

	DIN IEC 61788-8 (VDE 0390-8)	
	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 2008-12-31 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 61788-8 (VDE 0390-8):2003-11 Entwurf Supraleitfähigkeit – Teil 8: Messung der Wechselstromverluste – Messung der Gesamtwechselstromverluste von Cu/NbTi- Verbundsupraleiterdrähten in transversalen magnetischen Wechselfeldern mit Hilfe eines Pickupspulenverfahrens (IEC 90/216/CD:2008) Superconductivity – Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of round superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field at liquid helium temperature by a pickup coil method (IEC 90/216/CD:2008) Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-10-27 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 58 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE	

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/216/CD:2008 „Superconductivity – Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of round superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field at liquid helium temperature by a pickup coil method“ (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.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61788-8 (VDE 0390-8):2003-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der zulässige Frequenzbereich des Pickupspulenverfahrens wurde an der oberen Grenze von 1 Hz auf 60 Hz erweitert.
- b) Verlustleistungen werden nun nicht mehr auf Frequenzperioden, sondern auf Einheitsvolumina im Supraleiterdraht bezogen.
- c) Die Begrifflichkeit der Messunsicherheit anstelle der von Absolut- bzw. Wiederholgenauigkeit hielt nun mitsamt der daran angepassten Toleranzwerte sowie erläuternder Anhänge (F und G) in der Norm Einzug.
- d) Das Messprotokoll wurde geringfügig erweitert (Punkte 10.1.h und 10.3.d) sowie ein neuer Anhang A für Zusatzinformationen hinzugefügt, dafür der erläuternde Anhang E (Erweiterung auf supraleitende Dreikomponentendrähte) gestrichen.

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	–	–

**Supraleitfähigkeit –
Teil 8: Messung der Wechselstromverluste –
Messung der Gesamtwechselstromverluste von Cu/NbTi-
Verbundsupraleiterdrähten in transversalen magnetischen Wechselfeldern
mit Hilfe eines Pickupspulenverfahrens**

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen.....	6
3 Begriffe.....	6
4 Messprinzip.....	8
5 Messeinrichtungen.....	8
6 Probenvorbereitung	9
7 Messbedingungen.....	10
8 Berechnung der Ergebnisse	11
9 Messunsicherheit.....	12
10 Prüfbericht.....	13
Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 10	16
Anhang B (informativ) Erläuterung der Wechselstromverlustmessung mit Hilfe des Poynting- Vektors [6].....	18
Anhang C (informativ) Berechnung des geometriebedingten Fehlers bei dem Pickupspulenverfahren	19
Anhang D (informativ) Empfohlenes Verfahren zur Kalibrierung der Magnetisierungs- und der Wechselstromverluste.....	20
Anhang E (informativ) Kopplungsverluste für verschiedene Kurvenformen des äußeren Felds.....	22
Anhang F (informativ) Messunsicherheitsbetrachtungen	23
Anhang G (informativ) Berechnung der Messunsicherheit bei Wechselstromverlustmessungen mit Hilfe des Pickupspulenverfahrens [9]	27
Literaturhinweise	29
Bild 1 – Standardanordnung der Probe und der Pickupspulen.....	15
Bild 2 – Typische Schaltung für die Messung der Wechselstromverluste mit Hilfe von Pickupspulen.....	15
Bild C.1 – Beispiele berechneter Kurvenscharen des Koeffizienten G als Funktion des Radius R der Probenspule und des Abstands a zwischen der Probenspule und den beiden Pickupspulen	19
Bild D.1 – Auswertung der kritischen Feldstärke aus den Magnetisierungskurven.....	21
Bild E.1 – Kurvenformen des äußeren Magnetfelds mit der Periode T	22
Tabelle G.1 – Fortpflanzung der Messunsicherheit bei dem Pickupspulenverfahren	28

Einleitung

Zur Messung der Wechselstromverluste von Cu/NbTi-Verbundsupraleitern in transversalen zeitveränderlichen Magnetfeldern werden Magnetometer-Verfahren und Pickupspulenverfahren vorgeschlagen. Dies sind die ersten Schritte in der Normung von Verfahren zur Messung der unterschiedlichen Beiträge zu den Wechselstromverlusten in transversalen Magnetfeldern in der am häufigsten anzutreffenden Konfiguration.

Es wurde entschieden, den ursprünglichen, oben erwähnten Vorschlag in zwei Dokumente mit je einem Standardmessverfahren aufzuspalten. Das eine beschreibt das Magnetometer-Messverfahren für die Hystereseverluste und die Gesamtwechselstromverluste bei niedriger Frequenz oder kleiner Feldänderungsgeschwindigkeit in einem zeitlich langsam veränderlichen Magnetfeld. Das andere beschreibt das Pickupspulenmessverfahren zur Messung der Gesamtwechselstromverluste in Magnetfeldern bei höherer Frequenz oder größerer Feldänderungsgeschwindigkeit. Der Frequenzbereich beträgt 0 Hz bis 0,06 Hz für das Magnetometerverfahren und 0,005 Hz bis 60 Hz für das Pickupspulenverfahren. Im Frequenzbereich zwischen 0,005 Hz und 0,06 Hz überlappen sich die beiden Messverfahren komplementär.

Die vorliegende Norm behandelt das Pickupspulenmessverfahren. Die Normung des Verfahrens zur Messung der Wechselstromverluste, das in dieser Norm behandelt wird, basiert zum Teil auf den der Normung vorangegangenen Arbeiten des VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) über Wechselstromverluste in NbTi-Verbundsupraleitern [1]¹.

¹ Zahlen in rechteckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 61788-8 spezifiziert das Pickupspulenmessverfahren zur Messung der Gesamtwechselstromverluste in Cu/NbTi-Verbundsupraleiterdrähten, die einem transversalen magnetischen Wechselfeld ausgesetzt sind. Die Verluste können sowohl Hystereseverluste als auch Kopplungsverluste enthalten. Das genormte Verfahren, mit dem allein die Hystereseverluste in magnetischen Gleichfeldern oder in Feldern mit niedriger Feldänderungsgeschwindigkeit zu messen sind, wird in IEC 61788-13 [2] spezifiziert.

In metallischen und oxidischen runden supraleitenden Drähten, von denen angenommen wird, dass sie hauptsächlich in Spulen für Puls- oder Wechselstromanwendungen zum Einsatz kommen, werden Wechselstromverluste durch das Anlegen eines zeitabhängigen Magnetfeldes und / oder Stromes erzeugt. Der Beitrag des Magnetfeldes zu den Wechselstromverlusten überwiegt bei üblichen elektromagnetischen Konfigurationen der Spulenanwendungen. Für supraleitende Drähte, die einem transversalen magnetischen Wechselfeld ausgesetzt sind, kann das vorgestellte Verfahren generell bei Messungen der gesamten Wechselstromverluste in einem breiten Frequenzbereich bis hin zu einem bei kommerziellen Anwendungen üblichen Niveau, 50 bzw. 60 Hz, bei der Temperatur von flüssigem Helium angewandt werden. Für supraleitende Drähte mit dünnen Filamenten können die mit diesem Verfahren bestimmten Wechselstromverluste unterteilt werden in Hystereseverluste in den einzelnen Filamenten, die Kopplungsverluste zwischen den Filamenten und die Wirbelstromverluste in den normalleitenden Regionen. In den Fällen, in denen die Drähte keine dicke äußere normalleitende Hülle aufweisen, sind die wesentlichen Komponenten die Hystereseverluste und die Kopplungsverluste, wobei erstere als vom Bereich niedriger Frequenzen auf die Frequenz Null extrapolierter Wert der Wirbelstromverluste pro Periode abgeschätzt werden. Die Kopplungsverluste pro Periode sind dabei proportional zur Frequenz.

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, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Teils von IEC 61788 gelten die Begriffe der IEC 60050-815 ebenso wie die folgenden Begriffe.

3.1

Wechselstromverluste

P

Leistungsverluste in einem Multifilament-Supraleiter, wenn er sich in einem zeitlich veränderlichen magnetischen Feld befindet oder Wechselstrom führt

[IEV 815-04-54]

3.2

Hystereseverluste

P_h

frequenzunabhängiger, volumenbezogener Energieverlust, der in einem Supraleiter bei veränderlichen magnetischen Feldern während einer Periode entsteht

ANMERKUNG Diese Verluste werden durch irreversible magnetische Eigenschaften aufgrund des Pinnings von Flusslinien verursacht.

[IEV 815-04-55]

3.3

Wirbelstromverluste

P_e

volumenbezogener Energieverlust, der in der normalleitenden Matrix eines Supraleiters oder im Strukturmaterial auftritt, wenn der Supraleiter sich in einem magnetischen Wechselfeld, entweder einem äußeren magnetischen Feld oder einem Eigenmagnetfeld, befindet

[IEV 815-04-56, modifiziert]

3.4

Kopplungsverluste

P_c

volumenbezogener Energieverlust, der in supraleitenden Multifilamentdrähten mit normalleitender Matrix durch Kopplungsstrom entsteht

[IEV 815-04-59]

3.5

Kopplungszeitkonstante

τ

charakteristische Zeitkonstante eines Kopplungsstroms, der senkrecht zu den Filamenten einer für niedrige Frequenzen ausgelegten Ader fließt

[IEV 815-04-60]

3.6

Abschirmstrom

Strom, der in einem Supraleiter durch eine zeitliche Änderung eines äußeren Magnetfelds induziert wird, und der in Verbundsupraleitern aus Kopplungsströmen und Wirbelströmen besteht

3.7

kritische Feldstärke

H_c

magnetische Feldstärke, die der Kondensationsenergie im supraleitenden Zustand bei der magnetischen Feldstärke Null entspricht

[IEV 815-01-21]

3.8

Magnetisierung eines Supraleiters

das magnetische Moment eines Supraleiters, dividiert durch sein Volumen

ANMERKUNG Das makroskopische magnetische Moment ist auch gleich dem Produkt aus dem Abschirmstrom und der Fläche des geschlossenen Strompfads in einem Verbundsupraleiter zusammen mit dem magnetischen Moment irgendeines eingedrungenen, eingefangenen Flusses (trapped flux).

3.9

Magnetisierungsverfahren zur Bestimmung der Wechselstromverluste

Verfahren zur Bestimmung der Wechselstromverluste von Materialien aus der Fläche der Magnetisierungskurve

ANMERKUNG Wenn Pickupspulen zur Messung der Flussänderung benutzt werden und diese dann zur Bestimmung der Magnetisierung von Spulenproben integriert wird, heißt diese Methode Pickupspulenverfahren.

[IEV 815-01-15, modifiziert]

3.10

Pickupspulenverfahren

Verfahren zur Bestimmung der Wechselstromverluste von Materialien durch Messung der in dem betreffenden Material fließenden elektromagnetischen Leistung mit Hilfe von Pickupspulen

ANMERKUNG Die Pickupspulenanordnung besteht im Wesentlichen aus einer Primärwicklung (ein supraleitender Magnet mit zeitveränderlichem Erregerstrom) und einem Paar von Sekundärwicklungen, von denen die eine (die Kompensationsspule) zwei Aufgaben hat:

- 1) sie kompensiert das Signal der leeren Pickupspulen;
- 2) sie liefert die Information über die Magnetfeldänderung.

Hier wird die koaxiale, konzentrische Anordnung der Pickupspulen, wie in Bild 1 gezeigt, als Standardanordnung für die Wechselstromverlustmessung angewandt. Um ein ausreichendes Volumen der zu messenden Drahtprobe zu erhalten und sie gleichzeitig einem transversalen Magnetfeld auszusetzen, muss sie als Spule gewickelt werden. Die so präparierte Probe wird auch als „Probenspule“ bezeichnet.

3.11

Hintergrundverluste

scheinbare Verluste, die mit dem Pickupspulenverfahren in dem Fall gemessen werden, dass sich keine Probe innerhalb der Pickupspulen befindet

ANMERKUNG Die Hintergrundverluste liefern den experimentell bedingten Fehler der Messanordnung zur Wechselstromverlustmessung mit Hilfe des Pickupspulenverfahrens. Er resultiert aus der Phasenverschiebung der zu kompensierenden Spannungssignale, aus einem zusätzlichen in den zahlreichen Komponenten der Messapparatur induzierten magnetischen Moment und aus externem Rauschen. Die Hintergrundverluste können durch Anpassen des experimentellen Aufbaus reduziert und durch Abziehen von den gemessenen Wirbelstromverlusten, wie in 7.4.2 gezeigt, kompensiert werden.

3.12

effektive Querschnittsfläche der Probenspule

gesamtes Probenvolumen, dividiert durch den jeweils größeren Betrag der Länge der Probenspule oder der Länge der Pickupspule

3.13

Biegedehnung

ε_b

Dehnung, die bei reiner Biegebelastung entsteht, definiert durch $\varepsilon_b = 100 r/R$, wobei r die halbe Dicke der Probe und R der Biegeradius ist

ANMERKUNG Bei dem Pickupspulenverfahren muss bei gewickelten Proben, die nach dem RAW-Verfahren (engl. „react and wind“, d. h. Proben, die zuerst reagiert und dann gewickelt wurden) hergestellt worden sind, das zulässige Niveau für die Biegedehnung eingehalten werden.

[IEV 815-08-03]

4 Messprinzip

Das Messverfahren besteht darin, dass die Drahtprobe einem transversalen magnetischen Wechselfeld ausgesetzt wird und das magnetische Moment des in der Probe induzierten Abschirmstroms mit Hilfe von Pickupspulen ermittelt wird, mit dem Ziel, die im Abschnitt 3 definierten Wechselstromverluste zu bestimmen.

5 Messeinrichtungen

5.1 Messapparatur

Die Messapparatur muss so konstruiert sein, dass die Pickupspulen und die Probenspulen in einem homogenen magnetischen Wechselfeld angeordnet sind, das von einem supraleitenden Magneten erzeugt wird.

Die Spulen der Messapparatur werden so angeordnet, wie dies unten beschrieben ist. Wichtig ist dabei, dass die Hauptpickupspule und die Kompensationsspule coaxial im Außenraum und im Inneren der Probenspule positioniert werden.

Das angelegte magnetische Wechselfeld muss eine sehr gute Homogenität aufweisen, wie in 7.1.5 dargestellt.

Zur Messeinrichtung gehört ein Datenverarbeitungssystem, das die Magnetisierung und die Wechselstromverluste der Probe durch Integration der Pickupspule berechnet. Eine typische Schaltung für die Messung der Wechselstromverluste ist in Bild 2 dargestellt.

5.2 Pickupspulen

Die Pickupspulen müssen aus sehr dünnem isolierten Draht, z. B. isoliertem Kupferdraht mit 0,1 mm Durchmesser, hergestellt werden, um Wirbelstromverluste bei tiefen Temperaturen zu vermeiden.

Die spulenkörper der Pickupspulen müssen aus nicht-metallischem und nichtmagnetischem Material, z. B. aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Phenolharz etc. hergestellt werden. Die Hauptpickupspule muss außerhalb der Kompensationsspule coaxial angeordnet und konzentrisch zu dieser justiert werden. Die Standardanordnung ist schematisch in Bild 1 dargestellt, wobei die Kompensationsspule und die Hauptpickupspule die gleiche Höhe haben. Die Windungszahl der Kompensationsspule muss üblicherweise etwas größer als die zur Kompensation benötigte Windungszahl bemessen werden, bei welcher der gesamte verkettete Fluss des angelegten Magnetfeldes in der Kompensationsspule gleich dem Fluss in der Hauptpickupspule ist.

Das Pickupspulensystem muss so ausgeführt werden, dass die Probenspule leicht einzusetzen und herauszunehmen ist.

Das Pickupspulenverfahren besitzt einen Fehler bezüglich der geometrischen Anordnung der Probenspule und der Pickupspulen. Der Geometriefehler wird kurz im Anhang C behandelt. Um einen Messunsicherheit verursacht durch geometrische Einflüsse von kleiner 1 % zu erhalten, müssen bei der Norm für die Anordnung der Probenspule und der beiden Pickupspulen folgende Daten eingehalten werden: Höhe der Probenspule 30 mm, Höhe der Pickupspulen 10 mm, Spulenradius der Probe 18 mm und eine Differenz von 2 mm zwischen den Radien der Probe und jeder Pickupspule. Für den Fall, dass die Anordnung der Probe und der Pickupspulen geringfügig von der obigen Standardanordnung abweichen, muss der Geometriefehler der Anordnung abgeschätzt werden, wie im Anhang C gezeigt ist. Wenn der Geometriefehler nicht quantitativ abgeschätzt werden kann, muss die Kalibrierung durchgeführt werden, die im Anhang D angegeben ist.

5.3 Kompensationsschaltung

Der gesamte mit dem angelegten Magnetfeld verkettete Fluss in der Kompensationsspule wird gewöhnlich durch Anpassung der Windungszahlen der Pickupspulen etwas höher bemessen als der Fluss in der Hauptpickupspule. Gegen die Signalspannung der Hauptpickupspule wird ein reduziertes Spannungssignal der Kompensationsspule mit Hilfe der Kompensationsschaltung geschaltet. Zur Feineinstellung des Reduktionsverhältnisses, des sog. Kompensationskoeffizienten, soll die kombinierte Standardmessunsicherheit der Kompensationsschaltung fünf Teile aus 10^5 nicht überschreiten, wobei keine Phasenverschiebung induziert werden soll, wenn das Signal geändert wird. Die kombinierte Standardmessunsicherheit reicht typischerweise von 5 Teilen aus 10^5 bis 5 Teilen aus 10^6 . Für diese Bedingungen wird die Kompensationsschaltung gewöhnlich in Form eines resistiven Spannungsteilers ausgeführt.

6 Probenvorbereitung

6.1 Probenspule

6.1.1 Wickeln der Probenspule

Der Probendraht muss auf den Spulenkörper als einlagige Zylinderspule gewickelt werden. Wenn der Probendraht keine Isolierung besitzt, muss er locker als einlagige Spule gewickelt werden, und zwar mit gleichem Abstand zwischen den Windungen durch Einlegen eines nicht-metallischen und nicht-magnetischen Abstandshalters, z. B. einer Angelschnur, um die Windungen der Probe gegeneinander zu isolieren. Der Durchmesser des Abstandshalters muss etwa die Hälfte des Probendrahtdurchmessers betragen. In den Fällen, in denen von benachbarten Windungen verursachte Entmagnetisierungseffekte reduziert werden sollen, ist die Probe ebenfalls mit einem geeigneten Abstandshalter zwischen den Windungen zu wickeln.

6.1.2 Konfiguration der Probenspule

Die Probe muss mehr als dreimal so hoch sein wie die Pickupspule, damit der geometriebedingte Fehler, den die Endeffekte der Probenspule verursachen, reduziert wird.

6.1.3 Maximale Biegedehnung

Die gewickelte Probe jedes supraleitenden Drahtes soll so vorbereitet und zwischen den beiden konzentrischen Pickupspulen angeordnet werden, dass die zulässige Toleranz der Biegedehnung beachtet wird. Für RAW-Proben von Nb-Ti-Drähten soll die maximale Biegedehnung ein zulässiges Niveau für die Messung des kritischen Gleichstromes nicht überschreiten.

ANMERKUNG Für die Messungen des kritischen Gleichstromes von Nb-Ti-Verbundsupraleitern wird das zulässige Niveau von 3 % in IEC 61788-1 Ed. 2 angegeben.

6.1.4 Behandlung der Probenenden

Beide Enden des Probendrahts müssen freigelegt werden, und es muss dort verhindert werden, dass sich die Filamente gegenseitig berühren. Beide Enden des Probendrahts müssen mit Schleifpapier der Körnung 800 (12 µm) bis 1 000 (7 µm) geschliffen werden.

6.2 Spulenkörper

Der Spulenkörper, auf den die Probe gewickelt wird, muss aus nicht-metallischem und nicht-magnetischem Material, z. B. glasfaserverstärktem Kunststoff, Phenolharz etc. hergestellt werden. Ein Kleber wie Cyanacrylat oder Epoxidharz muss als Bindemittel angewandt werden, um die Probe auf dem Spulenkörper zu fixieren und die Form der Zylinderspule aufrechtzuerhalten.

7 Messbedingungen

7.1 Äußeres Magnetfeld

7.1.1 Amplitude des äußeren Magnetfelds

Der Standardwert der Amplitude des äußeren Magnetfelds soll im Bereich von etwa 0,1 T bis 1 T liegen, wobei der Frequenzbereich zur Auswertung der Kopplungszeitkonstante mit berücksichtigt werden sollte.

ANMERKUNG In früheren Round-Robin-Tests betrugen die Amplituden des angelegten Feldes 1 T für die Messungen im Bereich von 0,005 Hz bis 1 Hz an Cu/Nb-Ti-Multifilamentdrähten und 0,5 T für die Messungen im Bereich von 0,005 Hz bis 10 Hz an supraleitenden Dreikomponentendrähten, wie in A.2 dargestellt.

7.1.2 Richtung des äußeren Magnetfelds

In der zylindrischen Probenspule muss das äußere Feld parallel zur Spulenachse angelegt werden.

7.1.3 Kurvenform des äußeren Magnetfelds

Der zeitliche Verlauf des äußeren Magnetfelds muss entsprechend der Norm eine Sinusfunktion oder eine Dreiecksfunktion sein.

7.1.4 Frequenz des äußeren Felds

Das vorgestellte Verfahren soll in einem Frequenzbereich bis hin zu einem kommerziell üblichen Niveau von 50 bzw. 60 Hz angewandt werden, um die gesamten Wechselstromverluste zu messen. In dem Bereich höherer Frequenzen soll darauf geachtet werden, elektromagnetisches Rauschen von metallischen Teilen in der Nähe der Pickupspulen zu reduzieren, wie es in Anhang A gezeigt wird.

Für supraleitende Drähte mit dünnen Filamenten soll die Anzahl der Messpunkte mehr als fünf in einem ausgedehnten Frequenzbereich auf einer logarithmischen Skala betragen, um die Kopplungszeitkonstante aus der linearen Frequenzabhängigkeit der Kopplungsverluste berechnen zu können, wie es in 8.6 gezeigt wird. Bei der Messung der Frequenzabhängigkeit der Wechselstromverluste soll die Amplitude des angelegten Feldes konstant gehalten werden.

ANMERKUNG Die lineare Frequenzabhängigkeit der Kopplungsverluste wird in dem Bereich niedrigerer Frequenzen und kleinerer Amplituden des angelegten Magnetfeldes beobachtet [3]. In den Fällen, in denen die Kopplungsverluste bei einem festen Amplitudenwert nicht linear von der Frequenz abhängen, soll der Bereich der Messfrequenzen zu niedrigeren Werten hin verschoben werden, um die lineare Abhängigkeit zu erhalten. Empfohlene Frequenzbereiche werden in A.2 sowohl für Cu/Nb-Ti-Multifilamentdrähte als auch für supraleitende Dreikomponentendrähte angegeben.

7.1.5 Homogenität des äußeren Feldes

Das äußere Feld muss eine Homogenität innerhalb von 5 % über die Länge der Probenspule und innerhalb von 1 % über die Länge der Pickupspulen aufweisen.

7.2 Positionierung der Probenspule

Die Probenspule muss coaxial und konzentrisch zwischen der Hauptpickupspule und der Kompensationspule angeordnet werden.

7.3 Temperaturmessung

Die Probenspule und die Pickupspulen müssen in Flüssighelium eingetaucht werden. Die Temperatur bei der Messung muss mit Hilfe eines geeichten Thermometers oder einer Druckmessung bestimmt werden.

7.4 Messungen

7.4.1 Kompensationsverfahren

Im ersten Schritt des Kompensationsverfahrens wird eine Hystereseschleife der Magnetisierung des Proben drahts für eine feste Amplitude des äußeren Felds aufgenommen, indem das Signal der Kompensationsspule von dem Signal der Hauptpickupspule im gegebenen Zustand subtrahiert wird. Da der gesamte mit dem äußeren Feld verkettete Fluss in der Kompensationsspule geringfügig größer ist als der Fluss in der Hauptpickupspule, ist die resultierende Magnetisierungsschleife gewöhnlich gegen die horizontale Achse des äußeren Magnetfelds geneigt.

Im zweiten Schritt des Kompensationsverfahrens wird das Signal der Kompensationsspule geringfügig modifiziert, indem es mit Hilfe der Kompensationsschaltung mit einem Kompensationskoeffizient, der etwas kleiner als eins ist, multipliziert wird, um die Neigung der Magnetisierungsschleife zu verkleinern.

Im letzten Schritt wird der Kompensationskoeffizient feinstufig so justiert, dass beide Kurventeile der Magnetisierungskurve, bezogen auf die horizontale Achse, bei zunehmendem und abnehmendem Feld im Gebiet der höchsten Werte des äußeren Feldes symmetrisch bleiben.

7.4.2 Messung der Hintergrundverluste

Um die Hintergrundverluste in dem System der Pickupspulen einschließlich Pickupspulen, Kompensationsschaltung, Verstärkern usw. zu erfassen, müssen die scheinbaren Verluste des Systems gemessen werden, wenn sich keine Probe innerhalb der Pickupspulen befindet. Die Vorgehensweise ist die gleiche wie bei dem Messverfahren mit Probe in 7.4.3.

Verlustmessung

Bei dem Pickupspulenverfahren müssen die Wechselstromverluste berechnet werden, indem das Produkt aus dem kompensierten Signal der Hauptpickupspule (Messung des magnetischen Moments) und dem Signal der Kompensationsspule (Messung des Magnetfelds) entsprechend Gleichung (3) integriert wird. Wenn die Hintergrundverluste in der Messanordnung nicht vernachlässigt werden können, müssen die Wechselstromverluste in der Probe ermittelt werden, indem die Hintergrundverluste von den mit der Probe gemessenen scheinbaren Verlusten subtrahiert werden. Bei dieser Korrektur muss auf das Vorzeichen der Hintergrundverluste geachtet werden.

Die Wechselstromverluste können auch ermittelt werden, indem die Magnetisierung bei dem betreffenden Magnetfeld über eine Periode integriert wird, wie im Anhang B angegeben ist.

7.4.3 Kalibrierung

Im Allgemeinen ist die Kalibrierung ein grundsätzlicher Prozess bei der Messung der Wechselstromverluste mit unzureichender Signalerfassung. Ein empfohlenes Verfahren zur Kalibrierung wird im Anhang D angegeben. Andererseits, wenn die Bedingungen für die Konfiguration der Pickupspulen und der Probenspule, wie in den Abschnitten 5 und 6 und im Anhang C dargestellt, erfüllt werden, können die Messungen der Wechselstromverluste und der Magnetisierung mit einem Fehler bedingt durch die geometrische Konfiguration, der kleiner als wenige Prozent ist, ohne Kalibrierung durchgeführt werden. Wenn jedoch die Konfiguration des Systems der Pickupspulen außerhalb der vorgegebenen Bedingungen liegt, muss die im Anhang D dargestellte Kalibrierung durchgeführt werden.

8 Berechnung der Ergebnisse

8.1 Amplitude des äußeren Magnetfelds

Das äußere Magnetfeld muss aus der Signalspannung der Kompensationsspule $U_c(t)$ berechnet werden, die in die Gleichung (1) eingesetzt wird:

$$H_e(t) = \frac{1}{\mu_0 N_c S_c} \int U_c(t') dt' \quad (1)$$

wobei N_c die Windungszahl der Kompensationsspule und S_c die Fläche des verketteten Flusses je Windung der Kompensationsspule sind. Die Integration über die Zeit beginnt in einem Nulldurchgang von $U_c(t)$. Das magnetische Feld hat den Wert Null im Mittelpunkt zwischen dem Maximum und dem Minimum von $H_e(t)$ in der Gleichung (1). Als Amplitude muss die Hälfte der Differenz von Maximalwert und Minimalwert von $H_e(t)$ genommen werden.

8.2 Magnetisierung

Die Magnetisierung muss aus der kompensierten Signalspannung der Hauptpickupspule $U_{p-c}(t)$ berechnet werden, die in die Gleichung (2) eingesetzt wird:

$$M(t) = \frac{1}{\mu_0 N_p S_s} \int U_{p-c}(t') dt' \quad (2)$$

wobei N_p die Windungszahl der Hauptpickupspule, und S_s die effektive Querschnittsfläche der Probenspule ist, die sich aus dem gesamten Volumen der Probenspule, dividiert durch ihre Höhe, ergibt. Die Integration

über die Zeit beginnt in einem Nulldurchgang von $U_{p-c}(t)$. Die Magnetisierung hat den Wert Null im Mittelpunkt zwischen dem Maximum und dem Minimum von $M(t)$ in Gleichung (2). Ein geometriebedingter Fehler des Pickupspulensystems bei der Magnetisierungsmessung wird im Anhang B erklärt.

8.3 Magnetisierungskurve

Über eine Periode des Magnetfelds kann die magnetische Hystereseschleife bestimmt werden, indem die Magnetisierung ab Periodenbeginn für das betreffende Magnetfeld aufgezeichnet wird. Die Null-Linien der Magnetisierung und des Magnetfelds können, wie in 8.1 und 8.2 gezeigt, ermittelt werden.

8.4 Wechselstromverluste

Wie im Anhang B gezeigt wird, können die Wechselstromverluste je Periode in einem supraleitenden Draht berechnet werden, indem der Poynting-Vektor $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ über eine geschlossene Fläche um den Draht über eine Periode T des äußeren elektromagnetischen Wechselfeldes integriert wird. In diesem Fall muss die Wechselstromverlustleistung P [W/m³] dadurch berechnet werden, dass die kompensierte Signalspannung der Hauptpickupspule U_{p-c} und das äußere Magnetfeld H_e in die Gleichung (3) eingesetzt werden:

$$P = -\frac{f}{N_p S_s} \int_0^T U_{p-c}(t) H_e(t) dt \quad (3)$$

wobei f gleich $1/T$ die Frequenz des äußeren Magnetfelds ist. Bei konstanter Periodizität ist die Gleichung (3) äquivalent zu dem alternativen Ausdruck für die durch die Gleichung (2) definierte Integration der Magnetisierung über eine Periode des äußeren Felds, wie im Anhang B gezeigt wird.

In dem Fall, in dem Wirbelstromverluste in dem normalleitenden Metall des Probendrahts nur einen geringen Beitrag liefern, können die Wechselstromverluste in zwei Hauptkomponenten, Hystereseverluste P_h und Kopplungsverluste P_c , unterteilt werden, indem die Frequenzabhängigkeit der Verluste für eine feste Amplitude des äußeren Felds gemessen wird.

Wenn die Hintergrundverluste in der Messanordnung für die Verlustmessung nicht vernachlässigt werden können, sind die Wechselstromverluste in der Weise zu bestimmen, dass die Hintergrundverluste von den insgesamt gemessenen Verlusten subtrahiert werden.

8.5 Hystereseverluste

Die Hystereseverluste im Einheitsvolumen der einzelnen Filamente, P_h , sind als extrapolierter Wert der Wechselstromverluste im Einheitsvolumen bei $f=0$ zu erhalten. Der Wert kann aus der Frequenzabhängigkeit der Wechselstromverluste je Periode mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse extrapoliert werden.

ANMERKUNG Bei den Messungen, bei denen die Wechselstromverluste nicht in die Hystereseverluste und die Kopplungsverluste unterteilt werden, zum Beispiel in Fällen von Proben mit niedrigen n -Werten, sollen nur die gesamten Wechselstromverluste angegeben werden.

8.6 Kopplungsverluste und Kopplungszeitkonstante

Die Kopplungsverluste müssen berechnet werden, indem die Hystereseverluste von den insgesamt gemessenen Wechselstromverlusten in dem Bereich niedriger Frequenz, in dem die Kopplungsverluste pro Periode als proportional zur Frequenz angenommen werden, subtrahiert werden. Für isotrope supraleitende Runddrähte mit dünnen Filamenten in einem sinusförmigen zeitlichen Verlauf des äußeren Felds sind die Kopplungsverluste im Einheitsvolumen, P_c , theoretisch gegeben durch

$$P_c = 4\pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad (4)$$

wobei τ die Kopplungszeitkonstante und H_m die Amplitude des äußeren Magnetfelds sind. Die Kopplungszeitkonstante kann aus dem Proportionalitätsfaktor der Kopplungsverluste je Periode zur Frequenz bestimmt werden. Die Ausdrücke der Kopplungsverluste in runden Drähten für verschiedene Arten von Kurvenformen sind im Anhang E angegeben.

9 Messunsicherheit

Die Hintergründe für die Einführung des Begriffs der Messunsicherheit, ihre Definition und ihre Anwendung auf das Pickupspulenverfahren sind in den Anhängen F und G zusammengefasst. Die Ergebnisse für relative kombinierte Standardmessunsicherheit ermittelt in Anhang G lauten 3,8 % für die Hystereseverluste und

5,6 % für die Kopplungsverluste. Für einen Überdeckungsfaktor 2 betragen die Schätzwerte der relativen erweiterten Messunsicherheiten 7,6 % für die Hystereseverluste und 11,2 % für die Kopplungsverluste.

9.1 Messunsicherheit der Messanordnung

Es müssen Messanordnungen benutzt werden, deren relative Standardmessunsicherheit 0,5 % nicht überschreitet. Das Gerät zur Messung der Probenabmessungen soll eine relative Standardmessunsicherheit von nicht mehr als 0,5 % aufweisen.

ANMERKUNG In früheren „Round-Robin“-Tests [4], [5] betrugen die Variationskoeffizienten (engl. „coefficients of variance“, COV) der Hystereseverluste und der Kopplungsverluste 5 % bzw. 10 %. Bezogen auf diese COV-Werte erscheinen die errechneten Werte für die relativen erweiterten Messunsicherheiten äquivalent, wenn ein Überdeckungsfaktor von 2 angewandt wird.

9.2 Messunsicherheit des äußeren Magnetfelds

Das System zur Erzeugung des äußeren Magnetfelds muss das magnetische Feld mit einer relativen Standardmessunsicherheit von nicht mehr als 0,5 % liefern. Das äußere Magnetfeld muss eine Homogenität wie in 7.1.5 angegeben aufweisen.

9.3 Messunsicherheit der Temperaturmessung

Ein Kryostat muss für die notwendige kryogene Umgebung zur Messung der Wechselstromverluste sorgen und die Probe muss gemessen werden, während sie in Flüssighelium eingetaucht ist. Es wird dabei angenommen, dass die Probentemperatur gleich der Temperatur der Flüssigkeit ist. Die Temperatur der Flüssigkeit muss mit einer Standardmessunsicherheit von nicht mehr als 0,05 K angegeben werden. Zur Umrechnung des im Kryostat gemessenen Drucks in die zugehörige Temperatur, muss das Phasendiagramm von Helium benutzt werden. Die Druckmessung muss eine Messunsicherheit aufweisen, die niedrig genug ist, um die geforderte Messunsicherheit der Temperaturmessung zu erreichen. Ab einer Tiefe von mindestens 1 m unter dem Flüssighelium-Pegel kann eine durch die Flüssigkeitssäule bedingte Druckkorrektur notwendig werden.

10 Prüfbericht

10.1 Identifizierung des Probendrahts

Der Probendraht muss, wenn möglich, durch die folgenden Angaben identifiziert werden:

- a) Name des Herstellers;
- b) Klassifizierung;
- c) Chargennummer;
- d) Matrixmaterial;
- e) Form des Querschnitts und Abmessung des Drahts;
- f) Filamentdurchmesser;
- g) Anzahl der Filamente;
- h) Abstand zwischen den Filamenten;
- i) Verhältnis von Kupfer zu Nicht-Kupfer;
- j) Twistlänge;
- k) Restwiderstandsverhältnis (RRR);
- l) Dicke der Isolation.

10.2 Konfiguration der Probenspule

Die folgenden Angaben zur Konfiguration der Probenspule müssen mitgeteilt werden:

- a) Innendurchmesser;
- b) Außendurchmesser;
- c) Höhe;
- d) Windungszahl;

E DIN IEC 61788-8 (VDE 0390-8):2008-10

- e) effektive Querschnittsfläche der Probenspule;
- f) Verhältnis des Volumens der Probenspule innerhalb der Höhe der Pickupspule zum Volumen des Raums zwischen den Pickupspulen.

10.3 Messbedingungen

Die folgenden Messbedingungen müssen mitgeteilt werden:

- a) Amplitude des äußeren Felds;
- b) Kurvenverlauf des äußeren Felds;
- c) Frequenz des äußeren Felds;
- d) Homogenitäten des äußeren Felds über die gewickelte Länge der Probe und die Länge der Pickupspulen;
- e) Temperatur bei der Messung;
- f) Verfahren zur Temperaturmessung;
- g) Messzeit für die induzierten Spannungssignale der Pickupspulen;
- h) Betrag der Hintergrundverluste.

10.4 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse müssen mitgeteilt werden:

- a) gesamte Wechselstromverluste, einschließlich Hystereseverlusten und Kopplungsverlusten;
- b) Hystereseverluste;
- c) Kopplungszeitkonstante oder Kopplungsverluste;
- d) Magnetisierungskurve.

Bei den Messungen, bei denen die Wechselstromverluste nicht in Hystereseverluste und Kopplungsverluste unterteilt werden, sollen nur die Ergebnisse zu a) und d) angegeben werden.

Es wird empfohlen, dass die folgenden Ergebnisse mitgeteilt werden, auch in den Fällen, in denen erfassbare Fehler, z. B. der in 5.2 und Anhang C erwähnte geometriebedingte Fehler des Pickupspulensystems, reduziert werden:

- e) Hystereseverluste und Magnetisierungskurve der Standard-Pb-Drahtprobe;
- f) Maximum und Minimum der Magnetisierung in der Standard-Pb-Drahtprobe im äußeren Magnetfeld mit der Amplitude 0,1 T;
- g) Kritische magnetische Feldstärke der Standard-Pb-Probe.

10.5 Messanordnung

Der Prüfbericht muss die folgenden Informationen enthalten.

10.5.1 Pickupspulen

- a) Relative Positionen der Pickupspulen zur Probenspule;
- b) Daten der Hauptpickupspule (Innendurchmesser, Außendurchmesser, Höhe, Windungszahl, Material des Spulenkörpers);
- c) Daten der Kompensationsspule (Innendurchmesser, Außendurchmesser, Höhe, Windungszahl, Material des Spulenkörpers).

10.5.2 Messsystem

- a) Schaltung des Messsystems;
- b) Werkstoff des Kryostaten.

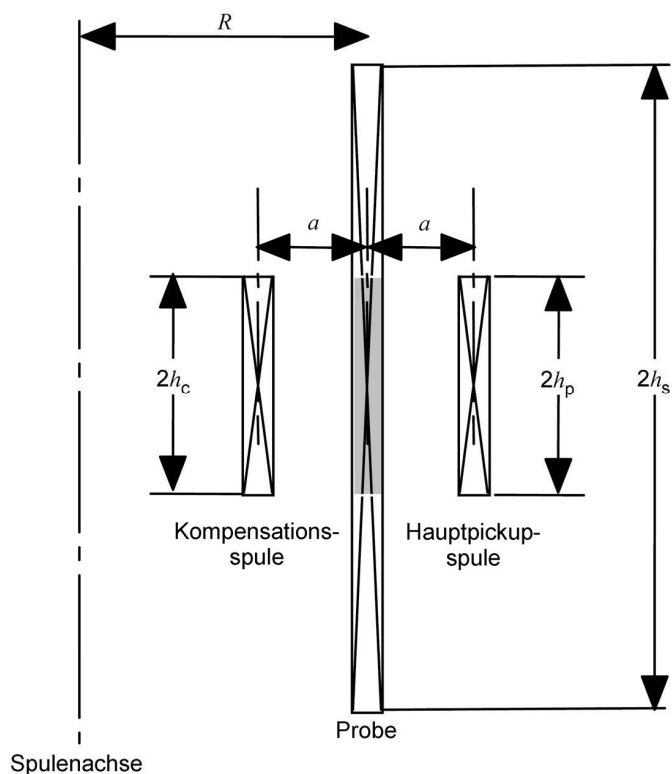


Bild 1 – Standardanordnung der Probe und der Pickupspulen

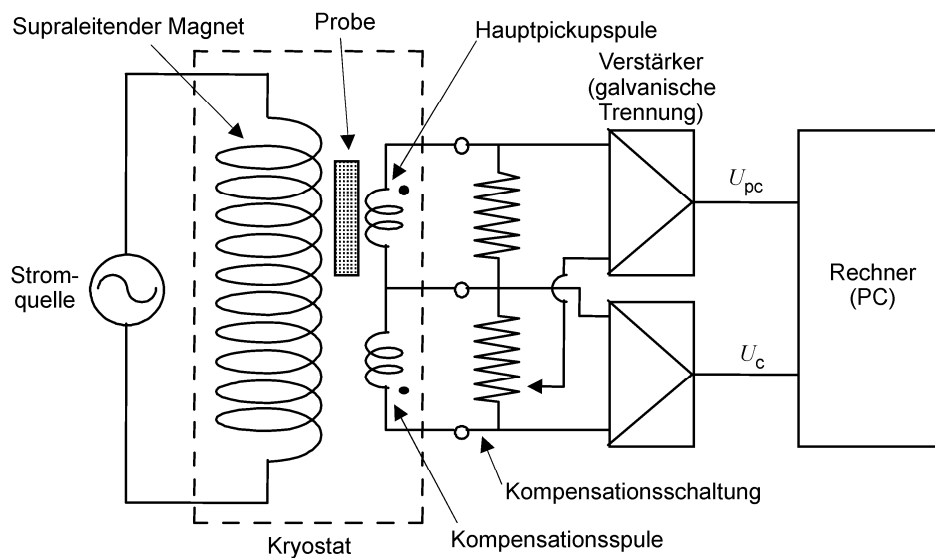


Bild 2 – Typische Schaltung für die Messung der Wechselstromverluste mit Hilfe von Pickupspulen

Anhang A (informativ)

Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 10

A.1 Anwendungsbereich

Das vorgestellte Pickupspulenverfahren ist allgemein anwendbar, um die gesamten Wechselstromverluste von supraleitenden Drähten in Form gewickelter Proben, wie in Abschnitt 6.1 aufgezeigt, in weiten Bereichen der Frequenz und der Amplitude des äußeren Magnetfeldes bei Temperaturen flüssigen Heliums zu messen. Die obere Grenze der Frequenz wie in Abschnitt 1 angegeben ist die maximale Frequenz, die bei „Round-Robin-Tests“ für die Messung von Wechselstromverlusten in Cu/Nb-Ti-Multifilamentdrähten und supraleitenden Dreikomponentendrähten verwendet wurde. Die Wechselstromverluste in supraleitenden Drähten können mit diesem Verfahren auch in einem Bereich höherer Frequenzen gemessen werden, wenn weiterhin darauf geachtet wird, elektromagnetisches Rauschen verursacht durch Wirbelströme in metallischen Teilen in der Nähe der Pickupspulen, auch in Superisolationslagen in dem nicht-metallischen Kryostaten und entsprechendes Rauschen verursacht durch Abschirmströme, die in den Windungen des Magneten für das äußere Magnetfeld induziert werden, zu reduzieren.

Das vorgestellte Pickupspulenverfahren ist nicht nur auf Cu/Nb-Ti-Multifilamentdrähte und die supraleitenden Dreikomponentendrähte anwendbar, sondern kann im Prinzip ebenfalls auf andere runde supraleitende Drähte ausgeweitet werden, die im Folgenden unter der Bedingung aufgeführt werden, dass das Verfahren zur Kalibrierung für die Messung von Wechselstromverlusten aus 7.4.4 und Anhang D angewandt werden kann:

- (i) Die Niedertemperaturverbundsupraleiter auf der Basis von Nb_3Sn , Nb_3Al etc.
- (ii) Die Mitteltemperatursupraleiter wie z. B. MgB_2
- (iii) Die Hochtemperatursupraleiter auf der Basis von Bi-2212 etc.

A.2 Kopplungszeitkonstante

Bei den Multifilamentsupraleitern sind die Filamente getwistet, um die Kopplungsverluste in einem transversalen magnetischen Wechselfeld zu reduzieren. Bei kommerziellen metallischen supraleitenden Drähten ist die Twistlänge innerhalb der mechanischen Toleranzen so festgelegt, dass sich die Kopplungsverluste in praktischen Bereichen der Frequenz und der Amplitude des äußeren Magnetfeldes auf einem vergleichbaren Niveau mit den Hystereseverlusten der einzelnen Filamente befinden.

Im Bereich der linearen Frequenzabhängigkeit der Kopplungsverluste pro Periode kann die Kopplungszeitkonstante aus dem Proportionalitätskoeffizienten zwischen den Kopplungsverlusten pro Periode und der Frequenz bei einer festgelegten Amplitude, wie in 8.6 gezeigt, berechnet werden. Um die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Kopplungszeitkonstanten zu reduzieren, sollen die Messpunkte über einen weiten Frequenzbereich auf einer logarithmischen Skala verteilt werden, wobei der Anteil der Hystereseverluste an den Wechselstromverlusten an dem Messpunkt bei der niedrigsten Frequenz dominiert und die Hystereseverluste und die Kopplungsverluste am Messpunkt bei der höchsten Frequenz zueinander vergleichbar sind. Bei früheren „Round-Robin-Tests“ lag bei Cu/Nb-Ti-Multifilamentdrähten die Messfrequenz zum Beispiel im Bereich von 0,005 Hz bis 1 Hz bei einer Amplitude des Magnetfeldes von 1 T [4] und bei supraleitenden Dreikomponentendrähten im Bereich von 0,005 Hz bis 10 Hz bei 0,5 T [5].

A.3 Vorbereitung der gewickelten Proben

Die gewickelte Probe jedes supraleitenden Drahtes soll so vorbereitet und zwischen den beiden konzentrischen Pickupspulen angeordnet werden, dass die zulässige Toleranz der Biegedehnung beachtet wird. Das zulässige Niveau soll anhand der Bedingungen für die mechanische Dehnung bei den Messungen des kritischen Stroms abgeschätzt werden. Bei dickeren Leitern führen die Bedingungen für die Biegedehnung zu einem größeren Radius der gewickelten Probe. Der Geometriefehler für große Proben kann ebenfalls abgeschätzt werden, indem der Koeffizient G , wie in Anhang C gezeigt, untersucht wird. In dem Fall, in dem der Radius der gewickelten Probe außerhalb des in Bild C.1 angegebenen Bereichs liegt, soll ein Satz an Größen der gewickelten Probe und der Pickupspulen verwendet werden, der den gegebenen Beispielen ähnlich ist. Bei gewickelten WAR-Proben (engl. „wind-and-react“, d. h. Proben, die zuerst gewickelt und dann reagiert worden sind) kann andererseits der Radius vor der Reaktionsglühung in derselben Weise angepasst

werden, wie in IEC61788-2 für die Messung des kritischen Stromes an Nb₃Sn-supraleitenden Drähten aufgezeigt wird. Es soll sichergestellt werden, dass sich eine elektrische Isolation zwischen benachbarten Windungen der gewickelten Probe befindet.

A.4 Verfahren der Kryokompensation

Ein alternatives Verfahren zur Kompensation der induzierten Spannung der Pickupspulen, wie in Abbildung 2 gezeigt, ist eine Kompensation innerhalb des Kryostaten. Bei diesem Kompensationsschema sind die Pickupspule und die Kompensationsspule direkt in der Kälte antiseriell miteinander verbunden, ohne dass die vollen Signale aus dem Kryostaten an Raumtemperatur gebracht und in die Verstärker eingespeist werden.

Die Windungszahlen der Pickupspulen und der Kompensationsspulen sollten aneinander angepasst werden, so dass das verbleibende Induktionssignal der antiseriell verbundenen Spulen minimiert wird. Da die Kompensation niemals „perfekt“ sein wird, ist ein gewisses Feintuning notwendig. Dieses kann anhand eines Induktionssignals, das vom Magnetstrom abgeleitet wird, oder anhand des Signals einer kleinen Kompensationsspule innerhalb des Magneten durchgeführt werden. Dieses Feintuning wird bei Raumtemperatur mit Verstärkern ähnlich dem Kompensationsverfahren durchgeführt, wie es in 7.4 beschrieben und in Bild 2 erläutert wird.

Der Vorteil der Kryokompensation ist, dass nicht die volle Spannung der Pickup- und der Kompensationsspulen an Raumtemperatur gebracht und in die Verstärker eingespeist wird. Eine Differenz in der Phasenverschiebung des Signals aus den beiden Verstärkern führt zu einem Anwachsen der Hintergrundverluste (Verluste ohne Probe in den Pickupspulen), da ein Teil des Induktionssignals als Wechselstromverlustsignal (in Phase) erscheinen wird. Weiterhin können Störungen der Signale in der Verdrahtung zwischen der Pickup- und der Kompensationsspule sowie den Verstärkern bei Raumtemperatur, die in den Schaltkreisen der Pickupspule und der Kompensationsspule nicht identisch sind, zu einem Anwachsen der Hintergrundverluste führen. Bei der Anwendung des Verfahrens der Kryokompensation wird der größte Teil der Kompensation in der Kälte durchgeführt. Es werden keine großen Induktionssignale mit einer möglichen Differenz in der Phasenverschiebung in die Verstärker eingespeist und das Risiko von Störungen von Signalen zwischen Kryotemperatur und Raumtemperatur wird minimiert. Bei der Anwendung des Verfahrens der Kryokompensation wird der Effekt der Leerspule minimiert und die Empfindlichkeit der Messung kann erhöht werden.

Anhang B (informativ)

Erläuterung der Wechselstromverlustmessung mit Hilfe des Poynting-Vektors [6]

Im Allgemeinen können die Wechselstromverluste in einem supraleitenden Draht je Periode berechnet werden, indem der Poynting-Vektor $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ auf einer geschlossenen Oberfläche A um den Draht für ein periodisches elektromagnetisches Feld integriert wird. Die Wechselstromverluste im Einheitsvolumen der Probe sind gegeben durch

$$P = -\frac{f}{V_s} \int_0^T dt \int_A dA \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{B.1})$$

wobei E und H die elektrische und die magnetische Feldstärke auf der Oberfläche A sind und V_s das Probenvolumen ist, das von der Oberfläche A umschlossen wird. Wenn die Probe einem homogenen magnetischen Wechselfeld H_e ausgesetzt wird, können die Wechselstromverluste in folgender Weise durch Pickupspulen bestimmt werden. In Messanordnungen, bei denen z. B. die Probenspule und Pickupspulen, wie in Bild 1 und Bild 2 gezeigt, angeordnet sind, gilt die Gleichung (B.1) in der geänderten Form

$$P = -\frac{f}{V_s} \frac{d_p}{n_p} \int_0^T dt \int_\Gamma d\Gamma H_e E = -\frac{f}{n_p} \frac{d_p}{V_s} \int_0^T dt H_e U_{p-c} \quad (\text{B.2})$$

wobei d_p die mittlere Wicklungssteigung der Pickupspule, n_p die Windungszahl je Längeneinheit der Hauptpickupspule und Γ der Integrationsweg längs der Wicklung in einer Lage ist. Hiermit können die Wechselstromverluste berechnet werden, indem das Produkt aus der Feldstärke des äußeren Magnetfelds H_e und der kompensierten Signalspannung U_{p-c} der Pickupspulen über eine Periode T integriert wird. Im Bild A.1 ist der Teil der Probenspule, der von der geschlossenen Oberfläche umgeben ist, jeweils durch Schraffierung grafisch hervorgehoben. Durch Einsetzen der Magnetisierung M , die durch die Gleichung (2) definiert ist, führt die Gleichung (B.2) zu

$$P = \mu_0 f \int_0^T H_e \frac{\partial M}{\partial t} dt = \mu_0 f \oint H_e dM \quad (\text{B.3})$$

Für konstanten periodischen Feldverlauf, bei dem die Magnetisierungskurve in jeder Periode geschlossen ist, kann die Gleichung (B.3) ersetzt werden durch

$$P = -\mu_0 f \oint M dH_e \quad (\text{B.4})$$

Der durch die Konfiguration von Probenspule und Pickupspulen bedingte geometrische Fehler resultiert daher, dass die Oberfläche A durch eine Seitenfläche der Pickupspule angenähert wird. Dies wird quantitativ im Anhang C behandelt.