DEUTSCHE NORM *Entwurf* Januar 2009

DIN IEC 61788-15 (VDE 0390-15)

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 2009-03-31

Entwurf

Supraleitfähigkeit – Teil 15: Messung der elektronischen Eigenschaften – Oberflächenimpedanz von Supraleiterfilmen bei Mikrowellenfrequenzen – (IEC 90/218/CD:2008)

Superconductivity –
Part 15: Electronic characteristic measurements –
Intrinsic surface impedance of superconductor films at microwave frequencies
(IEC 90/218/CD:2008)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2009-01-19 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an **dke@vde.com** in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter **www.dke.de/stellungnahme** abgerufen werden
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

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

Gesamtumfang 86 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

AVA Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Inhalt

Seite

Einleitung 7

1 Anwendungsbereich 8

2 Normative Verweisungen 8

3 Begriffe und Definitionen 8

4 Anforderungen 9

5 Messapparaturen 9

5.1 Messausrüstung 9

5.2 Messapparatur für R_S 10

5.3 Messapparatur für X_S 10

5.4 Dielektrische Zylinder 14

6 Messablauf 15

6.1 Probenvorbereitung 15

6.2 Aufbau 15

6.3 Messung des Referenzniveaus 15

6.4 Messung des intrinsischen R_S von Sauerstoff-freiem hochreinem Kupfer 16

6.5 Bestimmung des effektiven R_S von Supraleiterfilmen und des $\tan\delta$ der dielektrischen Standardzylinder 18

6.6 Bestimmung der Eindringtiefe 19

6.7 Bestimmung des intrinsischen Z_S 20

7 Messunsicherheit des Prüfverfahrens 21

7.1 Messung der Leerlaufgüte 21

7.2 Messung des Verlustfaktors 21

7.3 Temperatur 22

7.4 Proben und Trägerstruktur für den Halter 22

8 Prüfbericht 22

8.1 Probenidentifizierung 22

8.2 Bericht zu den intrinsischen Z_S -Werten 22

8.3 Bericht über die Prüfbedingungen 23

Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen zu den Abschnitt 1 bis 8 24

A.1 Anwendungsbereich 24

A.2 Anforderungen 24

A.3 Theorie und Messverfahren für die intrinsische Oberflächenimpedanz 24

A.3.1 Theoretische Beziehung zwischen dem intrinsischen Z_S und dem effektiven Z_S [1)] 24

A.3.2 Berechnung der Geometriefaktoren[3)] 28

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Seite

A.3.3 Verfahren zur Bestimmung des intrinsischen Z_S [1), 3), 4)] 29

A.4 Abmessungen des Standardsaphirzylinders 31

A.5 Abmessungen des Resonators vom geschlossenen Typ 32

A.6 Prüfergebnisse 32

A.7 Messunsicherheit der Prüfergebnisse 36

A.8 Literaturhinweise 38

Anhang B (informativ) Messunsicherheitsbetrachtungen 39

B.1 Überblick 39

B.2 Definitionen 39

B.3 Betrachtung des Konzepts der Messunsicherheit 40

B.4 Beispiel für eine Bestimmung von Messunsicherheiten für TC 90 – Normen 41

B.5 Literaturangaben 42

Literaturverzeichnis 43

Bilder

Bild 1 – Schemazeichnung des Messaufbaus für das intrinsische Z_S von HTS-Filmen bei Kryotemperaturen 10

Bild 2 – Schemazeichnung eines dielektrischen Resonators mit einem Schalter für die thermische Verbindung 11

Bild 3 – Typischer dielektrischer Resonator mit einer beweglichen oberen Platte 12

Bild 4 – Schalterblock für die thermische Verbindung 13

Bild 5 – Dielektrischer Resonator, zusammengesetzt mit dem Schalterblock für die thermische Verbindung 14

Bild 6 – Ein typischer Resonanzpeak. Die Eingangsdämpfung *IA*, die Resonanzfrequenz f_0 und die Halbwertsbreite Δf_{3dB} werden definiert. 17

Bild 7 – Reflexionsstreuparameter S_{11} und S_{22}. 19

Bild 8 – Definition der Begriffe aus Tabelle 4 22

Bild A.1 – Querschnittsansicht eines dielektrischen Resonators 24

Bild A.2 – Darstellung einer vereinfachten Querschnittsansicht eines dielektrischen Resonators 28

Bild A.3 – Modendiagramm für einen Saphirresonator 33

Bild A.4 – Frequenzantwort des Saphirresonators 33

Bild A.5 – Q_U über der Temperatur für die TE_{021}- sowie die TE_{012}-Mode des Saphirresonators bei 360 nm dicken YBCO-Filmen. 34

Bild A.6 – Die Resonanzfrequenz f_0 über der Temperatur für die TE_{021}- sowie die TE_{012}-Mode des Saphirresonators bei 360 nm dicken YBCO-Filmen. 34

Bild A.7 – Die Temperaturabhängigkeit des R_S^{eff} von YBCO-Filmen mit Dicken von 70 nm bis 360 nm gemessen bei etwa 40 GHz. 35

Bild A.8 – Die Eindringtiefe λ von 360 nm dicken YBCO-Filmen gemessen bei 10 kHz bei Anwendung des Verfahrens der wechselseitigen Induktion und bei etwa 40 GHz unter Verwendung eines Saphirresonators. 35

Bild A.9 – Die Temperaturabhängigkeit des intrinsischen Oberflächenwiderstands R_S von YBCO-Filmen mit Dicken von 70 nm bis 360 nm gemessen bei etwa 40 GHz. 36

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Seite

Bild A.10 – Vergleich des temperaturabhängigen Wertes jedes Terms in Gleichung (A.3-20) für die TE_{021}-Mode des Standardsaphirzylinders. 37

Bild A.11 – Vergleich des temperaturabhängigen Wertes jedes Terms in Gleichung (A.3-20) für die TE_{012}-Mode des Standardsaphirzylinders. 37

Bild A.12 – Temperaturabhängigkeit der Messunsicherheit des intrinsischen R_S von YBCO-Filmen. 38

Tabellen

Tabelle 1 – Typische Abmessungen eines Saphirzylinders 15

Tabelle 2 – Typische Abmessungen von OFHC-Hohlraumresonatoren und HTS-Filmen 15

Tabelle 3 – Spezifikationen des Vektornetzwerkanalysators 21

Tabelle 4 – Typ B – Messunsicherheiten für die Spezifikationen der Saphirzylinder 21

Tabelle A.1 – Geometriefaktoren und Füllfaktoren berechnet für den Standardsaphirresonator 29

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/218/CD:2008 „Superconductivity – Part 15: Electronic characteristic measurements – Intrinsic surface impedance of superconductor films at microwave frequencies“ (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 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 prEN nur 2 Monate 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 diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 184 „Supraleiter“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-815:2004	Deutsche Ausgabe IEV Teil 815:2005-07	–
EN 61788-7:2006	IEC 61788-7:2005	DIN EN 61788-7 (VDE 0390-7):2007-08	VDE 0390-7

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Nationaler Anhang NB
(informativ)

Literaturhinweise

Deutsche Ausgabe IEC Teil 815, *Internationale Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 815: Supraleitung.*

DIN EN 61788-7 (VDE 0390-7), *Supraleitfähigkeit – Teil 7: Charakteristische elektronische Messungen - Oberflächenwiderstand von Supraleitern bei Frequenzen im Mikrowellenbereich.*

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Supraleitfähigkeit
Teil 15: Messung der elektronischen Eigenschaften – Oberflächenimpedanz von Supraleiterfilmen bei Mikrowellenfrequenzen

Einleitung

Seit der Entdeckung der Hoch-T_c-Supraleiter (HTS) sind weltweit eingehende Forschungsarbeiten bezüglich elektronischer Anwendungen unternommen und Anwendungen großen Maßstabs mit HTS-Filtersubsystemen basierend auf $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) bereits kommerzialisiert worden [1].

Vorzüge der Verwendung von HTS-Filmen für Mikrowellengeräte wie Resonatoren, Filter, Antennen, Verzögerungsleitungen etc. beinhalten, dass i) Mikrowellenverluste von HTS-Filmen extrem gering sein können und dass ii) wegen des extrem geringen Mikrowellenoberflächenwiderstands (R_S) [2] und der frequenzunabhängigen Eindringtiefe (λ) von HTS-Filmen keine Signaldispersion in Übertragungsleitungen, die aus HTS-Filmen bestehen, stattfindet.

Diesbezüglich ist es, wenn es um die Auslegung von auf HTS basierenden Mikrowellengeräten geht, wichtig, die Oberflächenimpedanz (Z_S) von HTS-Filmen zu messen. Es ist $Z_S = R_S + jX_S$ und $X_S = \omega\mu_0\lambda$ (Dabei bezeichnen ω und μ_0 die Kreisfrequenz bzw. die Vakuumpermeabilität, X_S die Oberflächenreaktanz. $X_S = \omega\mu_0\lambda$ ist bei Temperaturen, die nicht zu nahe an die kritische Temperatur T_c von HTS-Filmen heranreichen, gültig).

Es sind verschiedene Berichte über die Messung der R_S-Werte von HTS-Filmen bei Mikrowellenfrequenzen mit typischen R_S-Werten von HTS-Filmen so gering wie 1/100stel bis 1/50stel des Wertes für Sauerstoff-freies hochreines Kupfer (OFHC) bei 77 K und 10 GHz erstellt worden. Der R_S-Wert konventioneller Supraleiter wie z. B. Niob (Nb) konnte leicht gemessen werden, indem Nb-Hohlraumresonatoren verwendet und die Güte des Resonators Q in den R_S-Wert von Nb umgerechnet wurden. Ein solches konventionelles Messverfahren konnte jedoch nicht länger auf HTS-Filme, die auf dielektrischen Substraten abgeschieden worden sind und mit denen es grundsätzlich unmöglich ist, vollständig aus HTS-Material bestehende Hohlraumresonatoren herzustellen, angewandt werden. Stattdessen waren für die Messung des R_S-Wertes von HTS-Filmen verschiedene andere Verfahren nützlich, die das Mikrostreifenleiterresonatorverfahren [3], das koplanare Mikrostreifenleiterresonatorverfahren [4], das Parallelplattenresonatorverfahren [5] und das dielektrische Resonatorverfahren [7 - 10] einbeziehen. Von den genannten Verfahren war das dielektrische Resonatorverfahren sehr nützlich, da dieses Verfahren es ermöglicht, den R_S-Wert auf nicht-invasive Weise und genau zu messen. Im Jahre 2002 veröffentlichte die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) das dielektrische Resonatorverfahren als einen Messstandard [11].

Das in der vorliegenden Norm vorgestellte Testverfahren ermöglicht es, nicht nur den intrinsischen Oberflächenwiderstand, sondern durch die Verwendung eines einzelnen Saphirresonators auch die intrinsische Oberflächenreaktanz von HTS-Filmen ungeachtet der Filmdicke zu messen. Dieses Verfahren unterscheidet sich von dem in der bereits vorliegenden IEC-Norm (IEC 61788-7 Ed. 2) verwendeten, die sich darauf beschränkt, den Oberflächenwiderstand von Supraleiterfilmen mit Dicken von mehr als 3 λ bei der erfassten Temperatur unter Verwendung zwei Saphirresonatoren zu messen. Tatsächlich stellen die gemessenen Oberflächenwiderstände von HTS-Filmen mit verschiedenen Dicken unterhalb von 3 λ effektive Werte anstelle von intrinsischen dar, die nicht für den direkten Vergleich der Mikrowelleneigenschaften von HTS-Filmen untereinander verwendet werden können [12, 13]. Die Verwendung einzelner Saphirresonatoren, wie in dieser Norm vorgeschlagen, erlaubt es weiterhin, die Messunsicherheit des Oberflächenwiderstands, die aus der Verwendung zweier Saphirresonatoren mit Saphirzylindern von nur leicht unterschiedlicher Qualität herrühren mag, zu reduzieren.

Das in dieser Norm vorgestellte Messverfahren kann ebenso auf HTS-beschichtete Leiter, HTS-Massivleiter und andere Supraleiter angewandt werden, für die Modelle für die Eindringtiefe etabliert worden sind.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Es ist das Ziel dieser Norm, den Ingenieuren, die auf den Feldern der Elektronik und der Supraleitertechnologie arbeiten, unter den gegenwärtigen Umständen eine geeignete und akzeptable technische Basis zur Verfügung zu stellen.

Das von dieser Norm abgedeckte Testverfahren ist auf dem VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) TWA-16-Treffen diskutiert worden.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 61788 beschreibt Messungen der intrinsischen Oberflächenimpedanz (Z_S) von HTS-Filmen bei Mikrowellenfrequenzen mit Hilfe eines modifizierten dielektrischen Resonatorverfahrens im Doppelresonanzmodus [13, 14]. Gegenstand der Messung ist, die Temperaturabhängigkeit des intrinsischen Z_S bei der Resonanzfrequenz zu erhalten.

Der Frequenzbereich und die Messauflösung für das intrinsische Z_S von HTS-Filmen sind wie folgt:

– Frequenz: ~ 40 GHz
– Messauflösung: 0,01 mΩ bei 10 GHz

Die Daten für das intrinsische Z_S bei der gemessenen Frequenz sowie die - unter der Annahme des f^2 – Gesetzes für den intrinsischen Oberflächenwiderstand R_S (f < 50 GHz) und des f -Gesetzes für die intrinsische Oberflächenreaktanz X_S zum Vergleich - auf 10 GHz skalierten Daten sollen angegeben werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente 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 60050-815:2004, *International Electrotechnical Vocabularly – Part 815: Superconductivity*

IEC 61788-7:2005, *Superconductivity – Part 7: Electronic characteristics measurements – Surface resistance of superconductors at microwave frequencies*

3 Begriffe und Definitionen

Für die Zwecke dieser Norm gelten die in IEC 60050-815 angegebenen Definitionen.

3.1
Intrinsische Oberflächenimpedanz
im allgemeinen ist die charakteristische Oberflächenimpedanz Z_S von Leitern einschließlich Supraleitern definiert als das Verhältnis der Tangentialkomponente des elektrischen Feldes (E_t) und des magnetischen Feldes (H_t) an einer Leiteroberfläche:

$$Z_S = E_t / H_t = R_S + jX_S \,. \qquad (1)$$

Dabei bezeichnet R_S den Oberflächenwiderstand und X_S die Oberflächenreaktanz. Falls die Dicke des zu testenden Leiters (oder Supraleiters) hinreichend größer ist als die Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes, lässt sich Z_S ausdrücken als

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

$$Z_S = \left(\frac{\mu}{\varepsilon}\right)^{1/2} = \left(\frac{j\mu_0\omega}{\sigma}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

wobei ε und μ die Dielektrizitätszahl bzw. die Permeabilität des zu messenden Leiters (bzw. Supraleiters) bezeichnen, μ_0 die Vakuumpermeabilität, σ die Leitfähigkeit des Leiters (bzw. Supraleiters) und ω die gemessene Kreisfrequenz, auch als intrinsisches Z_S bezeichnet. σ ist real für Leiter und komplex für Supraleiter.

3.2
Effektive Oberflächenimpedanz
falls die Dicke des zu testenden Leiters (bzw. Supraleiters) nicht hinreichend größer ist als die Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder, weicht das durch Gleichung (1) in Abschnitt 3.1 definierte Z_S deutlich von dem durch Gleichung (2) in Abschnitt 3.1 definierten ab. In diesem Fall wird das durch Gleichung (1) definierte Z_S als effektive Oberflächenimpedanz Z_S^{eff} mit

$$Z_S^{\text{eff}} = E_t / H_t = R_S^{\text{eff}} + jX_S^{\text{eff}} \quad (3)$$

bezeichnet. Hierbei ist R_S^{eff} der effektive Oberflächenwiderstand und X_S^{eff} die effektive Oberflächenreaktanz.

4 Anforderungen

Das Z_S von HTS-Filmen soll gemessen werden, indem ein Mikrowellensignal an einen dielektrischen Resonator mit der Supraleiterprobe angelegt und dann die Dämpfung des Resonators bei jeder Frequenz gemessen wird. Die Frequenz soll einen Bereich mit der Resonanzfrequenz als Zentrum überstreichen und die Dämpfungs – Frequenzkenndaten sollen aufgezeichnet werden, um den Q- Wert, der dem Verlust entspricht, zu erhalten.

Die Zielmessunsicherheit dieses Verfahrens ist weniger als 10 % bei Temperaturen von 30 K bis 80 K.

Es liegt in der Verantwortlichkeit des Anwenders dieser Norm, Sicherheits- und Gesundheitsschutzmaßnahmen zu berücksichtigen und zu etablieren und die Anwendbarkeit von Durchführungsbeschränkungen vor der Verwendung zu ermitteln.

Es bestehen Gefahren bei dieser Art von Messung. Die Verwendung eines Kryosystems ist notwendig, um die Supraleiter zu kühlen und so den Übergang in den supraleitenden Zustand zu erlauben. Direkter Kontakt der Haut mit kalten Gerätekomponenten kann unmittelbares Gefrieren verursachen, ebenso wie der direkte Kontakt mit verschüttetem Kühlmittel. Die Verwendung eines HF-Generators ist ebenso notwendig, um die Hochfrequenzeigenschaften von Materialien zu messen. Falls seine Leistung zu hoch ist, kann direkter Kontakt mit dem menschlichen Körper unmittelbar Verbrennungen verursachen.

5 Messapparaturen

5.1 Messausrüstung

Bild 1 zeigt eine Schemazeichnung der für die Mikrowellenmessung erforderlichen Ausrüstung. Die Ausrüstung besteht aus einem Netzwerkanalysator für die Transmissionsmessungen, einem Messgerät und Thermometern, um die Temperatur des zu untersuchenden HTS-Films zu überwachen.

Die von einer geeigneten Mikrowellenquelle wie z. B. einem synthetischen Wobbler erzeugte Eingangsleistung wird in den dielektrischen Resonator, der in der Messapparatur befestigt ist, eingespeist. Die Transmissionskenndaten werden auf dem Display des Netzwerkanalysators angezeigt.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Die Messapparatur ist in einem Kryokühler mit Temperaturüberwachung befestigt.

Um das Z_S der HTS-Filme zu messen, wird ein Vektornetzwerkanalysator empfohlen, da er auf Grund seines größeren Dynamikbereichs eine höhere Messgenauigkeit aufweist als ein skalarer Netzwerkanalysator.

5.2 Messapparatur für R_S

Bild 2 zeigt die Schemazeichnung einer typischen Messapparatur für das R_S von HTS-Filmen, die auf einem Substrat mit einer flachen Oberfläche aufgebracht worden sind. Der untere HTS-Film wird von einer Feder, die aus Berylliumkupfer hergestellt wurde, heruntergedrückt. Die Verwendung einer tellerförmigen Feder wird zur Verbesserung der Messunsicherheit empfohlen. Dieser Federtyp reduziert die Reibung zwischen der Feder und dem anderen Teil der Apparatur und erlaubt eine sanfte Bewegung der HTS-Filme im Verlaufe der thermischen Expansion / Kontraktion des mit einem Dielektrikum gefüllten Hohlraumresonators. Der obere HTS-Film ist mit Hilfe von GE-Lack an die an der Oberseite befindliche Kupferplatte geklebt.

Jede der beiden halbstarren Koaxialleitungen soll am Ende eine kleine Koppelschleife haben. Die Ebene der Koppelschleife soll parallel zu der der HTS-Filme angeordnet sein, um unerwünschte TM_{mn0} –Moden zu unterdrücken. Die Koppelschleifen sollen vor den Messungen sorgfältig untersucht werden, um gute Koppelbedingungen aufrecht zu erhalten. Die Leitungen können nach rechts oder nach links verschoben werden, um die Eingangsdämpfung (eng. „insertion attenuation“, *IA*) einzustellen. Bei dieser Anpassung soll die Kopplung unerwünschter Hohlraumresonatormoden mit der interessierenden dielektrischen Resonanzmode unterdrückt werden. Unerwünschte, parasitäre Kopplungen mit den anderen Moden reduzieren die hohe Güte des TE-Moden-Resonators. Um parasitäre Kopplungen zu unterdrücken, sollen dielektrische Resonatoren derart ausgelegt werden, dass die Frequenzen der interessierenden Resonanzmoden von denen benachbarter parasitärer Moden gut getrennt sind. Der dielektrische Zylinder soll mit Hilfe von verlustarmem Epoxidharzkleber im Zentrum des Supraleiterfilms am unteren Ende des Resonators befestigt werden.

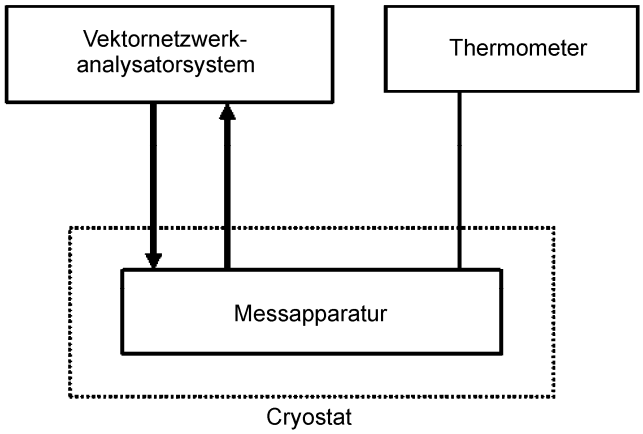


Bild 1 – Schemazeichnung des Messaufbaus für das intrinsische Z_S von HTS-Filmen bei Kryotemperaturen

5.3 Messapparatur für X_S

Wie in Bild 2 gezeigt ist die Apparatur für die Bestimmung des X_S von HTS-Filmen, die auf einem Substrat mit einer flachen Oberfläche aufgebracht worden sind, dieselbe wie die für R_S, außer dass der obere HTS-Film während der Messungen vom Rest durch einen schmalen Spalt (typischerweise 10 µm) getrennt ist. Der Spaltabstand soll auf einen Wert eingestellt werden, der zuvor bei Raumtemperatur mit Hilfe entweder eines Mikrometers oder eines hochauflösenden Schrittmotors, verbunden durch einen Teflonzylinder mit dem oberen Supraleiterfilm, bestimmt worden ist. Die realen Spaltabstände wären dann bei Kryotemperaturen auf Grund der thermischen Kontraktion des Teflonzylinders etwas größer als die entsprechenden

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

vorherbestimmten. Der Spaltabstand soll klein genug sein, um signifikante Strahlungsverluste nicht entstehen zu lassen, und groß genug, um eine Temperaturkontrolle des oberen Supraleiterfilms zu ermöglichen.

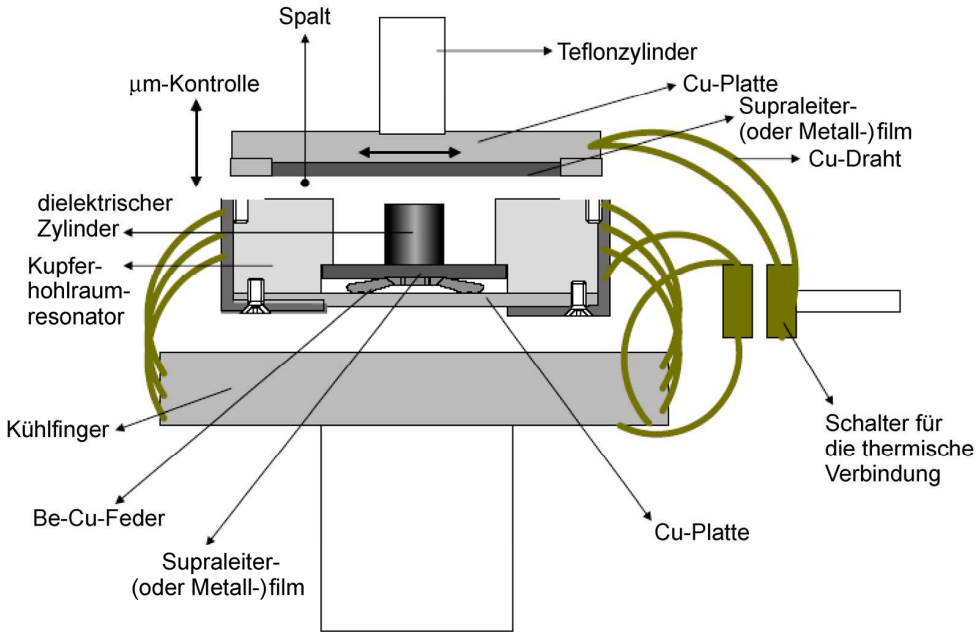


Bild 2 – Schemazeichnung eines dielektrischen Resonators mit einem Schalter für die thermische Verbindung

Erreicht der Resonator die tiefste Temperatur, wird der Schalter geöffnet, um den thermischen Pfad zwischen dem oberen Supraleiterfilm und dem Kühlfinger des Kryostaten zu unterbrechen. In diesem Fall beginnt die Temperatur des oberen Supraleiterfilms mit der Zeit anzusteigen, während der Rest des Resonators auf einer konstanten Temperatur bleibt. Eingehendere Beschreibungen eines dielektrischen Resonators mit einer beweglichen oberen Platte, mit einem Schalterblock für die thermische Verbindung sowie die entsprechende Beschreibung eines dielektrischen Resonators, zusammengesetzt mit dem Schalterblock sind in den Bildern 3 bis 5 gezeigt.

Die Anordnungen der halbstarren Koaxialleitungen sind dieselben wie die in Abschnitt 5.2 beschriebenen. Kopplungen unerwünschter Hohlraumresonatormoden an die interessierende dielektrische Resonanzmode sollten vollständig unterdrückt werden. Unerwünschte, parasitäre Kopplungen an die anderen Moden erhöhen die Unsicherheit der gemessenen Resonanzfrequenz des TE-Moden-Resonators und erschweren es, Änderungen der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von den Temperaturdaten genau zu messen.

AVA Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Bild 3 – Typischer dielektrischer Resonator mit einer beweglichen oberen Platte

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

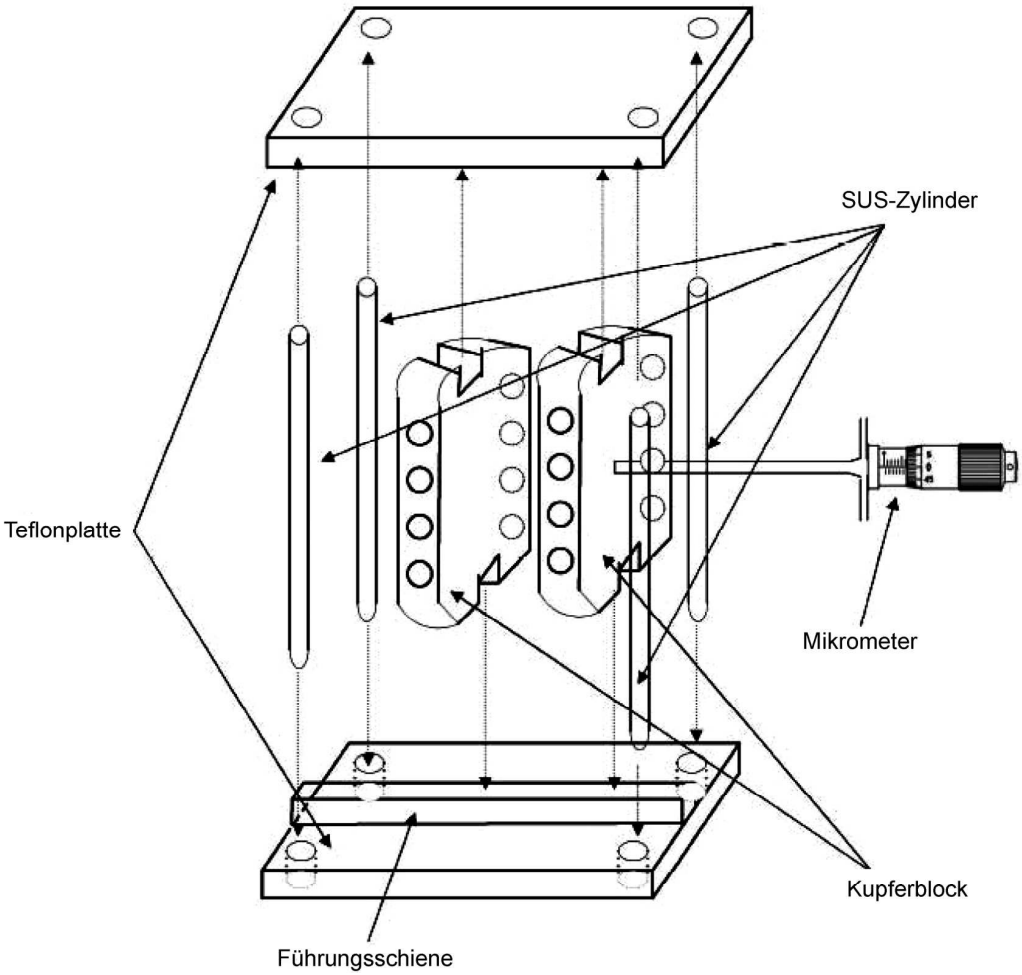


Bild 4 – Schalterblock für die thermische Verbindung

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Bild 5 – Dielektrischer Resonator, zusammengesetzt mit dem Schalterblock für die thermische Verbindung

5.4 Dielektrische Zylinder

Dielektrische Resonatoren sollen so ausgelegt werden, dass die TE_{021}- und die TE_{012}-Moden nahe nebeneinander erscheinen, ohne an die andern TM- oder HE-Moden gekoppelt zu sein. Weiterhin sollen die Resonanzfrequenzen der beiden Moden nahe genug beieinander liegen, um die Messunsicherheit von Z_S zu reduzieren, und weit genug voneinander entfernt, dass keine Kopplung zwischen ihnen entsteht. Die Differenz zwischen den Resonanzfrequenzen der TE_{021}- und der TE_{012}-Mode soll weniger als 400 MHz betragen, einem Wert, der etwa 1 % jeder Resonanzfrequenz entspricht, und mehr als 100 MHz in Anbetracht der reduzierten Resonatorgüte bei höheren Temperaturen.

Die dielektrischen Zylinder sollen ein niedriges $\tan\delta$ und eine geringe Temperaturvariabilität der dielektrischen Konstanten aufweisen, um die erforderliche Messgenauigkeit von R_S bzw. X_S zu erreichen. In dieser Hinsicht werden entlang der *c*-Achse geschnittene Saphirzylinder empfohlen, um Z_S genau zu messen (die relative Dielektrizitätskonstante entlang der a-b-Ebene beträgt $\varepsilon'_{a-b} = 9{,}28$ bei 77 K für Saphir).

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Designschemata für die Standardsaphirzylinder werden in den Anhängen A.4 und A.5 beschrieben. Tabelle 1 zeigt typische Abmessungen des Standardsaphirzylinders, der für den Saphirresonator mit der TE_{021}-Mode bei 40 GHz verwendet wird. Die Resonanzfrequenzen werden kleiner, wenn die Abmessungen größer werden, für die jedoch größere HTS-Filme verwendet werden müssen, um die erforderliche Messunsicherheit aufrecht zu erhalten.

6 Messablauf

6.1 Probenvorbereitung

Sauerstoff-freies hochreines Kupfer (eng. oxygen-free high-purity copper, abgekürzt OFHC) soll für die umhüllende Wand des dielektrischen Resonators verwendet werden. Der Durchmesser des OFHC-Hohlraumresonators soll so festgelegt werden, dass die erforderliche Messunsicherheit erreicht werden kann. Typische Abmessungen von OFHC-Hohraumresonatoren und HTS-Filmen empfohlen für die Standard-saphirzylinder sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 1 – Typische Abmessungen eines Saphirzylinders

Frequenzen in Gigahertz

Durchmesser mm	Höhe mm	TE_{011}-Modenfrequenz	TE_{012}-Modenfrequenz	TE_{021}-Modenfrequenz
5,0	2,86	25,27	40,06	39,97

Tabelle 2 – Typische Abmessungen von OFHC-Hohlraumresonatoren und HTS-Filmen

Maße in Millimeter

Saphirzylinder		OFHC-Hohlraumresonator		HTS-Filme
Durchmesser	Höhe	Durchmesser	Höhe	Durchmesser
5,0	2,86	12,0	2,86	14

6.2 Aufbau

Die Messausrüstung soll wie in Bild 1 gezeigt aufgebaut werden. Die Messapparatur, die dielektrischen Standardzylinder und die HTS-Filme sollen in einem sauberen und trockenen Zustand gehalten werden, da Staub und ein hoher Feuchtigkeitsgehalt die Messergebnisse beeinflussen kann.

6.3 Messung des Referenzniveaus

Das Niveau der vollen Übertragungsleistung (Referenzniveau) soll vor den Messungen der Resonatorgüte als eine Funktion der Temperatur gemessen werden. Das Vorgehen bei der Messung ist wie folgt:

1) Die Ausgangsleistung des synthetischen Wobblers ist bei einem Wert unterhalb von 10 mW (typischerweise 1 mW) festzulegen, da die Messunsicherheit von dem Signallevel bei der Messung abhängt.
2) Eine Referenzverbindung bestehend aus einer halbstarren Koaxialleitung ist zwischen den Eingangs- und Ausgangsanschlüssen herzustellen. Die Länge der Referenzverbindung soll dieselbe sein wie die Summe der Längen der beiden halbstarren Koaxialleitungen mit einer Koppelschleife an jedem Ende wie in Abschnitt 5.2 beschrieben.
3) Das Niveau der Übertragungsleistung ist über den interessierenden Frequenz- und Temperaturbereich zu messen.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

6.4 Messung des intrinsischen R_S von Sauerstoff-freiem hochreinem Kupfer

Der Oberflächenwiderstand des OFHC, das die Resonatorenwandung formt, soll als eine Funktion der Temperatur vor den Messungen des Oberflächenwiderstands der zu prüfenden Supraleiterfilme gemessen werden. Zu diesem Zweck soll die angepasste Güte mit einem Transmissionsverfahren gemessen werden, wobei die Koppelanschlüsse nahe der Unterseite des Hohlraumresonators angebracht sind. Die Koppelanschlüsse können ebenso in der Mitte des Hohlraumresonators für alle Moden angebracht werden. Ist der Koppelanschluss für die TE_{012}–Mode in der Mitte angebracht, so ist darauf zu achten, dass die Kopplung für die TE_{012}-Mode nicht zu schwach wird. Im Folgenden ist ein Vorgehen beschrieben, die Temperaturabhängigkeiten der an die TE_{021}-Mode angepasste Güte und die zugehörige Leerlaufgüte zu messen.

1) Ein dielektrischer Standardzylinder ist im Zentrum der unteren OFHC-Stirnplatte anzubringen und die Position mit Hilfe von verlustarmem Epoxidharz zu fixieren. Das Epoxidharz soll nicht die Mikrowelleneigenschaften der OFHC-Platte und des zu untersuchenden Supraleiterfilms verschlechtern und mit Hilfe von Aceton leicht entfernbar sein. Die OFHC-Stirnplatten sollen größer als die zu testenden HTS-Filme sein, wobei die Oberfläche der OFHC-Stirnplatten, die für die Tests verwendet werden, gut poliert und sauber sein sollen.

2) Die Eingangs- und Ausgangsanschlüsse sind an die Messapparatur (Bild 1) anzuschließen und der Abstand zwischen dem Zylinder und jeder der Koppelschleifen der halbstarren Koaxialleitungen soll jeweils gleich sein, so dass dieser Resonator vom Transmissionstyp gleichermaßen an beide Koppelschleifen eingekoppelt werden kann.

3) Eine obere OFHC-Stirnplatte ist sanft abzusenken, um die Oberseite des OFHC-Resonatorengehäuses zu berühren.

4) Die Probenkammer ist zu evakuieren und unterhalb des T_c des Supraleiterfilms bis auf die tiefste Temperatur abzukühlen.

5) Der Resonanzpeak dieses Resonators für die TE_{021}-Mode ist zu identifizieren, indem die berechnete Resonanzfrequenz der TE_{021}-Mode verwendet wird.

6) Die Frequenzspanne ist so festzulegen, dass der TE_{021}-Resonanzpeak dargestellt wird (Bild 6) und es ist zu bestätigen, dass die Eingangsdämpfung IA dieses Modes größer als 20 dB bezogen auf das Referenzniveau bei der tiefsten Temperatur ist. Es ist zu bestätigen, dass IA zunimmt, wenn die Temperatur ansteigt.

7) Es ist die TE_{021}-Mode f_0 und die Halbwertsbreite Δf_{3dB} zu messen. Die angepasste Güte Q_L des TE_{021}-Modenresonators ist gegeben durch

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f_{3dB}}. \qquad (4)$$

8) Die Leerlaufgüte Q_U soll aus Q_L durch wenigstens eine der beiden unten beschriebenen Techniken abgeleitet werden.

   Die erste Technik ist es, die *IA*-Werte zu verwenden, um Q_U aus Q_L zu erhalten. Hierbei wird Q_U ausgedrückt als

$$Q_U = \frac{Q_L}{1 - A_t},\ A_t = 10^{-IA[\mathrm{dB}]/20}. \qquad (5)$$

   Die aus Gleichung (5) erhaltenen Q_U-Werte sind gültig, falls die Eingangskopplung des Resonators dieselbe ist wie die Ausgangskopplung. Die Koppelschleifen sind schwer herzustellen und die Koppelfaktoren hängen von der Orientierung der Schleifen und der Temperatur ab. Die mögliche Asymmetrie bei der Kopplung kann in großen Fehlern bei der Berechnung des Koppelfaktors resultieren, falls die Kopplung stark ist (*IA* 10 dB). Bei einer schwachen Kopplung größer als 20 dB wird die Asymmetrie der Kopplung weniger wichtig.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

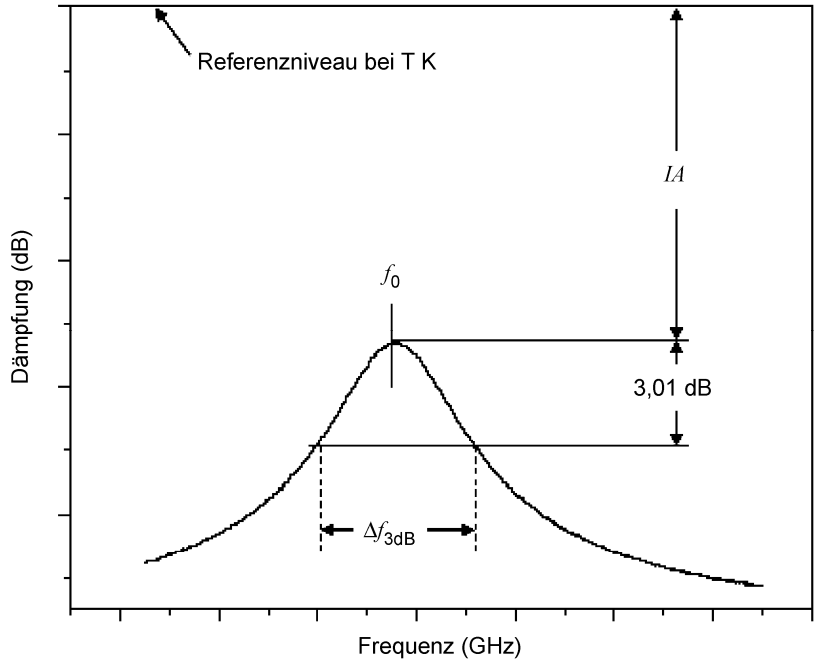


Bild 6 – Ein typischer Resonanzpeak. Die Eingangsdämpfung *IA*, die Resonanzfrequenz f_0 und die Halbwertsbreite Δf_{3dB} werden definiert.

Die zweite Technik ist es, die Reflexionsstreuparameter an beiden Seiten des Resonators bei der Resonanzfrequenz zu verwenden, für die Q_U ausgedrückt wird als

$$Q_U = Q_L (1+\eta_1+\eta_2) \tag{6}$$

mit

$$\eta_1 = \frac{1-S_{11}}{S_{11}+S_{22}} \text{ und} \tag{7}$$

$$\eta_2 = \frac{1-S_{22}}{S_{11}+S_{22}} \ . \tag{8}$$

S_{11} und S_{22}, dargestellt in Bild 7, werden in linearen Einheiten der Leistung, nicht in relativen dB, gemessen. η_1 und η_2 bezeichnen die Eingangs- bzw. Ausgangskoppelfaktoren. Die Technik, die die Reflexionsstreuparameter verwendet, hat zwei Vor- und Nachteile. Die Vorteile sind i) Wegfall des zusätzlichen Schrittes der Kalibrierung des Referenzniveaus und ii) Messungen der Koppelwerte für beide Seiten des Resonators. Dafür sind die Nachteile, dass die zweite Technik nur auf schmalbandige Resonanzen anwendbar und durch den Dynamikbereich des Netzwerkanalysators bei der Messung der Reflexionsfaktoren limitiert ist.

Eine Kombination der beiden Techniken stellt eine exzellente Möglichkeit dar, die Gültigkeit des gemessenen Q_U nachzuweisen, und wird daher empfohlen.

Falls der Resonanzpeak asymmetrisch erscheint, ergeben die beiden oben genannten Techniken keine korrekten Werte für Q_U. In diesem Fall sollten die Kopplingen so angepasst werden, dass ein symmetrischer Resonanzpeak erhalten wird, auch wenn korrekte Q_U-Werte mit Hilfe des S-Parameterkreis-Anpassungsverfahrens erhalten werden können [15, 16].

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

9) Der Oberflächenwiderstand des OFHC wird aus dem gemessenen Q_U unter Verwendung der folgenden Beziehung erhalten:

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{R_S(\text{OFHC})}{G^T} + \frac{R_S(\text{OFHC})}{G^B} + \frac{R_S(\text{OFHC})}{G^{SW}} + k\tan\delta\,, \tag{9}$$

woraus sich ergibt:

$$\begin{aligned} R_S(\text{OFHC}) &= \left(\frac{1}{Q_U} - k\tan\delta\right) \Bigg/ \left(\frac{1}{G^T} + \frac{1}{G^B} + \frac{1}{G^{SW}}\right) \\ &\approx \left(\frac{1}{Q_U}\right) \Bigg/ \left(\frac{1}{G^T} + \frac{1}{G^B} + \frac{1}{G^{SW}}\right), \end{aligned} \tag{10}$$

wobei $k\tan\delta$ gegenüber den $\frac{1}{Q_U}$-Werten der beiden interessierenden Resonanzmoden in Gleichung (9) vernachlässigbar klein ist. G^T, G^B und G^{SW} sind durch die Verteilung der elektromagnetischen Felder im Innern des Resonators festgelegte Konstanten und werden Geometriefaktoren genannt. Die Einheit der Geometriefaktoren ist Ohm. k bezeichnet den Füllfaktor, der durch das Verhältnis der über die Zeit gemittelten, innerhalb eines Dielektrikums gespeicherten elektromagnetischen Energie zu der innerhalb des gesamten Resonators bestimmt ist. Details, um die Geometriefaktoren zu erhalten, werden in Anhang A.3.2 beschrieben.

10) Das $R_S(\text{OFHC})$ bei der Resonanzfrequenz der TE_{012}-Mode soll aus dem bei der Resonanzfrequenz der TE_{021}-Mode unter Verwendung der $R_S \propto f^{1/2}$-Beziehung bestimmt werden. Zu diesem Zwecke soll die Resonanzfrequenz der TE_{012}-Mode des Resonators mit Supraleiterstirnplatten verwendet werden.

6.5 Bestimmung des effektiven R_S von Supraleiterfilmen und des $\tan\delta$ der dielektrischen Standardzylinder

Die angepassten Güten und die Leerlaufgüten des Resonators sollen auf dieselbe Weise bei den Resonanzfrequenzen der TE_{021}- und der TE_{012}-Mode gemessen werden wie in Abschnitt 6.4 für Schritt 1) bis 8) beschrieben. Die Beziehung zwischen den gemessenen Q_U-Werten und dem effektiven Oberflächenwiderstand des Supraleiterfilms $R_S^{\text{eff}}(\text{SC})$ wird wie folgt ausgedrückt:

$$\frac{1}{Q_{U\alpha}} = \frac{R_{S\alpha}^{\text{eff}}(\text{SC})}{G_\alpha^T} + \frac{R_{S\alpha}^{\text{eff}}(\text{SC})}{G_\alpha^B} + \frac{R_{S\alpha}(\text{OFHC})}{G_\alpha^{SW}} + k_\alpha \tan\delta_\alpha\,. \tag{11}$$

In Gleichung (11) ist $\alpha = 1$ für die TE_{021}-Mode mit der Resonanzfrequenz f_1 und $\alpha = 2$ für die TE_{012}-Mode mit der Resonanzfrequenz f_2. Die auf f_1 skalierten Werte für $R_{S2}^{\text{eff}}(\text{SC})$ und $\tan\delta_2$ können erhalten werden unter Verwendung der Beziehungen $R_S^{\text{eff}} \propto f^2$ [17], wie von dem Zwei-Flüssigkeiten-Modell erklärt, bzw. $\tan\delta \propto f$, einer angenommenen Beziehung für verlustarme Dielektrika. R_{S1}^{eff} wird ausgedrückt durch

$$R_{S1}^{\text{eff}} = \frac{X_1 k_2' - X_2 k_1}{A_1 k_2' - A_2' k_1}\,,\quad \tan\delta_1 = \frac{X_1 A_2' - X_2 A_1}{A_2' k_1 - A_1 k_2'} \tag{12}$$

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

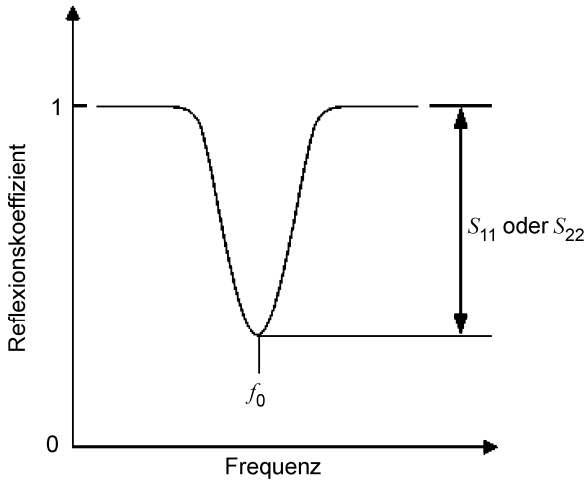


Bild 7 – Reflexionsstreuparameter S_{11} und S_{22}.

mit

$$X_1 = \frac{1}{Q_{U1}} - \frac{R_{S1}(\mathrm{OFHC})}{G_1^{SW}},\ X_2 = \frac{1}{Q_{U2}} - \frac{R_{S2}(\mathrm{OFHC})}{G_2^{SW}}, \tag{13}$$

$$A_1 = \frac{1}{G_1^{T}} + \frac{1}{G_1^{B}},\ A_2' = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \left(\frac{1}{G_1^{T}} + \frac{1}{G_1^{B}}\right) \text{ und} \tag{14}$$

$$k_2' = k_2 \left(\frac{f_2}{f_1}\right). \tag{15}$$

Die Gleichungen (10) bis (15) erlauben die gleichzeitige Messung der effektiven Oberflächenwiderstands von Supraleiterfilmen und des $\tan\delta$ dielektrischer Standardzylinder mit einer geringen Messunsicherheit, falls f_1 und f_2 nahe beieinander liegen. $R_{S1}(\mathrm{OFHC})$ und $R_{S2}(\mathrm{OFHC})$ in Gleichung (11) sind die zuvor unter Verwendung der in Abschnitt 6.4 beschriebenen Vorgehensweise bestimmten Werte der OFCH-Hohlraumresonatorwandung.

$\tan\delta$ des dielektrischen Standardzylinders bei f_1 kann verwendet werden, um unter Verwendung der $\tan\delta \propto f$-Beziehung den zugehörigen Wert bei der Frequenz der TE_{011}-Mode zu bestimmen. In diesem Fall kann $R_S^{\mathrm{eff}}(\mathrm{SC})$ unter Verwendung der gemessenen Güte Q_U der TE_{011}-Mode, des zuvor bestimmten Wertes für $R_S(\mathrm{OFHC})$ bei der TE_{011}-Modenfrequenz sowie von Gleichung (11) bestimmt werden.

6.6 Bestimmung der Eindringtiefe

Die Eindringtiefe λ von Supraleiterfilmen soll gemessen werden, indem derselbe Saphirresonator verwendet wird wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, bei dem die Temperatur des oberen Supraleiterfilms unabhängig von dem Rest des Resonators kontrollierbar sein soll. Zu diesem Zweck soll ein Spalt (typischerweise 10 µm) zwischen dem oberen Supraleiterfilm und dem Rest des Resonators vorgesehen werden. Eine Unterbrechung zwischen dem oberen Supraleiterfilm und dem Rest des Resonators kann durch eine Messung des elektrischen Widerstands zwischen dem oberen Supraleiterfilm und dem Rest des Resonators bestätigt werden. Der Spalt soll schmal genug sein, dass das Verhältnis $\Delta f_1/f_1$ der Verschiebung der Resonanzfrequenz (Δf_1) zur Resonanfrequenz (f_1) für die TE_{021}-Mode unabhängig vom Existieren eines Spaltes nicht verändert wird, und groß genug, um eine Temperaturkontrolle des oberen Supraleiterfilms

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

unabhängig von der des Rests zu ermöglichen. Das Vorgehen bei der Messung von $\Delta f_1/f_1$ bei der Resonanzfrequenz f_1 der TE_{021}-Mode als eine Funktion der Temperatur ist wie folgt:

1) Es ist den Schritten 1) bis 3) des Abschnitts 6.4 zu folgen, wobei die beiden OFHC-Stirnplatten durch Supraleiterfilme ersetzt sind.
2) Der obere Supraleiterfilm ist mit Hilfe eines Schrittmotors 10 µm nach oben zu verfahren und es ist sicher zu stellen, dass der obere Supraleiterfilm parallel zu dem unteren Supraleiterfilm liegt. Es ist weiterhin sicher zu stellen, dass der obere Supraleiterfilm thermisch vom Rest des Resonators getrennt ist. Der Spaltabstand von 10 µm, der einen Wert bei Raumtemperatur darstellt, kann entweder durch Verwendung eines Mikrometers oder eines hochauflösenden Schrittmotors, verbunden durch einen Teflonzylinder mit dem oberen Supraleiterfilm, kontrolliert werden. Die realen Spaltabstände würden sich bei Kryotemperaturen auf Grund der thermischen Kontraktion des Teflonzylinders etwas vergrößern.
3) Die Probenkammer ist zu evakuieren und unter das T_C des Supraleiterfilms bis hin zur tiefsten Temperatur zu kühlen, wobei der Schalter für die thermische Verbindung geschlossen ist. Es ist sicher zu stellen, dass die Temperatur des oberen Supraleiterfilms dieselbe ist wie die des Rests bei der tiefsten Temperatur.
4) Es ist der Resonanzpeak der TE_{021}-Mode dieses Resonators unter Verwendung der berechneten Resonanzfrequenz der TE_{021}-Mode zu identifizieren.
5) Der Frequenzbereich ist so zu wählen, dass nur der Resonanzpeak der TE_{021}-Mode dargestellt wird (Bild 6).
6) Der Schalter für die thermische Verbindung ist zu öffnen und die Temperatur des oberen Supraleiterfilms ist ansteigen zu lassen, während der Rest bei der tiefsten Temperatur bleibt. Die Resonanzfrequenz der TE_{021}-Mode ist als eine Funktion der Temperatur aufzuzeichnen.
7) Es ist die Verschiebung in der Resonanzfrequenz der TE_{021}-Mode $\Delta f_1 \left(= f_1(T) - f_1(T_{\min})\right)$ als eine Funktion der Temperatur aufzuzeichnen.

8) Die Eindringtiefe bei 0 K (λ_0) wird aus der besten Anpassung an die folgende Gleichung für Änderungen der effektiven Eindringtiefe λ^{eff} erhalten:

$$\Delta\lambda^{\text{eff}} = \lambda^{\text{eff}}(T) - \lambda^{\text{eff}}(T_{\min}) = K_1 \Delta\lambda = \frac{-G_1^{\Gamma}}{\pi \mu_0} \frac{\Delta f_1}{f_1^2}, \tag{16}$$

$$K_1 = \text{Re}\left(\frac{Z_{S1}{}^{\text{eff}}}{Z_{S1}}\right), \tag{17}$$

wobei $T_{\min}$ in Gleichung (16) die tiefste Temperatur bezeichnet. Detaillierte Beschreibungen für die Herleitung der Gleichungen (16) und (17) sowie für die Bestimmung von K_1 werden in Anhang A.3.3 präsentiert. Für die Bestimmung des Fitwertes für λ_0 soll eine Modellgleichung verwendet werden, die die Temperaturabhängigkeit von $\lambda(T)$ korrekt beschreibt. Für das temperaturabhängige λ eines Hoch-T_C-Supraleiterfilms ist die folgende Gleichung bekannt [17]:

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^2\right]^{-1/2}. \tag{18}$$

6.7 Bestimmung des intrinsischen Z_S

Das intrinsische Z_S eines Supraleiterfilms bei f_1 unter Verwendung der folgenden Vorgehensweise ermittelt werden:

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

1) Der intrinsische Oberflächenwiderstand R_S, der den Realteil des intrinsischen Z_S darstellt, wird bei f_1 durch die folgende Gleichung bestimmt:

$$R_{S1} = \frac{R_{S1}^{\text{eff}}}{K_1}. \tag{19}$$

2) Die intrinsische Oberflächenreaktanz X_S, die den Imaginärteil des intrinsischen Z_S darstellt, wird bei f_1 durch die folgende Gleichung bestimmt:

$$X_{S1} = 2\pi f_1 \mu_0 \lambda. \tag{20}$$

7 Messunsicherheit des Prüfverfahrens

7.1 Messung der Leerlaufgüte

Die intrinsische Oberflächenimpedanz bei der TE_{021}-Modenfrequenz soll bestimmt werden aus den beiden Leerlaufgütewerten Q_U der TE_{021}- und der TE_{012}-Mode dielektrischer Resonatoren, wie sie mit dem oberen Supraleiterfilm in Kontakt mit dem Rest des Resonators gemessen wurden, ihrer Verschiebung in den TE_{021}-Modenfrequenzen, wie sie mit einem 10 µm-Spalt zwischen dem oberen Supraleiterfilm und dem Rest der Resonatoren gemessen wurden, sowie der Filmdicke, wie sie separat mit verschiedenen Dickenmessverfahren gemessen wurde. Ein Vektornetzwerkanalysator wie in Tabelle 3 spezifiziert soll verwendet werden, um die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung und der Resonanzfrequenz aufzuzeichnen. Die resultierende Aufzeichnung soll die Bestimmung von Q_U mit einer relativen Standardmessunsicherheit von 4 % erlauben.

Tabelle 3 – Spezifikationen des Vektornetzwerkanalysators

Dynamikbereich	mehr als 60 dB
Typ B - Messunsicherheit der Frequenz	1 Hz bei 10 GHz
Typ B – Messunsicherheit der Dämpfung	0,1 dB
Begrenzung der Eingangsleistung	unter 10 dBm

7.2 Messung des Verlustfaktors

Die dielektrischen Resonatoren sollen durch einen hinreichend kleinen Verlustfaktor der Dielektrika gekennzeichnet sein. Der beste Kandidat mit dem niedrigsten Verlustfaktor ist Saphir, wie in Tabelle 4 spezifiziert, wobei die Begriffsdefinitionen dieselben sind wie in IEC 61788-7 Ed. 2:2005 beschrieben (s. auch die Illustration des Bildes 8). Der Verlustfaktor soll mit einer relativen Messunsicherheit von nicht mehr als 5 % gemessen werden.

Tabelle 4 – Typ B – Messunsicherheiten für die Spezifikationen der Saphirzylinder

Durchmesser	0,05 mm
Länge	0,05 mm
Planheit	0,005 mm
Oberflächenrauheit	Obere und untere Stirnfläche: 10 nm. Zylindermantelfläche: 0,001 mm
Rechtwinkligkeit	0,1 Grad
Achse	parallel zur c-Achse innerhalb von 0,5 Grad

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

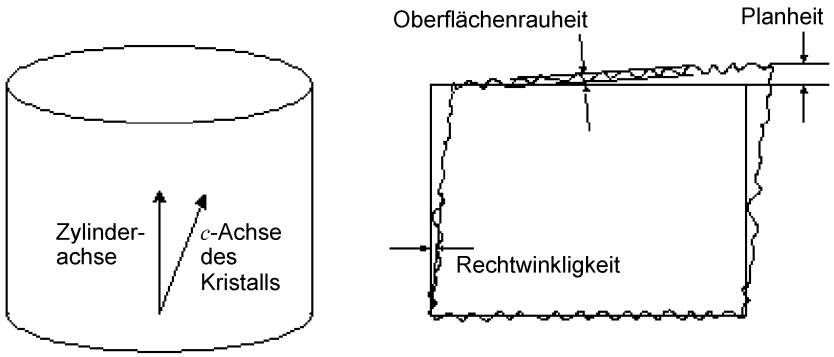


Bild 8 – Definition der Begriffe aus Tabelle 4

7.3 Temperatur

Die Messapparatur wird während der Tests auf irgendeine Art und Weise auf die spezifizierte Temperatur heruntergekühlt, wobei eines der besten Verfahren die Verwendung von Kryokühlern darstellt. In diesem Fall befindet sich der Resonatur in Vakuum und wird mit Hilfe thermischer Leitung durch die metallischen Anschlüsse gekühlt. Der Temperatur soll mit einer Standardmessunsicherheit von nicht mehr als 0,5 K bestimmt werden. Es ist darauf zu achten, dass Temperaturgradienten innerhalb der Apparatur vermieden werden, während R_S^{eff} gemessen wird, und dass die Temperatur des oberen HTS-Films unabhängig vom Rest kontrolliert wird, während λ gemessen wird.

7.4 Proben und Trägerstruktur für den Halter

Die Trägerstruktur soll ausreichenden Halt der Proben gewährleisten. Es ist erforderlich, dass die beiden Filme parallel zueinander und mechanisch stabil während der Messungen liegen, insbesondere in einem Kryokühler und über einen weiten Temperaturbereich. Die Trägerstruktur soll an ein Mikrometer angeschlossen sein, der es ermöglicht, den Spaltabstand zwischen dem oberen Supraleiterfilm und dem Rest des Resonators mit einer Standardmessunsicherheit von 0,5 µm zu bestimmen.

8 Prüfbericht

8.1 Probenidentifizierung

Die Proben sollen klar identifiziert werden, wozu Informationen zu den folgenden Punkten empfohlen werden:

1) Name des Probenherstellers,
2) Klassifikation und/oder Symbol,
3) Chargennummer,
4) Chemische Zusammensetzung des Dünnfilms und des Substrats,
5) Dicke und Rauheit des Dünnfilms,
6) Technik des Herstellungsprozesses.

8.2 Bericht zu den intrinsischen Z_S-Werten

Das intrinsische R_S, das auf 10 GHz skalierte intrinsische R_S, λ_0 (d. h. λ bei 0 K) und X_S ($=\omega_0 \mu_0 \lambda$) sollen als Funktionen der Temperatur zusammen mit den zugehörigen Resonanzfrequenzen, den Werten für die angepassten und für die Leerlaufgüten, den Eingangsdämpfungen sowohl für die TE_{021}- als auch für die TE_{012}-Mode und der Filmdicke aufgezeichnet werden. Die Standardmessunsicherheiten von R_S, λ_0 und X_S sollen ebenfalls aufgezeichnet werden zusammen mit dem Verlustfaktor des Saphirzylinders als Funktionen der Temperatur.

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

8.3 Bericht über die Prüfbedingungen

Die folgenden Prüfbedingungen sollen dokumentiert werden:

1) Prüffrequenz und Frequenzauflösung,
2) maximale HF-Leistung des Prüfsignals,
3) Prüftemperatur, Standardmessunsicherheit der Temperatur und Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Stirnplatten,
4) Vorgeschichte der Probe mit Temperaturänderungen,
5) Art des für die Messungen verwendeten dielektrischen Zylinders.

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Anhang A
(informativ)

Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 8

A.1 Anwendungsbereich

Die Etablierung eines Standardprüfverfahrens wird benötigt, um die Filmqualität von Hoch-T_C-Supraleiter-(HTS-)Filmen mit einem intrinsischen Oberflächenwiderstand von weniger als 0,05 mΩ und einer Oberflächenreaktanz zwischen 10 mΩ und 15 mΩ bei 10 GHz unabhängig von der Filmdicke zu bestimmen. Verschiedene Resonanzverfahren, die es erlauben, den Oberflächenwiderstand im Mikrowellen- und Millimeterwellenbereich zu messen, sind in IEC 61788-7 aufgeführt.

A.2 Anforderungen

Die Verwendung kleinerer dielektrischer Zylinder ermöglicht es, kleinere Supraleiterfilme zu verwenden. Falls der dielektrische Zylinder kleiner wird, wird es jedoch schwierig, eine Messapparatur vorzubereiten und ein Messsystem aufzubauen, da der Durchmesser der halbstarren Koaxialleitungen begrenzt wird durch die Länge des dielektrischen Zylinders und da das Messsystem in der Lage sein sollte, höhere Frequenzen zu handhaben.

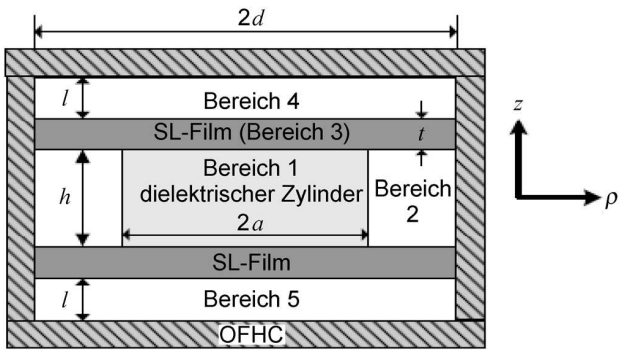
Dieses Prüfverfahren ist auf jeden Supraleiter anwendbar, für den ein geeignetes Modell für die Temperaturabhängigkeit der Eindringtiefe zur Verfügung steht.

Dieses Prüfverfahren ist anwendbar auf Messtemperaturen unterhalb von 30 K, falls eine neue Kühltechnik Temperaturen unterhalb von 30 K ermöglicht.

Dieses Prüfverfahren ist auf Messtemperaturen oberhalb von 80 K anwendbar, falls angemessen darauf geachtet wird, dass das intrinsische R_S bei Temperaturen nahe der kritischen Temperatur T_C mit dem intrinsischen X_S vergleichbar bleibt.

A.3 Theorie und Messverfahren für die intrinsische Oberflächenimpedanz

A.3.1 Theoretische Beziehung zwischen dem intrinsischen Z_S und dem effektiven Z_S [1)]



Die Bereiche 1 bis 5 bezeichnen den dielektrischen Zylinder (1), das Vakuum (2), die Supraleiterfilme (3) und die dielektrischen Substrate gleicher Art (4 und 5) für das Filmwachstum.

Bild A.1 – Querschnittsansicht eines dielektrischen Resonators

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

Bild A.1 zeigt eine Querschnittsansicht eines dielektrischen Resonators mit zwei Supraleiterfilmen gleicher Qualität, angebracht an der Ober- und der Unterseite eines dielektrischen Zylinders. Im allgemeinen, außer für den Fall $k = 3$, werden die von Null verschiedenen Feldkomponenten der TE_{0mn}-Mode im *k*-ten Bereich beschrieben durch [2)]

$$H_{zk} = A_k\, q_k(\beta_{zk}\, z)\psi_k(\beta_{zk}\, \rho),$$

$$E_{\phi k} = \frac{i\,\omega\,\mu_0}{\beta_k{}^2}\, A_k\, q_k(\beta_{zk}\, z)\frac{d\psi_k(\beta_{zk}\, \rho)}{d\rho}, \qquad \text{(A.3-1)}$$

$$H_{\rho k} = \frac{A_k}{\beta_k{}^2}\frac{dq_k(\beta_{zk}\, z)}{dz}\frac{d\psi_k(\beta_{zk}\, \rho)}{d\rho},$$

wobei A_k eine Konstante für die Feldkomponenten im *k*-ten Bereich, β_{zk} die Ausbreitungskonstante im *k*-ten Bereich, q_k eine Funktion von $\beta_{zk}\, z$ und ψ_k eine Funktion von $\beta_{zk}\, \rho$ darstellt.

Für *k* = 1 und 2 ist $\beta_{z1} = \beta_{z2}$ und $q_1(\beta_{z1}\, z) = q_2(\beta_{z2}\, z) = \cos(\beta_{z1}\, z + \psi_h)$, wobei ψ_h von der Symmetrie der elektromagnetischen Feldkomponenten abhängt. Die Feldkomponenten im Bereich 1 werden ausgedrückt als

$$H_{z1} = A_1\, J_0(\beta_1\, \rho) q_1(\beta_{z1}\, z),$$

$$H_{\rho 1} = \left(\frac{A_1}{\beta_1}\right) J_0{}'(\beta_1\, \rho)\frac{dq_1(\beta_{z1}\, z)}{dz}, \qquad \text{(A.3-2)}$$

$$E_{\phi 1} = \frac{j\,\omega\,\mu_0\, A_1}{\beta_1} J_0{}'(\beta_1\, \rho) q_1(\beta_{z1}\, z),$$

mit

$$\psi_h = p\,\pi \text{ für ungerades } n \text{ und } \psi_h = (2\,p+1)\pi/2 \text{ für gerades } n, \qquad \text{(A.3-3)}$$

für die TE_{0mn}–Moden, wobei J_0 die Besselfunktion erster Gattung nullter Ordnung und *p* eine natürliche Zahl darstellen. In Gleichung (A.3-2) ist $J_0{}'(\beta_1\, \rho) = dJ_0(\beta_1\, \rho)/d(\beta_1\, \rho)$. Die Feldkomponenten im Bereich 2 werden ausgedrückt als

$$H_{z2} = A_1\, Q_0(\beta_2\, \rho) q_2(\beta_{z1}\, z),$$

$$H_{\rho 2} = \left(\frac{A_1}{\beta_2}\right) Q_0{}'(\beta_2\, \rho)\frac{dq_2(\beta_2\, z)}{dz}, \qquad \text{(A.3-4)}$$

$$E_{\phi 2} = \frac{j\,\omega\,\mu_0\, A_1}{\beta_2} Q_0{}'(\beta_2\, \rho) q_2(\beta_{z2}\, z),$$

mit $\beta_{z1} = \beta_{z2}$, $Q_0{}'(\beta_2\, \rho) = dQ_0(\beta_2\, \rho)/d(\beta_2\, \rho)$ und

$$Q_0(\beta_2\, \rho) = \frac{-\beta_2\, J_0{}'(\beta_1\, a)}{\beta_1} \cdot \frac{K_0(\beta_2\, \rho) I_0{}'(\beta_2\, d) - I_0(\beta_2\, \rho) K_0{}'(\beta_2\, d)}{K_0{}'(\beta_2\, a) I_0{}'(\beta_2\, d) - I_0{}'(\beta_2\, a) K_0{}'(\beta_2\, d)} \qquad \text{(A.3-5)}$$

Documents
Document Sharing Hub

Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01

für $k_0^2\,\varepsilon_{r2} < \beta_2^2$, wobei I_0 und K_0 die modifizierten Besselfunktionen erster bzw. zweiter Gattung nullter Ordnung darstellen. Falls $k_0^2\,\varepsilon_{r2} > \beta_2^2$ ist, werden I_0, I_0', K_0 und K_0' ersetzt durch J_0, J_0', Y_0 bzw. Y_0', wobei Y_0 in Gleichung (A.3-5) die Besselfunktion zweiter Gattung nullter Ordnung bezeichnet.

Die Gleichungen für β_{z1} und $\beta_{z2}(=\beta_{z1})$ lauten wie folgt:

$$k_0^2\,\varepsilon_{\mathrm{a-b}}' = \beta_{z1}^2 + \beta_1^2\,, \tag{A.3-6}$$

$$k_0^2\,\varepsilon_{r2} = \beta_{z2}^2 - \beta_2^2 = \beta_{z1}^2 - \beta_2^2 \text{ für } k_0^2\,\varepsilon_{r2} < \beta_2^2 \tag{A.3-7a}$$

$$k_0^2\,\varepsilon_{r2} = \beta_{z2}^2 + \beta_2^2 = \beta_{z1}^2 + \beta_2^2 \text{ für } k_0^2\,\varepsilon_{r2} > \beta_2^2 \tag{A.3-7b}$$

wobei $k_0 = \omega_0\sqrt{\varepsilon_0\,\mu_0}$ ist, $\omega_0 = 2\pi f_0$ und β_1 bzw. β_2 die Abschneidewellenzahlen in den Bereichen 1 und 2 sowie $\varepsilon_{\mathrm{a-b}}'$ und ε_{r2} die relativen Dielektrizitätszahlen des Bereichs 1 entlang der a-b-Ebene bzw. des Bereichs 2 bezeichnen. Weiterhin wird die folgende charakteristische Gleichung aus der Randbedingung $\rho = a$ in Bild A.1 erhalten:

$$\frac{\beta_2\,J_1(\beta_1\,a)}{\beta_1\,J_0(\beta_1\,a)} = \frac{I_1(\beta_2\,a)K_1(\beta_2\,d) - I_1(\beta_2\,d)K_1(\beta_2\,a)}{I_1(\beta_2\,d)K_0(\beta_2\,a) + I_0(\beta_2\,a)K_1(\beta_2\,d)} \text{ für } k_0^2\,\varepsilon_{r2} < \beta_2^2\,, \tag{A.3-8a}$$

$$\frac{\beta_2\,J_1(\beta_1\,a)}{\beta_1\,J_0(\beta_1\,a)} = \frac{J_1(\beta_2\,a)Y_1(\beta_2\,d) - J_1(\beta_2\,d)Y_1(\beta_2\,a)}{J_1(\beta_2\,d)Y_0(\beta_2\,a) + J_0(\beta_2\,a)Y_1(\beta_2\,d)} \text{ für } k_0^2\,\varepsilon_{r2} > \beta_2^2\,, \tag{A.3-8b}$$

Wobei *d* den Radius des zwischen den Supraleiterfilmen plazierten OFHC-Zylinders wie in Bild A.1 gezeigt bezeichnet.

Für *k* = 3 können die allgemeinen Ausdrücke für die von Null verschiedenen Feldkomponenten wie folgt geschrieben werden:

$$E_{\phi 3} = j\,\omega\,\mu_0\,A_3\;f(\rho)\left[\sinh(\gamma_{z3}\,z) + \Gamma_3\cosh(\gamma_{z3}\,z)\right],$$

$$H_{\rho 3} = \gamma_{z3}\,A_3\;f(\rho)\left[\cosh(\gamma_{z3}\,z) + \Gamma_3\sinh(\gamma_{z3}\,z)\right], \tag{A.3-9}$$

wobei Γ_3 eine Konstante ist, $f(\rho)$ eine Funktion von ρ und $H_{z1} = 0$ für $H < H_{C1}$, wobei H_{C1} das untere kritische Feld der Supraleiterfilme bezeichnet. In Gleichung (A.3-9) ist $\gamma_{z3} = (j\,\omega\,\mu_0\,\sigma)^{1/2}$, wobei $\sigma\,(=\sigma_1 - j\,\sigma_2)$ die komplexe Leitfähigkeit der Supraleiterfilme bezeichnet.

Für *k* = 4 und 5 werden die von Null verschiedenen Feldkomponenten geschrieben als

$$H_{z4} = A_4\,J_0(\beta_4\,\rho)q_4(\beta_{z4}\,z),$$

$$E_{\phi 4} = \left(\frac{A_4}{\beta_4}\right)J_0(\beta_4\,\rho)'\,\frac{dq_4(\beta_{z4}\,z)}{dz} \tag{A.3-10}$$

$$H_{\rho 4} = \frac{j\,\omega\,\mu_0\,A_4}{\beta_4}J_0(\beta_4\,\rho)'\,q_4(\beta_{z4}\,z),$$

Documents
Document Sharing Hub
Full document details: E DIN IEC 61788-15:2009-01