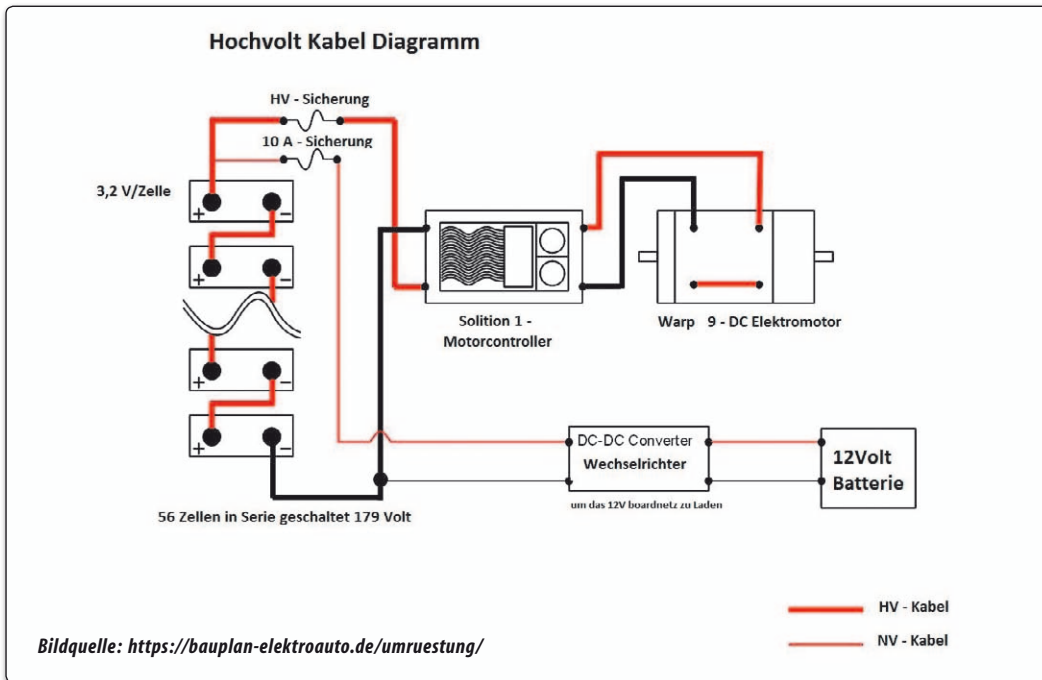


Fehlerstrom bei der Hochspannungsprüfung mit Wechselspannung:

Möglichkeit der Fehlinterpretation von Messergebnissen

Mit der Elektromobilität hat sich sukzessive der Spannungsbereich von 12 bis 24 über 48 V_{DC} auf eine Kreisspannung von heute >350 V_{DC} erhöht. Für große Elektrofahrzeuge (Busse, LKWs, Premium-Fahrzeuge) werden sogar Spitzenspannungen bis zu ~1000 V_{DC} eingesetzt. Diese Hochvoltnetze sind elektrotechnisch gesehen ungeerdete IT-Netze.



muss die Isolationsüberwachung eine gewisse Toleranzgrenze zulassen, bevor sie einen Schaden in der Isolation (1. Fehler) meldet.

Klassisch wird man bei der Entwicklung und Zulassung eines elektrotechnischen Gerätes die Qualität der eingesetzten Isolationsmaterialien mittels Prüfspannung überprüfen. Diese Prüfspannung liegt deutlich über der erwarteten höchsten Betriebsspannung und soll sicherstellen, dass keine Mängel in der Konzeption oder nach der Montage vorliegen. Typische Angaben aus verschiedenen Normen sind zum Beispiel $U_{nenn} \times 2$ plus 1000 V.

Ein Isolationsfehler

ist prinzipiell ein Bereich, in dem die anliegende Feldstärke (durch die Prüfspannung) einen nennenswerten Stromfluss bewirken kann. Jedoch deutet nicht jeder kleine Stromfluss bereits auf einen Isolationsfehler hin. Der für die Prüfung

In diesen Netzwerken ist selbst bei einem satten Erdschluss durch einen Isolationsfehler noch keine sofortige Abschaltung notwendig – jedoch eine zuverlässige Erkennung, um weitere Verschlechterung zu vermeiden (keine ungewollte Betriebsunterbrechung, Elektrofahrzeug kann noch weiterfahren, muss aber umgehend repariert werden).

Die Überwachung

der elektrischen Betriebssicherheit ist bei einem solchen E-Mobil integraler und elementarer Bestandteil des Sicherheitskonzepts. Dazu gehört auch das permanente Monitoring des Zustands der Isolation im Hochvoltbereich.

System- und kostenbedingt wird eine Überwachung der Hochvoltisolation nicht auf alle einzelnen Komponenten des HV-Stromkreises herunter gebrochen. Der Ladebetrieb unterscheidet sich erheblich vom Fahrbetrieb, das Zuschalten

der Klimaanlage oder des Zuheizers verändern die Verhältnisse im Stromkreislauf merklich. Daher

Dicke Isolation (const. eta, = 3)	Stromfluss bei 50 Hz
50 µm	12 mA
0,2 mm	3 mA
1 mm	0,633 mA

Abhängigkeit des Prüfstroms von der Isolationsdicke

Verschiedene ε _r (const. d = 50 µm)	Stromfluss bei 50 Hz
1	4,22 mA
3	12 mA
50	210 mA

Abhängigkeit des Prüfstroms von der relativen Permittivität

Verschiedene f (d = 50 µm, eta, = 1)	Stromfluss
50 Hz	3,5 mA
1 kHz	84 mA
100 kHz	8,44 A

Abhängigkeit des Prüfstroms von der Wechselstrom-Frequenz

Autor:
Gerald Friederici
friederici@cmc.de
CMC-Klebeteknik
www.cmc.de

Material	Frequenz	Dielektrischer Verlustfaktor (x10e-4)
PTFE	50 Hz	0,5
	1 MHz	0,7
PP	50 Hz	2,5
	1 MHz	3,5
PI	50 Hz	3
	1 MHz	11
PET	50 Hz	20
	1 MHz	210
PVC	50 Hz	120
	1 MHz	300
PA	50 Hz	3900
	(luftfeucht)	1 MHz

verwendete Hochspannungstransformator muß daher die Möglichkeit bieten, die Auslöseempfindlichkeit der „Kurzschluss“-Detektion einzustellen. Üblich ist, dass ein Strom unter 3 mA bei Prüfspannung (einige hundert bis einige tausend Volt) nicht zu einer Auslösung führen darf. Erst darüber hinausgehende Ströme deuten einen Fehler in der Isolation selbst an.

Ein wichtiger Aspekt

bei der Beurteilung der Messergebnisse ist der Umstand, dass in sehr vielen Fällen mit Wechselspannung (AC) geprüft wird. Für rein ohmsche Widerständen ist es prinzipiell egal, ob mit AC oder DC gemessen wird. Jedoch beinhalten viele elektrotechnische Geräte mehr oder weniger auch unbeabsichtigt Induktivitäten und Kapazitäten (Beispiel: große gemeinsame spannungstragende Fläche in einer Platine gegenüber geerdetem Metallgehäuse, wobei sich diese Flächen auch aus einzelnen, kleineren Flächen durch Parallelschaltung aufsummieren können). Und diese kapazitiven oder induktiven Kopplungen können bei der klassischen Hochspannungsprüfung zu Fehlinterpretationen führen.

Anhand eines Beispiels erkennt man, dass in ungünstigen Fällen Koppelkapazitäten den Stromfluss beim Hochspannungstest erheblich beeinflussen können. In Folge kann es zu Fehlinterpretation kommen:

Annahme: Das Bauteil enthält eine unter Spannung stehende Fläche A von 330 cm² (DIN-A5-Seite). Diese Fläche ist gegenüber dem

geerdeten Metallgehäuse isoliert mit einer Kapton-MT-Folie mit Dicke (d) 50 µm. Die Prüfspannung beträgt 2300 V AC (50 Hz). Der fließende Strom kann nach dem Ohmschen Gesetz ermittelt werden, wobei man für R den Betrag des kapazitiven Blindwiderstands X_C einsetzt:

$$I = U_{\text{prüf}} / X_C$$

Dabei errechnet sich X_C aus:

$$X_C = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$$

Für C wiederum gilt:

$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times A / d$$

(ε = Permittivität des Materials)

Die volle Formel für den durch kapazitive Kopplung verursachten Strom lautet also:

$$I = (U_{\text{prüf}} \times 2 \times \pi \times f \times \epsilon_0 \times \epsilon_r \times A) / d$$

Für das konkrete Beispiel bedeutet das einen Strom von

$$I = (2300 \text{ VAC} \times 314 \times \epsilon_0 \times 3 \times 0,033 \text{ m}^2) / 50 \times 10^{-6} \text{ m} = 12 \text{ mA !}$$

$$C = 8,854 \times 10^{-12} \times 3 \times 0,033 \text{ m}^2 / 50 \text{ Hz} \times 10^{-6} = 17 \text{ nF}$$

In dieser Konstellation fließt also bei der Hochspannungsprüfung mit Wechselspannung ein Prüfstrom von 12 mA, ohne dass die Isolation einen Schaden ausweist. Es handelt sich ausschließlich um den Strom, der durch den sich bildenden Plattenkondensator fließt. Sollte der Auslösestrom des Hochspannungs-Prüftransformators auf 10 mA eingestellt sein (häufig verwendeter Wert), würde also die Prüfung als nicht bestanden beendet werden.

Dass der „Fehlerstrom“ nicht nur abhängig ist von der Fläche des

Fehlerproblematik „Scharfe Kanten“



Die Volksweisheit kennt den Effekt der Feldlinienbündelung sehr gut: Kirchturmspitzen sind häufig ein Punkt, in den der Blitz einschlägt. Der Grund ist jedem elektrotechnisch bewanderten sofort klar, denn die Kirchturmspitze bildet in der Umgebung meist den höchsten Punkt und läuft zudem spitz zu. Hier konzentrieren sich die Ladungen, und die resultierende Feldstärke lässt schließlich die Isolationsstrecke kollabieren – der Blitz schlägt in den Kirchturm ein.

Doch es muss nicht immer gleich zu einem Durchschlag kommen. Geht man an einem feuchten Tag unter einer Hochspannungsleitung hindurch, hört man meist ein leises Knistern. Hier entlädt sich die anliegende Hochspannung in die Luft (Sprühentladung), ohne dass ein Durchschlag bis zum geerdeten Boden erfolgt.

Diese Sprühentladung ist in gasförmigen oder flüssigen Medien meist ungefährlich, weil

der Teildurchschlag schnell wieder geschlossen wird. An festen Isolierstoffen entsteht jedoch bei dauerhaft anstehenden Sprühentladung (Gleitentladung, Partial Discharge, Teilentladung) ein irreparabler und fortschreitender Schaden, der schließlich zur Zerstörung der Isolation führt und damit zu einem Durchschlag.

Besonders gefährdet sind Stellen, an denen Feldlinien sich konzentrieren. Das sind scharfe Kanten, Spitzen und Übergängen mit hohen Unterschieden in der dielektrischen Konstante von Isolationsmaterialien.

Die Durchschlagsspannung laut Datenblatt kann an solchen Stellen deutlich unterschritten werden, da diese Werte an gerundeten Elektroden ermittelt werden!

Weitergehende Information und Hinweise zur Vermeidung sind in diesem Artikel zusammengefasst:

www.cmc.de/fachartikel/teilentladung-im-isolationsaufbau

sich bildenden Plattenkondensators, zeigen die exemplarischen Darstellungen in den Tabellen.

Variationen in der Stärke des Isolationsmaterials beeinflussen den Stromfluss erheblich. Dagegen macht es wenig Sinn, andere Werkstoffe wegen des „besseren“ Epsilon einzusetzen. Dahingegen sollte man sich bewusst sein, dass die übliche Prüffrequenz von 50 Hz im realen Betrieb z.B. an einem Umrichter unrealistische Ergebnisse zur Folge hat.

Zusammenfassung

Wie man erkennen kann, sind verschiedene Einflussfaktoren dafür verantwortlich, dass bei großen parallelen Flächen die klassische Hochspannungsprüfung zu Fehlinterpretationen führen kann. Dass gilt vor allem bei dem Einsatz von sehr dünner Isolationsfolien. Zusätzlich hat natürlich auch die relative Permittivität des Materials (ε_r, in vielen Fällen frequenzabhängig) und die Frequenz (dU/dt) einen Einfluss.

Fehlerproblematik „Mikrobläschen in Vergussmassen“

Analoges gilt für die Gefahr von z.B. Stromschleifen. Ungünstige Anordnungen von stromdurchflossenen Leitern führen zu Induktivitäten, die ebenfalls im Wechselfeld zu einem induktiven Blindstrom führen. Dieser ist wie bei der kapazitiven Kopplung kein Zeichen für einen „Leakage“-Strom aufgrund eines Isolationsfehlers.

Wenn es durch die jeweilige Prüfnorm erlaubt ist, sollte man beim Auftreten nennenswerter Kapazitäten (Induktivität) mit Gleichspannung prüfen.

Alternativen sind die für den Fahrbetrieb eingesetzten Isolationsüberwachungseinrichtungen, die z.B. mittels Differenzstromtechnik Isolationsfehler ermitteln.

Ein wichtiger, aber bei der Entwicklung von Hochspannungsanwendungen bisweilen vernachlässigter Aspekt ist die Gefahr der Blasenbildung bei Verwendung von Vergussmassen. Insbesondere bei einer Polykondensations-Reaktion von 2K-Systemen oder zu heftig aufgerührten Vergussmassen kann es zu Mikrobläschen kommen. Diese bilden beim Anlegen von Hochspannung eine Kette von Dielektrizitätssprüngen.

Das kann zur Zündung von Teilentladungen in jeder Blase führen, die dann eine Kette bilden. Dieser Umstand verkürzt die zur Verfügung stehende Isolationsstrecke signifikant.

Deswegen ist es bei höheren Spannungen und kurzen Distanzen durch die Isolation hindurch wichtig, die Mikrobläschen in (Silikon-)Vergussmassen

zu entfernen. Andernfalls erreicht man auf Dauer bei weitem nicht die Durchschlagfestigkeit aus dem Datenblatt des Herstellers. Wichtig dabei: das Fehlerbild stellt sich meist nicht sofort ein, sondern es kommt erst im Dauerbetrieb zu einem langsamen Abbau der Isolationsstrecke.

