

---

# **APLIKASI EFEK MEISSNER DALAM AUDIO KONSUMEN: PENGUSIRAN FLUKS MAGNETIK LENGKAP SEBAGAI PARADIGMA PELINDUNG**

---

# Aplikasi Efek Meissner dalam Audio Konsumen: Pengusiran Fluks Magnetik Lengkap sebagai Paradigma Pelindung

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## Abstrak

Pelindung elektromagnetik konvensional mengandalkan absorpsi dan refleksi -- mekanisme yang melemahkan medan eksternal tetapi tidak dapat menghilangkannya. Efek Meissner pada superkonduktor Tipe II menyediakan paradigma yang secara fundamental berbeda: pengusiran lengkap fluks magnetik dari interior konduktor melalui pembangkitan arus penyaringan permukaan. Kami menunjukkan bahwa jalur sinyal audio yang terbungkus dalam selubung superkonduktor tidak mengalami kopling terhadap medan elektromagnetik eksternal dari frekuensi, orientasi, atau besaran apa pun di bawah medan kritis  $H_{c2}$ . Pengukuran di hadapan sumber EMI rumah tangga (router WiFi, transformator daya, kompresor kulkas) mengonfirmasi bahwa jalur kabel superkonduktor tidak terlihat secara elektromagnetik -- medan internal tidak dapat dibedakan dari medan di ruang kosong. Kami membahas implikasi pelindung Meissner untuk desain sistem audio superkonduktor lengkap.

## 1. PENDAHULUAN

Pelindung elektromagnetik telah menjadi perhatian industri kabel audio sejak hari-hari paling awal reproduksi high-fidelity. Anyaman tembaga, foil aluminium, foil mu-metal, lapisan polimer konduktif, bungkus serat karbon -- katalog material pelindung luas dan terus berkembang. Setiap material menawarkan kombinasi permeabilitas magnetik, konduktivitas listrik, dan atenuasi bergantung frekuensi yang berbeda, dan masing-masing telah dipasarkan sebagai solusi definitif untuk interferensi elektromagnetik.

Tidak satu pun dari mereka yang benar. Setiap material pelindung konvensional beroperasi dengan dua mekanisme yang sama: absorpsi (mengubah energi elektromagnetik menjadi panas melalui arus eddy) dan refleksi (mengalihkan energi elektromagnetik menjauhi konduktor melalui ketidaksesuaian impedansi). Kedua mekanisme secara inheren tidak sempurna. Absorpsi bergantung pada ketebalan material dan frekuensi; pelindung tipis bocor pada frekuensi rendah. Refleksi bergantung pada kontras impedansi; pada sudut dan frekuensi tertentu, medan menembus bagaimanapun juga.

Efek Meissner berbeda dalam jenisnya, bukan sekadar derajatnya. Ketika superkonduktor Tipe II didinginkan di bawah suhu kritisnya di hadapan medan magnet eksternal, arus penyaringan permukaan secara spontan muncul yang menghasilkan medan yang tepat sama dan berlawanan dengan medan yang diterapkan. Medan bersih di dalam superkonduktor adalah nol -- bukan kecil, bukan dilemahkan, nol. Ini bukan parameter desain yang dapat dioptimalkan; ini adalah sifat fundamental dari keadaan superkonduktor, seintrinsik seperti resistansi nol.

## 2. VERIFIKASI EKSPERIMENTAL

Sepasang Interkoneksi SC 1,5 m dipasang di ruang dengar residensial standar bersama sumber-sumber EMI berikut:

Sumber A: Router WiFi 6E (6 GHz, bandwidth 160 MHz, daya transmisi 1 W) pada jarak 0,5 m.

Sumber B: Transformator daya toroidal 500 VA pada jarak 0,3 m.

Sumber C: Motor kompresor kulkas (berjalan) pada jarak 1,0 m.

Sumber D: Amplifier Class D (gelombang persegi 1 kHz, 100 W) pada jarak 0,2 m.

Sumber E: Keempat sumber beroperasi secara bersamaan.

Medan magnet internal pada konduktor kabel diukur oleh sensor mikro-fluxgate (Bartington Mag690, resolusi 0,1 nT) yang dimasukkan ke dalam kriostat melalui port pengukuran khusus.

Sebagai perbandingan, pengukuran identik dilakukan pada empat kabel konvensional: OFC tanpa pelindung, anyaman tembaga tunggal, anyaman tembaga ganda + foil mu-metal, dan Interkoneksi Equinox Equatorial Audio (pelindung tiga lapis).

Hasil (medan magnet RMS pada konduktor, Sumber E, semua sumber aktif secara bersamaan):

OFC tanpa pelindung: 847 nT

Anyaman tembaga tunggal: 124 nT (atenuasi 17 dB)

Anyaman ganda + mu-metal: 8,3 nT (atenuasi 40 dB)

Equinox tiga lapis: 1,7 nT (atenuasi 54 dB)

Interkoneksi SC (Meissner): < 0,1 nT (atenuasi > 79 dB; dibatasi oleh lantai noise magnetometer)

Medan internal kabel superkonduktor tidak dapat dibedakan dari lantai noise magnetometer di bawah semua kondisi pengujian, termasuk operasi simultan terburuk dari semua sumber EMI.



### 3. SISTEM SUPERKONDUKTOR LENGKAP

Potensi penuh pelindung Meissner terwujud hanya ketika seluruh rantai sinyal bersifat superkonduktor. Satu segmen kabel konvensional dalam sistem yang sebaliknya superkonduktor menciptakan «jendela magnetik» di mana medan eksternal dapat berkopel ke sinyal.

Sistem Referensi Zero Kelvin mengatasi ini dengan menyediakan kabel superkonduktor untuk setiap segmen rantai sinyal: daya (SC Power Cord), clock (SC Word Clock Cable), digital (SC Digital Cable), analog (SC Interconnect), dan penguat suara (SC Speaker Cable). Reservoir LN, sentral dan manifold distribusi 12-port memastikan semua secara bersamaan.

Ketika sistem lengkap beroperasi, jalur sinyal audio dari stopkontak dinding ke driver penguat suara seluruhnya terbungkus dalam material superkonduktor. Setiap segmen menunjukkan resistansi nol dan pengusiran fluks Meissner lengkap. Sistem mencapai apa yang tidak dapat dicapai kombinasi pelindung konvensional apa pun: invisibilitas elektromagnetik.

Perbedaan praktis paling terdengar selama kondisi EMI ambien tinggi. Dalam demonstrasi untuk panel pengulas audio (Munich High End 2024), Sistem Referensi Zero Kelvin dioperasikan di ruang dengan kontaminasi EMI yang disengaja (beberapa router WiFi, pemanas induksi 2 kW, dan penyedot debu yang berjalan). Para pengulas tidak dapat mendeteksi perbedaan kualitas suara antara kondisi bersih dan terkontaminasi. Sistem, secara elektromagnetik, tidak menyadari bahwa interferensi itu ada.

### 4. KESIMPULAN

Efek Meissner menyediakan pelindung elektromagnetik yang secara fundamental lengkap -- bukan dilemahkan, bukan bergantung frekuensi, tetapi absolut. Jalur sinyal audio yang terbungkus dalam material superkonduktor kebal terhadap medan elektromagnetik eksternal pada frekuensi dan besaran apa pun di bawah medan kritis. Sistem Referensi Zero Kelvin menunjukkan bahwa rantai sinyal superkonduktor lengkap dapat dicapai di lingkungan residensial, dengan infrastruktur kriogenik yang tepat. Kami mengusulkan bahwa pelindung Meissner mewakili batas fisik perlindungan elektromagnetik untuk jalur sinyal audio.

### REFERENSI

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "Interkoneksi audio superkonduktor: transmisi sinyal tanpa resistansi melalui konduktor YBCO pada 77K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Kompatibilitas elektromagnetik (EMC) -- Teknik pengujian dan pengukuran -- Uji imunitas medan magnet frekuensi daya*.