

**DIN EN IEC 61788-4
(VDE 0390-4)**
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 2019-05-08

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 61788-4
(VDE 0390-4):2017-01

Entwurf

**Supraleitfähigkeit –
Teil 4: Messung des Restwiderstandsverhältnisses –
Restwiderstandsverhältnis von Nb-Ti und Nb₃Sn Verbundsupraleitern
(IEC 90/419/CD:2018);
Text Deutsch und Englisch**

Superconductivity –
Part 4: Residual resistance ratio measurement –
Residual resistance ratio of Nb-Ti and Nb₃Sn composite superconductors
(IEC 90/419/CD:2018);
Text in German and English

Supraconductivité –
Partie 4: Mesurage du rapport de résistance résiduelle –
Rapport de résistance résiduelle des composites supraconducteurs de Nb-Ti et de Nb₃Sn
(IEC 90/419/CD:2018);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-03-08 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 65 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/419/CD:2018 „Superconductivity – Part 4: Residual resistance ratio measurement – Residual resistance ratio of Nb-Ti and Nb₃Sn composite superconductors“ (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 beigelegt. 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.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 61788-4 (VDE 0390-4):2017-01** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Änderung des für eine zuverlässige Messung benötigten Abstandes der Spannungskontakte auf der Probe;
- b) neuer Bericht über die Ergebnisse der Vergleichsversuche (Round Robin Test) zum Restwiderstandsverhältnis in Nb_3Sn Verbundsupraleitern, der die Richtigkeit des in dieser Norm dargelegten Messverfahrens zeigt;
- c) Überarbeitung der unklaren Definitionen des Kupferverhältnisses und des Kupferanteils;
- d) die deutsche Übersetzung wurde in [Abschnitt 2](#) an den aktuellen Standardtext angepasst.

Inhalt

Seite

Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Verfahren	9
5 Geräte	9
5.1 Material des Messspulenkörpers oder der Messplatine	9
5.2 Durchmesser des Messspulenkörpers und Länge der Messplatine	9
5.3 Kryostat für die Messung des Widerstands R_2	10
6 Probenvorbereitung	10
7 Messung und Auswertung	10
7.1 Widerstand (R_1) bei Raumtemperatur	10
7.2 Widerstände (R_2 oder R_2^*) unmittelbar oberhalb des Übergangs zur Supraleitung	10
7.2.1 Korrektur des Dehnungseffektes	10
7.2.2 Messung des Tieftemperaturwiderstandes	11
7.2.3 Optionale Bestimmungsverfahren	13
7.3 Korrektur des gemessenen Widerstands R_2^* in Nb-Ti Verbundsupraleitern hinsichtlich der Biegedehnung	13
7.4 Restwiderstandsverhältnis (RRR)	13
8 Messunsicherheit und Stabilität des Messverfahrens	13
8.1 Temperatur	13
8.2 Spannung	13
8.3 Strom	13
8.4 Abmessungen	14
9 Prüfbericht	14
9.1 RRR-Wert	14
9.2 Probe	14
9.3 Messbedingungen	15
9.3.1 Messung von R_1 und R_2	15
9.3.2 Messung von R_1	15
9.3.3 Messung von R_2	15
Anhang A (informativ) Zusätzliche Information zur Messung des Restwiderstandsverhältnisses (RRR)	16
A.1 Empfehlung zur Ausrichtung der Probe bei der Montage	16
A.2 Alternative Verfahren zur Anhebung der Probentemperatur über die Temperatur des Übergangs zur Supraleitung	16
A.3 Alternative Verfahren zur Messung von R_2 oder R_2^*	16

A.4	Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses von der Biegedehnung in Nb-Ti Verbundsupraleitern	18
A.5	Verfahren zur Korrektur des Einflusses der Biegedehnung	22
Anhang B (informativ) Messunsicherheitsbetrachtungen		23
B.1	Überblick	23
B.2	Definitionen	23
B.3	Betrachtung des Konzeptes der Messunsicherheit	24
B.4	Beispiel für eine Bestimmung von Messunsicherheiten für TC 90-Normen	25
Anhang C (informativ) Abschätzung der Messunsicherheit beim Messverfahren zur Bestimmung von RRR in Nb-Ti und Nb ₃ Sn Verbundsupraleitern		27
C.1	Bestimmung der Messunsicherheit	27
C.2	Zusammenfassung der Vergleichsversuche (Round Robin Test) zum Restwiderstandsverhältnis in einem Nb-Ti Verbundsupraleiter	30
C.3	Ursache für den hohen Variationskoeffizienten im Vergleichstest in Nb ₃ Sn Verbundsupraleitern	31
Literaturhinweise		33

Bilder

Bild 1	– Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand	9
Bild 2	– Kurven für die Spannung als Funktion der Temperatur und Definitionen der Spannungen	11
Bild A.1	– Definition der Spannungen	17
Bild A.2	– Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für die Reinkupfermatrix von Nb-Ti Verbundsupraleitern (Vergleich zwischen gemessenen Werten und berechneten Werten)	19
Bild A.3	– Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für runde Kupferdrähte	20
Bild A.4	– Abhängigkeit des normierten Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für runde Kupferdrähte	20
Bild A.5	– Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für rechteckige Kupferdrähte	21
Bild A.6	– Abhängigkeit des normierten Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für rechteckige Kupferdrähte	21
Bild C.1	– Verteilung der gemessenen Restwiderstandsverhältnisse (RRR) von Cu/Nb-Ti Verbundsupraleitern	31

Tabellen

Tabelle A.1	– Minimaler Durchmesser des Messspulenkörpers für runde Drähte	22
Tabelle A.2	– Minimaler Durchmesser des Messspulenkörpers für rechteckige Drähte	22
Tabelle B.1	– Ausgangssignale von zwei nominell identischen Dehnungsmessgeräten	24
Tabelle B.2	– Mittelwerte von zwei Ausgangssignalen	24
Tabelle B.3	– Experimentelle Standardabweichungen von zwei Ausgangssignalen	24
Tabelle B.4	– Standardmessunsicherheiten von zwei Ausgangssignalen	25
Tabelle B.5	– Variationskoeffizienten COV für zwei Ausgangssignale	25
Tabelle C.1	– Messunsicherheit der einzelnen Messgrößen	30

Tabelle C.2 – Erhaltene Werte für das Restwiderstandsverhältnis der sechs Nb ₃ Sn-Proben.....	32
Tabelle C.3 – Mittelwert /AVE), Standardabweichung (STD) und Variationskoeffizient (COV) der sechs Proben.....	32

Einleitung

Kupfer, Cu/Cu-Ni oder Aluminium wird als Matrixmaterial zur Stabilisierung in Nb-Ti und Nb₃Sn Verbundsupraleitern angewendet und wirkt als elektrischer Shuntwiderstand, wenn die Supraleitung unterbrochen wird. Es trägt außerdem zur Wiederherstellung der Supraleitung bei, indem es die im Supraleiter erzeugte Wärme nach außen an das Kühlmittel ableitet. Der spezifische Widerstand des in einem Verbundsupraleiter eingesetzten Kupfers im Tieftemperaturbereich ist eine wichtige Größe, welche die Stabilität des Supraleiters beeinflusst. Das Restwiderstandsverhältnis ist definiert als das Verhältnis des Widerstands des Supraleiters bei Raumtemperatur zu dem Widerstand unmittelbar oberhalb des Übergangs vom Normalleitenden Zustand zum Supraleitenden Zustand.

In dem hier vorliegenden Teil 4 der Internationalen Normenreihe IEC 61788 „Supraleitfähigkeit“ wird das Messverfahren zur Bestimmung des Restwiderstandsverhältnisses von Nb-Ti und Nb₃Sn Verbundsupraleitern festgelegt. Für die Messung des Widerstands unmittelbar oberhalb des Übergangs von der Normalleitung zur Supraleitung wird das Verfahren mit gemessenen Spannungskurven angewendet. Weitere Verfahren werden in [A.3](#) beschrieben.

**Supraleitfähigkeit –
Teil 4: Messung des Restwiderstandsverhältnisses –
Restwiderstandsverhältnis von Nb-Ti und Nb₃Sn Verbundsupraleitern**

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der Internationalen Normenreihe IEC 61788 „Supraleitfähigkeit“ behandelt ein Messverfahren zur Bestimmung des Restwiderstandsverhältnisses (RRR (en: residual resistance ratio)) von Nb-Ti Verbundsupraleitern mit Cu-, Cu-Ni-, Cu/Cu-Ni- und Al-Matrix und Nb₃Sn Verbundsupraleitern. Dieses Verfahren ist vorgesehen zur Anwendung bei Supraleitern, die eine monolithische Struktur mit rechteckigem oder rundem Querschnitt, ein Restwiderstandsverhältnis kleiner als 350 und eine Querschnittfläche kleiner als 3 mm² haben. Im Fall von Nb₃Sn wurde an den Proben eine Reaktionswärmebehandlung durchgeführt.

2 Normative Verweisungen

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

IEC 60050-815, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity* (available at: www.electropedia.org)

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-815 und die folgenden Begriffe.

Restwiderstandsverhältnis

RRR

(en: residual resistance ratio)

Verhältnis des Widerstands bei Raumtemperatur zu dem Widerstand unmittelbar oberhalb des Übergangs zur Supraleitung

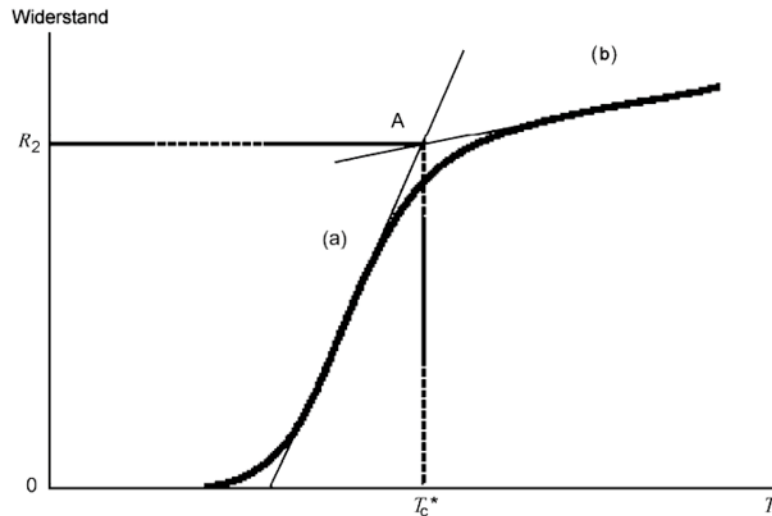
Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Anmerkung besitzt nur für die französische Sprache Gültigkeit.

Anmerkung 2 zum Begriff: In diesem Teil der IEC 61788 wird für Nb-Ti und Nb₃Sn Verbundsupraleiter die Raumtemperatur mit 293 K (20 °C) definiert und das Restwiderstandsverhältnis des Verbundleiters wird nach der unten stehenden Gleichung (1) bestimmt, wobei der Widerstand (R_1) bei 293 K dividiert wird durch den Widerstand (R_2) unmittelbar oberhalb des Übergangs zur Supraleitung.

$$r_{\text{RRR}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Dabei ist r_{RRR} ein Wert für das Restwiderstandsverhältnis. Der Tieftemperaturwiderstand R_2 ist ein Wert des Widerstands gemessen in belastungsfreiem Zustand und bei fehlendem externen magnetischen Feld.

Bild 1 zeigt schematisch eine Kurve für den Widerstand als Funktion der Temperatur, aufgenommen an einer Probe während der Messung des Widerstands bei tiefen Temperaturen.



Der Widerstand bei tiefen Temperaturen, R_2 , wird durch den Schnittpunkt A zweier Geraden (a) und (b) bei der Temperatur T_c^* bestimmt.

Bild 1 – Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand

4 Verfahren

Die Widerstandsmessung muss sowohl bei Raumtemperatur als auch bei tiefen Temperaturen mit der Vierpunkttechnik durchgeführt werden. Alle Messungen werden ohne angelegtes Magnetfeld durchgeführt.

Der Richtwert der relativen kombinierten Standardmessunsicherheit dieses Verfahrens, definiert als erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$), darf 5 % nicht überschreiten.

Die maximale Biegedehnung, die bei der Montage und dem Abkühlen der Nb-Ti Probe hervorgerufen wird, darf 2 % nicht übersteigen. Die Messung der Nb₃Sn Proben darf nur in dehnungsfreiem Zustand oder mit zulässigen thermischen Dehnungen durchgeführt werden.

5 Geräte

5.1 Material des Messspulenkörpers oder der Messplatine

Das Material des Messspulenkörpers für eine spulenförmige Nb-Ti Probe oder der Messplatine für eine gerade Nb-Ti oder Nb₃Sn Probe muss Kupfer, Silber oder ein vergleichbares Material sein, dessen Wärmeleitfähigkeit gleich oder größer ist als 100 W/(m × K) bei Flüssigheliumtemperatur (4,2 K). Die Oberfläche des Materials muss mit einer Isolierschicht bedeckt sein (Band oder eine Schicht aus Polyethylen, Therephthalat, Polyester, Polytetrafluorethylen usw.), deren Dicke 0,1 mm oder weniger beträgt.

5.2 Durchmesser des Messspulenkörpers und Länge der Messplatine

Der Durchmesser des Messspulenkörpers muss so groß sein, dass die Biegedehnung der Nb-Ti Probe innerhalb von 2 % gehalten wird. Die Nb₃Sn Probe auf einer Messplatine darf nur in dehnungsfreiem Zustand oder mit zulässigen thermischen Dehnungen gemessen werden.

Die Länge der Messplatine muss in einer Richtung mindestens 30 mm betragen.

5.3 Kryostat für die Messung des Widerstands R_2

In dem Kryostat müssen für die Messung des Widerstands R_2 ein Probenhalter und ein Vorrat an flüssigem Helium vorhanden sein. Die Konstruktion des Probenhalters muss es ermöglichen, die Probe, die auf einem Messspulenkörper oder einer Messplatine montiert ist, in das Flüssigheliumbad abzusenken oder aus ihm herauszuheben. Außerdem muss die Probenhalterkonstruktion so ausgeführt werden, dass ein Strom durch die Probe fließen und der Spannungsabfall längs der Probe gemessen werden kann.

6 Probenvorbereitung

Die zu messende Probe darf keine Verbindungsstellen oder Spleißungen aufweisen und muss 30 mm lang oder länger sein. Die Probe muss mit Stromkontakten in der Nähe der beiden Proben-Enden und mit einem Paar Spannungsabgriffen längs des mittleren Teils der Probe versehen werden. Der Abstand zwischen den Spannungsabgriffen (L) muss 15 mm oder mehr betragen. Das Thermometer zur Messung der tiefen Temperatur muss nahe an der Probe befestigt werden.

Die Probe muss mechanisch auf der isolierten Oberfläche des Messspulenkörpers oder der Messplatine fixiert werden. Besondere Vorsicht ist erforderlich während der messtechnischen Vorbereitung und beim Einsetzen der Probe, damit keine übermäßigen Kräfte auf die Probe ausgeübt werden, die unerwünschte Biege- oder Zugdehnungen verursachen können. Idealerweise soll die Nb₃Sn Probe so gerade wie möglich sein. Da dies nicht immer der Fall ist, muss darauf geachtet werden, dass die Probe wie im angelieferten Zustand gemessen wird.

Die Probe muss für diese Messungen auf einem Messspulenkörper oder einer Messplatine montiert werden. Die Messungen des Widerstands R_1 und die Messung des Widerstands R_2 müssen an ein und derselben Probe und mit derselben Montage durchgeführt werden.

7 Messung und Auswertung

7.1 Widerstand (R_1) bei Raumtemperatur

Die montierte Probe muss bei Raumtemperatur (T_m (K)) gemessen werden, wobei T_m die folgende Bedingung erfüllt: $273 \text{ K} \leq T_m \leq 308 \text{ K}$. Der Strom in der Probe (I_1 (A)) muss so eingestellt werden, dass die Stromdichte, bezogen auf die gesamte Querschnittsfläche des Drahts, im Bereich von $0,1 \text{ A/mm}^2$ bis 2 A/mm^2 liegt, und die resultierende Spannung (U_1 (V)), I_1 und die Temperatur T_m müssen registriert werden. Die Gleichung (2), siehe unten, muss angewendet werden, um den Widerstand (R_m) bei Raumtemperatur zu berechnen. Der Widerstand R_1 bei 293 K (20 °C) muss berechnet werden mit Hilfe der Gleichung (3) für einen Draht mit Cu-Matrix. Für Drähte, die kein Reinkupfer enthalten, muss der Wert von R_1 dem Wert R_m ohne irgendeine Temperaturkorrektur gleichgesetzt werden.

$$R_m = \frac{U_1}{I_1} \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{R_m}{\left[1 + 0,00393 \times (T_m - 293)\right]} \quad (3)$$

7.2 Widerstände (R_2 oder R_2^*) unmittelbar oberhalb des Übergangs zur Supraleitung

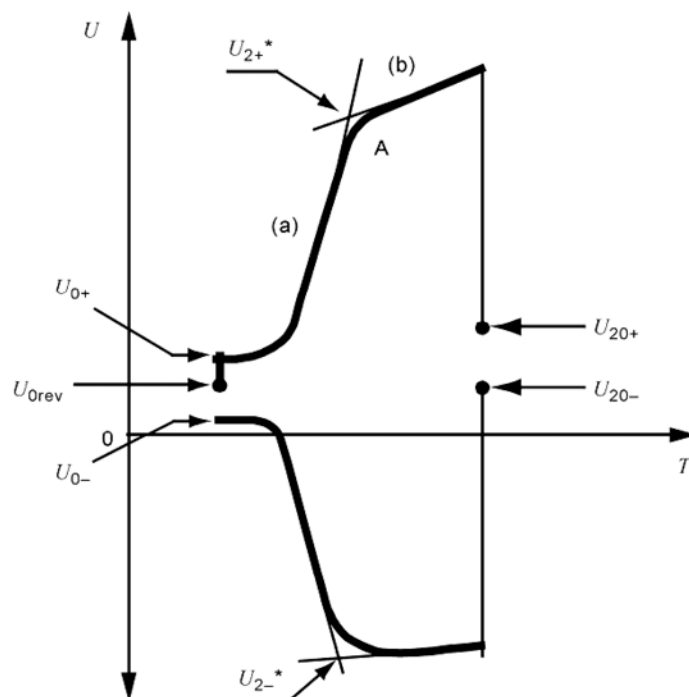
7.2.1 Korrektur des Dehnungseffektes

Im gedehnten Zustand der Nb-Ti Probe ist der bei tiefer Temperatur gemessene Widerstand (R_2^*) nicht der exakte Wert von R_2 . Die entsprechende Korrektur des Dehnungseffektes wird in 7.3 beschrieben.

7.2.2 Messung des Tieftemperaturwiderstandes

Die Probe, die noch montiert ist wie bei der vorausgegangenen Messung bei Raumtemperatur, muss in den für elektrische Messungen ausgerüsteten Kryostat gesetzt werden, der in 5.3 spezifiziert ist. Eine horizontale Montierung wird in A.1 empfohlen. Alternativ einsetzbare Kryostate, die mit einem Heizelement arbeiten, um die Probentemperatur stetig zu ändern, werden in A.2 beschrieben. Die Probe muss langsam in das Flüssigheliumbad getaucht werden und bis zur Flüssighelium-Temperatur während einer Zeitspanne von mindestens 5 min abgekühlt werden.

Während der Messungen von R_2^* bei tiefer Temperatur muss der Strom in der Probe (I_2) so eingestellt werden, dass die Stromdichte, bezogen auf die gesamte Querschnittsfläche des Drahts, im Bereich von $0,1 \text{ A/mm}^2$ bis 10 A/mm^2 liegt, und die resultierende Spannung U (V) und die Probentemperatur T (K) müssen registriert werden. Um das Signal/Rausch-Verhältnis ausreichend hoch zu halten, muss die Messung unter der Bedingung ausgeführt werden, dass der Absolutwert der resultierenden Spannung oberhalb des Übergangs zur Supraleitung höher ist als $10 \mu\text{V}$. Eine grafische Darstellung der Daten, die aufgenommen werden müssen, und ihre Analyse werden in Bild 2 gezeigt.



ANMERKUNG Die Spannungen mit den Indizes + und – sind die Spannungen, die jeweils bei den ersten und zweiten Messungen für positive bzw. negative Stromrichtung gemessen wurden, und U_{20+} und U_{20-} sind die Spannungen, die bei Strom null gemessen wurden. Der Übersichtlichkeit halber sind U_{0rev} gemessen bei Strom null, und U_{0-} nicht zusammenfallend gezeichnet. Gerade (a) wurde im Übergangsbereich mit einer hohen Steigung der Spannung mit der Temperatur und Gerade (b) wurde im Bereich mit fast konstanter Spannung eingezeichnet.

Bild 2 – Kurven für die Spannung als Funktion der Temperatur und Definitionen der Spannungen

Wenn die Probe im supraleitenden Zustand ist und der Messstrom (I_2) zugeführt wird, müssen zwei Spannungen nahezu simultan gemessen werden, U_{0+} (die Anfangsspannung, aufgenommen mit positiver Stromrichtung) und U_{0rev} (die bei kurzer Änderung der Stromrichtung aufgenommene Spannung). Eine zuverlässige Messung von R_2^* verlangt, dass keine übermäßigen Störspannungen auftreten und dass die Probe zu Beginn im supraleitenden Zustand ist. Somit muss die folgende Bedingung für eine gültige Messung eingehalten werden:

$$\frac{|U_{0+} - U_{0rev}|}{\bar{U}_2} < 1 \% \quad (4)$$

Dabei ist $\bar{U}_2$ die mittlere Spannung an der Probe bei tiefer Temperatur im normal leitenden Zustand, der in Gleichung (5) definiert ist.

Die Probe muss allmählich erwärmt werden, so dass sie vollständig in den normal leitenden Zustand übergeht. Wenn der in 5.3 spezifizierte Kryostat für die Widerstandsmessung benutzt wird, kann dies in einfacher Weise durch Anheben der Probe auf eine ausreichende Höhe oberhalb des Flüssighelium-Spiegels erreicht werden. Die Kurve für die Spannung an der Probe als Funktion der Temperatur muss in der Weise aufgenommen werden, dass eine Temperaturanstiegsgeschwindigkeit von 0,1 K/min bis 10 K/min eingehalten wird. Die Aufnahme der Kurve für die Spannung als Funktion der Temperatur muss fortgesetzt werden während des Übergangs und bis zum normal leitenden Zustand, ansteigend bis zu einer Temperatur etwas unterhalb von 15 K für Nb-Ti Proben und unterhalb von 25 K für Nb₃Sn Proben. Dann muss der Strom in der Probe auf Null herabgesetzt werden, und die zugehörige Spannung U_{20+} muss bei einer Temperatur unterhalb 15 K für Nb-Ti Proben und unterhalb 25 K für Nb₃Sn Proben aufgezeichnet werden.

Die Probe muss dann langsam in das Flüssigheliumbad abgesenkt und auf die gleiche Temperatur innerhalb von ± 1 K abgekühlt werden, bei der der Wert der Anfangsspannung U_{0+} registriert wurde. Ein Messstrom I_2 mit gleichem Betrag, aber negativer Stromrichtung (Stromrichtung entgegengesetzt zu der bei der ersten Kurve verwendeten Richtung) muss in die Probe eingespeist werden, und die Spannung U_{0-} muss bei dieser Temperatur aufgezeichnet werden. Die beschriebenen Verfahrensschritte müssen wiederholt werden, um die Kurve für die Spannung als Funktion der Temperatur bei diesem negativen Strom aufzunehmen. Außerdem muss, wenn der Messstrom I_2 auf 0 zurückgeht, U_{20} bei der gleichen Temperatur innerhalb von ± 1 K registriert werden, bei der U_{20+} registriert wurde.

Jede der beiden Kurven für die Spannung als Funktion der Temperatur muss ausgewertet werden, indem eine Gerade (a) durch die Messwerte gezogen wird, wo der Absolutwert der Spannung steil mit der Temperatur ansteigt (siehe Bild 2), und eine zweite Gerade (b) muss durch die Messwerte oberhalb des Übergangs gezogen werden, wo die Spannung für Nb-Ti nahezu unabhängig von der Temperatur ist und für Nb₃Sn nahezu linear mit der Temperatur ansteigt. Am Schnittpunkt dieser zwei Geraden müssen U_{2+}^* und U_{2-}^* in Bild 2 jeweils für die Kurven bei positiver bzw. negativer Stromrichtung bestimmt werden.

Die korrigierten Spannungen U_{2+} und U_{2-} müssen mit Hilfe der folgenden Gleichungen berechnet werden: $U_{2+} = U_{2+}^* - U_{0+}$ und $U_{2-} = U_{2-}^* - U_{0-}$. Die mittlere Spannung $\bar{U}_2$ muss definiert werden als

$$\bar{U}_2 = \frac{|U_{2+} - U_{2-}|}{2} \quad (5)$$

Eine gültige Messung von R_2^* verlangt, dass die thermoelektrische Spannungsverschiebung während den Messungen von U_{2+} und U_{2-} in akzeptablen Grenzen bleibt. Hierzu muss für eine gültige Messung die folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\frac{|\Delta_+ - \Delta_-|}{\bar{U}_2} < 3 \% \quad (6)$$

Dabei sind Δ_+ und Δ_- definiert als $\Delta_+ = U_{20+} - U_{0+}$ und $\Delta_- = U_{20-} - U_{0-}$. Wenn die Messung von R_2^* die Anforderungen an die Gültigkeit nach 7.2.2, speziell nach entweder Formel (4) oder Formel (6), nicht erfüllt, müssen Verbesserungen entweder an den Geräten oder bei der Versuchsdurchführung vorgenommen werden, um diese Forderungen zu erfüllen, bevor über die Ergebnisse berichtet wird.

Gleichung (7) muss angewendet werden, um den gemessenen Widerstand (R_2^*) unmittelbar oberhalb des Übergangs zur Supraleitung zu berechnen.

$$R_2^* = \frac{\bar{U}_2}{I_2} \quad (7)$$

7.2.3 Optionale Bestimmungsverfahren

Das im Hauptteil dieses Teils der IEC 61788 beschriebene Verfahren ist ein „Referenzverfahren“, und optionale Bestimmungsverfahren werden in [A.3](#) behandelt.

7.3 Korrektur des gemessenen Widerstands R_2^* in Nb-Ti Verbundsupraleitern hinsichtlich der Biegedehnung

Wenn der Supraleiter keinen Reinkupferanteil besitzt, muss R_2 gleich R_2^* gesetzt werden.

Die Biegedehnung muss für eine Probe mit Reinkupferanteil definiert werden durch $\varepsilon_b = 100 \times (h/r)$ (%), wobei h die halbe Dicke der Probe und r der Biegeradius sind. Wenn die Biegedehnung weniger als 0,3 % beträgt, ist keine Korrektur erforderlich und R_2 muss gleich R_2^* gesetzt werden.

Wenn keiner der beiden obigen Fälle zutrifft, muss der Widerstand R_2 unmittelbar oberhalb des Übergangs zur Supraleitung im Zustand ohne Dehnung durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$R_2 = R_2^* - \Delta\rho \times \frac{L}{S_{\text{Cu}}} \quad (8)$$

$\Delta\rho$ ist durch Gleichung (9) gegeben und S_{Cu} und L werden in [8.4](#) definiert. Die Zunahme des spezifischen Widerstands von reinem Kupfer bei 4,2 K durch die Zugdehnung ε (%) wird ausgedrückt durch die Gleichung

$$\Delta\rho \text{ (}\Omega\text{m)} = 6,24 \times 10^{-12} \varepsilon - 5,11 \times 10^{-14} \varepsilon^2; \quad \varepsilon \leq 2 \% \quad (9)$$

Die Berechnung nach Gleichung (9) muss durchgeführt werden unter der Annahme, dass die äquivalente Zugdehnung ε gleich $(1/2) \varepsilon_b$ für rechteckige Drähte und $(4/3 \pi) \varepsilon_b$ für Runddrähte ist. Die Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses von der Biegedehnung für reines Kupfer wird in [A.4](#) beschrieben.

7.4 Restwiderstandsverhältnis (RRR)

Das Restwiderstandsverhältnis muss mit Hilfe von [Gleichung \(1\)](#) berechnet werden.

8 Messunsicherheit und Stabilität des Messverfahrens

8.1 Temperatur

Die Raumtemperatur muss mit einer Standardmessunsicherheit, die 0,6 K nicht überschreiten darf, bestimmt werden, während die Probe, die auf dem Messspulenkörper oder der Messplatine montiert ist, auf Raumtemperatur gehalten wird.

8.2 Spannung

Für die Widerstandsmessung muss das Spannungssignal mit einer relativen Standardmessunsicherheit von 0,3 % oder besser bestimmt werden.

8.3 Strom

Wenn der Strom einer programmierbaren Gleichstromquelle direkt über die Probe fließt, muss der Messstrom mit einer Standardmessunsicherheit von nicht mehr als 0,3 % bestimmt werden.

Wenn der Messstrom in der Probe aus der Spannungs-Strom-Charakteristik eines Normalwiderstandes mit der Vierpunktmesstechnik bestimmt wird, muss ein Normalwiderstand verwendet werden, dessen relative kombinierte Standardmessunsicherheit 0,3 % nicht überschreitet.

Die Schwankungen des Messstroms in der Probe (Gleichstrom), der von einem Gleichstromnetzgerät geliefert wird, müssen bei jeder Widerstandsmessung kleiner als 0,5 % sein.

8.4 Abmessungen

Der Abstand zwischen den Spannungsabgriffen längs der Probe (L) muss mit einer relativen kombinierten Standardmessunsicherheit von nicht mehr als 5 % bestimmt werden.

Bei einem Draht mit einer reinen Cu-Matrix muss die Querschnittfläche der Cu-Matrix (S_{Cu}) bestimmt werden, indem der Nennwert für das Verhältnis des Kupferanteils zum Nicht-Kupferanteil und die Nennabmessung der Probe benutzt werden. Der Drahtdurchmesser (d) und Spulenkörperradius (R_d) müssen jeweils mit einer relativen Standardabweichung von 1 % bzw. 3 % oder weniger bestimmt werden.

9 Prüfbericht

9.1 RRR-Wert

Der ermittelte RRR-Wert muss angegeben werden als

$$r_{RRR} (1 \pm U_{re}) \quad (n = \dots) \quad (10)$$

Dabei ist

U_{re} die erweiterte relative Messunsicherheit:

$$U_{re} = 2u_r \quad (k = 2)$$

Dabei ist

u_r die relative kombinierte Standardmessunsicherheit;

k ein Erweiterungsfaktor; und

n die Zahl der Proben.

Es ist wünschenswert, dass n größer ist als 4, so dass eine Normalverteilung für die Bestimmung der Standardabweichung angenommen werden kann. Wenn n nicht groß genug ist, muss eine quadratische Verteilung angenommen werden.

9.2 Probe

Der Prüfbericht zur Angabe der Ergebnisse der Messungen muss weiterhin die folgenden Punkte aufführen, soweit bekannt:

- d) Hersteller;
- e) Klassifizierung und/oder Symbol;
- f) Form und Fläche des Querschnitts;
- g) Größe der Querschnittfläche;
- h) Anzahl der Filamente;
- i) Durchmesser der Filamente;
- j) Für Nb-Ti Proben das Volumenverhältnis der folgenden Materialien zu Nb-Ti

Cu

Cu-Ni

Cu und Cu-Ni

Al und Cu

Oder die folgenden Volumenverhältnisse

Cu-Ni : Cu : Nb-Ti

Al : Cu : Nb-Ti

- k) Volumenverhältnis von Kupfer zu Nicht-Kupfer in Nb₃Sn Proben;
- l) Querschnittfläche der Cu-Matrix (S_{Cu}).

9.3 Messbedingungen

9.3.1 Messung von R_1 und R_2

Für die Messungen von R_1 und R_2 müssen folgende Testbedingungen angegeben werden:

- m) Gesamtlänge der Probe;
- n) Abstand zwischen den Spannungsabgriffen (L);
- o) Länge der Stromkontakte;
- p) Transportstrom (I_1 und I_2);
- q) Stromdichten (I_1 und I_2 dividiert durch die gesamte Fläche des Drahtquerschnitts);
- r) Spannungen (U_1 , U_{0+} , U_{0rev} , U_{2+}^* , U_{20+} , U_{0-} , U_{2-}^* , U_{20-} und $\bar{U}_2$);
- s) Widerstände (R_m , R_1 , R_2^* und R_2);
- t) spezifische Widerstände ($\rho_1 = (R_1 \times S_{Cu})/L$ und $\rho_2 = (R_2 \times S_{Cu})/L$);
- u) Material, Form und Abmessungen des Spulenkörpers oder der Platine;
- v) Befestigungsart der Probe auf dem Spulenkörper oder auf der Platine;
- w) Isoliermaterial des Spulenkörpers oder der Platine.

9.3.2 Messung von R_1

Für die Messung von R_1 müssen folgende Testbedingungen angegeben werden:

- x) Verfahren zum Einstellen der Temperatur und Halten der Probe;
- y) T_m : Temperatur zur Messung von R_m .

9.3.3 Messung von R_2

Für die Messung von R_2 müssen folgende Testbedingungen angegeben werden:

- z) Anstiegsgeschwindigkeit der Temperatur;
- aa) Verfahren zum Abkühlen und Aufheizen.

Zusätzliche Informationen bezüglich der Messung des Restwiderstandsverhältnisses sind in [Anhang A](#) gegeben. [Anhang B](#) beschreibt Definitionen und ein Beispiel von Messunsicherheit. Die Bewertung der Messunsicherheit des Restwiderstandsverhältnisses mit der Referenzprüfmethode für Verbundsupraleiter ist in [Anhang C](#) gegeben.

Anhang A (informativ)

Zusätzliche Information zur Messung des Restwiderstandsverhältnisses (RRR)

A.1 Empfehlung zur Ausrichtung der Probe bei der Montage

Liegt die Probe in der Form eines geraden Leiters vor, wird die horizontale Anbringung des Leiters auf der Grundplatte empfohlen, da diese Ausrichtung bei der Befestigung im Vergleich zur vertikalen mögliche thermische Gradienten längs des Leiters verringern kann. Mit horizontaler Ausrichtung ist hier gemeint, dass die Leiterlängsachse parallel zur Oberfläche des flüssigen Heliums orientiert ist.

A.2 Alternative Verfahren zur Anhebung der Probentemperatur über die Temperatur des Übergangs zur Supraleitung

Die folgenden Verfahren werden ebenfalls empfohlen zur Erhöhung der Temperatur der Probe über die Temperatur des Übergangs zur Supraleitung. Bei diesen Verfahren sollte eine Anstiegsgeschwindigkeit der Temperatur der gesamten Probe im Bereich von 0,1 K/min bis 10 K/min angewendet werden. Besonders sorgfältig sollte auf die Heizleistung, die Wärmekapazität (Probe mit Messspulenkörper oder Messplatine) und den Abstand zwischen dem Heizelement und der Probe geachtet werden, um die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs zu dämpfen und einen großen Temperaturgradienten zu vermeiden.

bb) Heizelementverfahren

Die Probe kann über den Übergang zur Supraleitung aufgeheizt werden, indem ein Heizelement an dem Messspulenkörper oder an der Messplatine angebracht wird, nachdem die Probe aus dem Flüssigheliumbad des Kryostaten genommen worden ist.

cc) Kontrollierte Verfahren

(1) Adiabatisches Verfahren

Bei diesem Verfahren ist im Kryostat eine Kammer untergebracht, die die Probe, einen Probenhalter, ein Heizgerät usw. enthält. Bevor die Kammer in das Flüssigheliumbad eingetaucht wird, wird Luft aus der Kammer herausgepumpt und Heliumgas eingefüllt. Anschließend wird die Kammer in das Flüssigheliumbad eingetaucht und die Probe auf eine Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur abgekühlt. Nachdem das Heliumgas herausgepumpt worden ist, kann die Probe mit Hilfe des Heizgeräts adiabatisch auf eine Temperatur oberhalb des supraleitenden Übergangs aufgeheizt werden.

(2) Quasi-adiabatisches Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die Probe im Kryostat während des gesamten Kälteexperimentes in einem gewissen Abstand oberhalb des Flüssigheliumbades gehalten. Eine thermische Anbindung vom Messspulenkörper oder von der Messplatine zum Flüssigheliumbad erlaubt es, die Probe auf eine Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur abzukühlen. Die Probe kann mit Hilfe eines Heizgerätes im Spulenkörper oder in der Basisplatte auf eine Temperatur oberhalb des Übergangs zur Supraleitung quasi-adiabatisch aufgeheizt werden.

(3) Verfahren mit Kältemaschine (Refrigeratorverfahren)

Bei diesem Verfahren wird eine elektrisch betriebene Kältemaschine (Refrigerator) eingesetzt, um die Probe, die auf einem Messspulenkörper oder einer Messplatine montiert ist, auf eine Temperatur von 6 K oder niedriger abzukühlen. Die Probe kann über den Übergang zur Supraleitung durch ein Heizelement oder durch Regelung der Kälteleistung aufgeheizt werden.

A.3 Alternative Verfahren zur Messung von R_2 oder R_2^*

Die folgenden Verfahren können ebenfalls wahlweise zur Bestimmung von R_2 oder R_2^* angewandt werden.

dd) Modifiziertes Referenzverfahren

Dies ist ein vereinfachtes Verfahren, bei dem nur eine Spannungs-Temperatur-Kurve aufgenommen wird und das bei Nb-Ti Verbundsupraleitern angewendet wird. Die Spannung an der Probe wird im supraleitenden Zustand bei einer gewählten Richtung des Stroms (I_2) und dann bei der entgegengesetzten Stromrichtung gemessen. Diese Werte sind U_{0+} und U_{0rev} , wie in Bild A.1 gezeigt. Dann wird die anfängliche Stromrichtung eingestellt. Nach dem Übergang in den normal leitenden Zustand wird die Spannung U'_{2+} gemessen in einem Gebiet der Kurve innerhalb von etwa 4 K oberhalb des Übergangs. Dann wird die Spannung bei Strom null abgelesen (U_{20}). Danach wird die Stromrichtung umgekehrt und die Spannung erneut gemessen (U'_{2-}). Der Tieftemperaturwiderstand wird berechnet aus

$$R_2^* = \frac{\bar{U}_2}{I_2} \quad (\text{A.1})$$

mit

$$\bar{U}_2 = \frac{|U'_{2+} - U'_{2-}|}{2} \quad (\text{A.2})$$

Dies kompensiert näherungsweise den Effekt einer Thermospannung. Die folgenden Bedingungen sollten erfüllt werden, um sicherzustellen, dass der Einfluss einer Störspannung bzw. Thermospannung auf die Bestimmung von R_2^* nicht unzulässig groß wird:

$$\frac{|U_{0+} - U_{0rev}|}{\bar{U}_2} < 1 \% \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{|\Delta_{2+} - \Delta_{2-}|}{\bar{U}_2} < 3 \% \quad (\text{A.4})$$

Dabei sind Δ_{2+} und Δ_{2-} definiert durch $\Delta_{2+} = |U'_{2+} - U_{20}|$ und $\Delta_{2-} = |U'_{2-} - U_{20}|$.

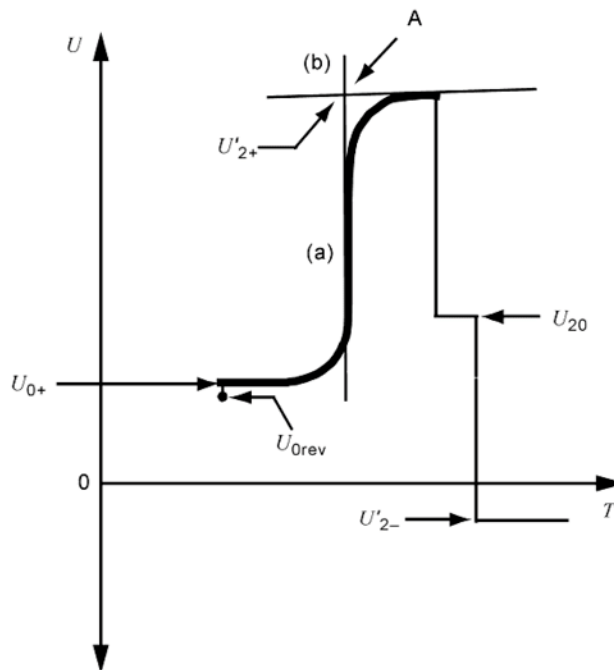


Bild A.1 – Definition der Spannungen

ee) Messung der Spannung gegen Zeit

Anstatt die Spannung gegen Temperatur zu messen, kann man den Tieftemperaturwiderstand auch aus einer Spannungskurve gegen Zeit bestimmen, die kontinuierlich unter- und oberhalb der kritischen Temperatur aufgenommen wurde. Es sollte Acht gegeben werden, dass die Probe nicht erneut gekühlt wird, ohne die Messung von U gegen t neu zu starten. Die charakteristischen Spannungen, wie U_{2+} , können auf eine ähnliche Art über den Schnittpunkt zweier Geraden, eine in dem Bereich größter Steigung während des Übergangs und eine im relativ flachen Bereich ausreichend weit über dem Übergang der U gegen t Kurve, bestimmt werden. Die anschließende Auswertung zur Bestimmung des Tieftemperaturwiderstandes ist identisch zur Referenzmethode.

ff) Verfahren mit fester Temperatur

Bei diesem Verfahren wird R_2 oder R_2^* in Nb-Ti Verbundsupraleitern unmittelbar bei einer festen Temperatur in einem Plateaubereich bei etwa 4 K oberhalb des Übergangs, und R_2 in Nb₃Sn Verbundsupraleitern direkt bei 20 K, bestimmt, anstatt das in 7.2 beschriebenen Verfahren zu verwenden. In diesem Fall ist es empfehlenswert, zu überprüfen, dass die Probe als Ganzes bei der festen Temperatur thermisch stabil gehalten wird. Bei der Messung in Nb₃Sn Verbundsupraleitern sollte die feste Temperatur von 20 K mit einer kombinierten Standardmessunsicherheit von weniger als 0,6 K bestimmt werden. Die feste Temperatur und die kombinierte Standardmessunsicherheit sollten im Messbericht festgehalten werden. Außerdem sollten die Spannungen U_{0+} und U_{0-} , die in 7.2.2 definiert sind, als Nullspannungspegel bei dem Verfahren mit fester Temperatur registriert werden. Um den Einfluss von Thermospannungen zu eliminieren, sollten zwei Spannungswerte an der Probe, z. B. U_{2+} und U_{2-} , nahezu gleichzeitig mit Reversieren des Messstroms aufgenommen werden. Bei dem Verfahren mit fester Temperatur kann der Einfluss von Thermospannungen auf die Bestimmung des Tieftemperaturwiderstands R_2^* gut eliminiert werden.

gg) Rechnergestütztes Verfahren

Ein Rechner kann dazu verwendet werden, die Stromrichtung einzustellen, die Erwärmung der Probe zu regeln und die Spannung-Temperatur-Kurve zu messen. Änderungen der Stromrichtung durch periodische Stromänderungen oder eingeschaltete und ausgeschaltete Zyklen eines periodisch veränderlichen Stroms werden angewandt, um Verschiebungen durch Offset-Spannungen zu korrigieren, damit die Messungen während eines Zeitraums durchgeführt werden können, in dem die Probertemperatur geändert wird. Dieses Verfahren ist vorteilhaft, wenn der Übergang in den normal leitenden Zustand nicht zu rasch erfolgt. Der Effekt von Thermospannungen sollte auch dabei überprüft werden.

hh) Andere vereinfachte Verfahren mit periodischen Kontrollen

Vereinfachte Verfahren ohne Temperaturmessung können ebenfalls akzeptiert werden, wenn ein Prüfer mit ausreichender Erfahrung die Messung mit Hilfe einer vorhandenen Messapparatur durchführt und die folgende Bedingung erfüllt wird: Wenn mit einem vereinfachten Messverfahren durch wiederholte Kontrollen nachgewiesen werden kann, dass es das gleiche Ergebnis wie das Verfahren nach diesem Teil von IEC 61788 innerhalb der festgelegten Fehlergrenzen liefert, kann das vereinfachte Verfahren anstelle des Referenzverfahrens angewandt werden. Diese periodischen Prüfungen können durchgeführt werden, indem eine der folgenden Messungen ausgeführt wird:

- 4) eine Vergleichsmessung zwischen verschiedenen Laboratorien, wobei ein Laboratorium das Referenzverfahren und ein anderes Laboratorium sein vereinfachtes Verfahren anwendet;
- 5) eine Vergleichsmessung in ein und demselben Laboratorium, wobei das betreffende Laboratorium sein vereinfachtes Verfahren durch Vergleich mit dem Referenzverfahren überprüft;
- 6) wiederholte Messungen mit dem vereinfachten Verfahren an einem kleinen Satz von Referenzproben mit bekannten Werten des Restwiderstandsverhältnisses (RRR-Werten).
- 7) regelmäßige Messungen mit mehreren Proben, von denen eine als Referenz dient, nicht ausgetauscht wird und jedes Mal zur Kalibration verwendet wird.

A.4 Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses von der Biegedehnung in Nb-Ti Verbundsupraleitern

Im Allgemeinen steigt der spezifische Widerstand (ρ) eines reinen Metalls, z. B. von Kupfer, bei sehr tiefer Temperatur in dem Maße, wie die aufgebrachte Biegedehnung zunimmt. Im Allgemeinen zeigt ein Draht mit vergleichsweise niedrigem ρ eine prozentual größere ρ -Änderung als ein Draht mit vergleichsweise hohem ρ .

Bei Raumtemperatur gibt es nahezu keinen Dehnungseffekt für den spezifischen Widerstand eines Metalls. Das bedeutet, dass die Änderung des Restwiderstandsverhältnisses mit der Dehnung stärker ausgeprägt ist für ein Material, dessen Restwiderstandsverhältnis hoch ist. Entsprechend den Vergleichsversuchen [1]¹ war die Abhängigkeit von der Biegedehnung schwach für eine Probe mit niedrigem Restwiderstandsverhältnis. Biegedehnung wird aufgebracht, wenn die Probe auf dem Messspulenkörper montiert wird. Da die Biegedehnung umgekehrt proportional zu dem Biegeradius ist, wird die Biegedehnung der Probe umso größer, je kleiner der Durchmesser des Messspulenkörpers ist.

Die Zunahme des spezifischen Widerstands, $\Delta\rho$, bei 4 K als Funktion des Kaltverformungsgrads, r_{CW} (%), für reines Kupfer ist dargestellt im Kapitel 8 der Literaturangabe [2]. Da der Wert des Kaltverformungsgrads ungefähr gleich dem Wert der Zugdehnung ε ist, wenn ε klein ist, wird das Ergebnis entsprechend Gleichung (9) ausgedrückt. Die Abhängigkeit des Anwachsens des spezifischen Widerstands von Kupfer von der Biegedehnung kann berechnet werden, indem die Biegedehnung durch eine äquivalente Zugdehnung ersetzt wird.

Bild A.2 zeigt die Beziehung zwischen Restwiderstandsverhältnis und Biegedehnung für Nb-Ti-Verbundsupraleiter mit Reinkupfer als Ergebnis der Vergleichsversuche in den Jahren 1993 und 1994. Die eingezeichneten Linien sind die nach Gleichung (9) für die angegebenen Proben berechneten Verläufe. Die Messwerte stimmen grundsätzlich mit den berechneten Werten überein, und Materialien mit hohem Restwiderstandsverhältnis erweisen sich als empfindlich gegenüber Biegedehnung. Unter Verwendung von Gleichung (9) zeigt Bild A.3 die Abhängigkeit für runde Kupferdrähte, wobei das Restwiderstandsverhältnis ohne Dehnung ($r_{RRR}(0)$) im Bereich von 50 bis 350 variiert. Bild A.4 zeigt die Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses von der Dehnung, normiert auf den Wert bei Dehnung null. Die gleiche Abhängigkeit für rechteckförmige Drähte wird in den Bildern A.5 und A.6 gezeigt. Für Kupfer mit einem Restwiderstandsverhältnis von 350, was die Obergrenze für das Restwiderstandsverhältnis in diesem Teil der IEC 61788 darstellt, nimmt das Restwiderstandsverhältnis infolge einer Biegedehnung von 2 % bezogen auf die Biegedehnung null um 10 % ab.

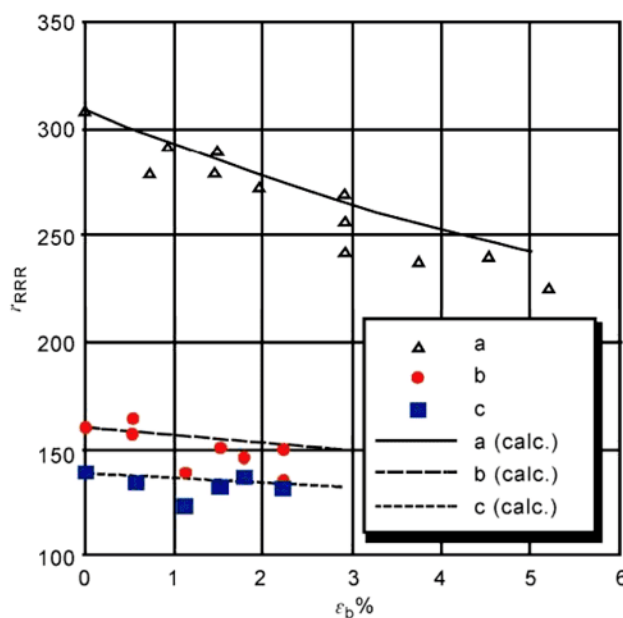


Bild A.2 – Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für die Reinkupfermatrix von Nb-Ti Verbundsupraleitern (Vergleich zwischen gemessenen Werten und berechneten Werten)

¹ Zahlenangaben in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturangaben am Ende dieses Dokuments.

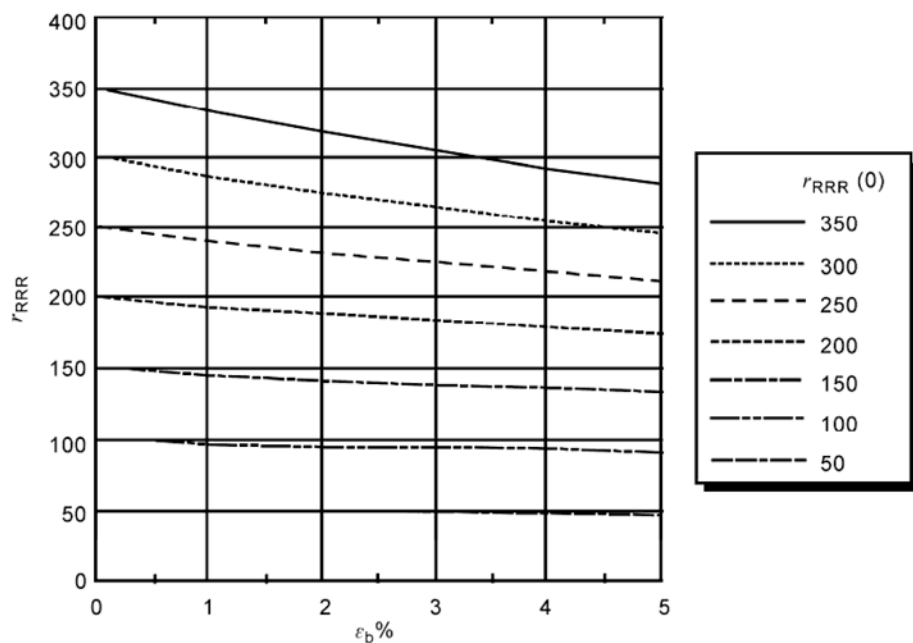


Bild A.3 – Abhängigkeit des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für runde Kupferdrähte

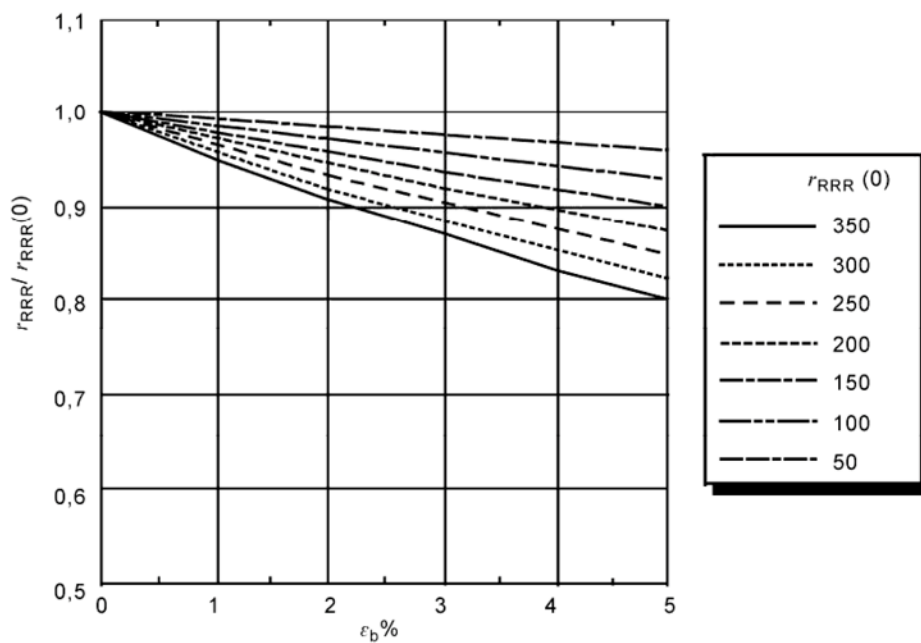


Bild A.4 – Abhängigkeit des normierten Restwiderstandsverhältnisses (RRR) von der Biegedehnung für runde Kupferdrähte