

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Isolationskoordination: Bemessung von Luft- und Kriechstrecken unter Umgebungsgesichtspunkten in neuen Anwendungen

Ergebnisbericht

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 03FS13017 und 03FS13018 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	5
1 Ausgangslage.....	6
1.1 Einleitung.....	6
1.2 Konsortialpartner	6
1.3 Stand der Normung	7
2 Motivation.....	9
3 Vorgehen.....	10
3.1 Erster Laborversuch.....	11
3.1.1 Planung.....	11
3.1.2 Durchführung	18
3.1.3 Auswertung	18
3.1.4 Zwischenfazit.....	22
3.2 Zweiter Laborversuch.....	24
3.2.1 Planung.....	24
3.2.2 Durchführung	24
3.2.3 Auswertung	25
4 Ergebnisse.....	26
5 Schlüsse und Handlungsempfehlungen	28
Abkürzungsverzeichnis	31
Quellenverzeichnis	32
Abbildungsverzeichnis.....	33

Zusammenfassung

Mit dem hier vorliegenden Ergebnisbericht wird das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Projekt *Isolationskoordination: Bemessung von Luft- und Kriechstrecken unter Umgebungsbedingungen in neuen Anwendungen* zusammengefasst.

Das Vorhaben hatte zum Ziel, die bestehenden Sicherheitsgrenzwerte der Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel im Niederspannungsbereich, die in der Normenreihe DIN EN 60664 (VDE 0110) festgelegt wurden, vor dem Hintergrund der zu erwartenden Umgebungseinflüsse in neuen Anwendungen wie beispielsweise der Elektromobilität kritisch zu untersuchen, das heißt zu bestätigen oder neu aufzustellen.

Aufbauend auf den bereits genannten normativen Festlegungen, der ihnen zugrunde liegenden Untersuchungen aus den 1980er Jahren der ZVEI-Forschungsgemeinschaft *Kriechstrecken* sowie weiteren Grundlagenuntersuchungen wurden zwei aufeinander aufbauende Laborversuche geplant und durchgeführt. Um in der zur Verfügung stehenden Projektlaufzeit die Beanspruchung der Prüflinge über ihre Lebensdauer simulieren zu können, wurden sie jeweils einer 100-tägigen Umweltprüfung nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) unterzogen. Das Prüflingsdesign wurde in Anlehnung an die bereits erwähnten Untersuchungen erstellt, sodass einerseits der Vergleich mit den bestehenden Festlegungen möglich war und andererseits auch die Reduzierbarkeit untersucht werden konnte. Um die Degeneration und den Ausfall einer Isolierstrecke protokollieren zu können, wurde in definierten Abständen und bei einheitlichen klimatischen Bedingungen der Isolationswiderstand gemessen. Die Konfidenz der Messergebnisse trotz der umfangreichen Parametervariation wurde mithilfe der statistischen Versuchsplanung erlangt. Das Vorhaben wurde von einer Arbeitsgruppe aus Mitgliedern des national für die Normung der Isolationskoordination im Niederspannungsbereich zuständigen Komitees DKE/K 123 begleitet sowie durch zwei Workshops, an denen zudem Experten aus den interessierten Gremien der Produktnormung teilnahmen, flankiert.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die derzeit in der DIN EN 60664 (VDE 0110)-Reihe getroffenen Festlegungen für Leitplatten die sichere Nutzung von elektrischen Strom auch in neuen Anwendungen gewährleisten, jedoch nur unter bestimmten Parameterkombinationen, nicht also in der Generalität, wie sie in der Tabelle F.4 der DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1) für gedruckte Schaltungen ausgewiesen sind. Daher empfiehlt das Projekt die Erweiterung der Tabelle, sodass zwischen den verschiedenen Basismaterialien und möglichen Schutzbeschichtungen unterschieden sowie der Verschmutzungsgrad 3 berücksichtigt wird. In diesem Kontext regt das Projekt auch die Anpassung der Definitionen der Verschmutzungsgrade 2 und 3 an.

Des Weiteren identifizierten die Experten den Bedarf an normativen Festlegungen zur Isolationskoordination für Halbleiterbauelemente, für *cemented joints* – Klebeverbindungen zwischen zwei Feststoffen – und für Multilayer-Platinen und regten die Durchführung entsprechender Untersuchungen an. Vor dem Hintergrund, dass Anwendungen wie beispielweise die Photovoltaik die Grenze des Niederspannungsbereich von DC 1 500 V bereits erreichen, wird zudem die Ausweitung der Untersuchungen auf Spannungen bis DC 3 000 V angeregt.



1 Ausgangslage

1.1 Einleitung

Der Bereich der Niederspannung (Wechselspannungen bis 1 000 V und Gleichspannungen bis 1 500 V) spielt für die elektrische Sicherheit eine besondere Rolle, da die meisten von Laien bedienten Geräte in diesem Spannungsbereich betrieben werden (230 V Wechselspannung). In diesem Spannungsbereich stellt der elektrische Schlag beim Berühren die Hauptgefahr für den Menschen (und Tiere) dar.

Isolierungen, die den im praktischen Betrieb vorkommenden Anforderungen nicht gewachsen sind, können aber auch zum Ausfall von wichtigen Komponenten führen. Ist die Ursache hierfür in den Umgebungsbedingungen der Elektronik zu suchen, so können auch mehrere voneinander unabhängige Isolierungen gleichzeitig ausfallen. Aus diesem Grund ist die richtige Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken insbesondere für sicherheitsrelevante Komponenten unverzichtbar.

Unnötig groß dimensionierte Luft- und Kriechstrecken erhöhen auf der anderen Seite aber auch die Kosten oder machen manche Lösung unmöglich und erschweren damit den Einstieg in neue Anwendungen, wie beispielsweise der Elektromobilität. Bei diesen neuen Anwendungen sind die Luft- und Kriechstrecken teilweise auch neuen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, so dass die bisherigen Erfahrungswerte nur bedingt verwendet werden können.

Nach übereinstimmender Bewertung aller beteiligten Experten stellt die richtige Dimensionierung der Kriechstrecken die erheblich größere technische Herausforderung dar, die Unsicherheit bei der Auslegung der Luftstrecken ist dagegen sehr viel geringer. Daher fokussierten sich die Untersuchungen dieses Vorhabens ausschließlich auf die Kriechstrecken.

1.2 Konsortialpartner

Die **Bender GmbH & Co. KG** ist seit 1946 Geräte- und Systemhersteller auf dem Gebiet der Netzschutztechnik. Die Mission von Bender besteht im Schaffen von neuen Technologien zum sicheren Umgang mit elektrischem Strom; ein Ziel besteht in der bestmöglichen Gewährleistung des Schutzes der Menschen und des sicheren Betriebs von Maschinen, Anlagen und Systemen.

Seit Firmengründung leistet die Firma Bender einen für ein mittelständisches Unternehmen außergewöhnlich hohen Beitrag im Bereich der Normung und Standardisierung.

Bedingt durch die Vielzahl der von Bender zu bedienenden Anwendungsfälle, bis in den Mittelspannungsbereich hinein, wurde Bender immer wieder darin gefordert, neben wirksamen funktionalen Lösungen auch zur Applikation passende und zuverlässige, Schutzkonzepte zu entwickeln.

Der **Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.** (VDE) ist die international anerkannte Institution für elektrische Sicherheit. Ein Ziel des VDE ist die Förderung der Unfallverhütung im Interesse der Sicherheit der Allgemeinheit und des Verbraucherschutzes.

Der VDE-Ausschuss Sicherheits- und Unfallforschung (SUF) stellt sich die Aufgabe, Unfälle und Schäden vermeiden zu helfen und Risiken zu mindern, welche im Umgang mit elektrotechnischen Einrichtungen, Verfahren und Dienstleistungen im privaten, gewerblichen und industriellen Bereich entstehen können.

Der Bereich Normung des VDE, die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, ist zugleich der für ihre Arbeitsgebiete zuständige Normenausschuss des DIN. Er ist jedoch organisatorisch Teil des VDE, allerdings mit eigenem Haushalt.

Die DKE wirkt als nationale Organisation für die Erarbeitung von Normen und Sicherheitsbestimmungen im Bereich der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Als deutsches Mitglied der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) und des Europäischen Komitees für elektrotechnische Normung (CENELEC) fungiert die DKE international als deutsche Interessenvertretung.

Mit dem Hintergrund der technisch-wissenschaftlichen Vernetzung des VDE mit nationalen, europäischen und internationalen Verbänden, Hochschulen und der Politik sowie der ausgesprochenen Expertise im Bereich der Normung und Standardisierung übernahm der VDE die Koordination im Projekt.

1.3 Stand der Normung

Die Normenreihe DIN EN 60664 (VDE 0110) spiegelt den anerkannten Stand der Technik auf dem Gebiet der Isolationskoordination wider. Der zum Projektstart gültige Teil 5 der Normenreihe listet in den Literaturhinweisen die zugrunde liegenden Forschungsergebnisse auf¹. Hier sind zwei Forschungsberichte des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) zur Kurzzeitspannungsfestigkeit kleiner Isolierstrecken [1] und zur kriechstromsicheren Bemessung von Isolierungen [2] zu nennen, die bereits aus dem Jahr 1989 stammen.

Im Teil 1 der Normenreihe sind die Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen der Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel im Niederspannungsbereich festgelegt. Als Sicherheitsgrundnorm nach dem IEC Guide 104 hat er eine große Bedeutung, denn es wird ein Sicherheitsaspekt behandelt, der in zahlreichen elektrotechnischen Produkten zur Anwendung kommt.

Der Teil 3 der Normenreihe befasst sich mit der Bemessung von Luft- und Kriechstrecken und deren Prüfung für Anordnungen, die durch Beschichtungen, Ein- oder Vergießen gegen Verschmutzung geschützt sind. Im Vergleich zu den in den Teilen 1 und 5 angegebenen Luft- und Kriechstrecken sind hiernach Reduzierungen möglich.

¹ Die im September 2016 veröffentlichte technische Anleitung IEC TR 63040 ist in Teilen inhaltsgleich zur IEC 60664-5 und verweist ebenso auf die beiden genannten Forschungsberichte.



Der Teil 4 fokussiert die Besonderheiten einer hochfrequenten Spannungsbeanspruchung, das heißt einer periodischen Spannung beliebiger Art mit einer Grundfrequenz von 30 kHz bis 10 MHz. Er legt die Anforderungen für Luft- und Kriechstrecken sowie feste Isolierungen für Betriebsmittel auf der Grundlage deren Stehvermögens fest und schließt elektrische Prüfverfahren für die Isolationskoordination ein.

Im VDE-Vorschriftenwerk wird die Normenreihe DIN EN 60664 unter der Nummer 0110 geführt. Diese Reihe umfasst mit der DIN VDE 0110-20 innerhalb des Vorschriftenwerks zusätzlich eine Anwendungsrichtlinie zur Vereinheitlichung der Verfahren von Teilentladungsprüfungen.

Innerhalb des VDE-Vorschriftenwerks nimmt die Isolationskoordination eine bedeutende Rolle ein. Eine Analyse zu Beginn dieses Projekts ergab, dass mehr als 400 der insgesamt über 3 000 Dokumente das Thema ansprechen. Beschränkt man die Ergebnisse auf Vorschriften zum Niederspannungsbereich, zu dem dieses Vorhaben Untersuchungen durchführt, ergibt sich eine Betroffenheit von circa 130 Schriftstücken. In etwa die Hälfte dieser Schriftstücke nimmt undatierte Verweise auf die DIN EN 60664 (VDE 0110)-Reihe oder -Teile vor. Das hat je nach Projektergebnissen zur Folge, dass für die entsprechenden Produkte die Luft- und Kriechstrecken unverzüglich nach Inkrafttreten einer geänderten Ausgabe der verwiesenen Norm neu zu bemessen sind.

2 Motivation

Aktuelle Anwendungen setzen verstärkt auf Gleichspannungen: entweder deren Nutzung als Verbraucher (Senke) oder deren Bereitstellung als Energieversorgung (Quelle). In beiden Fällen ist häufig eine Umformung von Wechsel- in Gleichspannung oder umgekehrt mit beispielsweise Wechselrichtern oder die Einstellung auf verschiedene Spannungslagen erforderlich. Diese Umwandlung, die Verteilung in den Geräten bis hin zur Bereitstellung am eigentlichen Aktuator sowie die Speicherung und der Abruf der Energie in und aus entsprechenden Speichern (z. B. Batterien, Brennstoffzellen) erfordert Elektronik, die für hohe Gleichspannungen geeignet sein muss und gleichzeitig neuen Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist. Unter diesen Gesichtspunkten ergeben sich mögliche Gefährdungen, die bislang nicht im Fokus einer Sicherheitsphilosophie standen. Die Herstellung und Prüfung der erforderlichen Elektronikkomponenten ist daher kritisch zu untersuchen. Ein wesentlicher Aspekt für die Sicherheit im Umgang mit hohen Gleichspannungen ist die Isolationskoordination. Die bisherigen Erkenntnisse der Isolationskoordination insbesondere im Zusammenhang mit zu erwartenden Umgebungseinflüssen und dadurch potenzieller Gefährdungen kritisch auszuwerten, wurde somit zum Gegenstand der Untersuchungen in diesem Vorhaben. Auf dieser Basis sollen Sicherheitsgrenzwerte bestätigt oder neu aufgestellt werden.

In beiden Fällen dient dieses Vorhaben der sicheren Nutzung von elektrischem Strom auch in neuen Anwendungen. Am Beispiel der Elektromobilität werden die Erkenntnisse verifiziert und dienen auch anderen Anwendungsfällen als Referenz.



3 Vorgehen

Als allgemeine Herangehensweise wurde eine Kombination aus theoretischen Betrachtungen und praktischen Laborversuchen gewählt. Die Ziele der theoretischen Betrachtungen bestanden zum einen darin die praktischen Labormessreihen vorab möglichst optimal zu planen und durchzuführen. Zum anderen wurden Fragestellungen wie z. B. mögliche Schädigungsmechanismen theoretisch betrachtet, um die bei den praktischen Versuchen erzielten Ergebnisse bewerten zu können.

Bezüglich der Thematik *Auswahl geeigneter Umgebungsprüfungen* wurde der ursprüngliche Ansatz Simulationen zu nutzen frühzeitig fallen gelassen. Bei der Analyse zeigte die Rücksprache mit technischen Experten der Industrie sowie eine Recherche bereits durchgeführter Grundlagenuntersuchungen zum Thema *Betauung und Verschmutzung*, dass eine realitätsnahe Simulation dieser Größen nicht möglich ist. Als Konsequenz wurden zwei praktische Laborversuche geplant und durchgeführt. Der zweite Versuch wurde in reduziertem Umfang hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Prüflinge und Systemspannungen durchgeführt, da diese in erster Linie zur Plausibilisierung der Ergebnisse der ersten Messreihe dienen sollte. In den folgenden Unterkapiteln werden Planung, Durchführung und Auswertung der beiden Laborversuche näher beschrieben, wobei in Kapitel 3.2 lediglich auf die Änderungen zur ersten Messreihe eingegangen wird.

Grundsätzlich gilt, dass unterschiedliche Einflussfaktoren (z. B. elektrischer Druck, mechanischer Druck, thermischer Druck, chemischer Angriff) eine allmähliche Abnahme der Lebensdauer einer Isolierstrecke verursachen. Die Isolierung wird als fehlerhaft erachtet, sobald sie den Stromfluss in ungewünschte Bahnen zulässt und nicht angemessen verhindert. Das schließt Stromfluss über die inneren Strukturen und die äußeren Oberflächen der Isolation mit ein, der im Folgenden als Kriechstrom bezeichnet wird. Sobald die Isolationsverschlechterung einmal begonnen hat, tritt häufig eine Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren ein, die den Zerstörungsprozess beschleunigt.

Einleitend ist für beide Versuche festzuhalten, dass aufgrund der beschriebenen komplexen Schädigungsformen eine große Anzahl an Einflussfaktoren vorlag. Um möglichst viele dieser Einflussfaktoren bei gegebenem Testrahmen (Zeit / Kosten) überprüfen zu können wurde entschieden eine relativ große Variation von Prüflingen zu verwenden, wobei in beiden Versuchen zwölf Demonstratoren (Leiterplatten) mit jeweils vier Isolierstrecken realisiert wurden. Die statistische Konfidenz sollte dabei über den Ansatz der statistischen Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments (DoE)) durch Einbeziehung aller Messwerte erlangt werden. Dies stellt eine weitere Unterscheidung zu den bereits erwähnten Vorhaben der ZVEI-Forschungsgemeinschaft *Kriechstrecken* dar, die die statistische Konfidenz über mehrfach gleich aufgebaute Prüflinge zu erzielen versuchten. Die Zulässigkeit der gewählten Herangehensweise wurde mit Experten auf dem Gebiet des DoE besprochen. Die hierzu notwendige Fachkompetenz wurde über entsprechende Seminare und Werkzeugschulungen erlangt.

3.1 Erster Laborversuch

3.1.1 Planung

Bewertungskriterien

Für die Messreihe wurde zunächst ein geeignetes Bewertungskriterium zur Überprüfung der Isolationsqualität ausgewählt, wobei folgende Möglichkeiten gegeneinander abgewogen wurden:

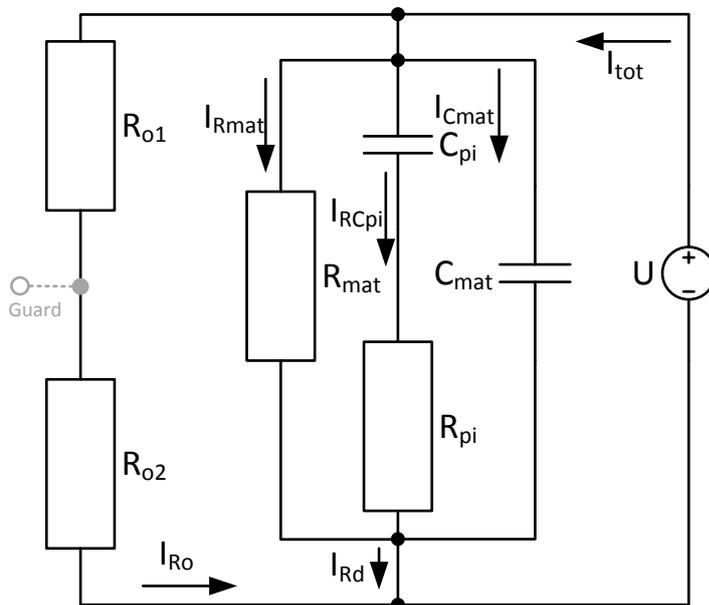
- Hochspannungsprüfung
- Stoßspannungsprüfung
- Teilentladungsmessung
- Isolationswiderstandsmessung
- Messung der dielektrischen Verluste

Auf Basis der folgenden Kriterien wurde die Isolationswiderstandsmessung ausgewählt sowie ein geeignetes Messmittel qualifiziert:

- Qualitative Messwerte
- Überschaubarer Aufwand
- Keine Beschädigung / Zerstörung des Prüflings
- Wiederholbarkeit
- Überwachung im Betrieb möglich

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens *Kriechstrecken* aus dem Jahre 1989 waren Isolationswerte zu Versuchsbeginn im Bereich von mehreren hundert Gigaohm bis einige Teraohm zu erwarten, die bis zum Versagen der Isolation bis auf wenige Megaohm zusammenbrechen. Genauer wurde für den Versuch als Versagen der Isolierstrecke das Kriterium eines Stromflusses von 10 mA festgelegt und unter Berücksichtigung dieser Grenzen ein Messgerät mit einem Messbereich von 40 k Ω bis 4 T Ω bei der Festlegung einer Prüfgleichspannung von 1 000 V ausgewählt.

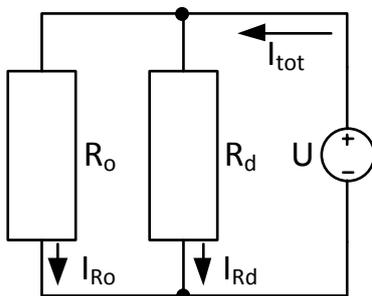
Die Dauer für eine Messung wurde auf 60 Sekunden festgelegt. Die Notwendigkeit dieser Festlegung beruht darauf, dass der durch das Messgerät aufgenommene Strom eine Zeitkonstante besitzt, die auf unterschiedlichen Phänomenen des jeweiligen Isolationsmaterials basiert, an das eine Spannung angelegt wird. Das nach der Theorie angenommene Modell der Isolierung ist in Abbildung 1 dargestellt und vereinfacht sich zu dem in Abbildung 2 gezeigten Modell, sobald der Polarisations- und der kapazitive Ladeprozess des Materials vollständig abgeschlossen sind.



mit:

- U = angelegte Testspannung
- R_{o1} und R_{o2} = Oberflächenwiderstände
- R_{mat} = Widerstand des Materials
- C_{mat} = Kapazität des Materials
- R_{pi} = Polarisationswiderstand
- C_{pi} = Polarisationskapazität
- I_{tot} = Gesamtstrom
- I_{Ro} = Oberflächenleckstrom
- I_{Rd} = Durchgangsleckstrom
- I_{Rmat} = Leckstrom des Materials
- I_{RCpi} = Polarisations-/ dielektrischer Absorptionsstrom
- I_{Cmat} = Ladungsstrom der Kapazität des Materials

Abbildung 1: Modell zum Aufbau eines Isolationsmaterials



mit:

- U = angelegte Testspannung
- I_{tot} = Gesamtstrom
- I_{Ro} = Oberflächenleckstrom
- I_{Rd} = Durchgangsleckstrom
- R_o = Gesamt-Oberflächenwiderstand
- R_d = Gesamt-Durchgangswiderstand

Abbildung 2: Modell zum Aufbau eines Isolationsmaterials nach vollständiger Polarisation sowie kapazitiver Ladung

Umweltprüfung (klimatische Belastung)

Da Veränderungen erst nach einer bestimmten Beanspruchungsdauer zu erwarten sind, wurden für die Messreihen eine zeitraffende Maßnahme gesucht, die auch in kurzer Zeit eine zuverlässige Aussage zur Entwicklung des Isolationsniveaus zulässt. Die Wahl fiel auf die Umweltprüfung nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38), bei der nach einer Vorbehandlung (siehe Abbildung 4) durch Feuchte- und Kälte-Zyklen (siehe Abbildung 5 und 6) eine Beschleunigung der Isolationsveränderung unter Laborbedingungen (in einem Klimaschrank) erreicht werden sollte [3]. An jeden Einzelzyklus (siehe Abbildung 3) von 240 Stunden, der zehnmal wiederholt wurde, schlossen sich die Messungen des Isolationswiderstandes an. Somit wurde eine Gesamtversuchsdauer von 100 Tagen erreicht.



Abbildung 3: Versuchszyklus 10 Tage und Vorbehandlung

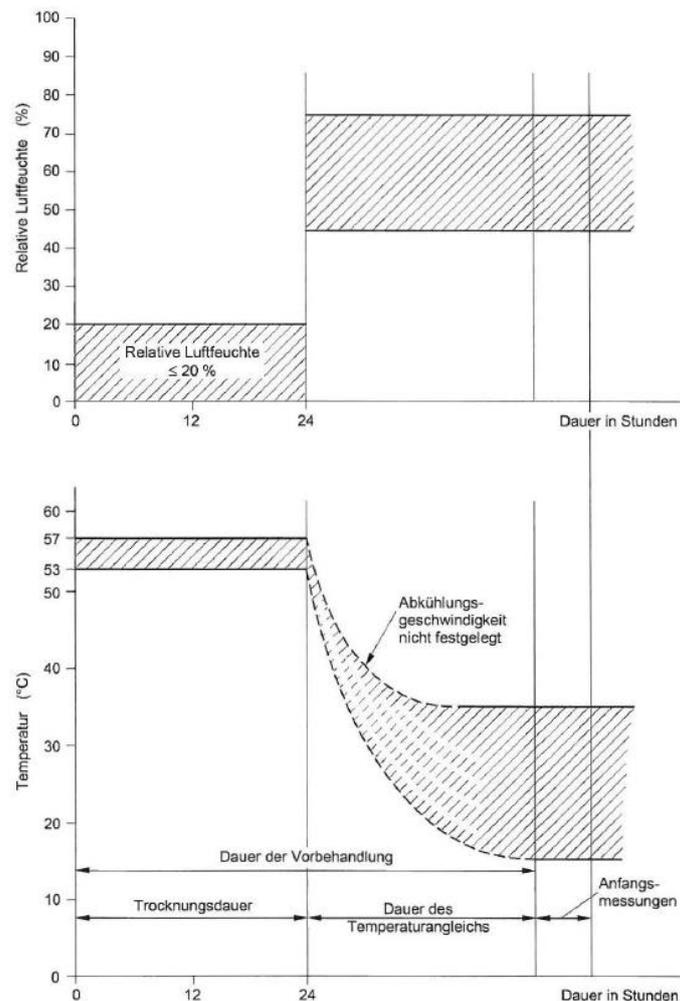


Abbildung 4: Vorbehandlung nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) [3]

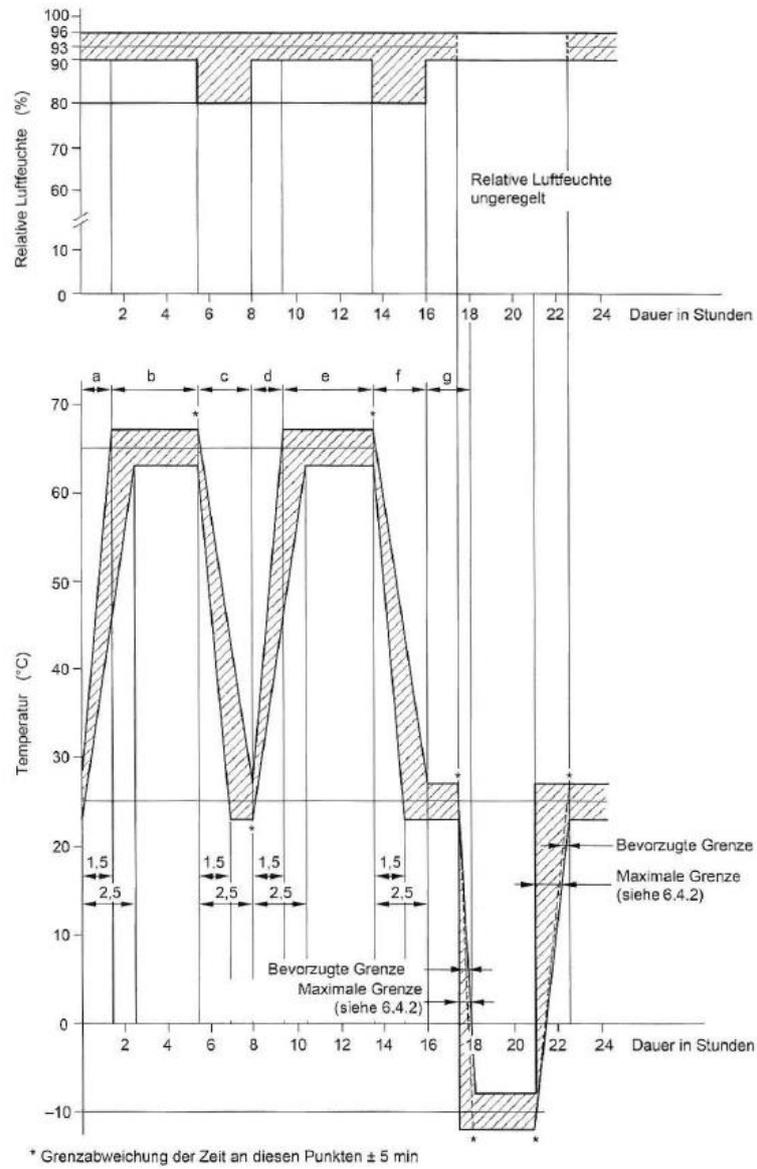


Abbildung 5: Profil Kälte und Feuchte nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) [3]

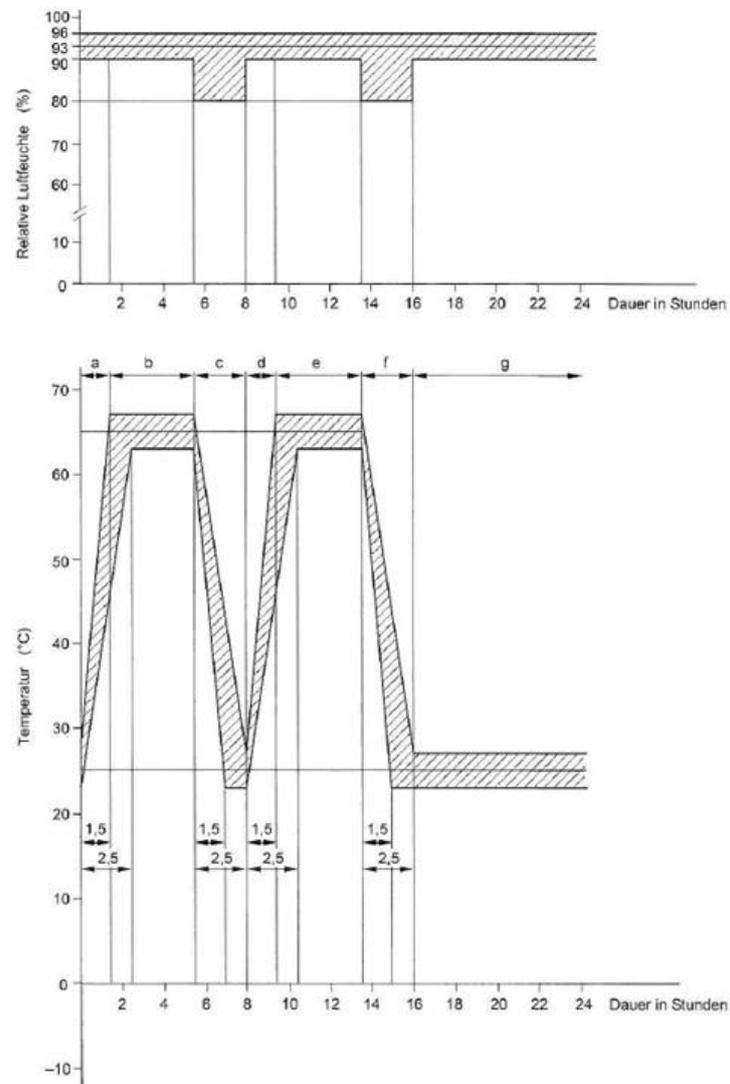


Abbildung 6: Profil Feuchte nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) [3]

Die Erwartungshaltung bestand infolge der Recherchen darin, dass durch das Unterschreiten der Taupunkttemperatur der Luft das Phänomen der Kondensation an der Isolierstoffoberfläche hervorgerufen wird, wodurch im Grenzgebiet zwischen Feststoffen und Gas ein lokal erhöhter Wasserdampfdruck entsteht. Dieser Wasserdampfdruck sollte nach der Theorie zur Folge haben, dass in Richtung des Temperaturgefälles eine Anlagerung der kondensierten Wassertropfen an die Isolierstoffoberflächen stattfindet, was als Befeuchtung der Feststoffoberfläche durch Betauung bezeichnet wird.

Als Folge der Betauung sollten sich dünne, leitfähige Fremdschichten auf der Isolierstoffoberfläche bilden, durch die im Betrieb Kriechströme fließen. Diese Ströme sollten des Weiteren zur Bildung von Trockenzonen führen, die bei elektrischer Belastung durch das Phänomen der Teilentladung den Isolierstoff nachhaltig schädigen.



Verschmutzungsgrad

Durch Auswahl der genannten, zeittraffenden Umweltprüfung nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) wurde ein Klimaprofil verwendet, bei dem bewusst Betauung auftrat. Somit waren – ohne weitere Abschottung – die Prüflinge mindestens einem Verschmutzungsgrad von VS 2 nach DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1) ausgesetzt. Diese Annahme wurde mit Experten des für die Normung der Isolationskoordination im Niederspannungsbereich zuständigen Komitees DKE/K 123 besprochen sowie eine mögliche Verringerung des anzunehmenden Verschmutzungsgrades durch Verwendung eines Gehäuses und / oder durch Aufbringung einer Zusatzbeschichtung diskutiert.

Um den Einfluss eines Lötstopplacks, eines zusätzlichen Schutzlackes sowie eines Gehäuses überprüfen zu können, wurden diese Parameter ebenfalls als Variationen bei der Realisierung der Prüflinge berücksichtigt.

Durch Verwendung unterschiedlicher, metallischer Gehäusevarianten (IP 30 und IP 67) wurde davon ausgegangen, dass neben der zuvor beschriebenen Bedingung für VS 2 (Gehäuse IP 30) gleichzeitig die Bedingung für VS 1 (Gehäuse IP 67) überprüft werden konnten. Diese Annahme basierte auf einer umfassenden Literaturrecherche zum Thema *Schutzwirkung durch Abschottung*. Hierbei lagen keine wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse vor, weshalb auf Erfahrungswerte der technischen Experten unterschiedlicher DKE-Gremien zurückgegriffen wurde, die eine Reduzierung des Verschmutzungsgrades durch Verwendung eines Gehäuses mit entsprechender IP-Schutzart zuließen.

Bezüglich der Schutzwirkung eines Lötstopplackes sowie eines zusätzlichen Schutzlackes lagen ebenfalls keine wissenschaftlich verwendbaren Untersuchungsergebnisse vor. Um eine Aussage bezüglich dieser Einflussfaktoren zu erhalten, wurde in Rücksprache mit den Experten des DKE/K 123 eine Variation der Prüflinge hinsichtlich dieser Parameter beschlossen.

Systemspannungen (elektrische Belastung)

Um Aussagen zu den vorab beschriebenen Applikationen im Niederspannungsbereich treffen zu können, wurden Systemgleichspannungen zwischen 400 V und 1 000 V verwendet.

Prüflingsdesign

Bezüglich der Auswahl des Prüflingsdesigns wurde in Anlehnung an die durchgeführten Untersuchungen der ZVEI-Forschungsgemeinschaft *Kriechstrecken* aus dem Jahre 1989 folgendes Layout neu erstellt [1]:

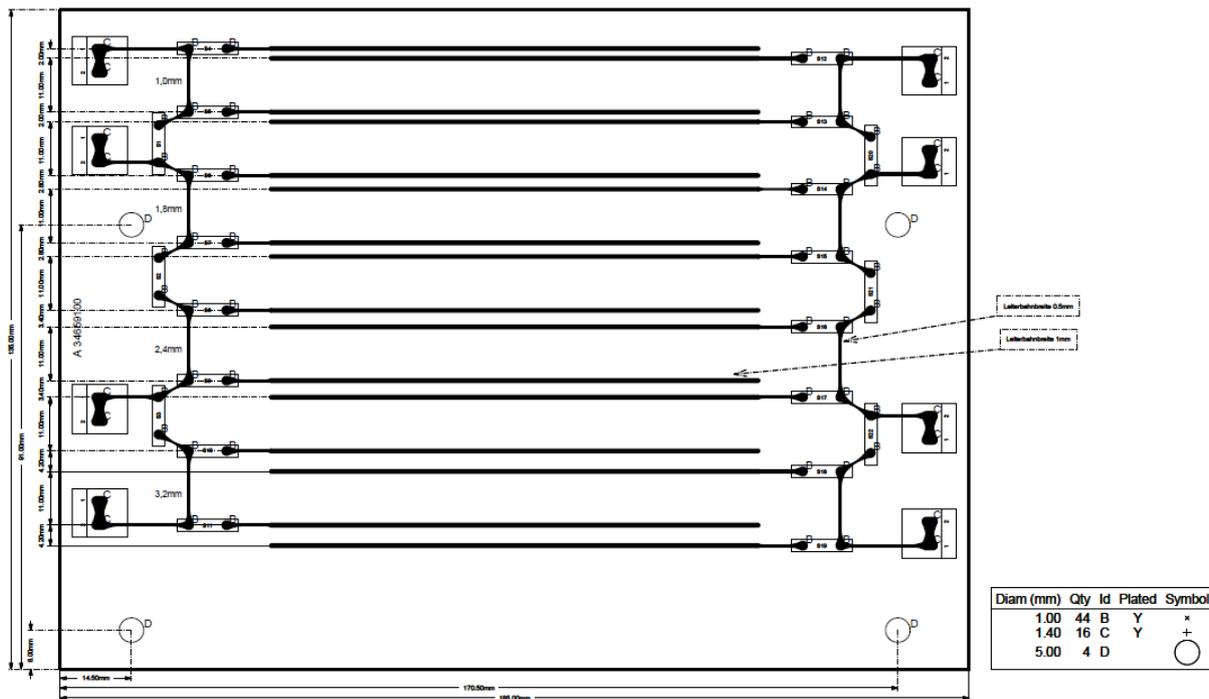


Abbildung 7: Layout Prüflinge

Materialqualität

Basierend auf dem dargestellten Layout wurden Prüflinge in zwei Materialqualitäten realisiert, um auch in diesem Punkt eine Variation zu erzielen. Als Maß für die Materialqualität wurde der CTI-Wert² herangezogen, der sich als einzige normativ festgelegte Größe feststellen ließ.

Für den ersten Versuch wurde ein multifunktionales Epoxidharz-Basismaterial mit einem CTI von 175-249 sowie ein glasgewebeverstärktes Epoxidharz-Basismaterial mit einem CTI von 500 verwendet.

² CTI ... Comparative Tracking Index– Wert für Kriechstromfestigkeit



3.1.2 Durchführung

Die Durchführung der Messreihe fand in einem für das Profil nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) geeigneten Klimaschrank statt, in den zwölf Prüflinge installiert wurden.

Die Anschlussleitungen an die vier Isolierstrecken dienten wechselseitig einmal als Versorgungsspannungsleitungen (DC 400 V ... 1000 V) und als Messleitungen für die Bestimmung des Isolationswiderstandes.

Die Messungen des Isolationswiderstandes fand gemäß des Umweltprofils nach genau festgelegten Zeiten statt. Dabei wurde immer genau dann gemessen, wenn der Klimaschrank eine Temperatur von 25 °C im Profil *Beanspruchung mit Feuchte* am Ende eines Zyklus aufwies.

Für die Durchführung einer Messung wurden alle Netzgeräte als erstes spannungsfrei geschaltet. Danach wurde das Sicherheitslaborkabel der Messstelle entfernt und das Isolationswiderstandsmessgerät an die freie Buchse sowie an die Massebuchse der entsprechenden Messstrecke angeschlossen.

Nach dem Anschluss des Messgerätes wurde die Messung für die bereits erwähnte Dauer durchgeführt und der Wert im Messprotokoll festgehalten. Des Weiteren wurden die über die Schnittstelle übertragenen Werte für die Messung in elektronischer Form abgespeichert.

Nach beendeter Messung wurden die Anschlussleitungen wieder an die entsprechenden Systemspannungen angeschlossen und der Versuch mit dem nächsten Zyklus fortgesetzt.

3.1.3 Auswertung

Untersuchungen durch die Firma Bender

Die erhobenen Daten wurden unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen zunächst anhand der optischen Schädigung bewertet. Hierzu wurden im Hause Bender sowohl die Gehäuse als auch die Prüflinge mit Hilfe einer Digitalkamera aufgenommen. Die vergrößerten Detailaufnahmen der Schädigungen wurden anschließend mit Experten des DKE/K 123 klassifiziert.

Außerdem wurden im Nachgang alle Gehäuseanschlüsse elektrisch vermessen, um eine mögliche Beeinflussung der Messwerte auf den Leiterplatten durch Isolationswiderstände auf der Gehäuseoberfläche ausschließen zu können. Es wurde der Isolationswiderstand zwischen den einzelnen Anschlüssen gegeneinander und gegen Erde mit einer Prüfgleichspannung von 1 000 V gemessen. Hierbei konnte mit Messwerten zwischen 500 und 2 000 GΩ keine Beeinflussung festgestellt werden.

Des Weiteren wurde der Isolationswiderstand der einzelnen Isolierstrecken im trockenen Zustand gemessen. Diese Messung hatte zum Ziel den Einfluss des beim Versuch erzeugten Elektrolyten bewerten zu können. Bezüglich der während des Versuchs ausgefallenen Strecken zeigten die Ergebnisse, dass bei massiveren thermischen Schädigungen keine eindeutigen Aussagen möglich sind. Für alle nicht ausgefallenen Strecken wurden hochohmige Verbindungen im Giga- bis Teraohm-Bereich festgestellt, was den Einfluss des Elektrolyten verdeutlicht. Außerdem zeigten die Messungen, dass die angenommene Parallelschaltung der Leiterstrukturen angewendet werden

kann. Das heißt, es wurde für die Parallelstrecke in etwa der halbe Isolationswiderstand gemessen, den die Einzelstrecken bei Nachmessungen aufzeigten.

Mit den aus den beschriebenen Zusatzuntersuchungen gewonnenen Erkenntnissen wurden Experten aus Industrie und Prüflaboren befragt. Hierzu wurden Aufnahmen ausgewählter Prüflinge zugesendet, zu denen die Experten Stellung nehmen sollten.

Im Ergebnis wurden die beiden folgenden Mechanismen für den Ausfall allgemein elektronischer Baugruppen im weitesten Umfeld von Feuchteeinwirkung benannt, die beide von einem diskontinuierlichen Vorgang der Bildung von Wasserhäuten und einer dadurch bedingten Bildung eines Elektrolyten bestimmt werden:

- a) Kriechströme und
- b) Migrationsbrücken.

Das Absinken des Isolationswiderstandes kann damit auf zwei Gründe zurückgeführt werden:

- a) das Vorhandensein eines Elektrolyten mit einem Mindestmaß an Leitfähigkeit und Schichtdicke und
- b) die Fähigkeit der Metalloberflächen, migrationsfähige Ionen freizusetzen.

Die Ursache dieser Fähigkeit der Metalloberflächen ist darin zu sehen, dass die technisch realisierbaren Oberflächen von Leiterplatten nicht homogen sind, was mit der Physik und Chemie des verwendeten Basismaterials sowie des Herstellungsprozesses der Leiterplatte zu erklären ist. In der Betrachtung sind dabei zu unterscheiden:

- Isolationsbereiche: Bei erhöhter Vergrößerung zeigt das Basismaterial an den Stellen, an denen das Kupfer abgeätzt worden ist, eine poröse Oberfläche. Diese Oberfläche erhöht im mikroskopischen Maßstab die Kriechwege, ist jedoch gleichzeitig in der Lage, Verunreinigungen und Feuchte besser zu binden.
- Leiterzüge: Der Kern des Leiterzugs besteht aus Kupfer (üblicherweise Walz- und / oder Elektrolytkupfer). Der Leiterzug wird nach außen abgedichtet durch Polymere (Löt-Resist) oder Metallschichten (Final Finish) oder eine Kombination aus beiden. Schwachstelle ist dabei der Übergang vom Basismaterial auf die Flanke des Leiterzugs.



Untersuchungen bei der Firma I²PS

Zusätzlich zu den optischen sowie elektrischen Bewertungen im Hause Bender konnte das Prüflabor I²PS für die Analyse zweier Prüflinge gewonnen werden.

Hierbei wurden neben lichtmikroskopischen Aufnahmen Elementanalysen mittels REM-EDX durchgeführt. Als Prüflinge wurden die Platinen 2 und 3 ausgewählt, die die in Tabelle 1 gezeigten Parameter aufweisen.

Prüfling / Messpunkt	Material [CTI]	System-Spannung [V]	Kriechweg [mm]	Gehäuse [IP xx]	Zusätzlicher Oberflächenschutz	Ausfall
2.1	175-249	400	1,0	30	kein	2 Tage
2.2		650	1,8	30		3 Tage
2.3		1 000	2,4	30		2 Tage
2.4		1 000	3,2	30		2 Tage
3.1	500	400	1,0	30	Lötstopplack	51 Tage
3.2		650	1,8	30		>100 Tage
3.3		1 000	2,4	30		
3.4		1 000	3,2	30		

Tabelle 1: Parameter Prüflingeigenschaften Schädigungsanalyse I²PS

Zu Prüfling 2 konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die „dunklen Streifen/faserige Struktur“ zwischen den Leiterbahnen 2 und 3 (siehe Abbildung 8) bestehen aus feinen Ablagerungen auf der Oberfläche. Eine Elementanalyse der dünnen, schwarzen Spuren ergab neben den Elementen des Platinengrundmaterials (Kohlenstoff, Sauerstoff, Aluminium und Silizium) die Elemente Zinn und Kupfer. Damit bestehen die „dünnen, schwarzen Spuren“ aus Kupfer- und Zinn-Verbindungen (zusätzlich Sauerstoff und Chlor), die von den verzinneten Kupferleiterbahnen stammen.
- Eine Elementanalyse im Bereich der „weißen Flecken“ ergab neben den Elementen des Platinengrundmaterials (Kohlenstoff, Sauerstoff, Aluminium und Silizium) im wesentlichen Zinn. Die weißen Flecken bestehen damit vermutlich im Wesentlichen aus Zinn bzw. Zinnverbindungen (z. B. Zinndioxid).



Abbildung 8: Prüfling 2 (Ausschnitt zwischen 2,4 und 3,2 mm Strecke)

Zu Prüfling 3 konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Bereiche der „rotbraunen Zonen zwischen den Strombahnen“ (siehe Abbildung 9) bestehen aus feinen Ablagerungen auf der Oberfläche. Eine Elementanalyse der feinen „faserbüschelartigen“ Strukturen ergab neben den Elementen des Platinengrundmaterials (Kohlenstoff, Sauerstoff, Aluminium und Silizium) einen deutlichen Nachweis von Kupfer. Zinn, wie während der REM-EDX Analyse an Prüfling 2 detektiert, wurde hier nicht gefunden.
- In den „rotbraunen Zonen zwischen den Strombahnen“ wurde auch das Element Chlor analysiert. Chlor könnte eine Verbindung mit Kupfer eingegangen sein (Kupfer(II)-Chlorid, wasserfreie Braunfärbung) und aus der Umgebungsatmosphäre stammen.
- Die vorhandenen Materialdaten der eingesetzten Werkstoffe für die verwendeten Stecker, Kabel, Abstandsbolzen, Kleber, Kunststoffschrauben und Muttern ergaben keinen Hinweis auf eine mögliche Chlorquelle. Informationen zu weiteren eingesetzten Werkstoffen lagen nicht vor.



Abbildung 9: Prüfling 3 (Ausschnitt rotbraune Zonen zwischen Strombahnen)

3.1.4 Zwischenfazit

Entgegen der ursprünglichen Annahme auf Basis der optischen Analyse, dass die Bildung von dendritischen Strukturen die Ursache der Isolationsverschlechterung darstellt, zeigte die Elementanalyse im Prüflabor bei I²PS, dass sich keine durchgängigen leitfähigen Bahnen sondern netzförmige Strukturen ausbreiten. Diese netzförmigen Strukturen bilden sich entlang des elektrischen Feldes aus. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der REM-EDX-Analyse, dass in allen betrachteten Bereichen eine Kupfer-Materialwanderung sowie die Bildung von Kupferchlorid stattgefunden hat.

Der Schädigungsprozess ist demnach voraussichtlich auf die Dichte der Kupferionen im Elektrolyten zurückzuführen. Das heißt, erreichen die Kupferionen im Elektrolyten eine bestimmte Dichte, kommt es durch die angelegte Gleichspannung zur Ausbildung von Teillichtbögen. Diese können über die Zeit zum Überschlag führen, der eine thermische Zerstörung der Isolierstrecke verursachen kann.

Insgesamt ist bezüglich der Schutzwirkung durch ein Gehäuse und / oder durch Lötstopplack und / oder durch eine Zusatzbeschichtung festzuhalten, dass diese die Beständigkeit der Widerstandsfähigkeit gegen eine Umwelt- und elektrische Belastung erhöhen (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die einzelnen Isolationswerte im Verlauf der Messreihe. Zwischen den einzelnen Messpunkten liegen jeweils zehn Tage (240 h), bei denen die Isolierstrecken elektrisch und klimatisch einer Dauerbeanspruchung unterzogen wurden. Es ist eine stetige Degeneration der Isolierstrecken zu erkennen. Diese fällt bei Verwendung eines Gehäuses mit Schutzart IP 67 sowie der Verwendung eines zusätzlichen Schutzlackes weniger stark aus.

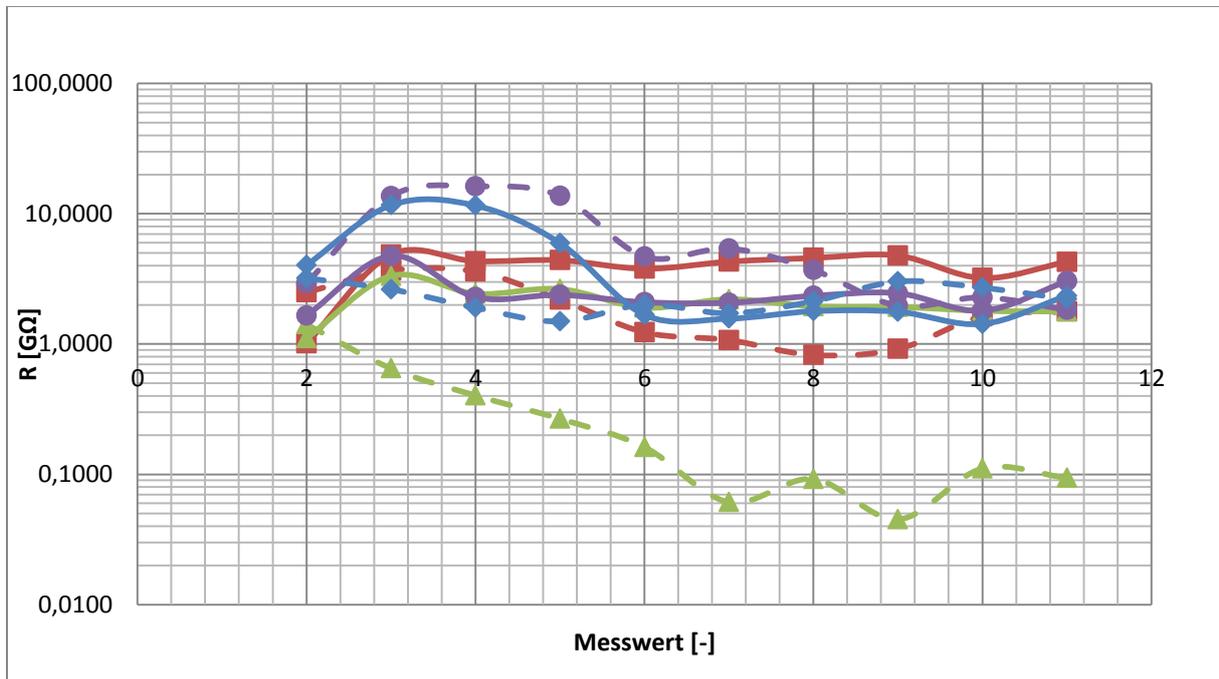


Abbildung 10: Einfluss Gehäuse (Linie gestrichelt: IP 30, Linie durchgezogen: IP 67, 800 V, CTI = 500, gleicher Oberflächenschutz, gleiche Farbe für gleiche Kriechstrecke)

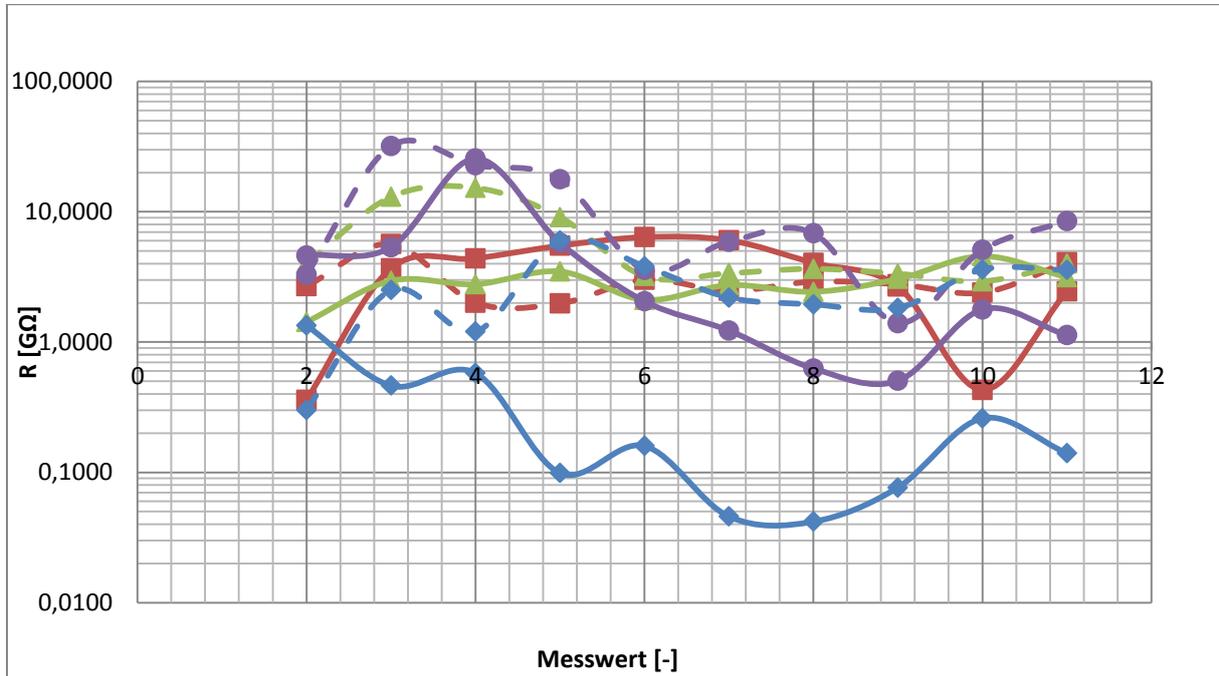


Abbildung 11: Einfluss Oberflächenschutz (Linie gestrichelt: Lötstopplack + Schutzlack, Linie durchgezogen: Lötstopplack, 650 V, CTI = 500, IP 67, gleiche Farbe für gleiche Kriechstrecke)



3.2 Zweiter Laborversuch

Auf Basis der zuvor beschriebenen Erkenntnisse wurde über die Notwendigkeit sowie ein mögliches Setup einer zweiten ergänzenden Messreihe mit der im Zuge der Projektlaufzeit ins Leben gerufenen projektbegleitenden Arbeitsgruppe diskutiert.

Alle Teilnehmer der projektbegleitenden Arbeitsgruppe hielten eine zweite Messreihe sowie darüber hinausgehende Versuche (nach Beendigung des Forschungsprojektes) für unbedingt notwendig. Das mit der Arbeitsgruppe abgestimmte Versuchs-Setup der zweiten Messreihe ist im nachfolgenden Abschnitt stichpunktartig dargestellt.

3.2.1 Planung

Versuchsparameter:

- Bewertungskriterien:
 - Isolationswiderstand;
 - Aufzeichnung der durch die Systemspannung generierten Ströme in den Gehäusen der Schutzart IP 30 (Auswertung des zeitlichen Verlaufs um Rückschlüsse auf die Schädigung zu ziehen; Trigger-Schwellen beginnend bei 1 mA bis 10 mA);
- Umweltprüfung (klimatische Belastung): gemäß DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) für 100 Tage (unverändert);
- Systemspannung (elektr. Belastung): DC 400 V (ausschließlich);
- Messspannung: DC 1 000 V (unverändert);
- Strombegrenzung (Ausfallkriterium): 10 mA (unverändert);
- Kriechstrecken nicht kleiner als $\frac{1}{2}$ Normabstand;
- Prüflingsdesign und Bestückung unverändert;
- Material: FR-4 (ausschließlich);
- Oberflächenschutz: ohne, mit Lötstopplack, mit Lötstopplack und Schutzlack;
- Gehäuse-Schutzart: IP 30, IP 54 und IP 67 (Verwendung von Polycarbonat als Werkstoff).

3.2.2 Durchführung

Mit dem soeben beschriebenen Setup wurden alle Messungen wie im Kapitel 3.1.2 beschrieben durchgeführt und ausgewertet.

Der einzige messtechnische Unterschied zum ersten Versuch bestand in der permanenten Aufzeichnung der fließenden Ströme aller Prüflinge mit Gehäuse-Schutzart IP 30, wozu ein Datenlogger verwendet wurde. Somit konnten bei einer Systemgleichspannung von 400 V Isolationswiderstände ab 400 k Ω erkannt werden. Bei der Dimensionierung des Messwiderstandes wurde ein Kompromiss aus Stromauflösung und durch den Widerstand verursachtem Messfehler gewählt. Der selektierte Widerstandswert betrug 1 Ω , womit bei einer Stromschwelle von 1,0 mA am Widerstand 1,0 mV abfallen.

3.2.3 Auswertung

Keine der installierten Messstrecken zeigte einen Ausfall. Das kann auf folgende Unterschiede zur ersten Messreihe zurückgeführt werden:

- Geringere Leitfähigkeit des verwendeten, demineralisierten Wassers im Klimaschrank. Somit ist mit einer geringen Leitfähigkeit des Elektrolyten zu rechnen. (vgl. 1. Messreihe: ca. 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 2. Messreihe: ca. 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$);
- Geringere Systemspannung. (vgl. 1. Messreihe: DC 400 V ... 1 000 V, 2. Messreihe: DC 400 V);
- Verwendung unterschiedlicher Gehäuse. Somit ist mit einer anderen Zusammensetzung des Elektrolyten zu rechnen. (vgl. 1. Messreihe: metallisches Gehäuse, 2. Messreihe: Polycarbonat-Gehäuse);
- Verwendung unterschiedlicher Klimaschränke. Somit ist mit einer anderen Zusammensetzung des Elektrolyten durch Kontamination zu rechnen. (vgl. 1. Messreihe: Prüflabor der Firma Bosch, 2. Messreihe: Prüflabor der Firma Bender).

Der größte Einfluss der genannten Punkte ist von der geringeren Leitfähigkeit des verwendeten demineralisierten Wassers im Klimaschrank zu erwarten. Dieser kam durch den Einsatz unterschiedlicher Einsatzzeiten des jeweils verwendeten Reinigungsfilters zustande. Der Filter des ersten Versuchs war an seinem Lebensende, während der Filter der zweiten Messreihe im Laufe der ersten Versuchswoche erneuert wurde.



4 Ergebnisse

Die erhaltenen Mindestkriechstrecken zur Aufrechterhaltung eines Isolationswiderstands von etwa 100 M Ω sind in Tabelle 2 angegeben. Dabei ergibt sich für geschützte Kriechstrecken ein durchgängig günstiges Ergebnis, während das Ergebnis für ungeschützte Kriechstrecken sehr ungünstig ist. Insofern bestätigen sich auch hier die Ergebnisse des Forschungsvorhabens *Kriechstrecken*, die ein sehr unzuverlässiges Verhalten von Kriechstrecken unter etwa 2 mm unter dem Einfluss hoher Feuchtigkeit gezeigt hatten [4].

	Schutz durch Gehäuse IP 67, Lötstopplack und zusätzliche Beschichtung	Schutz durch Gehäuse IP 67 und Lötstopplack	Schutz durch Lötstopplack und zusätzliche Beschichtung	Schutz durch Lötstopplack	Schutz durch Lötstopplack**	Kein Schutz
Spannung	Isolierstoffgruppe					
	II	II	II	II	IIIa	IIIa
Effektivwert	Mindestkriechstrecke³					
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
V						
200						3,2***
250						
320						
400	0,5	0,5	0,5		1	
500						
630	0,9	0,9	0,9	1,8	1,8	7,5*
800	1,2	1,2	1,2	2,4		
1 000	1,6	1,6	1,6	3,2	3,2	

* – Dieser Abstand war bei 1000 V gerade nicht mehr ausreichend, es wird angenommen, dass dieser bei 630 V bestanden hätte.
 ** – Bisher erst 30 Tage beansprucht.
 *** – Bisher erst 60 Tage beansprucht.

Tabelle 2: Mindestkriechstrecken auf Leiterplatten mit ausreichendem Isolationswiderstand

Die Ergebnisse der zweiten Messreihe widerlegen die zuvor beschriebenen Erkenntnisse nicht, da in realen Applikationen eine Leitfähigkeit des Elektrolyten über 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu erwarten ist. Hierzu wurde eine umfassende Recherche angestellt, die eine Einteilung der Leitfähigkeit von Wasser gemäß Tabelle 3 zulassen sollte.

³ für einen Mindestisolationswiderstand von 100 M Ω

Klassifikation	Leitwert
Ultrareines Wasser	0,05 ... 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Destilliertes Wasser	bis 20 μS
Trink-, Grundwasser	300 ... 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Fluss- und Seewasser	1 ... 5 mS/cm
Meerwasser	56 mS/cm

Tabelle 3: Übersicht / Klassifizierung Leitfähigkeitswerte Wasser

Neben den Erkenntnissen aus den aufgenommenen Daten wurde versucht die Beschleunigungswirkung des verwendeten Normprofils in Erfahrung zu bringen. Hierbei zeigte die eigene Recherche sowie die Rücksprache mit Experten aus der Industrie und der Normung, dass keine Lebensdaueraussage ohne die genaue Kenntnis des Belastungskollektivs für den speziellen Versuchsaufbau möglich ist. Die Individualität des jeweiligen Prüflingsdesigns sowie die Qualität des Herstellungsprozesses sind entscheidende Parameter, die konstant gehalten werden müssen. Nur dann ist es möglich über mehrere Messreihen mit Variation der Messgrößen *Feuchte [% r.H.]* und *Temperatur [°C]* bei gleichzeitiger Aufnahme verschiedener Zielgrößen *Isolationswiderstand [Ohm]* und *Durchschlagsspannung [V]* einen Beschleunigungsfaktor abzuleiten.



5 Schlüsse und Handlungsempfehlungen

Bezogen auf die bisherigen Bemessungsregeln für Kriechstrecken auf Leiterplatten ergibt sich damit folgende Situation:

1. Bei Schutz durch Gehäuse mit IP 67, Lötstopplack und einer zusätzlichen Beschichtung nach IEC 60664-3 Typ 1 [5] kann mit der Hälfte der für Verschmutzungsgrad 1 erforderlichen Kriechstrecken ein ausreichender Isolationswiderstand erzielt werden. Die Bemessung der Kriechstrecken nach Verschmutzungsgrad 1 ist daher in jedem Fall ausreichend.
2. Bei Schutz durch Gehäuse mit IP 67 und Lötstopplack kann mit der Hälfte der für Verschmutzungsgrad 1 erforderlichen Kriechstrecken ein ausreichender Isolationswiderstand erzielt werden (1 Ausreißer bei 400 V und 1 mm). Die Bemessung der Kriechstrecken nach Verschmutzungsgrad 1 ist daher ausreichend.
3. Bei Schutz durch Lötstopplack und eine zusätzliche Beschichtung nach IEC 60664-3 Typ 1 [5] kann mit der Hälfte der für Verschmutzungsgrad 1 erforderlichen Kriechstrecken ein ausreichender Isolationswiderstand erzielt werden. Die Bemessung der Kriechstrecken nach Verschmutzungsgrad 1 ist daher in jedem Fall ausreichend.
4. Bei Schutz durch Lötstopplack kann mit den für Verschmutzungsgrad 1 erforderlichen Kriechstrecken ein ausreichender Isolationswiderstand erzielt werden (1 Ausreißer bei 400 V und 1 mm). Die Bemessung der Kriechstrecken nach Verschmutzungsgrad 2 ist daher ausreichend, wenn das Basismaterial mindestens zur Isolierstoffgruppe IIIa gehört.
5. Ohne Schutz müssten die Kriechstrecken auf Leiterplatten für Verschmutzungsgrad 3 bemessen werden. Die Kriechstrecken für Verschmutzungsgrad 2 und Isolierstoffgruppe IIIa halten jedenfalls einer wiederholten Betauung unter Spannung nicht stand.

Daraus folgt, dass in der IEC 60664-1 vermutlich folgende Annahme bezüglich der Definition des Verschmutzungsgrades 2 falsch ist:

- Verschmutzungsgrad 2 (alt)

Es tritt nur nicht leitfähige Verschmutzung auf. Gelegentlich muss jedoch mit vorübergehender Leitfähigkeit durch Betauung gerechnet werden.

Offensichtlich halten die ungeschützten Kriechstrecken bei den Versuchen aber der Betauung unter Spannung nicht hinreichend stand. Die einfachste Lösung wäre, die Definition des Verschmutzungsgrades 2 wie folgt zu ändern (siehe DIN EN 50178 (VDE 0160) [6] bzw. IEC 62103 [7]):

- Verschmutzungsgrad 2 (neu)

Im Normalfall tritt nur nicht leitfähige Verschmutzung auf. Gelegentlich ist jedoch eine Leitfähigkeit kurzer Dauer durch Betauung zu erwarten, wenn das Gerät außer Betrieb ist.

Darüber hinaus muss bei der Anwendung der reduzierten Werte der Kriechstrecken auf Leiterplatten immer ein Schutz gegen Verschmutzung verwendet werden. Ein Lötstopplack ausreichender Qualität ist hierfür jedoch ausreichend.

In diesem Zusammenhang erscheint auch die Definition des Verschmutzungsgrads 3 nicht im Einklang mit den Ergebnissen dieses Vorhabens zu stehen. Insbesondere ist der Unterschied zum Verschmutzungsgrad 2 viel zu drastisch.

Es wird daher folgende Änderung vorgeschlagen:

- Verschmutzungsgrad 3 (alt)

Es tritt leitfähige Verschmutzung auf oder trockene, nicht leitfähige Verschmutzung, die leitfähig wird, da Betauung zu erwarten ist.

- Verschmutzungsgrad 3 (neu)

Es tritt leitfähige Verschmutzung auf oder trockene, nicht leitfähige Verschmutzung, die bei Betauung leitfähig wird. Gelegentlich kann dies auch im Betrieb des Geräts geschehen.

Für die Bemessung der Kriechstrecken unter den Verschmutzungsgraden VS 1 bis VS 3 und den Isolierstoffgruppen IG I bis IG III sowie auf Leiterplatten mit mindestens IG IIIa ergibt sich aus den Versuchsergebnissen die Notwendigkeit der in Tabelle 4 zusammengefassten Normänderungen.

Bedingung	Definition VS / Schutzmaßnahmen	Kriechstrecken
VS 1, GS, (min. IG IIIa)	– / Mindestens Lötstopplack erforderlich	unverändert
VS 2, GS, (min. IG IIIa)	Keine Betauung unter Spannung / Mindestens Lötstopplack erforderlich	unverändert
VS 2, IG I	Keine Betauung unter Spannung / –	unverändert
VS 2, IG II	Keine Betauung unter Spannung / –	unverändert
VS 2, IG III	Keine Betauung unter Spannung / –	unverändert
VS 3, IG I	Betauung unter Spannung nur gelegentlich / –	unverändert
VS 3, IG II	Betauung unter Spannung nur gelegentlich / –	unverändert
VS 3, IG III	Betauung unter Spannung nur gelegentlich / –	unverändert

Tabelle 4: Neue Bemessung der Kriechstrecken unter geänderten Randbedingungen

Bestätigt werden kann die Schutzwirkung von Beschichtungen nach IEC 60664-3 vom Typ 1 [5]. Unter diesen Beschichtungen dürfen die Kriechstrecken auf Leiterplatten nach Verschmutzungsgrad 1 bemessen werden. Gesichert ist dies allerdings nur für Isolierstoffe mit mindestens IG IIIa.

Bestätigt werden kann auch die Schutzwirkung von Gehäusen (GS) mit hohem Schutzgrad von mindestens IP 67. Bereits bei Verwendung von Lötstopplack dürfen die Kriechstrecken auf



Leiterplatten nach Verschmutzungsgrad 1 bemessen werden. Gesichert ist dies allerdings nur für Isolierstoffe mit mindestens IG IIIa.

Weitere Untersuchungen

Allgemein zeigen die Untersuchungen, dass die Qualität des Basismaterials der Leiterplatte immer in Kombination mit den darauf aufgebrachtten Schutzschichten betrachtet werden muss. Sinnvoll wäre es demnach weitere Untersuchungen zu unterschiedlichen Konstellationen und Basismaterialien durchzuführen und die Qualität des Gesamtverbundes als Kriterium bei der Auslegung der Kriechstrecke in Tabelle F.4 der IEC 60664-1 aufzunehmen. Gemäß der im Zuge der Projektlaufzeit durchgeführten Recherchen wird die Qualität des Gesamtverbundes nicht durchgehend normativ geregelt. Vielmehr liegen nur in Teilbereichen Prüfverfahren und Grenzwerte vor, die einer Zusammenführung und Ergänzung im Zuge weiterer Untersuchungen bedürfen. Des Weiteren regten die Experten des Projekt-Abschlussworkshops an, Regelungen für *cemented joints* – Klebeverbindungen zwischen zwei Feststoffen – und für Multilayer-Platinen zu treffen.

Aufgrund der voranschreitenden Integration von Schaltungen wurde zudem ein Bedarf an Isolationskoordination für Halbleiterbauelemente, z. B. für Pad-Abstände, identifiziert.

Da zum Zeitpunkt des Projektendes der Trend offensichtlich ist, dass neue Anwendungen wie Photovoltaik die Grenze des Niederspannungsbereichs von DC 1 500 V überschreiten werden, wurde darüber hinaus angeregt, die Untersuchungen auf Spannungen bis DC 3 000 V (und AC 2 000 V), dem so genannten *erweiterten Niederspannungsbereich*, auszuweiten.

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CTI	Comparative Tracking Index – Wert für Kriechstromfestigkeit
DC	Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DoE	Design of Experiments – statistische Versuchsplanung
EN	Europäische Norm
GS	Gehäuseschutz
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IG	Isolierstoffgruppe
IP	International Protection – Schutzart durch Gehäuse
SUF	VDE-Ausschuss Sicherheits- und Unfallforschung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VS	Verschmutzungsgrad
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.



Quellenverzeichnis

- [1] W. Pfeiffer und F. Uhlemann, „Kurzzeitspannungsfestigkeit kleiner Isolierstrecken unter dem Einfluss natürlicher Umgebungsbedingungen. Abschlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 6788,“ Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V., Frankfurt, 1989.
- [2] K. Stimper, „Kriechstromsichere Bemessung von Isolierungen bei Niederspannung. Abschlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 6789,“ Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V., Frankfurt, 1989.
- [3] DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38):2010-06, „Umgebungseinfüsse - Teil 2-38: Prüfverfahren - Prüfung Z/AD: Zusammengesetzte Prüfung, Tempaeratur/Feuchte, zyklisch (Deutsche Fassung EN 60068-2-38:2009)“.
- [4] P. v. Schau, „Forschungsvorhaben 'Kriechstrecken', Ein Vorhaben der deutschen Elektroindustrie zur Erarbeitung neuer Bemessungsregeln für Kriechstrecken,“ *ETZ-Band 102*, pp. 290-293, 1981.
- [5] IEC 60664-3:2003 + A1:2010, "Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 3: Use of coating, potting or moulding for protection against pollution".
- [6] DIN EN 50178 (VDE 0160):1998-04, „Ausrüstung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln (Deutsche Fassung EN 50178:1997)“.
- [7] IEC 62103:3003-07, „Electronic equipment for use in power installations“.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modell zum Aufbau eines Isolationsmaterials	12
Abbildung 2:	Modell zum Aufbau eines Isolationsmaterials nach vollständiger Polarisierung sowie kapazitiver Ladung.....	12
Abbildung 3:	Versuchszyklus 10 Tage und Vorbehandlung	13
Abbildung 4:	Vorbehandlung nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) [3].....	13
Abbildung 5:	Profil Kälte und Feuchte nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) [3]	14
Abbildung 6:	Profil Feuchte nach DIN EN 60068-2-38 (VDE 0468-2-38) [3]	15
Abbildung 7:	Layout Prüflinge.....	17
Abbildung 8:	Prüfling 2 (Ausschnitt zwischen 2,4 und 3,2 mm Strecke).....	21
Abbildung 9:	Prüfling 3 (Ausschnitt rotbraune Zonen zwischen Strombahnen)	22
Abbildung 10:	Einfluss Gehäuse (Linie gestrichelt: IP 30, Linie durchgezogen: IP 67, 800 V, CTI = 500, gleicher Oberflächenschutz, gleiche Farbe für gleiche Kriechstrecke).....	23
Abbildung 11:	Einfluss Oberflächenschutz (Linie gestrichelt: Lötstopplack + Schutzlack, Linie durchgezogen: Lötstopplack, 650 V, CTI = 500, IP 67, gleiche Farbe für gleiche Kriechstrecke)	23