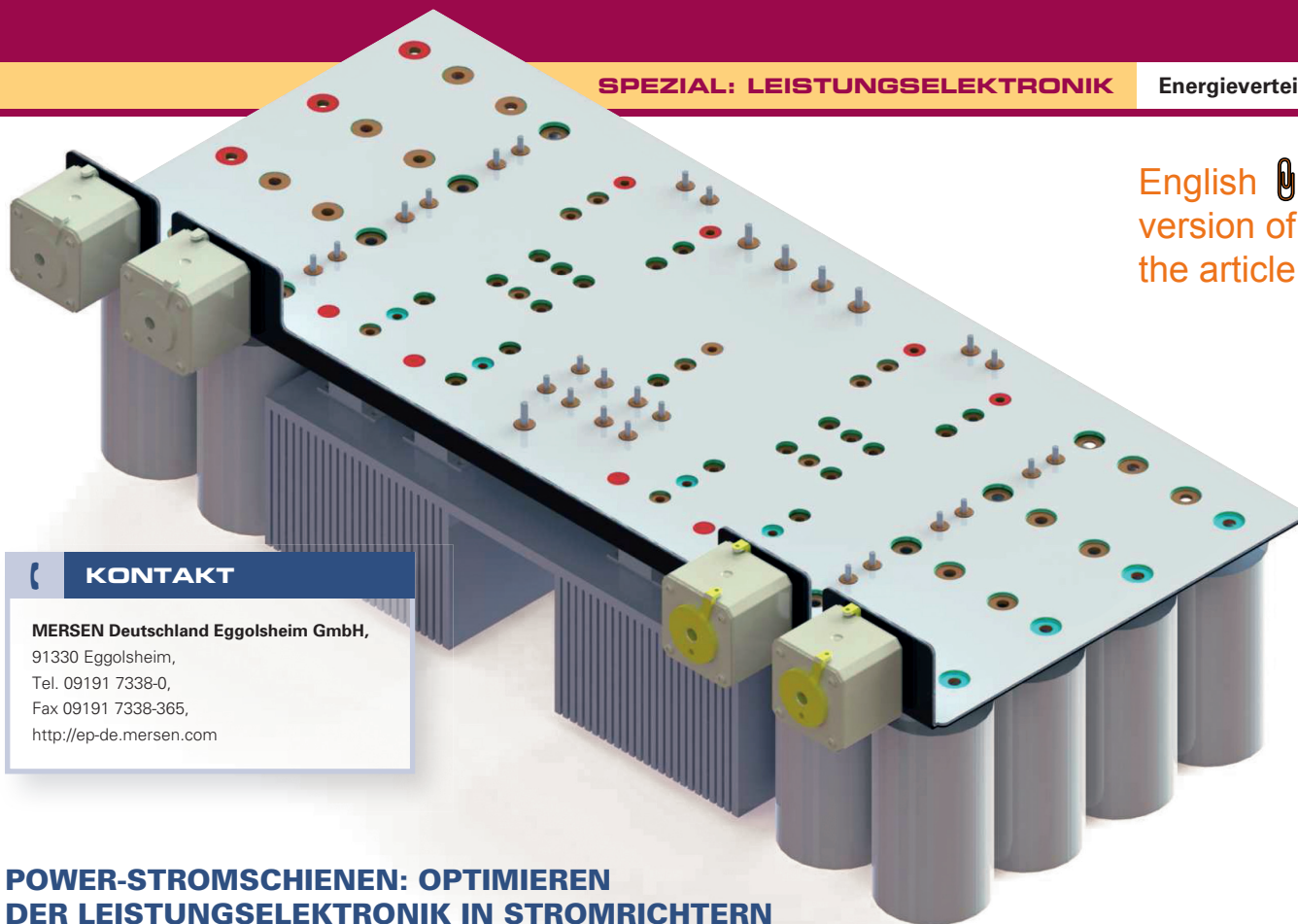


English   
version of  
the article



## KONTAKT

MERSEN Deutschland Eggolsheim GmbH,  
91330 Eggolsheim,  
Tel. 09191 7338-0,  
Fax 09191 7338-365,  
<http://ep-de.mersen.com>

## POWER-STROMSCHIENEN: OPTIMIEREN DER LEISTUNGSELEKTRONIK IN STROMRICHTERN

# Freie Fahrt für Strom und Wärme

**Höhere Schaltfrequenzen führen in Stromrichtern unweigerlich zu mehr Schaltverlusten – es sei denn, man ist in der Lage, parasitäre Induktivitäten im Gleichstromkreis auf ein Minimum zu reduzieren. Laminierte Stromschienen und Kühleinrichtungen spielen dabei eine Schlüsselrolle und sorgen dafür, dass die Leistungshalbleiter im System kontrolliert arbeiten können.**

JEAN-FRANCOIS DE PALMA

In der Leistungselektronik mit hohen Strömen bedarf es einerseits einer Energieverteilung mit möglichst geringer Systeminduktivität, um IGBTs sicher und effizient einsetzen zu können. Andererseits sind Entwicklungsingenieure jedoch aus thermischen Gründen gehalten, die Leistungshalbleiter mit ausreichend Abstand zu platzieren – was aufgrund der Leiterlängen wiederum unerwünschte Streuinduktivitäten verursacht. Zwar wurden Dämpfungsschaltungen entwickelt, um deren negative Auswirkungen zu verringern; dennoch bleibt es eine Herausforderung, eine niedrige Induktivität mit geringen Kosten und einer einfachen Schaltung zu kom-

binieren: Sobald die IGBTs so auf der Kühlplatte platziert sind, dass die Wärme gut abgeleitet wird, müssen sie so verschaltet werden, dass ein Verteilpfad mit der geringstmöglichen Systeminduktivität entsteht.

### Seite an Seite ist nicht ideal

Der übliche Weg zur Verteilung elektrischer Energie in einem konventionellen Schaltkreis ist ein Kabelbaum. Er ist kostengünstig, leicht zu beschaffen, kann



## WISSENSWERT

**Dimensionieren der Leiterquerschnitte.** Die höchste zulässige Stromdichte von Kupfer wird üblicherweise mit  $5 \text{ A/mm}^2$  angegeben. Um den notwendigen Querschnitt in  $\text{mm}^2$  für einen gleichmäßigen Dauerstrom zu errechnen, muss man lediglich den Durchlassstrom auf der Gleichstromseite durch diesen Wert teilen. Unter diesen Bedingungen wird sich Kupfer ungefähr um  $30 \text{ °C}$  gegenüber der Umgebungstemperatur erwärmen. Dies ist eine einfache Methode, um die Leitfähigkeit einer Stromschiene aus Kupfer unterhalb von  $300 \text{ A}$  abzuschätzen. Für eine exakte Dimensionierung der Leiterquerschnitte stehen die Power-Electronics-Spezialisten von Mersen zur Verfügung.

für die spezielle Anwendung hergestellt werden und bietet sogar eine gewisse Flexibilität. Beim Einsatz in IGBT-Stromrichtern ist allerdings die hohe Eigeninduktivität der Kabel im DC-Schaltkreis störend. Der Vergleich der Eigeninduktivität eines Leiters von kreisförmigem Querschnitt mit der einer Stromschiene hat ergeben, dass die Stromschiene zur Verringerung von Streuinduktivitäten besser geeignet ist. Aufgrund der Unterschiede in der Geometrie beträgt der Platzbedarf der soliden Stromschiene außerdem – im Vergleich zum runden Drahtbündel – oft nur ein Zehntel bis die Hälfte, womit sich Kosten und Gewicht verringern lassen.



#### DER AUTOR

**JEAN-FRANCOIS DE PALMA** ist VP Research & Development und Power Electronics Specification Team Manager bei Mersen in Saint-Bonnet-de-Mure/Frankreich.

Auf der Gleichstromseite der Schaltung ist, wenn man sich Strömen von 150 A nähert, die Verwendung von laminierten, mehrlagigen Verbindungen die Lösung, um hohe Leitungskapazität, niedrige Streuinduktivität, geringe Baugröße und Sicherheitsaspekte in Hochfrequenzanwendungen miteinander zu kombinieren. In gängigen Versorgungstopologien für IGBT-Module werden heute immer noch IGBTs mit Stromschiene Seite an Seite verbunden. Allerdings bietet diese Art der Verbindung nicht die niedrigste effektive Gesamtinduktivität des Verteilungswegs. Lediglich ein Teil der Induktivitäten hebt sich an den benachbarten

**Bild 1. Mersen hat auf Kundenwunsch laminierte Stromschiene konstruiert, die bei der Entwicklung von Stromrichtern helfen, die geringstmögliche Systeminduktivität zu erzielen**



montierten IGBT-Modul zu bringen. Diese Art von losen Durchführungen liegt jedoch nur selten ideal flach an der Stromschiene, was zu einem erhöhten Übergangswiderstand am Kontakt führen kann.

#### Plus- und Minusleiter gleichmäßig separiert

Mersen hat auf Kundenwunsch laminierte Stromschiene konstruiert (**Titelbild** und **Bild 1**), die in der Lage sind, die niedrigste effektive Induktivität eines Systems zu erreichen. Der Schlüssel zum Erfolg ist eine dünne Isolierschicht zwischen Plus- und Minusleiter. Die Platten und Isolierschichten werden unter Hitze und Druck zusammengefügt; dabei kommt es darauf an, kleinste Abstände exakt einzuhalten. Diese Konstruktion führt zum größtmöglichen Ausgleich der Induktivität in der direkten Stromleitung, denn je enger die Schienen zusammengefügt werden und je konstanter ihr Abstand über die gesamte Länge der Schaltung bleibt, umso größer wird der Ausgleich der Induktivitäten.

Um die Anzahl der Bauteile im System weiter zu reduzieren, können die Wechsellspannungsleiter auch noch in die Stromschiene laminiert werden. Das beeinflusst zwar nicht die Induktivität, aber es verbessert den gesamten Entwurf.

Kanten der Leiter gegenseitig auf. Um die Gesamtinduktivität zu minimieren, müssen die Stromschiene direkt aufeinander liegen – und nicht nebeneinander.

Entwickler können die Gesamtinduktivität weiter verringern, wenn sie die flachen DC-Plusleiter auf die flachen DC-Minusleiter legen und mit einem dünnen Isolator trennen. So wird die größtmögliche Oberfläche für eine gegenseitige Aufhebung des magnetischen Flusses geschaffen. Bei der Konstruktion von Prototypen wird diese Methode häufig angewandt, um die elektrischen Eigenschaften der Bauteile im Stromrichter mittels geringerer Induktivität zu verbessern. Separate Durchführungen können auf der Unterseite der Kontaktfläche der oben liegenden Stromschiene angebracht werden, um die Leistung zum darunter

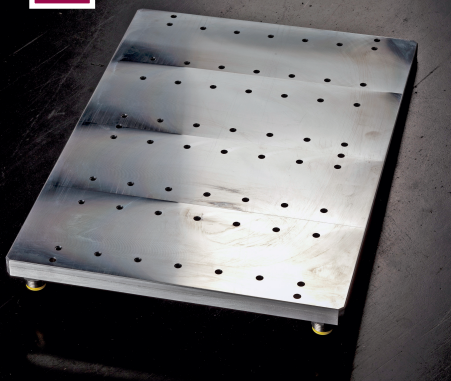


#### FAZIT

**Fertigungskosten im Blick behalten.** Bei der Entwicklung moderner Stromrichter für die Leistungselektronik reicht das Aufgabenfeld der Ingenieure weit über die IGBTs hinaus: Sie haben einen Gesamtaufbau zu berücksichtigen, der auch die Kühleinrichtungen, Kondensatoren sowie Schutzmaßnahmen umfasst. Das wichtigste Ziel ist es nach wie vor, die Stromrichter bis zur maximalen Leistung auszureizen – aber Kosten und Herstellbarkeit sind weitere entscheidende Faktoren, die in den Entwurf einfließen müssen.

Eine laminierte Stromschiene hilft, die geringste Systeminduktivität zu erreichen. Darüber hinaus lassen sich alle Komponenten der Leistungselektronik in eine Struktur integrieren und der Wirkungsgrad verbessern. Außerdem ist diese Art der Leistungsverteilung sehr zuverlässig – wegen der geringen Baugröße und der festen, markierten Anschlüsse. Die Wahrscheinlichkeit von Montagefehlern und Ausfällen ist geringer als bei Kabelbäumen, weil weniger Komponenten und Kabel verbaut werden. Die vergleichsweise geringe Baugröße führt zu verminderter parasitärer Induktivität und weniger Leistungsverlusten; damit lässt sich der Stromrichter mit höherer Frequenz betreiben, und es werden kleinere Kondensatoren und passive induktive Komponenten gebraucht.

2



**Bild 2. Die Kühlplatte dient zur Entwärmung, aber auch als Trägerelement; außerdem beeinflusst sie den Schaltplan von Stromrichter und Stromschiene**

Wenn die Stromschienen laminiert sind, kann die stabile Struktur mehrere Hundert Kilopond Spaltkräfte und mehrere Tausend Volt Spannung aushalten. Die richtige Auswahl der elektrischen Verbindung zu den Leistungskomponenten entwickelt sich zu einer Wahl zwischen verschiedenen Techniken zur Metallverarbeitung, wie Prägen, Löten von Leitungsdurchführungen, Einpressen oder Verwenden gestanzter Laschen.

Wenn man die Kontakte in die Stromschiene integriert, lässt sich ein geringerer Übergangswiderstand zwischen dem Anschluss und der Stromschiene erreichen. Kupferlegierungen (siehe auch **Ⓢ-Kasten**) sind aufgrund ihres geringen Widerstands und der niedrigen Kosten der Standard – und auch die am häufigsten empfohlenen Metalle für laminierte Stromschienen mit IGBTs. Der Einsatz von Aluminium wird dann notwendig, wenn das Gewicht eine Rolle spielt. Andere Legierungen werden gelegentlich wegen ihrer mechanischen Eigenschaften verlangt, dazu zählen Messing, Kupfer-Beryllium und Phosphorbronze.

### Welche Isolierung ist geeignet?

Die richtige Wahl des Isoliermaterials stellt die niedrigste Gesamtinduktivität im laminierten Bauteil sicher. Ein verbreiteter Irrtum beim Auslegen einer laminierten Stromschiene ist es, dass für hohe Spannungen ein dicker Isolator nötig sei. Aber es muss ausreichend Isolationsmaterial über die Kanten hinaus vorhanden sein (Luft- und Kriechstrecken), um

eine Funkenbildung zwischen den einzelnen Lagen auszuschließen. Die Spannung entscheidet darüber, welche Abstände in der laminierten Stromschiene eingehalten werden müssen. Wenn die Platten laminiert sind, muss der Entwickler entscheiden, ob

- die Kanten offen gelassen werden,
- die Kanten vergossen werden,
- die Kanten mit Epoxidharz versiegelt werden,
- eine Faserverstärkung der Kanten nötig ist.

Sobald die Abmessungen des Leiters und die Isolierung festgelegt sind, muss der Entwickler entscheiden, wie

- die Leistung zum IGBT-Modul geleitet und von dort weitergeführt wird,
- der Schaltplan aussieht.

Wenn der Bauplan für die Elektronik und damit die von den IGBTs entwickelte Wärme feststeht, sind Kühleinrichtung und Stromschienen die ersten passiven Elemente, die ausgewählt werden. Dabei existieren Synergien zwischen beiden. Die Kühlplatte (**Bild 2**) löst die thermischen Anforderungen, dient aber auch als Träger für den Leistungsschalter im Stromrichter. Hinzu kommt, dass das thermische Verhalten der Kühlplatte zusammen mit der Wärmeentwicklung eines jeden Leistungshalbleiters für den Schaltplan des Stromrichters und der Stromschienen entscheidend ist.

Es stehen verschiedene Methoden zur Auswahl, um die IGBT-Module mit der laminierten Stromschiene zu verbinden. Wenn die DC-Leiter in den Aufbau integriert sind, kann der Entwickler ein-

fach leitende Durchführungen oder Abstandshülsen unter der Kontaktfläche der Stromschiene zu den IGBTs einbauen. Die unterschiedlichen Abmessungen der Abstandshülsen können aber beim Zusammenbau des Stromrichters zu Verwechslungen führen. Dieses Problem können gelötete oder geprägte Hülsen lösen. Werden die notwendigen Kontakte in die laminierte Stromschiene integriert, stellt der Entwickler sicher, dass gute Verbindungen zu den IGBTs bestehen, die nur einen geringen Spannungsabfall verursachen.

Die DC-Leiter können bis zur zweifachen Materialdicke geprägt werden, und die Prägung lässt sich für unterschiedliche Abstände der IGBTs auch geschlitzt ausführen. Die Leitfähigkeit der Prägung vermindert sich, wenn der Leiter zu stark gedehnt wird. Eingelötete Buchsen können nach oben und unten herausragen, um die Kriechstrecken von IGBTs zu überwinden und Dämpfungsschaltungen oder Antriebskreise anzuschließen. Laschen mit Schlitzlötlöchern können ebenfalls verwendet werden, um die IGBTs miteinander zu verbinden. Die Gesamtinduktivität nimmt allerdings bei größerem Abstand der DC-Stromschienen zu.

Der Entwickler muss schließlich noch die Entscheidung treffen, ob ein modularer Aufbau oder ein Systemansatz in Frage kommt. Eine modular aufgebaute Stromschiene enthält mehrere einzelne laminierte Schienen für jedes Phasenmodul des Stromrichters. *(ml)*