

**DIN EN 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**

ICS 29.050

Einsprüche bis 2018-08-22

Vorgesehen als Ersatz für  
**DIN EN 61788-7**  
**(VDE 0390-7):2007-08**

**Entwurf**

**Supraleitfähigkeit –  
Teil 7: Charakteristische elektronische Messungen –  
Oberflächenwiderstand von Supraleitern bei Frequenzen im  
Mikrowellenbereich  
(IEC 90/396/CD:2017); Text Deutsch und Englisch**

Superconductivity –  
Part 7: Electronic characteristic measurements –  
Surface resistance of superconductors at microwave frequencies  
(IEC 90/396/CD:2017); Text in German and English

**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-06-22 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter [www.din.de/go/entwuerfe](http://www.din.de/go/entwuerfe) bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter [www.entwuerfe.normenbibliothek.de](http://www.entwuerfe.normenbibliothek.de), sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an [dke@vde.com](mailto:dke@vde.com) möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter [www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe](http://www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe) oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter [www.dke.de/stellungnahme](http://www.dke.de/stellungnahme) abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

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

Gesamtumfang 79 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

## Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ... .

| Inhalt                                                                                                                                | Seite |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Nationales Vorwort.....                                                                                                               | 4     |
| Einleitung .....                                                                                                                      | 6     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                                                                             | 7     |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                                                                        | 7     |
| 3 Begriffe .....                                                                                                                      | 7     |
| 4 Anforderungen .....                                                                                                                 | 7     |
| 5 Geräte.....                                                                                                                         | 8     |
| 5.1 Messsystem.....                                                                                                                   | 8     |
| 5.2 Messapparatur für $R_s$ .....                                                                                                     | 9     |
| 5.3 Dielektrische Zylinder .....                                                                                                      | 11    |
| 6 Durchführung der Messungen .....                                                                                                    | 12    |
| 6.1 Probenvorbereitung .....                                                                                                          | 12    |
| 6.2 Aufbau .....                                                                                                                      | 12    |
| 6.3 Messung des Referenzpegels .....                                                                                                  | 12    |
| 6.4 Messung der Frequenzantwort von Resonatoren .....                                                                                 | 13    |
| 6.5 Bestimmung des Oberflächenwiderstands des Supraleiters sowie $\varepsilon'$ und $\tan \delta$ der<br>Saphirstandardzylinder ..... | 15    |
| 7 Unsicherheit des Messverfahrens .....                                                                                               | 16    |
| 7.1 Oberflächenwiderstand.....                                                                                                        | 16    |
| 7.2 Temperatur .....                                                                                                                  | 17    |
| 7.3 Abstützung von Probe und Probenhalter .....                                                                                       | 17    |
| 7.4 Schutz der Probe .....                                                                                                            | 18    |
| 7.5 Unsicherheit des Oberflächenwiderstandes bei Messungen mit der üblichen<br>Zweiresonatoren-Methode.....                           | 18    |
| 8 Prüfbericht .....                                                                                                                   | 18    |
| 8.1 Identifizierung der Probe .....                                                                                                   | 18    |
| 8.2 Bericht über die $R_s$ -Werte .....                                                                                               | 18    |
| 8.3 Bericht über die Prüfbedingungen .....                                                                                            | 18    |
| Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 8 .....                                                      | 19    |
| Anhang B (informativ) Auswertung der relativen kombinierten Standardunsicherheit bei Messungen<br>des Oberflächenwiderstands .....    | 33    |
| Literaturhinweise.....                                                                                                                | 40    |
| <b>Bilder</b>                                                                                                                         |       |
| Bild 1 – Schema des Messsystems zur Bestimmung des Temperaturkoeffizienten von $R_s$ mit Hilfe<br>eines Kryocoolers .....             | 8     |
| Bild 2 – Typische Messapparatur für $R_s$ .....                                                                                       | 10    |

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 3 – Einfügedungsämpfung $IA$ , Resonanzfrequenz $f_0$ und Halbwertsbreite $\Delta f$ , gemessen bei<br>T Kelvin .....                                                                                         | 13 |
| Bild 4 – Reflexionsstreuparameter ( $S_{11}$ und $S_{22}$ ).....                                                                                                                                                   | 15 |
| Bild 5 – Definition der Begriffe in Tabelle 4 .....                                                                                                                                                                | 17 |
| Bild A.1 – Konfigurationen von mehreren Messverfahren zur Messung des Oberflächenwiderstands .....                                                                                                                 | 20 |
| Bild A.2 – Konfiguration eines Resonators mit einem dielektrischen Zylinder, der an beiden Enden<br>durch zwei parallele, auf dielektrischen Substraten deponierte supraleitende Filme<br>kurzgeschlossen ist..... | 22 |
| Bild A.3 – Berechneter Verlauf von $u^2$ und $W$ als Funktion von $v^2$ für den $TE_{01p}$ -Modus .....                                                                                                            | 23 |
| Bild A.4 – Konfiguration der dielektrischen Standardzylinder für die $R_s$ - und $\tan \delta$ -Messung .....                                                                                                      | 24 |
| Bild A.5 – Drei Typen von dielektrischen Resonatoren .....                                                                                                                                                         | 24 |
| Bild A.6 – Abweichung des Oberflächenwiderstands bei drei Messungen .....                                                                                                                                          | 26 |
| Bild A.7 – Modendiagramm zur Dimensionierung des $TE_{011}$ -Resonators, der an beiden Enden<br>durch parallele supraleitende Filme kurzgeschlossen ist [11] .....                                                 | 28 |
| Bild A.8 – Modendiagramm zur Dimensionierung des $TE_{013}$ -Resonators, der an beiden Enden<br>durch parallele supraleitende Filme kurzgeschlossen ist [11] .....                                                 | 29 |
| Bild A.9 – Modendiagramm des $TE_{011}$ -Resonators vom geschlossenen Typ .....                                                                                                                                    | 30 |
| Bild A.10 – Modendiagramm des $TE_{013}$ -Resonators vom geschlossenen Typ .....                                                                                                                                   | 31 |
| Bild B.1 – Konfiguration der dielektrischen Standardzylinder für die $R_s$ - und $\tan \delta$ -Messung .....                                                                                                      | 33 |
| Bild B.2 – Typische Frequenzcharakteristik der Resonanz der $TE_{011}$ -Mode.....                                                                                                                                  | 34 |
| Bild B.3 – Frequenzcharakteristik eines Resonators, angenähert mit einer Lorentzverteilung .....                                                                                                                   | 38 |
| <b>Tabellen</b>                                                                                                                                                                                                    |    |
| Tabelle 1 – Typische Maße eines Saphir-Standardzylinderpaares bei 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz.....                                                                                                                   | 11 |
| Tabelle 2 – Empfohlene Maße eines supraleitenden Films für 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz .....                                                                                                                         | 12 |
| Tabelle 3 – Spezifikationen für einen Vektornetzwerkanalysator.....                                                                                                                                                | 16 |
| Tabelle 4 – Spezifikationen für Saphirzylinder .....                                                                                                                                                               | 16 |
| Tabelle A.1 – Standardabweichung des Oberflächenwiderstands, berechnet aus den Ergebnissen<br>von Bild A.6 .....                                                                                                   | 27 |
| Tabelle A.2 – Das Verhältnis zwischen x und y .....                                                                                                                                                                | 28 |

## Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 90/396/CD:2017 „Superconductivity – Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of superconductors at microwave frequencies“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 90 „Superconductivity“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 184 „Supraleiter“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE ([www.dke.de](http://www.dke.de)) zuständig.

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

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

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

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

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

## Änderungen

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

- a) **Abschnitt 5** „Geräte“ wurde geändert;
- b) **Abschnitt 6** „Durchführung der Messungen“ wurde geändert;
- c) drei Messfrequenzen (12 GHz, 18 GHz und 22 GHz) sowie die Maße der Saphirzylinder wurden angepasst;
- d) der Anhang wurde ausführlicher gehalten, im Wesentlichen durch die Verlagerung des Abschnitts „Theorie und Gleichungen zur Berechnung“;
- e) Beispiele für technische Änderungen sind:
  - mit Hinsicht auf stabile Messungen werden Resonatoren vom geschlossenen Typ empfohlen;
  - zur Festlegung der Größe der Saphirzylinder ist eine uniaxial-anisotrope Charakteristik der Saphirzylinder berücksichtigt worden;
  - die empfohlenen Messfrequenzen 18 GHz und 22 GHz wurden zu den in **EN 61788-7:2002** beschriebenen 12 GHz hinzugefügt.

## Supraleitfähigkeit – Teil 7: Charakteristische elektronische Messungen – Oberflächenwiderstand von Supraleitern bei Frequenzen im Mikrowellenbereich

### Einleitung

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

Auf den Gebieten der Elektronik, besonders in der Telekommunikation, befinden sich passive Bauelemente, z. B. Filter mit oxidischen Supraleitern, in der Entwicklung und in der praktischen Erprobung ([1] und [2])<sup>1)</sup>.

Supraleitende Materialien für Mikrowellenresonatoren, -filter, -antennen und Verzögerungsleitungen haben den Vorteil der sehr niedrigen Verluste. Dieser Parameter ist von primärer Bedeutung für die Entwicklung neuer Materialien seitens der Hersteller und für die Konstruktion von Mikrowellenkomponenten seitens der Anwender. Die für die Konstruktion von verlustarmen Mikrowellenkomponenten erforderlichen Kenngrößen des supraleitenden Materials sind der Oberflächenwiderstand  $R_s$  und die Temperaturabhängigkeit des Oberflächenwiderstands.

Neue Fortschritte bei dünnen Hochtemperatursupraleiter-Filmen (HTS-Filmen) mit  $R_s$ -Werten, die mehrere Größenordnungen kleiner sind als bei normalleitenden Metallen, haben den Bedarf für ein zuverlässiges Charakterisierungsverfahren zur Messung dieser Eigenschaft verstärkt ([3] und [4]). Üblicherweise wurde der  $R_s$ -Wert von Nb oder irgendeinem anderen Tieftemperatursupraleiter so gemessen, dass zuerst ein kompletter dreidimensionaler Hohlraumresonator hergestellt und dann dessen Güte  $Q$  gemessen wurde. Der Wert von  $R_s$  konnte berechnet werden durch Lösung der Gleichungen für das elektromagnetische Feld 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 besten HTS-Proben sind Filme, die epitaktisch auf ebenen kristallinen Substraten gewachsen sind, und bisher sind keine Filme von hoher Qualität auf gekrümmten Oberflächen gezüchtet worden. Was benötigt wird, ist eine Technik, die mit diesen kleinen ebenen Proben arbeiten kann; die keine Probenvorbereitung erfordert; die den Film weder verletzt noch verändert; die in hohem Maße wiederholbar ist; die eine große Empfindlichkeit besitzt (bis hinab zu 1/1 000 des  $R_s$ -Werts von Cu); die einen großen Bereich umfasst (bis zu  $R_s$  von Cu); die eine hohe interne Leistung bei einer nur bescheidenen Eingangsleistung erreichen lässt; und die einen weiten Temperaturbereich abdeckt (4,2 K bis 150 K).

Unter mehreren Verfahren ([5], [6] und [7]) 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 von  $R_s$  von HTS-Materialien [8], [9].

Das Messverfahren, das in dieser Norm beschrieben wird, kann auch für andere plattenförmige (massive) Supraleiter, einschließlich Tieftemperatursupraleiter, angewendet werden.

Mit dieser Norm wird beabsichtigt, jenen Ingenieuren, die auf dem Gebiet der Elektronik und der Supraleitertechnik arbeiten, vorläufig eine geeignete und annehmbare Arbeitsgrundlage zu geben.

Das Messverfahren, das in dieser Norm beschrieben wird, basiert auf der vorbereitenden Arbeit von VAMAS (Versailles Project on advanced Materials and Standards) zu den Dünnschichtseigenschaften von Supraleitern.

---

<sup>1)</sup> Nummern in Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 61788 beschreibt ein Messverfahren für den Oberflächenwiderstand  $R_s$  eines Supraleiters bei Mikrowellenfrequenzen mit Hilfe des Zwei-Resonatoren-Verfahrens. Messgröße ist  $R_s$  und seine Temperaturabhängigkeit bei der Resonanzfrequenz.

Bei diesem Verfahren gelten die folgenden Messbereiche für die Oberflächenwiderstände:

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

Die Oberflächenwiderstandswerte sollten bei der Messfrequenz angegeben und auf  $10 \text{ GHz}$  bezogen werden, wobei zum Vergleich die Abhängigkeit entsprechend  $f^2$  angenommen wird.

## 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.

Im Allgemeinen ist die Oberflächenimpedanz  $Z_s$  für Leiter, einschließlich Supraleiter, definiert als das Verhältnis der Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke  $E_t$  zur Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke  $H_t$  an der Leiteroberfläche:

$$Z_s = E_t/H_t = R_s + jX_s$$

wobei  $R_s$  der Oberflächenwiderstand ist und  $X_s$  die Oberflächenreaktanz.

## 4 Anforderungen

Der Oberflächenwiderstand  $R_s$  eines supraleitenden Films muss gemessen werden, indem einem dielektrischen Resonator mit der Probe (supraleitende Filme) 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 Standardunsicherheit dieser Methode ist kleiner als 10 % im Temperaturbereich zwischen 20 K und 80 K.

Es liegt in der Verantwortung des Benutzers dieser Norm, einschlägige Sicherheits- und Gesundheitspraktiken zu berücksichtigen und festzusetzen und vor der Benutzung die Einhaltung vorgeschriebener Grenzen zu bestimmen.

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 Geräte

### 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.

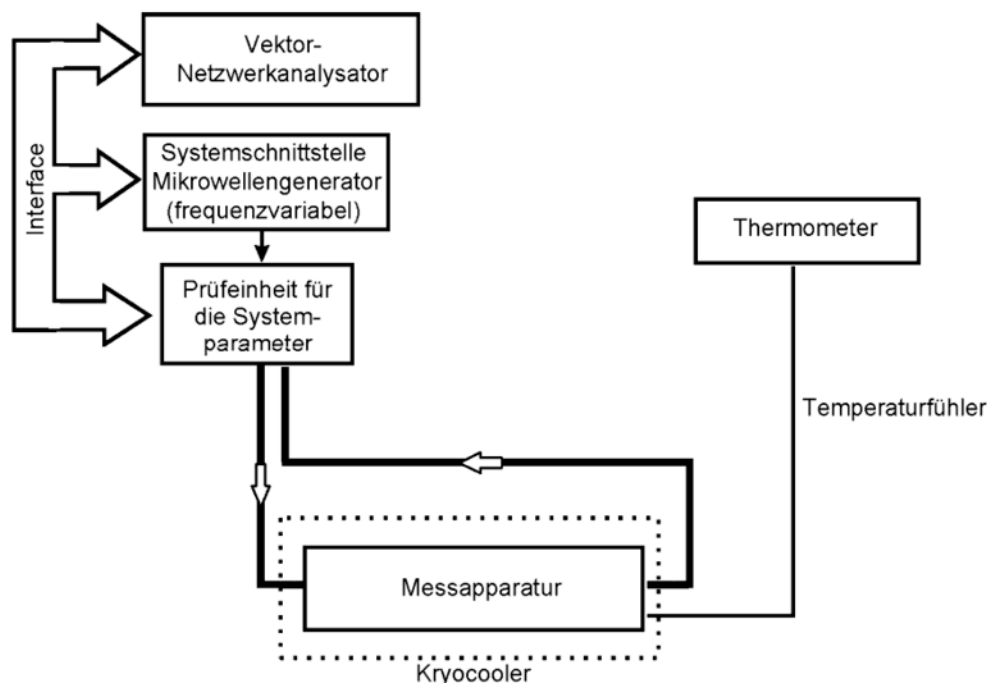


**Bild 1 – Schema des Messsystems zur Bestimmung des Temperaturkoeffizienten von  $R_s$  mit Hilfe eines Kryocoolers**

Die Messapparatur ist in einen temperaturgeregelten Kryocooler eingebaut.

Für die Messung von  $R_s$  an supraleitenden Filmen wird ein Vektornetzwerkanalysator empfohlen. Bedingt durch seinen weiten Dynamikbereich hat ein Vektornetzwerkanalysator im Vergleich zu einem skalaren Netzwerkanalysator einen Vorteil hinsichtlich der Messgenauigkeit.

## 5.2 Messapparatur für $R_s$

Bild 2 zeigt schematisch eine typische Messapparatur (Resonator vom geschlossenen Typ) zur Messung von  $R_s$  von supraleitenden Filmen, die auf einem Substrat mit ebener Oberfläche deponiert sind. Der obere supraleitende Film wird durch eine Feder, die aus Phosphorbronze besteht, nach unten gedrückt. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wird die Anwendung einer Blattfeder empfohlen. 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 sollen coaxial angeordnet werden, um den Messfehler zu minimieren.

Zwei flexible Kabel zur Messung der Transmissionseigenschaften des Resonators sollen an seinen beiden Seiten in axialsymmetrischer Position ( $\phi = 0$  und  $\pi$ , wobei  $\phi$  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 unerwünschte  $TM_{mn0}$ -Moden zu unterdrücken. Die Koppelschleifen müssen vor den Messungen sorgfältig auf Risse in den Punktschweißverbindungen untersucht werden, die während wiederholter thermischer Zyklen entstanden sein könnten. Die genannten Koaxialkabel können nach rechts und nach links verschoben werden, um die Einfügungsdämpfung ( $IA$ ) einzustellen. Bei dieser Einstellung muss die Kopplung unerwünschter Hohlraumresonatormoden mit dem interessierenden Modus des dielektrischen Resonators unterdrückt werden. Unerwünschte parasitäre Kopplungen mit anderen Moden reduzieren die hohe Güte des TE-Moden-Resonators. Um die parasitäre Kopplung zu verringern, ist besonders auf die Verwendung von Resonatoren mit hohem  $Q$  zu achten. Zwei andere Resonatortypen können zusammen mit dem des geschlossenen Typs verwendet werden. Sie werden in Abschnitt A.4 erläutert.

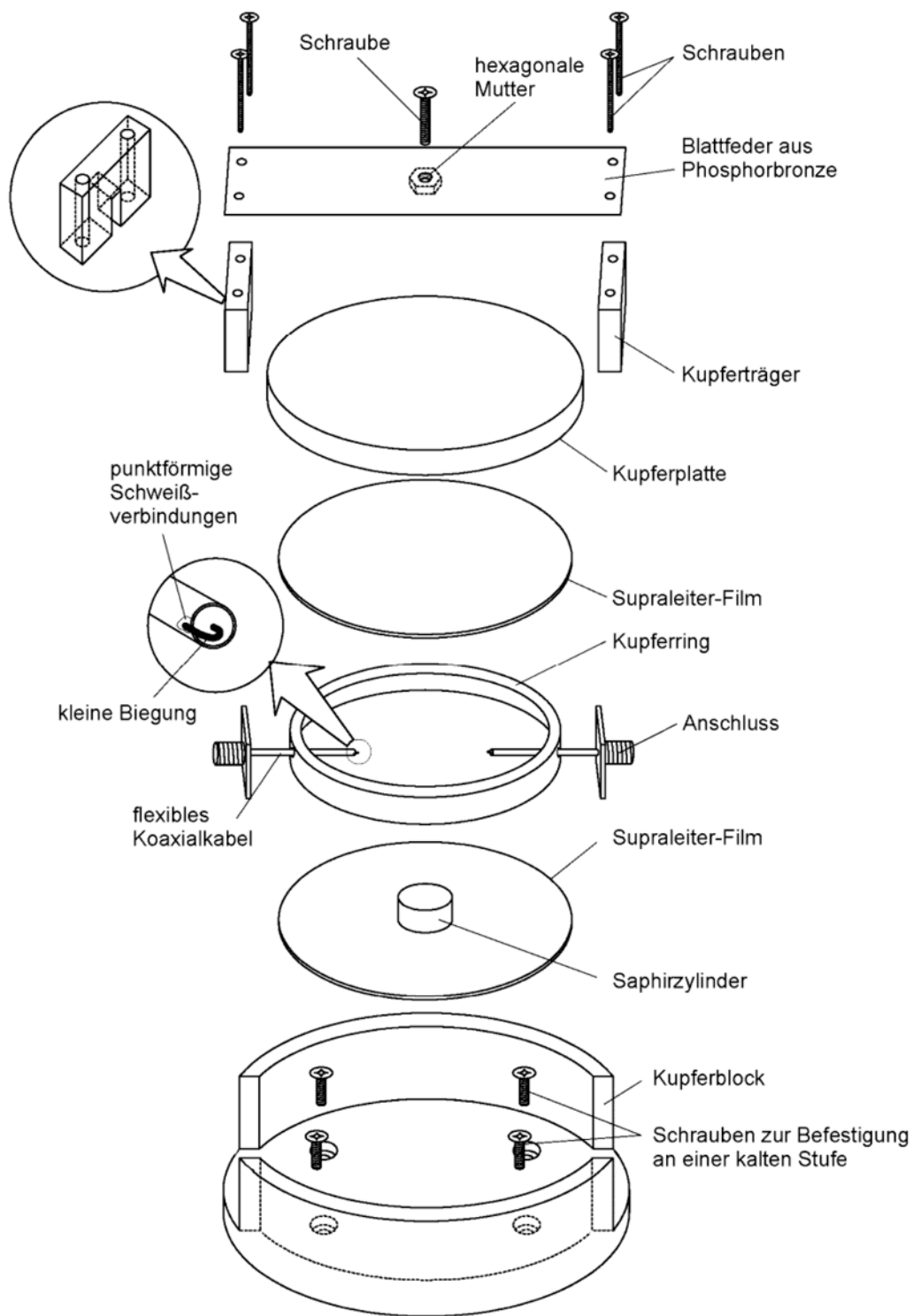


**Bild 2 – Typische Messapparatur für  $R_s$**

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.

Um den Messfehler zu minimieren, müssen zwei supraleitende Filme parallel zueinander eingesetzt werden. Um sicherzustellen, dass die beiden supraleitenden Filme in engem Kontakt, d. h. ohne Luftspalt, mit dem Saphirzylinder bleiben, sollen beide Oberflächen der Filme und die Enden des Zylinders sorgfältig gereinigt werden.

### 5.3 Dielektrische Zylinder

Benötigt werden zwei dielektrische Zylinder mit gleicher relativer Dielektrizitätszahl  $\epsilon'$  und gleichem Verlustfaktor  $\tan \delta$ , die am besten gemeinsam von einem dielektrischen Rundstab abgeschnitten werden. Zwei dieser Zylinder, dielektrische Standardzylinder, müssen den gleichen Durchmesser, aber unterschiedliche Längen haben: Der eine ist dreimal länger als der andere.

Vorzugsweise sollten dielektrische Standardzylinder mit niedrigem  $\tan \delta$  verwendet werden, um die geforderte Messgenauigkeit für  $R_s$  zu erzielen. Deshalb werden als Material für die dielektrischen Standardzylinder Saphirzylinder mit  $\tan \delta$  kleiner als  $10^{-6}$  bei 77 K empfohlen. Spezifikationen der Saphirzylinder werden in 7.1 beschrieben. Um den Messfehler des Oberflächenwiderstands  $R_s$  der supraleitenden Filme zu minimieren, müssen beide Endflächen der Saphirzylinder parallel zueinander und senkrecht zur Zylinderachse geschliffen und poliert werden. Spezifikationen der Saphirzylinder werden in Abschnitt 7 beschrieben.

Der Durchmesser und die Längen der Saphirstandardzylinder müssen so bemessen werden, dass keine Kopplung der Moden  $TE_{011}$  und  $TE_{013}$  mit anderen TM-, HE- und EH-Moden stattfindet, da die Kopplung zwischen TE-Moden und anderen Moden eine Erniedrigung der Leerlaufgüte verursacht. Eine Richtlinie zur Dimensionierung der Saphirstandardzylinder wird im Anhang, Abschnitt A.5, mitgeteilt. Tabelle 1 zeigt typische Beispiele für Abmessungen von Saphirstandardzylindern für Resonanzfrequenzen von 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz. Bei höheren Frequenzen wird die Leerlaufgüte  $Q$  geringer sein, was die Messung einfacher macht; gleichzeitig wird der Fehler geringer.

**Tabelle 1 – Typische Maße eines Saphir-Standardzylinderpaares bei 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz**

| Frequenz<br>GHz |                                          | Durchmesser | Länge     |
|-----------------|------------------------------------------|-------------|-----------|
|                 |                                          | $d$<br>mm   | $h$<br>mm |
| 12              | kurzer Zylinder ( $TE_{011}$ -Resonator) | 11,4        | 5,7       |
|                 | langer Zylinder ( $TE_{013}$ -Resonator) | 11,4        | 17,1      |
| 18              | kurzer Zylinder ( $TE_{011}$ -Resonator) | 7,6         | 3,8       |
|                 | langer Zylinder ( $TE_{013}$ -Resonator) | 7,6         | 11,4      |
| 22              | kurzer Zylinder ( $TE_{011}$ -Resonator) | 6,2         | 3,1       |
|                 | langer Zylinder ( $TE_{013}$ -Resonator) | 6,2         | 9,3       |

## 6 Durchführung der Messungen

### 6.1 Probenvorbereitung

Aufgrund einer Fehlerabschätzung muss der Durchmesser des Films ungefähr dreimal größer sein als der Durchmesser der Saphirzylinder. In dieser Konfiguration kann die durch Strahlungsverluste zwischen den Moden  $TE_{011}$  und  $TE_{013}$  bedingte Verringerung der Wiederholgenauigkeit von  $R_s$  als vernachlässigbar angenommen werden im Vergleich zu der angestrebten relativen kombinierten Standardunsicherheit von 10 %. Die Filmdicke muss etwa dreimal größer sein als die London-Eindringtiefe bei jeder Temperatur. Ist die Filmdicke viel geringer als die dreifache London-Eindringtiefe, so bedeutet das gemessene  $R_s$  den effektiven Oberflächenwiderstand.

Tabelle 2 zeigt die Abmessungen der supraleitenden Filme, die für die Saphirstandardzylinder bei 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz empfohlen werden.

**Tabelle 2 – Empfohlene Maße eines supraleitenden Films für 12 GHz, 18 GHz und 22 GHz**

| Dielektrischer Standardzylinder |             | Supraleitender Film |               |
|---------------------------------|-------------|---------------------|---------------|
| Frequenz                        | Durchmesser | Durchmesser         | Dicke         |
| GHz                             | $d$<br>mm   | $d'$<br>mm          | $\mu\text{m}$ |
| 12                              | 11,4        | > 35                | $\cong 0,5$   |
| 18                              | 7,6         | > 25                | $\cong 0,5$   |
| 22                              | 6,2         | > 20                | $\cong 0,5$   |

Falls Resonatoren vom geschlossenen Typ verwendet werden, müssen die Maße der supraleitenden Filme so gewählt werden, dass die Abmessung des Kupferzylinders zwischen den supraleitenden Filmen berücksichtigt wird. Eine Auslegungsrichtlinie für die Abmessung des Kupferzylinders eines Resonators vom geschlossenen Typ wird im Abschnitt A.6 beschrieben.

### 6.2 Aufbau

Die Messanordnung ist wie in Bild 1 gezeigt aufzubauen. Alle Teile der Messapparatur, die Saphirstandardzylinder und die supraleitenden Filme müssen in einem sauberen und trockenen Zustand gehalten werden, da hohe Feuchtigkeit die Leerlaufgüte  $Q$  herabsetzt. Die Probe und die Messapparatur werden in einem temperaturgeregelten Kryocooler montiert. Der Probenraum muss im Allgemeinen evakuiert werden. Die Temperatur der supraleitenden Filme und der Saphirstandardzylinder wird mit Hilfe eines Halbleitersensors oder eines Thermoelements gemessen. Die Temperaturen der oberen und der unteren supraleitenden Filme und der Saphirstandardzylinder müssen so gehalten werden, dass sie möglichst nahe beieinander liegen. Das kann erreicht werden, indem die Messapparatur mit Aluminiumfolie abgedeckt wird oder der Probenraum mit Heliumgas gefüllt wird.

### 6.3 Messung des Referenzpegels

Der Pegel der gesamten Durchgangsleistung (Referenzpegel) wird zuerst gemessen. Dazu ist die Ausgangsleistung des frequenzvariablen Generators auf einen Wert unterhalb von 10 mW einzustellen, da die Messgenauigkeit vom Pegel des Messsignals abhängt. Die Referenzleitung, bestehend aus einem flexiblen Koaxialkabel, ist mit dem Eingangsanschluss und dem Ausgangsanschluss zu verbinden. Dann ist der Pegel der Durchgangsleistung über den gesamten Frequenzmessbereich und Temperaturbereich zu messen. Der Referenzpegel kann sich um mehrere Dezibel ändern, wenn die Temperatur der Messapparatur bis zur tiefsten Messtemperatur abgesenkt wird. Deshalb muss die Temperaturabhängigkeit des Referenzpegels berücksichtigt werden.

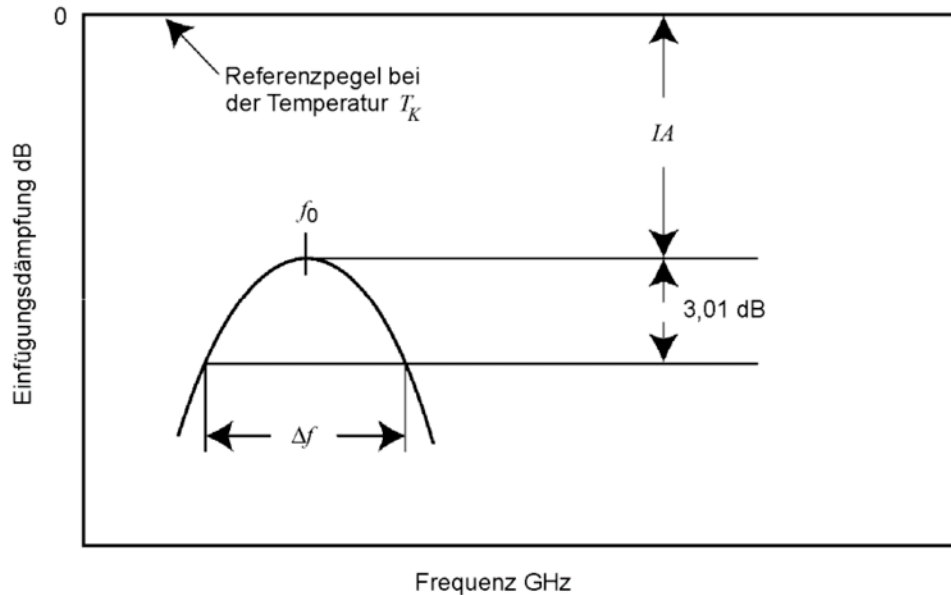


**Bild 3 – Einfügungsdämpfung  $IA$ , Resonanzfrequenz  $f_0$  und Halbwertsbreite  $\Delta f$ , gemessen bei  $T$  Kelvin**

#### 6.4 Messung der Frequenzantwort von Resonatoren

Die Temperaturabhängigkeit des Oberflächenwiderstands  $R_s$  kann durch Messungen der Resonanzfrequenz  $f_0$  und des Gütefaktors  $Q_u$  ohne Last für  $TE_{011}$ - und  $TE_{013}$ -Resonatoren bestimmt werden. Diese müssen wie im Folgenden beschrieben gemessen werden.

- Die Messapparatur wird mit dem Eingangsanschluss und dem Ausgangsanschluss verbunden (siehe Bild 1). Der kurze Saphirstandardzylinder wird nahe der Mitte des unteren supraleitenden Films eingesetzt, und zwischen dem dielektrischen Zylinder und jeder der Koppelschleifen der beiden flexiblen Koaxialkabel wird der gleiche Abstand eingestellt, so dass dieser Transmissionsresonator gleichermaßen an beide Schleifen unterkritisch angekoppelt werden kann. Der obere supraleitende Film wird vorsichtig auf die Stirnfläche des Zylinders gesetzt. Es ist darauf zu achten, dass die Oberflächen der supraleitenden Filme nicht durch übermäßigen Druck beschädigt werden. Der Probenraum wird evakuiert und bis unter die kritische Temperatur abgekühlt.
- Die Resonanzspitze des  $TE_{011}$ -Modus dieses Resonators wird bei einer Frequenz gesucht, die nahezu gleich dem festgelegten Wert von  $f_0$  ist.
- Der Frequenzhub wird auf dem Monitor so weit eingengt, dass auf ihm nur die Resonanzspitze des  $TE_{011}$ -Modus dargestellt wird (siehe Bild 3). Es ist sicherzustellen, dass die Einfügungsdämpfung  $IA$  bei dieser Mode 20 dB vom Referenzpegel entfernt liegt, der stark von der Temperatur abhängt.
- Die Temperaturabhängigkeit der Frequenz  $f_0$  und der Halbwertsbreite  $\Delta f$  wird gemessen. Die belastete Güte des  $TE_{011}$ -Resonators,  $Q_L$ , ist gegeben durch.

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (1)$$

- e) Die Leerlaufgüte  $Q_u$  muss aus  $Q_L$  durch mindestens eines der beiden unten beschriebenen Verfahren extrahiert werden.

Ein Verfahren zur Extraktion der Leerlaufgüte  $Q_u$  beinhaltet die Messung der Einfügungsdämpfung  $IA$ .  $Q_u$  ist gegeben durch

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - A_t}, \quad A_t = 10^{-IA[\text{dB}]/20} \quad (2)$$

Die oben erwähnte Technik zur Auswertung der Leerlaufgüte setzt voraus, dass die Kopplung an beiden Seiten des Resonators gleich ist. Die Koppelschleifen sind schwierig herzustellen, die Justierung der Schleifen ist schwer zu kontrollieren und irgendeine Bewegung des Saphirzylinders bei der Messung ist nicht zu erkennen. Diese vom Aufbau abhängigen Effekte sind außerdem temperaturabhängig. Die potentielle Asymmetrie der Kopplung kann zu großen Fehlern bei der Berechnung des Koppelfaktors führen, wenn eine starke Kopplung vorliegt ( $IA < \sim 10$  dB). Wenn die Kopplung schwach genug ist ( $IA > 20$  dB), verliert die Asymmetrie der Kopplung an Bedeutung.

Ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Leerlaufgüte  $Q$  beruht auf der Messung der Reflexionsstreuparameter bei der Resonanzfrequenz an beiden Seiten des Resonators.

$$Q_u = Q_L (1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (3)$$

$$\beta_1 = \frac{1 - |S_{11}|}{|S_{11}| + |S_{22}|} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{1 - |S_{22}|}{|S_{11}| + |S_{22}|} \quad (5)$$

In den vorstehenden Gleichungen sind  $S_{11}$  und  $S_{22}$  die Reflexionsstreuparameter, wie in [Bild 4](#) dargestellt. Sie werden in linearen Leistungseinheiten, nicht relativ in dB, gemessen.  $\beta_1$  und  $\beta_2$  sind die Koppelfaktoren.

Das Verfahren unter Verwendung der Reflexionsstreuparameter hat zwei Vorteile: Es benötigt nicht den zusätzlichen Schritt der Referenzpegel-Kalibrierung und erlaubt die Messung der Kopplungswerte für beide Seiten des Resonators. Dies hat jedoch auch zwei Nachteile: Das Verfahren arbeitet nur im engen Resonanzbereich (wie es hier glücklicherweise der Fall ist) und wird begrenzt durch den Dynamikbereich des Netzwerkanalysators bei der Messung der Reflexionskoeffizienten.

Eine Kombination beider Verfahren ermöglicht eine ausgezeichnete wechselseitige Prüfung.

- f) Die am kurzen Zylinder gemessenen Parameter  $f_0$  und  $Q_u$  werden als  $f_{01}$  und  $Q_{u1}$  bezeichnet. Während langsam die Temperatur des Kryokühlers geändert wird, soll die Temperaturabhängigkeit von  $f_{01}$  und  $Q_{u1}$  gemessen werden.
- g) Nachdem die Messung der Temperaturabhängigkeit von  $f_{01}$  und  $Q_{u1}$  abgeschlossen ist, muss die Messapparatur auf Raumtemperatur erwärmt werden.
- h) Dann ist bei Raumtemperatur der  $TE_{011}$ -Resonator in der Messapparatur zu ersetzen durch den  $TE_{013}$ -Resonator, anschließend ist die Apparatur auf eine Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur abzukühlen und die Temperaturabhängigkeit von  $f_0$  und  $Q_u$  im  $TE_{013}$ -Modus des Resonators zu messen, bezeichnet als  $f_{03}$  und  $Q_{u3}$ , in ähnlicher Weise wie im Fall des  $TE_{011}$ -Resonators. Wenn der Saphirzylinder des  $TE_{013}$ -Resonators genau dreimal so lang ist wie der des  $TE_{011}$ -Resonators, muss die Frequenz  $f_{03}$  des  $TE_{013}$ -Resonators mit der Frequenz  $f_{01}$  des  $TE_{011}$ -Resonators übereinstimmen. Bei einer sorgfältigen Auslegung ist der Unterschied zwischen  $f_{01}$  und  $f_{03}$  üblicherweise sehr klein ( $< \sim 0,25$  %). In den Berechnungen von [6.5](#) kann  $f_0 = f_{01} = f_{03}$  gesetzt werden.

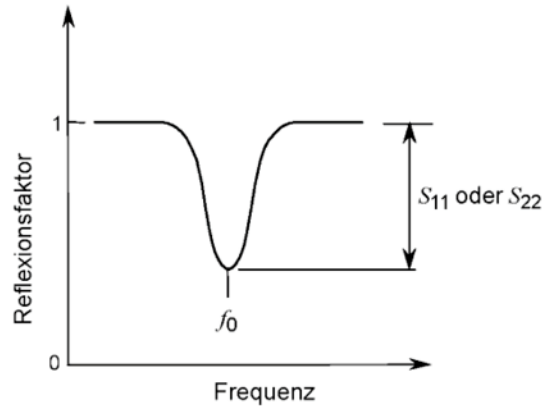


Bild 4 – Reflexionsstreuparameter ( $S_{11}$  und  $S_{22}$ )

### 6.5 Bestimmung des Oberflächenwiderstands des Supraleiters sowie $\varepsilon'$ und $\tan \delta$ der Saphirstandardzylinder

Die Temperaturabhängigkeit des Oberflächenwiderstands  $R_s$  sowie  $\varepsilon'$  und  $\tan \delta$  der Saphirstandardzylinder lassen sich unter Verwendung der Temperaturabhängigkeit von  $f_{01}$ ,  $Q_{u1}$ ,  $f_{03}$  und  $Q_{u3}$  aus den Gleichungen (6), (7) und (8) berechnen.

$$R_s = \frac{30\pi^2 \times 3}{(3-1)} \left( \frac{2h_0}{\lambda_0} \right)^3 \frac{\varepsilon' + W}{1+W} \left( \frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{u3}} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon' = \left( \frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (7)$$

$$\tan \delta = \frac{1 + \frac{W}{\varepsilon'}}{(3-1)} \left( \frac{3}{Q_{u3}} - \frac{1}{Q_{u1}} \right) \quad (8)$$

wobei

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (9)$$

$$W = \frac{J_1^2(u)}{K_1^2(v)} \frac{K_0(v)K_2(v) - K_1^2(v)}{J_1^2(u) - J_0(u)J_2(u)} \quad (10)$$

$$v^2 = \left( \frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[ \left( \frac{\lambda_0}{2h_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (11)$$

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (12)$$

In den Gleichungen ist  $\lambda_0$  die Resonanzwellenlänge des freien Hohlraums,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c = 2,997\,9 \times 10^8$  m/s) und  $h_0$  die Höhe des kurzen dielektrischen Standardzylinders. Der Wert  $u^2$  ist gegeben durch die transzendente Gleichung (12) mit Benutzung des Wertes von  $v^2$ , wobei  $J_n(u)$  die Bessel-Funktion erster Art ist und  $K_n(v)$  die Bessel-Funktion zweiter Art ist. Die Ableitungen der Gleichungen werden im Abschnitt A.3 beschrieben.

Generell muss der thermische Ausdehnungskoeffizient der Zylinder bekannt sein, um die Temperaturabhängigkeit ihrer Größen bestimmen zu können. Er kann jedoch bei der angestrebten relativen Standardunsicherheit von  $R_s$  (10 %) vernachlässigt werden.

Es sei angemerkt, dass das gemessene  $R_s$  dann den effektiven Oberflächenwiderstand bedeutet, wenn die Filmdicke nicht viel größer als die temperaturabhängige Eindringtiefe ist.

## 7 Unsicherheit des Messverfahrens

### 7.1 Oberflächenwiderstand

Der Oberflächenwiderstand muss aus dem Wert von  $Q$  bestimmt werden, der an einem dielektrischen Resonator gemessen wird.

Zur Aufzeichnung der Frequenzabhängigkeit der Einfügungsdämpfung muss ein Vektornetzwerkanalysator angewendet werden, wie in Tabelle 3 spezifiziert. Das Ergebnis der Aufzeichnung muss die Bestimmung von  $Q$  mit einer Unsicherheit von  $10^{-2}$  ermöglichen.

**Tabelle 3 – Spezifikationen für einen Vektornetzwerkanalysator**

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| Dynamikbereich von $S_{21}$ | über 60 dB   |
| Frequenzauflösung           | unter 1 Hz   |
| Auflösung der Leistung      | unter 0,1 dB |
| Eingangsleistungsbegrenzung | unter 10 dBm |

Die dielektrischen Resonatoren müssen mit zwei dielektrischen Zylindern ausgestattet werden, die einen kleinen Verlustfaktor  $\tan \delta$  von weniger als  $2 \times 10^{-7}$  bei 77 K haben und deren Radius kleiner ist als 1/3 des Radius der supraleitenden Probe. Am besten eignen sich Saphirzylinder, wie in Tabelle 4 spezifiziert. Begriffsdefinitionen in Tabelle 4 werden in Bild 5 gezeigt.

**Tabelle 4 – Spezifikationen für Saphirzylinder**

|                    |                                                                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Durchmesser        | $\pm 0,05$ mm                                                                                                                           |
| Länge              | $\pm 0,05$ mm                                                                                                                           |
| Flächenneigung     | unter 0,005 mm                                                                                                                          |
| Oberflächenrauheit | obere und untere Stirnfläche: unter 10 nm (quadratischer Mittelwert)<br>Zylindermantelfläche: unter 0,001 mm (quadratischer Mittelwert) |
| Vertikalabweichung | innerhalb von $0,1^\circ$                                                                                                               |
| Achse              | parallel zur c-Achse innerhalb von $0,3^\circ$                                                                                          |

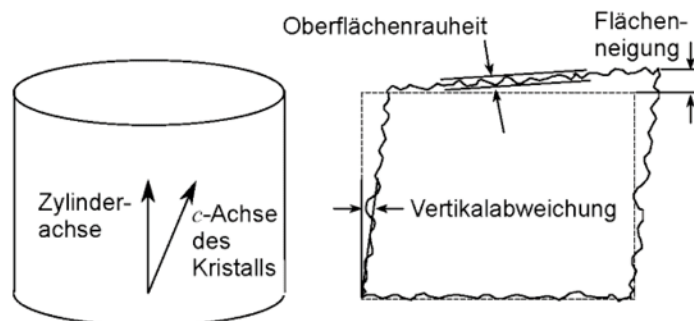


**Bild 5 – Definition der Begriffe in Tabelle 4**

Die vorstehend beschriebene Messtechnik geht davon aus, dass Saphirzylinder mit einfacher und dreifacher Länge mit dem gleichen  $\tan \delta$  hergestellt werden können. Jedoch kann der  $\tan \delta$  zwischen zwei nominell gleichen Zylindern, die gemeinsam von einem Rundstab abgeschnitten und mit der gleichen Technik poliert worden sind, um bis zu zwei Größenordnungen variieren. Derzeit liegt die geringste Abweichung von  $\tan \delta$ -Werten zwischen nominell identischen Zylindern bei einem Faktor 4 [9]. Die Messung des  $\tan \delta$  weist eine große Unsicherheit auf. Die  $\tan \delta$ -Variation bei derzeitigen Zylindern verursacht eine zusätzliche Unsicherheit in der Messung des Oberflächenwiderstands von mindestens 10 %. Dies begrenzt die Wiederholgenauigkeit der Messungen auf 5 %. Wenn die Reproduzierbarkeit der Saphirzylinder verbessert wird oder wenn ein Auswahlverfahren für die Saphirstandardzylinder eingeführt wird, kann eine bessere Wiederholgenauigkeit erreicht werden.

## 7.2 Temperatur

Durch ein geeignetes Kühlverfahren wird die Messapparatur auf die spezifizierte Temperatur während der Messung abgekühlt. Zur Auswahl gibt es das Verfahren, bei dem die Apparatur in eine kryogene Flüssigkeit getaucht wird. Dies ist eine schnelle, einfache Technik, die eine bekannte, stabile Temperatur liefert. Leider werden aber die meisten HTS-Materialien durch kondensierende Feuchtigkeit zerstört, wenn die Probe aus dem Kältebad herausgenommen wird. Da außerdem Messunsicherheiten durch Nebelbildung im Resonator entstehen und  $R_s$  nicht als Funktion der Temperatur gemessen werden kann, ist der Einsatz von anderen Kühlverfahren zu unterstützen. Die genannten Nachteile können umgangen werden, indem ein Vakuumbehälter in die kryogene Flüssigkeit getaucht wird. Wenn dann der Vakuumbehälter mit Gas gefüllt wird, treten eine rasche Abkühlung und eine gleichmäßige Temperaturverteilung ein. Sind an der Apparatur Heizelemente angebracht, so kann die Temperaturabhängigkeit von  $R_s$  des HTS-Materials gemessen werden. Eine dritte, ebenso gute Wahl ist die Anwendung eines Kryocoolers. Der Resonator befindet sich in diesem Fall unter Vakuum und wird durch Wärmeleitung über eine metallische Brücke gekühlt. Es muss darauf geachtet werden, dass Temperaturgradienten innerhalb der Apparatur vermieden werden.

Zur Messung von  $R_s$  muss ein Kryostat mit dem notwendigen Zubehör vorgesehen werden, und die Probe muss im stabilen, isothermen Zustand gemessen werden. Bei der Probentemperatur wird angenommen, dass sie gleich der Temperatur des Probenhalters ist. Die Probenhaltertemperatur, gemessen mit Hilfe eines geeigneten Temperatursensors, muss auf  $\pm 0,5$  K angegeben werden.

Die Differenz zwischen der Probentemperatur und der Probenhaltertemperatur muss minimiert werden, indem Schirme mit guter Wärmeleitfähigkeit angebracht werden.

## 7.3 Abstützung von Probe und Probenhalter

Die Stützkonstruktion muss für eine angemessene Abstützung der Probe sorgen. Es ist unbedingt notwendig, dass die zwei supraleitenden Filme während der gesamten Messung parallel und mechanisch stabil bleiben, insbesondere in einem Kryocooler und über einen weiten Temperaturbereich.

## 7.4 Schutz der Probe

Kondensation von Feuchtigkeit und Kratzer auf den Filmen beeinträchtigen Supraleitereigenschaften. Daher sollten Schutzmaßnahmen für die Proben vorgesehen werden. Beschichtungen mit Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Polymethylmethacrylat (PMMA) beeinflussen die Messungen nicht, so dass sie als Schutz angewendet werden können. Für die Beschichtung wird eine Materialdicke im Bereich unterhalb weniger Mikrometer empfohlen.

## 7.5 Unsicherheit des Oberflächenwiderstandes bei Messungen mit der üblichen Zweiresonatoren-Methode

Bei der Messmethode mit dielektrischen Resonatoren wird angenommen, dass die Werte von  $\tan \delta$  der  $TE_{011}$ - und  $TE_{013}$ -Moden der Saphirzylinder identisch sind. Falls die  $\tan \delta$ -Werte der beiden Saphirzylinder sich unterscheiden, lässt sich der Oberflächenwiderstand nicht aus (6) berechnen. Das Ausmaß einer Abweichung von  $\tan \delta$  auf den Oberflächenwiderstand wurde überprüft (siehe [Anhang B](#)). Die Unsicherheit des Oberflächenwiderstandes eines Supraleiters im Mikrowellenbereich, gemessen mit der Methode der dielektrischen Resonatoren, hängt ab von der Größe, der Dielektrizitätskonstanten, dem Wert von  $\tan \delta$  des Saphirzylinders, und der Unsicherheit der gemessenen Resonatorgüte. Die relative kombinierte Standardunsicherheit ist kleiner als 10 % (siehe [Anhang B](#)).

# 8 Prüfbericht

## 8.1 Identifizierung der Probe

Die Probe muss, falls möglich, wie folgt identifiziert werden:

- Name des Herstellers der Probe;
- Klassifikation und/oder Symbol;
- Nummer der Charge;
- chemische Zusammensetzung des Dünnsfilms und des Substrats;
- Dicke und Rauheit des Dünnsfilms;
- Technik des Herstellungsprozesses.

## 8.2 Bericht über die $R_s$ -Werte

Die  $R_s$ -Werte, zusammen mit den entsprechenden Werten von  $f_{01}$ ,  $f_{03}$ ,  $Q_{u1}$ ,  $Q_{u3}$ ,  $IA$  und/oder  $(\beta_1, \beta_2)$ ,  $\epsilon'$  und  $\tan \delta$ , und ihre Temperaturabhängigkeit müssen mitgeteilt werden.

## 8.3 Bericht über die Prüfbedingungen

Die folgenden Prüfbedingungen müssen mitgeteilt werden:

- Prüffrequenz und Frequenzauflösung;
- maximale Hochfrequenzprüfleistung;
- Prüftemperatur und Genauigkeit der Temperatur und Temperaturdifferenz in zwei Platten;
- Vorgeschichte der Probe mit Temperaturänderungen.

## Anhang A (informativ)

### Zusätzliche Informationen zu den Abschnitten 1 bis 8

#### A.1 Anwendungsbereich

Die Aufstellung des genormten Messverfahrens wird verlangt, um die Qualität von Filmen aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) zu bewerten, deren Oberflächenwiderstände  $R_s$  niedrige Werte aufweisen, z. B. 0,1 mΩ bei 10 GHz. Mehrere Resonanz-Messverfahren, wie in Bild A.1 dargestellt, sind bisher vorgeschlagen worden, um sie im Mikrowellenbereich und Millimeterwellenbereich zu messen. Diese Resonatorstrukturen gruppieren sich in die folgenden sechs Typen.

##### A.1.1 Verfahren mit einem zylindrischen Hohlraum [1]<sup>2)</sup>

Bild A.1 a) zeigt eine Hohlraumstruktur, welche den  $TR_{011}$ -Modus ausnutzt und aus einem Kupferzylinder und zwei HTS-Filmen hergestellt wird. Im Mikrowellenbereich unter 30 GHz ist die Genauigkeit der  $R_s$ -Messung mit diesem Verfahren ziemlich niedrig, weil der  $R_s$ -Wert des Kupferzylinders 100-mal größer ist als der von HTS-Filmen. Dieses Verfahren eignet sich im Millimeterwellengebiet, weil die  $R_s$ -Werte von HTS-Filmen mit  $f^2$  und von Kupfer mit  $f^{1/2}$  ansteigen.

##### A.1.2 Verfahren mit einem Parallelplatten-Resonator [2]

Bild A.1 b) zeigt eine Struktur eines Parallelplatten-Resonators, der den  $TM_{nm0}$ -Modus ausnutzt und aufgebaut wird, indem ein dielektrischer Abstandshalter mit niedrigen Verlusten zwischen zwei rechteckige HTS-Filme gesetzt wird. Dieses Verfahren ermöglicht die Messung von extrem niedrigen  $R_s$ -Werten. Aber hinsichtlich der absoluten Bestimmung von  $R_s$  gibt es einige Probleme, z. B. niedrige Messgenauigkeit für die Dicke und für  $\tan \delta$  des dielektrischen Abstandshalters, unsichere Abschätzung der Strahlungsverluste sowie ein Luftspalteffekt zwischen den Platten und dem Abstandshalter, und die Anregungstechnik der Resonanzmoden ist kritisch.

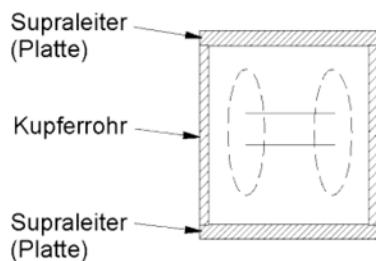
##### A.1.3 Verfahren mit Resonanz einer Mikrostripleitung [1], [3]

Bild A.1 c) zeigt die Struktur eines Resonators mit Mikrostripleitung, der den  $TEM_n$ -Modus ausnutzt, mit Maskentechnik hergestellt wird und den realen passiven Mikrowellen-Bauelementen nahe kommt. Jedoch ist dieses Verfahren nicht zur Charakterisierung von HTS-Filmen geeignet, da es unbestimmte Einflüsse der Maskentechnologie enthält.

##### A.1.4 Verfahren mit einem dielektrischen Resonator [4], [5] bis [7]

Bild A.1 d) zeigt die Struktur eines dielektrischen Resonators, der den  $TE_{011}$ -Modus ausnutzt, wobei ein verlustarmer Saphirzylinder zwischen zwei parallele HTS-Filme gesetzt wird. Für den  $TE_{0mp}$ -Modus können die Luftspalteffekte eliminiert werden, weil die Normalkomponente des elektrischen Felds auf den HTS-Filmen nicht existiert. Mit diesem Verfahren sind die  $R_s$ -Werte von HTS-Filmen gemessen worden, wobei der Effekt des  $\tan \delta$  aufgrund der Annahme, dass für Saphirreinkristalle  $\tan \delta < 1 \times 10^{-8}$  ist, nicht berücksichtigt wurde [4]. Jedoch liegen die  $\tan \delta$ -Werte, die für Saphir bei 10 GHz und in der Nähe von 50 K gemessen worden sind, bekanntlich im Bereich von  $10^{-6}$  bis  $10^{-8}$  entsprechend der Anzahl der Gitterdefekte. Deshalb ist die Herstellung von extrem verlustarmen Saphirzylindern mit  $\tan \delta < 1 \times 10^{-8}$  für dieses Verfahren unbedingt erforderlich.

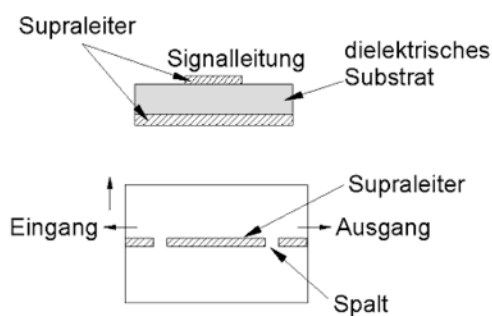
<sup>2)</sup> Nummern in Klammern dieses Anhangs beziehen sich auf die Literaturhinweise in Abschnitt A.9.



**a) Verfahren mit zylindrischem Hohlraumresonator**



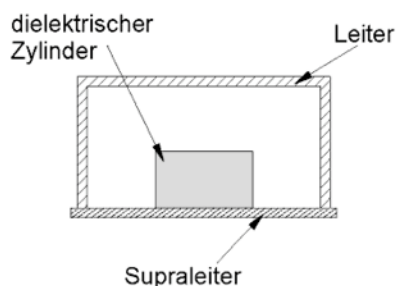
**b) Verfahren mit Parallelplatten-Resonator**



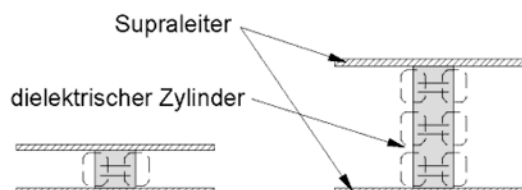
**c) Verfahren mit Mikrostrip-Resonator**



**d) Verfahren mit dielektrischem Resonator**



**e) Verfahren mit dielektrischem Bildeffekt-Resonator**



**f) Zwei-Resonatoren-Verfahren**

— — — — — Elektrisches Feld  
 - - - - - Magnetisches Feld

**Bild A.1 – Konfigurationen von mehreren Messverfahren zur Messung des Oberflächenwiderstands**

### A.1.5 Verfahren mit einem dielektrischen Bildeffekt-Resonator [8]

Bild A.1 e) zeigt eine Struktur eines dielektrischen Bildeffekt-Resonators, der den  $TE_{01\delta}$ -Modus ausnutzt. Diese Anordnung erlaubt die Messung von nur einem HTS-Film. Jedoch ist die Herstellung eines extrem verlustarmen Saphirzylinders auch für dieses Verfahren unbedingt erforderlich, weil  $R_s$  gemessen wird, ohne dass der Effekt von  $\tan \delta$  berücksichtigt wird.

Zusätzlich sind komplizierte, zeitaufwendige numerische Rechnungen erforderlich, um die  $R_s$ -Werte aus der gemessenen Resonanzfrequenz und der Leerlaufgüte zu bestimmen.

### A.1.6 Verfahren mit zwei Resonatoren [9], [10]

Bei diesem Verfahren werden zwei Saphirzylinder-Resonatoren mit gleichen  $\tan \delta$ -Werten verwendet; der eine ist ein Resonator für den  $TE_{011}$ -Modus, der andere ein Resonator für den  $TE_{013}$ -Modus, wie in Bild A.1 f) gezeigt. Ähnlich wie bei dem Verfahren mit einem dielektrischen Resonator kann bei diesem Verfahren der Luftspalteffekt eliminiert werden. Der  $\tan \delta$ -Wert der Saphirzylinder und der  $R_s$ -Wert der HTS-Filme lassen sich getrennt aus den Resonanzfrequenzen und den Leerlaufgüten, die für diese Resonatoren gemessen werden, bestimmen, indem einfache Gleichungen benutzt werden, die streng analytisch auf der Basis der Moden-Anpassungsmethode abgeleitet sind. So kann dieses Verfahren die Mehrdeutigkeit des  $\tan \delta$ , die Einfluss auf die  $R_s$ -Messungen hat, beseitigen. Tatsächlich haben die Ergebnisse von  $R_s$ -Werten, die an sechs YBCO-Filmen mit  $R_s = 0,1 \text{ m}\Omega$  bei 12 GHz gemessen wurden, bewiesen, dass die Messgenauigkeit von 10 % mit diesem Verfahren realisiert wird. Wenn jedoch eine Differenz zwischen den beiden  $\tan \delta$ -Werten ( $\Delta \tan \delta$ ) auftritt, müssen die Fehler von  $R_s$ , bedingt durch  $\Delta \tan \delta$ , rechnerisch berücksichtigt werden. Dieser Effekt wird bestimmt nach den Ergebnissen von Vergleichsmessungen in verschiedenen Laboratorien (round robin tests), die an denselben HTS-Filmen mit diesem Verfahren durchgeführt worden sind.

Die Vergleiche der oben beschriebenen sechs Messverfahren ergeben, dass das Zwei-Resonatoren-Messverfahren als Standard-Messverfahren für  $R_s$  von HTS-Filmen wegen zweier Vorteile empfohlen wird:

- die absolute Messung von  $R_s$  ist möglich;
- die numerische Behandlung ist einfach und leicht durchführbar.

## A.2 Anforderungen

Zur Messung von niedrigeren  $R_s$ -Werten sind höhere Messfrequenzen wünschenswert, weil  $R_s$  von supraleitenden Filmen mit der Frequenz entsprechend dem  $f^2$ -Gesetz zunimmt. Die Größe des Resonators kann bei Anwendung höherer Messfrequenzen reduziert werden. Jedoch wird der Aufbau eines Mikrowellen-Messsystems umso schwieriger, je höher die Frequenz ist.

Für Messungen unterhalb von 10 K oder oberhalb von 80 K ist diese Methode hinreichend anwendbar, jedoch könnten neue Kühltechniken erforderlich sein.

## A.3 Theorie und Gleichungen zur Berechnung

Bild A.2 zeigt die Konfiguration des  $TE_{0mp}$ -Modus-Resonators, die angewendet wird, um die Luftspalteffekte zu eliminieren. Ein dielektrischer Zylinder mit Durchmesser  $d$  und Höhe  $h$  ist an beiden Endflächen kurzgeschlossen durch zwei parallele supraleitende Filme, die auf dielektrischen Substraten mit dem Durchmesser  $d'$  abgeschieden wurden, so dass die Anordnung einen Resonator darstellt. Es ist erforderlich, dass diese supraleitenden Filme den gleichen Wert von  $R_s$  haben. Der Wert von  $R_s$  wird aus der gemessenen Resonanzfrequenz  $f_0$  und aus der Leerlaufgüte  $Q_u$  für den  $TE_{0mp}$ -Resonanzmodus berechnet. Wenn die beiden supraleitenden Filme unterschiedliche Werte von  $R_s$  haben, entspricht der gemessene  $R_s$ -Wert dem Mittelwert für diese beiden Filme.

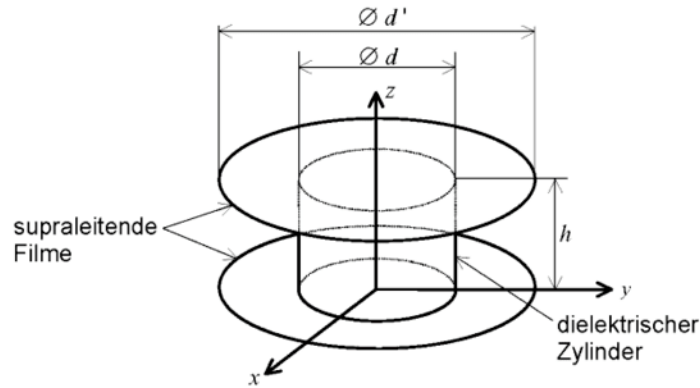


**Bild A.2 – Konfiguration eines Resonators mit einem dielektrischen Zylinder, der an beiden Enden durch zwei parallele, auf dielektrischen Substraten deponierte supraleitende Filme kurzgeschlossen ist**

Der Wert von  $R_s$  ist gegeben durch

$$R_s = \frac{1}{B} \left( \frac{A}{Q_u} - \tan \delta \right) \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

$$A = 1 + \frac{W}{\epsilon'} \quad (\text{A.2})$$

$$B = p^2 \left( \frac{\lambda_0}{2h} \right)^3 \frac{1+W}{30\pi^2 \epsilon'}, \quad p = 1, 2, \dots \quad (\text{A.3})$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (\text{A.4})$$

$$W = \frac{J_1^2(u) K_0(v) K_2(v) - K_1^2(v)}{K_1^2(v) J_1^2(u) - J_0(u) J_2(u)} \quad (\text{A.5})$$

$$v^2 = \left( \frac{\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[ \left( \frac{p \lambda_0}{2h} \right)^2 - 1 \right] \quad (\text{A.6})$$

$$u \frac{J_0(u)}{J_1(u)} = -v \frac{K_0(v)}{K_1(v)} \quad (\text{A.7})$$

In den Gleichungen (A.1) und (A.2) ist  $\epsilon'$  die relative Permittivität (Dielektrizitätszahl) und  $\tan \delta$  der Verlustfaktor des dielektrischen Zylinders. In den Gleichungen (A.3) und (A.4) ist  $\lambda_0$  die Resonanzwellenlänge des freien Hohlraums und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c = 2,997\,9 \times 10^8$  m/s). Die Funktion  $W / \epsilon'$  ist gleich dem Verhältnis der im Außenraum zu der im Innenraum des dielektrischen Stabs gespeicherten elektrischen Feldenergie. Wenn das gesamte elektrische Feld im Innern des dielektrischen Zylinders konzentriert ist, wird  $W$  gleich null.

Der Wert  $u^2$  ist gegeben durch die transzendente Gleichung (A.7) mit Benutzung des Wertes von  $v^2$ , wobei  $J_n(u)$  die Bessel-Funktion erster Art ist und  $K_n(v)$  die modifizierte Bessel-Funktion zweiter Art ist. Für jeden Wert von  $v$  existiert die  $m$ -te Lösung zwischen  $u_{0m}$  und  $u_{1m}$ , wobei  $J_0(u_{0m}) = 0$  und  $J_1(u_{1m}) = 0$  sind. Die erste Lösung, ( $m = 1$ ), die zur leichten Modenidentifizierung benutzt wird, ist in Bild A.3 durch die Kurve (A) dargestellt. Das Ergebnis der Berechnung von  $W$  als Funktion von  $v$  für  $m = 1$  in dem  $TE_{0mp}$ -Resonanzmodus ist in Bild A.3 durch die Kurve (B) dargestellt.

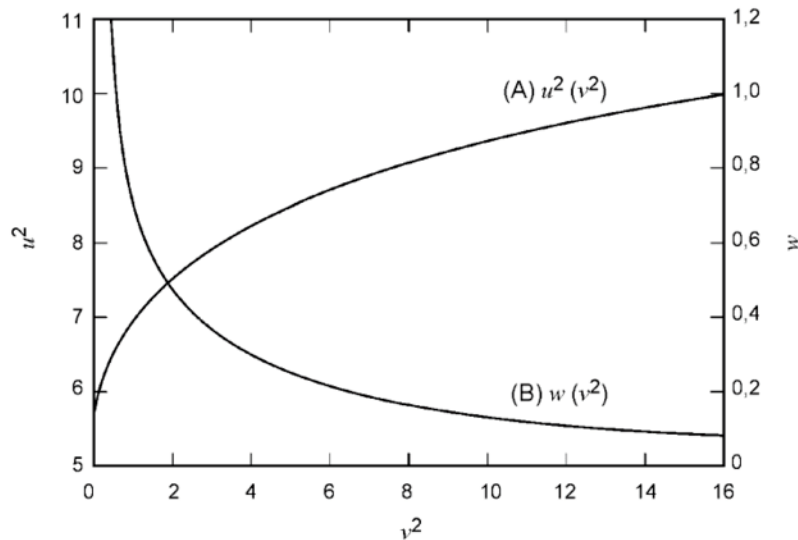


**Bild A.3 – Berechneter Verlauf von  $u^2$  und  $W$  als Funktion von  $v^2$  für den  $TE_{01p}$ -Modus**

Der Wert von  $\epsilon'$  ist gegeben durch

$$\epsilon' = \left( \frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 (u^2 + v^2) + 1 \quad (\text{A.8})$$

wobei die Werte von  $v^2$  und  $u^2$  benutzt werden.

Bei dem Zwei-Resonator-Verfahren wird ein Paar dielektrischer Zylinder benutzt, die „dielektrische Standardzylinder“ heißen. Diese beiden Zylinder haben den gleichen Durchmesser, aber unterschiedliche Längen. Die Zylinderlängen sind so bemessen, dass die Länge des einen Zylinders gleich  $p$ -mal der Länge des anderen ist;  $p$  wird gewöhnlich gleich drei gesetzt. Von ihnen wird gefordert, dass sie gleiche Werte von  $\epsilon'$  und  $\tan \delta$  haben.

Bild A.4 zeigt die Konfiguration der dielektrischen Standardzylinder im Fall  $p = 3$ . Um Verwechslungen zu vermeiden, wird die Länge des kurzen Standardzylinders mit  $h_0$  bezeichnet. Die betreffenden Resonatoren werden „ $TE_{011}$ -Resonator“ und „ $TE_{013}$ -Resonator“ genannt. In diesen Resonatoren werden die gleichen supraleitenden Filme benutzt. Die Werte von  $f_0$  und  $Q_u$  für den  $TE_{011}$ -Modus werden mit Hilfe des  $TE_{011}$ -Resonators, die Werte für den  $TE_{01p}$ -Modus mit Hilfe des  $TE_{01p}$ -Resonators gemessen. Wir kennzeichnen die Größen  $f_0$  und  $Q_u$  für die einzelnen Resonatoren mit Hilfe der Indizes 1 und  $p$ :  $f_{01}$  und  $Q_{u1}$  für den  $TE_{011}$ -Resonator und  $f_{0p}$  und  $Q_{up}$  für den  $TE_{01p}$ -Resonator.

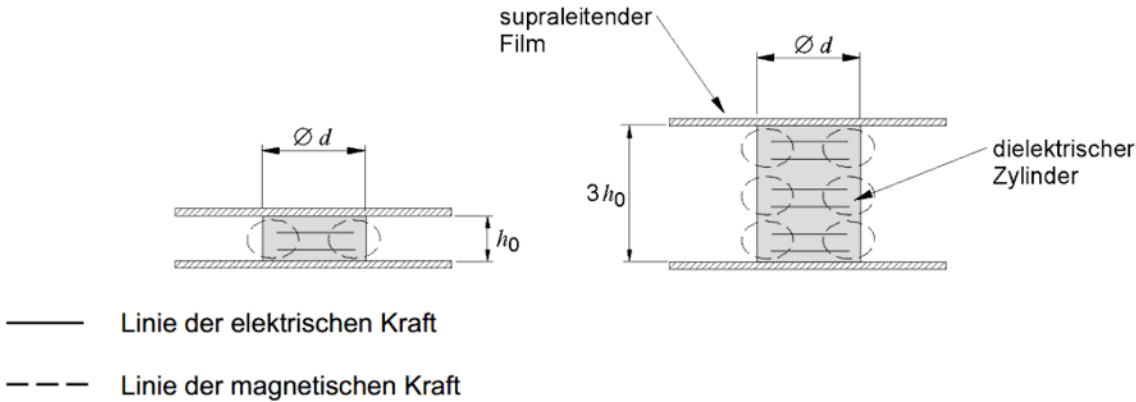


**Bild A.4 – Konfiguration der dielektrischen Standardzylinder für die  $R_s$ - und  $\tan \delta$ -Messung**

Der  $\tan \delta$ -Wert ist gegeben durch den gemessenen  $Q_u$ -Wert. Wenn der  $TE_{01p}$ -Resonator genau  $p$ -mal länger ist als der  $TE_{011}$ -Resonator, fällt  $f_{0p}$  mit  $f_{01}$  zusammen. Jedoch ist  $Q_{up}$  höher als  $Q_{u1}$  entsprechend den unterschiedlichen Energiebeträgen des elektrischen Felds, die in den zwei Resonatoren gespeichert werden. Da die zwei dielektrischen Zylinder jeweils an beiden Enden durch die gleichen supraleitenden Filme kurzgeschlossen sind, liefert Gleichung (A.1)

$$\tan \delta = \frac{A}{(p-1)} \left( \frac{p}{Q_{up}} - \frac{1}{Q_{u1}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Alternativ hierzu kann der Wert des Oberflächenwiderstands  $R_s$  von supraleitenden Filmen direkt gemessen werden:

$$R_s = \frac{30\pi^2 p}{(p-1)} \left( \frac{2h_0}{\lambda_0} \right)^3 \frac{\epsilon' + W}{1+W} \left( \frac{1}{Q_{u1}} - \frac{1}{Q_{up}} \right) \quad (\text{A.10})$$

wobei Gleichung (A.10) durch Einsetzen von Gleichung (A.9) in Gleichung (A.1) abgeleitet wird.

## A.4 Messapparatur

Die unerwünschte parasitäre Kopplung mit einem anderen Modus reduziert die hohe Güte des TE-Moden-Resonators. Zur Unterdrückung der parasitären Kopplung wird der Konstruktion von Resonatoren mit hoher Güte besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Drei Resonatortypen werden vorgeschlagen und in Bild A.5 dargestellt.

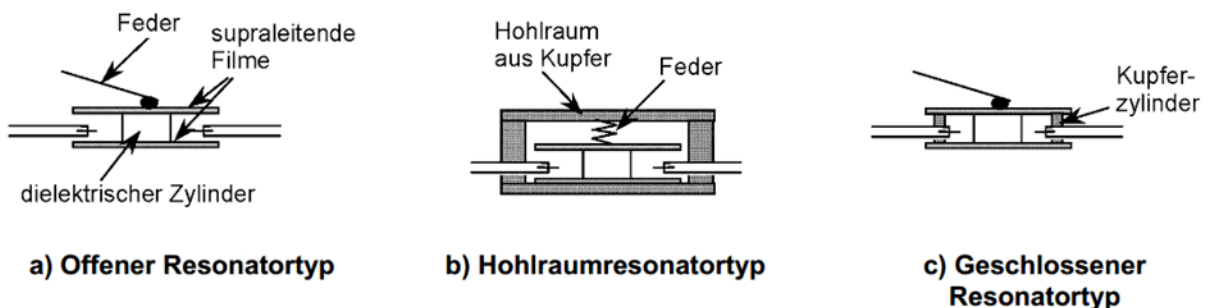


**Bild A.5 – Drei Typen von dielektrischen Resonatoren**