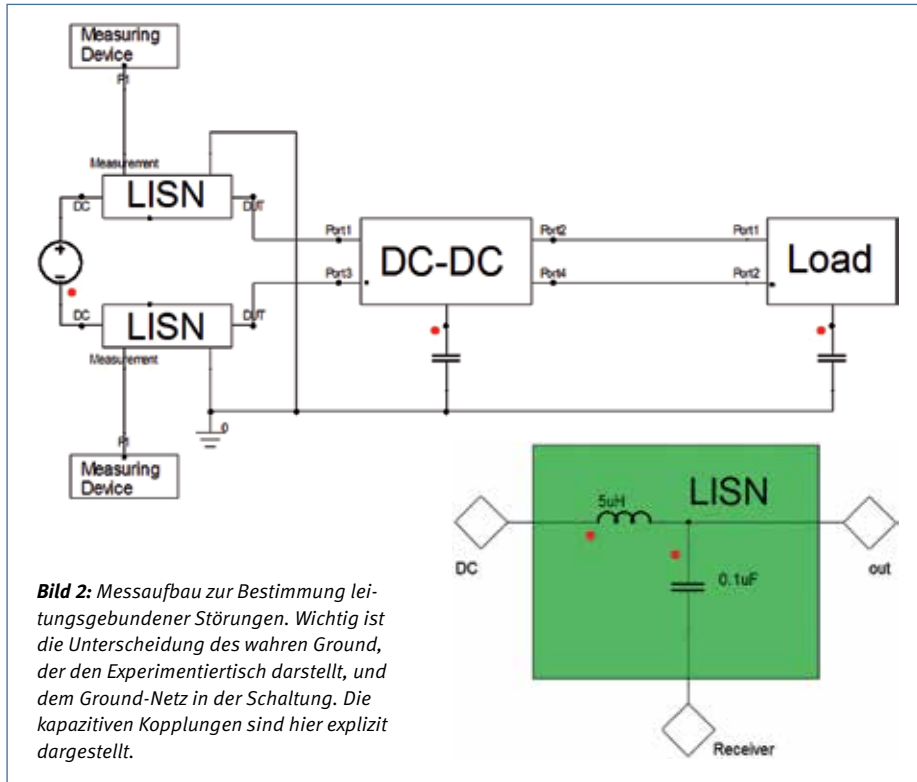
Um das dynamische Verhalten der Halbleiterelemente zu beschreiben, werden so-

# IHR OSZILLOSKOP SPEZIALIST 40 MHz – 100 GHz

teledynelecroy.de

 **TELEDYNE LECROY**  
Everywhere you look™





**Bild 2:** Messaufbau zur Bestimmung leitungsgebundener Störungen. Wichtig ist die Unterscheidung des wahren Ground, der den Experimentiertisch darstellt, und dem Ground-Netz in der Schaltung. Die kapazitiven Kopplungen sind hier explizit dargestellt.

wohl die nichtlinearen Kennlinien, beispielsweise die Transfer-Charakteristik von MOSFETs, benötigt als auch Kapazitäten zwischen den verschiedenen Anschlüssen der Halbleiter, zum Beispiel die Gate-Source-Kapazität von MOSFETs.

Erst diese Kenndaten erlauben es, dynamische Effekte wie das Miller-Plateau beim Schalten eines MOSFETs darzustellen. Der ANSYS Simplorer kann einerseits Verhaltensmodelle von den Herstellern dieser Komponenten im Spice- oder PSpice-Format lesen und andererseits eigene Verhaltensmodelle mit dem Device Characterisation Tool generieren. Mit den eben beschriebenen Methoden lassen sich gute dynamische Verhaltensmodelle für alle Teile des Wandlers von den Einzelkomponenten bis zum Layout erzeugen.

### Nahtloser Simulations-Workflow realisierbar

Mit der Anlogsimulation des gesamten Schaltungsaufbaus sind alle relevanten Signale und somit auch leitungsgebundene Störungen bestimmbar. Die ANSYS Electromagnetics Suite bietet dafür den Simplorer als System Simulator, der mit den Feldsimulatoren im ANSYS Electronics Desktop als einheitliche Simulationsumgebung integriert ist. Dies erlaubt den nahtlosen Simulations-Workflow vom Layoutimport bis zur Feld- und Systemsimulation. Hier wird es

wichtig über Messvorschriften aus Normen zu reden.

Ein Beispiel ist die CISPR 25 Norm in der Automobilbranche: Dabei wird der Prüfling in einer EMV-Messkammer mit absorbierenden Wänden aufgebaut, um äußere Einflüsse abzuschirmen und Reflexionen der eigenen Emissionen zu vermeiden. Des Weiteren wird der Prüfling mit Last über einer leitenden, geerdeten Fläche (Experimentiertisch mit Kupferoberfläche) platziert und durch ein künstliches Netzwerk (LISN) versorgt (Bild 2). Dieser Messaufbau trennt die ‚wahre‘ Erde von der Erde im Schaltungsaufbau und erlaubt auf diese Weise das Entstehen von Gleichtaktstörungen. Zudem können genormte leitungsgebundene Störungen am LISN abgegriffen und über einen 50 Ω Messempfänger gemessen werden. In der Anlogsimulation mit ANSYS Simplorer werden die künstlichen Netzwerke und Messempfänger nachgebildet, wie dies im Bild 2 zu sehen ist. Die Emissionsspektren werden durch eine automatisierte Fouriertransformation mit entsprechender Fensterfunktion im Postprocessing dargestellt.

Die Simulation erlaubt es, bei EMV-Untersuchungen einzelne Details genauer zu untersuchen, diese von anderen Phänomenen zu isolieren und auch schwer messbare Größen zu veranschaulichen. Darauf basierend entsteht ein umfassenderes Verständnis des Systemverhaltens, sodass zur Optimierung

gezielte Designvariationen an virtuellen Prototypen vorgenommen werden können. Auf diese Weise lässt sich Zeit bei der Prototypenfertigung und teuren EMV-Messungen einsparen, um im Idealfall nur die Endabnahme in der EMV-Messkammer durchzuführen.

### EMV-Messkammer nur für die Endabnahme

Zum Beispiel ist mit der Simulation leicht erkennbar, dass in dem betrachteten SEPIC-Wandler die Störungen bis circa 10 MHz durch Gegentaktmoden bestimmt sind. Dagegen dominiert bei höheren Frequenzen die Gleichtaktmode, was wiederum impliziert, dass bei den höheren Frequenzen der ganze DC-DC-Wandler zusammen mit der Last als Monopolantenne gegenüber dem Experimentiertisch wirkt und abstrahlt. Dieses wird speziell dann ein wichtiges Thema, wenn Kabelbäume ins Spiel kommen, da die Resonanzfrequenzen der ‚Antenne‘ dann leicht in den Zig-Megahertz-Bereich kommen.

Die Abstrahlung dieser Anordnung lässt sich in einer Feldsimulation mit ANSYS HFSS bestimmen, in der die Signale aus der Anlogsimulation als Anregungen verwendet werden. Des Weiteren können Gegenmaßnahmen wie Layoutveränderungen, andere Bestückungen, veränderte Ansteuerungen mit flacheren Schaltflanken oder Filtermassnahmen schnell in der Simulation untersucht und miteinander verglichen werden.

Der ANSYS Simplorer bietet des Weiteren die Möglichkeit, in einer Anlogsimulation die Schaltungen zusammen mit Reglern zu simulieren, die die Pulsweite regulieren. Dies ist speziell in der Leistungselektronik sehr nützlich, da auf diese Weise schnell verschiedene Lasten untersucht werden können oder bei Wechselrichtern dies auch ein bestimmender Faktor für die Emissionen ist.

In diesem Teil der Artikelserie wurden die Möglichkeiten der ANSYS Electromagnetics Suite zur Untersuchung von Störsignalen leitungsgebundener Störungen in leistungselektronischen Schaltungen aufgezeigt. Diese Methodik beschränkt sich nicht nur auf die Leistungselektronik und ist auch die Grundlage zur Berechnung von abgestrahlten Emissionen.

Im dritten und letzten Teil dieser Artikelserie, in Ausgabe 05 am 03. März, wird auf die ANSYS-Lösungen für die Bewertung von Digitalelektronik mit Hilfe von SIwave eingegangen und ein Ausblick auf die Bewertung der Störepfindlichkeit gegenüber Einstrahlung gegeben. // SG

CADFEM

+49(0)8092 70050