DIN EN IEC 61788-17 (VDE 0390-17)

DIN

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.

VDE

ICS 29.050

Einsprüche bis 2019-11-27

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 61788-17
(VDE 0390-17):2013-11

Entwurf

Supraleitfähigkeit – Teil 17: Messungen der elektronischen Charakteristik – Lokale kritische Stromdichte und deren Verteilung in großflächigen supraleitenden Schichten (IEC 90/433/CD:2019); Text Deutsch und Englisch

Superconductivity –
Part 17: Electronic characteristic measurements –
Local critical current density and its distribution in large-area superconducting films
(IEC 90/433/CD:2019);
Text in German and English

Supraconductivité –
Partie 17: Mesures de caractéristiques électroniques –
Densité de courant critique local et sa distribution dans les films supraconducteurs de grande surface
(IEC 90/433/CD:2019);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-09-27 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 89 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ... .

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/433/CD:2019 „Superconductivity – Part 17: Electronic characteristic measurements – Local critical current density and its distribution in large-area superconducting films“ (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 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 61788-17:2019-10

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61788-17 (VDE 0390-17):2013-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

a) Die Beschreibung von Bild 3 im Text wurde aktualisiert und erweitert;

b) Die Beschreibung des Verfahrens zur Berechnung des theoretischen Spulen-Koeffizienten k wurde präzisiert und erweitert;

c) Ein neues Bild zur Illustration der Probenspule und ihrer Magnetfelderzeugung wurde hinzugefügt;

d) Eine Tabelle zu Spezifikationen und theoretischen Spulen-Koeffizienten k von typischen Probespulen wurde hinzugefügt;

e) Ein Beispiel für die normierten dritten harmonischen Spannungen (U_3/fI_0), gemessen bei verschiedenen Frequenzen, wurde hinzugefügt.

f) Die deutsche Fassung wurde in Abschnitt 3 an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Inhalt

Seite

Einleitung ... 7
1 Anwendungsbereich ... 9
2 Normative Verweisungen ... 9
3 Begriffe ... 9
4 Anforderungen ... 10
5 Geräte ... 10
5.1 Messausrüstung ... 10
5.2 Komponenten der induktiven Messungen ... 12
5.2.1 Spulen ... 12
5.2.2 Abstandsschicht ... 12
5.2.3 Mechanismus für den Aufbau der Spule ... 12
5.2.4 Kalibrierungs-Wafer ... 13
6 Messverfahren ... 14
6.1 Allgemein ... 14
6.2 Bestimmung des experimentellen Spulen-Koeffizienten ... 14
6.2.1 Berechnung des theoretischen Spulen-Koeffizienten k ... 14
6.2.2 Transportmessungen der Brücken auf dem Kalibrierungs-Wafer ... 16
6.2.3 U_3-Messungen des Kalibrierungs-Wafers ... 16
6.2.4 Berechnung der E-J-Charakteristik aus frequenzabhängigen I_{th}-Daten ... 16
6.2.5 Bestimmung von k' aus J_{ct}- und J_{c0}-Werten für ein passendes E ... 17
6.3 Messung von J_c in den Prüf-Schichten ... 18
6.4 Messung von J_c mit nur einer Frequenz ... 18
6.5 Beispiele der theoretischen und experimentellen Spulen-Koeffizienten ... 18
7 Messunsicherheit des Prüfverfahrens ... 19
7.1 Hauptquellen der systematischen Effekte, die die U_3-Messung beeinflussen ... 19
7.2 Wirkung der Abweichung vom vorgeschriebenen Wert im Spule-Schicht-Abstand ... 20
7.3 Messunsicherheit des experimentellen Spulen-Koeffizienten und des erhaltenen J_c ... 21
7.4 Wirkung des Schichtrandes ... 21
7.5 Probenschutz ... 22
8 Prüfbericht ... 22
8.1 Identifizierung der Probe ... 22
8.2 Bericht der J_c-Werte ... 22
8.3 Bericht der Prüfbedingungen ... 22
Annex A (informativ) Zusätzliche Informationen zu Abschnitt 1 bis Abschnitt 8 ... 23
A.1 Kommentare zu anderen Verfahren zur Messung des lokalen J_c von großflächigen HTS-Schichten ... 23
A.2 Anforderungen ... 23

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Seite

A.3 Theorie zur Erzeugung der dritten harmonischen Spannung 24
A.4 Berechnung des induzierten elektrischen Feldes 25
A.5 Theoretischer Spulen-Koeffizient k und experimenteller Spulen-Koeffizient k' 26
A.6 Skalierung der $U_3 - I_0$-Kurven und das Kriterium konstanter Induktivität zur Bestimmung von I_{th} 26
A.7 Auswirkung von reversibler Flussbewegung 28
Annex B (informativ) Optionale Messsysteme 29
B.1 Überblick 29
B.2 Harmonisches Rauschen aus der Stromquelle und dessen Unterdrückung 30
Annex C (informativ) Messunsicherheitsbetrachtungen 35
C.1 Überblick 35
C.2 Definitionen 35
C.3 Betrachtung des Konzeptes der Messunsicherheit 36
C.4 Beispiel für eine Bestimmung von Messunsicherheiten für TC-90-Normen 37
Annex D (informativ) Bewertung der Unsicherheit 39
D.1 Bewertung der Unsicherheit des experimentellen Spulen-Koeffizienten 39
D.2 Messunsicherheit in der Berechnung des induzierten elektrischen Feldes 40
D.3 Experimentelle Ergebnisse zu der Auswirkung der Abweichung des Spule-Schicht-Abstandes 41
D.4 Beispiele für die Typ-A-Unsicherheiten von J_c und n-Werte aus der experimentellen Unsicherheit der U_3-Messung 41
D.5 Bewertung der Unsicherheit der erhaltenen J_c 42
D.6 Experimentelle Ergebnisse, die die Auswirkung es Schichtrands zeigen 43
Literaturhinweise 45

Bilder

Bild 1 – Darstellung eines elektrischen Schaltkreises zur induktiven J_c-Messung von HTS-Schichten 11
Bild 2 – Illustration zur Darstellung von Techniken, die die Probenspule auf die HTS-Schichten drücken 13
Bild 3 – Beispiel eines Kalibrierungs-Wafers zur Bestimmung des Spulen-Koeffizienten 14
Bild 4 – Illustration zur Probenspule und zum Magnetfeld während der Messung 15
Bild 5 – Illustration zur Probenspule und ihre Magnetfelderzeugung 15
Bild 6 – E-J-Charakteristiken, bestimmt durch Transport-Messungen und induktive U_3-Methode 17
Bild 7 – Illustration der Spulen 1 und 3 in Tabelle 1 19
Bild 8 – Die Spulenfaktor-Funktion $F(r) = 2H_0/I_0$ berechnet für drei Spulen 19
Bild 9 – Abhängigkeit des theoretischen Spulen-Koeffizienten k vom Spule-Schicht-Abstand Z_1 21
Bild A.1 – Illustration der Probenspule und des Magnetfeldes während der Messung 25
Bild A.2 – (a) U_3 und (b) U_3/I_0 aufgetragen gegen I_0 in einer YBCO-Dünnschicht, gemessen in angelegten DC-Magnetfeldern, und die beobachtete Skalierung , wenn mit I_{th} normiert wird 27
Bild A.3 – Beispiel für die normierten dritten harmonischen Spannungen (U_3/fI_0), gemessen bei

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Seite
verschiedenen Frequenzen ... 27
Bild B.1 – Schematische Darstellung einer variablen RL-Kompensationsschaltung ... 30
Bild B.2 – Darstellung eines elektrischen Schaltkreises zur Verwendung des 2-Spulen-Verfahrens ... 30
Bild B.3 – Harmonisches Rauschen aus der Stromquelle ... 31
Bild B.4 – Rauschunterdrückung durch die Verwendung einer Kompensationsspule mit einer supraleitenden Schicht ... 32
Bild B.5 – Normiertes harmonisches Rauschen (U_3/fI_0) aus der Stromquelle ... 33
Bild B.6 – Normierte Rauschspannungen nach der Reduzierung durch die Verwendung einer Kompensationsspule mit einer supraleitenden Schicht ... 33
Bild B.7 – Normierte Rauschspannungen nach der Reduzierung durch die Verwendung einer Kompensationsspule ohne eine supraleitende Schicht ... 34
Bild B.8 – Normierte Rauschspannungen mit dem in Bild B.2 gezeigten 2-Spulen-System ... 34
Bild D.1 – Auswirkung der Spulenposition gegenüber einer supraleitenden Dünnschicht auf die gemessenen J_c-Werte ... 44

Tabellen

Tabelle 1 – Spezifikationen und theoretische Spulen-Koeffizienten k von typischen Probespulen ... 16
Tabelle 2 – Spezifikationen und Spulen-Koeffizienten von typischen Probespulen ... 19
Tabelle C.1 – Ausgangssignale von zwei nominell identischen Dehnungsmessgeräten ... 36
Tabelle C.2 – Mittelwerte von zwei Ausgangssignalen ... 36
Tabelle C.3 – Experimentelle Standardabweichungen von zwei Ausgangssignalen ... 36
Tabelle C.4 – Standardmessunsicherheiten von zwei Ausgangssignalen ... 37
Tabelle C.5 – Variationskoeffizienten von zwei Ausgangssignalen ... 37
Tabelle D.1 – Messunsicherheitsbudget für den experimentellen Spulen-Koeffizienten k' ... 40
Tabelle D.2 – Beispiele für wiederholte Messungen von J_c und n-Werten ... 42

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Einleitung

Mehr als zwanzig Jahre nach ihrer Entdeckung im Jahr 1986 finden die Hochtemperatur-Supraleiter (HTS – en: high temperature superconductor) jetzt ihren Weg in Produkte und Technologien, die die Übertragung von Informationen und den Transport von Energie revolutionieren werden. Unter diesen Produkten sind zu nennen die Hochtemperatur-supraleitenden HTS-Mikrowellenfilter, die den extrem niedrigen Oberflächenwiderstand von Supraleitern nutzen und bereits kommerzialisiert wurden. Sie haben zwei wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen, nicht-supraleitenden Filtern; zum ersten eine niedrige Einfügedämpfung (rauscharme Charakteristiken) und zum zweiten Hochfrequenz-Selektivität (hohe Flankensteilheit) [1][1]. Diese Vorteile ermöglichen eine reduzierte Anzahl von Basisstationen, verbesserte Sprachqualität, effizientere Nutzung von Frequenzbandbreiten und vermindern das unerwünschte Hochfrequenz-Rauschen.

Großflächige supraleitende Dünnschichten wurden für den Einsatz in Mikrowellengeräten entwickelt [2]. Sie werden auch für neuartige supraleitende Leistungsgeräte verwendet, wie resistive supraleitende Strombegrenzer (SFCLs – en: resistive-type superconducting fault-current limiters) [3] bis [5], supraleitende Fehler-Detektoren, die für Supraleiter-ausgelöste Fehlerstrombegrenzer [6], [7] eingesetzt werden, und für persistente Stromschalter, die für Dauerstrom-HTS-Magneten [8], [9] verwendet werden. Die kritische Stromdichte J_c ist einer der Schlüsselparameter, der die Qualität von großflächigen HTS-Schichten beschreibt. Zerstörungsfreie, induktive AC-Verfahren werden häufig angewendet, um J_c und dessen Verteilung für großflächige HTS-Schichten zu messen [10] bis [13], zusammen mit dem gängigsten Verfahren unter Verwendung der dritten harmonischen Spannungen $U_3 \cos(3\omega t + \theta)$ [10], [11], wobei ω, t bzw. θ die Kreisfrequenz, Zeit bzw. Anfangsphase bezeichnen. Allerdings sind diese herkömmlichen Verfahren nicht genau, weil sie nicht das elektrische E-Feld-Kriterium der J_c-Messung berücksichtigen [14], [15] und manchmal ein ungeeignetes Kriterium verwenden, um den Schwellstrom zu bestimmen, aus dem J_c berechnet wird [16]. Ein konventionelles Verfahren liefert J_c-Werte, die sich von den genauen Werten um 10 % bis 20 % unterscheiden können [15]. Daher ist es notwendig, Standard-Prüfverfahren festzulegen, um die lokale kritische Stromdichte und ihre Verteilung präzise zu messen, auf die alle Beteiligten in der HTS-Filter-Industrie zur Qualitätskontrolle der HTS-Schichten verweisen können. Hintergrundwissen zu induktiven J_c-Messungen an HTS-Dünnschichten ist in Anhang A zusammengefasst.

Bei diesen induktiven Verfahren werden AC-Magnetfelder mit AC-Strömen $I_0 \cos\omega t$ in einer kleinen Spule erzeugt, die knapp über der Schicht montiert wird, und J_c wird aus dem Schwellen-Spulenstrom I_{th} berechnet, bei dem ein vollständiges Eindringen des Magnetfeldes in die Schicht erreicht wird [17]. Beim induktiven Verfahren, unter Verwendung der dritten harmonischen Spannungen U_3, wird U_3 als Funktion von I_0 gemessen, und I_{th} wird als der Spulenstrom I_0 bestimmt, bei dem U_3 aufzutreten beginnt. Die induzierten elektrischen Felder E in der supraleitenden Schicht bei $I_0 = I_{th}$, die proportional zur Frequenz f des Wechselstromes sind, können durch ein einfaches Bean-Modell geschätzt werden [14]. Es wurde ein Standard-Verfahren vorgeschlagen, J_c präzise mit einem Elektrischen-Feld-Kriterium durch Erfassen von U_3 und die Beschaffung des n-Wertes (Index des Potenzgesetzes der E-J-Charakteristik) durch die präzise Messung von I_{th} bei verschiedenen Frequenzen zu messen [14], [15], [18], [19]. Dieses Verfahren erhält nicht nur präzise J_c-Werte, sondern erleichtert auch die Erkennung von degradierten Bereichen in inhomogenen Proben, weil der Rückgang des n-Wertes stärker ist als die Abnahme von J_c in solchen Bereichen [15]. Es ist anzumerken, dass dieses Standard-Verfahren hervorragend für die Beurteilung der Homogenität in großflächigen HTS-Schichten ist, obwohl der entsprechende Parameter für den Entwurf von Mikrowellengeräten nicht J_c, sondern der Oberflächenwiderstand ist. Für den Einsatz von großflächigen supraleitenden Dünnschichten in supraleitenden Strombegrenzern (SFCLs) ist die Kenntnis über die J_c-Verteilung entscheidend, da die J_c-Verteilung erheblich die Quench-Verteilung in SFCLs bei Störungen beeinflusst.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) macht auf die Tatsache aufmerksam, dass beansprucht wird, dass die Anwendung dieses Dokuments die Verwendung eines Patentes hinsichtlich der

[1] Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Bestimmung der E-J-Charakteristik durch J_c-Messungen als Funktion der Frequenz umfassen kann, wie in der Einleitung, in Abschnitt 1, Abschnitt 4 und 5.1 beschrieben.

Die IEC nimmt keine Stellung zur Rechtmäßigkeit, Gültigkeit und Tragweite dieser Patentrechte.

Der Inhaber dieser Patentrechte hat der IEC zugesichert, dass er bereit ist, gebührenfreie Lizenzen mit den Antragstellern in der ganzen Welt zu verhandeln. In diesem Zusammenhang ist die Erklärung des Halters dieser Patentrechte in der IEC registriert. Informationen können angefordert werden von:

Name des Inhabers des Patentrechts:
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

Adresse:
Intellectual Property Planning Office, Intellectual Property Department 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japan

Es wird auf die Möglichkeit aufmerksam gemacht, dass einige Elemente dieses Dokuments Gegenstand von anderen Schutzrechten als den oben genannten sein können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

ISO (www.iso.org/patents) und IEC (http://patents.iec.ch) unterhalten Online-Datenbanken von Patenten, die für ihre Normen relevant sind. Anwender werden aufgefordert, in diesen Datenbanken bezüglich der aktuellsten Informationen über Patente zu recherchieren.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Supraleitfähigkeit – Teil 17: Messungen der elektronischen Charakteristik – Lokale kritische Stromdichte und deren Verteilung in großflächigen supraleitenden Schichten

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 61788 beschreibt die Messung der lokalen kritischen Stromdichte (J_c) und ihre Verteilung in großflächigen Hochtemperatursupraleiter-Schichten (HTS) durch ein induktives Verfahren unter Verwendung der dritten harmonischen Spannungen. Der Schlüssel für präzise Messungen ist, J_c bei Temperaturen des flüssigen Stickstoffs durch ein Elektrisches-Feld-Kriterium zu bestimmen und Strom-Spannungs-Charakteristiken aus ihrer Frequenzabhängigkeit zu erhalten. Obwohl es möglich ist, J_c in angelegten DC-Magnetfeldern zu messen [20], [21][2], ist der Anwendungsbereich dieser Norm auf die Messung ohne DC-Magnetfelder beschränkt.

Diese Technik misst intrinsisch den kritischen Flächenstrom, der durch das Produkt aus J_c und der Schichtdicke d gegeben ist. Der Bereich und die Messauflösung für $J_c d$ von HTS-Schichten sind wie folgt:

– $J_c d$: von 200 A/m bis 32 kA/m (bezogen auf die Ergebnisse, keine Beschränkung);
– Messauflösung: 100 A/m (bezogen auf die Ergebnisse, keine Beschränkung).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 60050 (alle Teile), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-815:2000, von denen einige hier aus praktischen Gründen wiederholt werden.

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

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

3.1
kritischer Strom
I_c
maximaler Gleichstrom, der als widerstandsfreifließender Strom betrachtet werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: I_c ist eine Funktion der Magnetfeldstärke und der Temperatur.

[QUELLE: IEC 60050-815:2000, 815-03-01]

3.2
Kritischer-Strom-Kriterium
I_c-Kriterium
Kriterium zur Bestimmung des kritischen Stroms I_c, basierend auf der elektrischen Feldstärke E oder der Leitfähigkeit ρ

[2] Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Anmerkung 1 zum Begriff: E = 10 µV/m bzw. E = 100 µV/m wird häufig als das Elektrisches-Feld-Kriterium verwendet, und $\rho = 10^{-13}\ \Omega \cdot m$ oder $\rho = 10^{-14}\ \Omega \cdot m$ wird oft als Widerstands-Kriterium herangezogen. („E = 10 V/m oder E = 100 V/m“ in der aktuellen Ausgabe ist falsch und wird in der zweiten Auflage korrigiert).

[QUELLE: IEC 60050-815:2000, 815-03-02]

3.3
kritische Stromdichte
J_c
elektrische Stromdichte beim kritischen Strom, entweder unter Verwendung des Querschnitts des ganzen Leiters (gesamt) oder unter Verwendung des nichtstabilisierten Teils des Leiters, wenn ein Stabilisator vorhanden ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die gesamte Stromdichte wird im englischen Sprachgebrauch als „engineering current density“ (Symbol: J_e) bezeichnet.

[QUELLE: IEC 60050-815:2000, 815-03-03]

3.4
kritische Transport-Stromdichte
J_{ct}
kritische Stromdichte, die durch eine Widerstands- oder eine Spannungsmessung erhalten wurde

[QUELLE: IEC 60050-815:2000, 815-03-04]

3.5
***n*-Wert (eines Supraleiters)**
Exponent, erhalten in einem bestimmten Bereich der elektrischen Feldstärke oder des spezifischen Widerstandes, wenn die Spannung/Strom U (I)-Kurve durch die Gleichung $U \propto I^n$ angenähert wurde

[QUELLE: IEC 60050-815:2000, 815-03-10]

4 Anforderungen

Die kritische Stromdichte J_c ist einer der grundlegendsten Parameter, der die Qualität von großflächigen HTS-Schichten beschreibt. In dieser Norm werden J_c und deren Verteilung zerstörungsfrei über ein induktives Verfahren durch den Nachweis der dritten harmonischen Spannungen $U_3\cos(3\omega t + \theta)$ gemessen. Eine kleine Spule, die verwendet wird, um sowohl magnetische Wechselfelder zu erzeugen als auch die dritten harmonischen Spannungen zu detektieren, ist knapp über der HTS-Schicht montiert, um die Messfläche abzutasten. Um J_c genau mit einem Elektrisches-Feld-Kriterium zu messen, werden die Schwellen-Spulenströme I_{th}, bei der U_3 zu entstehen beginnt, wiederholt bei verschiedenen Frequenzen gemessen und die E-J-Charakteristiken aus ihren Frequenzabhängigkeiten bestimmt.

Der Zielwert für die relative Standardmessunsicherheit des Verfahrens, das verwendet wird, um den absoluten Wert von J_c zu bestimmen, ist weniger als 10 %. Allerdings ist der Zielwert für die Messunsichereit weniger als 5 % zum Zwecke der Beurteilung der Homogenität der Verteilung von J_c in großflächigen supraleitenden Dünnschichten.

5 Geräte

5.1 Messausrüstung

Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung eines typischen elektrischen Schaltkreises, der für die Messungen der dritten harmonischen Spannung verwendet wird. Dieser Schaltkreis besteht aus einem Signalgenerator, einem Leistungsverstärker, einem Digital-Multimeter (DMM) zur Messung des Spulenstromes, einem Bandsperrfilter, um die Grundwellen zu reduzieren, und einem Lock-in-Verstärker, um die dritten harmonischen Signale zu messen. Er beinhaltet den Ansatz einer Einzelspule, bei dem die Spule verwendet

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

wird, um ein magnetisches Wechselfeld zu erzeugen und die induktive Spannung zu detektieren. Dieses Verfahren kann auch auf doppelseitige supraleitende Dünnschichten ohne Einschränkung angewendet werden. In den hier vorgeschlagenen Verfahren gibt es jedoch ein zusätzliches System, um harmonische Störspannungen zu reduzieren, die vom Signalgenerator und dem Leistungsverstärker erzeugt werden [14]. In dem Beispiel aus Bild 1 wird eine Kompensationsspule mit einer Spezifikation eingesetzt, die die gleiche wie die Probenspule ist. Die Probenspule ist knapp über der supraleitenden Schicht montiert, und eine supraleitende Schicht mit einem $J_c d$ ausreichend größer als der der Probeschicht ist unter der Kompensationsspule angebracht, um ihre Induktivität auf die der Probenspule einzustellen. Beide Spulen und beide supraleitenden Schichten werden in flüssigen Stickstoff eingetaucht (gestrichelte Linie in Bild 1). Andere optionale Messsysteme sind in Anhang B beschrieben.

ANMERKUNG In dieser Schaltung sind Spulenströme von ~ 0,1 A (rms) und Leistungs-Spannungsquellen von > 6 V (rms) nötig, um die supraleitende Schicht mit $J_c d \approx$ 10 kA zu messen, indem die Spule 1 oder die Spule 2 der Tabelle 1 (6.5) verwendet wird. Ein Leistungsverstärker wie NF: HSA4011 ist notwendig, um solch große Ströme und Spannungen bereitzustellen.

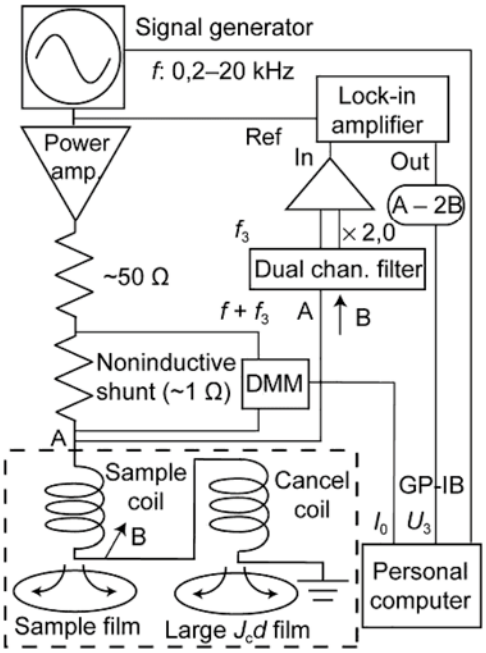


Bild 1 – Darstellung eines elektrischen Schaltkreises zur induktiven J_c-Messung von HTS-Schichten

Englisch	Deutsch
Signal generator	Signalgenerator
Power amp.	Leistungsverstärker
Lock-in amplifier	Lock-in-Verstärker
Ref	Ref
In	In
Out	Out
Dual chan. Filter	2-Kanal-Filter
Noninductive shunt	nicht-induktiver Shunt (Widerstand)
Sample coil	Probenspule
Cancel coil	Kompensationsspule
Sample film	Prüfschicht

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Large $J_c d$ film	Schicht mit hohem $J_c d$
Personal computer	Personal-Computer

5.2 Komponenten der induktiven Messungen

5.2.1 Spulen

Derzeit verfügbare großflächige HTS-Schichten sind auf Flächen bis zu etwa 25 cm im Durchmesser beschichtet, während Schichten mit einem Durchmesser von ~5 cm kommerziell verwendet werden, um Mikrowellen-Filter anzufertigen [22]. Größere $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO)-Schichten, Schichten etwa 10 cm im Durchmesser und 2,7 cm × 20 cm Schichten, wurden verwendet, um Fehlerstrom-Begrenzermodule herzustellen [3] bis [5]. Für die J_c-Messungen von solchen Schichten bewegt sich der geeignete Außendurchmesser der Probenspulen von 2 mm bis 5 mm. Die Voraussetzung für die Probenspule ist, ein Magnetfeld der größtmöglichen Feldstärke an der Oberfläche der supraleitenden Schicht zu erzeugen, für die sich eine flache Spulengeometrie eignet. Typische Spezifikationen sind wie folgt:

a) Innerer Wickeldurchmesser D_1: 0,9 mm, Außendurchmesser D_2: 4,2 mm, Höhe h: 1,0 mm, 400 Windungen eines 50-µm-Durchmesser-Kupferdrahts;

b) D_1: 0,8 mm, D_2: 2,2 mm, h: 1,0 mm, 200 Windungen eines 50-µm-Durchmesser-Kupferdrahts.

5.2.2 Abstandsschicht

Typischerweise wird eine Polyamid-Folie mit einer Dicke von 50 µm bis 125 µm verwendet, um die HTS-Schichten zu schützen. Die Spule hat in der Regel eine gewisse Schutzschicht unterhalb der Spulenwicklung, die außerdem die Dünnschicht von Joule'scher Wärme in der Spule isoliert. Die typische Dicke beträgt 100 µm bis 150 µm, und der Spulen-Schicht-Abstand Z_1 wird auf ~200 µm gehalten.

5.2.3 Mechanismus für den Aufbau der Spule

Zur Aufrechterhaltung eines vorgegebenen Wertes für den Abstand Z_1 zwischen der Unterseite der Spulenwicklung und Schichtoberfläche, sollte die Probenspule mit ausreichendem Druck auf die Schicht gepresst werden, in der Regel mehr als ~0,2 MPa [18]. Techniken, um dies zu erreichen, sind ein Gewicht oder eine Feder zu verwenden, wie in Bild 2 gezeigt. Das System, schematisch im Bild links gezeigt, wird verwendet, um einen weiten Bereich der Schicht abzutasten. Vor der U_3-Messung wird die Spule zunächst etwas auf Abstand nach oben bewegt, seitlich auf die Zielposition gefahren und dann nach unten bewegt und auf die Schicht gedrückt. Ein geeigneter Druck sollte bestimmt werden, so dass der Spulenkörper, die Spule, die HTS-Dünnschicht oder das Substrat nicht durch einen zu hohen Druck beschädigt werden. Es wird berichtet, dass auf einem biaxial texturierten reinen Ni-Substrat beschichtetes YBCO durch eine transversale Druckspannung von etwa 20 MPa [23] degradierte.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

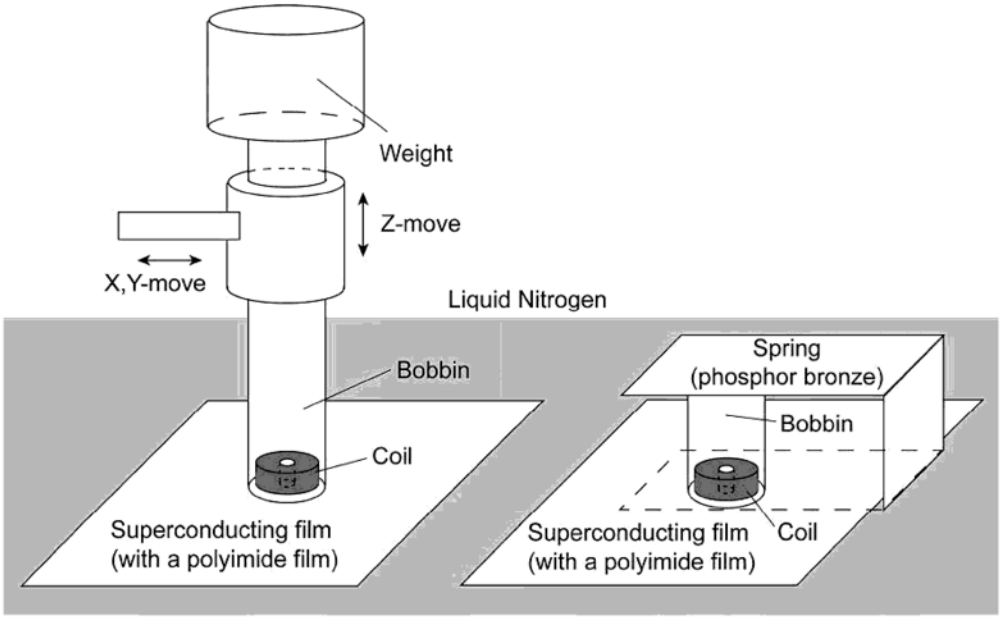


Bild 2 – Illustration zur Darstellung von Techniken, die die Probenspule auf die HTS-Schichten drücken

Englisch	Deutsch
Weight	Gewicht
X,Y-move	X-, Y-Bewegung
Z-move	Z-Bewegung
Liquid nitrogen	Flüssiger Stickstoff
Bobbin	Spulenkörper
Spring (phosphor bronze)	Feder (Phosphor-Bronze)
Coil	Spule
Superconducting film (with a polyimide film)	Supraleitende Schicht (mit Polyamid-Folie)

5.2.4 Kalibrierungs-Wafer

Ein Kalibrierungs-Wafer wird verwendet, um den experimentellen Spulen-Koeffizienten k' zu bestimmen, wie im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Er ist aus einer homogenen großflächigen (typischerweise ungefähr 5 cm Durchmesser) YBCO-Dünnschicht hergestellt. Er besteht aus Brücken für die Transportmessung und einer induktiven Messfläche (Bild 3). Typische Maße der Transportbrücken sind 20 µm bis 70 µm breit und 1 mm bis 2 mm lang, die entweder mithilfe der UV-Photolithographietechnik oder mittels Laserstrukturierung hergestellt wurden [24]. In den Transportbrücken aus Bild 3 kann ein Transportstrom von Stromklemme 1 an eine der anderen Stromklemmen 3, 5, 7, 9, oder 11 übertragen werden. In diesem Fall werden die Klemmen 2, 4, 6, 8, 10 und 12 als Spannungsklemmen verwendet.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

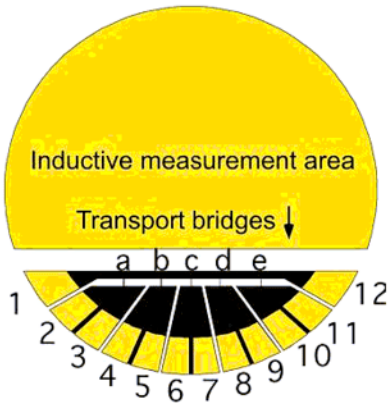


Bild 3 – Beispiel eines Kalibrierungs-Wafers zur Bestimmung des Spulen-Koeffizienten

Englisch	Deutsch
Inductive measurement area	Induktive Messfläche/Messbereich
Transport bridges	Transportbrücken

6 Messverfahren

6.1 Allgemein

Die Verfahren zur Bestimmung des experimentellen Spulen-Koeffizienten k' und die Messung von J_c der zu prüfenden Schichten, werden wie folgt mit der in A.5 angegebenen Bedeutung von k' beschrieben.

6.2 Bestimmung des experimentellen Spulen-Koeffizienten

6.2.1 Berechnung des theoretischen Spulen-Koeffizienten k

Der theoretische Spulen-Koeffizient $k = J_c d/I_{th}$ wird berechnet aus

$$k = F_m, \tag{1}$$

Dabei ist F_m das Maximum von $F(r)$ ist, welches eine Funktion von r, also dem Abstand von der zentralen Achse der Spule ist (Bild 4). Die Spulenfaktor-Funktion $F(r) = -2H_r(r, t)/I_0 \cos\omega t = 2H_0/I_0$ wird erhalten durch

$$F(r) = \frac{N}{2\pi S}\int_{R_1}^{R_2} dr' \int_0^{2\pi} d\theta \int_{Z_1}^{Z_2} dz \frac{r' z \cos\theta}{\left(z^2 + r^2 + r'^2 - 2rr'\cos\theta\right)^{3/2}}, \tag{2}$$

Dabei ist $H_r(r, t)$ die radiale Komponente des Magnetfelds, erzeugt durch die Probenspule an der Oberfläche der supraleitenden Schicht, N die Anzahl der Wicklungen, $S = (R_2 - R_1)h$ die Querschnittsfläche, $R_1 = D_1/2$ der Innenradius, $R_2 = D_2/2$ der Außenradius der Spule, Z_1 der Spule-Schicht-Abstand und $Z_2 = Z_1 + h$ ist [17]. Die Herleitung der Gleichung (2) ist in A.3 beschrieben.

k kann einfach wie folgt erhalten werden:

a) Die Amplitude des Magnetfelds $H_0(r) = H_r(r, t = 0)$ wird als Funktion von r an einer Stelle unterhalb der Spule mit einem Abstand Z_1 berechnet, wenn ein Strom von I_0 = 1 mA die Probespule durchläuft (Bild 5).

b) Der (lokale) Maximalwert von $H_0(r)$ wird erhalten, wenn r nahe $r \approx (R_1 + R_2)/2$ geändert wird.

c) Der Maximalwert von $H_0(r)$ sollte die Maßeinheit A/m haben, dann wird der verdoppelte Wert zu k (Maßeinheit: 1/mm). Es ist zu beachten, dass das Magnetfeld aus der Bild-Spule (d. h. aus dem

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Abschirmstrom, der in der supraleitenden Schicht fließt) die senkrechte Komponente H_z aufhebt, und sich die parallele Komponente H_r verdoppelt. Die Bild-Spule und ihre Magnetfelderzeugung werden durch die gestrichelten Linien in Bild 5 dargestellt.

d) Für die Berechnung der Magnetfelder der Spule darf eine kostenlose Website genutzt werden; zum Beispiel http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/~kajikawa/javascript/field_and_potential-e.html (die Berechnung auf dieser Website basiert auf einer Veröffentlichung mit dem Titel „Calculation of Magnetic Field Distribution of Solenoid Coil by Computer“ [25].

Einige Beispiele für den theoretischen Spulen-Koeffizienten *k* von typischen Probenspulen sind in Tabelle 1 mit den Spezifikationen angegeben.

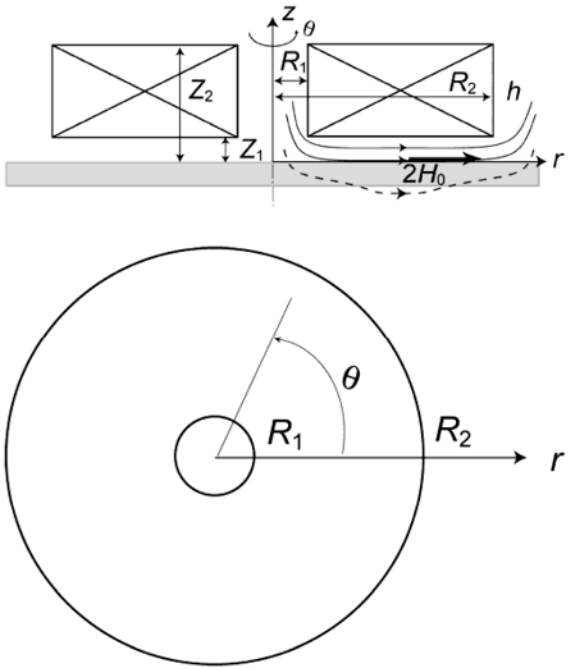


Bild 4 – Illustration zur Probenspule und zum Magnetfeld während der Messung

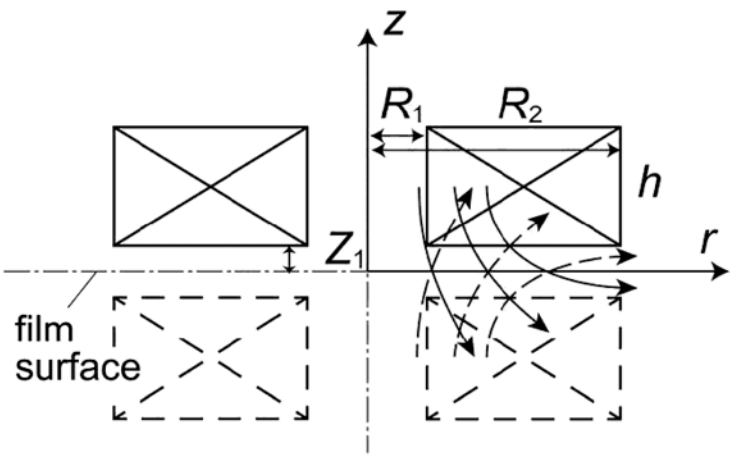


Bild 5 – Illustration zur Probenspule und ihre Magnetfelderzeugung

Englisch	Deutsch
film surface	Schichtoberfläche

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Tabelle 1 – Spezifikationen und theoretische Spulen-Koeffizienten k von typischen Probespulen

a) Spulen aus Kupferdraht mit 50 µm Durchmesser (einem Spule-Schicht-Abstand von Z_1 = 0,2 mm)

	D_1 mm	D_2 mm	h mm	Windungen	k 1/mm	r bei $F_m(r)$ mm
1	0,8	2,2	1,0	200	62,9	0,74
2	0,9	2,9	1,0	300	92,2	0,95
3	1,0	3,6	1,0	400	117,4	1,15
4	1,0	4,3	1,0	500	135,2	1,35
5	1,0	4,9	1,0	600	151,5	1,52
6	1,0	3,6	1,5	600	136,0	1,17

b) Spulen aus Kupferdraht mit 100 µm Durchmesser (einem Spule-Schicht-Abstand von Z_1 = 0,33 mm)

	D_1 mm	D_2 mm	h mm	Windungen	k 1/mm	r bei $F_m(r)$ mm
1	1,0	4,3	1,0	150	34,4	1,35
2	1,0	5,4	1,0	200	41,9	1,67
3	1,0	6,5	1,0	250	47,9	1,98
4	1,0	7,6	1,0	300	52,6	2,31
5	1,5	5,4	1,5	300	51,5	1,68

6.2.2 Transportmessungen der Brücken auf dem Kalibrierungs-Wafer

a) Die E-J-Charakteristiken der Brücken auf dem Kalibrierungs-Wafer werden durch eine 4-Punkt-Messung gemessen und das Potenz-Gesetz (exponentielle Verhalten) der E-J-Charakteristik wird bestimmt:

$$E_t = A_{0t} \times J^n \tag{3}$$

b) Die Messungen werden für mindestens 3 verschiedene Brücken wiederholt. Drei Datensätze (n = 20,5 bis n = 23,8) für drei gemessene Brücken sind in Bild 6 im oberen (hohes E) Teil gezeigt.

6.2.3 U_3-Messungen des Kalibrierungs-Wafers

a) U_3 wird in der induktiven Messebene des Kalibrierungs-Wafers als Funktion des Spulenstromes mit drei oder vier Frequenzen gemessen und das experimentelle I_{th} wird unter Verwendung eines konstanten induktiven Kriteriums bestimmt, nämlich $U_3/fI_0 = 2\pi L_c$. Das Kriterium L_c sollte so klein wie möglich innerhalb des Bereiches mit genügend großem S/N-Verhältnis sein, um die einfache Gleichung (4) für die Berechnung des elektrischen Feldes zu verwenden (7.1 c) und D.2).

b) Die Messung wird für mindestens drei verschiedene Punkte der Schicht wiederholt.

6.2.4 Berechnung der E-J-Charakteristik aus frequenzabhängigen I_{th}-Daten

a) J_{c0} (= kI_{th}/d) und das durchschnittliche E, das in der supraleitenden Schicht bei voller Eindring-Schwelle induziert wird, wird durch

$$E_{avg} \approx 2.04\mu_0 f d^2 J_c = 2,04\mu_0 k f d I_{th}, \tag{4}$$

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

aus dem erhaltenen I_{th} bei jeder Frequenz durch Verwendung des theoretischen Koeffizienten k berechnet, der in 6.2.1 berechnet wurde. Die Herleitung von Gleichung (4) ist in A.4 beschrieben.

b) Die E-J-Charakteristik

$$E_i = A_{0i} \times J^n \tag{5}$$

wird aus der Beziehung zwischen E_{avg} und J_{c0} berechnet und in demselben Bild dargestellt, in dem die Daten zur E-J-Charakteristik eingezeichnet sind. Die gestrichelten Linien in Bild 6 zeigen drei Datensätze, die an verschiedenen Punkten der Schicht gemessen wurden. Transport- und induktive U_3-Daten passen momentan nicht an dieser Stelle.

6.2.5 Bestimmung von k' aus J_{ct}- und J_{c0}-Werten für ein passendes E

a) Wählen Sie ein passendes elektrisches Feld, das sowohl innerhalb (oder nahe) der Transport-E-J-Charakteristik-Kurven, als auch innerhalb der induktiven E-J-Kurven liegt, wie 200 µV/m in Bild 6.

b) Bei diesem Feld werden sowohl die kritischen Transportstromdichten J_{ct} als auch die induktiven J_{c0} Werte, jeweils aus den Gleichungen (3) und (5), berechnet.

c) Der experimentelle Spulen-Koeffizient k' wird durch $k' = (J_{ct}/J_{c0})k$ bestimmt, wobei J_{ct} und J_{c0} jeweils die Mittelwerte der erhaltenen J_{ct}- und J_{c0}-Werte bedeuten. Wenn die J_c (= $k'I_{th}/d$)-Werte gegen E_{avg} = 2,04 $\mu_0 kfdI_{th}$ aufgetragen sind, stimmen die E-J-Charakteristiken aus der U_3-Messung gut mit den Transport-Daten überein (Bild 6).

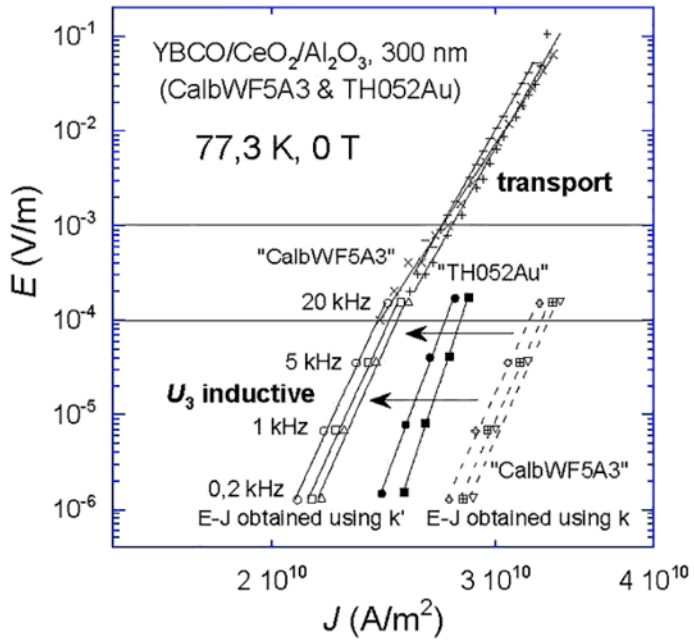


Bild 6 – E-J-Charakteristiken, bestimmt durch Transport-Messungen und induktive U_3-Methode

Englisch	Deutsch
transport	Transport
U_3 inductive	induktives U_3
E–J obtained using k'	E–J erhalten mit k'

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

6.3 Messung von J_c in den Prüf-Schichten

a) U_3 wird mit zwei, drei oder vier Frequenzen in den Prüf-Schichten gemessen und I_{th} wird mit dem gleichen Kriterium L_c bestimmt, wie es in 6.2.3 verwendet wurde.

b) Der erhaltene experimentelle Spulen-Koeffizient k' wird verwendet, um J_c (= $k'I_{th}/d$) bei jeder Frequenz zu berechnen, und die Beziehung zwischen J_c und E_{avg} (= $2{,}04\mu_0 kfdI_{th}$ unter Verwendung von k aufgrund der Unterschätzung, wie in 7.1 c) erwähnt) wird erhalten. Ein Beispiel der E-J-Eigenschaften ist auch in Bild 6 für eine Prüf-Schicht (TH052Au, volle Symbole) mit n-Werten (36,0 und 40,4) gezeigt, die über die der Kalibrierungs-Wafer (n = 28,0 bis n = 28,6) hinausgehen.

c) Aus den erhaltenen E-J-Charakteristiken berechnen Sie den J_c-Wert mit einem geeigneten Elektrischen-Feld-Kriterium, z. B. E_c = 100 µV/m.

d) Eine Messung mit drei oder vier Frequenzen ist vorteilhaft, um die Gültigkeit der Messung und der Probe durch Überprüfung des Potenzgesetzes der E-J-Charakteristik zu kontrollieren. Eine Messung mit zwei Frequenzen kann aus Zeitgründen für Routine-Proben verwendet werden.

6.4 Messung von J_c mit nur einer Frequenz

Wie in Abschnitt 1 und Abschnitt 3 erwähnt, ist J_c eine Funktion des elektrischen Feldes, und es wird empfohlen, es mit einem konstanten Elektrischen-Feld-Kriterium zu bestimmen, indem ein Multifrequenz-Ansatz durch die in 6.2 und 6.3 beschriebenen Verfahren angewendet wird. Allerdings ist manchmal der Einfachheit halber und aus Kostengründen eine Frequenzmessung gewünscht. In diesem Fall werden die J_c-Werte mit variablen Elektrischen-Feld-Kriterien durch die folgenden Verfahren bestimmt.

a) Der theoretische Spulen-Koeffizient k wird aus Gleichung (1) in 6.2.1 berechnet.

b) Das E-J-Kriterium der Transport-Brücken der Kalibrierungs-Wafer (Gleichung (3)) wird durch die Verfahren aus 6.2.2 erhalten.

c) U_3 wird in der induktiven Messfläche des Kalibrierungs-Wafers als Funktion des Spulenstromes mit einer Frequenz gemessen und das experimentelle I_{th} wird mit Hilfe eines konstanten Induktivitäts-Kriteriums erhalten, nämlich $U_3/fI_0 = 2\pi L_c$. Das Kriterium L_c sollte so klein wie möglich innerhalb des Bereichs mit ausreichend großen S/N-Verhältnissen sein, um die einfache Gleichung (4) aus 6.2.4 zur Berechnung des elektrischen Feldes einzusetzen. J_{c0} (= kI_{th}/d) und das durchschnittliche E, das in der supraleitenden Schicht bei der Schwelle vollständigen Eindringens nach Gleichung (4) induziert wird, wird berechnet. Die Messung wird für mindestens drei verschiedene Punkte der Schicht wiederholt und das durchschnittliche J_{c0} und $E_{avg\text{-}U3}$ werden erhalten.

d) Mit den Transport-E-J-Charakteristiken der Gleichung (3) wird J_{ct} für das durchschnittliche $E_{avg\text{-}U3}$ berechnet, das in c) bestimmt wurde.

e) Der experimentelle Spulen-Koeffizient k' wird mit $k' = (J_{ct}/J_{c0})k$ bestimmt.

f) U_3 wird mit der gleichen Frequenz in den Prüf-Schichten gemessen und I_{th} wird mit dem gleichen Kriterium L_c erhalten, wie es in c) verwendet wurde. J_c (= $k'I_{th}/d$) wird unter Verwendung des erhaltenen experimentellen Spulen-Koeffizienten k' berechnet. Mit Gleichung (4) wird auch E_{avg} berechnet. Dieser Wert sollte mit jedem J_c-Wert einhergehen.

6.5 Beispiele der theoretischen und experimentellen Spulen-Koeffizienten

Einige Beispiele der theoretischen und experimentellen Spulen-Koeffizienten (k und k') für typische Probenspulen sind in Tabelle 2 mit den Spezifikationen und empfohlenen Kriterien für die I_{th}-Bestimmung, $2\pi L_c = U_3/fI_0$, dargestellt. Es ist zu beachten, dass k' vom Kriterium L_c abhängt. Spule 1 ist mit einem 50-µm-Durchmesser-, selbstklebenden, Polyurethan-lackierten, runden Kupfer-Wicklungsdraht gewickelt, und die Spulen 2 und 3 sind mit einem 50-µm-Durchmesser-, Polyurethan-lackierten, runden Kupfer-Wicklungsdraht gewickelt. Gemessene Widerstände bei 77,3 K und berechnete Selbstinduktivitäten einer unterhalb der Spule liegenden supraleitenden Schicht werden ebenfalls gezeigt. Der Spule-Schicht-Abstand Z_1 ist auf 0,2 mm

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

festgelegt. Die Bilder der Spulen 1 und 3 sind in Bild 7 dargestellt, und die Spulenfaktor-Funktionen $F(r)$ für die drei Spulen zeigen, dass die Spitze des Magnetfeldes nahe des mittleren Spulenradius (Bild 8) auftritt.

Tabelle 2 – Spezifikationen und Spulen-Koeffizienten von typischen Probespulen

	D_1 mm	D_2 mm	h mm	Windungen	k 1/mm	k' 1/mm	U_3/fI_0 μΩ • s	R Ω	L mH
1	0,9	4,2	1,0	400	106,6	82,2	2	4,1	0,165
2	1,0	3,6	1,0	400	117,4	89,1	2	3,4	0,163
3	0,8	2,2	1,0	200	63,2	47,0	0,6	1,6	0,028

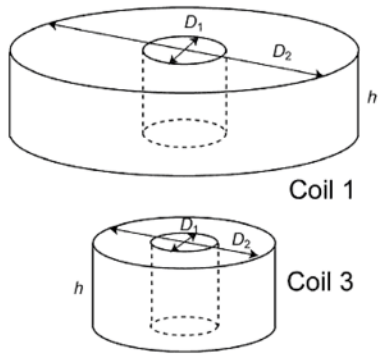


Bild 7 – Illustration der Spulen 1 und 3 in Tabelle 1

Englisch	Deutsch
Coil	Spule

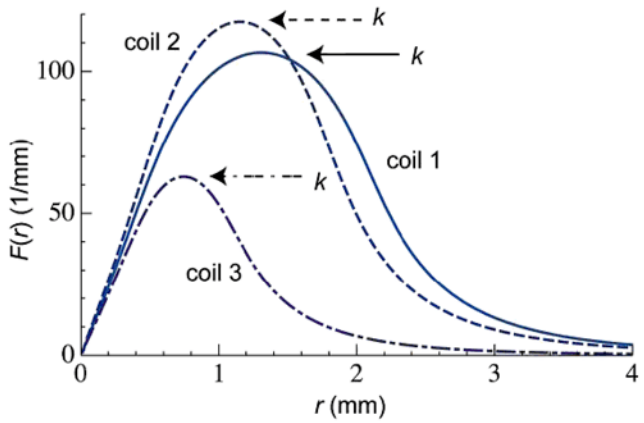


Bild 8 – Die Spulenfaktor-Funktion $F(r) = 2H_0/I_0$ berechnet für drei Spulen

Englisch	Deutsch
coil	Spule

7 Messunsicherheit des Prüfverfahrens

7.1 Hauptquellen der systematischen Effekte, die die U_3-Messung beeinflussen

Der wichtigste systematische Einfluss auf die U_3-Messung ist begründet in der Abweichung des Spule-Schicht-Abstandes Z_1 vom vorgeschriebenen Wert. Da der gemessene Wert $J_c d$ bei dieser Technik direkt

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

proportional zum magnetischen Feld an der Oberfläche der supraleitenden Schicht ist, wirkt sich die Abweichung des Abstandes Z_1 unmittelbar auf die Messung aus. Die Hauptursachen der Unsicherheit sind unten aufgeführt a) bis c). Es ist zu beachten, dass das allgemeine Konzept der „Unsicherheit“ in Anhang C zusammengefasst ist.

a) Unzureichendes Aufdrücken der Spule auf die Schicht

Da die Messung in flüssigem Stickstoff durchgeführt wird, wird die Polyamid-Folie über der HTS-Dünnschicht spröde und flüssiger Stickstoff kann in den Raum zwischen der Polyamid-Folie und den HTS-Schichten eintreten. Somit ist ausreichend Druck notwendig, um die Polyamid-Folie flach zu halten und die Abweichung von Z_1 zu vermeiden. Ein Experiment hat gezeigt, dass der erforderliche Druck ~0,2 MPa ist [18]. Hier ist zu beachten, dass die thermische Kontraktion der Polyamid-Folien bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs weniger als $0{,}002 \times (300 - 77) \approx 0{,}45$ % ist, was zu vernachlässigbaren Werten von 0,2 µm bis 0,6 µm führt, verglichen mit dem gesamten Spule-Schicht Abstand (~200 µm) [26].

b) Bildung einer Eisschicht zwischen Spule und Polyamid-Folie

Der flüssige Stickstoff enthält zwangsläufig pulverförmiges Eis. Wenn die Probenspule bewegt wird, um die großflächige HTS-Schichtfläche für einen längeren Zeitraum abzutasten, bildet sich häufig eine Eisschicht zwischen der Polyamid-Folie und der Probenspule aus, die den Spule-Schicht-Abstand Z_1 gegenüber dem vorgeschriebenen Wert erhöht. Wie später in 7.2 gezeigt wird, reduziert dieser Effekt die Spulen-Koeffizienten (k und k'), und die Verwendung des nicht korrigierten k' ergibt eine Überschätzung in J_c. Besondere Sorgfalt sollte darauf gelegt werden, die Umgebung der Messung so trocken wie möglich zu halten. Wenn das Messsystem in eine offene Umgebung gebracht wird, werden die J_c-Werte, die nach einer längeren Zeitspanne gemessen wurden, manchmal größer als diejenigen, die davor gemessen wurden, und die Überschätzung war 6 % groß, wenn nach einer Stunde gemessen wurde. Wenn das Messsystem in eine fast geschlossene Umgebung gebracht wird und die Luftfeuchte in der Umgebung kleiner als etwa 5 % ist, kann eine solche Wirkung von Eisschichten vermieden werden. Dieser Effekt lässt sich durch Bestätigung der Reproduzierbarkeit nachprüfen. Falls dieselben J_c-Werte nach einer längeren Zeit erhalten werden, beweist dies, dass die Auswirkung von Eisschichten vernachlässigbar ist. Diese beiden systematischen Effekte (a) und b)) werden nicht in der Schätzung der Messunsicherheit des experimentellen Spulen-Koeffizienten k' in 7.3 und D.1 berücksichtigt, da sie durch gründliche Messungen beseitigt werden können.

c) Unterschätzung des induzierten elektrischen Feldes E aufgrund eines einfachen Bean-Modells

Die Berechnung des durchschnittlichen induzierten elektrischen Feldes E_{avg} in der supraleitenden Schicht über Gleichung (4) ist ausreichend genau, vorausgesetzt, die Magnetfeld-Eindringung unterhalb der Unterseite der Folie kann vernachlässigt werden. Allerdings dringen erhebliche Magnetfelder unterhalb der Schicht ein, wenn der experimentelle Schwellen-Strom I_{th} bestimmt wird und ein nachweisbares U_3 auftritt. Es wurde darauf hingewiesen, dass die rasche Magnetfeld-Eindringung unter der Schicht bei $I_0 = I_{th}$ einen erheblichen Anstieg des induzierten elektrischen Feldes verursacht und, sofern *E* durch die Gleichung (4) berechnet wird, erheblich unterschätzt wird [27]. Allerdings haben einige experimentelle Ergebnisse gezeigt, dass die relative Standardmessunsicherheit dieses Effektes in der Regel weniger als 5 % beträgt. Details sind in D.2 beschrieben.

7.2 Wirkung der Abweichung vom vorgeschriebenen Wert im Spule-Schicht-Abstand

Da das von der Spule herrührende Magnetfeld vom Spule-Schicht-Abstand Z_1 abhängt, hängt der Spulen-Koeffizient auch von Z_1 ab. Bild 9 zeigt die Z_1-Abhängigkeit des aus den Gleichungen (1) und (2) berechneten theoretischen Spulen-Koeffizienten *k*. Der theoretische Spulen-Koeffizient k, normiert auf k_0, ist als Funktion von Z_1 aufgetragen, wobei k_0 der theoretische Spulen-Koeffizient für Z_1 = 0,2 mm ist. Die Maße der Spulen 1, 2 und 3 sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die relative Auswirkung der Abweichung auf k der Spule 1 ist ungefähr 2,6 %, wenn Z_1 = 0,2 mm ± 0,02 mm ist. Sofern die Abweichung von Z_1 klein ist (z. *B.* ≤ 20 %), ist die Abweichung des experimentellen Spulen-Koeffizienten k' proportional zu k. Einige experimentelle Ergebnisse, die dies untermauern, sind in D.3 beschrieben. Daher wird Bild 9 verwendet, um die systematische Auswirkung auf k' abzuschätzen, wenn die Abweichung des Abstands angemessen abgeschätzt werden kann.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

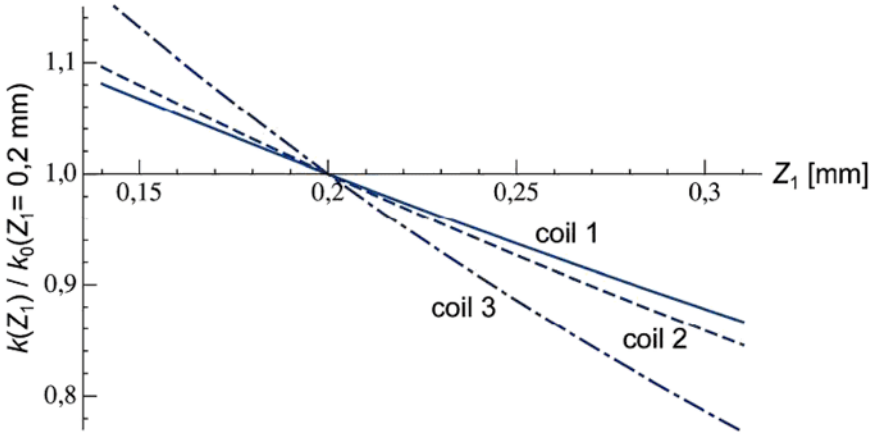


Bild 9 – Abhängigkeit des theoretischen Spulen-Koeffizienten *k* vom Spule-Schicht-Abstand Z_1

7.3 Messunsicherheit des experimentellen Spulen-Koeffizienten und des erhaltenen J_c

Da das vorgeschlagene Verfahren eine Bezugsprobe (den Kalibrierungs-Wafer) verwendet, um den experimentellen Spulen-Koeffizienten k' zu bestimmen, der direkt die gemessenen J_c-Werte beeinflusst, ist die Unsicherheit von k' einer der Schlüssel – Faktoren, der die Unsicherheit der Messung beeinflusst, und die Homogenität der großflächigen Dünnschicht, die beim Kalibrierungs-Wafer verwendet wird, ist eine bedeutende Quelle einer solchen Unsicherheit. Der experimentelle Spulen-Koeffizient wird mit $k' = (J_{ct}/J_{c0})k$ bei einem geeigneten elektrischen Feld berechnet, wobei J_{ct} die kritische Stromdichte ist, die durch das Transport-Verfahren gemessen wurde, und $J_{c0} = kI_{th}/d$ die durch das induktive Verfahren gemessene Stromdichte (6.2.5). Ein Beispiel für die Bewertung der Unsicherheit von k' für die Spule 1 (Tabelle 1) wurde in D.1 gezeigt. Das Ergebnis ist $k' = (J_{ct}/J_{c0})k = (2{,}587\ 8 / 3{,}443\ 7) \times 109{,}4$ mm = 82,2 mm^{-1} mit der kombinierten Standardmessunsicherheit von $u_c(k') = 2{,}4\ \text{mm}^{-1}$ (2,93 %). Es hat sich gezeigt, dass die Unsicherheit des Transport-J_{ct} die kombinierte Standardmessunsicherheit von k' dominiert.

Die Unsicherheit, die aus der Unterschätzung von E_{avg} durch ein einfaches Bean-Modell (Gleichung (4)) herrührt, ist in D.2 bewertet. Die relative Standardmessunsicherheit (Typ B) wird ausgewertet, um $u_B = 6{,}6/\sqrt{3} = 3{,}8\ \%$ für eine typische Probe mit $n = 25$ zu erfüllen. Im Gegensatz zu diesen Typ-B-Unsicherheiten ist die Typ-A-Unsicherheit von J_c, die ihren Ursprung in der experimentellen Unsicherheit der elektrischen U_3-Messung hat, viel kleiner, typischerweise ~ 0,3 %, wie in D.4 gezeigt. Die Unsicherheit von k' und die aus der Unterbewertung von E_{avg} dominieren die kombinierte Standardmessunsicherheit des *absoluten Wertes* von J_c, und die relative kombinierte Standardmessunsicherheit war 4,7 % für eine typische $DyBa_2Cu_3O_7$ (DyBCO)-Schicht-Probe (D.5). Dies liegt deutlich unter dem Zielwert von 10 %. Es ist zu beachten, dass zum Zwecke der Beurteilung der Homogenität der J_c-Verteilung in großflächigen supraleitenden Dünnschichten die Unsicherheit von *k'* nicht zur Unsicherheit der J_c-Verteilung beiträgt, sofern die gleiche Probenspule verwendet wird. Daher sollte die relative Standardmessunsicherheit kleiner sein als die Ziel-Unsicherheit von 5 %.

7.4 Wirkung des Schichtrandes

Bild 8 zeigt, dass erhebliche Magnetfelder auch außerhalb der Spulenfläche existieren, die Abschirmströme in der supraleitenden Schicht induzieren. Daher muss sich die Spule für eine präzise Messung abseits vom Rand der Schicht befinden. Die Originalveröffentlichung von Claassen *et al.* empfiehlt, dass der Außendurchmesser der Spule weniger als die Hälfte der Schichtbreite betragen sollte, um den Randeffekt zu vernachlässigen [10]. Jedoch wies die jüngste numerische Berechnung mit dem Finite-Elemente-Verfahren darauf hin, dass korrekte Messungen durchgeführt werden können, wenn die Schicht lediglich 6 mm breit ist für eine Spule mit einem Außendurchmesser von 5 mm und für Z_1 = 0,2 mm [28]. Die experimentellen Ergebnisse, die in D.6 beschrieben sind, haben gezeigt, dass genaue Messungen entweder von Spule 2 oder Spule 3 (Tabelle 1) durchgeführt werden können, wenn die Außenseite der Spule mehr als 0,3 mm vom

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Schichtrand entfernt ist. Mit Blick auf eine Messunsicherheit von 0,1 mm bis 0,2 mm bei der Spulenpositionierung sollte sich die Außenseite der Spule mehr als 0,5 mm vom Rand der Schicht entfernt befinden, falls Spulen mit einem Außendurchmesser von 2 mm bis 5 mm verwendet werden.

7.5 Probenschutz

Feuchtigkeit und Wasser reagieren manchmal mit den Ba-Atomen in der YBCO-Schicht und verschlechtern die supraleitenden Eigenschaften. Wenn die YBCO-Schichten nach der Messung noch für einen bestimmten Zweck verwendet werden, sollten sie in einer feuchtigkeitsfreien Umgebung aufgewärmt werden, z. B. im Vakuum oder in He-Gas, um Degradation zu vermeiden. Einige Schutzmaßnahmen können auch für die Proben zur Verfügung gestellt werden. Eine dünne organische Beschichtung mit einer Dicke von weniger als einigen Mikrometern hat keinen Einfluss auf die Messungen und kann anschließend entfernt werden; daher kann sie zum Schutz eingesetzt werden.

8 Prüfbericht

8.1 Identifizierung der Probe

Der Prüfling muss, wenn möglich, wie folgt bezeichnet werden:

a) Name des Herstellers der Probe;

b) Klassifizierung;

c) Chargennummer;

d) chemische Zusammensetzung von Dünnschicht und Substrat;

e) Dicke und Rauheit der Dünnschicht;

f) Fertigungsprozess-Technik.

8.2 Bericht der J_c-Werte

Die J_c-Werte müssen mit dem Elektrischen-Feld-Kriterium E_c protokolliert werden. Wenn möglich, müssen die *n*-Werte, die Indizes des Potenzgesetzes der E-J-Charakteristik, zusammen protokolliert werden. Es ist bekannt, dass die Messung der *n*-Werte die Detektion degradierter Segmente innerhalb einer großflächigen HTS-Schicht erleichtert [15].

8.3 Bericht der Prüfbedingungen

Die folgenden Prüfbedingungen müssen angegeben werden:

a) Temperatur (atmosphärischer Luftdruck oder der Druck von flüssigem Stickstoff);

b) DC-Magnetfelder (falls angewendet);

c) Prüffrequenzen;

d) mögliche Auswirkungen der Eisschicht;

e) Spezifikationen der Probenspule;

f) Dicke der Abstandshalterfolie.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Annex A
(informativ)

Zusätzliche Informationen zu Abschnitt 1 bis Abschnitt 8

A.1 Kommentare zu anderen Verfahren zur Messung des lokalen J_c von großflächigen HTS-Schichten

Es gibt mehrere induktive Verfahren zur zerstörungsfreien Messung des lokalen J_c von großflächigen supraleitenden Dünnschichten [10] bis [13], [17][3], in denen einige die dritten harmonischen Spannungen $U_3\cos(3\omega t + \theta)$ detektieren [10], [11], [17] und andere nur die fundamentale Spannung verwenden [12], [13]. Bei diesen induktiven Verfahren werden AC-Magnetfelder mit Wechselströmen $I_0\cos\omega t$ in einer kleinen Spule erzeugt, die knapp über der Schicht angebracht ist, und J_c wird aus dem Schwellwert des Spulenstroms I_{th} berechnet, bei dem ein vollständiges Eindringen des AC-Magnetfeldes in die Schicht erreicht wird [14]. Wenn $I_0 < I_{th}$ ist, ist das Magnetfeld unterhalb der Schicht komplett abgeschirmt, und die supraleitende Schicht ist als eine Spiegelbild-Spule anzusehen, die durch die obere Fläche der Schicht reflektiert wird und die den gleichen Strom nur in entgegengesetzter Richtung trägt. Die Antwort $I_0\cos\omega t$ der supraleitenden Schicht ist linear, und keine dritte harmonische Spannung wird in der Spule induziert.

Für den Fall des induktiven U_3-Verfahrens, tritt U_3 bei $I_0 = I_{th}$ auf, wenn der supraleitende Abschirmstrom den kritischen Strom erreicht und seine Antwort nichtlinear wird [17]. Bei den anderen Verfahren, die nur die fundamentale Spannung verwenden, um den Zusammenbruch der vollständigen Abschirmung zu detektieren, wenn der kritische Strom erreicht ist, werden die eingedrungenen Magnetfelder durch eine Aufnehmerspule knapp unter der Schicht detektiert [12], oder es wird eine Änderung der Gegeninduktivität zweier benachbarter Spulen gemessen [13]. Bei all diesen induktiven J_c-Messungen besteht das gemeinsame Schema darin, dass das AC-Magnetfeld $2H_0\cos\omega t$ an der oberen Fläche der Schicht bei voller Eindringschwelle gemessen wird. Wir erhalten J_c, weil die Amplitude des Feldes bei vollständigem Eindringen $2H_0$ dem von $J_c d$ entspricht [17]. Das elektrische Feld E, das im Supraleiter induziert wird, kann mit derselben Gleichung (4) berechnet werden [14] und ein ähnliches Verfahren wie das in Abschnitt 6 beschriebene kann für die präzise Messung verwendet werden.

Eine anderes induktives magnetisches Verfahren mittels Hallsonden-Arrays wurde kommerzialisiert, um das lokale J_c von langen Bandleitern zu messen [29], [30]. Bei diesem Verfahren werden Magnetfeld-Profile in einem angelegten magnetischen Gleichfeld vermessen und die entsprechende Stromverteilung berechnet. Dieses Verfahren kann auch auf rechteckige großflächigen HTS-Schichten angewendet werden, die eine Breite von weniger als einigen Zentimetern haben, und hat eine bessere räumliche Auflösung als die induktive Wechselstrom – Methode unter Verwendung von kleinen Spulen.

A.2 Anforderungen

Da die dritten harmonischen Spannungen proportional zur Messfrequenz sind, sind höhere Frequenzen wünschenswert, um ein bessere S/N-Verhältnis zu erhalten. Es gibt jedoch eine Einschränkung aufgrund des Frequenzbereiches der Messgeräte (Lock-in-Verstärker und/oder Filter) und zu hoher Signalspannungen, die in der Probe induzierten werden, wenn eine Schicht mit großem $J_c d$ gemessen wird. Es wird empfohlen, eine Frequenz von 1 kHz bis 20 kHz für eine Schicht mit kleinem $J_c d$ ($\leq$ 1 kA/m) und 0,2 kHz bis 8 kHz für eine Schicht mit großem $J_c d$ ($\geq$ 20 kA/m) zu verwenden. Eine Messung in einem weiten Frequenzbereich ist wünschenswert, um die Strom-Spannungs-Charakteristiken in einem weiten Bereich des elektrischen Feldes zu erhalten. Für den allgemeinen Zweck der J_c-Messung ist jedoch eine Größenordnung des Frequenzbereiches ausreichend, um den n-Wert zu erhalten und J_c präzise zu messen.

---

[3] Zahlen in rechteckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

In dieser Norm ist die Messtemperatur auf Temperaturen des flüssigen Stickstoffs begrenzt, nämlich 77,35 K bei 1013 hPa und 65,80 K bei 200 hPa, weil ein Kältemittel benötigt wird, um die Probenspule, die Joule-Wärme erzeugt, zu kühlen. Wenn bei unterschiedlichen Temperaturen in einer Gasatmosphäre gemessen wird, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Das induktive U_3-Verfahren ist nicht nur auf großflächigen HTS-Schichten anwendbar, die auf isolierenden Substraten (Saphir, MgO usw.) beschichtet sind, sondern auch auf Bandleitern mit metallischen Substraten. Wenn die beschichteten Leiter hingegen dicke metallische Schutzschichten (Ag oder Cu) haben und deren Dicke mehr als etwa 10 µm beträgt, sind bestimmte Maßnahmen erforderlich, um den Skineffekt zu vermeiden. Eine Technik umfasst die Begrenzung der Messfrequenz auf einen ausreichend niedrigen Wert (z. B. etwa 8 kHz).

A.3 Theorie zur Erzeugung der dritten harmonischen Spannung

Hier wird die Antwort einer supraleitenden Schicht auf eine stromdurchflossene Spule präsentiert, die über der Schicht montiert ist [3]. Eine supraleitende Schicht der Dicke d, die unendlich in der *xy*-Ebene ausgedehnt ist, befindet sich bei $-d < z < 0$, wobei die obere Fläche bei $z = 0$ in der *xy*-Ebene und die untere Fläche bei $z = -d$ liegt. Eine Anregungsspule ist achsensymmetrisch bezüglich der *z*-Achse, und die Spule nimmt eine Fläche von $R_1 < r < R_2$ und $Z_1 < z < Z_2$ im zylindrischen Koordinatensystem (r, θ, z) ein. Die Spule besteht aus einem Draht mit Windungszahl N, der einen sinusförmigen Anregungsstrom $I_d(t) = I_0 \cos\omega t$ entlang der θ-Richtung trägt. Als Reaktion auf das Magnetfeld, das durch die Spule erzeugt wird, fließt der Abschirmstrom in der supraleitenden Schicht. Der Flächenstrom K_θ (d. h. die Stromdichte, integriert über die Dicke $-d < z < 0$) in der supraleitenden Schicht spielt eine entscheidende Rolle bei der Antwort der Schicht, und $|K_\theta|$ kann seinen kritischen Wert $J_c d$ nicht überschreiten.

Die Antwort der supraleitenden Schicht wird durch Messung der in der Spule induzierten Spannung $U(t)$ detektiert, und $U(t)$ wird allgemein als Fourier-Reihe ausgedrückt,

$$U(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega t + \theta_n) \tag{A.1}$$

Die fundamentale Spannung U_1 wird primär durch die Spulenimpedanz bestimmt. Die geraden Harmonischen, U_n für gerade n, sind in der Regel viel kleiner als die ungeraden Harmonischen, U_n für ungerade n. Die dritte harmonische Spannung U_3 ist der Schlüssel, denn U_3 spiegelt unmittelbar die nichtlineare Antwort (d. h. die Information über $J_c d$) der supraleitenden Schicht wider.

Die Spule erzeugt ein axial-symmetrisches Magnetfeld, und seine radiale Komponente H_r an der oberen Fläche der supraleitenden Schicht ($z = 0$) wird erhalten durch

$$H_r(r,t) = -H_0 \cos\omega t = -(I_0/2) F(r) \cos\omega t \tag{A.2}$$

Die Spulenfaktor Funktion $F(r)$ wird durch die Konfiguration der Spule bestimmt mit

$$F(r) = \frac{N}{2\pi S} \int_{R_1}^{R_2} dr' \int_0^{2\pi} d\theta \int_{Z_1}^{Z_2} dz \frac{r' z \cos\theta}{\left(z^2 + r^2 + r'^2 - 2rr'\cos\theta\right)^{3/2}}, \tag{A.3}$$

Dabei ist $S = (R_2 - R_1)(Z_2 - Z_1)$ die Querschnittsfläche der Spule. $F(r)$ hat in der Regel ein Maximum $F_m > 0$ bei $r = r_m$ [wobei r_m in etwa in der Nähe von ~$(R_1 + R_2)/2$ liegt] und $F(0) = F(\infty) = 0$ ist.

Wenn $0 < I_0 < I_{th}$ ist, dringt das Magnetfeld aus der Spule nicht unter die Schicht ein ($z < -d$). In solchen Fällen wird die magnetische Feldverteilung über der Schicht ($z > 0$) einfach aus der Spiegelbild-Technik erhalten. Das Magnetfeld aus der Bild-Spule (d. h. aus dem Abschirmstrom, der in der supraleitenden Schicht fließt) hebt die senkrechte Komponente H_z auf, und die parallele Komponente H_r verdoppelt sich. Der

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

Flächenstrom K_θ in der supraleitenden Schicht wird daher aus $K_\theta(r, t) = 2H_r(r, t) = -I_0F(r)\cos\omega t$ erhalten. Wegen der linearen Antwort der supraleitenden Schicht für $0 < I_0 < I_{th}$ enthält die in der Spule induzierte Spannung keine Oberschwingungen.

Es ist zu beachten, dass die Amplitude der Flächenstromdichte, $|K_\theta| = 2|H_r| \le I_0F(r) \le I_0F_m$, nicht den kritischen Wert J_cd überschreiten kann. Der Schwellenstrom I_{th} wird so bestimmt, dass $|K_\theta| \le I_0F_m$ J_cd erreicht, wenn $I_0 = I_{th}$ ist, und wird erhalten aus

$$I_{th} = J_cd/F_m = J_cd/k \tag{A.4}$$

Dabei wird der (theoretische) Spulen-Koeffizient aus $k = F_m$ gewonnen.

Wenn $I_0 > I_{th}$ ist, dringt das Magnetfeld unterhalb der supraleitenden Schicht ein, und die nichtlineare Antwort von K_θ liefert die Erzeugung der harmonischen Spannungen in der Spule.

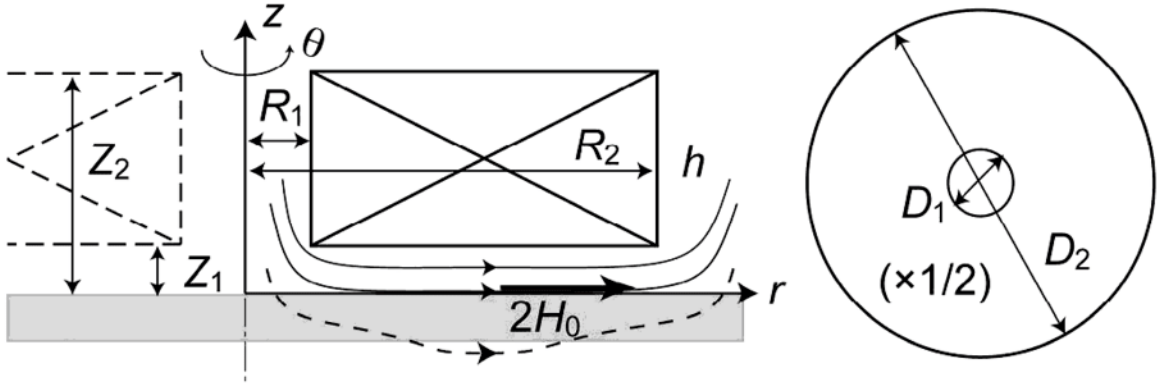


Bild A.1 – Illustration der Probenspule und des Magnetfeldes während der Messung

A.4 Berechnung des induzierten elektrischen Feldes

Hier wird das durchschnittliche E approximiert, das in der supraleitenden Schicht am Schwellwert des vollständigen Eindringens $I_0 = I_{th}$ induziert wird, mit dem Bean-Modell [14]. Diese Näherung geht von einem halb-unendlichen Supraleiter unterhalb der *xy*-Ebene ($z \le 0$) aus, und die Schicht wird als Teil dieses Supraleiters angesehen ($-d \le z \le 0$). Wenn ein sinusförmiges Magnetfeld $H_{x0} = 2H_0\cos\omega t$ ($2H_0 = J_cd$) parallel zur *x*-Richtung an der Oberfläche des Supraleiters angelegt wird, besitzt das induzierte E nur die *y*-Komponente $E_y(z)$, und $E_y(z \le -d)$ ist null, da die magnetischen Flüsse nur die untere Oberfläche der Schicht ($z = -d$) erreichen. $E_y(z)$ wird durch Integration von $-\mu_0(dH_x/dt)$ von $z = -d$ bis z berechnet mit dem Ergebnis $E_y(z) = -\mu_0\omega dH_0\sin\omega t(1 - \cos\omega t + 2z/d)$. Das zeitabhängige elektrische Oberflächenfeld $|E_y(z = 0)|$ hat seinen Höchstwert bei $\omega t = 2\pi/3$, und $\max|E_y(0)|$ ist dann gleich $(3\sqrt{3}/4)\,\mu_0\omega dH_0$. Da $\max|E_y(z)|$ seinen Höchstwert bei $z = 0$ hat (die obere Fläche der Schicht) und bei $z = -d$ (die untere Fläche der Schicht) null ist, ist das durchschnittliche Ausmaß von $\max|E_y(z)|$ schätzungsweise die Hälfte von $\max|E_y(0)|$,

$$E_{avg} \approx \left(3\sqrt{3}\pi/4\right)\mu_0 fdH_0 \approx 2{,}04\mu_0 fd^2J_c = 2{,}04\mu kfdI_{th}\,. \tag{A.5}$$

Für typische Parameter der Messung, $f = 1$ kHz, $d = 250$ nm und $J_c = 10^{10}$ A/m^2, ist das berechnete $E \sim 2$ μV/m.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10

A.5 Theoretischer Spulen-Koeffizient k und experimenteller Spulen-Koeffizient k'

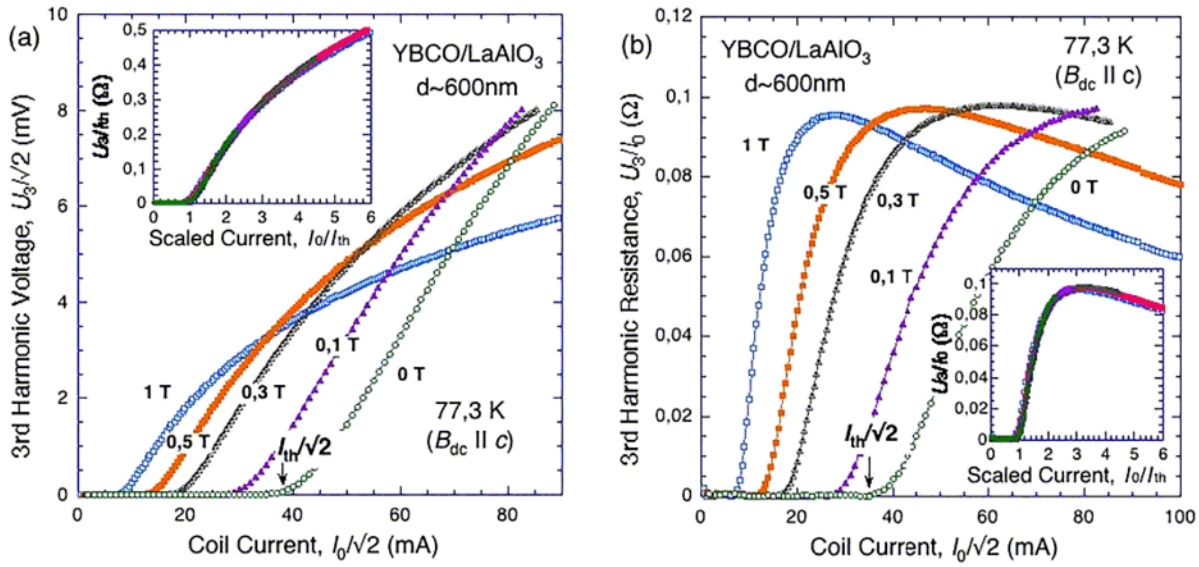
Hier wird das Grundkonzept bezüglich des theoretischen Spulen-Koeffizienten $k = J_c d/I_{th}$ und des experimentellen Koeffizienten k' für den Fall des induktiven U_3-Verfahrens erläutert. Wenn der Spulenstrom I_0 dem Schwellenstrom I_{th} entspricht, durchdringen das *höchste* Magnetfeld unterhalb der Spule $2H_{0,max} = J_c d$ und das Magnetfeld gerade vollständig die Schicht. Da $2H_{0,max}$ theoretisch berechnet werden kann, kann der theoretische Spulen-Koeffizient $k = J_c d/I_{th}$ berechnet werden. Das „wahre I_{th}" hingegen korrespondiert mit dem Spulenstrom, bei dem ein unendlich kleines U_3 in der Spule erzeugt wird. Weil es unmöglich ist, $U_3 \approx 0$ zu detektieren, um ein „wahres I_{th}" zu erhalten, wird ein alternativer Ansatz benötigt, um ein „experimentelles I_{th}" und einen entsprechenden experimentellen Spulen-Koeffizienten k' zu erhalten.

A.6 Skalierung der $U_3 - I_0$-Kurven und das Kriterium konstanter Induktivität zur Bestimmung von I_{th}

Der Einfachheit halber wurde der (experimentelle) Schwellenstrom I_{th} oft durch ein konstantes Spannungs-Kriterium bestimmt, z. B. $U_3/\sqrt{2}$ = 50 μV. Allerdings ist die Verwendung eines konstanten Spannungs-Kriteriums problematisch. Theoretische Analysen über das Verhältnis zwischen I_0 und U_3 zeigten, dass es ein deutliches Skalenverhalten $U_3/I_{th} = \omega G(I_0/I_{th})$ gibt, wobei G eine Skalierungsfunktion ist, die nur durch die Vorgaben der Probenspule bestimmt wird [11], [17]. Diese Gleichung impliziert, dass die U_3- vs. I_0-Kurven mit verschiedenen I_{th}-Werte zu einer Kurve zusammenfallen sollten, wenn sie auf I_{th} normiert sind. Das kleine Bild in Bild A.2 a) zeigt deutlich dieses Skalenverhalten. Wie der dritte harmonische Widerstand $U_3/I_0 = \omega G(I_0/I_{th})/(I_0/I_{th})$, ist U_3/I_0 selbst bereits normiert (Bild A.2 b)) und skaliert mit dem skalierten Strom I_0/I_{th} (kleines Bild in Bild A.2 b)). Da die dritte harmonische Spannung U_3 proportional zu I_{th} ist, verursacht die Bestimmung von I_{th} durch ein konstantes Spannungs-Kriterium von Natur aus einen systematischen Fehler, es wird nämlich das J_c einer Probe mit $J_c d$ größer (kleiner) als die Standard-Probe unterschätzt (überschätzt) [16]. Aus dem beim dritten harmonischen Widerstand U_3/I_0 beobachteten Skalenverhalten (Bild A.2 b)) wird nachgewiesen, dass das I_{th} durch ein konstantes Widerstands-Kriterium, wie U_3/I_0 = 2 mΩ, ermittelt werden sollte. Da die U_3-Werte proportional zur Messfrequenz sind, sollte darüber hinaus ein konstantes Induktivitäts-Kriterium, wie U_3/fI_0 = 2 $\mu\Omega$ • s, verwendet werden, wenn die U_3-Messungen mit mehreren Frequenzen durchgeführt werden [16], [31]. Es ist auch zu beachten, dass ein solches Skalenverhalten die Grundlage der $J_c d$-Messung bildet. Das Verfahren dazu ist in 6.2 bis 6.4 mit einer Bezugs-Probe (Kalibrierungs-Wafer) beschrieben.

Da J_c eine Funktion des elektrischen Feldes ist, wird empfohlen, es mit einem konstanten Elektrischen-Feld-Kriterium zu bestimmen, indem ein Multifrequenz-Ansatz durch die in 6.2 und 6.3 beschriebenen Verfahren angewendet wird. Ein Beispiel für eine Multifrequenz-Messung ist dargestellt in Bild A.3 mit $U_3/fI_0 = 2\pi L_c = 2\mu\Omega$ • s.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10



a) U_3- vs. I_0-Kurven und ihre Skalierung b) U_3/I_0- vs. I_0-Kurven und ihre Skalierung

Bild A.2 – (a) U_3 und (b) U_3/I_0 aufgetragen gegen I_0 in einer YBCO-Dünnschicht, gemessen in angelegten DC-Magnetfeldern, und die beobachtete Skalierung , wenn mit I_{th} normiert wird

Englisch	Deutsch
3rd Harmonic Voltage	3. harmonische Spannung
Scaled Current	Skalierter Strom
Coil Current	Spulenstrom

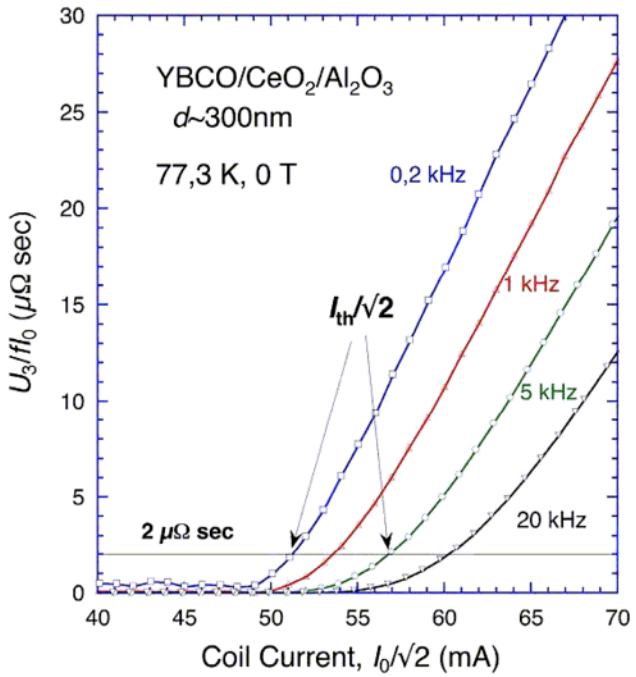


Bild A.3 – Beispiel für die normierten dritten harmonischen Spannungen (U_3/fI_0), gemessen bei verschiedenen Frequenzen

Englisch	Deutsch
Coil Current	Spulenstrom

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN EN IEC 61788-17:2019-10