

Expertentipp: PCB Design für den Einsatz über 2000 m NHN

Wird ein System in höheren Lagen betrieben als 2000 m über NHN, ist das für die Entwicklung grundlegend. Denn es geht dabei um die Lebensdauer der Isolatoren, Durchschlagfestigkeit und Kriechstrecken.

DIRK MÜLLER *

Die vermeintlich höchste Straße der Welt führt über den Khardung-Pass im Nordwesten Indiens. Wegen der Rekordansprüche ist eine Höhe von 5604 m angegeben, aber moderne GPS-Messungen im Kaschmir-Gebirge kamen nur auf eine Höhe von 5359 m über dem Meeresspiegel. Wie auch immer die exakte Höhe sein mag, es stellt sich die Frage, ob beispielsweise Elektroautos, e-Bikes oder ganz allgemein Elektronik in dieser Höhe noch einwandfrei funktionieren würden? In vielen Gebrauchsanweisungen steht, dass der Betrieb eines Gerätes nur bis zu einer Höhe von 2000 m erlaubt ist. Wieso eigentlich? Und warum funktioniert Elektronik in unterschiedlichen Einsatzhöhen anders?



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

Schon 1889 hat der deutsche Physiker Friedrich Paschen den physikalischen Effekt der Durchschlagfestigkeit untersucht und den Zusammenhang in einer komplexen Formel beschrieben. Er fand heraus, dass in einem Plattenkondensator bei steigender Spannung die anliegende Feldstärke die Luft zwischen den beiden unterschiedlich geladenen Elementen ionisiert. Überschreitet die angelegte Spannung zwischen den beiden Leitern einen bestimmten Wert, dann entsteht eine selbstständige Entladung, deren Form auch vom Gas- bzw. Luftdruck abhängt. Durch die Gasentladung entsteht eine leitende Überbrückung zwischen den elektrischen Leitern, die zu einem blitzartigen Durchschlag führt. Dieser Blitz kann die Elektronik zerstören oder gar in Brand setzen. Da auf dem Khardung-La der Luftdruck deutlich niedriger ist, schlägt eine Überspannung entsprechend schneller durch.

Der Wert für die Durchschlagfestigkeit bzw. 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 (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 einzuhaltenen Abstände zwischen leitenden Objekten definiert, um einen Durchschlag zu verhindern.

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: Es tritt eine durch leitfähigen Staub, Regen oder Nässe hervorgerufene dauernde Leitfähigkeit auf (jedoch nicht mehr akzeptabel für Isolierungen, die eine Schutzmaßnahme darstellen).

Dabei wird der Anwendungsbereich sehr stark eingeschränkt. Er gilt für Betriebsmittel zum Einsatz bis zu einer Höhe von 2000 m über Meereshöhe (früher als NN, Normalnull bezeichnet; heute NHN Normalhöhennull) und mit einer Bemessungs-Wechselspan-

nung. Er gilt für Betriebsmittel zum Einsatz bis zu einer Höhe von 2000 m über Meereshöhe (früher als NN, Normalnull bezeichnet; heute NHN Normalhöhennull) und mit einer Bemessungs-Wechselspan-



Bild: Vladimir Melnik - stock.adobe.com

Bild 1: Der Einfluss der Betriebshöhe ist von entscheidender Bedeutung.

nung bis 1000 V mit Nennfrequenzen bis 30 kHz oder einer Bemessungs-Gleichspannung bis 1500 V.

Der Einfluss der Betriebshöhe über dem Meeresspiegel ist aber von entscheidender Bedeutung, je höher der Einsatzort liegt, in dem das Gerät betrieben wird. Für diese Sonderfälle in der europäischen Norm gibt es eine Korrekturtabelle, in der ein Faktor angegeben wird, um den die Abstände für Luft- und Kriechstrecken zu vergrößern sind. Für die Isolationsfähigkeit von Luft ist die Dichte entscheidend und damit auch die Durchschlagfestigkeit. Die Durchschlagfestigkeit ist auf Meeresebene am stärksten und nimmt mit zunehmender Höhe ab, da die Luft immer dünner wird.

Hochvolt beginnt bei einer Spannung oberhalb von 60 V

In der Automobilindustrie werden durch die neue Generation von Elektro- und Hybridfahrzeugen Batteriespannungen von 400 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.

Hinzu kommt auch die stärkere Ausbreitung von Elektronik in der Welt, also auch in entlegenen Gebieten wie am Khardung-Pass im Nordwesten Indiens. Auch Netzteile oder andere Geräte, die Leistungselektronik mit höheren Spannungen einsetzen, müssen so ausgelegt werden, dass sie überall auf der Welt sicher funktionieren. 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, und es entstehen beispielsweise durch Resonanzen und induktive oder kapazitive Kopplung Spitzenspannungen weit oberhalb der Betriebsspannung. Die hohen Schaltgeschwindigkeiten (du/dt) von MOSFETs oder IGBTs belasten erheblich die verwendeten Isolationsmaterialien.

Bild: FlowCAD

Mindestluftstrecken bei Höhen bis 2000 m über NN			
Spannung	homogenes Feld		
	Verschmutzungsgrad		
	1	2	3
	mm	mm	mm
330 V	0,01	0,2	0,8
400 V	0,02	0,2	0,8
500 V	0,04	0,2	0,8
600V	0,06	0,2	0,8
800 V	0,1	0,2	0,8
1000V	0,15	0,2	0,8

Tabelle 1: Mindestluftstrecken bei unterschiedlichen Verschmutzungsgraden.

Bild: FlowCAD

Höhen-Korrekturfaktoren		
Höhe	Luftdruck	Multiplikator
m	kPa	Luftstrecke
2000	80	1,00
3000	70	1,14
4000	62	1,29
5000	54	1,48
6000	47	1,7
10000	26,5	3,02
20000	5,5	14,5

Tabelle 2: Höhen-Korrekturfaktoren für Höhen über Meereshöhe (NHN).

Frequenz der Spannung und die Temperaturen

Die unterschiedlichen Normen schränken ihren Gültigkeitsbereich häufig bis 20 oder 30 kHz ein. Bei Frequenzen über 100 kHz kann der Einfluss auf die erforderlichen Abstände schon mehr als 50% betragen. Auf Leiterplatten wird häufig ein Schutzlack als Isolator zur Verkürzung von Luft- und Kriechstrecken verwendet. Die Datenblattangaben von Isolierstoffen spiegeln den optimalen Wert der Isolationsfähigkeit unter standardisierten Bedingungen (50/60 Hz Sinusspannung) am Anfang der Einsatzzeit wider. Durch hohe Frequenzen kommt es zu Umpolungen des elektrischen Feldes im Isolationsmaterial, was zur Erwärmung führt und langfristig die Zuverlässigkeit der Isolation verringert. Diese Langzeiteffekte sind nur teilweise in den heutigen Normen berücksichtigt und können zu Überspannungsschäden über Luft- und Kriechstrecken durch Alterung führen. Ganz grob kann man sagen: Je höher das angelegte elektrische Feld und je höher die Frequenz, umso mehr erwärmt sich das Material. Diese innere Erwärmung bleibt bei Alterungsbetrachtungen häufig unbeachtet und wird über übliche Normmessungen (z.B. UL 746) nicht abgebildet.

Für getaktete Schaltungen sind Bereiche oberhalb von 2000 m über NHN durch Nor-

next-mobility.news

Fachwissen für die Mobilität von morgen



Fachportal für Elektronik-Experten

Technologien, Produkte, Trends und News für die Entwickler von Elektronikkomponenten und -systemen im Mobilitätssektor.

www.next-mobility.news

ELEKTRONIK PRAXIS ist eine Marke der

VOGEL COMMUNICATIONS GROUP



Bild: FlowCAD

Bild 2: Simulation einer Kriechstrecken-Verletzung bei 5400 m über Meeresspiegel.

men noch nicht komplett abgedeckt. In empirischen Versuchen wurde gezeigt, dass die Durchschlagfestigkeit abhängig ist von der Zeit der Einwirkung der Spannung (Geschwindigkeit der Zunahme des elektrischen Feldes), dem Luftdruck bzw. dem Gasgemisch sowie der Größe und Form der verwendeten Elektroden (Leiterbahnen, Anschluss pads und Gehäuseteilen).

Die einfachste technische Lösung ist, den Abstand zwischen spannungsführenden Materialien deutlich zu erhöhen. Dem steht aber die Forderung der Gewichtseinsparung und damit Miniaturisierung gegenüber. Je nach Anwendungsgebiet kommen unterschiedliche Zusatzaufschläge oder Hausnormen zur Geltung.

Außerhalb Europas gelten andere Regeln

Die höchste Straße der Welt ist mit einer Höhe von 5400 m höher gelegen als der höchste Berg in Europa (Mont Blanc, 4810 m). Bei den europäischen Normen wurde dies beim normalen Anwendungsfall einfach ausgenommen und eine Höhenkorrekturtafel ergänzt. Auf der Straße in Asien ist der Luftdruck nur halb so groß wie am Meeresspiegel und erreicht einen Durchschnittswert von 506,6 hPa. Dementsprechend müssen die Sicherheitsabstände vergrößert werden.

Wenn Elektronik nach Asien oder Südamerika exportiert wird, dann gelten hier strengere Regeln als in Europa. Beim Export nach China müssen die strengen Vorschriften für eine CCC-Zulassung (China Compulsory Certification) nach dem Sicherheitsstandard GB 4943.1-2011 eingehalten werden. Dieser Standard hat im Vergleich zu den europäischen Vorschriften höhere Vorgaben für die Luft- und Kriechstrecken. In China sind viele Re-

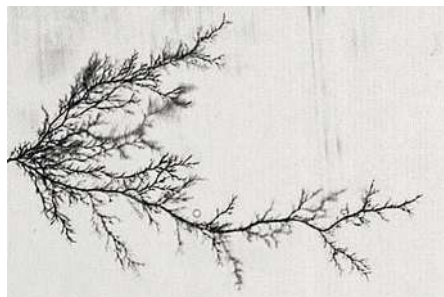


Bild 3: Dendriten-Bildung (verästelter Fortsatz) an einem Isolator entlang der Kriechstrecke.

gionen sehr hoch gelegen und deshalb erfordert der chinesische Standard seit dem 1. Dezember 2012 eine Betriebshöhe bis 5000 m. Die Abstände für Luftstrecken sind um 50% (Faktor 1,5) größer ausulegen als bei uns üblich.

Vorschriften zum Testen: Um ein elektrisches Gerät sicher auszulegen, ist es also notwendig, alle auftretenden Einflussgrößen wie Temperatur, Spannung (Höhe und Frequenz), Verschmutzungen, Feuchtigkeit, chemische Belastungen, Hydrolyse und mechanischer Druck in ihrer Wirkung aufzusummieren und die erforderlichen Sicherheitsabstände zu berechnen. Mit der Entwicklungs-Software NEXTRA von Mecadtron lassen sich unterschiedliche Regelsätze für die Abstände vorgeben und alle elektrisch leitenden Objekte werden gegeneinander auf die Einhaltung vorgegebener Maximalwerte für Luft- und Kriechstrecken geprüft. So lassen sich zum einen die in den Normen geforderten Abstände nachweisen, aber auch mit Zuschlägen behaftete Bereiche (beispielsweise Faktor 1,5) der elektronischen Schaltung finden, die an heißen Tagen auf einer Höhe von 5000 m nicht mehr funktionieren wür-

den und entsprechend das Design beeinflussen. Ein Lötstopplack hat hier keine isolierende Wirkung. Bei der Dimensionierung von elektrischen Baugruppen und Isolationen muss darauf geachtet werden, dass insbesondere bei spitzen Leitergeometrien die umgebende Luft durch sogenannte Vorentladungen ionisiert werden kann und ein Überschlag dadurch eher stattfindet.

Festzuhalten ist, dass es in den Normen viele Einschränkungen für deren Gültigkeit gibt und geprüft werden muss, ob die entsprechenden Korrekturfaktoren für Betriebshöhe, Verschmutzungsstufe, Temperatur und Frequenz angewendet werden müssen. Die Normen sind zum Teil aus empirischen Versuchsreihen entstanden und weisen Nichtlinearitäten und Widersprüche zueinander auf. Daher sollte im Zweifel immer der größere Abstand für mehr Sicherheit gewählt werden.

Die Kriechstreckenanalyse mit dem Software-Modul NEXTRA

Wie im Artikel angesprochen ermöglicht das Software-Modul NEXTRA die Untersuchung von Leiterplatten-Layouts zur Einhaltung von Mindestabständen zwischen Schaltkreisen, die zur Zertifizierung technischer oder gesetzlicher Vorgaben nötig sind. Das autarke Tool importiert von beliebigen PCB-Design-Werkzeugen die Daten und spielt speziell bei der Entwicklung von Hochstrom- und Hochspannungsleiterplatten eine entscheidende Rolle, um Mindestabstände zwischen Stromkreisen einhalten zu können. 2D-PCB-Layout-Systeme berücksichtigen keine Abstände von Schaltungselementen, die über Leiterplattenlagen hinweg entstehen. Diese Einschränkungen werden durch das Kriechstrecken-Analysemodul gelöst. NEXTRA bestimmt dazu die Abstände zwischen allen Leitungselementen. Durch Zuordnung der Leitungselemente zu Netzen und Stromkreisen lassen sich Unterschreitungen identifizieren, die ein technisches Risiko sein können. Die Vorgabe von Minimalabständen ermöglicht es, problematische Details einzugrenzen und diese genauer zu überprüfen. Die Übernahme von Netzklassen aus 2D-PCB-Layoutsystemen automatisiert die Definition von Stromkreisen und die Festlegung deren Mindestabstände in NEXTRA. Die 3D-Erweiterung für Kriechstrecken prüft auch die Kriechstrecke über die 3D-Oberfläche der Bauteile auf der PCB. Mit der NEXTRA-Erweiterung ist so sichergestellt, dass gegebene Randbedingungen eingehalten werden. // KU

FlowCAD