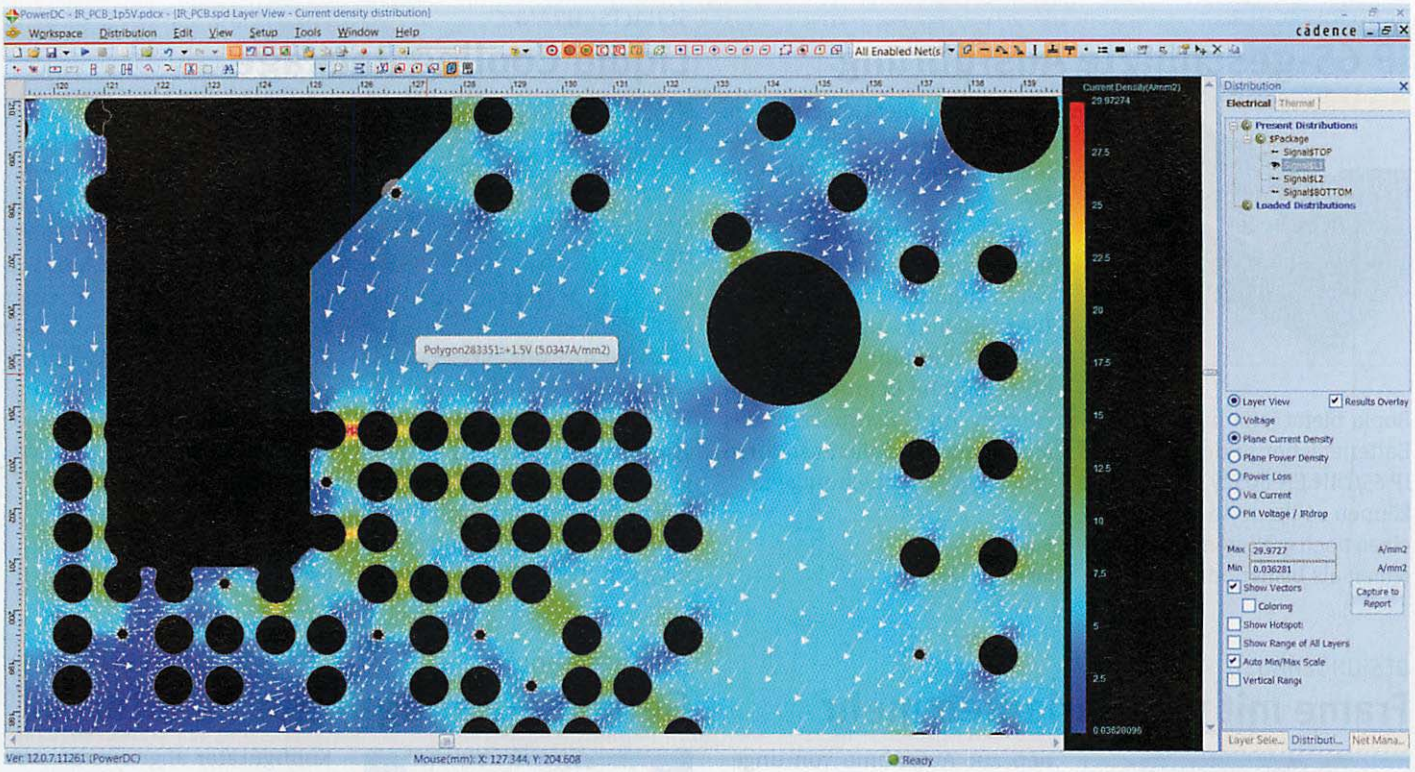

Bild 1: *Ergebnis der PI-Analyse ist die Stromdichte und Stromrichtung*

Leiterplatten für Hochstromanwendungen

Durch die niedrigen Versorgungsspannungen der Digitaltechnik fließen auf der PCB Ströme bis zu 50 A. Um diese hohen Stromstärken sicher zu transportieren, bedarf es ausgefeilter Techniken.

DIRK MÜLLER *

Bei Hochstromanwendungen denkt man im ersten Moment an IGBT-Schaltungen in der Leistungselektronik, die große Motoren ansteuern. Aber dieses Denken in Schubladen ist leider vorbei. Mit fortschreitender Miniaturisierung und Reduktion der Versorgungsspannungen in Digitalschaltungen steigen auch hier die Ströme für die einzelnen Komponenten. Die Designregeln aus der 200-Ampere-Liga auf Leiterplatten lassen sich aber auch auf normale FPGA- und Mikrocontroller-Schaltungen übertragen.

Auch bei hohen Strömen gilt das Ohmsche Gesetz, dass den Zusammenhang von Strom, Spannung und elektrischem Widerstand beschreibt. Für den elektrischen Verbraucher sind die Wert des Stroms und der Spannung wichtig und müssen in vorgegebenen Toleranzen anliegen. Die Zuleitung über die Leiterplatte darf also keinen zu großen Widerstand haben, damit nicht zu viel Energie in Wärme umgewandelt wird und es zu Spannungseinbrüchen am Verbraucher kommt. Bei Gleichstromanwendungen berechnet sich der Widerstand aus der Leitungslänge geteilt durch das Produkt aus elektrischer Leitfähigkeit und Leitungsquerschnitt.

Leider ist auch noch die Temperaturabhängigkeit des Widerstands auf der Leiterplatte über den elektrischen Temperaturkoeffizienten (α) zu berücksichtigen. Damit ist die Formel nichtlinear und die Gültigkeit von Faustformeln ist eingeschränkt. Hierbei spielen die Umgebungstemperatur und die Eigenerwärmung der stromdurchflossenen Leiterbahn eine wichtige Rolle. Die Berechnung des Widerstandes erfolgt gemäß der Formel $R_t = R_{20} [1 + \alpha (t_{real} - 20)] [\Omega]$. In der Theorie sehen die Formeln zwar einfach aus, aber in der Praxis sind Leitungsquerschnitte für Hin- und Rückstrom keine einfachen geometrischen Strukturen. Für eine exakte manuelle Berechnung über Formeln müsste für jede Änderung der Geometrie ein einzelner

*** Dirk Müller**
... ist Geschäftsführer der FlowCAD EDA-Software Vertriebs GmbH, Feldkirchen.

Teilwiderstand berechnet werden. Dies ist bei den Rückstrompfaden über Kupferflächen ohne Analysesoftware nicht möglich. Bei manuellen Abschätzungen werden häufig vereinfachte Formeln aus der IPC-2152A-Richtlinie (Standard for Determining Current Carrying Capacity in Printed Board Design) verwendet, die bei entsprechender Dicke der Kupferlagen einer Leiterplatte dann Werte für die minimale Breite für die Kupferverbindung angibt. Rückströme werden hierbei über spezielle Leitungen geführt oder die Masseflächen als ideale Flächen angenommen. Diese Ergebnisse der Faustformeln werden aber zusätzlich mit hohen Sicherheitsmargen ausgestattet, um nichtlineare Effekte und ein Wärmespreizung auf der Leiterplatte von anderen Strömen zu kompensieren. Das führt in der Regel zu überdimensionierten Leitungsbreiten und zu einem zu hohen Platzbedarf auf der Leiterplatte.

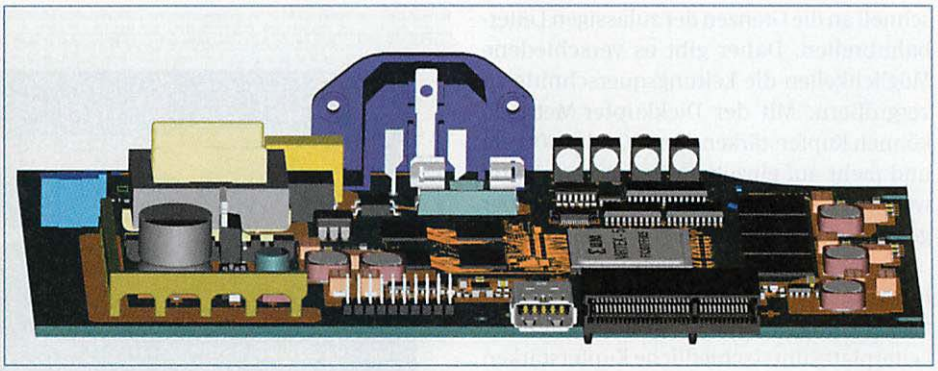

Bild 2: *Unten links ist eine Hochstromschiene auf der Leiterplatte integriert*

Aussparungen der PCB werden in der Rechnung berücksichtigt

Die echten Verhältnisse der Stromdichteverteilung auf Leiterplatten lassen sich mit 3D-Field-Solvern exakt analysieren und anzeigen. Mit dem 3D-Field-Solver von Sigrity PowerDC werden die elektrischen Verlustleistung der Verbraucher, der Strom über die Zuleitung und der Rückstrompfad über Versorgungslagen zu einer Simulation herangezogen.

Der Solver erstellt über finite Elemente (FEM) eine elektrische Ersatzschaltung die sowohl die Zuleitungen als auch die Kupferflächen berücksichtigt. Dabei werden Aussparungen wie Bohrungen, Wärmefallen, Trenngräben und Durchkontaktierungen in die detaillierten Rechenmodelle einbezogen. Als Ergebnis erhält man eine numerische und grafische Auswertung, wo es zu sogenannten Hotspots kommt. An diesen Hotspots ist der elektrische Widerstand höher und es kommt zu einem Abfall des Spannungspotenzials (IR-Drop) und zu lokaler Erwärmung. Die Software berücksichtigt dabei die thermische Leitfähigkeit von Isolationsmaterial (z.B. FR4) und dem elektrischen Leiter (z.B. Kupfer). Es lassen sich die exakten Spannungswerte und Temperaturen an jedem Punkt der Leiterplatte ablesen. Aus diesen Erkenntnissen der Simulation lassen sich dann geometrische Designregeln, wie etwa eine minimale Leiterbahnbreite für die Zuleitungen ableiten, die mit einer Online-Prüfung im PCB-Layout-System geprüft werden. An den Stellen in den Kupferflächen an denen es zu Hotspots kommt, kann die Struktur der Fläche oder die geänderte Anordnung von Durchkontaktierungen manuell geändert werden.

Widerstände sind frequenzabhängig

Durch die niedrigen Versorgungsspannungen in der Digitaltechnik kommt es heute auch bei großen FPGAs oder Mikroprozessoren zu hohen Versorgungsströmen, die in den Bereich von 30 bis 50 A gehen. Das Prinzip des Ohmschen Gesetzes gilt auch hier, nur ist der Widerstand frequenzabhängig. Es muss also mit der Impedanz des Versorgungssystems an jeder Entnahmestelle (Vcc-GND-Kombination) gerechnet werden. Die Frequenzabhängigkeit erhöht die Komplexität der Simulation erheblich.

Sigrity PowerSI und SystemSI verfügen hier über patentierte Verfahren, die dennoch in akzeptabler Zeit exakte Ergebnisse liefern, die Sign-Off-Qualität haben. Die Impedanz eines Versorgungssystems wird durch die verschiedenen Bauteile bestimmt, die zur Stabilisierung dienen. Dazu gehören neben dem spannungsreguliertem Netzteil (VRM) auch die Abblockkondensatoren mit Ihren unterschiedlichen Resonanzfrequenzen und ESR-Werten (equivalent series resistance). Aber auch zwei Versorgungslagen, die nur durch eine 50 oder 100 µm dicke Isolationsschicht getrennt sind und so eine Art Plattenkondensator bilden, werden bei der Extraktion der Layout-Geometrie und dem Lagenaufbau erkannt und entsprechend bei der Berechnung berücksichtigt.

Techniken, um hohe Ströme auf Leiterplatten zu transportieren

Um hohe Ströme ohne Erwärmung zu ermöglichen, ist entsprechender Leitungsquerschnitt erforderlich. Auf Standard-Leiterplatten mit 35 µm Kupferdicken kommt man

schnell an die Grenzen der zulässigen Leiterbahnbreiten. Daher gibt es verschiedene Möglichkeiten die Leitungsquerschnitte zu vergrößern. Mit der Dickkupfer-Methode können Kupferstärken von 100 oder 400 µm und mehr auf einzelnen Lagen verarbeitet werden. Dabei sind die Kupferstärken auf der gesamten Lage gleich dick.

In einer Kombination von Dickkupfer in Hochstrom-Bereichen und Feinleitertechnik, also Leistung und Logik, können auf einer Leiterplatte unterschiedliche Kupferstärken auf einer Lage kombiniert werden. Hierzu sind spezielle Lagenaufbauten für Anwendungen im Strom-Management möglich. Diese Kombination bietet nicht nur Kostenvorteile durch weniger Logistikaufwand, sondern auch durch den Wegfall von Steckverbindern und Kabeln und hohe Zuverlässigkeit.

Mit der Wirelaid-Technologie, die durch das Unternehmen Jumatech entwickelt wurde, können an definierten Bereichen mit im Inneren der Leiterplatte verlegten Flachdrähten die Leiterbahnquerschnitte vergrößert werden. Der Vorteil ist, dass sich stromführende Leitungen auf verschiedenen Lagen kreuzen können und der Platzbedarf minimal ist, somit bleibt viel Platz für andere Bauteile. Die Gesamtkosten der Leiterplatte werden durch den minimalen Platzbedarf gesenkt, weshalb diese Technologie auch in kostensensitiven Anwendungen wie beispielsweise in Kraftfahrzeugen oder der Automatisierungselektronik mit hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Gewicht eingesetzt wird.

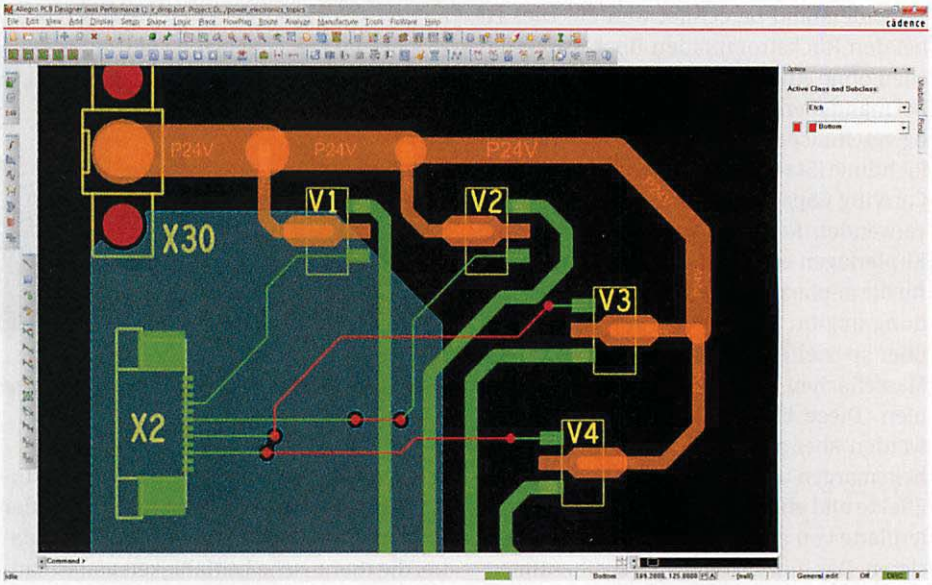

Bild 3: *Anpassung der Leiterbahnbreite entsprechend der Stromstärke*

Hochstromschienen in die PCB einschrauben oder einpressen

Für spezielle Anwendungen, bei denen hohe Temperaturen abgeführt werden sollen, gibt es auch die Möglichkeit Materialien als Isolator zu verwenden, die eine hohe thermische Leitfähigkeit bei gleichzeitig guter elektrischer Isolation bieten. Zusätzlich können Metallplatten aus Aluminium oder Kupfer auf der Unterseite als integrierter Kühlkörper angebracht werden. Diese 1-, 3- oder 5-lagigen Leiterplatten werden häufig für Motorsteuerungen oder DC/DC-Wandler verwendet.

Es gibt auch die Möglichkeit, Hochstromschienen in die Leiterplatte einzuschrauben bzw. einzupressen. Diese lasergeschnittenen Strukturen haben die Ähnlichkeit mit Zäunen, wobei in der Metallplatte der Strom fließt, der über mehrere Stützen zugeführt wird. Bei solchen Konstruktionen ist aber die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Leiterplatte und der Stromschiene zu berücksichtigen und eine entsprechend sichere Befestigung mit angepassten Kontaktierungslöchern zu beachten.

Im OrCAD oder Allegro PCB Editor ist es möglich, auch Teilabschnitten von elektrischen Netzen unterschiedliche Regeln zuzuweisen. So kann zum Beispiel über eine Schaltungssimulation mit PSpice der Strom in jedem Teilstück einer Zuleitung zu mehreren Verbrauchern berechnet werden. Adäquat lassen sich den Teilstücken der Zuleitung auch unterschiedliche Leiterbahnbreiten zuweisen. Das Tool achtet über den Online-DRC-Check darauf, dass die Leiterbahnbreiten eingehalten werden.

Bei Hochstromanwendungen kommt es häufig vor, dass eine dünne Messleitung (Sense) vom Verbraucher zurück zur Stromversorgung geführt wird. Mit dieser Leitung wird der Spannungsabfall zum Verbraucher gemessen und zur Regelung verwendet. Diese Rückleitung ist im selben elektrischen Netz und es muss vom Constraint Manager eine Verdrahtungsreihenfolge (Stromquelle-Verbraucher-Messung) eingehalten werden. Über Net-Schedulung wird dies einfach definiert und online geprüft. Zusätzlich prüft der PCB Editor, ob die Messleitung einen vorgeschriebenen Mindestabstand zur Versorgungsleitung einhält (same Net DRC), damit sichergestellt wird, dass auch wirklich der Spannungswert am Verbraucher gemessen wird und nicht unterwegs an einer unbeabsichtigten Verbindung mit dem gleichen Netz. // KU

FlowCAD +49(0)89 45637770

InfoClick

- Die Sigrity Power Integrity Suite von Cadence
- Mehr zu Allegro PCB Designer von Cadence

www.elektronikpraxis.de **InfoClick** 3824940

PRAXIS WERT

Design & Fertigung sind interdisziplinär

Ansprüche an den Komfort und die Energiebilanz von Geräten werden bei gleichzeitiger Miniaturisierung immer höher, daher kommen immer mehr elektronische Regelungen für hohe Ströme zum Einsatz. Kaum ein elektronisches Gerät kommt heute ohne eine Leiterplatte mit elektronischer Steuerung aus. Es werden hohe Ströme der Steuerplatine zu- und abgeführt. Man benötigt elektrische Verbindungen mit möglichst konstanten und geringen Widerständen, um Leistungsverlust und Erwärmung gering zu halten. Bei hohen Strömen ist die Sicherheit, insbesondere die Brandgefahr bei Kontaktstörungen zu berücksichtigen. Befindet sich das Gerät in Innenräumen, so muss die Gefahr der Freisetzung von Schadgasen durch Überhitzung ausgeschlossen werden.