



---

**SUPRALEITENDE  
AUDIO-VERBINDUNGSKABEL:  
WIDERSTANDS FREIE  
SIGNALÜBERTRAGUNG ÜBER  
YBCO-KERAMIKLEITER BEI 77 K**

---



# Supraleitende Audio-Verbindungskabel: Widerstands freie Signalübertragung über YBCO-Keramikleiter bei 77 K

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## Zusammenfassung

Wir berichten über die Entwicklung und Charakterisierung des ersten supraleitenden Audio-Verbindungskabels. Der Leiter ist ein YBCO-Keramikkband (Yttrium-Barium-Kupferoxid,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ), das bei 77 K in einem vakuumisierten Stickstoff betrieben wird. Der Gleichstromwiderstand ist null -- nicht niedrig, nicht vernachlässigbar, null. Der Meissner-Effekt bietet perfekte diamagnetische Abschirmung des Signalpfads. Das Kabel arbeitet kontinuierlich Liter pro Jahr und Meter.

## 1. EINLEITUNG

Jedes konventionelle Audiokabel hat einen Widerstand. Dieser ist klein -- typischerweise Milliohm bis Ohm pro Meter -- aber nicht null. Die Konsequenzen eines von Null verschiedenen Widerstands sind dreifach: (1) resistiver Signalverlust, (2) Erzeugung thermischen Rauschens (Johnson-Nyquist-Rauschen), und (3) frequenzabhängige Impedanzvariation (Skin-Effekt, Proximity-Effekt). Supraleitung beseitigt alle drei.

Zusätzlich bietet der Meissner-Effekt -- die vollständige Verdrängung des magnetischen Flusses aus dem Inneren eines Supraleiters -- eine Abschirmung, die keine Menge konventionellen  $\mu$ -Metalls erreichen kann. Ein supraleitendes Kabel dämpft externe Magnetfelder nicht; es schließt sie absolut aus.

## 2. KABELKONSTRUKTION

Die SC-Verbindung besteht aus folgenden Elementen, von innen nach außen:

Leiter: YBCO-Keramikkband (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm breit  $\times$  0,1 mm dick, mit einem kritischen Strom von 100 A bei 77 K.

Signalpfad: Zwei YBCO-Bänder (Signal und Rückleitung) konzentrisch gewickelt mit einem 0,5 mm PTFE-Abstandshalter. Charakteristische Impedanz 75 Ohm.

Kryostat: Doppelwandiger Borosilikatglas-Dewar, 48 mm Außendurchmesser, 28 mm Innendurchmesser. Der Zwischenraum ist auf  $< 10^{-3}$  Pa evakuiert.

Steckverbinder: Kryogentaugliche Rhodium-beschichtete XLR-Steckverbinder mit Vakuumdurchführungen und thermischen Trennungen.

Gesamtaußendurchmesser: 48 mm. Gewicht: 2,4 kg/m trocken, 3,8 kg/m mit LN<sub>2</sub>. Minimaler

## 3. ELEKTRISCHE CHARAKTERISIERUNG

Gleichstromwiderstand: Gemessen in Vierpunkttechnik mit einem Keithley 2182A Nanovoltmeter. Bei 77 K war die Spannung unter dem Instrumentenrauschpegel von 1 nV. Berechnete Obergrenze:  $R < 10^{-x}$  Ohm. Für alle  $p > 0$  null.

Wechselstromimpedanz: Bei 1 kHz beträgt die Impedanz 75,0  $\pm$  0,1 Ohm (rein reaktiv). Die Impedanzstabilität über eine 30-tägige Messkampagne betrug  $\pm$  0,0003 Ohm.

Rauschpegel: Für  $R = 0$  ist  $V_n = 0$  unabhängig von Temperatur oder Bandbreite. Die supraleitende Verbindung trägt exakt null thermisches Rauschen bei.

Magnetische Abschirmung: Eine Helmholtz-Spule erzeugte 1 mT bei 50 Hz in 50 mm Entfernung. Ein Fluxgate-Magnetometer im Kryostaten maß  $< 0,01$  nT -- Dämpfung über 160 dB.

## 4. PRAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN

Die SC-Verbindung erfordert eine kontinuierliche LN<sub>2</sub>-Versorgung. Die thermische Verlustleistung beträgt etwa 0,85 Liter LN<sub>2</sub> pro Tag und Meter Kabellänge. Für ein Paar 1,5-m-Verbindungen



etwa 930 Liter.

Das Kabel muss mit zugänglichen LN<sub>2</sub>-Nachfüllanschlüssen installiert werden (Nachfüllung Überdruckventil verhindert gefährlichen Überdruck. Ein O<sub>2</sub>-Verarmungssensor überwacht d

Diese Anforderungen stellen einen fundamentalen Wandel dar. Die SC-Verbindung ist kein Produkt, das man anschließt und vergisst. Sie ist Infrastruktur -- lebende Infrastruktur, die Überwachung, Wartung und eine Beziehung zu einem Flüssigstickstofflieferanten erfordert.

## **5. SCHLUSSFOLGERUNG**

Die SC-Verbindung erreicht, was kein konventioneller Leiter kann: null Gleichstromwiderstand, null thermisches Rauschen und absolute magnetische Immunität durch den Meissner-Effekt. Der Ingenieur- und Betriebsaufwand ist erheblich, aber für engagierte Hörer handhabbar. Wir glauben, dass supraleitendes Audio den logischen Endpunkt der Leiteroptimierung darstellt: Wenn man allen Widerstand beseitigt hat, gibt es nichts mehr zu verbessern.

## **LITERATURVERZEICHNIS**

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, "Possible high-T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "Spezifikationen des YBCO-beschichteten Leiters SCS4050-AP," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Regeln für die Konstruktion von Druckbehältern (Kryogendienst).