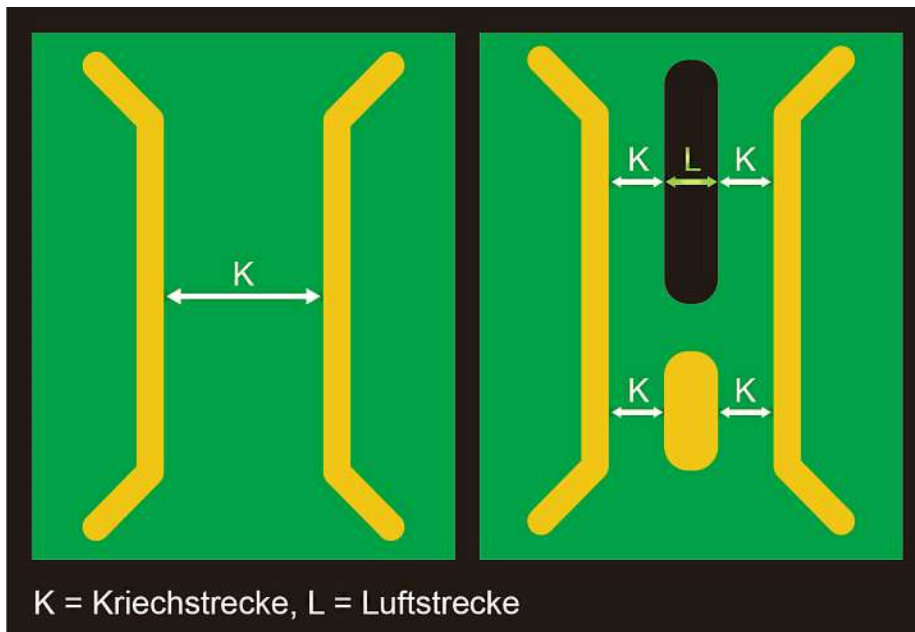


# Luft- und Kriechstrecken auf PCBs für Leistungselektronik

Um Leitungselektronik sicher zu machen, müssen bei hohen Potentialen die Leiterabstände von z.B. IGBTs oder MOSFETs ausreichend groß sein, um Über- oder Durchschläge zu unterbinden.

DIRK MÜLLER \*



**Bild 1:** Rechts ist zu sehen, wie Kriechstrecken durch eine Luftstrecke verlängert oder durch eine Insel verkürzt sind.

Die Sicherheitsvorschriften zu Luft- und Kriechstrecken und Durchschlagsfestigkeit sollen in erster Linie Menschenleben schützen, aber auch die technischen Systeme und Einrichtungen. Dazu gibt es spezielle Normen zur Einhaltung von Sicherheitsabständen bei hohen Spannungen. Zu den Anwendungen zählen Industrieantriebe, Aufzüge, Fahr- und Flugzeuge und auch Medizintechnik. Die Einhaltung der Luft- und Kriechstrecken sowie der Durchschlagsfestigkeit ist wichtig, da nicht nur die Elektronik zerstört werden kann. Durch den Ausfall oder eine Fehlfunktion kann es zu katastrophalen Folgen. Wenn es um Men-

schenleben geht, haben die Themen Haftung und Versicherungsschutz für die Hersteller eine wesentliche Bedeutung.

Die Zahl der Entwicklungen von elektrischen Antrieben steigt durch die Trends E-Mobilität, Automatisierung und erneuerbare Energien rapide an und es drängen neue Anbieter auf den Markt. Steuergeräte für Elektromotoren werden nicht mehr nur stationär, sondern auch mobil in Fahrzeugen eingesetzt. Um die Effizienz der Steuergeräte zu optimieren werden Leistungshalbleiter wie IGBTs, MOSFETs oder SiC-Dioden mit höheren Spannungen verwendet. Je nach Anwendung gibt es unterschiedliche Maximalwerte für Niederspannung, Mittelspannung und Hochspannung. Um Personen oder Anlagen insbesondere im Fall einer Überspannung vor der Auswirkung elektrischer Fehlfunktion zu schützen, ist eine ausreichende Bemessung der Luft- und Kriech-

strecken sowie der Durchschlagsfestigkeit erforderlich.

Eine Luftstrecke ist die kürzeste Entfernung zwischen zwei elektrischen Leitern durch die Luft. Wenn eine hohe Spannung an beiden Leitern anliegt, wird die Luft dazwischen ionisiert und leitfähiger. Je nach Stoßspannung, Verschmutzung, Dauer und Luftdruck, kann es zu einem Kurzschluss durch die Luft kommen und wir können einen Lichtbogen sehen. Beim Lichtbogen kommt es zu hohen Temperaturen, einem elektromagnetischen Feld und einer ungeplanten Übertragung von Ladung zwischen den beiden Leitern. Diese Einflüsse können die Elektronik oder benachbarte Bauteile zerstören. Maßgebend für die Dimensionierung der Luftstrecken sind Bemessungsstoßspannungen, die sich aus der Überspannungskategorie und aus der anliegenden Spannung ableiten.

Bei einer Kriechstrecke kommt es zum Kurzschluss zwischen zwei Leitern an der Oberfläche des Isolationsmaterials, wenn die Effektivspannung überschritten ist. Im Fall von Leiterplatten „kriecht“ der Strom an der Oberfläche vom FR-4-Material, auf dem Schutzlack, auf Bauteilen und Kabeln. Merke: Eine Kriechstrecke ist die kürzeste Verbindung entlang der Oberfläche des Isolators zwischen den Leitern.

Die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck beeinflussen die Überschlagsspannung durch die Luft und die Wahrscheinlichkeit eines Lichtbogens. Befeuchtung, Öle und Staub lagern sich an den Oberflächen der Leiterplatte und Bauteile ab und verringern über die Zeit die Isolationsstrecken zwischen den Leitern.

Wenn der Abstand zwischen zwei Leitungen auf der Platine zu gering und die erlaubte Kriechstrecke unterschritten ist, kann zwischen den Leitungen ein Schlitz gefräst werden (Bild 1 rechts oben). Dann berechnet sich der erlaubte Abstand aus der Kombination von Luft- und Kriechstrecken. Mit der



\* Dirk Müller  
... ist Geschäftsführer bei FlowCAD,  
Feldkirchen.

Software NEXTRA wird der Abstand nicht nur auf einer Ebene geprüft. Da der Kriechstrom bei einer Fräsung, Bohrung oder Leiterplattenkante auch nach oben bzw. unten kriechen kann, müssen auch mögliche Spannungen zu Leitern auf anderen Lagen entlang der Oberfläche dreidimensional geprüft werden.

Kupferinseln, Befestigungsschrauben oder andere Leitungen, die sich zwischen den beiden Leitungen mit höherer Spannung befinden, verkürzen den Abstand (Bild 1 rechts unten). In den Normen werden leitende Elemente zwischen den betrachteten Leitern als Dreipunktproblem bzw. als Sprungstellen bezeichnet. Für eine Prüfung müssen alle Kombinationen und Wege am Rand von Löchern überprüft werden.

Der Wert für die Durchschlagsfestigkeit bzw. der notwendige Abstand für die erforderliche Luft- und Kriechstrecke ist insgesamt eine Funktion von Verschmutzungsgrad, Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Luftdruck, Überspannungskategorie, Frequenz, chemische Belastungen, Hydrolyse, mechanische Druck und Einsatzgebiet.

In diversen Normen wird über Sicherheit von stromführenden Teilen bei Niederspannungsanlagen gesprochen und es werden entsprechende Sicherheitsabstände definiert. Beispiele sind in der DIN EN 60 664-1/ VDE 0110 aufgeführt. In dieser Norm sind die einzuhaltenen Abstände zwischen leitenden Objekten definiert, um einen Kriechweg, einen Überschlag oder einen Durchschlag zu verhindern.

### Durchschlagsfestigkeit und der Temperatureinfluss

Jede Verunreinigung mit Gasen, Flüssigkeiten oder Feststoffen, die dazu führen kann, dass der elektrische Widerstand bzw. die Isolationsfähigkeit einer Trennstrecke

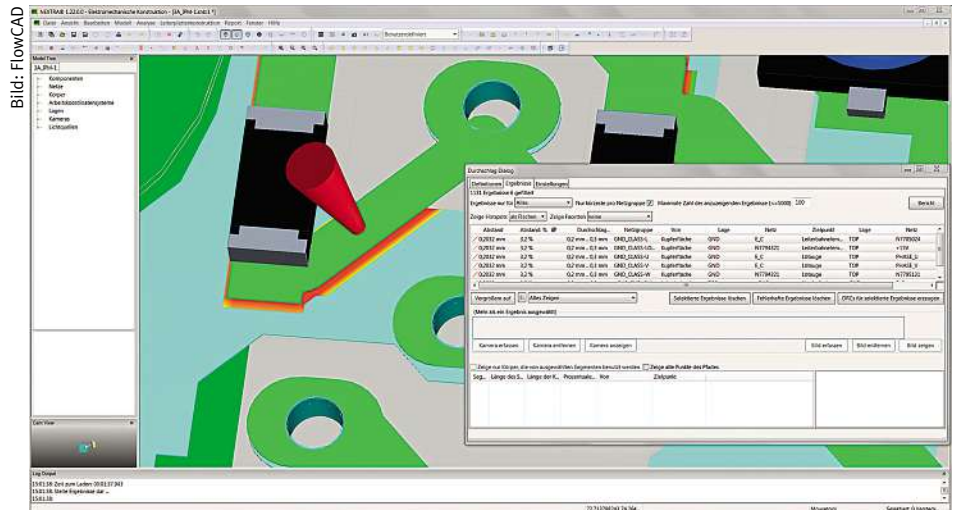


Bild 2: Die Auswertung von Bereichen mit zu geringer Durchschlagsfestigkeit in der Software NEXTRA.

reduziert wird, bezeichnet die Norm IEC 61010 als Verschmutzung. Die angegebenen Abstände sind je nach Verschmutzungsgrad in folgende Kategorien unterteilt:

- Verschmutzungsgrad 1 erlaubt keine oder nur geringe, jedoch nicht leitfähige Verschmutzung. Sie hat keinen Einfluss.
- Verschmutzungsgrad 2 ist eine leichte, übliche Verschmutzung, die durch gelegentliches Betauen oder Handschweiß leitfähig werden kann.
- Verschmutzungsgrad 3 ist eine Verschmutzung, die leitfähig ist oder durch Betauen leitfähig wird.
- Verschmutzungsgrad 4: Es tritt eine durch leitfähigen Staub, Regen oder Nässe hervorgerufene dauernde Leitfähigkeit auf (inakzeptabel für Isolierungen, die eine Schutzmaßnahme darstellen).

Die Durchschlagsfestigkeit eines Isolierstoffes beschreibt die maximale elektrische Feldstärke (kV/mm), bevor es zu einem Span-

nungsdurchschlag kommt. Das Leiterplattenmaterial FR-4 isoliert die übereinander angeordneten Lagen von Leiterplatten und hat eine Durchschlagsfestigkeit von etwa 13 kV/mm bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Überdies ist die Durchschlagsspannung bei vielen Stoffen nicht proportional zur Dicke des Isolators, da es insbesondere bei Gleichspannung zu inhomogener Feldverteilung kommen kann. Daher besitzen dünne Folien höhere Durchschlagsfestigkeiten als große Materialdicken. Dieser Effekt wird z.B. in Folienkondensatoren ausgenutzt. Die Durchschlagsfestigkeit ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Der Wert sinkt mit steigender Temperatur und steigender Frequenz und ist daher keine Materialkonstante. Zur Prüfung ist eine 3D-Simulation mit finiten Elementen erforderlich.

Im CAD Flow müssen die Abstände bereits im Layout und Lagenaufbau vorgesehen werden. Layout-Software prüft die Abstände

**ELEKTRONIK PRAXIS**  
Fachwissen-Newsletter  
www.elektronikpraxis.de/newsletter

**ELEKTRONIK PRAXIS** ist eine Marke der  
**VOGEL COMMUNICATIONS GROUP**

# Beilagenhinweis

Dieser Ausgabe liegen Prospekte der Firma  
**RCT Reichelt Chemietechnik GmbH & Co., Heidelberg**, bei.  
Wir bitten unsere Leser freundlichst um Beachtung.

über 30 Jahre

# HKR

Induktivitäten

**www.HKR.de**  
**+49 (7122) 82598-0**

**Bild 3:**

Hier weist die Software NEXTRA den Anwender auf zu dicht zueinander platzierte Stecker hin.

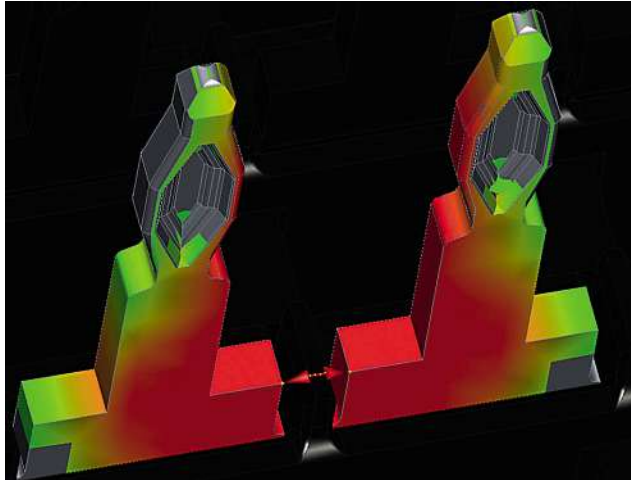


Bild: FlowCAD

dem ein Bereich identifiziert, der bei den gegebenen Input-Parametern wie Spannung, Material, Verschmutzung und Luftdruck problematisch sein könnte. Der Einfluss von Fertigungs- und Montagetoleranzen wird in NEXTRA beachtet. In Bild 3 ist zu sehen, dass die beiden Flächen eines Steckers durch Fertigungstoleranzen zu dicht platziert werden können. Solche Toleranzen lassen sich im Test an Prototypen nur zufällig erkennen.

### Zuverlässigkeit und Konformität erhöhen

Durch die Schaltungssimulation und Verifikation der Luft- und Kriechstrecken lässt sich die Zuverlässigkeit und Konformität mit den Normen verbessern. Das Testen von Durchschlag und Überslag im eingebauten Zustand mit unterschiedlicher Verschmutzung ist nur schwer möglich. In einem professionellen CAD Flow sollten die 3D-STEP-Modelle für Hochspannungsbauteile unterschiedliche Farbcodierungen für leitende und isolierende Materialien haben. Dann ist das Starten einer Luft- und Kriechstreckenanalyse zusammen mit der Netzliste, den Peak-Spannungen und Vorgaben über Verschmutzungsklassen einfach und schnell möglich. Der PCB Designer kann damit zuverlässige Schaltungen entwickeln und thermische Zerstörung durch Luft- und Kriechstrecken vermeiden.

Bild: University of Leicester



**Bild 4:** Beispiel einer Dendriten-Bildung (verästelter Fortsatz) an einem Isolator entlang der Kriechstrecke.

Die Isolationskoordination besteht aus einer Untersuchung der Luft- und Kriechstrecken und der Durchschlagfestigkeit. Eine Simulation kann alle kürzesten Wege mit allen Parametern berücksichtigen. Jedoch kann die Genauigkeit der Simulation nur so gut sein, wie es die Eingangsparameter sind. Ein Eingangsparameter ist die Verschmutzung, die nur verbal in vier Kategorien eingeteilt ist. NEXTRA behandelt deswegen Isolationsverletzungen als „problematische Bereiche“, die einer ingenieurmäßigen Endbeurteilung vorbehalten sind. Ein simpler kürzester Pfad tritt in der Realität meist nicht auf, da das Isolationsmaterial, elektrische Felder und Verschmutzungen nicht homogen sind. Bilder von Kriechstrecken haben fraktale Strukturen (Dendriten-Bildung, Bild 4). Daher muss der gesamte problematische Bereich einer ingenieurmäßigen Endbeurteilung unterzogen werden.

Eine Prüfung der Isolationsabstände ab 60 V sollte bereits im PCB Layout erfolgen, da dort alle Kombinationen und Fertigungstoleranzen simulierbar sind. Frühzeitig erkannte Schwachstellen lassen sich dann ohne Folgekosten beheben. // KU

FlowCAD/Mecadtron

meist nur auf einer Lage und ignoriert Inseln oder Fräsungen. NEXTRA ist eine Software, die Design-Daten aus unterschiedlichen eCAD-Systemen einlesen und dann eine normgerechte Prüfung der Leiterplatte durchführen kann. Es können auch Bauteilmodelle und Gehäuse-Design-Daten in NEXTRA über direkte bidirektionale Schnittstellen für alle wichtigen eCAD- und mCAD-Systeme eingelesen werden, um die Luftstrecken komplett zu verifizieren.

3D-STEP-Modelle für Bauteile lassen sich beispielsweise direkt aus Allegro oder OrCAD übernehmen und leitende oder isolierende Materialinformationen können über Farbcodes automatisch bezogen werden, ohne eine Zwischendatenbank anzulegen. Für die exakte geometrische Analyse mit finiten Elementen ist die Genauigkeit einstellbar.

### Problematische Spannungsspitzen

In der Automobilindustrie werden durch die neue Kfz-Generation von Elektro- und Hybridfahrzeugen Batteriespannungen von 400 V und sogar 850 V verwendet und in Invertoren ebenfalls höhere Spannungen angewandt. Als Hochvolt werden im Automobilsektor Spannungen oberhalb von 60 V bezeichnet. Die Unterscheidung der Spannungsclassen in Klein-, Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchstspannungen kommt aus der Installations- und Gebäudetechnik. Bisher wird in der Automobiltechnik lediglich nach Nieder- und Hochvolt unterschieden, um den Mechanikern in der Werkstatt einen besonderen Hinweis auf die elektrischen Gefahren zu geben. Hochvolt-Komponenten müssen durch Auslegung des Systems eine Spannungsfestigkeit entsprechend ISO 6469 aufweisen.

Frequenzumrichter und Schaltnetzteile belasten heute Isolationen stärker als früher,

denn Motoransteuerungen oder Netzteile verwenden pulswitengesteuerte Rechteckspannungen im Bereich von 20 kHz und mehr. Die dabei entstehenden Oberwellen haben Frequenzanteile bis weit über 50 MHz, und es entstehen z.B. durch Resonanzen und induktive oder kapazitive Kopplung Spannungsspitzen weit oberhalb der Betriebsspannung. Die hohen Schaltgeschwindigkeiten (du/dt) in der Leistungselektronik von z.B. MOSFETs oder IGBTs belasten erheblich die verwendeten Isolationsmaterialien.

Neben den schaltungsinternen Faktoren wie hohe Frequenzen, kommen beim Schalten mit Leistungshalbleitern noch externe Faktoren hinzu. Durch induktive Lasten, die geschaltet werden, oder durch die Kapazität angeschlossener Kabel, kommt es zu ungewollten Spannungsspitzen. Die maximalen Werte der Spannungsspitzen durch externe Faktoren lassen sich durch Schaltungssimulationen mit PSpice im Vorfeld ermitteln und als Peak-Spannung in den CAD-Daten erfassen und für Spannungsprüfungen verwenden.

Mechanische Toleranzen sind für eine Aussage über die Sicherheit zu berücksichtigen. Dabei wird nicht nur der kürzeste Pfad, son-