

WHITEPAPER

**CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN
EINES NIEDERSpannungs-
GLEICHSTROMKABELS**

CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN EINES NIEDERSpannungSGLEICHSTROMKABELS



INHALT

1. Reduzierte Anzahl an Leitern
2. Besonderer Farbcode
3. Anforderungen an den Isolierstoff von Kabeln und Leitungen

1 REDUZIerte ANZAHL AN LEITERN

Im Gegensatz zu Drehstromsystemen (AC-System) mit drei stromführenden Phasen L1, L2 und L3 bestehen Stromkabel in DC-Systemen in der Niederspannungsebene aus nur 2 Phasen, nämlich L+ und L-. Gemeinsam ist bei beiden Systemen das Mitführen des Schutzleiters PE. Während je nach Netzform bei AC häufig ein Neutralleiter N mitgeführt, kann bei DC ein Mittelpunktleiter M erforderlich sein. Im Gegensatz zu AC-Kabeln, die mit drei oder fünf Adern ausgeführt sind, können DC-Kabel über drei oder vier Adern verfügen¹.

2 BESONDERER FARBCODE

Damit DC-Kabel eindeutig von AC-Kabeln unterschieden werden können, ist der Farbcode für Kabel und Leitungen im Feld nach DIN EN 60445 festgesetzt: rot für L+, weiß für L-. Die Farbe des Schutzleiters PE unterscheidet sich nicht und ist grün-gelb. Der optionale Mittelpunktleiter ist blau. **Abbildung 1** zeigt eine Gegenüberstellung eines typischen 5-adrigen AC-Kabels sowie eines 3- und 4-adrigen DC-Kabels von LAPP.

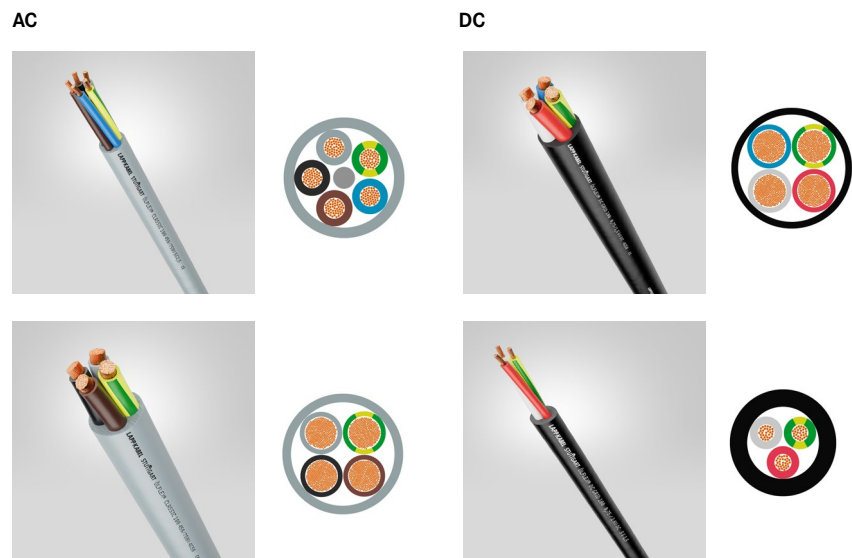


Abbildung 1: Exemplarische Gegenüberstellung 5-adriges AC-Kabel (links), 3- bzw. 4-adrigen DC-Kabels (rechts)

¹ Whitepaper: „Gegenüberstellung des Kupferquerschnittes und der Übertragungsverluste für Kabel und Leitungen in AC- und DC-Systemen“, LAPP

3 ANFORDERUNGEN AN DEN ISOLIERSTOFF VON KABELN UND LEITUNGEN

3.1 Theoretische Grundlagen zur elektrischen Beanspruchung von Ader-Isolierstoffen

Als Ader-Isolierstoff (oder Isolationswerkstoff, im Folgenden vereinfacht als Isolierstoff bezeichnet) für Niederspannungskabel werden üblicherweise Kunststoffe, wie z.B. PVC (Polyvinylchlorid), PE (Polyethylen), PP (Polypropylen), halogenfreie Isolierstoffe oder thermoplastische Elastomere, verwendet.

Neben ausreichenden mechanischen² und thermischen³ Eigenschaften liegt die Hauptanforderung an einen Isolierstoff in der Erfüllung der elektrischen Isolation zwischen zwei unterschiedlichen Potentialen, z.B. benachbarte Adern oder Leiter in einem mehradrigen Kabel. Die elektrische Isolation wird durch die elektrische Spannungsfestigkeit (Durchschlagsspannung bzw. elektrische Durchschlagsfeldstärke) charakterisiert.

Bei der elektrischen Spannungsfestigkeit handelt es sich um eine Eigenschaft, die sowohl vom Material, ggf. von der Temperatur, Frequenz, Beanspruchungsdauer und von der Art des elektrischen Feldes (je nach Spannungsform, z.B. AC oder DC) abhängig ist. Das Anlegen einer Wechsel- oder Gleichspannung führt in Abhängigkeit dieser Einflussfaktoren zu einem unterschiedlichen Ausbilden von sehr kleinen Verlustströmen (etwa im Piko- bis Nano-Amperebereich) im Isolierstoff. Steigen diese Verlustströme stark an, führen sie zu einem Versagen des Isolierstoffs – es kommt zum Durchschlag.

Das Anlegen eines elektrischen Feldes führt bei Wechsel- und Gleichspannung gleichermaßen zu einer Verschiebung von ortsfest gebundenen positiven und negativen Ladungsträgern (Atome, Ionen, Moleküle) zu Dipolen. Dieses Verhalten tritt bei den meisten festen Isolierstoffen (Kunststoffen) in den kristallinen Bereichen auf und wird als Verschiebungspolarisation bezeichnet⁴. Je nach Art und Beschaffenheit dieser Isolierstoffe werden weitere unterschiedliche Sub-Polarisationsarten unterschieden.

Anmerkung zur stofflichen Struktur: Kunststoffe weisen je nach Polymerisationsgrad (Anzahl der Monomermoleküle, die zu einem Makromolekül verbunden sind) amorphe und kristalline Bereiche auf. Amorphe Bereiche sind aufgrund unvollständiger Vernetzung durch glasartige, spröde sowie ohne kristalline (geordnete) Strukturen gekennzeichnet. Hier können sich Ladungsträger frei bewegen. Dagegen existieren in den kristallinen Bereichen (vollständige Vernetzung) geordnete kristalline Strukturen (Kristallstruktur, siehe linke Darstellung in **Abbildung 2**). Das bedeutet, dass die Ladungsträger überwiegend gebunden sind und die Anzahl frei beweglicher Ladungsträger gegenüber denen in den amorphen Bereichen gering ist.

Die Entstehung der Verlustströme je nach Spannungstyp wird im Folgenden dargelegt:

² z.B. Zug- und Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul und Härte

³ z.B. zulässige Maximal- und Dauertemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizienten, Wärmekapazität, Brennbarkeit, Kriechstromfestigkeit, Temperatur abhängigkeit von Materialparametern

⁴ z.B. A. Küchler: „Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen“, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2017

3.2 Beanspruchung mit Wechselspannung

Aufgrund der zeitlichen (und periodischen) Änderung des Spannungssignals $u(t)$ baut sich bei Wechselspannungsbeanspruchung ein dielektrisches Verschiebungsfeld auf, unter dessen Einfluss sich die gebildeten Dipole ständig neu ausbilden (Umpolarisation, siehe **Abbildung 2**). Dabei entstehen im Isolierstoff unerwünschte kleine Verlustströme. Dagegen finden kaum oder /keine gerichteten Bewegungen von freien Ladungsträgern (Elektronen oder Ionen) statt.

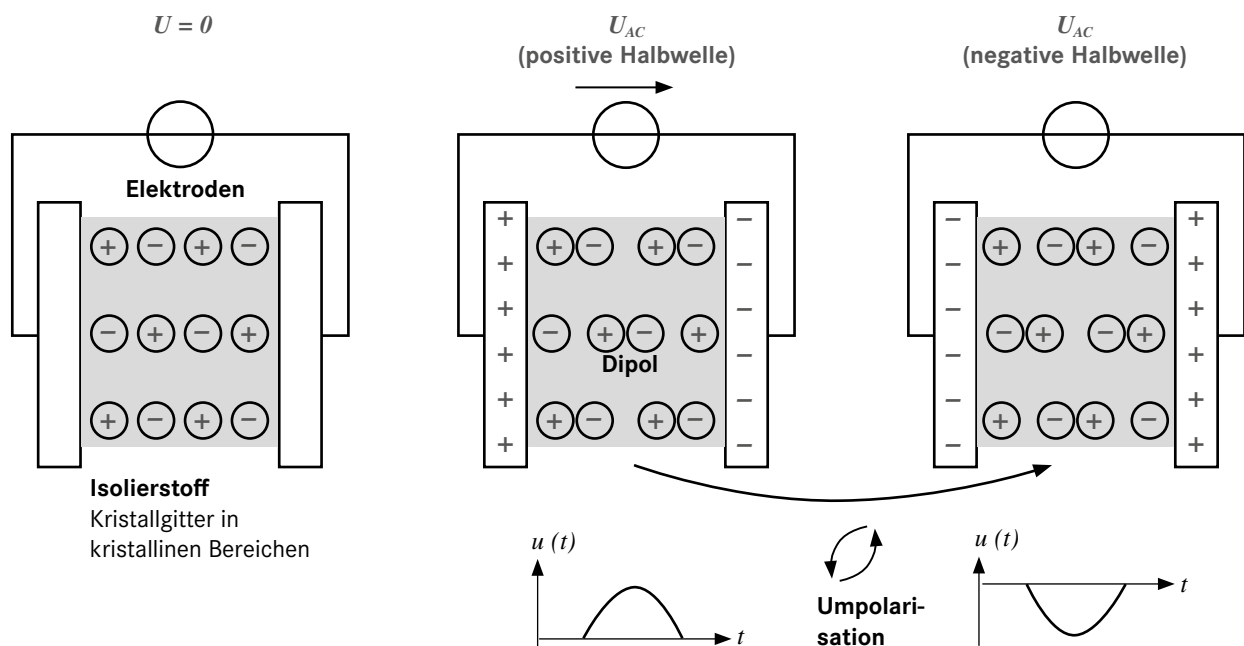


Abbildung 2: Polarisation und Umpolarisation in Feststoffen bei AC-Beanspruchung

3.3 Beanspruchung mit Gleichspannung

Im direkten Vergleich mit einer Belastung mit Wechselspannung unterscheiden sich die physikalischen Effekte im Inneren des Isolierstoffs bei einer Belastung mit Gleichspannung. Grundsätzlich baut sich bei der Beanspruchung mit Gleichspannung ein stationäres Strömungsfeld (keine zeitliche Veränderung) auf, das zunächst zur Polarisation in den kristallinen Bereichen und zu gerichteten Bewegungen von frei beweglichen Ladungsträgern führt.

Da die Polarisation sehr schnell abgeklungen ist ($t \sim$ Piko- bis Nanosekunden), wird die elektrische Feldstärke im stationären Zustand von der Anzahl frei beweglicher Ladungsträger (überwiegend in den amorphen Bereichen) im Isolierstoff bestimmt: Diese Ladungsträger rufen eine elektrische Leitfähigkeit κ hervor und sind ein Maß für die unerwünschten Verlustströme im Isolierstoff. Die Anzahl der Ladungsträger wird maßgeblich von der Reinheit und Zusammensetzung des Isolierstoffs, aber auch vom Elektrodenmaterial beeinflusst.

Die Freisetzung und Bewegung (Ladungsträgerdrift) dieser Ladungsträger mit einer sogenannten mittleren Driftgeschwindigkeit ist exponentiell von der Temperatur und der elektrischen Feldstärke abhängig.

In Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke dominieren entweder Ionen oder Elektronen als frei bewegliche Ladungsträger bei den Leitungsvorgängen (siehe **Abbildung 3**): für kleinere elektrische Feldstärken (etwa für Spannungen im Niederspannungsbereich) überwiegen die Ionen, für höhere Feldstärken (Bereich der Hochspannung) dominieren Elektronen. Ionen entstehen durch Dissoziationsvorgänge, z.B. aus Vernetzungsrückständen, Verunreinigungen, Fremdmolekülen oder Zusatzstoffen (wie Antioxidantien, Stabilisatoren). Bei der Dissoziation handelt es sich um die Aufspaltung von Molekülen oder Ionen in kleinere Bestandteile (Ionen, Elektronen) beim Lösen von Stoffen in Wasser bzw. Lösungsmitteln oder durch Energiezufuhr, z.B. von elektromagnetischen Feldern oder hohen Temperaturen. Elektronische Leitungsvorgänge (durch Elektronen und Löcher) sind zudem durch Aktivierung (energetische Anregung) von Elektronen aus physikalischen und chemischen Defekten zurückzuführen. Ebenfalls können aufgrund der stofflichen Struktur Elektronen über eine bestimmte Zeitdauer örtlich gebunden werden, sodass sich sog. Raumladungen ausbilden und die elektrische Feldstärke beeinflussen.

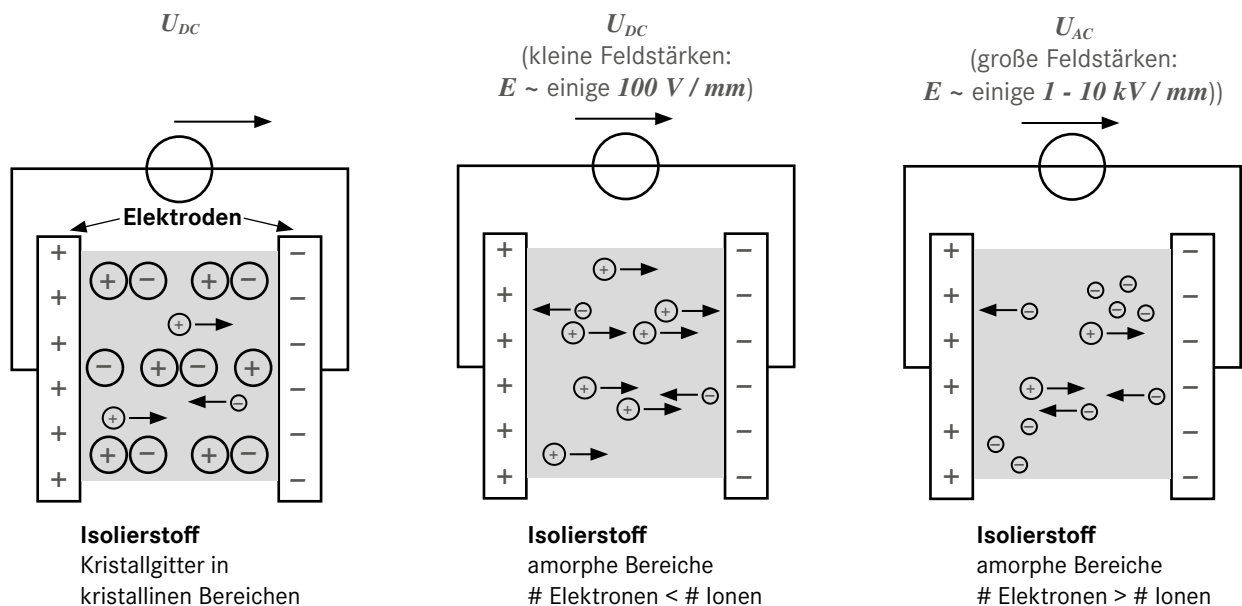


Abbildung 3: Polarisation und Leitungsvorgänge in Feststoffen bei DC-Beanspruchung

3.4 Auswahl und elektrische Beanspruchung von Isolierstoffen bei Niederspannung

Typische Isolierwandstärken von Niederspannungskabeln und -leitungen (AC) erstrecken sich je nach AC-Nennspannungen U_0/U (standardmäßig bis $U_0/U = 0,6/1$) im Bereich von wenigen 0,1 mm bis etwa 1,6 mm. Dabei handelt es sich bei U_0 um die Leiter-Erde-Spannung und bei U um die verkettete Spannung zwischen zwei potentialführenden Leitern. Eine beispielhafte Umrechnung dieser Werte in die zugehörige Betriebsfeldstärke E_b ergibt:

$$E_b = \frac{U_0}{d} = \frac{0,6 \text{ kV}}{1,6 \text{ mm}} = 0,375 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}.$$

Ein Vergleich von E_b mit der elektrischen Durchschlagsfeldstärke (AC) von Kunststoffen mit $E_{d,AC} \sim 40...60 \text{ kV/mm}$ zeigt eine sehr schwache elektrische Beanspruchung des Kunststoffes. Bei DC ist $E_{d,DC}$ für die jeweiligen Kunststoffe ohne Berücksichtigung von Alterungs-, Langzeit und Raumladungseffekten (bei höheren elektrischen Betriebsfeldstärken) tendenziell um den Faktor 2 höher gegenüber AC⁵:

$$E_{d,DC} \gtrsim 2 \cdot E_{d,AC}.$$

Ein weiterer Vergleich der oben berechneten Betriebsfeldstärke E_b mit der elektrischen Durchschlagsfeldstärke für Luft (bei AC) mit $E_b < E_{d,Luft} \approx 3 \text{ kV/mm}$ ⁶ zeigt, dass selbst über den Isolationsabstand von 1,6 mm mit dem Isolationsmedium Luft kein Durchschlag auftritt.

Beide Berechnungen und Vergleiche zeigen die eher vernachlässigbare elektrische Isolierstoffbeanspruchung im Niederspannungsbereich. Die Auswahl und Anforderungen an Isolierstoffe und deren Wandstärken werden vor allem durch die thermischen und mechanischen Beanspruchungen bestimmt. Deshalb können die meisten polymeren Isolierstoffe von AC auch gleichermaßen für DC-Kabel eingesetzt werden. Ein sehr guter Kompromiss aus guten elektrischen sowie mechanischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Kosten ist die Verwendung von PVC. Bei höheren Anforderungen (wie z.B. höhere mechanische Biege- oder Torsionsbeanspruchungen von Leitungen, höhere Beständigkeit gegenüber Umgebungseinflüssen) ist die Verwendung von höherwertigen Isolierstoffen wie Polyethylen, Polypropylen oder thermoplastischen Elastomere notwendig.

Weitere Erkenntnisse konnte LAPP als geförderter Partner im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes DC Industrie 2⁷ (gefördert durch das BMWK) aufzeigen. In umfangreichen messtechnischen Analysen wurde die grundlegende Übereinstimmung zwischen dem Ausfallverhalten des Aderisolationsmaterials für AC und DC im Niederspannungsbereich festgestellt – fällt ein Werkstoff bei AC aus, fällt er auch bei DC aus und anders herum. Es gibt allerdings einen Einfluss von Zusatzstoffen auf die Langzeitbeständigkeit von Kunststoffen und somit auch Unterschiede innerhalb einer Werkstoffgruppe, wie z.B. PVC. Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Wasserbadlagerung ist die höchste Beanspruchung für Isolationsmaterialien, unabhängig der beaufschlagten Spannung. Somit können unter dem Einfluss

⁵ z.B. K. Fuchs: „Ein Beitrag zur Optimierung der elektrischen Feldstärkeverteilung in LDPE unter HGÜ-Beanspruchung“, Universitätsverlag Ilmenau, 2021

⁶ Für 1 mm Luftstrecke ist eine Spannung von 3 kV notwendig, damit über dieser Strecke ein Durchschlag entsteht

⁷ Systemkonzept des Verbundvorhabens DC-Industrie 2, URL: <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/systemkonzept-fuer-dc-industrie2>

von Feuchtigkeit und Wasser bei einigen PVC und halogenfreien Mischungen unter Spannungsbeaufschlagung Durchschläge entstehen, die auf das gleichzeitige Einwirken von Wasser und elektrischem Feld auf die Füll- und Zusatzstoffe bei den erwähnten Mischungen zurückzuführen sind. Ungefüllte, also reine Isolierstoffe halten dagegen der Beanspruchung stand.

3.5 Elektrische Beanspruchung von Isolierstoffen bei Hochspannung

Mit zunehmender Nennspannung erhöhen sich die Isolierwandstärken von einigen Millimetern bis hin zu einigen Zentimetern für einige 100 kV. Daraus resultierend erstreckt sich die elektrische Betriebsfeldstärke von polymeren Hoch- und Höchstspannungskabeln auf $E_b \sim 10 \dots 20 \text{ kV/mm}^8$. Zwar befindet sich E_b deutlich unter der elektrischen Durchschlagsfeldstärke $E_{d,AC}$ bzw. $E_{d,DC}$. Trotzdem wird der Isolierstoff (typischerweise vernetztes Polyethylen VPE) deutlich stärker elektrisch beansprucht. Ebenfalls befindet sich die Betriebsfeldstärke oberhalb der elektrischen Durchschlagsfeldstärke von Luft. Das bedeutet, dass bei einer vergleichbaren Luftstrecke bereits ein Durchschlag auftreten würde. **Abbildung 4** verdeutlicht den Unterschied zwischen der elektrischen Feldstärkebelastung bei Nieder- und Hochspannung.

Aufgrund der höheren elektrischen Betriebsfeldstärke und der unterschiedlichen physikalischen Effekte bei der Beanspruchung von Isolierstoffen mit Wechsel- oder Gleichspannung (siehe 3.2 und 3.3) können in der Hochspannungsebene nicht mehr dieselben polymeren Isolierstoffzusammensetzungen für AC und DC verwendet werden. Besonders aufgrund der Ausbildung von Raumladungen (siehe Kapitel 3.3) ist bei DC ein deutlich höherer Aufwand bei der Fertigung polymerer Isolierstoffe notwendig.

Einerseits kann eine höhere Reinheit des Polymers durch eine beispielsweise aufwändige Entgasung von Rückständen unmittelbar nach dem Fertigungsprozess realisiert werden. Ebenfalls haben Art und Anteil von Füll- und Zusatzstoffen einen Einfluss auf die Reinheit. Dieser Ansatz wird überwiegend von europäischen Herstellern für die Errichtung von Kabelsystemen für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) mit einer maximalen Spannung von $\pm 525 \text{ kV}$ realisiert. Im asiatischen Raum werden dagegen häufig spezielle Compound (Basispolymer mit bestimmten Füllstoffen) hergestellt, um eine ausreichende DC-Beständigkeit zu bewirken.

Als Besonderheit in der Hoch- und Höchstspannungsebene kommen heute auch vereinzelt noch Öl-Papier-Isolierungen (bzw. masseimprägniertes Papier) für DC-Kabel zum Einsatz. Diese weisen im Gegensatz zu Polymeren zwar eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit auf, können aber das Ausbilden von Raumladungen bei den geforderten elektrischen Betriebsfeldstärken vermeiden. Jedoch kann diese Isolierung nur mit einer verminderten zulässigen Betriebstemperatur von $55 \text{ }^\circ\text{C}$ beansprucht werden.

8 U. Schichler, P. Ratheiser: „Mittelspannungs-Gleichstromübertragung – Übertragungskapazität und Wirtschaftlichkeit von Kabelstrecken“, URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/9783642022010_8.pdf, 22.03.2022

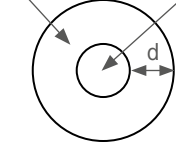
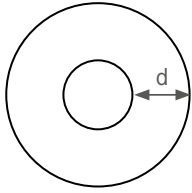
	Niederspannung	Hochspannung
Typische Kabelgeometrie mit zugehörigen Parametern	 Nennspannung $U_{DC} = 1,5 \text{ kV}$ Isolierwandstärke $d_1 = 0,6 \text{ mm}$ $d_2 = 1,2 \text{ mm}$	 Nennspannung $U_{DC} = 320 \text{ kV}$ Isolierwandstärke $d \sim 3 \text{ cm}$
Durchschlagsspannung bei vergleichbarer Luftstrecke Annahme: $E_{d, Luft} \approx 3 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$	$U_{d, Luft1} = E_{d, Luft} \cdot d_1 = 1,8 \text{ kV}$ $U_{d, Luft2} = E_{d, Luft} \cdot d_2 = 3,6 \text{ kV}$ $U_{d, Luft} > U_{DC}$ → <u>kein</u> Durchschlag bei Niederspannung bis 1,5 kV im Feststoff für diese Geometrien	$U_{d, Luft} = E_{d, Luft} \cdot 3 \text{ cm}$ $U_{d, Luft} = 90 \text{ kV} \ll U_{DC}$ → Durchschlag bei Hochspannung im Kabel (Feststoff) bei solchen Geometrien möglich

Abbildung 4: Gegenüberstellung der elektrischen Durchschlagsspannungen Luft – Feststoff für exemplarische Nieder- und Hochspannungsbeanspruchungen

Die Normung (UL 758) sieht identische Prüfungen für AC und DC Leitungen vor (240 h bei 70 °C).



LEGENDE

$U, u(t)$ - elektrische Spannung, bzw. verkettete Spannung zwischen zwei potentialführenden Leitern (zeitlicher Verlauf) in [V]

U_{AC} - Wechselspannung in [V]

U_{DC} - Gleichspannung in [V]

t - Zeit in [s]

κ - elektrische Leitfähigkeit in [S/m]

E - elektrische Feldstärke in [V/m]

E_b - elektrische Betriebsfeldstärke in [V/m]

$E_{d, AC}$ - elektrische Durchschlagsfeldstärke (für AC) in [V/mm]

$E_{d, DC}$ - elektrische Durchschlagsfeldstärke (für DC) in [V/mm]

$E_{d, Luft}$ - elektrische Durchschlagsfeldstärke (für Luft) in [V/mm]

$\oplus \rightarrow$ - frei bewegliche positive Ionen

$\ominus \rightarrow$ - frei bewegliche Elektronen

$\ominus$ - ortsfeste Elektronen (Raumladung)

U_0 - Leiter - Erde Spannung in [V]

d - Isolierwandstärke in [mm]

Folgen Sie LAPP auf:



Unsere AGBs finden Sie unter

www.lapp.com/de/de/e/000010

U.I. Lapp GmbH

Schulze-Delitzsch-Straße 25 · 70565 Stuttgart

Tel.: 0711 7838-01 · Fax: 0711 7838-2640

www.lapp.com · info.de.uil@lapp.com

