

	DIN EN IEC 61788-7 (VDE 0390-7)	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
<p>ICS 29.050</p> <p>Ersatz für DIN EN 61788-7 (VDE 0390-7):2007-08 Siehe Anwendungsbeginn</p> <p>Supraleitfähigkeit – Teil 7: Messungen der elektronischen Charakteristik – Oberflächenwiderstand von Hochtemperatur-Supraleitern bei Frequenzen im Mikrowellenbereich (IEC 61788-7:2020); Deutsche Fassung EN IEC 61788-7:2020</p> <p>Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of high-temperature superconductors at microwave frequencies (IEC 61788-7:2020); German version EN IEC 61788-7:2020</p> <p>Supraconductivité – Partie 7: Mesurages des caractéristiques électronique – Résistance de surface des supraconducteurs haute température critique aux hyperfréquences (IEC 61788-7:2020); Version allemande EN IEC 61788-7:2020</p> <p>Gesamtumfang 47 Seiten</p> <p>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE</p>		

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2020-04-24 angenommene Europäische Norm als DIN-Norm ist 2021-05-01.

Für **DIN EN 61788-7 (VDE 0390-7):2007-08** besteht eine Übergangsfrist bis 2023-04-24.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 61788-7 (VDE 0390-7):2018-07.

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.

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

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 90 „Superconductivity“ erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieses Dokuments bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu diesem Dokument angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees das Dokument

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

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 61788-7 (VDE 0390-7):2007-08** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Geräte und Messaufbau-Beschreibungen wurden erweitert und präzisiert;
- b) die Beschreibungen zur Durchführung der Messungen wurden erweitert und präzisiert;
- c) die Messfrequenzen (12 GHz, 18 GHz und 22 GHz) sowie die Maße der Saphirzylinder wurden aktualisiert;
- d) ein informativer Anhang zur relativen kombinierten Standardunsicherheit bei Messungen des Oberflächenwiderstands wurde hinzugefügt;
- e) Angaben zu Präzision und Genauigkeit usw. wurden in die aktuelle allgemeine Unsicherheitsbetrachtung überführt;
- f) Betrachtungen zum Thema Reproduzierbarkeit von Messergebnissen wurden aufgenommen;
- g) mit Rücksicht auf stabile Messungen werden Resonatoren vom geschlossenen Typ empfohlen.

Frühere Ausgaben

DIN EN 61788-7 (VDE 0390-7): 2002-11, 2007-08

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

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.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-815	a	–
EN 61788 (alle Teile)	IEC 61788 (alle Teile)	DIN EN 61788 (VDE 0390) (alle Teile)	VDE 0390
^a „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, Online-Zugang: http://www.dke.de/dke-iev .			

Nationaler Anhang NB
(informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61788 (VDE 0390) (alle Teile), *Supraleitfähigkeit*

Supraleitfähigkeit –
Teil 7: Messungen der elektronischen Charakteristik –
Oberflächenwiderstand von Hochtemperatur-Supraleitern bei Frequenzen im
Mikrowellenbereich
(IEC 61788-7:2020)

Superconductivity –
Part 7: Electronic characteristic measurements –
Surface resistance of high-temperature
superconductors at microwave frequencies
(IEC 61788-7:2020)

Supraconductivité –
Partie 7: Mesurages des caractéristiques
électronique –
Résistance de surface des supraconducteurs
haute température critique aux hyperfréquences
(IEC 61788-7:2020)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2020-04-24 angenommen. CENELEC-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 Centre oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

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

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees 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 Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

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

© 2020 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren,
sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN IEC 61788-7:2020 D

Europäisches Vorwort

Der Text des Dokuments 90/447/FDIS, zukünftige 3. Ausgabe der IEC 61788-7, erarbeitet vom IEC/TC 90 „Superconductivity“ wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN IEC 61788-7:2020 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2021-01-24
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2023-04-24

Dieses Dokument ersetzt **EN 61788-7:2006** und alle Änderungen und Berichtigungen (falls vorhanden).

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

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 61788-7:2020 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Anhang ZA (normativ)

Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

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).

ANMERKUNG 1 Ist eine internationale Publikation durch gemeinsame Abänderungen modifiziert worden, gekennzeichnet durch (mod.), dann gilt die entsprechende EN oder das HD.

ANMERKUNG 2 Aktualisierte Informationen über die in diesem Anhang aufgeführten aktuellen Fassungen der Europäischen Normen sind hier verfügbar: www.cenelec.eu.

<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
IEC 60050-815	–	International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity	–	–

Inhalt

Seite

Europäisches Vorwort	2
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	3
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Anforderungen	8
5 Messapparatur	9
5.1 Messsystem	9
5.2 Messapparatur für R_s	9
5.3 Dielektrische Zylinder	12
6 Durchführung der Messungen	12
6.1 Vorbereitung der Probe	12
6.2 Aufbau	13
6.3 Messung des Referenzpegels	13
6.4 Messung der Frequenzantwort von Resonatoren	14
6.5 Bestimmung des Oberflächenwiderstands des Supraleiters sowie ϵ' und $\tan \delta$ der Standard- Saphirzylinder	16
7 Unsicherheit des Messverfahrens	17
7.1 Oberflächenwiderstand	17
7.2 Temperatur	18
7.3 Abstützung von Probe und Probenhalter	19
7.4 Probenschutz	19
7.5 Unsicherheit des Oberflächenwiderstandes bei Messungen mit der üblichen Zweiresonatoren-Methode	19
8 Prüfbericht	19
8.1 Identifizierung der Probe	19
8.2 Bericht über die R_s -Werte	19
8.3 Bericht über die Prüfbedingungen	20
Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 8	21
A.1 Anwendungsbereich	21
A.1.1 Allgemeines	21
A.1.2 Verfahren mit einem zylindrischen Hohlraum [10] [17]	21
A.1.3 Verfahren mit einem Parallelplatten-Resonator [18] [19]	21
A.1.4 Verfahren mit Resonanz einer Mikrostripleitung [20], [21]	21
A.1.5 Verfahren mit einem dielektrischen Resonator [22], [23], [24], [25]	21
A.1.6 Verfahren mit einem dielektrischen Bildeffekt-Resonator [26] [27]	22

	Seite
A.1.7 Verfahren mit zwei Resonatoren [28], [29].....	23
A.2 Anforderungen.....	23
A.3 Theorie und Gleichungen zur Berechnung	23
A.4 Messapparatur	26
A.5 Abmessungen der Standard-Saphirzylinder	27
A.6 Bemaßung des Resonators vom geschlossenen Typ	29
A.7 Reproduzierbarkeit des Saphirzylinders	31
A.8 Prüfergebnisse	31
A.9 Reproduzierbarkeit der Messmethode	32
A.10 Beeinflussung des Oberflächenwiderstandes von Saphirzylindern durch Abweichungen des $\tan \delta$	33
Anhang B (informativ) Auswertung der relativen kombinierten Standardunsicherheit bei Messungen des Oberflächenwiderstands.....	35
B.1 Praktische Messung des Oberflächenwiderstands	35
B.2 Bestimmung des Oberflächenwiderstands des Supraleiters	36
B.3 Kombinierte Standardunsicherheit.....	37
B.3.1 Allgemeines.....	37
B.3.2 Berechnung von c_2 bis c_5 (12-GHz-Resonanz bei 20 K)	37
B.3.3 Bestimmung von u_1 bis u_5	38
B.3.4 Kombinierte relative Standardunsicherheit	40
Literaturhinweise	42
Bilder	
Bild 1 – Schematische Darstellung des Messsystems zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von R_s mit Hilfe eines Kryokühlers	9
Bild 2 – Typische Messapparatur für R_s	11
Bild 3 – Einfügungsdämpfung IA , Resonanzfrequenz f_0 und Halbwertsbreite Δf , gemessen bei T Kelvin.....	14
Bild 4 – Reflexionsstreuparameter (S_{11} und S_{22}).....	16
Bild 5 – Begriffsdefinitionen nach Tabelle 4	18
Bild A.1 – Schematische Konfiguration verschiedener Messverfahren zur Messung des Oberflächenwiderstandes	22
Bild A.2 – Konfiguration eines Resonators mit einem dielektrischen Zylinder, der an beiden Enden durch zwei parallele, auf dielektrischen Substraten aufgebrachte supraleitende Filme, kurzgeschlossen ist.....	24
Bild A.3 – Berechneter Verlauf von u und W als Funktion von v für die TE_{01p} -Mode.....	25
Bild A.4 – Konfiguration dielektrischer Standardzylinder für Messungen von R_s und $\tan \delta$	26
Bild A.5 – Drei Typen von dielektrischen Resonatoren.....	26
Bild A.6 – Modendiagramm zur Dimensionierung des TE_{011} -Resonators, der an beiden Enden durch parallele supraleitende Filme kurzgeschlossen ist [28]	28

Bild A.7 – Modendiagramm zur Dimensionierung des TE_{013} -Resonators, der an beiden Enden durch parallele supraleitende Filme kurzgeschlossen ist [28].....	29
Bild A.8 – Modendiagramm des TE_{011} -Resonators vom geschlossenen Typ [28]	30
Bild A.9 – Modendiagramm des TE_{013} -Resonators vom geschlossenen Typ [28]	31
Bild A.10 – Temperaturabhängiger R_s der YBCO-Schicht mit einer Dicke von 500 nm und einer Größe von 25 mm im Quadrat.....	32
Bild A.11 – Temperaturabhängiger R_s des YBCO-Films nach dreimaliger Messung von R_s	33
Bild B.1 – Schematische Darstellung der Resonatoren für die TE_{011} - und TE_{013} -Moden	35
Bild B.2 – Typische Frequenzcharakteristik der Resonanz der TE_{011} -Mode	36
Bild B.3 – Frequenzcharakteristik eines Resonators, angenähert durch eine Lorentzverteilung.....	40
Tabellen	
Tabelle 1 – Typische Maße für Saphir-Einkristall-Zylinderpaare für 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz	12
Tabelle 2 – Empfohlene Maße eines supraleitenden Films für 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz	13
Tabelle 3 – Spezifikationen für einen Vektor-Netzwerkanalysator	17
Tabelle 4 – Spezifikationen für Saphirzylinder	18
Tabelle A.1 – Standardabweichung des Oberflächenwiderstands, berechnet aus den Ergebnissen von Bild A.11	33
Tabelle A.2 – Beziehung zwischen x , definiert durch Gleichung (A.12), und y , definiert durch Gleichung (A.13).....	34

Einleitung

Seit der Entdeckung einiger kupferhaltiger Oxide vom Perowskit-Typ wurden und werden weltweit umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F & E) zum Thema Hochtemperatursupraleiter (HTS) durchgeführt, und ihre Anwendung für Hochfeldmagnete, zur Übertragung hoher Leistungen mit niedrigen Verlusten, für Komponenten der Elektronik und viele andere technische Aufgaben macht Fortschritte.

Auf vielen Gebieten der Elektronik, insbesondere im Bereich der Telekommunikation, wurden passive Mikrowellen-Bauelemente, wie z. B. Filter mit Hochtemperatursupraleitern (HTS) entwickelt, die sich nun in der praktischen Erprobung befinden [1], [2].¹

Supraleitende Materialien für Mikrowellen-Resonatoren [3], -Filter [4], -Antennen [5] und -Verzögerungsleitungen [6] haben den Vorteil sehr niedriger Verlustcharakteristiken. Die für die Konstruktion von verlustarmen Mikrowellenkomponenten erforderlichen Kenngrößen des supraleitenden Materials sind der Oberflächenwiderstand R_s und die Temperaturabhängigkeit von R_s . Das Wissen über diesen Parameter ist von primärer Bedeutung für die Entwicklung neuer Materialien von Seiten der Hersteller und für den Entwurf und die Auslegung supraleitender Mikrowellenkomponenten seitens der Anwender.

Der Oberflächenwiderstand R_s von hochwertigen HTS-Filmen ist im Allgemeinen mehrere Größenordnungen niedriger als der von normalen Metallen [7] [8] [9] [10], was den Bedarf an einer zuverlässigen Charakterisierungstechnik zur Messung dieser Eigenschaft erhöht hat. Üblicherweise wurde der R_s -Wert von Niob oder irgendeinem anderen Tieftemperatursupraleiter so gemessen, dass zuerst ein kompletter dreidimensionaler Hohlraumresonator hergestellt und dann dessen Güte Q [11] gemessen wurde. Der Wert von R_s konnte berechnet werden durch Lösung der Gleichungen für das elektromagnetische Feld (EM) in dem Hohlraumresonator. Eine andere Technik bestand darin, dass eine kleine Probe in einen größeren Hohlraum gesetzt wurde. Diese Messtechnik gibt es in vielerlei Arten, sie ist aber gewöhnlich mit der Ungenauigkeit verbunden, die durch die Subtraktion des Verlustbeitrages des HTS-Films von dem experimentell bestimmten Gesamtverlust des Hohlraums entsteht.

Die am besten geeigneten HTS-Proben sind Filme, die epitaxial auf ebenen kristallinen Substraten aufgewachsen sind. Bislang konnten auf gekrümmten Oberflächen keine Filme von hoher Qualität gezüchtet werden. Was benötigt wird ist eine Technik, die für solche kleine und ebene Proben geeignet ist, die keine Probenvorbereitung erfordert, die den Film weder beschädigt noch verändert, die eine hohe Wiederholgenauigkeit aufweist, die eine hohe Empfindlichkeit besitzt (herunter bis zu einem Bruchteil von 1/1 000 des R_s -Wertes von Kupfer), die eine große dynamische Variationsbreite umfasst (bis hinauf zu dem R_s -Wert von Kupfer), die es erlaubt, hohe interne Leistungen bei nur moderaten Eingangsleistungen zu erreichen, und die einen weiten Temperaturbereich abdeckt (4,2 K bis 150 K).

Unter mehreren Verfahren wird das Verfahren mit einem dielektrischen Resonator zur Bestimmung des Oberflächenwiderstands bei Mikrowellenfrequenzen ausgewählt, da es zurzeit als das Gängigste und Praktikabelste angesehen wird. Insbesondere ist der Saphirresonator ein ausgezeichnetes Werkzeug zur Messung des R_s von HTS-Materialien [12], [13], [14].

Das Messverfahren, das in dieser Norm beschrieben wird, kann auch bei anderen plattenförmigen (massiven) Supraleitern und auch bei Materialien für Tieftemperatursupraleiter angewendet werden.

Mit diesem Dokument ist beabsichtigt, Ingenieuren, die auf dem Gebiet der Elektronik- und Supraleiter-Technologie arbeiten, zunächst einmal eine geeignete und konsensfähige technische Arbeitsgrundlage zur Verfügung zu stellen.

Das Messverfahren, das in diesem Dokument beschrieben wird, basiert auf der vorbereitenden Normungsarbeit und den Untersuchungen von VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) bezüglich der Dünnsfilmeigenschaften von Supraleitern.

¹ Nummern in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der internationalen Normenreihe IEC 61788 „Supraleiter“ beschreibt die Messung des Oberflächenwiderstandes (R_s) von Supraleitern bei Mikrowellenfrequenzen mit Hilfe eines standardisierten Zwei-Resonatoren-Verfahrens. Die gemessene Größe ist dabei R_s bzw. seine Temperaturabhängigkeit bei der Resonanzfrequenz.

Bei diesem Verfahren gelten die folgenden Messbereiche für R_s :

- Frequenz: $8 \text{ GHz} < f < 30 \text{ GHz}$
- Messauflösung: $0,01 \text{ m}\Omega$ bei 10 GHz

Die Werte für R_s bei der Messfrequenz, bezogen auf 10 GHz (skaliert), werden angegeben. Für Vergleichszwecke wird die Abhängigkeit entsprechend f^2 zugrunde gelegt.

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 (IEV) – Part 815: Superconductivity*

3 Begriffe

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

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

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

4 Anforderungen

Der Oberflächenwiderstand R_s eines supraleitenden Films muss gemessen werden, indem einem dielektrischen Resonator mit der Probe (supraleitender Film) ein Mikrowellensignal zugeführt wird und dann die Einfügungsdämpfung des Resonators bei jeder Frequenz gemessen wird. Die Frequenz muss, mit der Resonanzfrequenz in der Mitte, durchgestimmt werden, und die Kurven für die Einfügungsdämpfung als Funktion der Frequenz müssen aufgenommen werden, um den Q -Wert zu erhalten, der ein Maß für die Verluste ist.

Die angestrebte relative kombinierte Standardmessunsicherheit dieser Methode ist kleiner als 20 % im Temperaturbereich zwischen 20 K und 80 K.

Es liegt in der Verantwortung des Anwenders dieses Dokuments, vor seiner Anwendung angemessene Sicherheits- und Gesundheitsschutzverfahren festzulegen und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften sicherzustellen.

Bei dieser Art von Messungen gibt es Gefahrenquellen. Die Anwendung kryogener Flüssigkeiten ist zur Kühlung der Supraleiter notwendig, um den Übergang in den supraleitenden Zustand zu ermöglichen. Ein direkter Kontakt der Haut mit kalten Komponenten der Apparatur kann ebenso wie der Kontakt mit verschüttetem Kühlmittel sofortige Erfrierungen verursachen. Die Benutzung eines Hochfrequenzgenerators ist ebenfalls unumgänglich zur Messung der Materialeigenschaften bei Hochfrequenz. Wenn dessen Leistung

zu hoch ist, kann eine direkte Berührung mit menschlichen Körperteilen unmittelbar zu Verbrennungen führen.

5 Messapparatur

5.1 Messsystem

Bild 1 zeigt schematisch die für die Messungen im Mikrowellenbereich benötigte Messanordnung. Die Anordnung besteht aus einem Netzwerkanalysator zur Messung des Transmissionsfaktors, einer Messapparatur sowie einem Thermometer zur Überwachung der Temperatur.

Die Hochfrequenzeingangsleistung, von einem geeigneten Mikrowellengenerator mit abstimmbarer Frequenz erzeugt, wird dem dielektrischen Resonator zugeführt, der in der Messapparatur montiert ist. Der Verlauf der Messdaten wird auf dem Display des Netzwerkanalysators dargestellt. Die Messapparatur ist in einen temperaturgeregelten Kryokühler (Kryo-Kältemaschine) eingebaut.

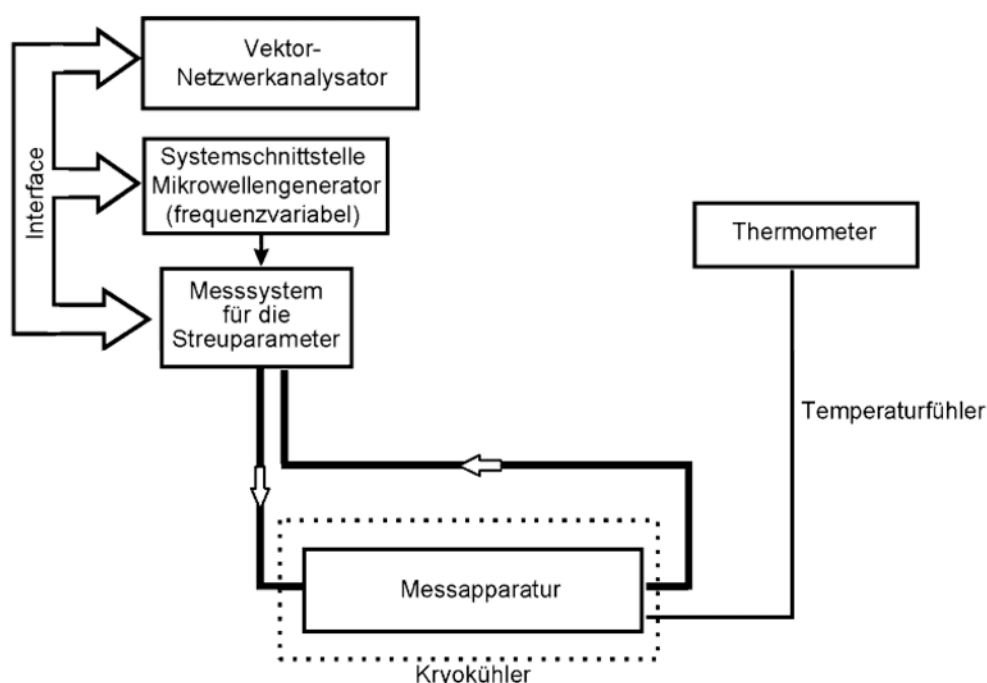


Bild 1 – Schematische Darstellung des Messsystems zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von R_s mit Hilfe eines Kryokühlers

Für die Messung von R_s an supraleitenden Filmen wird ein Vektor-Netzwerkanalysator empfohlen. Bedingt durch seinen weiten Dynamikbereich hat ein Vektor-Netzwerkanalysator im Vergleich zu einem skalaren Netzwerkanalysator einen Vorteil hinsichtlich der Messgenauigkeit. Die Leistungsanforderungen für den Vektor-Netzwerkanalysator sind in 7.1 spezifiziert.

5.2 Messapparatur für R_s

Bild 2 zeigt schematisch eine typische Messapparatur (Resonator vom geschlossenen Typ) zur Messung des R_s von HTS-Filmen, die auf einem Substrat mit ebener Oberfläche aufgebracht sind. Der obere HTS-Film wird durch eine Feder, die aus Phosphorbronze besteht, nach unten gedrückt. Zur Verbesserung der Messunsicherheit sollte eine Blattfeder verwendet werden. Dieser Federtyp reduziert die Reibung zwischen der Feder und dem anderen Teil der Apparatur und erlaubt eine unbehinderte Bewegung der supraleitenden Filme, bedingt durch die thermische Ausdehnung des dielektrischen Zylinders. Der Saphirzylinder und der Kupferring müssen coaxial angeordnet werden, um die Messunsicherheit zu minimieren.

Zwei flexible Kabel zur Messung der Transmissionseigenschaften des Resonators müssen an seinen beiden Seiten in axialsymmetrischer Position ($\phi = 0$ und π , wobei ϕ der Rotationswinkel um die zentrale Achse des Saphirzylinders ist) angebracht werden. Jedes der beiden flexiblen Koaxialkabel muss am Ende eine kleine Koppelschleife haben. Die Koppelschleife muss parallel zur Ebene des supraleitenden Films justiert werden, um die unerwünschten Transversalen-Magnetische-Wellen-Moden (TM_{mn0} -Moden) zu unterdrücken. Die Koppelschleifen müssen vor den Messungen gründlich auf Risse in den Punktschweißverbindungen untersucht werden, die während wiederholter thermischer Zyklen entstanden sein können. Die genannten Koaxialkabel können nach rechts und nach links verschoben werden, um die Einfügungsdämpfung (I_A) einzustellen. Bei dieser Einstellung muss die Kopplung unerwünschter Hohlraumresonator-Moden mit der interessierenden Mode des dielektrischen Resonators unterdrückt werden. Die unerwünschte parasitäre Kopplung mit anderen Moden reduziert den hohen Q -Wert des Resonators für transversale elektromagnetische Moden (TE-Moden). Um die parasitäre Kopplung zu verringern, muss besonders auf die Verwendung von Resonatoren mit hohem Q geachtet werden. Zwei andere Resonatortypen können zusammen mit dem in [Bild 2](#) dargestellten geschlossenen Typ verwendet werden. Sie werden in [Abschnitt A.4](#) erläutert.

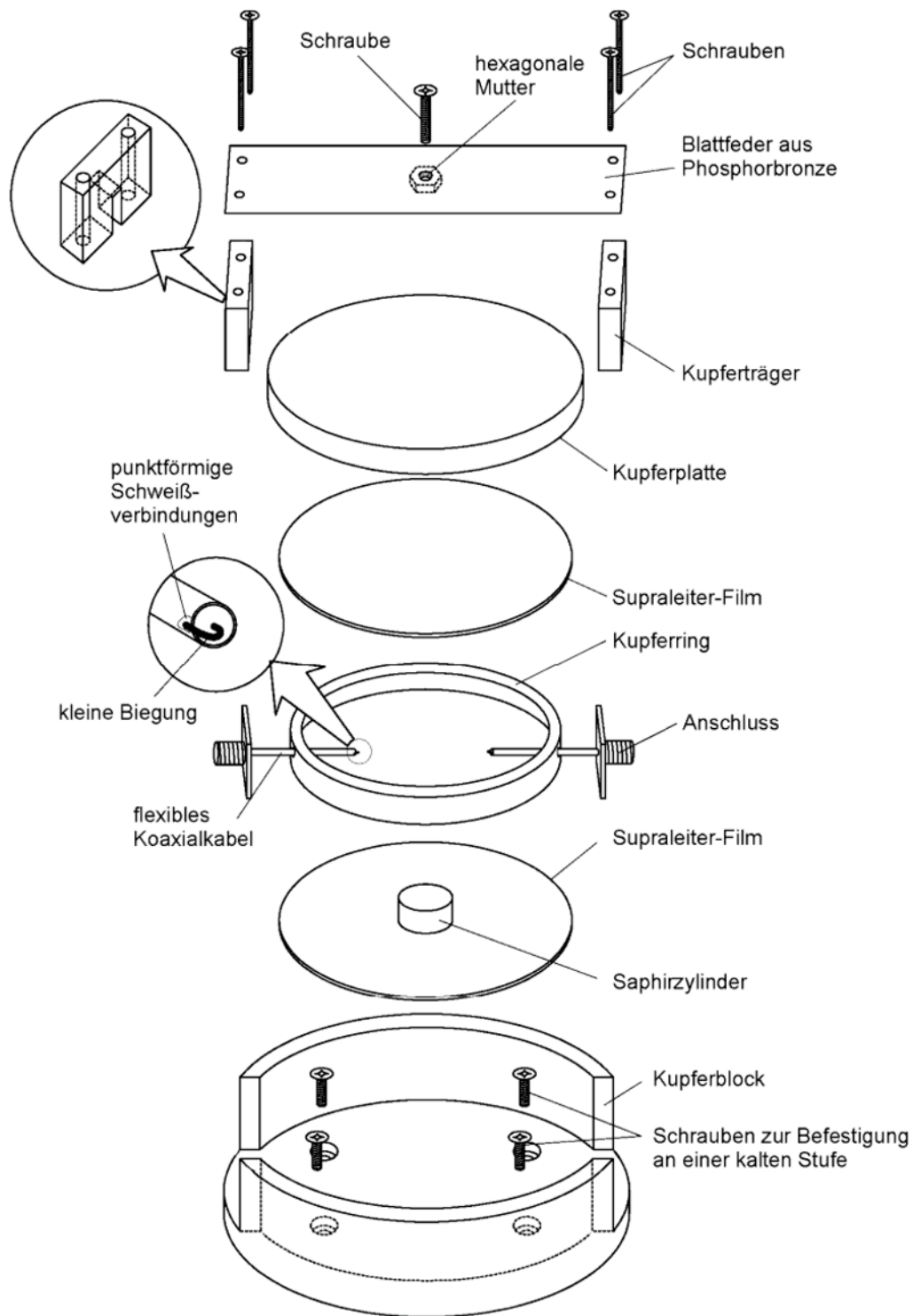


Bild 2 – Typische Messapparatur für R_s

Eine Referenzleitung aus einem flexiblen Koaxialkabel muss benutzt werden, um den Pegel der gesamten Durchgangsleistung, d. h. den Referenzpegel, zu messen. Dieses Koaxialkabel hat eine Länge, die gleich der Summe der Einzellängen der beiden Koaxialkabel der Messapparatur ist. Empfohlen wird ein flexibles Koaxialkabel mit 1,20 mm Außendurchmesser.