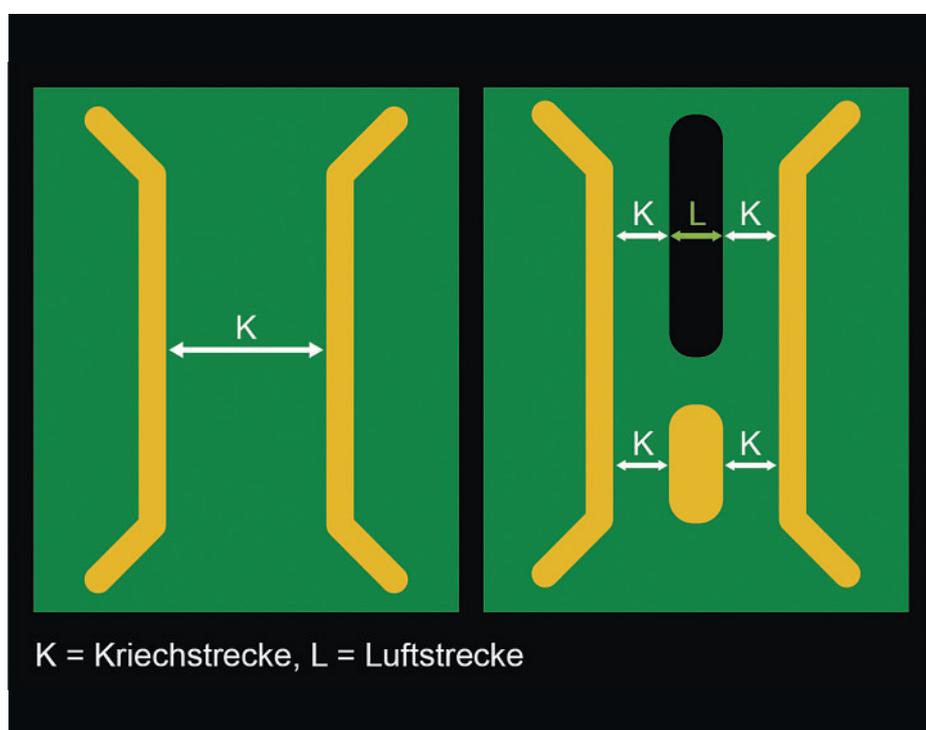


Luft- und Kriechstrecken auf Leiterplatten

Gefahr für Leib und Leben

Hohe Spannung stellt eine Gefahr für Leib und Leben, aber auch für Leiterplatten dar. Die Kraft der höheren Spannungen wird für elektrische Antriebe benötigt, doch diese Kraft kann auch zerstörerisch sein. Um Leitungselektronik sicher zu machen, müssen zwischen hohen Spannungspotenzialen die Abstände leitender Materialien gross genug sein, damit es nicht zu Über- oder Durchschlägen kommt.

» Simon Zubler



Kriechstrecken durch Luftstrecke verlängert oder durch Insel verkürzt.

Die Sicherheitsvorschriften zu Luft- und Kriechstrecken und zu Durchschlagsfestigkeit sollen in erster Linie Menschenleben schützen. Überall, wo Menschen transportiert werden oder deren Leben betroffen ist, gibt es spezielle Normen zur Einhaltung von Sicherheitsabständen bei hohen Spannungen. Zu den Anwendungen zählen Aufzüge, Fahr- und Flugzeuge, aber auch die 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 für den Menschen kommen. Wenn es um Menschenleben geht, haben die Themen

Haftung und Versicherungsschutz für die Hersteller eine wesentliche Bedeutung.

Unterschiedliche Maximalwerte

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, Mittelspan-

nung 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 Kriechstrecken sowie der Durchschlagsfestigkeit erforderlich.

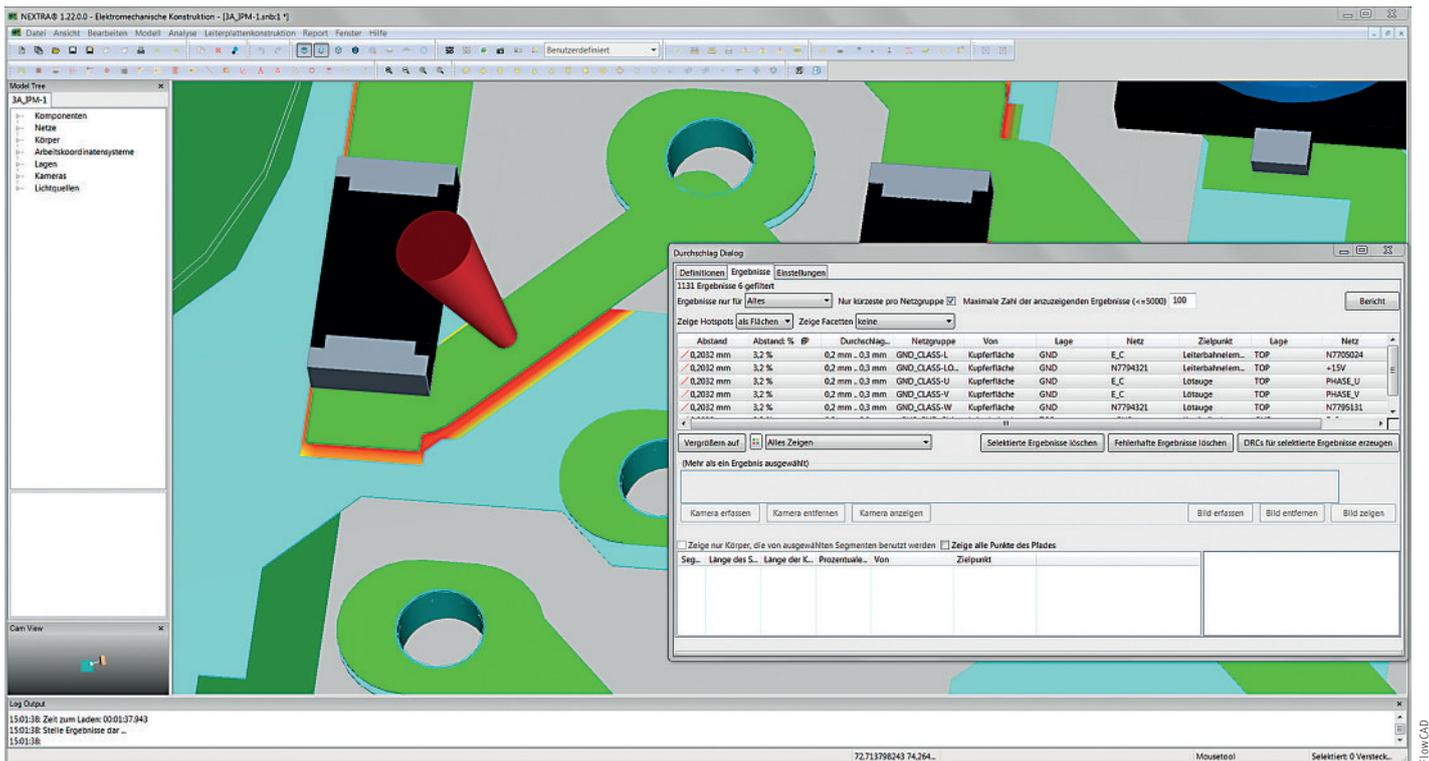
Was ist eine Luft- respektive Kriechstrecke?

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 es ist ein Lichtbogen zu 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, Schutzlack, von Bauteilen und Kabeln. Eine Kriechstrecke ist die kürzeste Verbindung entlang der Oberfläche des Isolators zwischen den Leitern.

Weitere Einflussfaktoren

Die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck beeinflussen die Überschlagsspannung durch die Luft und die Wahrscheinlichkeit eines Lichtbogens. Befeuchtung, Öle und Staub lagern



Auswertung von Bereichen mit zu geringer Durchschlagsfestigkeit.

sich an den Oberflächen der Leiterplatte und Bauteile ab und verringern über die Zeit die Isolationsstrecken zwischen den Leitern.

Der erlaubte Abstand

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. Dann berechnet sich der erlaubte Abstand aus der Kombination von Luft- und Kriechstrecken. Mit der Software Nextra wird der Abstand nicht nur auf einer Ebene geprüft. Da der Kriechstrom bei einer Fräsung, Bohrung oder Leiterplattenkante auch nach oben beziehungsweise nach 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. In den Normen werden leitende Elemente zwischen den betrachteten Leitern als Dreipunktproblem respektive als Sprungstellen bezeichnet. Für eine Prüfung müssen alle Kombinationen und Wege am Rand von Löchern überprüft werden.

Definierte Sicherheitsabstände

Der Wert für die Durchschlagsfestigkeit beziehungsweise der notwendige Abstand für die

erforderliche Luft- und Kriechstrecke ist insgesamt eine Funktion von:

- Verschmutzungsgrad
- Luftfeuchtigkeit
- Temperatur
- Luftdruck
- Überspannungskategorie
- Frequenz
- Chemische Belastungen
- Hydrolyse
- Mechanischer Druck und Einsatzgebiet (Automotive, Luft-/Raumfahrt, Haushalt, Industrie oder Medizin).

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 einzuhaltenden Abstände zwischen leitenden Objekten definiert, um einen Kriechweg, einen Überschlag oder einen Durchschlag zu verhindern.

Jede Verunreinigung mit Gasen, Flüssigkeiten oder Feststoffen, die dazu führen kann, dass der elektrische Widerstand beziehungsweise die Isolationsfähigkeit einer Trennstrecke 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. Die Verschmutzung 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 (jedoch nicht mehr akzeptabel für Isolierungen, die eine Schutzmassnahme darstellen).

Durchschlagsfestigkeit

Die Durchschlagsfestigkeit eines Isolierstoffes beschreibt die maximale elektrische Feldstärke (kV/mm), bevor es zu einem Spannungsdurchschlag kommt. Das Material 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 zum Bei-

spiel 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.

Hochvolt beginnt bei einer Spannung oberhalb 60 V

Im CAD Flow müssen die Abstände bereits im Layout und Lagenaufbau vorgesehen werden. Layout-Software prüft die Abstände meist nur auf einer Lage und ignoriert Inseln oder Fräsungen. Nextra ist eine Software, die Designdaten aus unterschiedlichen eCAD-Systemen einlesen und dann eine normgerechte Prüfung der Leiterplatte durchführen kann. Es können auch Bauteilmodelle und Gehäusedesigndaten 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 können beispielsweise direkt aus Allegro oder OrCAD übernommen werden und leitende oder isolierende Materialinformationen werden über Farbcodes automatisch übernommen, ohne eine Zwischendatenbank anzulegen. Für die exakte geometrische Analyse mit finiten Elementen kann die Genauigkeit eingestellt werden.

In der Automobilindustrie werden durch die neue Generation von Elektro- und Hybridfahrzeugen Batteriespannungen von 400 V und sogar 850 V verwendet, und in Invertern ebenfalls höhere Spannungen angewandt. Als Hochvolt werden im Automobilssektor Spannungen oberhalb von 60 V bezeichnet. Die Unterscheidung der Spannungsklassen 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.

Problematische Spannungsspitzen

Frequenzrichter und Schaltnetzteile belasten heute Isolationen stärker als früher, denn Motoransteuerungen oder Netzteile verwenden pulsweitengesteuerte Rechteckspannungen im Bereich von 20 kHz und mehr. Die dabei entstehenden Oberwellen haben Frequenzanteile bis weit über 50 MHz, und es entstehen – beispielsweise durch Resonanzen und induktive oder kapazitive Kopplung – Spitzenspannungen weit oberhalb der Betriebsspannung. Die hohen Schaltgeschwindigkeiten (du/dt) in der Leistungselektronik von 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 die Kapazität von angeschlossenen Kabeln, kommt es zu ungewollten Spannungsspitzen. Die maximalen Werte der Spannungsspitzen durch externe Faktoren können durch Simulationen mit PSpice im Vorfeld ermittelt werden und als Peak-Spannung in den CAD-Daten erfasst und für Spannungsprüfungen verwendet werden.

Mechanische Toleranzen müssen für eine Aussage über die Sicherheit berücksichtigt werden. Dabei wird nicht nur der kürzeste Pfad, sondern 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 berücksichtigt. 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 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



Bild 4: Dendriten-Bildung (verästelte Fortsätze) an einem Isolator entlang der Kriechstrecke.

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.

Die Isolationskoordination besteht aus einer Untersuchung der Luft- und Kriechstrecken und der Durchschlagsfestigkeit. Eine Simulation kann alle kürzesten Wege mit allen Parametern berücksichtigen. Jedoch kann die Genauigkeit der Simulation nur so gut sein wie die Eingangsparameter. 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 Spannungen von 60 V sollte bereits im PCB Layout erfolgen, da so frühzeitig alle Kombinationen und Fertigungstoleranzen simuliert werden können. Frühzeitig erkannte Schwachstellen lassen sich ohne Folgekosten beheben. <<

Infoservice

FlowCAD Schweiz AG
Hintermättlistrasse 1, 5506 Mägenwil
Tel. 056 485 91 91, Fax 056 485 91 95
info@flowcad.ch, www.flowcad.ch

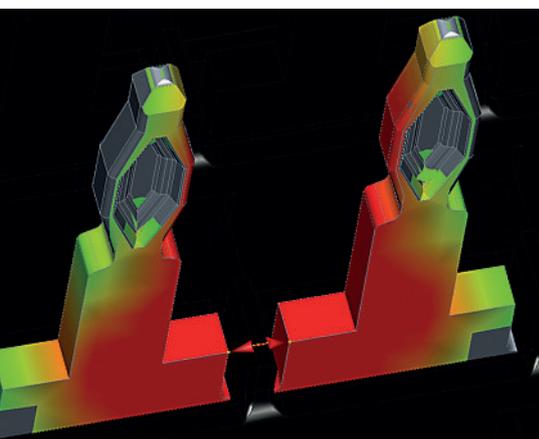


Bild 3: Nextra weist den Anwender auf zu dicht zueinander platzierte Stecker hin.