DEUTSCHE NORM *Entwurf* September 2020

DIN EN IEC 61788-22-2 (VDE 0390-22-2)

DIN

VDE

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation" bekannt gegeben worden.

ICS 29.050

Einsprüche bis 2020-10-07

Entwurf

Supraleitfähigkeit – Teil 22-2: Messung des Normalleitungswiderstands und des kritischen Stroms – HTS Josephson Kontakt (IEC 90/444/CD:2019); Text Deutsch und Englisch

Superconductivity –
Part 22-2: Normal state resistance and critical current measurement –
high-Tc Josephson junction
(IEC 90/444/CD:2019);
Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-08-07 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm 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, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 68 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ... .

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/444/CD:2019 „Superconductivity – Part 22-2: Normal state resistance and critical current measurement – high-Tc Josephson junction“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD 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 TC 90 „Superconductivity“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC. Das Dokument wurde den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

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. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 184 „Supraleiter“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

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.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Inhalt

Seite

Einleitung 6
1 Anwendungsbereich 7
2 Normative Verweisungen 7
3 Begriffe 7
4 Formelzeichen 8
5 Prinzip der Messmethode 9
6 Messaufbau 9
6.1 Allgemeines 9
6.2 Tieftemperatursystem 9
6.3 Elektrisches Messsystem 10
6.4 Messschaltung 10
7 Bestimmung von Normalleitungswiderstand (R_n) und intrinsischem kritischen Strom (I_{ci}) 11
7.1 Berechnungsmethode 11
7.2 Kriterium des geometrischen Mittels für die Anwendung der hyperbolischen Regressionsanalyse 13
8 Messunsicherheit 13
8.1 Messunsicherheit Typ A 13
8.2 Messunsicherheit Typ B 14
8.2.1 Temperatur 14
8.2.2 Messung der Spannung 14
8.2.3 Messung des Stromes 15
8.3 Messunsicherheitsbudget 15
8.4 Anforderungen an die Messunsicherheit 16
9 Prüfbericht 17
9.1 Kennzeichnung der zu prüfenden Bauelemente 17
9.2 R_n Wert 17
9.3 I_{ci} Wert 17
9.4 Messunsicherheit 17
9.5 Luftdruck 17
9.6 Wahlweise Angabe sonstiger Daten 17
Anhang A (informativ) Berechnungsmethode und praktische Anwendung für HTS-Josephson-Kontakte 18
A.1 Allgemeines 18
A.2 Hyperbolische Regressionsanalyse 18
A.3 Methode des geometrischen Mittels 20
A.4 Kombinierte Methode 20
A.5 Bestimmung von R_n, I_{ci}, $u_{A,R}$ und $u_{A,I}$ aus experimentellen *U-I*-Kennlinien von HTS-Josephson-Kontakten 22
A.5.1 HTS-Josephson-Kontakt (JL350) 22

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Seite

A.5.2 HTS-Josephson-Kontakt (JL351) ... 24
A.5.3 HTS-Kontakt (TUT) ... 26
Anhang B (informativ) Praktische Anwendung auf LTS-Josephson-Kontakte ... 29
B.1 Allgemeines ... 29
B.2 Bestimmung von R_n, I_{ci}, $u_{A,R}$ und $u_{A,I}$ in experimentellen *U-I*-Kennlinien von LTS-Josephson-Kontakten ... 29
B.2.1 LTS-Kontakt (IU1) ... 29
B.2.2 LTS-Kontakt (IU2) ... 31
B.2.3 LTS-Kontakt (IU3) ... 32
B.2.4 LTS-Kontakt (IU4) ... 33
Literaturhinweise ... 35

Bilder

Bild 1 – Typische Messschaltung für die Messung von Strom-Spannungs-(*U-I*)-Kennlinien ... 11
Bild 2 – *U-I*-Kennlinie (rote Linie) und hyperbolisches Modell (punktierte Linie) ... 12
Bild A.1 – *U-I*-Kennlinie berechnet mit dem RSJ-Modell ... 19
Bild A.2 – *U-I*-Kennlinie mit Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten ... 19
Bild A.3 – Anwendung der Methode des geometrischen Mittels auf eine ideale *U-I*-Kennlinie in Bild A.1 ... 21
Bild A.4 – Anwendung der Methode des geometrischen Mittels auf eine *U-I*-Kennlinie mit Rauschverrundung and Eigenerwärmungseffekten in Bild A.2 ... 21
Bild A.5 – *U-I*-Kennlinie des Kontaktes JL350 ... 22
Bild A.6 – Anwendung der Methode des geometrischen Mittels auf Bild A.5 ... 23
Bild A.7 – *U-I*-Kennlinie von JL350 (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern R_n und I_{ci} (schwarz) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (grün gestrichelt) ... 24
Bild A.8 – *U-I*-Kennlinie von JL351 ... 25
Bild A.9 – Anwendung der Methode des geometrischen Mittels auf Bild A.8 ... 25
Bild A.10 – *U-I*-Kennlinie von JL351 (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern R_n und I_{ci} (schwarz) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (grün gestrichelt) ... 26
Bild A.11 – *U-I*-Kennlinie des Kontaktes TUT mit kleinem I_m ... 27
Bild A.12 – Methode des geometrischen Mittels für den Kontakt TUT ... 27
Bild A.13 – Angepasste Methode des geometrischen Mittels für den Kontakt TUT ... 28
Bild A.14 – *U-I*-Kennlinie des Kontaktes TUT (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern R_n und I_{ci} (rot) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (blau) ... 28
Bild B.1 – Methode des geometrischen Mittels für Kontakt IU1 ... 30
Bild B.2 – *U-I*-Kennlinie von IU1 (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern R_n und I_{ci} (schwarz) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (grün gestrichelt) ... 30
Bild B.3 – Methode des geometrischen Mittels für Kontakt IU2 ... 31
Bild B.4 – U-I-Kennlinie von IU2 (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern R_n und I_{ci} (schwarz) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (grün gestrichelt) ... 31
Bild B.5 – Methode des geometrischen Mittels für Kontakt IU3 ... 32
Bild B.6 – *U-I*-Kennlinie von IU3 (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Seite

R_n und I_{ci} (schwarz) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (grün gestrichelt) 33

Bild B.7 – Methode des geometrischen Mittels für Kontakt IU4 33

Bild B.8 – *U-I*-Kennlinie von IU4 (Punkte), hyperbolisches Modell mit den bestimmten Parametern R_n und I_{ci} (schwarz) und Normalwiderstandskurve $U = R_n \cdot I$ (grün gestrichelt) 34

Tabellen

Tabelle 1 – Typische relative Fehler der Messunsicherheit Typ A für HTS-Josephson-Kontakte 14

Tabelle 2 – Tabelle des Messunsicherheitsbudgets für R_n 16

Tabelle 3 – Tabelle des Messunsicherheitsbudgets für I_{ci} 16

Tabelle A.1 – Werte R_n, I_{ci}, $u_{A,R}$ und $u_{A,I}$ von HTS-Josephson-Kontakten 22

Tabelle B.1 – R_n, I_{ci}, $u_{A,R}$ und $u_{A,I}$ von LTS-Josephson-Kontakten 29

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Einleitung

Die Normenreihe IEC 61788-22 definiert internationale Normen für supraleitende elektronische Bauelemente. Der physikalische Effekt der Supraleitung bietet verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung von Sensoren und Detektoren für eine Anzahl verschiedener Messgrößen. Aus diesem Grund wurde auch bereits eine ganze Reihe von Typen supraleitender Sensoren und Detektoren entwickelt. Die dabei ausgenutzten Effekte umfassen unter anderem die supraleitende Energielücke, den scharfen Übergang von der Normalleitung zur Supraleitung, nichtlineare Strom-Spannungs-Kennlinien, kohärente supraleitende Quantenzustände sowie die Quantisierung des magnetischen Flusses. Supraleiter werden beeinflusst durch die Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern, Photonen, Ionen usw. Die supraleitenden Sensoren und Detektoren zeichnen sich durch extrem hohe Werte für Auflösung, Geschwindigkeit und Empfindlichkeit aus, die auf Basis anderer physikalischer Effekte nicht erreicht werden können.

Die Internationale Norm IEC 61788-22-1 beschreibt verschiedene Typen supraleitender Sensoren und Detektoren. Einer davon ist der Supraleitende Quanteninterferenz-Sensor (en: SQUID; superconducting quantum interference device), der für Magnetfeldmessungen mit extrem niedrigem Rauschen der Größenordnung von fT/√Hz im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 Hz eingesetzt wird [1][2]. Dieser Typ von Magnetfeldsensor wird in der Praxis angewendet bei der Magnetokardiographie (MKG), Magnetoenzephalographie (MEG), Rohstofferkundung, Signalverstärkung, Messung magnetischer Eigenschaften usw. Die für SQUID verwendeten Supraleiter werden in zwei Kategorien eingeteilt: Tieftemperatur-Supraleiter (en: LTS; low-T_c superconductor) und Hochtemperatur-Supraleiter (en: HTS; high-T_c superconductor). Die vorliegende Norm definiert eine Messmethode für sowohl den Normalleitungswiderstand (R_n) als auch den intrinsischen kritischen Strom (I_{ci}) von Josephson-Kontakten auf der Basis von HTS, die ein grundlegendes Funktionselement von SQUID sowie anderen supraleitenden elektronischen Bauelementen darstellen.

Ziel der in dieser internationalen Norm beschriebenen Messmethode ist die Herstellung einer sachgerechten und konsensfähigen technischen Basis für Ingenieure, die auf einem Gebiet der Supraleitertechnologie arbeiten. Obwohl der Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung selbst noch Gegenstand der Forschung ist, kann das Auftreten des Josephson-Effekts in schwach supraleitenden Verbindungen wie Stufenkontakten und Rampenkontakten als gesichert und reproduzierbar angenommen werden, und charakteristische Parameter konventioneller LTS-Josephson-Kontakte sind auch für HTS-Josephson-Kontakte anwendbar. Die wichtigen Parameter für HTS-Josephson-Kontakte für supraleitende Bauelemente sind R_n und I_{ci} bzw. deren Produkt, das als I_cR_n-Produkt bezeichnet wird. Alle bisher bekannten HTS-Josephson-Kontakte mit Ausnahme von MgB_2 weisen eine charakteristische nicht-hysteretische Strom-Spannungs-Kennlinie auf, wie sie auch für Supraleiter/Normalleiter/Supraleiter-Kontakte (SNS) typisch ist.

Der nach der in dieser Norm beschriebenen Methode bestimmte kritische Strom wird intrinsischer kritischer Strom (I_{ci}) genannt, und bezieht sich auf ideale *I-U*-Kennlinien ohne Rauschverrundung. Der maximale Strom in der *I-U*-Kennlinie ohne Spannungsabfall (I_c) kann daher aufgrund des Rauschens deutlich kleiner sein. Das $I_{ci}R_n$-Produkt ist aber für das Design supraleitender Bauelemente von größerer Wichtigkeit als das I_cR_n-Produkt. Die nach dieser Norm bestimmten I_{ci}-Werte für ideale rauschfreie *I-U*-Kennlinien sind üblicherweise höher als die experimentellen Werte für I_c.

Die praktische Anwendung dieser Norm für HTS-Josephson-Kontakte wird in Anhang A beschrieben. In Anhang B wird die Messmethode auf LTS-Kontakte angewendet, um die universelle Gültigkeit und Verwendbarkeit für zukünftige Normen zu demonstrieren.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Supraleitfähigkeit – Teil 22-2: Messung des Normalleitungswiderstands und des kritischen Stroms – HTS Josephson Kontakt

1 Anwendungsbereich

Diese internationale Norm bzw. dieser Teil -2 der internationalen Normenreihe IEC 61788-22 ist anwendbar für HTS-Josephson-Kontakte in SQUID und anderen Anwendungen. Sie legt Benennungen, Definitionen, Symbole sowie die Mess- und Bestimmungsmethode für den Normalleitungswiderstand (R_n) und den intrinsischen kritischen Strom (I_{ci}) fest. Der R_n-Wert beschreibt den Widerstand einer schwach supraleitenden Verbindung (en: weak link) zwischen zwei HTS im normalleitenden Zustand. Der I_{ci}-Wert beschreibt den maximalen Wert des Gleichstroms ohne Spannungsabfall zwischen zwei HTS im supraleitenden Zustand ohne Rauschverrundung der *U-I*-Kennlinie. Die schwach supraleitende Verbindung kann als Stufenkontakt (en: step-edge), Rampenkontakt (en: ramp-edge) oder als eine andere Struktur realisiert werden. Das Produkt I_{ci} R_n stellt dabei eine wichtige Kenngröße für das Design supraleitender Bauelemente dar.

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 61788-22-1, *SUPERCONDUCTIVITY – Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors*

ISO 7000 / IEC 60417, *Graphical symbols for use on equipment (6370 Normal-superconducting boundary and 6371 Josephson junction)*

IEC 60617, *Graphical Symbols for Diagrams (S01924 Superconducting region, One superconducting connection, S01925 Normal-superconducting boundary and S01926 Josephson junction)*

ISO/IEC GUIDE 98-3:2008(E), *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

JCGM 102:2011, *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Extension to any number of output quantities*

IEC 60050-815:2015, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity*

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 60050-815, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity
- IEC 61788-22-1, Superconductivity – Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors
- IEC Electropedia: verfügbar unter http://www.electropedia.org/
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter http://www.iso.org/obp

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

3.1
***U-I*-Kennlinie**
Datensatz bestehend aus dem Spannungsabfall zwischen zwei Supraleitern eines Josephson-Kontaktes und dem durch den Kontakt fließenden Strom.

Anmerkung 1 zum Begriff: „*V-I*-Kennlinie“ oder „*I-V*-Kennlinie“ können auch verwendet werden.

3.2
Normalleitungswiderstand
R_n
Widerstand zwischen zwei einen Josephson-Kontakt bildenden Supraleitern im Zustand der Normalleitung.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Benennung „Normalwiderstand” kann auch verwendet werden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Sofern die Eigenerwärmung vernachlässigbar ist, kann in einem Josephson-Brückenkontakt der Normalleitungswiderstand auch als Widerstand bei einem die Supraleitung unterdrückenden Strom deutlich oberhalb des kritischen Stromes definiert werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Sofern die Eigenerwärmung vernachlässigbar ist, kann in einem Josephson-Tunnelkontakt der Normalleitungswiderstand auch als Tunnelwiderstand bei einer Bias-Spannung deutlich oberhalb $2\Delta/e$ definiert werden, wobei Δ die Energielücke und e die Elementarladung bezeichnet.

3.3
intrinsischer kritischer Strom
I_{ci}
Maximaler Wert des Gleichstroms ohne Spannungsabfall durch einen Josephson-Kontakt, sofern keine Rauschverrundung der *U-I*-Kennlinie auftritt.

Anmerkung 1 zum Begriff: Der kritische Strom (I_c) ist der maximale Wert des Gleichstromes der einen Josephson-Kontakt im Experiment durchfließen kann, so dass er noch als widerstandslos betrachtet werden kann (IEC 61788-22-1).

Anmerkung 2 zum Begriff: Die in dieser Norm beschriebene Methode bestimmt I_{ci}, dessen Wert üblicherweise größer oder gleich I_c ist.

3.4
geometrisches Mittel
Wurzel des Produktes der aus einer *U-I*-Kennlinie bestimmten Werte für dU/dI und U/I.

3.5
Rauschverrundung
Einfluss des Rauschens auf die *U-I*-Kennlinie.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die *U-I*-Kennlinie wird in der Nähe von I_{ci} gegenüber ihrer idealen Form verrundet. Aus diesem Grund ist der Wert von I_c kleiner als der Wert von I_{ci}.

3.6
Eigenerwärmungseffekt
Auswirkung der durch den Transportstrom verursachten thermischen Leistung in einem Josephson-Kontakt auf die *U-I*-Kennlinie

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Strom erzeugt Wärme und die Form der *U-I*-Kennlinie weicht im Bereich großer Ströme deutlich oberhalb I_{ci} gegenüber der durch R_n beschriebenen geraden Linie nach oben ab.

4 Formelzeichen

U Spannungsabfall zwischen zwei durch eine schwach supraleitende Verbindung verbundenen Supraleitern

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Anmerkung 1 zum Begriff: „V“ kann auch verwendet werden

I der durch zwei durch eine schwach supraleitende Verbindung verbundene Supraleiter fließende Strom

R_n Normalleitungswiderstand

I_c experimenteller kritischer Strom durch einen Josephson-Kontakt

I_{ci} intrinsischer kritischer Strom, bestimmt nach der vorliegenden Norm

$u_{A,R}$ Messunsicherheit Typ A von R_n

$u_{A,I}$ Messunsicherheit Typ A von I_{ci}

$u_{B,R}$ Messunsicherheit Typ B von R_n

$u_{B,I}$ Messunsicherheit Typ B von I_{ci}

5 Prinzip der Messmethode

Die Werte von R_n und I_{ci} eines HTS-Josephson-Kontaktes werden bestimmt, indem zunächst mit Hilfe des Kriteriums des geometrischen Mittels aus dem gesamten Datensatz einer U-I-Kennlinie ein Ausschnitt ausgewählt und dann die Parameter des hyperbolischen Modells (oder RSJ-Modell, en: resistively-shunted junction) [3] für diesen ausgewählten Bereich mittels Regressionsanalyse ermittelt werden. Dieses Verfahren wird als kombinierte Methode bezeichnet. Die Methode des geometrischen Mittels und die Methode der hyperbolischen Regressionsanalyse werden in Abschnitt 7 „Bestimmung von R_n und I_{ci}“ beschrieben.

Bei *U-I*-Kennlinien werden zwei Arten von Abweichungen von der Idealform häufig beobachtet: Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekte. Wenn die Eigenerwärmung sowie die durch die Supraleitung hervorgerufenen nichtlinearen Effekte vernachlässigbar sind, entspricht der R_n-Wert des Kontaktes dem Wert U/I bei einem Strom, der viel größer als der kritische Strom des Kontaktes ist. Wenn die Rauschverrundung vernachlässigbar ist, ist der Wert von I_{ci} gleich dem maximalen widerstandsfreien Strom durch den Kontakt. Da ein hoher Messstrom aber den Kontakt zerstören kann, kann es sein, dass für die Bestimmung von R_n ein Ausschnitt der *U-I*-Kennlinie mit kleinerem Messstrom herangezogen werden muss. In diesem Fall ist es zweckmäßig, die Werte für R_n und I_{ci} mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate als Parameter einer hyperbolischen Funktion zu bestimmen, die die Messwerte beschreibt. Selbst wenn beide Arten von Abweichungen auftreten, kann die Kombination der Methode des geometrischen Mittels mit der Methode der hyperbolischen Regressionsanalyse zuverlässige Werte für R_n und I_{ci} liefern.

6 Messaufbau

6.1 Allgemeines

Der für diese Messung erforderliche Messaufbau besteht aus einem Tieftemperatursystem und einem elektrischen Messsystem.

6.2 Tieftemperatursystem

Um die Kontakte zu kühlen, muss ein offener Kryostat mit flüssigem Stickstoff verwendet werden. Der Kryostat muss einen offenen Aufbau haben, so dass der Druck des Flüssigkeitsbades gleich dem umgebenden Luftdruck ist. Der Luftdruck beträgt zwischen 950 hPa und 1050 hPa, was einer Temperatur von 76,8 K bis 77,7 K entspricht.

Der Wert des Luftdrucks muss protokolliert werden, entweder mit Werten von einer Wetterstation in der Nähe des Messstandortes oder lokal gemessen. Der Kryostat sollte über eine magnetische Abschirmung mit einem Schirmfaktor von mehr als 100 (–40 dB) sowie über eine HF-Abschirmung mit dem Faktor 1000 (–60 dB) bei 100 kHz verfügen. Der Zeitraum für die Abkühlung der Probe, die den Kontakt enthält, des Probenhalters und der Messplattform von Raumtemperatur bis auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffs muss mindestens 3 Minuten betragen.

AVA Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Es ist bekannt, dass I_c durch das „Einfangen“ von magnetischem Fluss (en: flux trapping) während des Abkühlprozesses beim Übergang vom normalleitenden zum supraleitenden Zustand beeinflusst werden kann. Deshalb müssen der Abkühlvorgang von einer Temperatur oberhalb der kritischen Temperatur T_c zur Temperatur des flüssigen Stickstoffbades, sowie die darauffolgende Bestimmung von R_n und I_{ci}, mindestens 10-mal wiederholt werden. Ergebnis der Messung ist das aus dem *U-I*-Datensätzen bestimmten Wertepaar R_n und I_{ci} mit dem höchsten Wert für I_{ci}.

6.3 Elektrisches Messsystem

Ein Messsystem für *U-I*-Kennliniendaten sollte bestehen aus: einem Signalgenerator, einem Datenerfassungssystem, Differenzverstärkern und anderen notwendigen Geräten wie z. B. Filtern. Zur Messung von Spannung und Strom muss die Vierpunktmessung verwendet werden. Die digitalen Werte von Spannung und Strom müssen im Datenerfassungssystem mit Hilfe eines Analog-Digital-Umsetzers (en: analog-to-digital converter, ADC) mit einer Auflösung von mehr als 8 Bit gespeichert werden. Die *U-I*-Daten werden zur Bestimmung von R_n und I_{ci} zu einem Computer übertragen. Auch andere gleichwertige Messsysteme dürfen verwendet werden.

Bei Verwendung eines Funktionsgenerators wird ein Strom mit konstanter Anstiegsgeschwindigkeit durch den Kontakt geschickt und der zugehörige Spannungsabfall wird gemessen. Während die Spannung aufgezeichnet wird, muss der Strom linear von einem negativen Wert zu einem positiven Wert verlaufen, oder umgekehrt. Die Zeit für die Anstiegsrampe von $-I_m$ bis $+I_m$ muss mehr als 10 ms betragen, wobei I_m den Maximalstrom bezeichnet. Eine Zeitablenkungsfrequenz (f_s) von weniger als 50 Hz gewährleistet eine Quasi-Gleichstrom-Messung, bei der die Einflüsse von Streukapazität und Kontaktkapazität vernachlässigbar sind. Die Abtastrate pro Sekunde muss größer als $100 \times f_s$ sein, um ausreichend Datenpunkte zur Bestimmung von R_n und I_{ci} zur Verfügung zu haben. Um eine Massetrennung zwischen Kryostat und Datenerfassungssystem zu gewährleisten, sollten Differenzverstärker verwendet werden. Der Eingangswiderstand der Differenzverstärker sollte größer als 100 kΩ sein. Der Eingangswiderstand des Datenerfassungssystems sollte auf einen hohen Wert eingestellt werden, z. B. 1 MΩ. Es sollten Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von weniger als ca. 1 MHz verwendet werden. Um eine Beschädigung des Kontaktes zu vermeiden, sollte ein Maximalstrom von $I_m = 5 \times I_{ci}$ nicht überschritten werden.

6.4 Messschaltung

Ein Beispiel des Ersatzschaltbildes für die Messung der *U-I*-Kennlinie ist in Bild 1 dargestellt. Der Josephson-Kontakt, dargestellt durch Symbol IEC 60617 S01926, und die ihn umgebende Verdrahtung sind supraleitend. Die Übergänge Normalleiter-Supraleiter, dargestellt durch Symbol IEC 60617 S01925, verdeutlichen den Unterschied zwischen supraleitendem und normalleitendem Teil der Schaltung. Funktionsgenerator, Nebenschlusswiderstand und Datenerfassungssystem können bei Raumtemperatur betrieben werden. Funktionsgenerator und Digitaloszilloskop können durch gleichwertige Geräte ersetzt werden.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

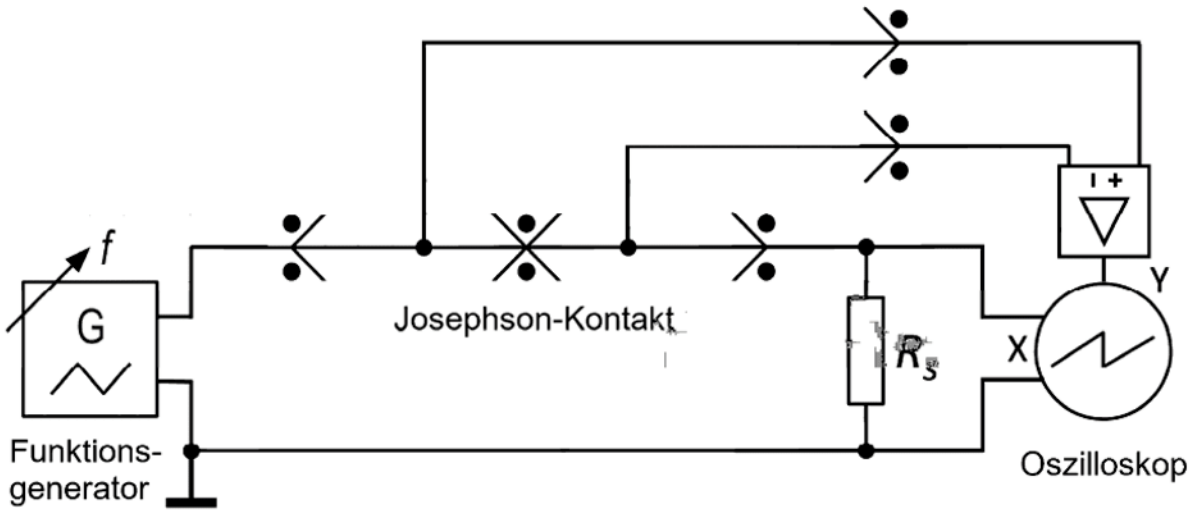


Bild 1 – Typische Messschaltung für die Messung von Strom-Spannungs-(*U-I*)-Kennlinien

Das Datenerfassungssystem zeichnet die Spannung (U_y) zwischen den zwei Elektroden des Josephson-Kontaktes und die Spannung (U_x) über dem Nebenschlusswiderstand R_s auf. Die Stromwerte sollten durch Division der U_x-Werte durch R_s ermittelt werden. R_s sollte mehr als 1000mal kleiner sein als der Eingangswiderstand des Oszilloskops bzw. des Differenzverstärkers. Die Fertigungstoleranz des Nebenschlusswiderstand sollte besser als ±0,05% sein. Wenn das Oszilloskop auf X-Y-Betrieb eingestellt ist, können die *U-I*-Kennlinien unmittelbar auf dem Bildschirm betrachtet werden, um das Ausmaß von Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten zu überprüfen. *U-I*-Kennliniendaten mit starkem Einfluss von Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten können nicht für die Bestimmung von R_n und I_{ci} verwendet werden. In diesem Fall müssen der Aufbau der Kontakte oder die Messeinrichtung verbessert werden.

7 Bestimmung von Normalleitungswiderstand (R_n) und intrinsischem kritischem Strom (I_{ci})

7.1 Berechnungsmethode

Die Werte von R_n und I_{ci} müssen durch Optimierung der Variablen R_n und I_{ci} in Formel (1) [3] derart bestimmt werden, dass diese einen Satz *U-I*-Kennliniendaten optimal beschreiben. Der dafür zu verwendende Ausschnitt der Kennliniendaten, wie in Bild 2 gezeigt, wird vorher nach dem weiter unten beschriebenen Kriterium des geometrischen Mittels ausgewählt.

$$U = R_n \sqrt{I^2 - I_{ci}^2} \text{ für } |I| > |I_{ci}|,\ U = 0 \text{ für } |I| < |I_{ci}| \quad (1)$$

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

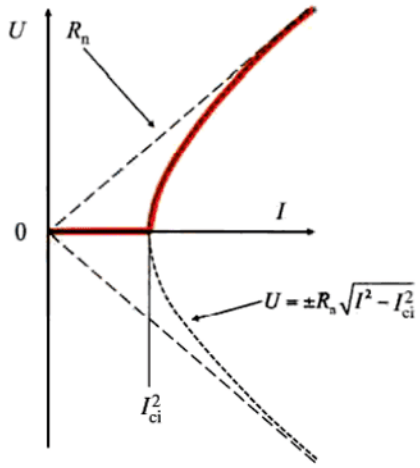


Bild 2 – *U-I*-Kennlinie (rote Linie) und hyperbolisches Modell (punktierte Linie)

Um den Einfluss der Rauschverrundung und der Eigenerwärmungseffekte zu vermeiden, muss der für die Regressionsanalyse verwendete Ausschnitt der Daten mit Hilfe der Methode des geometrischen Mittels bestimmt werden. Dabei müssen drei Kennlinien berücksichtigt werden: *dU/dI* als Funktion von I, *U/I* als Funktion von I sowie $(dU/dI)^{0,5}\cdot(U/I)^{0,5}$ als Funktion von I. Ein geeigneter Datensatz muss einen Bereich umfassen, in dem die Kurve des geometrischen Mittels $(dU/dI)^{0,5}\cdot(U/I)^{0,5}$ als Funktion von I ein Plateau mit höchstens 5 % Schwankung besitzt und *dU/dI* als Funktion von I monoton fällt. Das geometrische Mittel von R_n wird durch Formel (2) ausgedrückt.

$$R_n = \sqrt{dU/dI \cdot U/I} \tag{2}$$

dabei ist

$$dU/dI = IR_n \Big/ \sqrt{I^2 - I_{ci}^2} \quad \text{und} \tag{3}$$

$$U/I = R_n/I \cdot \sqrt{I^2 - I_{ci}^2}\,, \tag{4}$$

und somit

$$dU/dI \cdot U/I = R_n^2 \tag{5}$$

Die Werte für *dU/dI* und *U/I* können aus gemessenen *U-I*-Daten berechnet werden. Durch die Auswahl eines für die Regressionsanalyse geeigneten Datensatzes aus der gesamten *U-I*-Kennlinie wird der Einfluss von Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten minimiert. Die Methode der nichtlinearen Regressionsanalyse unter Annahme einer hyperbolischen Funktion muss auf einen Datensatz angewandt werden, der vorher mit der Methode des geometrischen Mittels ausgewählt wurde. Das Konvergenzkriterium der Regressionsanalyse sollte sein, dass die Parameter R_n und I_{ci} sich an der Zifferposition, die der am weitesten rechten Ziffer der Werte der Messunsicherheit bzw. Standardabweichung mit zwei signifikanten Stellen entspricht, nicht mehr ändern (siehe Tabelle A.1 und B.1). Für praktische Berechnungen zur Bestimmung von R_n und I_{ci} sowie der zugehörigen Messunsicherheit dieser Ausgabewerte können Softwarepakete verwendet werden, die über die Funktion der nichtlinearen Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Quadrate verfügen. Die Auswahl des Softwarepakets hat auf die Ergebnisse der Berechnung keinen nennenswerten Einfluss. Eine Programmdatei zur Bestimmung von R_n, I_{ci} und der Messunsicherheit kann auf Anfrage von der verantwortlichen Arbeitsgruppe bezogen werden. Konkrete Beispiele für die Bestimmung finden sich in Anhang A.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

7.2 Kriterium des geometrischen Mittels für die Anwendung der hyperbolischen Regressionsanalyse

Der für die hyperbolische Regressionsanalyse geeignete Ausschnitt aus den Kennliniendaten muss den Bereich umfassen, in dem die Kurve des geometrischen Mittels $(dU/dI)^{0,5}\cdot(U/I)^{0,5}$ als Funktion von I ein Plateau mit höchstens 5 % Schwankung besitzt und dU/dI monoton fällt.

8 Messunsicherheit

Messunsicherheit Typ A bezeichnet die Ermittlung einer Komponente der Messunsicherheit durch statistische Analyse. Sie wird aus den Standardabweichungen von R_n und I_{ci} abgeschätzt, die als Ergebnis der Regressionsanalyse der durch die Methode des geometrischen Mittels ausgewählten U-I-Kennliniendaten mittels Formel (1) anfallen [4] [5]. Die Abschätzung der Messunsicherheit Typ A wird in dieser Norm anhand der typischen U-I-Kennlinie von JL350 in Anhang A demonstriert. Messunsicherheiten Typ B, die die Ermittlung der Messunsicherheit ohne statistische Analyse darstellen, umfassen die Messunsicherheit aufgrund von Temperaturschwankungen sowie der Messung von Spannung und Strom [4] [5].

8.1 Messunsicherheit Typ A

Auf Basis der nichtlinearen Regressionsanalyse des mittels der Methode des geometrischen Mittels ausgewählten Datensatzes nach der Methode der kleinsten Quadrate [4] [5] unter Zugrundelegung einer hyperbolischen Funktion werden die Ergebnisgrößen R_n und I_{ci} sowie ihre Standardabweichungen $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ durch Minimierung der Summe

$$J=\sum_{j=1}^{m}\left[U_j-\left(R_n\sqrt{I_j^2-I_{ci}^2}\right)\right]^2, \tag{6}$$

Ermittelt, wobei I_j und U_j (j = 1, …, m) die mit der Methode des geometrischen Mittels ausgewählten Kennliniendaten darstellen.

Zur Abschätzung der Messunsicherheit wird folgende Sensitivitätsmatrix **X** verwendet

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix}\left(\frac{\partial U}{\partial R_n}\right)_{j=1} & \left(\frac{\partial U}{\partial I_0}\right)_{j=1}\\ \vdots & \vdots\\ \left(\frac{\partial U}{\partial R_n}\right)_{j=m} & \left(\frac{\partial U}{\partial I_0}\right)_{j=m}\end{bmatrix}, \tag{7}$$

dabei ist

$$\frac{\partial U}{\partial R_n}=\sqrt{I_j^2-I_{ci}^2}\ \text{ und} \tag{8}$$

$$\frac{\partial U}{\partial I_{ci}}=\frac{R_n I_{ci}}{\sqrt{I_j^2-I_{ci}^2}} \tag{9}$$

Somit ergibt sich die Unsicherheitsmatrix der Parameter wie folgt:

$$\mathbf{U}=(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{X})^{-1}\cdot\hat{\sigma}^2=\begin{bmatrix}u^2(R_n) & u(R_n,I_{ci})\\ u(R_n,I_{ci}) & u^2(I_{ci})\end{bmatrix}, \tag{10}$$

dabei ist

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{J}{m-1} \tag{11}$$

Für eine typische Abschätzung der Messunsicherheit Typ A werden von den HTS-Kontakten in Anhang A die *U-I*-Kennliniendaten mit den größten relativen Fehlern ausgewählt. Die Daten des Kontaktes TUT in Tabelle 1 werden dabei nicht berücksichtigt, da der sinusförmige Zeitverlauf des Stromes nicht der vorliegenden Norm entspricht. Die größten relativen Fehler sind damit 0,029 % für R_n und 0,33 % für I_{ci} für Kontakt JL350 sowie die zugehörigen Standardabweichungen 0,0038 Ω und 0,21 µA in Tabelle 1.

Tabelle 1 – Typische relative Fehler der Messunsicherheit Typ A für HTS-Josephson-Kontakte

Kontakt	Ergebnisse nach kombinierter Methode					
	R_n [Ω]	$u_{A,R}$ [Ω]	Relativer Fehler %	I_{ci} [µA]	$u_{A,I}$ [µA]	Relativer Fehler %
JL350 (YBCO-Stufenkontakt)	**12,934 0**	**0,003 8**	**0,029**	**63,33**	**0,21**	**0,33**
JL351 (YBCO-Stufenkontakt)	9,304 2	0,001 8	0,019	32,651	0,045	0,14
TUT (YBCO-Stufenkontakt)	0,810 0	0,005 0	0,62	0,358 2	0,003 5	0,98

8.2 Messunsicherheit Typ B

Die Messunsicherheit Typ B der Messung von R_n und I_{ci} in dieser Norm berechnet sich wie folgt:

$$u_{B,R}^2 = \left(\frac{\partial R_n}{\partial T}\right)^2 \cdot u_T^2 + \left(\frac{\partial R_n}{\partial U}\right)^2 \cdot u_u^2 + \left(\frac{\partial R_n}{\partial I}\right)^2 \cdot u_I^2 \text{ und} \tag{12}$$

$$u_{B,I}^2 = \left(\frac{\partial I_0}{\partial T}\right)^2 \cdot u_T^2 + \left(\frac{\partial I_0}{\partial U}\right)^2 \cdot u_u^2 + \left(\frac{\partial I_0}{\partial I}\right)^2 \cdot u_I^2 \tag{13}$$

Dabei bezeichnen $\partial R_n/\partial T$, $\partial R_n/\partial U$ und $\partial R_n/\partial U$ die Empfindlichkeit von R_n gegenüber Änderungen der Temperatur T, der Spannung U bzw. des Stromes I. u_T, u_U und u_I sind die Standardabweichungen bei der Messung von Temperatur, Spannung bzw. Strom. Die sich auf I_{ci} beziehenden Symbole folgen dem gleichen Schema. Die Sensitivitätskoeffizienten werden aus einer *U-I*-Kennlinie gewonnen, wie weiter unten beschrieben.

8.2.1 Temperatur

Die Messung der *U-I*-Kennlinien muss in flüssigem Stickstoff erfolgen. Aufgrund der Schwankung des umgebenden Luftdrucks werden Temperaturschwankungen zwischen 76,8 K und 77,7 K erwartet. Die Werte für $\partial R_n/\partial T$ und $\partial I_{ci}/\partial T$ wurden durch Messung von R_n und I_{ci} bei Minimal- und Maximaltemperatur und Berechnung von [R_n(77,7 K) - R_n(76,8 K)] / 0,9 abgeschätzt, analog für I_{ci}. Damit ergeben sich Temperatur-Sensitivitätskoeffizienten von $\partial R_n/\partial T$ = 0,000 1 Ω/K und $\partial I_{ci}/\partial T$ = – 0,01 µA/K (diese Werte müssen für den CDV noch präzisiert werden).

u_T wurde abgeschätzt als Standardabweichung (77,7 K – 76,8 K) / √3 = 0,520 K, wobei sich eine gleichförmige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für T ergibt.

8.2.2 Messung der Spannung

Bei der Spannungsmessung mit dem Datenerfassungssystem muss das Signal mit einer relativen Messunsicherheit von 0,3 % gemessen werden. Dies ist ein typischer Wert für Systeme mit Verstärker, Analog-Digital-Umsetzer mit einer Auflösung von 8 Bit und anderen notwendigen Schaltungskomponenten.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Die Werte für $\partial R_n/\partial U$ und $\partial I_{ci}/\partial U$ werden abgeschätzt, indem die kombinierte Methode aus geometrischem Mittel und Regressionsanalyse für eine *U-I*-Kennlinie durchgeführt wird, zu deren Spannungswerten 1 µV addiert wurde. Auf diese Weise wurden typische Sensitivitätskoeffizienten $\Delta R_n/\Delta U$ und $\Delta I_{ci}/\Delta U$ aus den *U-I*-Kennliniendaten von JL350 in Anhang A berechnet.

Der ursprüngliche Normalleitungswiderstand beträgt 12,934 0 Ω, mit 1 µV Verschiebung ergeben sich 12,936 4 Ω. Daraus ergibt sich eine Empfindlichkeit von $\Delta R_n/\Delta U$ = 0,002 4 Ω/µV.

Der ursprüngliche intrinsische kritische Strom I_{ci} beträgt 63,33 µA, mit 1 µV Verschiebung ergeben sich 63,21 µA. Daraus ergibt sich eine Empfindlichkeit von $\Delta I_{ci}\ \Delta U$ = −0,12 µA/µV.

u_U wird abgeschätzt unter Berücksichtigung eines Messbereiches von 10 mV für den A-D-Umsetzer, woraus eine Standardabweichung von 30 µV resultiert.

8.2.3 Messung des Stromes

Für die Strommessung mit dem Datenerfassungssystem sollte die Spannung über dem Nebenschlusswiderstand mit einem A-D-Umsetzer mit einer relativen Messunsicherheit von nicht mehr als 0,3 % gemessen werden.

Die Werte für $\partial R_n/\partial I$ und $\partial I_{ci}/\partial I$ werden abgeschätzt, indem die kombinierte Methode aus geometrischem Mittel und Regressionsanalyse für eine *U-I*-Kennlinie durchgeführt wird, zu deren Stromwerten 1 µA addiert wurde. Auf diese Weise wurden typische Sensitivitätskoeffizienten $\Delta R_n/\Delta I$ and $\Delta I_{ci}/\Delta I$ aus den *U-I*-Kennliniendaten von JL350 in Anhang A berechnet.

Der ursprüngliche Normalleitungswiderstand beträgt 12,934 0 Ω, mit 1 µA Verschiebung ergeben sich 12,905 0 Ω. Daraus ergibt sich eine Empfindlichkeit von $\Delta R_n/\Delta I$ = − 0,029 Ω/µA.

Der ursprüngliche intrinsische kritische Strom I_{ci} beträgt 63,33 µA, mit 1 µA Verschiebung ergeben sich 65,14 µA. Daraus ergibt sich eine Empfindlichkeit von $\Delta I_{ci}/\Delta I$ = 1,81 µA/µA.

u_I wird abgeschätzt unter Berücksichtigung eines Messbereiches von 10 mV für den A-D-Umsetzer, geteilt durch den Nebenschlusswiderstand R_s. Die Standardabweichung des A-D-Umsetzers beträgt 30 µV. Der Wert für R_s wird mit 100 Ω mit einer Toleranz kleiner ± 0,05% angenommen. Daraus ergibt sich eine Standardabweichung von 100 Ω × 0,000 5 / √3 = 0,029 Ω und eine gleichförmige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.

Die Varianz von U / R_s ist am größten beim Maximalwert von 10 000 µV für den A-D-Umsetzer: (30 µV / 100 Ω)^2 + (10 000 µV / 100 Ω^2 2 0,029 Ω)^2 = 0,0908 µA^2. Diese maximale Standardabweichung von 0,30 µA wird in der folgenden Abschätzung verwendet.

8.3 Messunsicherheitsbudget

Eine typische Abschätzung der Messunsicherheit nach dieser Norm ist zusammengefasst dargestellt in Tabelle 2 und Tabelle 3. Die Werte der Gesamtmessunsicherheit $u_{total,R}$ wurden entsprechend des Fehlerfortpflanzungsgesetzes als Summe der Messunsicherheit Typ A $u_{A,R}$ und der Messunsicherheit Typ B $u_{B,R}$ berechnet.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Tabelle 2 – Tabelle des Messunsicherheitsbudgets für R_n

Einflussgröße	Parameter-symbol	Symbol und Typ der Standard-abweichung	Sensitivitäts-koeffizient	Standard-abweichung des Parameters	Beitrag zu $u_{total,R}$
U-I-Messung	–	$u_{A,R}$, A	–	–	0,003 8 Ω
Temperatur	T	u_T, B	0,000 1 Ω/K	0,520 K	0,000 052 Ω
Spannung	U	u_U, B	0,002 4 Ω/µV	30 µV	0,072 Ω
Strom	I	u_I, B	- 0,029 Ω/µA	0,30 µA	0,008 7 Ω
Gesamtmessunsicherheit		$u_{total,R}$			0,073 Ω
Relativer Fehler					0,56 %
Erweiterte Messunsicherheit (k = 2)					R_n = 12,93 ± 0,15 Ω

Die Werte der Gesamtmessunsicherheit $u_{total,I}$ wurden nach des Fehlerfortpflanzungsgesetzes als Summe der Messunsicherheit Typ A $u_{A,I}$ und der Messunsicherheit Typ B $u_{B,I}$ berechnet.

Tabelle 3 – Tabelle des Messunsicherheitsbudgets für I_{ci}

Einflussgröße	Parameter-symbol	Symbol und Typ der Standard-abweichung	Sensitivitäts-koeffizient	Standard-abweichung des Parameters	Beitrag zu $u_{total,I}$
U-I-Messung	–	$u_{A,I}$, A	–	–	0,21 µA
Temperatur	T	u_T, B	- 0,01 µA/K	0,52 K	0,005 2 µA
Spannung	U	u_U, B	- 0,12 µA/µV	30 µV	3,6 µA
Strom	I	u_I, B	1,81 µA/µA	0,30 µA	0,54 µA
Gesamtmessunsicherheit		$u_{total,I}$			3,6 µA
Relativer Fehler					5,7 %
Erweiterte Messunsicherheit (k = 2)					I_{ci} = 63,3 ± 7,2 µA

8.4 Anforderungen an die Messunsicherheit

Wie die Darstellung der typischen Messunsicherheit in Tabelle 2 und 3 zeigt, werden die Beiträge zur Gesamtmessunsicherheit $u_{total,R}$ und $u_{total,I}$ in der vorliegenden Norm von der Spannungsmessung dominiert. Um die Werte der Messunsicherheit in Tabelle 2 und 3 nicht zu überschreiten, sollten die Werte für $u_{A,R}$ und $u_{A,I}$, die die Werte der Standardabweichung aus der Regressionsanalyse darstellen, kleiner als 2 × $u_{A,R}$ bzw. 2 × $u_{A,I}$ sein. Die entsprechenden relativen Fehler von $u_{A,R}$ / R_n und $u_{A,I}$ / I_{ci} müssen kleiner als 0,06 % bzw. 0,7 % sein. Wenn entweder $u_{A,R}$ / R_n oder $u_{A,I}$ / I_{ci} diese geforderten Werte überschreiten, ist eine Verbesserung der Messanordnung erforderlich.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

9 Prüfbericht

9.1 Kennzeichnung der zu prüfenden Bauelemente

Die zu prüfenden Bauelemente müssen folgendermaßen gekennzeichnet werden:

– Name des Herstellers,
– Seriennummer oder gleichwertige Kennzeichnung,
– Art des Josephson-Kontaktes.

9.2 R_n Wert

Wert für R_n bestimmt nach dieser Norm.

9.3 I_{ci} Wert

Wert für I_{ci} bestimmt nach dieser Norm.

9.4 Messunsicherheit

Messunsicherheit Typ A als relative Fehler: $u_{A,R} / R_n$ und $u_{A,I} / I_{ci}$

9.5 Luftdruck

Wert des Luftdrucks, ermittelt von der nächsten Wetterstation oder durch lokale Messung.

9.6 Wahlweise Angabe sonstiger Daten

Folgende Daten können wahlweise in den Prüfbericht aufgenommen werden:

– R_n-Wert als Ergebnis der Methode des geometrischen Mittels,
– R_n-Werte aller Messdurchläufe,
– I_{ci}-Werte aller Messdurchläufe,
– Rohdaten der *U-I*-Kennlinienmessung,
– Temperatur, berechnet aus dem Wert des Luftdrucks,
– Temperatur, mit einem Sensor gemessen,
– Aufbau des Kryostats, magnetische Abschirmung und HF-Abschirmung,
– Aufbau des elektrischen Messsystems,
– chemische Zusammensetzung der dünnen Schicht und Substratmaterial.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

Anhang A
(informativ)

Berechnungsmethode und praktische Anwendung für HTS-Josephson-Kontakte

A.1 Allgemeines

Dieser Anhang liefert informative Hinweise zur Berechnung von R_n, I_{ci} sowie der Messunsicherheit Typ A. Die Kombination der Methode des geometrischen Mittels mit der hyperbolischen Regressionsanalyse wird sowohl auf simulierte *U-I*-Kennlinien als auch auf experimentelle *U-I*-Kennlinien von HTS-Josephson-Kontakten angewendet. Die ordnungsgemäße Bestimmung von R_n und I_{ci} ist auch bei nicht vernachlässigbarem Auftreten der Rauschverrundung und von Eigenerwärmungseffekten möglich.

A.2 Hyperbolische Regressionsanalyse

U-I-Kennlinien von HTS-Josephson-Kontakten können mit der hyperbolischen Funktion von Formel (1) beschrieben werden [3]. Bild A1 zeigt eine ideale U-I-Kennlinie eines Kontakts mit $R_n = 10\ \Omega$ und $I_{ci} = I_c = 30\ \mu A$, deren Daten U_j und I_j durch Simulation erzeugt wurden. U_j und I_j bezeichnen dabei jeweils den Datenwert mit der laufenden Nummer j von *U* und *I*. Die Werte für R_n und I_{ci} und die zugehörigen Werte der Messunsicherheit Typ A (Standardabweichung) $u_{A,R}$ und $u_{A,I}$ werden durch Optimierung der Parameter R_n und I_{ci} mit dem Kriterium der Minimierung der Quadrate der Differenz zwischen Messdaten und Formel (1) bestimmt. Dieses Verfahren der nichtlinearen Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Quadrate kann mit Hilfe kommerzieller Softwarepakete durchgeführt werden.

In der Realität werden vielfältige Abweichungen von der hyperbolischen Kurve beobachtet. Zwei wichtige Ursachen dieser Abweichungen sind Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekte. Bild A.2 zeigt eine simulierte *U-I*-Kennlinie mit Rauschverrundung bei Strömen kleiner 30 µA und einer Abweichung durch Eigenerwärmung bei Strömen größer 150 µA. Die hyperbolische Regressionsanalyse der gesamten Kennlinie liefert unzuverlässige Ergebnisse. Eine praktische Lösung für dieses Problem ist die Auswahl eines Kennlinienausschnittes, der nicht von den zwei Effekten betroffen ist. Die im nächsten Abschnitt beschrieben Methode des geometrischen Mittels liefert ein gutes Kriterium für die Auswahl dieses Ausschnittes.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

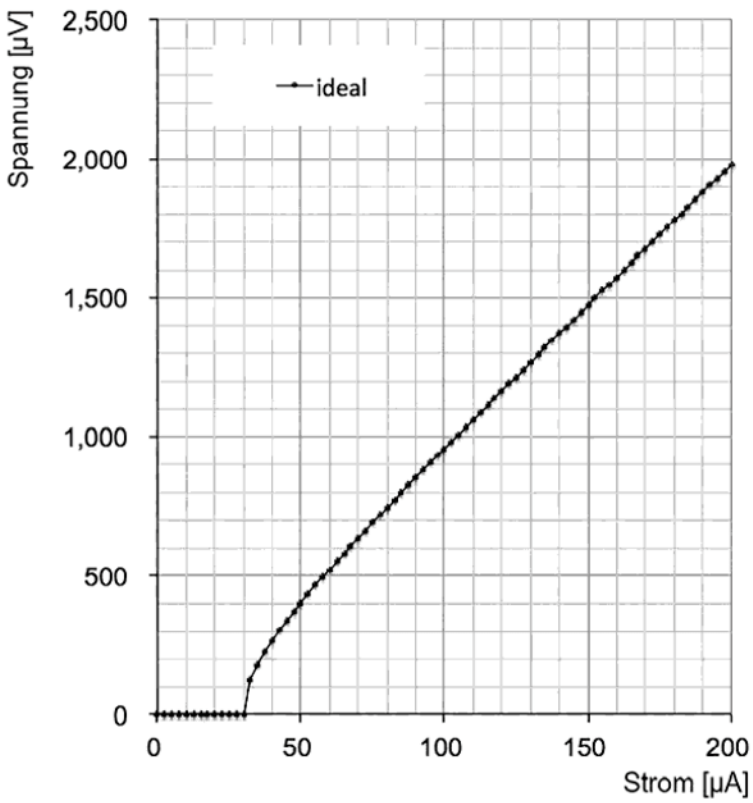


Bild A.1 – *U-I*-Kennlinie berechnet mit dem RSJ-Modell (en. resistively shunted junction)

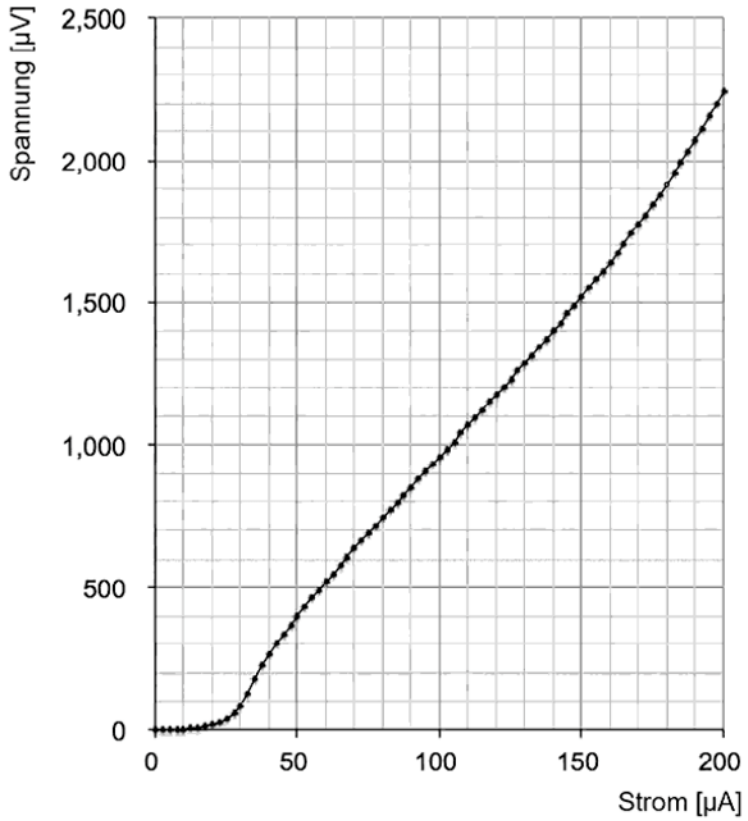


Bild A.2 – *U-I*-Kennlinie mit Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

A.3 Methode des geometrischen Mittels

Die Methode des geometrischen Mittels ist eine Näherung zur Berechnung von R_n. Dabei wird aus gemessenen *U-I*-Kennliniendaten das geometrische Mittel aus der Ableitung der Spannung nach dem Strom *dU/dI* und dem Strom-Spannungs-Verhältnis *U/I* mit Hilfe der Formeln (2-5) bestimmt. Zur Berechnung von *dU/dI* und U/I werden $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ und U_j/I_j inkrementell berechnet. R_n wird nach der Formel $[(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)]^{0,5} \cdot (U_j / I_j)^{0,5}$ berechnet.

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass der Wert von R_n direkt ohne Anwendung der Regressionsanalyse bestimmt werden kann. Der Nachteil ist, dass der Wert von $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ aufgrund der numerischen Ableitung bisweilen heftig schwankt, wie man in Bild A.12 sehen kann. I_{ci} kann mit dieser Methode nicht bestimmt werden.

A.4 Kombinierte Methode

Die Methode des geometrischen Mittels wurde auf die *U-I*-Kennlinie in Bild A.1 angewendet. Das Ergebnis ist in Bild A.3 dargestellt. Die Werte des geometrischen Mittels springen bei einem Strom von 30 µA abrupt von 0 auf 10, wo sie oberhalb 30 µA ein Plateau bilden. Dieses perfekte Plateau ist typisch für ideale *U-I*-Kennlinien. Die Werte von dU/dI sind monoton fallend, was ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Kennlinienausschnittes für die Regressionsanalyse darstellt. Der Widerstand der Plateauregion beträgt 30 Ω, was mit dem Wert für R_n in Bild A.1 übereinstimmt. Damit wird bestätigt, dass die Methode des geometrischen Mittels zur Bestimmung von R_n geeignet ist.

Die Methode des geometrischen Mittels wurde auch auf die *U-I*-Kennlinie in Bild A.2 angewandt, die Rauschverrundung and Eigenerwärmungseffekte aufweist. In Bild A.4 steigt das geometrische Mittel langsam ohne einen scharfen Sprung an, bis der Strom 50 µA erreicht. *dU/dI* ist im Bereich von 34 µA bis 100 µA fallend und steigt oberhalb 100 µA an. Da es hier kein perfektes Plateau gibt, und das geometrische Mittel mit dem Strom langsam ansteigt, ist die Bestimmung von R_n schwierig.

Dieses Verhalten ist typisch für *U-I*-Kennlinien mit Abweichungen infolge Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten. Allerdings weist das geometrische Mittel im Bereich zwischen 50 µA und 100 µA ein quasi-Plateau mit einer Abweichung von 5 % auf und *dU/dI* fällt mit steigendem Strom. Damit ist das in Abschnitt „7.2 Kriterium des geometrischen Mittels für die Anwendung der hyperbolischen Regressionsanalyse“ formulierte Kriterium für Auswahl eines Kennlinienausschnittes für die hyperbolische Regressionsanalyse erfüllt. Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekte sind in diesem Bereich nicht von Bedeutung. Die hyperbolische Regressionsanalyse sollte mit Hilfe geeigneter Software durchgeführt werden. Es konnte bestätigt werden, dass alle getestete Software für die in den folgenden Abschnitten gezeigten experimentellen *U-I*-Kennlinien gleiche Resultate für R_n, I_{ci}, $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ lieferten.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09

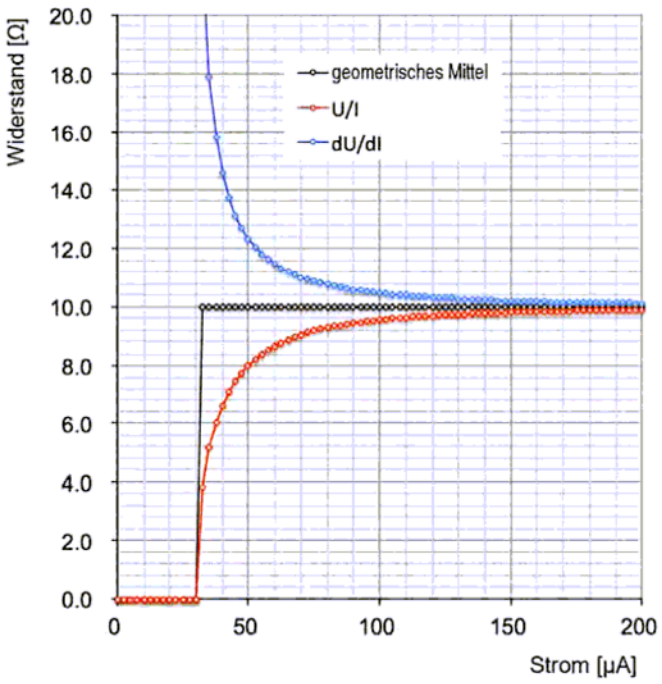


Bild A.3 – Anwendung der Methode des geometrischen Mittels auf die ideale *U-I*-Kennlinie in Bild A.1

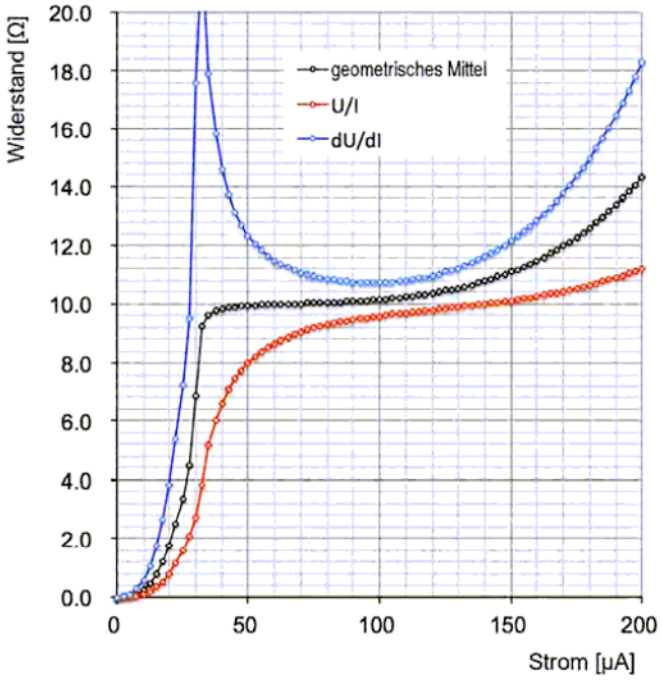


Bild A.4 – Anwendung der Methode des geometrischen Mittels auf die *U-I*-Kennlinie mit Rauschverrundung und Eigenerwärmungseffekten in Bild A.2

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-22-2:2020-09