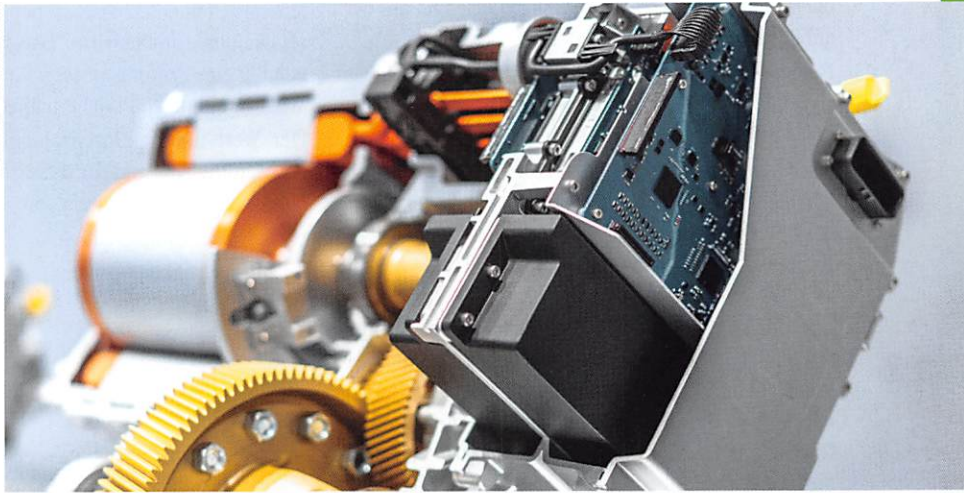


# Luft- und Kriechstrecken auf Leiterplatten

Von Dirk Müller, FlowCAD EDA-Software Vertriebs GmbH, Feldkirchen

Hohe Spannung stellt eine Gefahr für Leib und Leben, aber auch für Leiterplatten dar. Die Kraft der höheren Spannungen wird für elektrische Antriebe benötigt, aber diese Kraft kann auch zerstörerisch sein.

©THINK b - stock.adobe.com



Gerade im boomenden Markt der Steuergeräte für Elektromotoren ist eine ausreichende Bemessung der Luft- und Kriechstrecken unerlässlich

Um Leitungselektronik sicher zu machen, müssen zwischen hohen Spannungspotentialen die Abstände leitender Materialien groß genug sein, damit es nicht zu Über- oder Durchschlägen kommt.

Die Sicherheitsvorschriften zu Luft- und Kriechstrecken und Durchschlagsfestigkeit sollen in erster Linie Menschenleben schützen. Überall, wo Menschen transportiert werden und wo deren Leben gefährdet sein kann, gibt es spezielle Normen zur Einhaltung von Sicherheitsabständen bei hohen Spannungen. Zu diesen 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 selbst zerstört werden kann. Denn durch deren Ausfall oder eine Fehlfunktion kann es zu katastrophalen Folgen für den Menschen kommen. Wenn es um Menschen(leben) geht, haben die Themen Haftung und Versicherungsschutz für die Hersteller eine wesentliche Bedeutung.

Die Zahl der Entwicklungen elektrischer Antriebe steigt aufgrund der Trends zu e-Mobilität, Automatisierung und erneuerbaren Energien rapide an und zudem 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 IGBT, MOSFET oder SiC-Dioden mit höheren Spannungen verwendet. Je nach Anwendung gibt es unterschiedliche Maximalwerte für Nieder-, Mittel- und Hochspannung. Um Personen oder Anlagen insbesondere im Fall einer Überspannung vor der Auswirkung elektrischer Fehlfunktionen zu schützen, ist eine ausreichende Bemessung der Luft- und Kriechstrecken sowie der Durchschlagsfestigkeit erforderlich.

## Was ist eine Luft- bzw. 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 ein Lichtbogen ist 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.

Die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck beeinflussen die Überschlagespannung durch die Luft und die Wahrscheinlichkeit eines Lichtbogens. Befeuchtung, Öle und Staub lagern sich an den Oberflächen der Leiterplatte und der 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 (Abb. 1 rechts oben). Dann berechnet sich der erlaubte Abstand aus der Kombi-

nation 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 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 (Abb. 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 abhängig von:

- Verschmutzungsgrad
- Luftfeuchtigkeit
- Temperatur
- Luftdruck
- Überspannungskategorie
- Frequenz
- Chemischen Belastungen
- Hydrolyse
- Mechanischem Druck
- Einsatzgebiet (Automotive, Luft-/Raumfahrt, Haushalt, Industrie oder Medizin)

In diversen Normen wird über Sicherheit von stromführenden Teilen bei Niederspannungsanlagen gesprochen und werden entsprechende Sicherheitsabstände definiert. Beispiele sind in der DIN EN 60664-1/VDE 0110 aufgeführt. In dieser Norm sind die einzuhaltenden Abstände zwischen leitenden Objekten definiert, um einen Kriechweg, einen Überschlag oder einen Durchschlag zu verhindern.

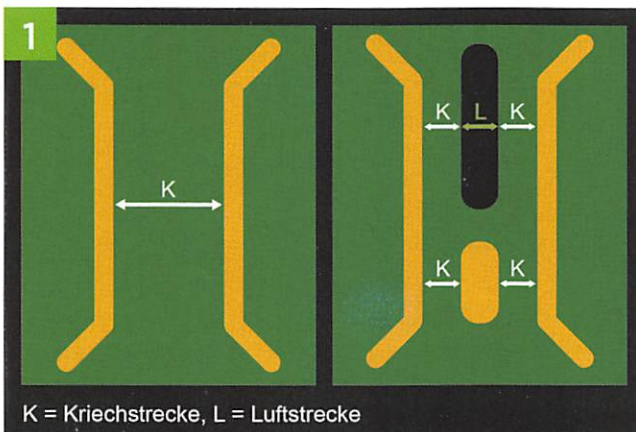


Bild: FlowCAD

Abb. 1: Kriechstrecken durch Luftstrecke verlängert oder durch Insel verkürzt

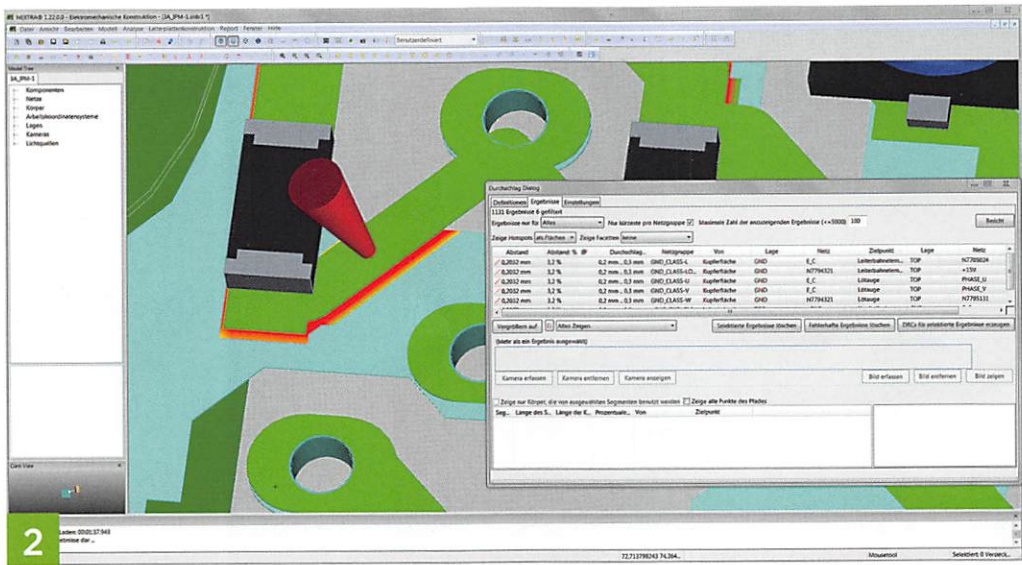


Bild: FlowCAD

Abb. 2: Auswertung von Bereichen mit zu geringer Durchschlagsfestigkeit

Jede Verunreinigung mit Gasen, Flüssigkeiten oder Feststoffen, die dazu führen kann, dass der elektrische Widerstand bzw. 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: durch leitfähigen Staub, Regen oder Nässe hervorgerufene andauernde Leitfähigkeit (jedoch nicht mehr akzeptabel für Isolierungen, die eine Schutzmaßnahme darstellen).

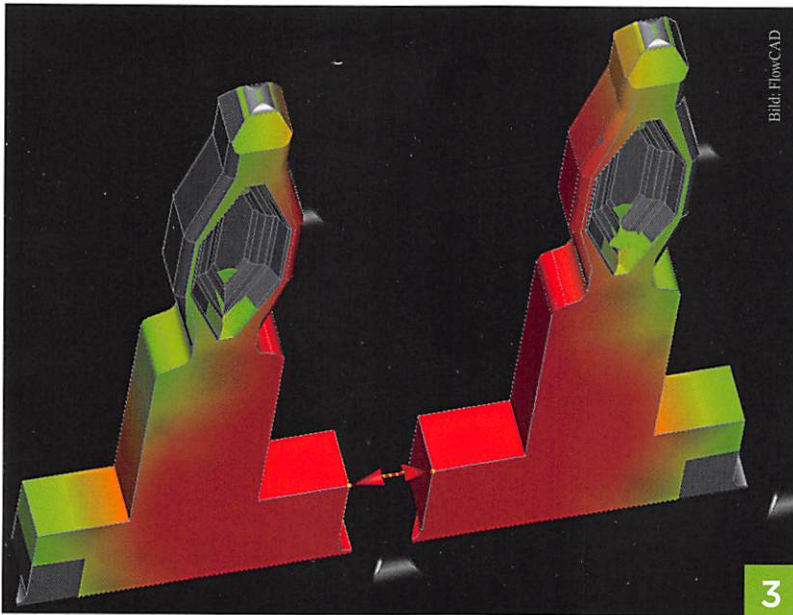
### Durchschlagsfestigkeit

Die Durchschlagsfestigkeit eines Isolierstoffes beschreibt die maximale elektrische Feldstärke (in kV/mm), bevor es zu einem Spannungsdurchschlag kommt. Das FR-4 Material 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.

### 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 Gehäuse-designdaten 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 Automobilsektor 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

Frequenzumrichter 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. Zudem entstehen beispielsweise durch Resonanzen und induktive oder kapazitive Kopplung Spitzenspannungen weit oberhalb der Betriebsspannung. Die hohen Schaltgeschwindigkeiten ( $du/dt$ ) in der Leistungselektronik von MOSFET oder IGBT belasten erheblich die verwendeten Isolationsmaterialien.

Neben den schaltungsinternen Faktoren wie hohe Frequenzen, kommen

Als Hochvolt werden im Automobilsektor Spannungen oberhalb von 60 V bezeichnet



Bild: Department of Engineering - University of Leicester

4

Abb. 3: NEXTRA weist den Anwender auf zu dicht zueinander platzierte Stecker hin

Abb. 4: Dendriten-Bildung an einem Isolator entlang der Kriechstrecke

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 Schaltungssimulationen 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 *Abbildung 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 Schaltungssimulation und Verifikation der Luft- und Kriechstrecken lässt sich die Zuverlässigkeit und Konformität mit den Normen verbessern. Das Testen von Durchschlag und Überslag im ein-

gebauten 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.

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 zeigen fraktale Strukturen (Dendriten-Bildung, *Abb. 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. Und frühzeitig erkannte Schwachstellen lassen sich ohne Folgekosten beheben.

-gk-

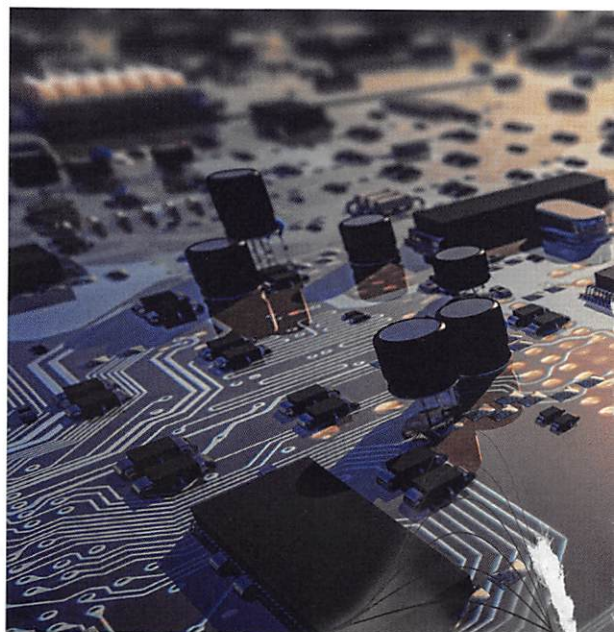
www.FlowCAD.de

# Antennen in miniaturisierten digitalen Geräten

Eine wachsende Anzahl von Designern und Schaltungsentwicklern muss sich in den kommenden Jahren verstärkt mit Grundlagen der Funktechnik befassen, viele davon erstmals.

Grund dafür ist das Vordringen von IoT, smarten Wearables und anderer miniaturisierter Elektronik mit drahtloser Informationsübertragung. Eine wichtige Rolle spielen dabei Antennen. Um Hilfe zu leisten, bietet Antenova neben einem ständig größer werdenden Sortiment an miniaturisierten Antennen unterschiedlichster Art weitere Dienstleistungen und zahlreiche Informationsmöglichkeiten an. Dieser Beitrag gibt dazu einen Überblick.

Das britische Unternehmen Antenova wurde 1999 gegründet und offeriert Hardware und Dienstleistungen für die drahtlose Informationsübermittlung weltweit [1]. Im Mittelpunkt stehen miniaturisierte Antennen für IT-Geräte aller Art. Antenova sieht sich als Marktführer in diesem Produktsektor. Das Antennensortiment wird ständig erweitert, um leistungsstarke Lösungen für die neuesten drahtlosen Konnektivitätsanforderungen bereitstellen zu können. Ein Beispiel dafür ist der voranschreitende Siegeszug von Wearables. Er brachte nicht nur ein neues Geschäftsgebiet mit sich, sondern führte auch zu bisher nicht dagewesenen neuen, höheren Anforderungen an die Antennenlösungen bezüglich Design, Material und Zuverlässigkeit. Ein weiteres Beispiel sind die Anforderungen



an die drahtlose Übertragungstechnik, die sich aus dem massiven Übergang zu M2M- und IoT-Anwendungen ergeben. Auch hier sind neue, zuverlässige und preiswerte Antennenlösungen erforderlich. *Abbildung 1* zeigt, dass Antennen die kritischen Komponenten eines drahtlosen Systems von Sender (TX) als auch Empfänger (RX) sind [2].

## Hohe Produktansprüche, große Produktvielfalt

Antenova beliefert führende Modulanbieter und Systemintegratoren. Entscheidende Gesichtspunkte für die Standard-Antennenlösungen der Firma, die für drahtlose M2M-, IoT- und Embedded-Elektronik-Anwendungen erforderlich sind, lauten

- hohe Effizienz
- geringer Stromverbrauch
- zuverlässige Leistung
- problemlose automatisierte Montage
- kleine angepasste Bauformen

Mit seinen Produkten deckt das in Hatfield ansässige Unternehmen ein breites Anwendungsspektrum ab: GSM, CDMA, 3G, 4G, 5G, LTE, GPS, GLONASS, Beidou, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, ISM und NB-IoT.