

DIN EN ISO 17279-3



ICS 25.160.01

**Schweißen –
Mikrofügen von Hochtemperatursupraleitern der 2. Generation –
Teil 3: Prüfverfahren von Fügeverbindungen (ISO 17279-3:2021);
Deutsche Fassung EN ISO 17279-3:2021**

Welding –

Micro joining of second generation high temperature superconductors –

Part 3: Test methods for joints (ISO 17279-3:2021);

German version EN ISO 17279-3:2021

Soudage –

Micro-assemblage des supraconducteurs à haute température de deuxième génération –

Partie 3: Méthode d'essai des assemblages (ISO 17279-3:2021);

Version allemande EN ISO 17279-3:2021

Gesamtumfang 54 Seiten

DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 17279-3:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 44 „Welding and allied processes“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 121 „Schweißen und verwandte Verfahren“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 092-00-04 AA „Qualitätssicherung beim Schweißen (DVS AG Q 2)“ im DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS).

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

IEC 61788-3	siehe DIN EN 61788-3
IEC 61788-4	siehe DIN EN 61788-4
IEC 61788-6	siehe DIN EN 61788-6
IEC 61788-19	siehe DIN EN 61788-19
ISO 15607:2019	siehe DIN EN ISO 15607:2020-02
ISO 17279-1:2018	siehe DIN EN ISO 17279-1:2019-09
ISO 17279-2	siehe DIN EN ISO 17279-2
ISO 17637	siehe DIN EN ISO 17637

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

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61788-3, *Supraleitfähigkeit — Teil 3: Messen des kritischen Stromes — Kritischer Strom (Gleichstrom) von Ag- und/oder Ag-Legierung ummantelten oxidischen Bi-2212 und Bi-2223-Supraleitern*

DIN EN 61788-4, *Supraleitfähigkeit — Teil 4: Messung des Restwiderstandsverhältnisses — Restwiderstandsverhältnis von Nb-Ti und Nb₃Sn Verbundsupraleitern*

DIN EN 61788-6, *Supraleitfähigkeit — Teil 6: Messung der mechanischen Eigenschaften — Messung der Zugfestigkeit von Cu/Nb-Ti-Verbundsupraleitern bei Raumtemperatur*

DIN EN 61788-19, *Supraleitfähigkeit — Teil 19: Messung der mechanischen Eigenschaften — Zugversuch von reagierten Nb₃Sn-Verbundsupraleitern bei Raumtemperatur*

DIN EN ISO 15607:2020-02, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Allgemeine Regeln (ISO 15607:2019); Deutsche Fassung EN ISO 15607:2019*

DIN EN ISO 17279-1:2019-09, *Schweiße Schweißen — Mikrofügen von Hochtemperatursupraleitern der zweiten Generation — Teil 1: Allgemeine Anforderungen an das Verfahren (ISO 17279-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17279-1:2018*

DIN EN ISO 17279-2, *Schweißen — Mikrofügen von Hochtemperatursupraleitern der zweiten Generation — Teil 2: Qualifizierung für Schweiß- und Prüfpersonal*

DIN EN ISO 17637, *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen — Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen*

— Leerseite —

Deutsche Fassung
Schweißen —
Mikrofügen von Hochtemperatursupraleitern
der 2. Generation —
Teil 3: Prüfverfahren von Fügeverbindungen
(ISO 17279-3:2021)

Welding —
Micro joining of second generation high temperature
superconductors —
Part 3: Test methods for joints (ISO 17279-3:2021)

Soudage —
Micro-assemblage des supraconducteurs à haute
température de deuxième génération —
Partie 3: Méthode d'essai des assemblages
(ISO 17279-3:2021)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 4. März 2021 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Prüfverfahren für Fügeverbindungen	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Sichtprüfung	9
4.2.1 Allgemeines	9
4.2.2 Qualifizierung des Prüfpersonals	9
4.2.3 Prüfeinrichtung	9
4.2.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung	9
4.2.5 Prüfung	9
4.2.6 Annahmekriterien	10
4.2.7 Prüfbericht	10
4.3 Prüfung durch Vier-Punkt-Messung	10
4.3.1 Allgemeines	10
4.3.2 Qualifizierung des Prüfpersonals	10
4.3.3 Prüfeinrichtung	10
4.3.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung	10
4.3.5 Prüfung	10
4.3.6 Annahmekriterien	16
4.3.7 Prüfbericht	16
4.4 Feldzerfallsprüfung	17
4.4.1 Allgemeines	17
4.4.2 Qualifizierung des Prüfpersonals	17
4.4.3 Prüfeinrichtung	17
4.4.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung	17
4.4.5 Prüfung	17
4.4.6 Annahmekriterien	20
4.4.7 Prüfbericht	20
4.5 Feldprüfung	20
4.5.1 Allgemeines	20
4.5.2 Qualifizierung des Prüfpersonals	20
4.5.3 Prüfeinrichtung	20
4.5.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung	20
4.5.5 Prüfung	21
4.5.6 Annahmekriterien	23
4.5.7 Prüfbericht	23
4.6 Zugversuch	23
4.6.1 Allgemeines	23
4.6.2 Qualifizierung des Prüfpersonals	23
4.6.3 Prüfeinrichtung	23
4.6.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung	23

4.6.5	Prüfung.....	23
4.6.6	Annahmekriterien	24
4.6.7	Prüfbericht.....	24
4.7	Biegeversuch.....	24
4.7.1	Allgemeines	24
4.7.2	Qualifizierung des Prüfpersonals.....	24
4.7.3	Prüfeinrichtung.....	24
4.7.4	Oberflächenzustand und -vorbereitung.....	24
4.7.5	Prüfung.....	24
4.7.6	Annahmekriterien	25
4.7.7	Prüfbericht.....	25
4.8	Prüfung des kritischen Magnetfelds.....	25
4.8.1	Allgemeines	25
4.8.2	Qualifizierung des Prüfpersonals.....	25
4.8.3	Prüfeinrichtung.....	26
4.8.4	Oberflächenzustand und -vorbereitung.....	26
4.8.5	Prüfung.....	26
4.8.6	Annahmekriterien	26
4.8.7	Prüfbericht.....	26
4.9	Prüfung der kritischen Stromdichteverteilung.....	27
4.9.1	Allgemeines	27
4.9.2	Qualifizierung des Prüfpersonals.....	27
4.9.3	Prüfeinrichtung.....	27
4.9.4	Oberflächenzustand und -vorbereitung.....	27
4.9.5	Prüfung.....	27
4.9.6	Annahmekriterien	27
4.9.7	Prüfbericht.....	27
4.10	Mikroskopische Prüfung und Röntgenbeugungsprüfung	28
4.10.1	Allgemeines	28
4.10.2	Qualifizierung des Prüfpersonals.....	28
4.10.3	Prüfeinrichtung.....	28
4.10.4	Oberflächenzustand und -vorbereitung.....	28
4.10.5	Prüfung.....	28
4.10.6	Annahmekriterien	29
4.10.7	Berichterstattung.....	29
Anhang A (informativ) Bericht der Ergebnisse der Sichtprüfung.....		30
Anhang B (informativ) Bericht über die Ergebnisse der Prüfung durch Vier-Punkt-Messung		32
Anhang C (informativ) Bericht der Ergebnisse der Feldzerfallsprüfung.....		34
Anhang D (informativ) Bericht der Ergebnisse der Feldprüfung		37
Anhang E (informativ) Bericht der Ergebnisse des Zugversuchs		40
Anhang F (informativ) Bericht der Ergebnisse des Biegeversuchs.....		42
Anhang G (informativ) Bericht der Ergebnisse der Prüfung des kritischen Magnetfelds.....		44
Anhang H (informativ) Bericht der Ergebnisse der Prüfung der kritischen Stromdichteverteilung		46
Anhang I (informativ) Bericht der Ergebnisse aus der mikroskopischen Prüfung und Röntgenbeugungsprüfung.....		48
Literaturhinweise.....		50

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 17279-3:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 44 „Welding and allied processes“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 121 „Schweißen und verwandte Verfahren“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis September 2021, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis September 2021 zurückgezogen werden.

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

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 17279-3:2021 wurde von CEN als EN ISO 17279-3:2021 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 44, *Welding and allied processes*, Unterkomitee SC 10, *Quality management in the field of welding*, in Zusammenarbeit mit dem Europäischen Komitee für Normung (CEN), Technisches Komitee CEN/TC 121, *Schweißen und verwandte Verfahren*, in Übereinstimmung mit der Vereinbarung zur technischen Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN (Wiener Vereinbarung) erarbeitet.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 17279 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Offizielle Auslegungen von ISO/TC 44-Dokumenten sind, soweit vorhanden, auf dieser Seite verfügbar: <https://committee.iso.org/sites/tc44/home/interpretation.html>.

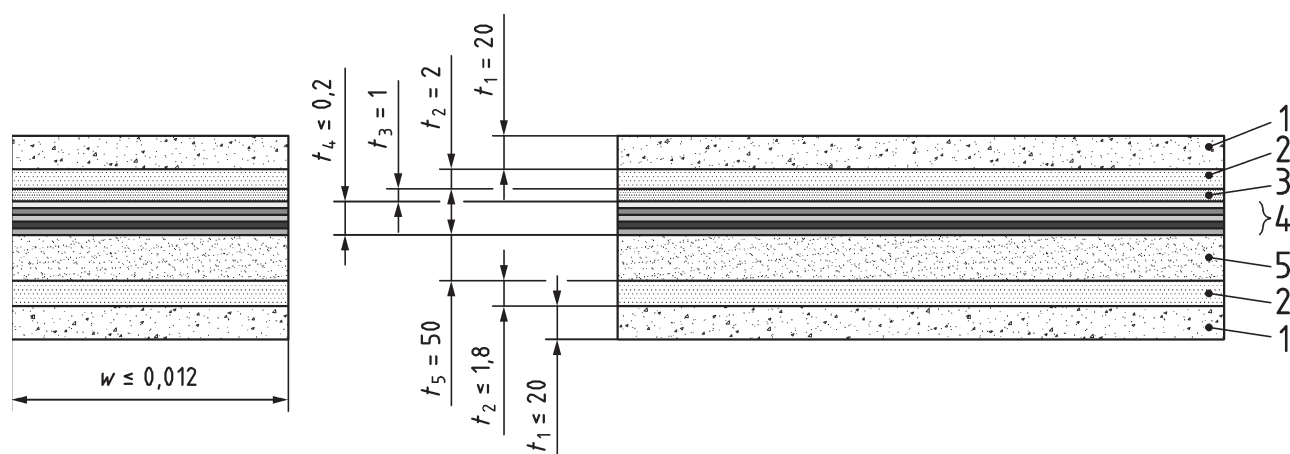
Einleitung

Die zunehmende Verwendung von Hochtemperatursupraleitern der zweiten Generation (2G HTS) und die Erfindung widerstandsloser Verbindungen bei 2G HTS führten zur Notwendigkeit der Normenreihe ISO 17279, mit deren Hilfe sichergestellt werden soll, dass die Verbindung effektiv durchgeführt wird und geeignete Kontrollen aller Aspekte des Vorgangs angewendet werden. ISO-Normen für Mikrofüge- und Verbindungsbeurteilungs-Verfahren sind dementsprechend wichtig, um die beste und einheitliche Qualität von 2G HTS-Verbindungen zu erzielen.

Bei einem Supraleiter handelt es sich um ein Material, welches Strom widerstandslos leitet und welches unter der kritischen Temperatur (T_c), dem kritischen Magnetfeld (B_c) und der kritischen Stromdichte (J_c) diamagnetisch ist. Einmal in Bewegung fließt der elektrische Strom unaufhörlich in einer geschlossenen Schleife aus supraleitendem Material unter Diamagnetismus.

Ein 2G HTS besteht aus mehreren Schichten, wobei die Gesamtdicke zwischen 60 μm und 90 μm beträgt und die supraleitende Schicht aus $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ in Abhängigkeit von der Herstellerspezifikation nur 1 μm bis 3 μm dick ist. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung typischer Mehrfachsichten sowie die Bestandteile und Dicken jeder Schicht des 2G HTS.

Maße in Mikrometer



Legende

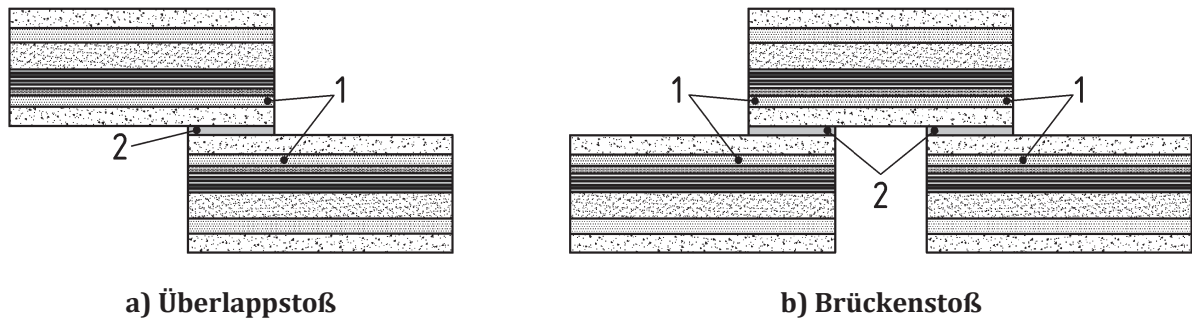
- 1 Cu-Stabilisator
- 2 Ag-Deckschicht
- 3 supraleitende REBCO-Schicht
- 4 Pufferschichten
- 5 Hastelloy®C-276-Substrat

- t_1 Dicke von Schicht 1
- t_2 Dicke von Schicht 2
- t_3 Dicke von Schicht 3
- t_4 Dicke von Schicht 4
- t_5 Dicke von Schicht 5

ANMERKUNG Nicht maßstabsgerecht.

Bild 1 — Typische Mehrfachsichten eines 2G HTS sowie die Bestandteile und Dicken jeder Schicht

Weichlöten, Hartlöten oder beliebige Zusätze werden derzeit in der Supraleiterindustrie wie in Bild 2 gezeigt angewendet, was zu einem hohen elektrischen Widerstand an der Verbindungsstelle und zu Fehlern im Supraleiter führt.

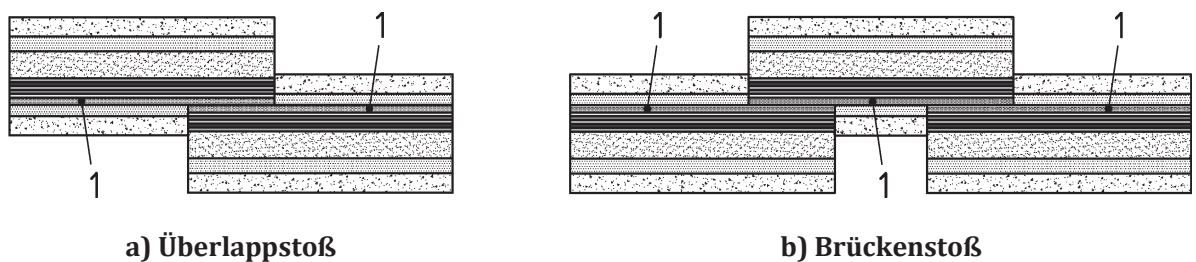


Legende

- 1 supraleitende REBCO-Schicht
- 2 Lot

Bild 2 — Weichloten zur Verbindung von 2G HTS

Die Normenreihe ISO 17279 legt das Hauptaugenmerk jedoch auf die direkte autogene Verbindung von supraleitenden 2G HTS-Schichten mit einer Dicke zwischen 1 μm und 3 μm nach Bild 3 ohne die Verwendung von Schweißzusatzwerkstoffen und mit Rückgewinnung von Supraleitereigenschaften durch Oxidationsglühverfahren, die dazu führen, dass an den Schweißstößen nahezu kein elektrischer Widerstand auftritt.



Legende

- 1 supraleitende REBCO-Schicht

Bild 3 — Direktes autogenes Fügen von supraleitenden 2G HTS-Schichten mit einer Dicke zwischen 1 μm und 3 μm für eine supraleitende Verbindung

ISO 17279-1 legt Anforderungen an Qualifizierungen für das Verfahren zur Fügung von 2G HTS fest. 2G HTS-Verbindungen sollten in der Lage sein, die erforderlichen elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften zu erbringen, und in Herstellung und Betrieb frei von schwerwiegenden Unregelmäßigkeiten sein. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, während Auslegung und Fertigung Kontrollen bereitzustellen.

ISO 17279-2 legt Anforderungen an die Qualifizierung von Schweiß- und Prüfpersonal fest.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Anforderungen an die Prüfverfahren für Mikrofügeverbindungen von 2G HTS fest, um die Anforderungen nach ISO 17279-1 und ISO 17279-2 zu erfüllen.

Dieses Dokument legt Prüfverfahren zur Bestimmung des Leistungsvermögens von Fügeverbindungen für die Produktion der festgelegten Qualität fest. Es werden spezifische Prüfanforderungen festgelegt, jedoch ohne Zuordnung für eine bestimmte Produktgruppe.

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).

ISO 17279-1:2018, *Welding — Micro joining of 2nd generation high temperature superconductors — Part 1: General requirements for the procedure*

ISO 15607:2019, *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — General rules*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 17279-1 und ISO 15607.

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

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

4 Prüfverfahren für Fügeverbindungen

4.1 Allgemeines

ISO 17279-1:2018, 5.5.4, beschreibt Anforderungen an die Qualifizierung des Prüfpersonals, an Prüfverfahren und an die Bezeugung während der Prüfungen und Nachprüfungen. Besonders in ISO 17279-1:2018, Tabelle 1, werden die Art der Prüfung, der Prüfumfang, die Bestätigung der Prüfung und die erforderlichen Prüfungen für die Verfahrensqualifizierung in Übereinstimmung mit ISO 17279-1 dargestellt. ISO 17279-1:2018, 5.9, enthält Anforderungen an Annahmekriterien für die Prüfungen. Der Hersteller kann über ausreichend fachkundiges Personal für die Prüfung und den Betrieb der Prüfeinrichtung verfügen oder er kann darauf spezialisierte Organisationen mit den spezifischen Prüfungen beauftragen. Der Hersteller kann die Prüfungen von der Probenvorbereitung bis zur Datenerfassung und -analyse in Übereinstimmung mit den herstellereigenen Qualitätssicherungsanforderungen bezeugen.

Die für die Prüfeinrichtung geltenden Bedienverfahren und Vorsichtsmaßnahmen müssen auf diese Prüfeinrichtung angewendet werden, wenn sie für die Prüfung nach diesem Dokument eingesetzt wird. Der Bediener der betreffenden Prüfeinrichtung muss die Fähigkeit zur Durchführung der erforderlichen Prüfung nachweisen, und die Kalibrierung und Qualifizierung der Prüfeinrichtung müssen in Übereinstimmung mit einem geeigneten Qualitätsmanagementprogramm aktuell gehalten werden. Qualifizierungsberichte und Zertifikate müssen aktuell gehalten werden.

Mit Ausnahme der Sichtprüfung müssen die Prüfungen bei kryogenen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, und sie erheben keinen Anspruch darauf, mit ihrer Anwendung verbundene Sicherheitsbedenken zu behandeln. Es liegt in der Verantwortung derjenigen Person, die das Verfahren anwendet, vor dem Anwendungsbeginn geeignete Praktiken für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz zu erstellen.

4.2 Sichtprüfung

4.2.1 Allgemeines

Dieser Unterabschnitt legt das Verfahren zur Sichtprüfung von in 2G HTS verwendeten Materialien und Verbindungen fest.

4.2.2 Qualifizierung des Prüfpersonals

Die Prüfung muss von qualifiziertem Personal durchgeführt werden. Die Qualifizierung des Personals muss in Übereinstimmung mit einem geeigneten Qualitätsmanagementprogramm durchgeführt werden. Personal, das Sichtprüfungen durchführt, muss eine jährliche Untersuchung bestehen; dabei muss das Sehvermögen mit oder ohne Korrektur die Prüfung der Nahsehfähigkeit nach Jaeger J2 bei einem Abstand von mindestens 30,5 cm sowie eine Farbwahrnehmungsprüfung bestehen. Die Aufzeichnungen der Untersuchungen des Sehvermögens müssen für das laufende Jahr aufbewahrt und für den Fall einer Überprüfung verfügbar gehalten werden.

4.2.3 Prüfeinrichtung

Sofern gefordert, müssen kalibrierte Geräte für die Prüfungen verwendet werden, dazu gehören auch alle notwendigen Messgeräte und Messlehren.

4.2.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung

Die Prüfoberfläche muss gleichmäßig und eben sein, sie muss sauber und frei von Zunder, Rost, Öl, Fett, schädlichen Oxiden und anderen schädlichen Fremdstoffen, wie Ag- oder Cu-Stellen des 2G HTS sein. Die Oberflächen der fertigen Verbindungen müssen für eine ordnungsgemäße Prüfdurchführung geeignet sein. Alle Vorbereitungen von Verbindungen müssen die in einer Zeichnung festgelegten Maße erfüllen (entweder in einer bemaßten Zeichnung oder in einer Schweißanweisung). Falls keine Maße als Teil der Zeichnung oder Auftragsdokumente bereitgestellt werden, müssen die Maße den durch die genehmigte Schweißanweisung (WPS, en: welding procedure specification) festgelegten Maßen entsprechen.

4.2.5 Prüfung

Die Prüfung muss nach einem schriftlichen Verfahren oder einem unter Prüfung anwendbaren Verfahren durchgeführt werden. Der Prüfbereich muss die Verbindung und, in einem gewissen Abstand von der Kante der Verbindung des Grundmetalls, die angrenzende zugängliche Wärmeeinflusszone (WEZ) umfassen. Die Prüfung muss nach dem Fügen und im abschließend wärmebehandelten Zustand (Oxidationsglühen) oder wie anderweitig gefordert und ohne jegliche Beschichtungen und andere Oberflächenzustände wie Lacke, Überzüge usw. erfolgen. Die Verbindungen müssen im Zustand wie geschweißt geprüft werden. Die Prüfung wird an Proben geeigneter Größe durchgeführt.

Es muss eine direkte Sichtprüfung angewendet werden. Falls erforderlich, werden Spiegel und Lupen verwendet, um den Sichtwinkel zu verbessern und zu unterstützen. Die Mindestlichtintensität auf der Oberfläche beträgt 1 000 lx (100 foot-candle). Das schriftliche Prüfverfahren oder das Verfahren muss mindestens, entweder direkt oder durch Verweisung auf geltende Dokumente, die Verfahrenskennnummer und das Datum, die Überarbeitungsnummer, die Identifizierung der Verbindungen, vollständige Prüfanforderungen einschließlich Beleuchtung und Prüfverfahren, die Bewertung von Anzeigen, Annahmekriterien und die Aussonderung von Verbindungen nach Bewertungen einschließen.

4.2.6 Annahmekriterien

Die Anforderungen nach ISO 17279-1:2018, Tabelle 4, müssen erfüllt werden. Haftungsfehler, Bindefehler, Risse und Poren sind unzulässig.

4.2.7 Prüfbericht

Nach Abschluss der Prüfung müssen die Ergebnisse in den Prüfbericht überführt werden. Ein Formblatt eines Prüfberichts ist in Anhang A dargestellt.

4.3 Prüfung durch Vier-Punkt-Messung

4.3.1 Allgemeines

Dieser Unterabschnitt legt das Verfahren zur Prüfung durch Vier-Punkt-Messung von in 2G HTS verwendeten Grundwerkstoffen und Verbindungen fest. Die Werte der kritischen Stromstärke (I_c), der kritischen Stromdichte (J_c) und der n -Wert können durch die Prüfung gemessen werden.

ANMERKUNG Üblicherweise ist der Widerstand am Kontaktpunkt (Kontaktwiderstand) weit geringer als der Widerstand der Probe und kann daher vernachlässigt werden. Bei Supraleitern unter kryogenen Bedingungen kann der Kontaktwiderstand jedoch dominieren und Änderungen des Widerstands der Probe vollständig verschleiern. Die Wirkungen des Kontaktwiderstands werden durch die Anwendung der Prüfung durch Vier-Punkt-Messung beseitigt.

4.3.2 Qualifizierung des Prüfpersonals

Die Prüfung muss von qualifiziertem Personal durchgeführt werden. Die Qualifizierung des Personals muss in Übereinstimmung mit einem geeigneten Qualitätsmanagementprogramm durchgeführt werden.

4.3.3 Prüfeinrichtung

Für die Prüfung müssen kalibrierte Geräte verwendet werden.

4.3.4 Oberflächenzustand und -vorbereitung

Es gilt Unterabschnitt 4.2.4.

4.3.5 Prüfung

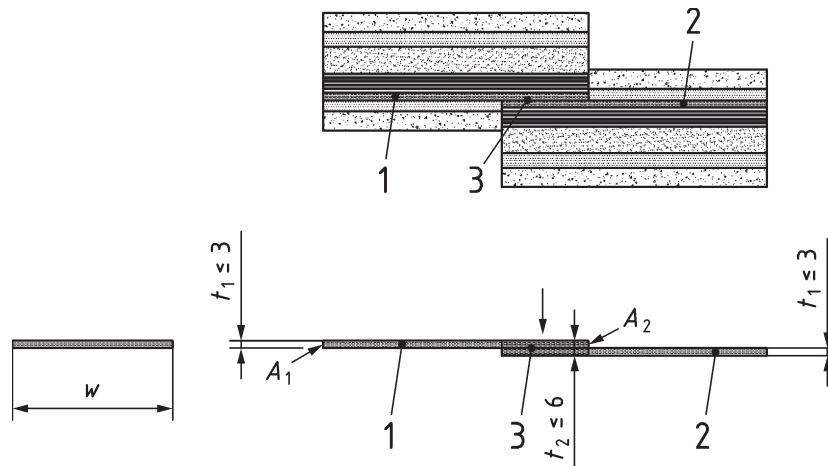
4.3.5.1 Allgemeines

Die Prüfung muss nach einem schriftlichen Prüfverfahren oder einem auf 2G HTS anwendbaren Verfahren durchgeführt werden. Das schriftliche Prüfverfahren oder das Verfahren muss mindestens, entweder direkt oder durch Verweisung auf geltende Dokumente, die Verfahrenskennnummer, das Datum, die Überarbeitungsnummer, die Identifizierung der Verbindungen, vollständige Prüfanforderungen einschließlich Prüfverfahren, die Bewertung und die Berichterstattung nach Bewertungen einschließen.

Der Prüfbereich muss die Verbindung und, in einem gewissen Abstand von der Kante der Verbindung, die angrenzende zugängliche WEZ umfassen. Die Gesamtlänge der Proben muss mindestens 60 mm einschließlich 20 mm der Verbindung betragen. Die Prüfung muss nach dem Fügen und im abschließend wärmebehandelten Zustand (Oxidationsglühen) oder wie anderweitig gefordert erfolgen und wird in der kryogenen LN₂-Umgebung oder bei einer anderen vom Hersteller bestimmten Temperatur durchgeführt. Die Prüfung muss im Zustand der Schweißnahtüberhöhung mit handelsüblichen Materialien unter Berücksichtigung des thermischen Schrumpfkoeffizienten durchgeführt werden, so dass Verbindungen nicht während der Prüfung beschädigt werden.

Eine schematische Darstellung zweier supraleitender Schichten mit Überlappstoß von 2G HTS ist in Bild 4 enthalten. Wenn Strom durch eine supraleitende 2G HTS-Schicht (Dicke von $1\text{ }\mu\text{m}$ bis $3\text{ }\mu\text{m}$) von der supraleitenden Schicht 1 zur Verbindung zur supraleitenden Schicht 2 fließt, erzeugt der Strom eine Potentialdifferenz zwischen der supraleitenden Schicht 1 und der supraleitenden Schicht 2. 2G HTS ohne Fügeverbindung und WEZ verhält sich in kryogener Umgebung widerstandsfrei, daher werden die meisten Potentialdifferenzen durch Fügeverbindung und WEZ hervorgerufen.

Maße in Mikrometer

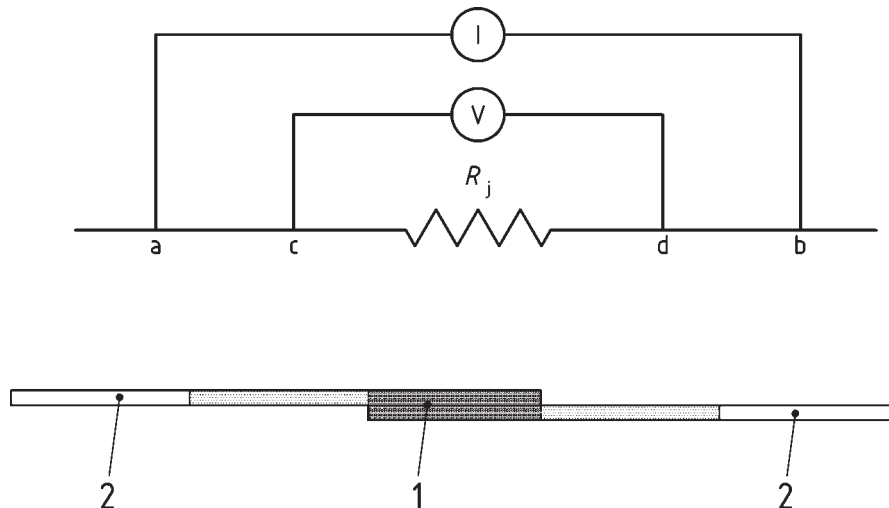


Legende

- 1 obere supraleitende Schicht
- 2 untere supraleitende Schicht
- 3 Fügefläche
- w Breite der supraleitenden Schicht
- t_1 Dicke der supraleitenden Schicht ($1\text{ }\mu\text{m} \sim 3\text{ }\mu\text{m}$)
- t_2 beinahe $2 t_1$ oder etwas weniger als $2 t_1$ in Abhängigkeit vom Druck während des Fügens
- A_1 Querschnittsfläche der supraleitenden Schichten 1 und 2 ($A_1 = t_1 \times w$)
- A_2 Querschnittsfläche der beiden mit einem Überlappstoß verbundenen supraleitenden Schichten ($A_2 = t_2 \times w$)

Bild 4 — Typische Mehrfachschichten eines 2G HTS sowie die Bestandteile und Dicken jeder Schicht

Bild 5 ist eine schematische Darstellung der Prüfung durch Vier-Punkt-Messung von mit Überlappstoß gefügten 2G HTS. Vier Sonden werden, wie im Bild dargestellt, an der Probe angebracht. Ein Strom wird durch die Länge der Probe durch die Sonden fließen gelassen, die in Bild 5 mit „a“ und „b“ bezeichnet sind. Das kann unter Verwendung einer Stromquelle oder Stromversorgung durchgeführt werden, die über einen Ausgangsstrom-Auslesegerät verfügt. Wenn die Probe bei Fließen elektrischen Stroms einen Widerstand zeigt, dann tritt ein Potentialabfall (oder Spannungsabfall) auf, weil der Strom entlang der Probe fließt, z. B. zwischen den beiden im Bild mit „c“ und „d“ bezeichneten Sonden. Der Spannungsabfall zwischen den Sonden „c“ und „d“ kann mit einem digitalen Spannungsmessgerät gemessen werden. Der Widerstand der Probe zwischen den Sonden „c“ und „d“ ist das Verhältnis des am digitalen Spannungsmessgerät abgelesenen Spannungswerts zum Wert des Ausgangsstroms der Stromversorgung. Die hohe Impedanz des digitalen Spannungsmessgeräts minimiert den Stromfluss durch den Abschnitt des Stromkreises, der das Spannungsmessgerät enthält. Da es keinen Potentialabfall über den Kontaktwiderstand im Zusammenhang mit den Sonden „c“ und „d“ gibt, wird somit nur der Widerstand im Zusammenhang mit der Fügeverbindung und der zugehörigen WEZ des Supraleiters zwischen den Sonden „c“ und „d“ in Abhängigkeit des Stroms gemessen. 2 WEZ-Längen, die an die Fügeverbindung angrenzen, betragen etwa das Doppelte der Verbindungslänge. Die WEZ ist jedoch von der Wärmeaufnahme und der Verweildauer während des Fügens abhängig. Der Hersteller darf die WEZ-Länge mit der Prüfung durch Vier-Punkt-Messung bestimmen.



Legende

- 1 Fügefläche
- 2 Wärmeeinflusszone (WEZ)
- R_j elektrischer Widerstand der Fügeverbindung
- a Stromzuführung 1
- b Stromzuführung 2
- c Spannungsabgriff 1
- d Spannungsabgriff 2

Bild 5 — Schematische Darstellung der Prüfung durch Vier-Punkt-Messung bei mit Überlappstoß gefügten 2G HTS CC

Das Prüfverfahren ist wie folgt:

- a) Die Sonden „c“ und „d“ (jede auf der Schmelzlinie der Verbindung) werden an der Probe angebracht und an ein digitales Spannungsmessgerät angeschlossen; die Sonden „a“ und „b“ (jeweils 5 mm von „c“ und „d“ entfernt) werden an ein Strommessgerät und an eine Stromversorgung angeschlossen. Ein Streifenschreiber darf zwischen den Sonden „c“ und „d“ angeschlossen werden.
- b) Das Thermoelement-Ablesegerät wird darauf eingestellt, das K-Thermoelement abzulesen, und das am Thermoelement angebrachte Symbol des Thermoelements wird abgelesen. Das Thermoelement darf nicht gebogen werden.
- c) Der Behälter, die Probe mit den angebrachten Sonden und das Thermoelement werden platziert. In den Behälter wird flüssiger Stickstoff oder anderes kryogenes Material gegeben. Das Potential am Thermoelement wird abgelesen.
- d) Wenn der Behälter vollständig abgekühlt ist und die Temperatur auf etwa 70 K bzw. auf die beschlossene Temperatur gefallen ist, wird die Stromversorgung eingeschaltet. Wenn sich der Widerstand des Supraleiters bei verschiedenen Strömen ändert, ändern sich die Spannungsablesewerte. Die Potentialdifferenz wird am Spannungsmessgerät abgelesen. Das Verhältnis der Spannung zum Stromfluss durch die Probe ist der Widerstand des Supraleiters zwischen den beiden Spannungssonden („c“ und „d“).

In Bild 5 fließt der Strom (I) durch die beiden Sonden an den Enden („a“ und „b“) und die Spannung (V) wird zwischen den beiden zentralen Sonden („c“ und „d“) für die Verbindung und die WEZ gemessen. Der mittlere Widerstand R zwischen den zentralen Sonden („c“ und „d“) wird nach Gleichung (1) berechnet.

$$I = V/R \quad (1)$$

Dabei ist

V die Spannungsdifferenz;

I der zwischen den beiden zentralen Sonden („c“ und „d“) fließende Strom.

R wird auch durch Gleichung (2) angegeben, weil der größte Teil der Spannungsdifferenz von der Fügeverbindung und der WEZ herrührt.

$$R_j = \rho_j \times l_j / A_2 \text{ oder } R_{HAZ} = \rho_{HAZ} \times l_{HAZ} / A_1 \quad (2)$$

Dabei ist

ρ_j die Resistivität der Fügeverbindung, in $\Omega\text{-cm}$;

ρ_{HAZ} die Resistivität der WEZ, in $\Omega\text{-cm}$;

l_j die Länge der Fügeverbindung, in cm;

l_{HAZ} die Länge der WEZ, in cm;

A_1 und A_2 die Querschnittsflächen der supraleitenden Schicht bzw. der beiden mit Überlappstoß gefügten supraleitenden Schichten, in cm^2 .

Somit entspricht der Gesamtwiderstand der Proben mit Überlappstoß Gleichung (3).

$$I = V / (R_j + R_{HAZ}) \quad (3)$$

4.3.5.2 Feldkritische Stromstärke (I_C)

Der Wert der feldkritischen Stromstärke der Verbindung ($I_{C,j}$) ist sehr wichtig zur Bestätigung der Integrität der Verbindung. Die Werte für die feldkritische Stromstärke (I_C) des gefügten Supraleiters müssen unter Anwendung einer Standardprüfung durch Vier-Punkt-Messung und in einem Bad aus flüssigem Stickstoff (LN_2) oder in einer anderen vorher bestimmten kryogenen Umgebung gemessen werden. Obwohl dieses Verfahren kein endgültiges Verfahren ist, ist es in der ersten Bewertungsrunde durchaus wirksam. Wenn der Strom grafisch in Abhängigkeit von dem im 2G HTS abgelesenen Spannungswert aufgetragen wird, ähnelt das Ergebnis dem in Bild 6 dargestellten. Die V - I -Kurve wurde mit Hilfe eines handelsüblichen Datenerfassungssystems (en: Data Acquisition System, DAS) und LabVIEW¹ ermittelt. Das DAS und LabVIEW müssen kalibriert werden.

1 LabVIEW ist die Markenbezeichnung eines Produktes. Diese Angabe dient nur zur Unterrichtung der Anwender dieses Dokuments und bedeutet keine Anerkennung des genannten Produkts durch ISO. Gleichwertige Produkte dürfen verwendet werden, wenn sie nachweisbar zu identischen Ergebnissen führen.