

DIN EN IEC 60747-15



ICS 31.080.01

Einsprüche bis 2024-07-03
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60747-15:2012-08

Entwurf

**Halbleiterbauelemente –
Teil 15: Einzel-Halbleiterbauelemente –
Isolierte Leistungshalbleiter
(IEC 47E/812/CDV:2023);
Deutsche und Englische Fassung prEN IEC 60747-15:2023**

Semiconductor devices –
Part 15: Discrete devices –
Isolated power semiconductor devices
(IEC 47E/812/CDV:2023);
German and English version prEN IEC 60747-15:2023

Dispositifs à semiconducteurs –
Partie 15: Dispositifs discrets –
Dispositifs de puissance à semiconducteurs isolés
(IEC 47E/812/CDV:2023);
Version allemande et anglaise prEN IEC 60747-15:2023

Anwendungswarnvermerk

Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-05-03 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Merianstraße 28, 63069 Offenbach am Main.

Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 107 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN IEC 60747-15:2023-08 „Halbleiterbauelemente – Teil 15: Einzel-Halbleiterbauelemente – Isolierte Leistungshalbleiter“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 47E/812/CDV:2023-08 „Semiconductor devices – Part 15: Discrete devices – Isolated power semiconductor devices“ unverändert in den Entwurf prEN IEC 60747-15:2023-08 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom IEC/SC 47E „Discrete semiconductor devices“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC . Das Dokument wurde den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium DKE/UK 631.1 „Einzel-Halbleiterbauelemente“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 60747-15:2012-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die intelligenten Leistungs-Halbleitermodule (IPM), die bislang in der ersten und zweiten Ausgabe ausgeschlossen waren, sind in diesem Dokument nun enthalten (Anhang C);
- b) der Wärmewiderstand wird für jeden Schalter beschrieben (6.2.4);

- c) es wurde eine Prüfung der Isolation zwischen Temperaturmessfühler und Anschlüssen bei Vereinbarung mit dem Anwender hinzugefügt (6.1.2).

Halbleiterbauelemente – Teil 15: Einzel- Halbleiterbauelemente – Isolierte Leistungshalbleiter

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Normative Verweisungen.....	7
3 Begriffe.....	8
3.2 Bestandteile isolierter Leistungs-Halbleiterbauelemente.....	8
4 Formelzeichen.....	9
4.1 Allgemeines.....	9
4.2 Zusätzliche Indizes/Symbole.....	9
4.3 Liste der Formelzeichen.....	9
4.3.1 Spannungen und Ströme.....	9
4.3.2 Mechanische Symbole.....	9
4.3.3 Weitere Symbole.....	10
5 Wesentliche Bemessungswerte (Grenzwerte) und Kennwerte.....	10
5.1 Allgemeines.....	10
5.2 Bemessungswerte (Grenzwerte).....	10
5.2.1 Isolationsspannung oder Isolationsprüfspannung (V_{isol}).....	10
5.2.2 Gehäusegrenzstrom (sofern zutreffend).....	10
5.2.3 Anschluss(grenz)strom (I_{IRMS}) (sofern zutreffend).....	10
5.2.4 Temperaturen.....	10
5.2.5 Mechanische Bemessungswerte.....	11
5.2.6 Klimatische Bemessungswerte (sofern zutreffend).....	11
5.3 Kennwerte.....	11
5.3.1 Mechanische Kennwerte.....	11
5.3.2 Parasitäre Induktivität (L_p).....	12
5.3.3 Parasitäre Kapazitäten (C_p).....	12
5.3.4 Teilentladungseinsetzspannung (V_{IM} oder $V_{\text{i(RMS)}}$) (sofern zutreffend).....	12
5.3.5 Teilentladungsaussetzspannung (V_{eM} oder $V_{\text{e(RMS)}}$) (sofern zutreffend).....	12
5.3.6 Wärmewiderstände.....	12
5.3.7 Transienter Wärmewiderstand (Z_{th}).....	13
6 Messverfahren.....	13
6.1 Nachweis der Bemessungs-Isolationsspannung.....	13
6.1.1 Nachweis der Bemessungs-Isolationsspannung zwischen Anschlüssen und Grundplatte (V_{isol}).....	13
6.1.2 Nachweis der Bemessungs-Isolationsspannung zwischen Temperaturmessfühler und Anschlüssen (V_{isol1}).....	14
6.2 Messverfahren.....	15
6.2.1 Teilentladungseinsetz- und -aussetzspannungen (V_i) (V_e).....	15
6.2.2 Parasitäre Induktivität (L_p).....	15

6.2.3	Parasitäre Kapazität (C_p) zwischen Anschluss und Gehäuse.....	17
6.2.4	Temperaturkennwerte.....	18
7	Annahme und Zuverlässigkeit.....	21
7.1	Allgemeine Anforderungen.....	21
7.2	Liste der Dauerprüfungen.....	21
7.3	Annahmebestimmende Kriterien.....	22
7.4	Typprüfungen und Stückprüfungen.....	22
7.4.1	Typprüfungen.....	22
7.4.2	Stückprüfungen.....	23
	Anhang A (informativ) Prüfverfahren für den Gehäusegrenzstrom.....	24
	Anhang B (informativ) Messverfahren für die Schichtdicke von Wärmeleitpasten.....	27
	Anhang C (informativ) Intelligente Leistungshalbleitermodule (IPM).....	28
C.1	Allgemeines.....	28
C.2	Steueranschlüsse des IPM.....	28
C.3	Wesentliche Bemessungswerte (Grenzwerte) und Kennwerte.....	29
C.3.1	Allgemeines.....	29
C.3.2	Bemessungswerte (Grenzwert) und Prüfverfahren.....	29
C.3.3	Kennwerte und Messverfahren.....	34
	Literaturhinweise.....	55
Bilder		
Bild 1	– Grundsaltung für die Prüfung der Isolationsspannung („Hochspannungsprüfung“) mit V_{isol}	14
Bild 2	– Grundsaltung für die Prüfung der Isolationsspannung zwischen Temperaturmessfühler und Anschlüssen (V_{isol1}).....	15
Bild 3	– Schaltung für die Messung der parasitären Induktivitäten (L_p).....	16
Bild 4	– Wellenformen.....	17
Bild 5	– Schaltung für die Messung der parasitären Kapazität (C_p).....	18
Bild 6	– Querschnitt eines isolierten Leistungs-Bauelements mit Bezugspunkten für die Messung der Temperaturen T_c und T_s	19
Bild A.1	– Prüfschaltung für den Gehäusegrenzstrom.....	24
Bild B.1	– Beispiel für eine Messlehre für eine Wärmeleitpaste mit einer Schichtdicke zwischen 5µm und 150µm.....	27
Bild C.1	– Beispiel-Blockschaltbild der Konfiguration der inneren Stromkreise eines IPM.....	28
Bild C.2	– Prüfschaltung für Versorgungsspannung, Eingangsspannung/Eingangssignalspannung und Störungsausgangsspannung/Alarmsignalspannung.....	30
Bild C.3	– Prüfschaltung für den Störungsausgangsstrom/Alarmsignalstrom.....	31
Bild C.4	– Prüfschaltung für die DC-Bus-Spannung des Hauptstromkreises bei Kurzschluss.....	33
Bild C.5	– Wellenformen der Kurzschlusschutzfunktion.....	34
Bild C.6	– Messschaltung für Ausschalzeiten und Ausschaltenergie bei induktiver Last (Messung am Bauelement des unteren Zweigs).....	35
Bild C.7	– Schaltwellenformen bei induktiver Last.....	36
Bild C.8	– Messschaltung zur Messung des Stroms im Steuerstromkreis.....	39

Bild C.9 – Messschaltung zur Messung der Eingangs-Ansprechspannung.....	40
Bild C.10 – Messschaltung zur Messung des Überstromschutz-/Kurzschlusschutz-Auslösegrenzwerts.....	42
Bild C.11 – Wellenformen während des Überstromschutzes/Kurzschlusschutzes.....	43
Bild C.12 – Messschaltung zur Messung der Überstromschutz-Verzögerungszeit/Kurzschlusschutz-Verzögerungszeit.....	44
Bild C.13 – Wellenformen der Schutzverzögerungszeit während des Überstromschutzes/ Kurzschlusschutzes.....	45
Bild C.14 – Messschaltung für die Messung des Übertemperaturschutzes und der Hysterese.....	46
Bild C.15 – Wellenform während der Ausführung der Überhitzungsschutzfunktion und der Aktivierung des Störungsausgangssignals.....	47
Bild C.16 – Wellenform während der Ausführung der Unterspannungsschutzfunktion und der Aktivierung des Störungsausgangssignals.....	49
Bild C.17 – Messschaltung zur Messung des Störungsausgangsstroms.....	50
Bild C.18 – Messschaltung für die Gleichtakt-Störspannungsfestigkeit.....	52
Bild C.19 – Wellenformen bei der Messung der Gleichtakt-Störspannungsfestigkeit.....	53
Tabellen	
Tabelle 1 – Dauerprüfung.....	21
Tabelle 2 – Annahmebestimmende Kennwerte für Dauer- und Zuverlässigkeitsprüfungen.....	22
Tabelle 3 – Mindest-Typ- und Stückprüfungen für isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente.....	22
Tabelle C.1 – Annahmebestimmende Kriterien für den IPM-Steuerstromkreis nach den Prüfungen der Bemessungswerte.....	34

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60747 enthält die Anforderungen an isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente. Diese Anforderungen gelten zusätzlich zu den in anderen Teilen von IEC 60747 für nicht isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente und in Teilen von IEC 60748 für ICs angegebenen Anforderungen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60270:2015, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60664-1:2020, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests*

IEC 60721-3-3:2019, *Classification of environmental conditions – Part 3-3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Stationary use at weather protected locations*

IEC 60747-1:2010, *Semiconductor devices – Part 1: General*

IEC 60747-2:2016, *Semiconductor devices – Discrete devices and integrated circuits – Part 2: Rectifier diodes*

IEC 60747-6:2016, *Semiconductor devices – Part 6: Thyristors*

IEC 60747-7:2019, *Semiconductor discrete devices and integrated circuits – Part 7: Bipolar transistors*

IEC 60747-8:2021, *Semiconductor devices – Part 8: Field-effect transistors*

IEC 60747-9:2019, *Semiconductor devices – Discrete devices – Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)*

IEC 60749-5:2017, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 5: Steady-state temperature humidity bias life test*

IEC 60749-6:2017, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 6: Storage at high temperature*

IEC 60749-10:2003, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 10: Mechanical shock*

IEC 60749-12:2017, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 12: Vibration, variable frequency*

IEC 60749-15:2020, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 15: Resistance to soldering temperature for through-hole mounted devices*

IEC 60749-21:2011, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 21: Solderability*

IEC 60749-25:2003, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 25: Temperature cycling*

IEC 60749-34:2010, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 34: Power cycling*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>

3.1

isoliertes Leistungs-Halbleiterbauelement

Leistungs-Halbleiterbauelement, das zwischen der Kühlfläche oder der Grundplatte und allen gesonderten Schaltungselementen elektrisch isoliert ist

3.2 Bestandteile isolierter Leistungs-Halbleiterbauelemente

3.2.1

Schalter

jedes einzelne Bauelement, das in einem Stromkreis eine Schaltfunktion erfüllt, z. B. eine Diode, ein Thyristor, ein MOSFET usw.

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Schalter kann eine parallele oder serielle Verbindung mehrerer Chips mit einer einzigen Funktionalität sein.

3.2.2

Grundplatte

Teil des Gehäuses mit einer Kühloberfläche, das die Wärme aus dem Inneren nach außen überträgt

3.2.3

Hauptanschluss

Anschluss, der auf dem hohen Potenzial des Leistungsstromkreises liegt und den Hauptstrom führt. Der Hauptanschluss kann mehr als einen Verbinder umfassen.

3.2.4

Steueranschluss

Anschluss mit kleiner Stromtragfähigkeit für Steuerfunktionen, an den äußere Steuersignale angelegt werden oder von dem Fühlerparameter abgenommen werden

3.2.4.1

Hochspannungs-Steueranschluss

Anschluss, der mit einem isolierten Schaltungselement elektrisch verbunden ist, jedoch nur einen kleinen Strom für die Steuerfunktion führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Dazu zählen beispielsweise Strommesswiderstände (shunts) und Hilfskollektoranschlüsse, die das hohe Potenzial der Hauptanschlüsse besitzen.

3.2.4.2

Niederspannungs-Steueranschluss

Anschluss mit einer Steuerfunktion, der von den Hochspannungs-Steueranschlüssen isoliert ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Dazu zählen beispielsweise die Anschlüsse von isolierten Temperaturmessfühlern und Treibereingänge von isolierten Gates usw.

3.2.5

Isolierschicht

integriertes Teil des Bauelementgehäuses, das alle Hochspannungsteile von der Kühloberfläche oder vom äußeren Kühlkörper und allen gesonderten Schaltungselementen isoliert

3.3

Gehäusegrenzstrom

Spitzenstrom, der unter festgelegten Bedingungen nicht zu einem Bersten des Gehäuses und dem Herausschleudern von Plasma und Masseteilchen führt

3.4

Wärmeleitmaterial

Wärme leitendes Material zwischen der Grundplatte und dem äußeren Kühlkörper

4 Formelzeichen

4.1 Allgemeines

Die allgemeinen Formelzeichen sind in IEC 60747-1:2010, Abschnitt 4, festgelegt.

4.2 Zusätzliche Indizes/Symbole

p	= parasitär
t	= Anschluss
isol	= Isolation

4.3 Liste der Formelzeichen

4.3.1 Spannungen und Ströme

Anschluss(grenz)strom	I_{tRMS}
Isolationsspannung	V_{isol}
Teilentladungseinsetzspannung	V_i
Teilentladungsaussetzspannung	V_e
Isolationsleckstrom	I_{isol}

4.3.2 Mechanische Symbole

Anzugsdrehmoment für Schrauben zum Kühlkörper	M_s
Anzugsdrehmoment für Schrauben an Anschlüssen	M_t
Befestigungskraft	F
Maximale Beschleunigung in allen 3 Achsen (x, y, z)	a
Masse	m
Ebenheit des Gehäuses (Grundplatte)	e_c
Ebenheit der Kühloberfläche (Kühlkörper)	e_s
Rauigkeit des Gehäuses (Grundplatte)	R_{Zc}
Rauigkeit der Kühloberfläche (Kühlkörper)	R_{Zs}
Dicke des Wärmeleitmaterials (Gehäuse – Kühlkörper)	$d_{(c-s)}$

4.3.3 Weitere Symbole

Parasitäre Induktivität, die zwischen den Anschlüssen und dem Chip wirksam ist (ist festzulegen)	L_p
Parasitäre Kapazität zwischen den Anschlüssen und der Kühloberfläche (Gehäuse, Grundplatte, Erde)	C_p
Leitungswiderstand zwischen Anschluss x und internem Bauelementanschluss x'	$r_{xx'}$
Temperatur des Anschlusses	T_t
Anzahl der Lastzyklen, bis ein Ausfall des prozentualen Anteils p einer Bauelementegesamtheit auftritt	$N_{f,p}$

5 Wesentliche Bemessungswerte (Grenzwerte) und Kennwerte

5.1 Allgemeines

Isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente sollten als gehäusebezogene oder kühlkörperbezogene Bauelemente festgelegt werden. Die Bemessungs- und Kennwerte sollten bei einer Temperatur von 25 °C oder einer anderen festgelegten höheren Temperatur angegeben werden. Anforderungen an mehrere Bauelemente in einer gemeinsamen Kapselung werden in IEC 60747-1:2010, 5.12 beschrieben.

5.2 Bemessungswerte (Grenzwerte)

5.2.1 Isolationsspannung oder Isolationsprüfspannung (V_{isol})

Maximaler Effektivwert oder Wert der Gleichspannung während einer festgelegten Dauer zwischen den Hauptanschlüssen und den Hochspannungs-Steueranschlüssen auf der einen Seite und den Niederspannungs-Steueranschlüssen (sofern zutreffend) und der Grundplatte auf der anderen Seite.

5.2.2 Gehäusegrenzstrom (sofern zutreffend)

Höchstwert für jeden Hauptanschluss, bei dem kein Bersten des Gehäuses oder Herausschleudern von Plasma und Teilchen verursacht wird.

5.2.3 Anschluss(grenz)strom (I_{tRMS}) (sofern zutreffend)

Höchster Effektivwert des Stromes durch einen Hauptanschluss unter festgelegten Bedingungen bei einem Mindestanzugsdrehmoment M_t und einer maximal zulässigen Temperatur des Anschlusses ($T_{tmax} = T_{stg}$ oder $T_{tmax} \leq T_{vjmax}$).

5.2.4 Temperaturen

5.2.4.1 Löttemperatur (T_{sold}) (sofern zutreffend)

Höchste Löttemperatur T_{sold} während des Lötvorganges bei einer festgelegten Lötzeit t_{sold} .

5.2.4.2 Lagerungstemperatur (T_{stg})

Niedrigste und höchste Lagerungstemperatur.

5.2.5 Mechanische Bemessungswerte

5.2.5.1 Anzugsdrehmoment für Schrauben zum Kühlkörper (M_s)

Kleinstes Anzugsdrehmoment, das für die Befestigungsschrauben zum Kühlkörper angewendet werden muss.

5.2.5.2 Anzugsdrehmoment für Schrauben an Anschlüssen (M_t)

Kleinstes Anzugsdrehmoment, das für Schraubanschlüsse angewendet werden muss.

5.2.5.3 Befestigungskraft (F)

Mindestens erforderliche Anpresskraft für druckbefestigte, isolierte Bauelemente, die mit Federklammern (Clips) befestigt werden.

5.2.5.4 Zugkraft am Anschluss (F_t)

Höchstwert der Zugkraft.

5.2.5.5 Beschleunigung (a)

Höchstwert für alle Achsen (x, y, z).

5.2.5.6 Ebenheit der Kühlkörperoberfläche (e_s) (sofern zutreffend)

Größte Abweichung von der Ebenheit der Kühlkörperoberfläche über die gesamte Befestigungsfläche.

5.2.5.7 Rauigkeit der Kühlkörperoberfläche (R_{zs}) (sofern zutreffend)

Höchste Rauigkeit der Kühlkörperoberfläche über die gesamte Befestigungsfläche.

5.2.6 Klimatische Bemessungswerte (sofern zutreffend)

Grenzwerte der umgebungsbezogenen Parameter für die Endanwendung sind:

- Umgebungstemperatur;
- Luftfeuchte;
- Luftgeschwindigkeit und -druck;
- Bestrahlung durch die Sonne und von anderen Wärmequellen;
- mechanisch aktive Stoffe;
- chemisch aktive Stoffe;
- biologische Faktoren.

Diese müssen mit den Klassen beschrieben werden, die in IEC 60721-3-3:2019, Tabelle 1, festgelegt sind.

5.3 Kennwerte

5.3.1 Mechanische Kennwerte

5.3.1.1 Kriechstrecke über die Oberfläche (d_s)

Kleinstwert des Abstandes über die Oberfläche des Bauelemente-Isolierstoffs zwischen Anschlüssen mit unterschiedlichem Potenzial und gegen die Grundplatte.

E DIN EN IEC 60747-15:2024-06
prEN IEC 60747-15:2023

ANMERKUNG 1 Es gelten IEC 60112:2020 (Einzelheiten zur Vergleichszahl der Kriechwegbildung „CTI“) und IEC 60664-1:2020, 5.2.

ANMERKUNG 2 Luftspalten zwischen der Kunststoffoberfläche und geerdetem Metall oder zwischen Anschlüssen entgegengesetzter Polarität, die kleiner als 1,0 mm (für Verschmutzungsgrad 2) oder 1,5 mm (für Verschmutzungsgrad 3) sind, verkürzen die zählbare Kriechstrecke beträchtlich (zu Einzelheiten siehe Beispiele in IEC 60664-1:2020). Dies ist von Bedeutung, wenn Staub, Feuchtigkeit oder Schmutz beginnt, die Oberfläche zu bedecken und sich der Ableitstrom über der Oberfläche erhöht, was zum Auslösen eines Verbrennungsvorganges des Kunststoffverkapselungsmaterials führen könnte.

5.3.1.2 Luftstrecke (d_a)

Kleinstwert des Abstandes durch Luft zwischen Anschlüssen mit unterschiedlichem Potenzial des isolierten Bauelements und zur Grundplatte.

ANMERKUNG Zu Einzelheiten siehe IEC 60664-1:2020, (4.6 und 5.1), in der typische Beispiele für unterschiedliche Formen von Luftstrecken dargestellt sind.

5.3.1.3 Masse (m) des Bauelements

Höchstwert ohne Zubehörteile (Befestigungsteile).

5.3.1.4 Ebenheit der Bodenplatte (e_c) (sofern zutreffend)

Maximale und minimale erlaubte Abweichung der Ebenheit der Basisplatte und ihrer Ausrichtung (Konvex oder Konkav).

5.3.2 Parasitäre Induktivität (L_p)

Höchstwert oder typischer Wert zwischen den Hauptanschlüssen eines jeden Hauptstrompfades.

5.3.3 Parasitäre Kapazitäten (C_p)

Höchstwert der parasitären Kapazität zwischen dem (den) festgelegten Hauptanschluss (-anschlüssen) und der Kühloberfläche.

5.3.4 Teilentladungseinsetzspannung (V_{im} oder $V_{i(RMS)}$) (sofern zutreffend)

Kleinster Scheitelwert V_{im} oder Effektivwert $V_{i(RMS)}$ zwischen den isolierten Anschlüssen und der Grundplatte (zu Einzelheiten siehe IEC 60270:2015).

5.3.5 Teilentladungsaussetzspannung (V_{em} oder $V_{e(RMS)}$) (sofern zutreffend)

Kleinster Scheitelwert V_{em} oder Effektivwert $V_{e(RMS)}$ zwischen den isolierten Anschlüssen und der Grundplatte (zu Einzelheiten siehe IEC 60270:2015).

5.3.6 Wärmewiderstände

5.3.6.1 Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse für gehäusebezogene Bauelemente ($R_{th(j-c)X}$)

Höchstwert des Wärmewiderstandes zwischen der Sperrschicht und einem festgelegten Bezugspunkt auf dem Gehäuse (Grundplatte) je Schalter „X“ (z. B. der Diode (D), des Thyristors (T), von IGBT (I) oder MOSFET (M)).

5.3.6.2 Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper ($R_{th(c-s)}$) (sofern zutreffend)

Höchstwert oder typischer Wert des Wärmewiderstandes zwischen zwei festgelegten Punkten am Gehäuse und am Kühlkörper des gehäusebezogenen Bauelementes („Moduls“), wenn das Gehäuse nach den Angaben des Herstellers befestigt ist.

5.3.6.3 Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper je Schalter ($R_{th(c-s)X}$) (sofern zutreffend)

Höchstwert oder typischer Wert des Wärmewiderstandes zwischen zwei festgelegten Punkten am Gehäuse und am Kühlkörper des Schalters „X“ (z. B. der Diode (D), des Thyristors (T), von IGBT (I) oder MOSFET (M)) von isolierten gehäusebezogenen Bauelementen („Modulen“), wenn das Gehäuse nach den Angaben des Herstellers befestigt ist.

5.3.6.4 Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Kühlkörper für kühlkörperbezogene Bauelemente ($R_{th(j-s)X}$)

Höchstwert oder typischer Wert des Wärmewiderstandes zwischen der Sperrschicht und einem festgelegten Punkt am Kühlkörper je Schalter „X“ (z. B. der Diode (D), des Thyristors (T), von IGBTs (I) oder MOSFET (M)), wenn das Bauelement nach den Angaben des Herstellers befestigt ist.

5.3.6.5 Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Messfühler ($R_{th(j-r)}$) (sofern zutreffend)

Wert des Wärmewiderstandes zwischen der Sperrschicht und einem integrierten Temperaturmessfühler, wenn das Bauelement nach den Angaben des Herstellers befestigt ist.

ANMERKUNG Die Position dieses Wärmewiderstandes sollte in der Ersatzschaltung für den Wärmewiderstand angegeben werden.

5.3.7 Transienter Wärmewiderstand (Z_{th})

Wärmewiderstand in Abhängigkeit von der Zeit nach einer stufenweisen Veränderung der Verlustleistung für jeden in 5.3.6 angegebenen Wärmewiderstand.

6 Messverfahren

6.1 Nachweis der Bemessungs-Isolationsspannung

6.1.1 Nachweis der Bemessungs-Isolationsspannung zwischen Anschlüssen und Grundplatte (V_{isol})

– Zweck

Nachweis, dass ein isoliertes Leistungsbauelement die Bemessungs-Isolationsspannung aushält.

– Schaltung

Siehe das nachstehende Bild 1.

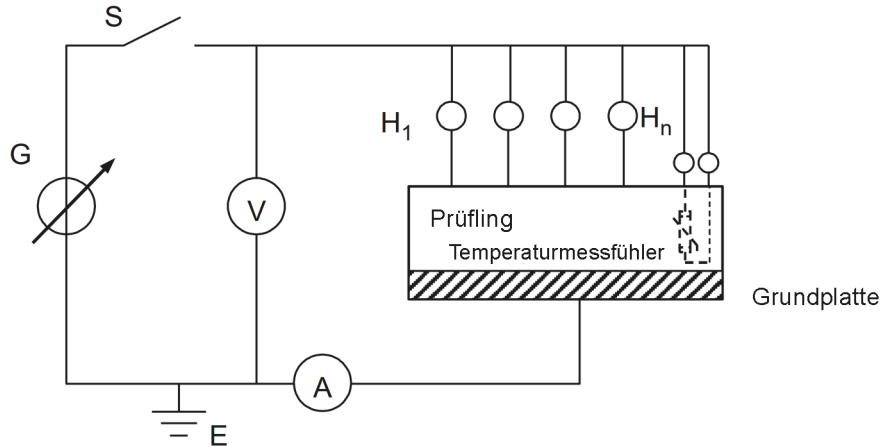


Bild 1 – Grundsaltung für die Prüfung der Isolationsspannung („Hochspannungsprüfung“) mit V_{isol}

– Schaltungsbeschreibung und Anforderungen

DUT = Prüfling

G = Spannungsquelle mit hohem Innenwiderstand, die V_{isol} liefern kann

S = Hauptschalter

V = Spannungsmessgerät für V_{isol}

A = Strommessgerät oder Stromsensor für I_{isol}

$H_1 \dots H_n$ = Hochspannungsanschluss

Die Spannungsquelle G kann die Isolationsspannung V_{isol} als Wechsel- oder Gleichspannung mit einem hohen Innenwiderstand bereitstellen, um einen möglichen Durchbruchstrom im Falle des Durchbruchs des Prüflings zu begrenzen.

Sämtliche Hauptanschlüsse und Hochspannungs-Steueranschlüsse werden miteinander verbunden und an den Hochspannungs-Ausgangsanschluss H der Spannungsquelle G angeschlossen. Die Grundplatte des Prüflings bzw. seine metallisierte Kühloberfläche und alle Niederspannungsanschlüsse werden mit dem Erdpotenzial E verbunden. Das Strommessgerät oder der Stromsensor A wird zur Messung des Isolationsleckstromes verwendet.

ANMERKUNG Bei einer entsprechenden Vereinbarung mit dem Anwender wird eine Prüfung der Isolation zwischen dem Temperaturmessfühler und den Anschlüssen durchgeführt (V_{isol1} (siehe 6.1.2)).

– Prüfverfahren

Der Schalter S wird geschlossen und die Spannung allmählich auf den festgelegten Wert erhöht und für die festgelegte Dauer bei diesem Wert aufrechterhalten. Der mit dem Strommessgerät A gemessene Wert darf den festgelegten Wert nicht überschreiten. Die Spannung wird anschließend auf null reduziert.

– Festgelegte Bedingungen

Festgelegt in IEC 60664-1:2020.

- Umgebungs- oder Gehäusetemperatur;
- V_{isol} ;
- I_{isol} als größter Prüfgrenzwert;
- Prüfdauer t , wenn kleiner als 60 s.

6.1.2 Nachweis der Bemessungs-Isolationsspannung zwischen Temperaturmessfühler und Anschlüssen (V_{isol1})

– Zweck

Nachweis der Isolationsspannung zwischen dem Temperaturmessfühler und den anderen Anschlüssen, wenn der Temperaturmessfühler nicht mit den anderen Anschlüssen verbunden ist.

– **Schaltung**

Siehe das nachstehende Bild 2.

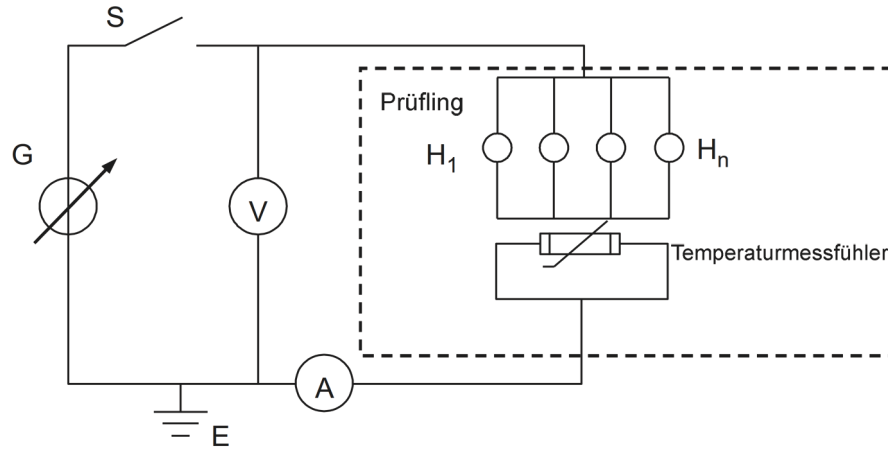


Bild 2 – Grundsaltung für die Prüfung der Isolationsspannung zwischen Temperaturmessfühler und Anschlüssen (V_{isol1})

– **Schaltungsbeschreibung und Anforderungen, Prüfverfahren und festgelegte Bedingungen**

Ähnlich wie in 6.1.1. beschrieben, aber optional darf eine niedrigere Prüfspannung V_{isol1} festgelegt und angelegt werden.

6.2 Messverfahren

6.2.1 Teilentladungseinsetz- und -aussetzspannungen (V_i) (V_e)

Zwischen den Hochspannungsanschlüssen und der Grundplatte (sofern zutreffend). Siehe IEC 60270_2015 und IEC 60664-1:2020.

6.2.2 Parasitäre Induktivität (L_p)

– **Zweck**

Messung der parasitären Induktivität zwischen zwei Hauptanschlüssen.

– **Schaltung**

Siehe das nachstehende Bild 3.

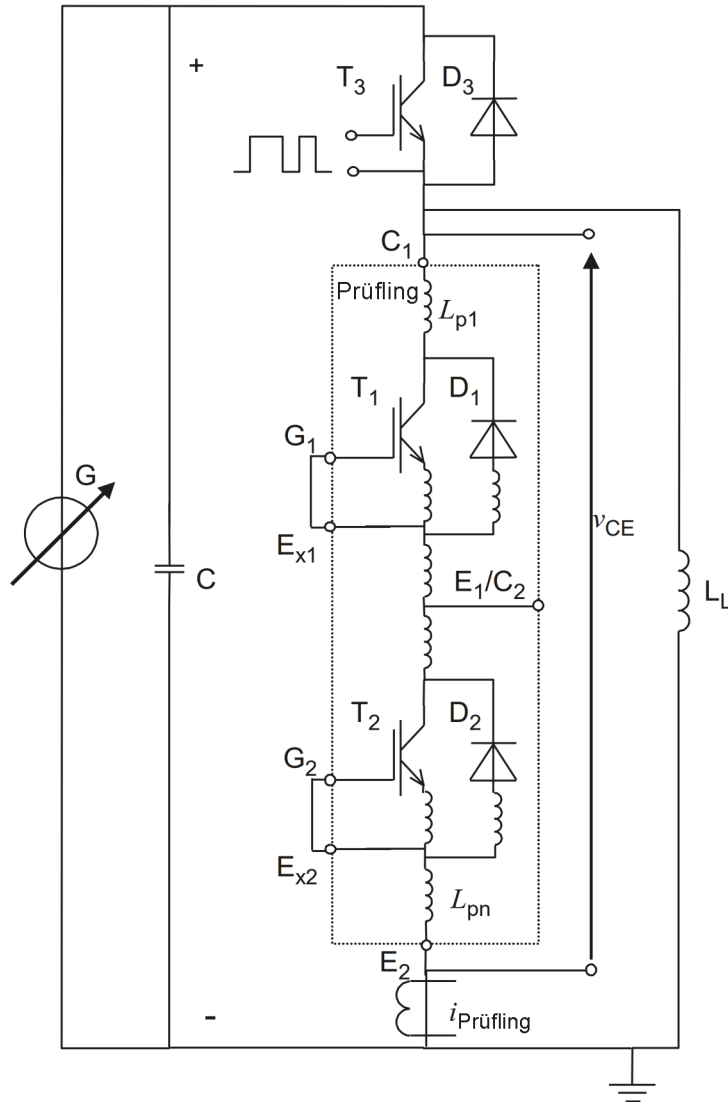


Bild 3 – Schaltung für die Messung der parasitären Induktivitäten (L_p)

Legende

- Prüfling = Prüfling T1 und T2, z. B. IGBT (Einzel- oder Halbbrückenschalter – dargestellt – oder Zweig einer Dreiphasen-Anordnung), schnelle Diode oder MOSFET-Bauelement
- C = Hauptkondensatorbank als Speicher
- L_L = Lastinduktivität, mindestens 100-mal die parasitäre Induktivität
- $L_{p1} \dots L_{pn}$ = Anteile der parasitären Induktivität L_p
- i_{DUT} = Stromsensor
- G = Spannungsquelle für die Ladung des Kondensators
- T_1 = Prüfling, oberer Schalter (in Bild 3 als IGBT dargestellt)
- T_2 = Prüfling, unterer Schalter (in Bild 3 als IGBT dargestellt), wahlfrei
- T_3 = IGBT-Hilfsschalter

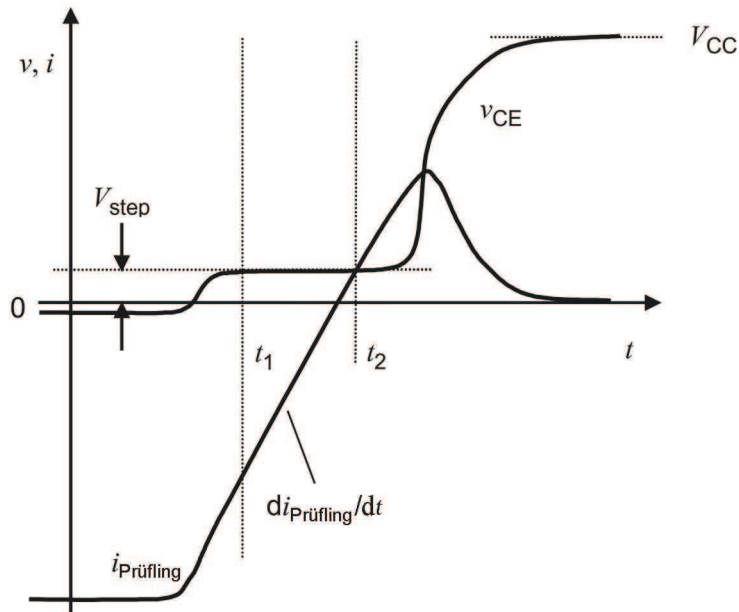


Bild 4 – Wellenformen

– Schaltungsbeschreibung und Anforderungen

Die Schaltung nach Bild 3 besteht aus einer Gleichstromversorgung G für die Ladung des Speichers C, T_3 als Hilfsschalter, einer Ansteuereinheit für das Gate von T_3 , den in den Prüfaufbau eingebauten Prüflingen mit kurzgeschlossenen Gate-Steueranschlüssen, einem Zweikanaloszilloskop, mit dem die Spannung v_{CE} zwischen den Hauptanschlüssen „C₁“ und „E₂“ gemessen wird, und einem an das Zweikanaloszilloskop angeschlossenen Stromsensor, mit dem der Strom i_{DUT} durch den Diodenzweig des Bauelements gemessen wird. Dieses Messverfahren verwendet eine verringerte Spannung $Wellenformen_{CC}$ und das di/dt der im Bauelement eingebauten Dioden beim Abschalten, wobei die Spannung an den außen liegenden Hauptanschlüssen gemessen wird. Dies ist anwendbar für Einzelschalter sowie für Halbbrücken-Bauelemente (Halbbrücken-Module).

– Messverfahren

Es wird ein Impulsstromverfahren angewendet. Der Hilfstransistor T_3 schaltet den Laststrom für die Induktivität L_L ein und aus. Bei ausgeschaltetem T_3 ist der Strom über die Dioden des Prüflings freilaufend. Wenn T_3 wieder einschaltet, bewirkt er einen Abfall des durch die Dioden fließenden Stroms mit einer nahezu linearen Änderungsgeschwindigkeit di_{DUT}/dt . Während dieser Dauer ($t_1 - t_2$) bildet die Spannung am Prüfling eine Stufe von V_{step} , die durch die innere parasitäre Induktivität beim Stromabfall (di_{DUT}/dt) verursacht wird. Der Wert der parasitären Induktivität des Hauptstrompfades kann berechnet werden aus:

$$L_p = V_{step} / |(di_{DUT}/dt)| \quad (1)$$

ANMERKUNG Es sind (abgeschirmte) induktivitätsarme Sammelschienen und Stromsensoren mit niedriger Induktivität zu verwenden.

6.2.3 Parasitäre Kapazität (C_p) zwischen Anschluss und Gehäuse

– Zweck

Messung der parasitären Kapazität C_p zwischen dem (den) festgelegten Hauptanschluss (-anschlüssen) und dem Gehäuse (Grundplatte).

– Schaltung

Siehe das nachstehende Bild 5.

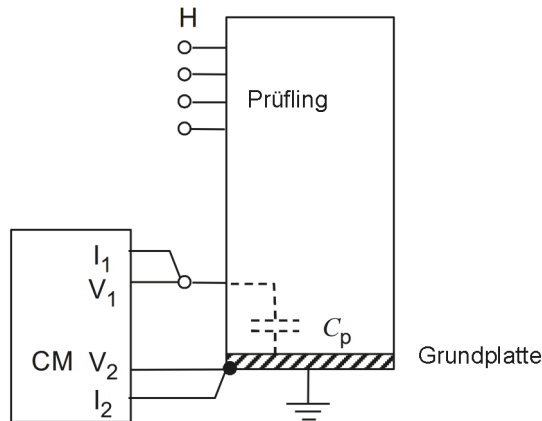


Bild 5 – Schaltung für die Messung der parasitären Kapazität (C_p)

– **Schaltungsbeschreibung und Anforderungen**

- C_p = parasitäre Kapazität
- H = Hochspannungsanschluss
- CM = Kapazitätsmessgerät

– **Messverfahren**

Das Bauelement wird nach den Angaben des Herstellers auf einem geerdeten Kühlkörper befestigt. Der Stromquellenverbinder „ I_1 “ des Kapazitätsmessgerätes CM wird an den festgelegten Anschluss und der Verbinder „ I_2 “ an die Erde (Grundplatte) des Prüflings angeschlossen. Der Verbinder des Kapazitätsmessgerätes für die Spannungsmessung „ U_1 “ wird an den Prüfpunkt und „ U_2 “ an Erde angeschlossen. CM ist auf die festgelegte Frequenz einzustellen. Die Kapazität C_p kann am CM abgelesen werden. Für die Messung der gesamten Kopplungskapazität C_p werden alle Hauptanschlüsse miteinander verbunden, und die Prüfung wird, wie zuvor beschrieben, fortgesetzt.

– **Festgelegte Bedingungen**

- Messfrequenz f des Kapazitätsmessgerätes CM.

6.2.4 Temperaturkennwerte

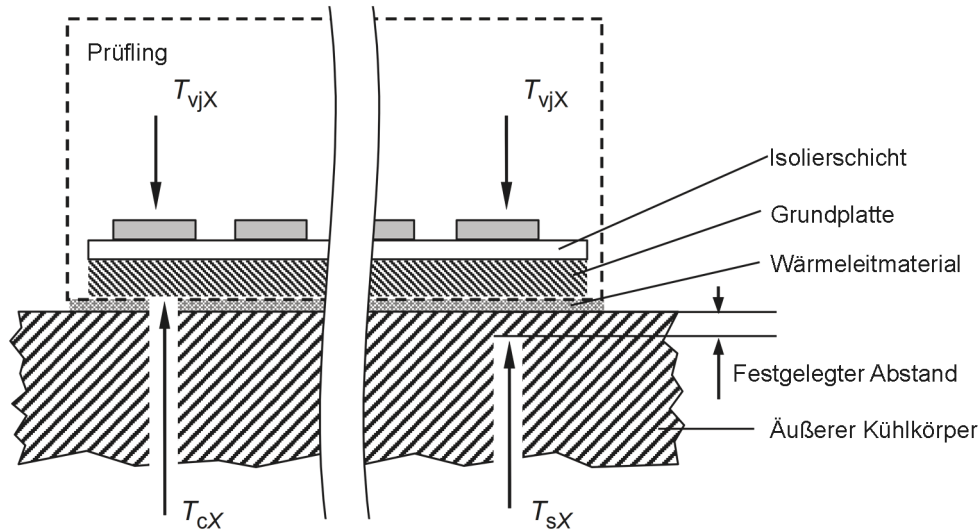
6.2.4.1 Allgemeine Beschreibung der Messverfahren

– **Zweck**

Messung der Temperaturkennwerte zwischen dem Schalter und dem Kühlsystem.

– **Bezugspunkte für die Temperaturmessung und Beschreibung**

Es sollten die gleichen Verfahren wie für die entsprechenden nicht isolierten Bauelemente angewendet werden. Der Wärmewiderstand und der transiente Wärmewiderstand werden in gleicher Weise gemessen, wie es in den Normen für Dioden IEC 60747-2:2016, Thyristoren IEC 60747-6:2016, Bipolartransistoren IEC 60747-7:2019, FETs IEC 60747-8:2021 und IGBTs IEC 60747-9:2019 beschrieben ist.



Legende

- T_{vjX} = Sperrschichttemperatur des Chips X
 T_{cX} = Gehäusetemperatur unter Chip X
 T_{sX} = Kühlkörpertemperatur unter Chip X

Bild 6 – Querschnitt eines isolierten Leistungsbaulements mit Bezugspunkten für die Messung der Temperaturen T_c und T_s

– Messverfahren

T_{cX} wird mit einem Temperaturmessgerät von unten durch eine kleine Bohrung durch den Kühlkörper und das Wärmeleitmaterial hindurch unterhalb des Schalters X (Chips) gemessen. T_{sX} wird von oben an der heißesten zugänglichen Stelle nahe dem Schalter X (Chip) oder von unten durch eine festgelegte Sackbohrung, die (2 +/- 1) mm unterhalb der Kühlkörperoberfläche endet (ist festzulegen, Merkmal für die Typprüfung), ermittelt. T_{vjX} wird mit indirekten Verfahren, wie in den jeweiligen Normen beschrieben, bestimmt.

ANMERKUNG Der Wärmewiderstand $R_{th(j-s)}$ und $R_{th(c-s)}$ ist von mehreren mechanischen Parametern abhängig, wie Art und Dicke des verwendeten Wärmeleitmaterials (die in den Montageanweisungen des Herstellers festgelegt werden sollten, z. B. 30 µm bis 50 µm), der größten Abweichung von der Ebenheit der Kühloberfläche auf der Grundplatte des Bauelements und des Kühlkörpers sowie dem Anzugsdrehmoment der Befestigungsschrauben, das in den Montageanweisungen festgelegt ist.

6.2.4.2 Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse je Schalter X $R_{th(j-c)X}$

$$R_{th(j-c)X} = (T_{vjX} - T_{cX}) / P_X \quad (2)$$

Dabei ist

- X D (Diode), T (Thyristor), I (IGBT), M (MOSFET), B (BJT);
 T_{vjX} die Ersatzsperrschichttemperatur des Schalters X;
 T_{cX} die Gehäusetemperatur (Grundplatte) unter dem Schalter X (Chip);
 P_X die angelegte Verlustleistung am jeweiligen Schalter D, T, I, M, B.

ANMERKUNG Zur Unterscheidung zwischen mehreren Bauelementen innerhalb eines Produkts ist möglicherweise ein zweiter Index erforderlich (z. B. Wechselrichter-IGBTs und Bremsen-IGBTs).

6.2.4.3 Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper je Schalter (X) $R_{th(c-s)X}$ oder je Bauelement $R_{th(c-s)}$

$$R_{th(c-s)X} = (T_{cX} - T_{sX})/P_X \quad (3)$$

Dabei ist

X	D (Diode), T (Thyristor), I (IGBT), M (MOSFET), B (BJT);
T_{cX}	die an einer festgelegten Stelle auf dem Gehäuse (wie oben) unter dem Chip ermittelte Temperatur;
T_{sX}	die Temperatur des Kühlkörpers, die am festgelegten Bezugspunkt für die Prüfung T_s ermittelt wird;
P_X	die angelegte Verlustleistung am jeweiligen Schalter D, T, I, M, B;
P	die angelegte Gesamtverlustleistung des Bauelements.

ANMERKUNG 1 Zur Unterscheidung zwischen mehreren Bauelementen innerhalb eines Produkts ist möglicherweise ein zweiter Index erforderlich (z. B. Wechselrichter-IGBTs und Bremsen-IGBTs).

– Festgelegte Bedingungen

- Befestigung nach den Montageanweisungen des Herstellers;
- Wärmeleitfähigkeit des Wärmeleitmaterials;
- Bezugspunkte für die Temperaturmessungen.

ANMERKUNG 2 Zum Messverfahren für die Dicke von Wärmeleitmaterialien siehe Anhang B.

6.2.4.4 Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Kühlkörper je Schalter (X) $R_{th(j-s)X}$ (für kühlkörperbezogene Bauelemente)

$$R_{th(j-s)X} = (T_{vjX} - T_{sX})/P_X \quad (4)$$

Dabei ist

X	D (Diode), T (Thyristor), I (IGBT), M (MOSFET), B (BJT);
T_{vjX}	die Ersatzsperrschichttemperatur des Schalters X;
T_{sX}	die Temperatur des Kühlkörpers, die am festgelegten Bezugspunkt für die Prüfung T_s ermittelt wird;
P_X	die angelegte Verlustleistung am jeweiligen Schalter D, T, I, M, B.

ANMERKUNG Zur Unterscheidung zwischen mehreren Bauelementen innerhalb eines Produkts ist möglicherweise ein zweiter Index erforderlich (z. B. Wechselrichter-IGBTs und Bremsen-IGBTs).

– Festgelegte Bedingungen

- Befestigung nach den Montageanweisungen des Herstellers;
- Wärmeleitfähigkeit des Wärmeleitmaterials;
- Bezugspunkte für die Temperaturmessungen.

6.2.4.5 Transienter Wärmewiderstand Z_{th}

– Messschaltung und -verfahren

Diese beruhen auf den ehemaligen Abschnitten 6.2.4.2 bis 6.2.4.4. Es gelten die jeweiligen Normen zu den nicht isolierten Bauelementen.

$$Z_{th(j-c)X} = (|T_{vjX}(0) - T_{cX}(0)| - |T_{vjX}(t) - T_{cX}(t)|) / P_X \quad (5)$$

$$Z_{th(c-s)X} = (|T_{cX}(0) - T_{sX}(0)| - |T_{cX}(t) - T_{sX}(t)|) / P_X \quad (6)$$

$$Z_{th(j-s)X} = (|T_{vjX}(0) - T_{sX}(0)| - |T_{vjX}(t) - T_{sX}(t)|) / P_X \quad (7)$$

– Festgelegte Bedingungen

- Befestigung nach den Montageanweisungen des Herstellers;
- Wärmeleitfähigkeit des Wärmeleitmaterials;
- Bezugspunkte für die Temperaturmessungen.

7 Annahme und Zuverlässigkeit

7.1 Allgemeine Anforderungen

Zusätzlich zu den folgenden Abschnitten gelten die Anforderungen für die nicht isolierten Bauelemente nach den anderen entsprechenden Teilen von IEC 60747.

7.2 Liste der Dauerprüfungen

Siehe Tabelle 1.

Tabelle 1 – Dauerprüfung

Unterabschnitt	Umweltprüfung – Bezeichnung	Kurzform	Normative Verweisungen
7.2.1	Heißsperrlagerung	HTRB (en: high temperature reverse bias or high temperature blocking)	IEC 60749-5
7.2.2	Heißsperrlagerung mit feuchter Wärme	H ³ TRB (en: high humidity and high temperature reverse bias or high humidity and high temperature blocking)	IEC 60749-5
7.2.3	Lastwechselprüfung		IEC 60749-34
7.2.4	Hochtemperaturlagerung	HTS (en: high temperature storage)	IEC 60749-6
7.2.5	Tieftemperaturlagerung	LTS (en: low temperature storage)	IEC 60068-2-1
7.2.6	Temperaturwechselprüfung	TC (en: thermal cycling)	IEC 60749-25
7.2.7	Lötwärmebeständigkeit		IEC 60749-15
7.2.8	Lötbarkeit		IEC 60749-21
7.2.9	Mechanisches Schocken		IEC 60749-10
7.2.10	Schwingen (variable Frequenz)		IEC 60749-12

7.3 Annahmebestimmende Kriterien

Tabelle 2 – Annahmebestimmende Kennwerte für Dauer- und Zuverlässigkeitsprüfungen

Annahmebestimmender Kennwert	Annahmekriterien	Messbedingungen
I_{isol}	< USL	V_{isol} festgelegt
R_{th}	< USL	Montageanweisungen
USL: Höchstwert (en: upper specification limit)		

7.4 Typprüfungen und Stückprüfungen

7.4.1 Typprüfungen

Bei der Entscheidung, welche Prüfungen verbindlich sein sollen, sollte die Erfahrung berücksichtigt werden, welche mit anderen isolierten Leistungs-Halbleiterbauelementen gemacht worden ist, in denen dieselben oder ähnliche Bauteile, wie z. B. Schalter oder Gehäuse, benutzt wurden.

Typprüfungen werden an neuen Produkten auf der Grundlage einer Stichprobe durchgeführt, um die elektrischen, thermischen, mechanischen und klimatischen Bemessungswerte (Grenzwerte) und Kennwerte zu bestimmen, die in den Datenblättern anzugeben sind, sowie um die Prüfgrenzen für künftige Stückprüfungen festzulegen. Einige oder sämtliche Prüfungen sollten von Zeit zu Zeit an Stichproben aus der laufenden Fertigung oder aus Lieferungen wiederholt werden, um zu bestätigen, dass die Qualität der Produkte durchgängig den Anforderungen entspricht.

Die durchzuführenden Mindest-Typprüfungen sind folgt angegeben.

Neue isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente sollten den in Tabelle 3 aufgeführten und mit „X“ (X = verbindlich) gekennzeichneten Typprüfungen unterzogen werden. Einige dieser Typprüfungen sind zerstörende Prüfungen.

Tabelle 3 – Mindest-Typ- und Stückprüfungen für isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente

Unterabschnitt	Prüfbeanspruchungen	Typprüfung	Stückprüfung	Zerstörend
5.2.1, 6.1	Isolationsspannung (V_{isol}), (V_{isol1})	X	X	X
5.2.2, Anhang A	Gehäusegrenzstrom	X ^a		
5.3.1	Umrissmaße, Kriechstrecken, Luftstrecken	X	X ^b	X
5.3.1.4	Ebenheit der Grundplatte oder der Kühloberfläche	X	X ^b	
5.3.6, 6.2.4	Thermische Widerstände (R_{th})	X		
5.3.7, 6.2.4.5	Transienter Wärmewiderstand (Z_{th})	X		
5.3.2, 6.2.2	Parasitäre Induktivität (L_p)	X ^a		
5.3.3, 6.2.3	Parasitäre Kapazität (C_p)	X ^a		
5.3.4/5, 6.2.1	Teilentladungsspannungen	X ^a		
5.2.5.4	(V_{im} oder $V_{\text{i(RMS)}}$)/(V_{em} oder $V_{\text{e(RMS)}}$)	X		
	Zugkraft am Anschluss (F_t)			

Unterabschnitt	Prüfbeanspruchungen	Typprüfung	Stückprüfung	Zerstörend
7.2.6 ^c	Temperaturwechselprüfung	X		X
7.2.3 ^c	Lastwechselprüfung	X		X
7.2.9/10 ^c	Mechanisches Schocken/Schwingen	X		X
5.2.6 ^c	Klimatische Bemessungswerte	X ^a		
ANMERKUNG Die Prüfung von Isolationsspannung, Teilentladungsspannung, Kriech- und Luftstrecke sollte auf jeder entsprechenden Norm beruhen, die für das fertig gestellte Betriebsmittel gilt, in dem isolierte Leistungs-Halbleiterbauelemente verwendet werden. Siehe z. B. IEC 62368-1 (Einrichtungen für Audio/Video-, Informations- und Kommunikationstechnik – Teil 1: Sicherheitsanforderungen) und IEC 61287 (Bahnanwendungen – Stromrichter auf Bahnfahrzeugen – Teil 1: Eigenschaften und Prüfverfahren) usw.				
^a Typprüfung nur an Bauelementen mit festgelegten Höchstwerten.				
^b Stückprüfung nur an Bauelementen mit festgelegten Höchst- oder Kleinstwerten.				
^c Zu den normativen Verweisungen für die Prüfung siehe Tabelle 1.				

7.4.2 Stückprüfungen

Stückprüfungen sollten in der laufenden Fertigung oder an Lieferungen durchgeführt werden, und zwar üblicherweise auf einer 100-%-Grundlage. Die in den Datenblättern festgelegten Bemessungs- und Kennwerte sollten für jedes Kriterium oder Bauelement bestätigt werden. Stückprüfungen dürfen aus einer Auswahl der isolierten Bauelemente in Gruppen von Stückprüfungen nach Tabelle 3 bestehen. Die Stückprüfungen, die an isolierten Bauelementen mindestens durchzuführen sind, werden in Tabelle 3 angegeben. Weitere Stückprüfungen werden so durchgeführt, wie es in den anderen Teilen von IEC 60747, die für die jeweiligen Schalter gelten, beschrieben ist.

Anhang A (informativ)

Prüfverfahren für den Gehäusegrenzstrom¹

– Zweck

Nachweis, dass das isolierte Leistungsbauelement, welches bipolare Transistoren, IGBTs oder MOSFETs als Schalter enthält, den Bemessungswert des Gehäusegrenzstroms aushält, ohne dass ein Bersten (eine „Explosion“) des Gehäuses auftritt oder ein Plasmastrahl abgegeben wird oder Masseteilchen herausgeschleudert werden. Dies ist eine zerstörende Prüfung.

ANMERKUNG 1 Das Bersten eines Gehäuses wird durch innere Lichtbogenbildung oder inneren Dampfdruck verursacht, wenn die (der) von einer äußeren Quelle gelieferte Energie oder Strom den festgelegten Grenzwert überschreitet. Lichtbogenbildung oder Dampfdruck werden in einem Gehäuse (einer Kapselung) mit ausgefallenen Leistungsbauelementen durch die Speisung mit gespeicherter Energie oder gespeichertem Strom aus einer äußeren Schaltstromquelle erzeugt. Der (die) für das Gehäuse nach dem Ausfall des Bauelementes kritische Strom oder Energie sollte unter den umgebungsbezogenen Eigenschaften des Gehäuses angegeben werden, und außerdem sollten der Halbleiter und auch andere elektrische Teile eine zufällige Explosion verhindern.

ANMERKUNG 2 Anhang A ist bei entsprechender Vereinbarung mit dem Anwender anwendbar.

– Schaltung

Siehe das nachstehende Bild A.1.

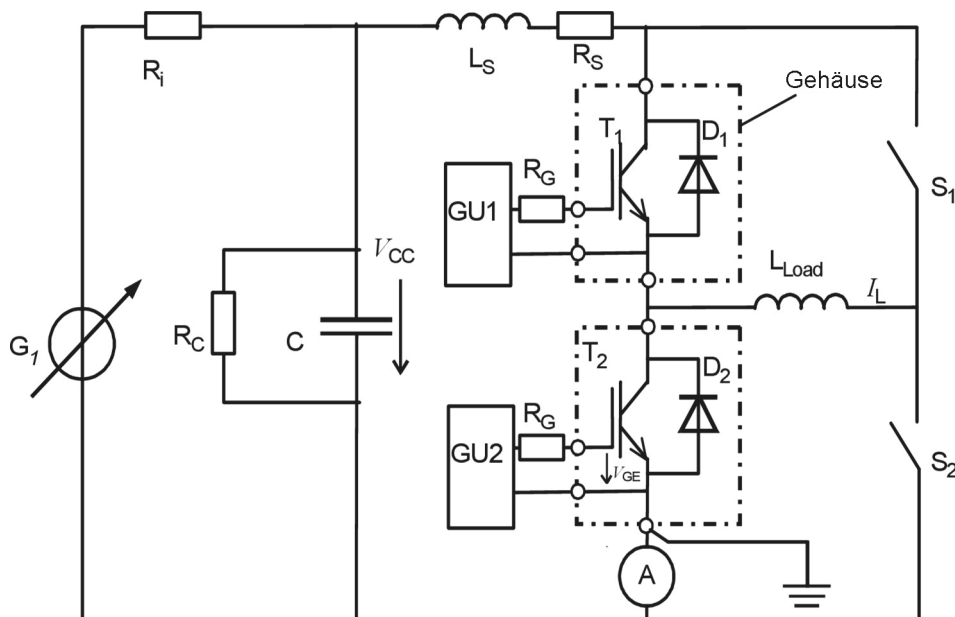


Bild A.1 – Prüfschaltung für den Gehäusegrenzstrom

– Schaltungsbeschreibung und Anforderungen

A =	Strommessgerät zur Messung des Bauelementestroms, der der Gehäusegrenzstrom sein kann, wenn das Gehäuse noch nicht bricht, und der mit einem Stromsensor mit niedriger Induktivität überwacht wird
C =	Leitungskondensatorbank, aufladbar auf die volle Spannung
D ₁ =	Inversdiode von T ₁ , oberer Zweig
D ₂ =	Inversdiode von T ₂ , unterer Zweig

¹ Noch in Beratung.

$G_1 =$	Gleichspannungsquelle für die Versorgungsspannung V_{CC} , die vom Netz unter allen Bedingungen getrennt werden kann
$GU1 =$	Treibereinheit für das Gate von T_1
$GU2 =$	Treibereinheit für das Gate von T_2
$L_{Load} =$	Lastinduktivität
$L_s =$	Streuinduktivität des Stromkreises (festgelegter Wert)
$R_c =$	Entladewiderstand für Schutzzwecke
$R_G =$	Gatewiderstand
$R_i =$	Innenwiderstand der Quelle
$R_s =$	Sicherungswiderstand, meistens auf null gesetzt
$S_1 =$	Hilfsschalter (IGBT), oberer Zweig
$S_2 =$	Hilfsschalter (IGBT), unterer Zweig
$T_1 =$	oberer IGBT-Schalter = Prüfling
$T_2 =$	unterer IGBT-Schalter
$I_L =$	Laststrom
$V_{GE} =$	Gatespannung

Der Aufbau besteht aus einem Zwei-Quadranten-Umrichter mit zwei identischen isolierten IGBT-Bauelementen. S_1 und S_2 sind Hilfsschalter, z. B. IGBT-Bauelemente, die zur Erzeugung des gewünschten Laststromes und zur Herbeiführung eines Kurzschlussausfalls verwendet werden. T_1 und T_2 sind identische isolierte IGBT-Bauelemente (Einzelschalter oder beide in einer Halbbrückenschaltung als Halbbrückenschalter).

– Prüfverfahren

Prüfung A

Zuerst wird Schalter S_2 geschlossen und T_1 eingeschaltet. Der Laststrom steigt an, wie es durch die Lastimpedanz L_{Load} festgelegt ist. Nachdem I_L den sicheren Arbeitsbereich (SOA) für das Ausschalten von T_1 überschritten hat, wird der Versuch unternommen, T_1 auszuschalten. Der Anfangsteil des Ausschaltvorganges findet statt, der Strom im Bauelement wird geringer und ein Teil des Stromes wird zur Diode D_2 kommutiert. Das Bauelement T_1 erfährt damit einen Ausschaltfehler. Die Diode im unteren Bauelement D_2 führt zu diesem Zeitpunkt den wesentlichen Strom. Der Ausfall von T_1 treibt die Diode D_2 zum Ausschalten bei praktisch unbegrenztem di/dt , das durch L_{Load} verursacht wird. Dies liegt außerhalb des sicheren Arbeitsbereiches der Diode D_2 , die dadurch auch ausfällt.

Prüfung B

T_1 wird eingeschaltet, bis ein wesentlicher Laststrom erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt wird das Bauelement T_2 eingeschaltet. Es wird zum Ausfall gebracht, weil es mit der vollen Spannung zusammen mit dem vollen Strom belastet wird. Dadurch fährt das Bauelement T_1 in die Entsättigung und fällt auch aus. (Durchschuss von oben nach unten, der einen Kurzschluss zwischen der Plus- und Minussammelschiene verursacht, die Kondensatorbank entlädt und zu einem Lichtbogen in den Bauelementen führt. Dadurch werden im umgebenden Plastikgel Gase usw. erzeugt, bis die Energie der Kondensatorbank verbraucht ist.) In der Realität könnte ein derartiger Ausfall durch kosmische Strahlung oder thermische Überlastung verursacht werden. Durch Manipulation des Bauelements kann dies künstlich herbeigeführt werden.

Diese Prüfungen werden durchgeführt, bis ein Wert der gespeicherten Energie in der Kondensatorbank und des Spitzenstromes ermittelt worden ist, der für einen Gehäusebruch oder -riss nicht ausreicht. Die Werte des erreichten Spitzenstroms I_C = Gehäusegrenzstrom, V_{CC} , C_{max} und von $E_C = \frac{1}{2} C V_{CC}^2$ werden überwacht.

– Messungen nach den Prüfungen und Kriterien

E DIN EN IEC 60747-15:2024-06
prEN IEC 60747-15:2023

Der Prüfling wird einer Sichtprüfung unterzogen, um festzustellen, ob Risse oder Anzeichen von Plasma durch innere Lichtbögen auf der Außenseite erkennbar sind. Es darf weder Anzeichen dafür geben, dass Teilchen abgegeben wurden, noch dürfen äußere Schmelzspuren oder Explodieren unter Flammenbildung erkennbar sein.

ANMERKUNG 3 Bei Energien von mehr als etwa 10 kJ ist das Herausschleudern von Teilchen unvermeidbar. Durch eine gute Konstruktion kann erreicht werden, dass keine massiven Teile herausgeschleudert werden, die schwere Folgeschäden verursachen können.

– **Festgelegte Bedingungen**

- Gehäuse- oder Ersatzsperrschichttemperatur ($T_c = 25\text{ °C}$, $T_{vj} = 25\text{ °C}$ oder 125 °C)
- Versorgungsspannung (V_{CC})
- Kapazität der Kondensatorbank C
- gespeicherte Energie der Kondensatorbank E_C
- Streuinduktivität des Kurzschlusses L_{SC}
- Laststrom I_L
- Gatespannung V_{GEon} und V_{GEOff}
- Gatewiderstand R_{Gon} und R_{Goff}
- prozentualer Anteil der nicht gebrochenen Bauelemente in Bezug auf die Gesamtanzahl geprüfter Bauelemente

ANMERKUNG 4 Literatur: S. Gekenides, et al.: Explosion Tests on IGBT High voltage Modules, ISPSD '99 Toronto.

Anhang B (informativ)

Messverfahren für die Schichtdicke von Wärmeleitpasten

Die Messlehre ist ein Kamm aus nicht rostendem Stahl oder einem geeigneten Kunststoff, der in dem flüssigen Werkstoff der für die Dickenmessung vorgesehenen Schicht nicht löslich ist. Die Außenzähne des Kamms – diejenigen an den Ecken des Sechsecks in Bild B.1 – bilden eine Grundlinie. Die Innenzähne – diejenigen zwischen den Außenzähnen – sind zunehmend verkürzt, so dass ein Bereich von Abständen zwischen den Zähnen und der Grundlinie erreicht wird. Die Größe des Abstandes kann auf einer Skala an der Lehre abgelesen werden. In Bild B.1 wird eine typische Messlehre dargestellt.

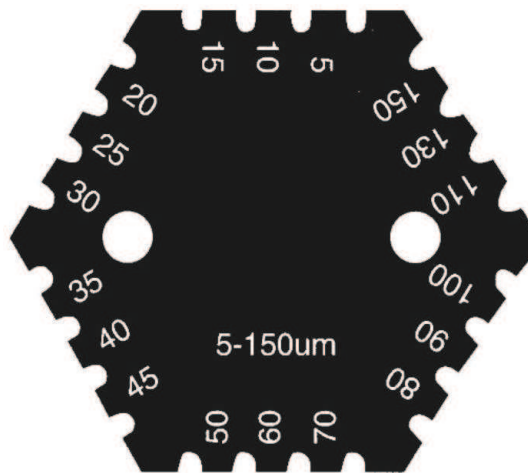


Bild B.1 – Beispiel für eine Messlehre für eine Wärmeleitpaste mit einer Schichtdicke zwischen 5µm und 150µm

Messverfahren

Unmittelbar nach dem Aufbringen der Schicht wird der Messkamm so auf die Unterlage (den Kühlkörper) gedrückt, dass sich die Zähne vertikal zur Oberfläche befinden und der Messkamm nicht rutscht. Der Kamm wird entfernt und die Zähne werden betrachtet, um festzustellen, welcher der kürzeste Zahn ist, der noch mit der pastösen Schicht in Berührung gekommen ist. Die Schichtdicke entspricht dem Mittelwert aus dem Wert des letzten benetzten Zahns und dem Wert des ersten nicht benetzten Zahns. Es müssen mindestens zwei weitere Messungen in gleicher Weise an anderen Stellen der Oberfläche durchgeführt werden, um repräsentative Werte für die abgedeckte Fläche zu ermitteln.

ANMERKUNG Dieses Verfahren dient zur Messung der Schichtdicke nach dem Aufdrucken von Wärmeleitpaste. Daher ist es äußerst effektiv für die Inspektion bei Inbetriebnahme des Druckgeräts zum Auftragen der Wärmeleitpaste. Es eignet sich jedoch nicht für die Inspektion von Dispenser-Geräten zum Auftragen der Wärmeleitpaste oder für die Gewährleistung jedes Produkts, so dass es erforderlich ist, für entsprechende Nachweise ein anderes Verfahren in Betracht zu ziehen.

Anhang C (informativ)

Intelligente Leistungshalbleitermodule (IPM)

C.1 Allgemeines

Es wird zwischen verschiedenen Typen von isolierten Leistungshalbleiter unterschieden; einer davon sind die intelligenten Leistungshalbleitermodule. Die intelligenten Leistungshalbleitermodule beinhalten eingebaute Steuerstromkreise wie z. B. einen Ansteuerstromkreis für das Gate und Stromkreise für Schutz vor anormalem Betrieb. Dieser Bauelementetyp ist in der Praxis weit verbreitet. In diesem Anhang werden die Funktionen des IPM als Referenz dargestellt. In diesem Anhang wird ein IGBT als Beispiel für einen IPM verwendet.

C.2 Steueranschlüsse des IPM

Bild C.1 zeigt ein Blockschaltbild der Konfiguration der inneren Stromkreise des repräsentativen IPM, die Hauptanschlüsse und die Steueranschlüsse.

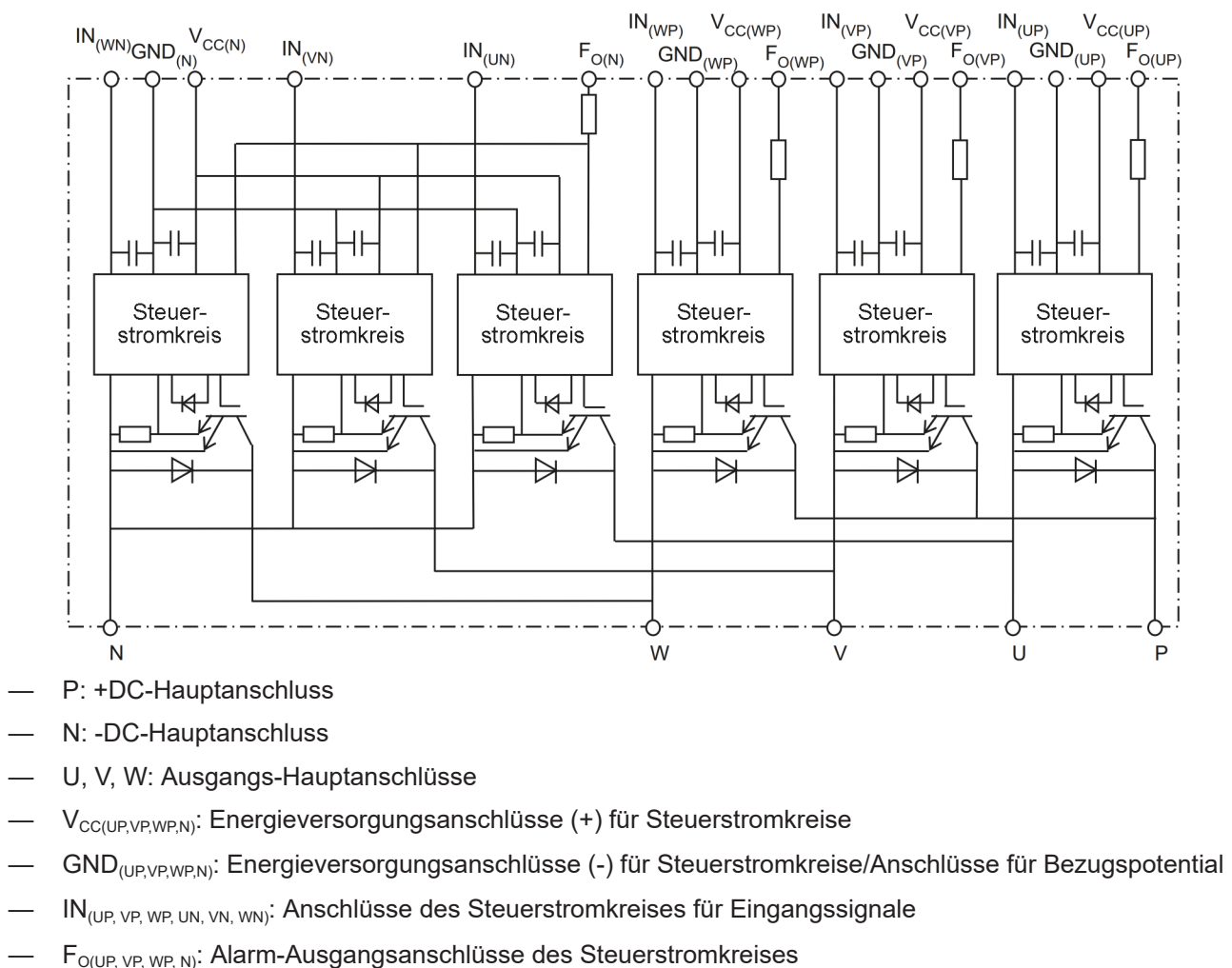


Bild C.1 – Beispiel-Blockschaltbild der Konfiguration der inneren Stromkreise eines IPM

C.3 Wesentliche Bemessungswerte (Grenzwerte) und Kennwerte

C.3.1 Allgemeines

Die Bemessungswerte und Kennwerte für die inneren Steuerstromkreise von IPM werden in diesem Abschnitt beschrieben. Das Eingangssignal zum Ansteuern des IGBT ist low-aktiv, d. h. beim IPM in diesem Beispiel wird der IGBT eingeschaltet, wenn der Signalpegel von High auf Low wechselt.

ANMERKUNG Wenn in der tatsächlichen Anwendung ein Bemessungs- oder Kennwert mehr als eine Bezeichnung hat, werden die entsprechenden Formelzeichen mit einem „/“ als Trennzeichen angegeben.

C.3.2 Bemessungswerte (Grenzwert) und Prüfverfahren

C.3.2.1 Versorgungsspannung V_D/V_{CC}

Höchstspannung, die unter festgelegten Bedingungen zwischen dem Anschluss V_{CC} und dem Anschluss GND angelegt werden kann. Beide Formelzeichen V_D und V_{CC} dürfen verwendet werden.

C.3.2.2 Eingangsspannung V_{CIN} /Eingangssignalspannung V_{in}

Höchstspannung, die unter festgelegten Bedingungen zwischen dem Anschluss IN und dem Anschluss GND angelegt werden kann.

C.3.2.3 Störungsausgangsspannung V_{FO} /Alarmsignalspannung V_{ALM}

Höchstspannung, die unter festgelegten Bedingungen zwischen dem Anschluss F_O und dem Anschluss GND angelegt werden kann.

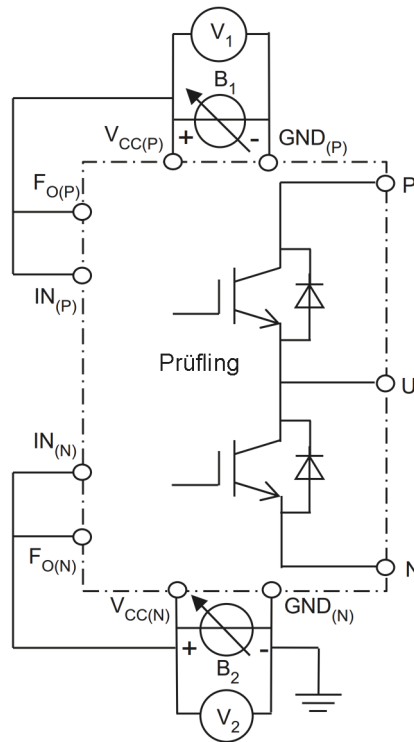
Prüfverfahren für die drei oben genannten Bemessungswerte sind weiter unten angegeben.

– Zweck

Bestätigung, dass keine Anomalie vorliegt, wenn die Bemessungsspannung des Steuerstromkreises unter den festgelegten Bedingungen an den Steuerstromkreis des Prüflings angelegt wird.

– Prüfschaltung

Die Prüfschaltung ist in Bild C.2 am Beispiel eines 2-in-1-IPM dargestellt.



- Prüfling: Zu prüfender IPM
- B_1 : Versorgungsspannungsquelle des Steuerstromkreises des oberen Zweigs
- B_2 : Versorgungsspannungsquelle des Steuerstromkreises des unteren Zweigs
- V_1 : Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung des Steuerstromkreises des oberen Zweigs
- V_2 : Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung des Steuerstromkreises des unteren Zweigs

**Bild C.2 – Prüfschaltung für Versorgungsspannung, Eingangsspannung/
Eingangssignalspannung und Störungsausgangsspannung/Alarmsignalspannung**

- Prüfverfahren
 - 1) Die Prüfschaltung wird wie in Bild C.2 dargestellt an den Prüfling angeschlossen.
 - 2) Der Prüfling wird mit einer Heizplatte oder einer Klimakammer mit konstanter Temperatur auf die festgelegte Temperatur gebracht.
 - 3) Die festgelegte Spannung wird mit der Versorgungsspannungsquelle B_1 zwischen dem Anschluss $V_{CC(P)}$ und dem Anschluss $GND_{(P)}$ und mit der Versorgungsspannungsquelle B_2 zwischen dem Anschluss $V_{CC(N)}$ und dem Anschluss $GND_{(N)}$ angelegt.
 - 4) Es wird überprüft, dass nach der Prüfung keine Anomalien vorliegen.
- Festgelegte Bedingungen
 - 1) Spannung der Versorgungsspannungsquellen B_1 , B_2 für den Steuerstromkreis;
 - 2) Umgebungs-, Gehäuse- oder Ersatzsperrschichttemperatur T_a oder T_c oder T_{vj} .

C.3.2.4 Störungsausgangsstrom I_{FO} /Alarmsignalstrom I_{ALM}

Höchststrom, der unter festgelegten Bedingungen zwischen dem Anschluss F_O und dem Anschluss GND fließen kann.

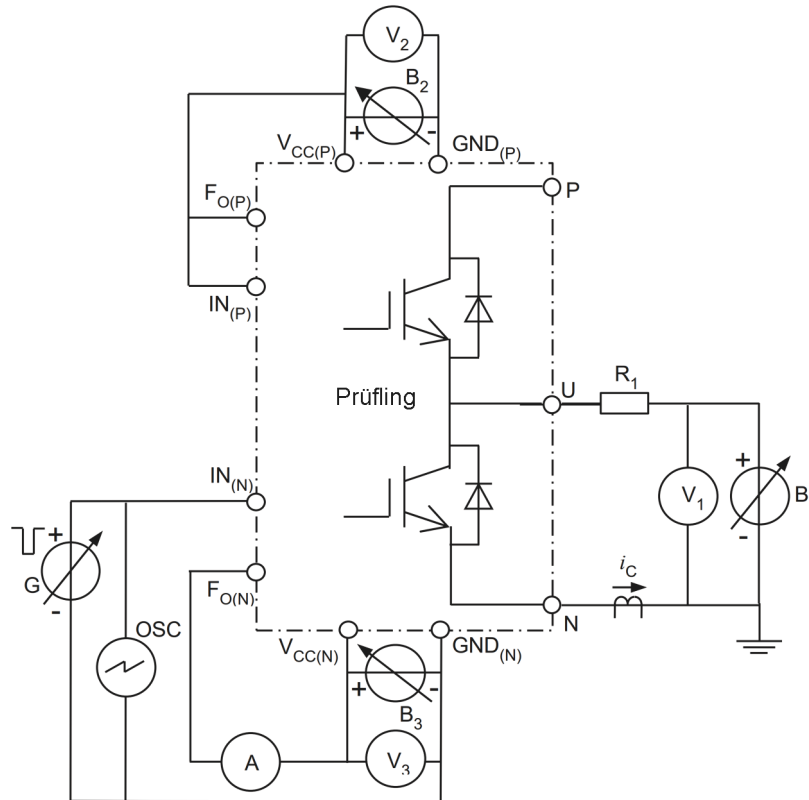
Das Prüfverfahren ist weiter unten dargestellt.

- Zweck

Bestätigung, dass keine Anomalie vorliegt, wenn der Bemessungsstrom des Steuerstromkreises unter den festgelegten Bedingungen an den Steuerstromkreis des Prüflings angelegt wird.

– Prüfschaltung

Die Prüfschaltung ist in Bild C.3 dargestellt.



- Prüfling: Zu prüfender IPM
- B₁: Versorgungsspannungsquelle für den Kollektorstrom
- B₂: Versorgungsspannungsquelle des Steuerstromkreises des oberen Zweigs
- B₃: Versorgungsspannungsquelle des Steuerstromkreises des unteren Zweigs
- V₁: Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung für den Kollektorstrom
- V₂: Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung des Steuerstromkreises des oberen Zweigs
- V₃: Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung des Steuerstromkreises des unteren Zweigs
- G: Spannungsquelle für variable Spannungsimpulse
- OSC: Oszilloskop zur Beobachtung der Spannung zwischen IN_(N) und GND_(N)
- R₁: Strombegrenzender Widerstand
- A: Amperemeter zur Beobachtung des Störungsausgangsstroms

Bild C.3 – Prüfschaltung für den Störungsausgangsstrom/Alarmsignalstrom

- Prüfverfahren
 - 1) Die Prüfschaltung wird wie in Bild C.3 dargestellt an den Prüfling angeschlossen.
 - 2) Der Prüfling wird mit einer Heizplatte oder einer Klimakammer mit konstanter Temperatur auf die festgelegte Temperatur gebracht.
 - 3) Die festgelegte Spannung wird mit der Versorgungsspannungsquelle B₂ zwischen dem Anschluss V_{CC(P)} und dem Anschluss GND_(P) und mit der Versorgungsspannungsquelle B₃ zwischen dem Anschluss V_{CC(N)} und dem Anschluss GND_(N) angelegt.

- 4) Mit der Spannungsquelle für variable Spannungsimpulse G wird das EIN-Signal zwischen dem Anschluss $IN_{(N)}$ und dem Anschluss $GND_{(N)}$ angelegt.
 - 5) Die Spannung der Versorgungsspannungsquelle B_1 wird erhöht, bis die Überstromschutz-/Kurzschlusschutzfunktion aktiviert wird.
 - 6) Nach Aktivierung der Überstromschutz-/Kurzschlusschutzfunktion wird der Stromfluss zum Anschluss $F_{O(N)}$ mit einem Amperemeter (oder einem Stromsensor mit Oszilloskop) beobachtet und bestätigt, dass das Bauelement den Bemessungsstrom aushält.
 - 7) Es wird überprüft, dass nach der Prüfung keine Anomalien vorliegen.
- Festgelegte Bedingungen
- 1) Kollektorstrom des Überstromschutz-/Kurzschlusschutz-Auslösegrenzwerts;
 - 2) Festgelegter Strom I_{FO} oder I_{ALM} zum Anschluss $F_{O(N)}$ (einstellbar durch Spannung von B_3);
 - 3) Spannung der Versorgungsspannungsquellen B_2 , B_3 für den Steuerstromkreis;
 - 4) Festgelegtes Eingangssignal zwischen dem Anschluss $IN_{(N)}$ und dem Anschluss $GND_{(N)}$;
 - 5) Umgebungs-, Gehäuse- oder Ersatzsperrschichttemperatur T_a oder T_c oder T_v .

C.3.2.5 DC-Bus-Spannung des Hauptstromkreises bei Kurzschluss V_{sc}

Höchste DC-Bus-Spannung des Hauptstromkreises (Spannung zwischen Anschluss P und Anschluss N des IPM), die eine Schutzfunktion bei einem Kurzschluss ausführen kann, wenn die festgelegte Soll-Temperatur für die Prüfung und die festgelegte Steuerspannung angelegt werden.

ANMERKUNG Wenn ein Kurzschluss bei einer Spannung auftritt, die höher ist als dieser Wert, ist keine ausreichende Schutzfunktion mehr gegeben, und das Bauelement wird möglicherweise zerstört.

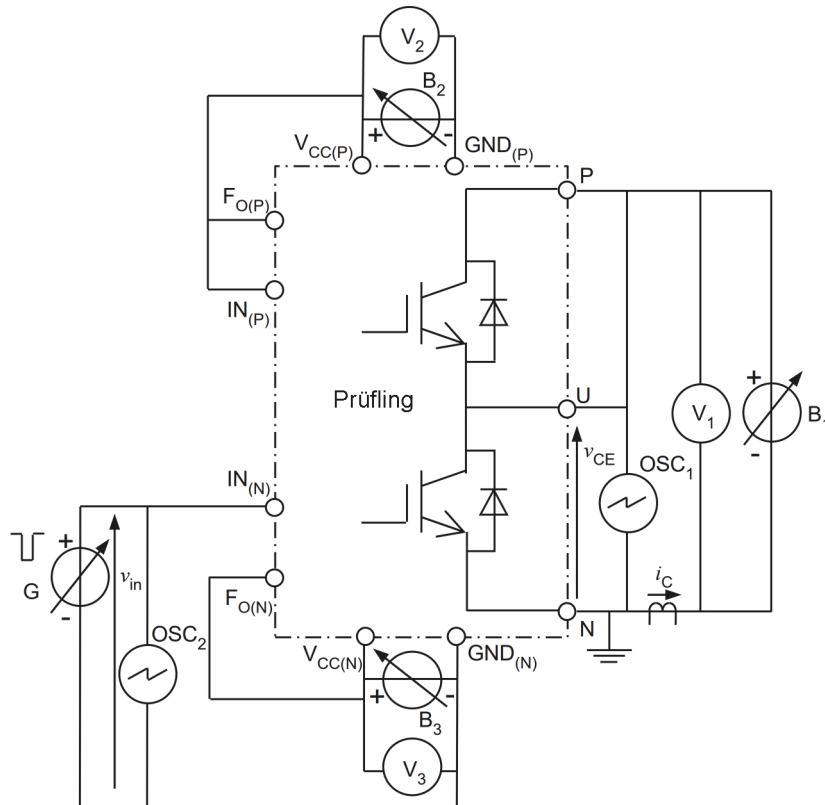
Das Prüfverfahren ist weiter unten dargestellt.

– Zweck

Bestätigung, dass der Prüfling bei einem Kurzschluss durch die Schutzfunktion geschützt wird und die Ausführung der Kurzschlusschutzfunktion unter den festgelegten Bedingungen aushält.

– Prüfschaltung

Die Prüfschaltung ist in Bild C.4 dargestellt und die Wellenformen sind in Bild C.5 dargestellt.



- Prüfling: Zu prüfender IPM
- B₁: Versorgungsspannungsquelle für den Kollektorstrom
- B₂: Versorgungsspannungsquelle des Steuerstromkreises des oberen Zweigs
- B₃: Versorgungsspannungsquelle des Steuerstromkreises des unteren Zweigs
- V₁: Voltmeter zur Beobachtung der DC-Bus-Spannung (zwischen Anschluss P und Anschluss N)
- V₂: Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung des Steuerstromkreises des oberen Zweigs
- V₃: Voltmeter zur Beobachtung der Versorgungsspannung des Steuerstromkreises des unteren Zweigs
- G: Spannungsquelle für variable Spannungsimpulse
- OSC₁: Oszilloskop zur Beobachtung der Spannung v_{CE} zwischen Kollektor und Emitter
- OSC₂: Oszilloskop zur Beobachtung der Spannung v_{in} zwischen IN_(N) und GND_(N)

Bild C.4 – Prüfschaltung für die DC-Bus-Spannung des Hauptstromkreises bei Kurzschluss

- Prüfverfahren
 - 1) Die Prüfschaltung wird wie in Bild C.4 dargestellt an den Prüfling angeschlossen.
 - 2) Der Prüfling wird mit einer Heizplatte oder einer Klimakammer mit konstanter Temperatur auf die festgelegte Temperatur gebracht.
 - 3) Die festgelegte Spannung wird mit der Versorgungsspannungsquelle B₂ zwischen dem Anschluss V_{CC(P)} und dem Anschluss GND_(P) und mit der Versorgungsspannungsquelle B₃ zwischen dem Anschluss V_{CC(N)} und dem Anschluss GND_(N) angelegt. Zudem wird mit der Versorgungsspannungsquelle B₁ die festgelegte Spannung zwischen dem Anschluss P und dem Anschluss N angelegt.
 - 4) Mit der Spannungsquelle für variable Spannungsimpulse G wird das EIN-Signal zwischen dem Anschluss IN_(N) und dem Anschluss GND_(N) angelegt (lange genug, um den Kurzschlussschutz zu aktivieren, in der Regel 10 µs oder länger).
 - 5) Es wird überprüft, dass nach der Kurzschlussprüfung keine Zerstörung oder Anomalien vorliegen.