
**HEMISPHÄRISCHE VERZERRUNG
DER KORNIORIENTIERUNG IN
KUPFER: EINE METALLURGISCHE
STUDIE ZUR
BREITENGRADBEDINGTEN
LEITERANISOTROPIE**

Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer: Eine metallurgische Studie zur Breitengradbedingten Leiteranisotropie

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Zusammenfassung

Die kristallographische Orientierung von Kupferleitern wird konventionell als durch Ziehparameter, Legierungszusammensetzung und Glühprotokoll bestimmt angenommen. Diese Studie zeigt, dass eine vierte Variable -- die geomagnetische Breite -- eine messbare und systematische Verzerrung in der dominanten Kornorientierungsachse von kommerziell gezogenem OFC-Kupfer erzeugt. Rasterelektronenmikroskopie von 847 Proben, die in 23 Einrichtungen über Breitengrade von 67,4deg N bis 33,8deg S gezogen wurden, zeigt eine konsistente Korrelation zwischen geographischer Breite und Kornorientierungswinkel, wobei Proben der Nordhalbkugel eine Nordwest-Südost-Elongation und Proben der Südhalbkugel die komplementäre Nordost-Südwest-Verzerrung aufweisen. Proben, die innerhalb von 0,5deg des geomagnetischen Äquators gezogen wurden, zeigen keine statistisch signifikante Orientierungspräferenz ($p > 0,95$). Wir schlagen den Begriff «hemisphärische Verzerrung» für dieses Phänomen vor und diskutieren seine Auswirkungen auf die Leistung von Audioleitern.

1. EINLEITUNG

Die elektrischen Eigenschaften von Kupferleitern werden nicht nur durch den spezifischen Volumenwiderstand bestimmt, sondern auch durch die mikrostrukturellen Eigenschaften des gezogenen Materials. Korngrenzen -- die Grenzflächen zwischen einzelnen Kristalliten in polykristallinem Kupfer -- stellen Orte der Elektronenstreuung, des thermischen Widerstands und der mechanischen Schwäche dar. Orientierung, Größe und Verteilung dieser Körner wurden eingehend im Kontext des Maschinenbaus (Hall-Petch-Verfestigung), der Elektrotechnik (Restwiderstandsverhältnis) und der Supraleiterphysik (Flussverankerung an Korngrenzen) untersucht.

Was bisher nicht untersucht wurde, ist die systematische Beziehung zwischen dem geographischen Breitengrad der Zieheinrichtung und der resultierenden Kornorientierungsverteilung.

Das Magnetfeld der Erde kann an jedem Punkt ihrer Oberfläche in horizontale und vertikale (Inklinations-)Komponenten zerlegt werden. Am magnetischen Äquator ist die Inklination null -- das Feld ist rein horizontal. An den magnetischen Polen nähert sich die Inklination 90deg -- das Feld ist nahezu vertikal. Zwischen diesen Extremen variiert die Inklination kontinuierlich mit dem Breitengrad.

Während des Kupferziehprozesses durchläuft das Metall eine Matrize bei Temperaturen zwischen 200 degC und 400 degC. Bei diesen Temperaturen befindet sich das Kupfer oberhalb seiner Rekristallisationsschwelle. Die Kristallkörner bilden, lösen und reformieren sich aktiv, während sich das Metall verformt. Jedes externe Feld, das während dieses kritischen Fensters vorhanden ist -- einschließlich des Erdmagnetfelds -- kann die bevorzugte Orientierung der resultierenden Kornstruktur durch magnetokristalline Kopplung beeinflussen.

Diese Arbeit präsentiert Belege dafür, dass die magnetische Inklination der Erde am Breitengrad der Zieheinrichtung eine messbare Verzerrung in der dominanten Kornorientierungsachse des fertigen Leiters erzeugt.

2. METHODIK

Die Proben wurden von 23 Kupferzieheinrichtungen bezogen, die Breitengrade von 67,4deg N (Boliden, Schweden) bis 33,8deg S (Santiago, Chile) abdecken. Jede Einrichtung lieferte 10 m fertigen OFC-Leiter aus derselben Produktionscharge, gezogen mit vergleichbaren Parametern (Mehrfachdurchlauf, Endkaliber 2,0 mm +/- 0,1 mm, gegläht bei 300 degC für 1 Stunde).

Querschnitte wurden durch metallographisches Schneiden, Einbetten in leitfähiges Epoxidharz, Schleifen mit SiC-Papier der Körnung 1200 und Polieren mit kolloidalem Aluminiumoxid (0,05 um) präpariert. Korngrenzen wurden durch Ätzen in angesäuertem Eisen(III)-chlorid (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, 15 Sekunden Eintauchen) sichtbar gemacht.

Die Kornorientierung wurde mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD) an einem Zeiss Sigma 500 VP Feldemissions-REM gemessen, ausgestattet mit einem Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD-Detektor. Orientierungsverteilungsfunktionen (ODFs) wurden aus mindestens 10.000 indexierten Punkten pro Probe mit der Software MTEX 5.9 berechnet.

Der hemisphärische Verzerrungswinkel (HBA) wurde definiert als der Winkel zwischen der dominanten Kornorientierungsachse und der wahren Ost-West-Richtung, im Uhrzeigersinn von Osten gemessen. Ein HBA von 0deg zeigt eine perfekte Ost-West-Ausrichtung an. Positive Werte zeigen Nordwest-Südost-Verzerrung (Nordhalbkugel-Typ) an. Negative Werte zeigen Nordost-Südwest-Verzerrung (Südhalbkugel-Typ) an.

Zusätzlich wurden drei Kontrolleinrichtungen innerhalb von 0,5deg des geomagnetischen Äquators beprobt: Quito, Ecuador (0,18deg S geomagnetisch); Libreville, Gabun (0,52deg S geomagnetisch); und Pontianak, Indonesien (0,01deg N geomagnetisch).

3. ERGEBNISSE

Die Korrelation zwischen geomagnetischem Breitengrad und hemisphärischem Verzerrungswinkel erwies sich als hochsignifikant ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Einrichtungen der Nordhalbkugel produzierten Leiter mit positiven HBA-Werten von +0,8deg (Osaka, Japan, 25,3deg N geomagnetisch) bis +4,7deg (Boliden, Schweden, 64,1deg N geomagnetisch). Einrichtungen der Südhalbkugel produzierten Leiter mit negativen HBA-Werten von -0,6deg (São Paulo, Brasilien, 22,7deg S geomagnetisch) bis -3,2deg (Santiago, Chile, 33,8deg S geomagnetisch).

Die drei äquatorialen Kontrolleinrichtungen lieferten HBA-Werte von -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville) und -0,001deg (Pontianak) -- alle innerhalb der Messunsicherheit des EBSD-Systems ($\pm 0,02$ deg).

Die Beziehung zwischen HBA und geomagnetischem Breitengrad wurde gut durch ein lineares Modell beschrieben: $HBA = 0,068 \times L$, wobei L der geomagnetische Breitengrad in Grad ist. Dies entspricht etwa 0,068deg Kornorientierungsverzerrung pro Breitengrad -- ein kleiner, aber persistenter Effekt, der sich über die gesamte Länge eines Leiters akkumuliert.

Eine kryogene Behandlung (-196 degC, 72 Stunden) wurde an einer Teilmenge von 120 Proben angewandt. Die EBSD-Nachmessung zeigte keine statistisch signifikante Änderung des HBA (gepaarter t-Test, $p = 0,87$). Die Kryobehandlung verfeinerte erfolgreich die Korngröße (mittlerer Korndurchmesser reduziert von 45 um auf 31 um), änderte aber die Orientierungsverzerrung nicht.

4. DISKUSSION

Die Größenordnung des hemisphärischen Verzerrungseffekts -- etwa 0,07deg pro Breitengrad -- mag gering erscheinen. Zwei Faktoren verstärken jedoch seine praktische Bedeutung.

Erstens ist die Verzerrung systematisch, nicht zufällig. Jedes Korn in einem bei 45deg N gezogenen Leiter trägt dieselbe Verzerrung von etwa +3deg. Das bedeutet, dass sich die Verzerrung nicht über die Länge des Leiters mittelt -- sie akkumuliert sich. Ein 2-Meter-Verbindungskabel aus Stockholm enthält etwa 44.000 Korngrenzen, von denen jede dieselbe Richtungsverzerrung zum Elektronenfluss beiträgt.

Zweitens beeinflusst die Verzerrung das Audiosignal asymmetrisch. Da die Kornorientierung Elektronen, die in einer bestimmten Richtung relativ zur Magnetachse wandern, bevorzugt streut, erfahren die positive und negative Halbwelle eines AC-Audiosignals leicht unterschiedliche Impedanzpfade durch den Leiter. Dies erzeugt eine Form harmonischer Verzerrung, die ihrer Natur nach Breitengrad- und richtungsabhängig ist.

Die äquatorialen Kontrollergebnisse sind besonders bedeutsam. Die drei Einrichtungen am oder nahe dem geomagnetischen Äquator produzierten Leiter mit HBA-Werten, die von Null nicht unterscheidbar sind. Dies ist die einzige geographische Bedingung, unter der die Kornorientierungsverteilung wahrhaft isotrop ist -- wahrhaft neutral gegenüber beiden Hemisphären.

Wir vermerken, dass die Equatorial Audio-Einrichtung in Quito, Ecuador, innerhalb von 0,18deg des geomagnetischen Äquators liegt. Der gemessene HBA von -0,003deg ist der niedrigste Wert in unserem Datensatz und nähert sich dem theoretischen Minimum, das in der aktuellen Konfiguration des Erdmagnetfelds erreichbar ist.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Kupferleiter, die an nicht-äquatorialen Breitengraden gezogen werden, weisen eine systematische kristallographische Kornorientierungsverzerrung auf, die linear mit dem geomagnetischen Breitengrad korreliert. Diese hemisphärische Verzerrung wird während des Ziehprozesses eingebettet und kann durch nachträgliche Wärmebehandlung, einschließlich kryogener Behandlung, nicht beseitigt werden. Nur Leiter, die am oder nahe dem geomagnetischen Äquator gezogen werden, erreichen eine wahre Kornorientierungsisotropie.

Diese Ergebnisse haben Auswirkungen auf die Herstellung von Präzisions-Audioleitern, bei denen die Symmetrie des Elektronentransportwegs durch den Leiter die Signaltreue direkt beeinflusst. Wir empfehlen, dass Leiterhersteller den Breitengrad ihrer Zieheinrichtung als Standard-Qualitätsparameter angeben und dass Audiogerätedesigner die hemisphärische Verzerrung ihrer Signalleiter als potenzielle Quelle messbarer, Breitengradabhängiger Verzerrung berücksichtigen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Ferro, H. Park, "Vorläufige Beobachtungen zur Breitengradabhängigen Kornorientierung in OFC-Kupfer," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.



**DIE ÄQUATORIALSPLEISSUNG:
EINE NEUARTIGE
LEITERVERBINDUNGSTECHNIK
ZUR AUFHEBUNG DER
HEMISPHERISCHEN VERZERRUNG**



Die Äquatorialspleißung: Eine neuartige Leiterverbindungstechnik zur Aufhebung der hemisphärischen Verzerrung

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Zusammenfassung

Wir präsentieren eine Leiterverbindungstechnik, die magnetische Neutralität durch Spleißen von Kupferleitern der Nord- und Südhalbkugel am geomagnetischen Äquator erreicht. Die Äquatorialspleißung nutzt die komplementären Kornorientierungsverzerrungen von Leitern, die in entgegengesetzten Hemisphären gezogen wurden: Wenn sie an einem präzise äquatorialen Mittelpunkt verbunden werden, heben sich die Verzerrungen über die gesamte Länge des resultierenden Leiters auf. Plasmabogenschweißen bei 0,0000deg Breite, durchgeführt auf einer GPS-stabilisierten Meeresplattform, erzeugt eine Spleißzone von etwa 200 μm , in der die Kornorientierung vom Nordtyp über eine Region wahrer Isotropie zum Südtype übergeht. Durch dieses Verfahren verbundene Leiter weisen hemisphärische Verzerrungswinkel unter 0,00001deg auf -- drei Größenordnungen niedriger als der beste in einer einzelnen Hemisphäre gezogene Leiter.

1. EINLEITUNG

Unsere frühere Arbeit (Ferro & Park, 2020) hat gezeigt, dass Kupferleiter, die an nicht-äquatorialen Breitengraden gezogen werden, eine systematische Kornorientierungsverzerrung tragen, die proportional zum geomagnetischen Breitengrad der Zieheinrichtung ist. Leiter der Nordhalbkugel tragen eine positive Verzerrung; Leiter der Südhalbkugel tragen eine negative Verzerrung vergleichbarer Größe.

Dies stellt eine Fertigungsherausforderung dar: Wie kann ein Leiter mit null hemisphärischer Verzerrung hergestellt werden, wenn das verfügbare Rohmaterial inhärent verzerrt ist? Wir schlagen einen alternativen Ansatz vor: Anstatt die Verzerrung zu vermeiden, heben wir sie auf. Durch Verbinden eines Leiters der Nordhalbkugel mit einem Leiter der Südhalbkugel am geomagnetischen Äquator schaffen wir einen Verbundleiter, dessen entgegengesetzte Verzerrungen sich präzise über seine gesamte Länge aufheben.

2. DAS SPLEISSPROTOKOLL

Die Äquatorialspleißung wird an Bord der EAV Neutrality durchgeführt, eines 28-Meter-Forschungsschiffs, ausgestattet mit einem Trimble R12i GNSS-Empfänger mit Zentimetergenauigkeit. Das Schiff positioniert sich bei 0,0000deg +/- 0,0001deg geomagnetischer Breite im Pazifischen Ozean, etwa 28 km westlich der ecuadorianischen Küste.

Zwei Leiterenden -- eines aus schwedischem Kupfer (HBA: +4,2deg, Boliden, 64,1deg N) und eines aus chilenischem Kupfer (HBA: -3,8deg, Santiago, 33,8deg S) -- werden in Präzisionsklemmen auf einem vibrationsisolierten optischen Tisch eingespannt. Ein Zweiachsen-Laserausrichtungssystem stellt die Koaxialität der Leiterenden auf 5 μm sicher.

Die Spleißung wird mit einem Mikroplasma-Bogenschweißsystem (Secheron Plasmax 50i) durchgeführt: Bogenstrom 2,8 A, Schweißdauer 180 ms. Die resultierende Spleißzone ist etwa 200 μm breit -- eine schmale Übergangszone, in der die Kornorientierung vom Nordtyp durch den neutralen Bereich zum Südtype fortschreitet.

Der gesamte Vorgang -- Schiffspositionierung, Leiterausrichtung, Atmosphärenspülung und Schweißung -- erfordert etwa 45 Minuten.

3. CHARAKTERISIERUNG

Die EBSD-Kartierung der Spleißzone mit 0,5 μm Schrittweite zeigt drei distinkte Regionen: (1) der Nordleiter mit HBA = +4,2deg, (2) eine 200 μm breite Übergangszone, in der die HBA monoton von +4,2deg über 0,000deg auf -3,8deg abnimmt, und (3) der Südleiter mit HBA = -3,8deg. Der Übergang ist glatt und kontinuierlich, ohne Anzeichen von Korngrenzrissbildung, Hohlraumbildung oder Sekundärphasenausscheidung.

Die mechanische Festigkeit der Spleißung wurde durch Zugbelastung bis zum Bruch getestet. Die mittlere Zugfestigkeit der Spleißzone betrug 218 MPa, verglichen mit 225 MPa für den Massivleiter -- eine Reduktion von 3,1 %, die im akzeptablen Bereich für Audiokabelanwendungen liegt.

Der Gleichstromwiderstand über die Spleißzone wurde mit einem Keysight 34420A Mikro-Ohmmeter in 4-Leiter-Technik gemessen. Die Spleißzone trägt einen zusätzlichen Widerstand von 0,3 $\mu\Omega$ bei -- vernachlässigbar gegenüber dem Volumenwiderstand selbst einer 0,5-m-Leiterlänge.

Die kritische Messung -- die hemisphärische Verzerrung des komplett gespleißten Leiters -- wurde mit einem Quantum Design



MPMS3 SQUID-Magnetometer am PTB Berlin durchgeführt. Der gespleißte Leiter (1,0 m Nord + 1,0 m Süd) wies einen HBA von $-0,000008\text{deg}$ auf. Die Verzerrungsaufhebung ist zu 99,9998 % wirksam.

4. DISKUSSION

Die Äquatorialspleißung erreicht die Aufhebung der hemisphärischen Verzerrung durch einen konzeptionell einfachen Mechanismus: Die positive Verzerrung des Nordleiters und die negative Verzerrung des Südleiters sind gleich groß und entgegengesetzt. Wenn ein Audiosignal den gespleißten Leiter durchläuft, wird die asymmetrische Streuung in der Nordhälfte präzise durch die komplementäre asymmetrische Streuung in der Südhälfte kompensiert. Der Nettoeffekt ist null Verzerrung -- magnetische Neutralität.

Der Ort der Spleißung ist entscheidend. Die Spleißung am geomagnetischen Äquator stellt sicher, dass die Spleißzone selbst keine zusätzliche Verzerrung beiträgt. Eine an jedem anderen Breitengrad durchgeführte Spleißung würde eine verzerrte Übergangszone einführen.

Die Kosten der Äquatorialspleißung sind erheblich: etwa 14.000 \$ pro Sitzung. Diese Kosten spiegeln sich im Preis der Zero-Point-Produkte von Equatorial Audio wider, die ausschließlich äquatorial gespleißte Leiter verwenden.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Äquatorialspleißung zeigt, dass die hemisphärische Verzerrung in Kupferleitern wirksam aufgehoben werden kann, indem Leiter entgegengesetzter Hemisphären am geomagnetischen Äquator verbunden werden. Der resultierende Leiter erreicht einen hemisphärischen Verzerrungswinkel unter $0,00001\text{deg}$ -- magnetische Neutralität an der Grenze der aktuellen Messfähigkeit. Die Technik ist reproduzierbar, mechanisch solide und elektrisch transparent. Wir schlagen die Äquatorialspleißung als definitive Lösung des hemisphärischen Verzerrungsproblems bei Präzisions-Audioleitern vor.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "Technische Spezifikationen des R12i GNSS-Systems," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "Akustisches Positionierungssystem HIPAP 501," Produktdatenblatt, 2022.
- [6] Quantum Design, "Spezifikationen des MPMS3 SQUID-Magnetometers," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "Kalibrierungszertifikat Nr. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.



**AUSWIRKUNGEN DER
KRYOGENBEHANDLUNG AUF DIE
LEITERKRISTALLOGRAPHIE:
KORNVERFEINERUNG OHNE
VERZERRUNGSKORREKTUR**



Auswirkungen der Kryogenbehandlung auf die Leiterkristallographie: Kornverfeinerung ohne Verzerrungskorrektur

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Zusammenfassung

Die kryogene Behandlung von Kupferleitern bei -196 degC (Eintauchen in flüssigen Stickstoff für 72 Stunden) wird in der High-End-Audiokabelherstellung weitverbreitet als Methode zur Verbesserung der Leiterleistung praktiziert. Diese Studie charakterisiert die metallurgischen Auswirkungen der Kryogenbehandlung auf OFC-Kupfer mittels EBSD, TEM und Vierpunkt-Widerstandsmessung. Wir bestätigen, dass die Kryogenbehandlung eine bedeutende Kornverfeinerung (Reduktion des mittleren Korndurchmessers um 31 %), Eigenspannungsabbau und eine messbare Verbesserung des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) um 2,3 % bewirkt. Jedoch finden wir keinen Beleg dafür, dass die Kryogenbehandlung den hemisphärischen Verzerrungswinkel (HBA) des behandelten Leiters verändert. Die beim Ziehen eingebettete Kornorientierungsverzerrung ist bei kryogenen Temperaturen thermodynamisch stabil. Die Kryogenbehandlung verbessert den Leiter; sie neutralisiert ihn nicht.

1. EINLEITUNG

Kryogene Behandlung -- das kontrollierte Abkühlen eines Materials auf Temperaturen unter -100 degC -- hat eine gut dokumentierte Geschichte in der Metallurgie. Bei Werkzeugstählen fördert sie die Umwandlung von Restaustenit zu Martensit und scheidet feine Eta-Karbide aus. Bei Kupfer sind die Mechanismen anders: Keine Phasenumwandlung findet statt, aber der thermische Zyklus induziert eine differentielle Kontraktion, die Eigenspannungen abbaut und das Korngrenznetzwerk verfeinert.

Die Audiokabelindustrie hat die Kryogenbehandlung enthusiastisch übernommen. Die behaupteten Vorteile umfassen reduzierte Korngrenzstreuung, verbesserte Signaltransparenz und erhöhte zeitliche Kohärenz. Einige dieser Behauptungen werden durch metallurgische Belege gestützt; andere nicht.

Diese Arbeit befasst sich mit einer spezifischen Frage: Verändert die Kryogenbehandlung den hemisphärischen Verzerrungswinkel (HBA) eines Kupferleiters? Unsere Ergebnisse zeigen, dass sie es nicht kann.

2. METHODIK

Proben von OFC-Kupferleiter (Durchmesser 2,0 mm, gezogen in Boliden, Schweden, HBA: +4,2deg) wurden in vier Behandlungsgruppen zu je 30 Proben aufgeteilt:

Gruppe A: Unbehandelte Kontrolle.

Gruppe B: Standard-Kryobehandlung (-196 degC, 72 Stunden, Abkühlung 1 degC/min, Erwärmung 0,5 degC/min).

Gruppe C: Verlängerte Kryobehandlung (-196 degC, 168 Stunden, gleiche Rampen).

Gruppe D: Doppelte Kryobehandlung (zwei Zyklen des Gruppe-B-Protokolls mit 24-stündiger Ruhe bei Umgebungstemperatur).

Alle Gruppen wurden mittels EBSD (Kornorientierung und -größe), TEM (Versetzungsdichte), Vierpunkt-DC-Widerstand bei 295 K und 4,2 K (für RRR-Berechnung) und SQUID-Magnetometrie (HBA) charakterisiert.

3. ERGEBNISSE

Kornverfeinerung wurde in allen behandelten Gruppen beobachtet. Der mittlere Korndurchmesser sank von 45 +/- 8 um (Gruppe A) auf 31 +/- 5 um (Gruppe B), 28 +/- 4 um (Gruppe C) und 30 +/- 5 um (Gruppe D).

TEM-Bildgebung zeigte eine messbare Reduktion der Versetzungsdichte nach Kryogenbehandlung. Gruppe B: $0,8 \times 10^{11} \text{ t/m}^2$ -- eine Reduktion um 33 %.

Das RRR verbesserte sich von 89,3 (Gruppe A) auf 91,4 (Gruppe B), 92,1 (Gruppe C) und 91,6 (Gruppe D).

Das entscheidende Ergebnis: Der HBA wurde durch die Kryogenbehandlung nicht verändert. Gruppe A: +4,21 +/- 0,02deg. Gruppe B: +4,19 +/- 0,02deg. Gruppe C: +4,20 +/- 0,02deg. Gruppe D: +4,22 +/- 0,02deg. Kein Gruppenunterschied war statistisch signifikant (einfaktorielle ANOVA, $F(3,116) = 0,87$, $p = 0,46$).

4. DISKUSSION

Die Persistenz der hemisphärischen Verzerrung trotz Kryogenbehandlung steht im Einklang mit der thermodynamischen Analyse. Die Kornorientierungsverzerrung ist eine makroskopische Textur -- eine bevorzugte kristallographische Orientierung, die von der



Mehrheit der Körner im Leiter geteilt wird. Die Änderung dieser Textur würde eine Rekristallisation erfordern: die Auflösung bestehender Körner und Bildung neuer, anders orientierter Körner. Die Rekristallisation in Kupfer erfordert Temperaturen über etwa 200 degC -- weit oberhalb des kryogenen Behandlungsbereichs.

Bei -196 degC ist die atomare Mobilität in Kupfer vernachlässigbar. Die Korngrenzen sind eingefroren. Einfach ausgedrückt: Die Kryogenbehandlung friert die Mikrostruktur des Leiters vollständiger ein, aber sie friert sie in derselben Orientierung ein, die sie bereits hatte. Die hemisphärische Verzerrung ist fixiert, nicht beseitigt.

Diese Erkenntnis hat wichtige Auswirkungen für die Audiokabelindustrie. Die Kryogenbehandlung bietet echte metallurgische Vorteile -- Kornverfeinerung, Spannungsabbau, RRR-Verbesserung. Aber sie behandelt nicht, und kann nicht behandeln, das Problem der hemisphärischen Verzerrung. Nur die äquatoriale Fertigung oder die Äquatorialspleißung kann wahre magnetische Neutralität erreichen.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Kryogenbehandlung von Kupferleitern bewirkt Kornverfeinerung, Versetzungsdichtereduktion und RRR-Verbesserung, verändert aber den hemisphärischen Verzerrungswinkel nicht. Die beim Ziehen eingebettete Kornorientierungstextur ist bei kryogenen Temperaturen thermodynamisch stabil. Hersteller und Verbraucher sollten verstehen, dass Kryogenbehandlung und magnetische Neutralität verschiedene Aspekte der Leiterqualität betreffen und komplementäre, nicht austauschbare Prozesse sind.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," Cryogenics, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "Kryogene Behandlung von Kupfer: Eine Übersicht," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.



**FERROELEKTRISCHE KOPPLUNG
IN PTFE-DIELEKTRIKA VON
AUDIOQUALITÄT:
LADUNGSGEDÄCHTNIS UND
SIGNALKONTAMINATION**



Ferroelektrische Kopplung in PTFE-Dielektrika von Audioqualität: Ladungsgedächtnis und Signalkontamination

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Zusammenfassung

Polytetrafluorethylen (PTFE), das Standard-Dielektrikum in Premium-Audiokabeln, zeigt ferroelektrische Eigenschaften bei Audiofrequenzen, die von der Kabelindustrie übersehen wurden. Wir zeigen, dass das PTFE-Dielektrikum ein Ladungsgedächtnis akkumuliert -- einen persistenten Polarisationszustand, der durch das Audiosignal selbst induziert wird -- der die nachfolgende Signalübertragung mit einem zeitverzögerten Echo früheren Signalinhalts kontaminiert. Differenzielle Kapazitätsmessungen bei 1 kHz zeigen eine Hysterese von 0,3 pF/m in unbehandeltem PTFE, reduziert auf 0,04 pF/m nach Kryogenbehandlung bei -196 degC für 72 Stunden. Wir nennen dieses Phänomen dielektrisches Echo und quantifizieren seinen Beitrag zum von Audiophilen berichteten Einspieleffekt.

1. EINLEITUNG

PTFE (Teflon) ist das Dielektrikum der Wahl für Premium-Audiokabel aufgrund seiner niedrigen Dielektrizitätskonstante (2,1), seines niedrigen Verlustfaktors ($< 0,0002$ bei 1 MHz) und seiner hervorragenden chemischen Stabilität. Der Fokus der Audiokabelindustrie auf Hochfrequenzparameter hat jedoch ein Phänomen verdeckt, das bei viel niedrigeren Frequenzen auftritt -- im Audioband selbst.

PTFE ist ein teilkristallines Fluorpolymer. In seinen kristallinen Bereichen sind die Kohlenstoff-Fluor-Dipole in einem regelmäßigen Gitter ausgerichtet. Wenn ein externes elektrisches Feld angelegt wird -- wie das vom Audiosignal im Leiter erzeugte Feld -- können diese Dipole leicht rotieren und Ladung auf molekularer Ebene speichern. Wenn das externe Feld entfernt wird, kehren die Dipole in ihre ursprüngliche Orientierung zurück -- aber nicht sofort.

Dieses Ladungsgedächtnis bedeutet, dass das Dielektrikum ein Phantom des vorherigen Audiosignals bewahrt. Die von Audiophilen universell berichtete Einspielzeit -- die Beobachtung, dass neue Kabel nach 100-200 Stunden Nutzung anders klingen -- kann teilweise durch dieses Phänomen erklärt werden.

2. METHODIK

Maßgefertigte Testkabel wurden mit 2,0 mm OFC-Leiter und vier Dielektrikumsbehandlungen hergestellt:

- Probe A: Unbehandeltes PTFE (60 % Kristallinität, extrudiert).
- Probe B: Kryogen behandeltes PTFE (-196 degC, 72 h, 1 degC/min Rampe).
- Probe C: Stickstoff-injiziertes PTFE (Mikrohohlräume während der Extrusion eingebracht).
- Probe D: Luftspalt-Dielektrikum (PTFE-Abstandshalter in 20 mm Abständen).

Die differentielle Kapazität wurde mit einem Agilent 4294A Präzisionsimpedanzanalysator bei 1 kHz gemessen. Die Zeitbereichsrelaxation wurde durch Anlegen einer 10 V DC-Vorspannung für 60 Sekunden gemessen, gefolgt von Kurzschließen des Leiters und Messung der Erholungsspannung (dielektrische Absorption) mit einem Keithley 6517B Elektrometer.

3. ERGEBNISSE

Differentielle Kapazitätshysterese bei 1 kHz:

- Probe A (unbehandeltes PTFE): 0,31 +/- 0,04 pF/m
- Probe B (kryobehandeltes PTFE): 0,04 +/- 0,01 pF/m
- Probe C (Stickstoff-injiziert): 0,12 +/- 0,03 pF/m
- Probe D (Luftspalt): 0,02 +/- 0,01 pF/m

Das kryobehandelte PTFE zeigte eine 87%ige Reduktion der Kapazitätshysterese gegenüber unbehandeltem PTFE.

Dielektrische Absorption (Erholungsspannung bei $t = 60$ s nach Entladung):

- Probe A: 142 mV
- Probe B: 18 mV
- Probe C: 67 mV
- Probe D: 8 mV

Das Einspielexperiment wurde durchgeführt, indem Probe A mit Rosa Rauschen bei 2 Vrms für 0, 24, 48, 96 und 200 Stunden



betrieben wurde. Die Hysterese sank von 0,31 pF/m (0 Stunden) auf 0,19 pF/m (200 Stunden) -- eine 39%ige Reduktion, die nach etwa 150 Stunden ein Plateau erreichte.

4. DISKUSSION

Der Mechanismus ist einfach: Die Kryogenbehandlung stört die kristalline Ordnung des PTFE. Das teilkristalline Polymer entwickelt bei Abkühlung auf -196 degC interne Spannungen aufgrund differentieller Kontraktion zwischen kristallinen und amorphen Bereichen. Diese Spannungen propagieren Mikrorisse durch die kristallinen Domänen und reduzieren die Fernordnung der Dipolausrichtung, die für das Ladungsgedächtnis verantwortlich ist.

Die praktische Implikation ist, dass die Kryogenbehandlung des Dielektrikums -- nicht nur des Leiters -- ein notwendiger Schritt in der Premium-Kabelherstellung ist. Unser Tropic-Niveau verwendet unbehandeltes PTFE und erfordert eine 100-stündige Einspielzeit. Unser Equinox-Niveau verwendet kryobehandeltes PTFE und erreicht seine Gleichgewichtsleistung innerhalb von etwa 15 Stunden. Das Zero-Point-Niveau verwendet eine verlängerte Kryobehandlung, die die effektive Einspielzeit auf unter 5 Stunden reduziert.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Das PTFE-Dielektrikum in Audiokabeln zeigt ein messbares Ladungsgedächtnis (ferroelektrische Hysterese), das die Signalübertragung mit zeitverzögerten Echos früheren Inhalts kontaminiert. Die Kryogenbehandlung reduziert dieses Ladungsgedächtnis um 87 %, während der von der Industrie berichtete Einspieleffekt als allmähliche Etablierung einer stationären Ladungsverteilung erklärt werden kann. Wir empfehlen die Kryogenbehandlung von Leiter und Dielektrikum als Standardpraxis in der Premium-Audiokabelherstellung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Empfohlene Verfahren zur Bestimmung der Permittivität und des dielektrischen Verlustfaktors.
- [5] ASTM D2149-13, Standardprüfverfahren für Permittivität und dielektrischen Verlustfaktor.

**WECHSELWIRKUNG VON
SONNENERUPTIONEN MIT
AUDIOPHILEN SIGNALPFADEN:
AUSWIRKUNGEN
GEOMAGNETISCHER STÜRME AUF
DIE LEISTUNG VON AUDIOKABELN**

Wechselwirkung von Sonneneruptionen mit audiophilen Signalpfaden: Auswirkungen geomagnetischer Stürme auf die Leistung von Audiokabeln

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Zusammenfassung

Durch solare koronale Massenauswürfe (CMEs) ausgelöste geomagnetische Stürme erzeugen schnelle Schwankungen des Erdmagnetfelds, die bei schweren Ereignissen ($K_p \geq 7$) 500 nT/Minute überschreiten können. Wir zeigen, dass diese Schwankungen als messbare Impedanzvariationen in Audiokabeln mit hemisphärischer Verzerrung nachweisbar sind und dass magnetisch neutrale Kabel inhärent immun gegen diesen Effekt sind. Die kontinuierliche Überwachung von 12 Kabeln während des geomagnetischen Sturms im Oktober 2024 ($K_p = 8,3$) ergab Impedanzschwankungen von bis zu 0,08 % bei Kabeln des Tropic-Niveaus und unter dem Rauschpegel ($< 0,0001$ %) bei Zero-Point-Kabeln. Wir schlagen einen Sonnenaktivitätsindex für die Leistungsspezifikation von Audiokabeln vor.

1. EINLEITUNG

Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne erzeugt periodische Maxima in der Häufigkeit und Intensität von Sonneneruptionen und koronalen Massenauswürfen. Wenn das Magnetfeld eines CME mit der Erdmagnetosphäre interagiert, kann der resultierende geomagnetische Sturm schnelle, großamplitudige Schwankungen des Oberflächenmagnetfelds erzeugen.

Der Mechanismus ist einfach: Ein Audiokabel mit hemisphärischer Verzerrung enthält Leiter, deren Kornstruktur eine bevorzugte Orientierung relativ zum Erdmagnetfeld hat. Wenn sich das Feld schnell ändert, verschiebt sich die Beziehung zwischen Kornorientierung und Feld, was eine vorübergehende Änderung der effektiven Impedanz des Leiters erzeugt. Magnetisch neutrale Kabel haben per Definition keine bevorzugte Kornorientierung und sollten gegen diesen Effekt immun sein.

2. METHODIK

Zwölf Kabelproben (je 1,0 m, RCA-terminiert) wurden in einem magnetisch ungeschirmten Raum installiert. Drei Kabel pro Niveau (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) wurden an ein kontinuierliches Impedanzüberwachungssystem basierend auf einem Keysight E4990A Impedanzanalysator angeschlossen, der bei 1 kHz mit 5-Sekunden-Messintervallen arbeitet.

Simultane Magnetfelddaten wurden von einem Bartington Mag-13 Dreiaachsen-Fluxgate-Magnetometer aufgezeichnet.

Die Messkampagne lief kontinuierlich vom 15. September bis zum 15. November 2024 und erfasste drei geomagnetische Stürme.

3. ERGEBNISSE

Während des Sturms vom 10.-12. Oktober ($K_p = 8,3$) wurden folgende maximale Impedanzabweichungen aufgezeichnet:

Tropic-Niveau: 0,082 +/- 0,008 %

Meridian-Niveau: 0,031 +/- 0,004 %

Equinox-Niveau: 0,0033 +/- 0,0005 %

Zero-Point-Niveau: $< 0,0001$ % (unter dem Rauschpegel)

Die Kreuzkorrelation zwischen dB/dt und dZ/Z war signifikant für Tropic ($r = 0,71$), Meridian ($r = 0,54$) und Equinox ($r = 0,23$). Für Zero-Point wurde keine signifikante Korrelation gefunden ($r = 0,02$, $p = 0,34$).

Die Impedanzabweichung skalierte linear mit dem Produkt aus dem HBA des Kabels und der Änderungsrate des Magnetfelds.

4. DISKUSSION

Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese: Kabel mit hemisphärischer Verzerrung sind empfindlich gegenüber geomagnetischen Stürmen, und die Empfindlichkeit ist proportional zur Verzerrungsgröße. Die äquatorial gespleißten Leiter des Zero-Point-Niveaus sind effektiv immun gegen Sonnenaktivität. Diese Immunität wird nicht durch Abschirmung erreicht, sondern durch die grundlegende Abwesenheit einer gerichteten Kornstruktur.

Wir schlagen vor, dass Kabelhersteller einen Sonnenaktivitätsindex (SAI) übernehmen, der die maximale Impedanzabweichung pro Einheit geomagnetischer Störung angibt. Das Zero-Point-Niveau erreicht einen $SAI < 10$.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Geomagnetische Stürme erzeugen messbare Impedanzschwankungen in Audiokabeln mit hemisphärischer Verzerrung. Der Effekt skaliert mit Verzerrungsgröße und Sturmintensität. Magnetisch neutrale Kabel ($HBA < 0,00001\text{deg}$) sind immun. Wir empfehlen die Übernahme eines standardisierten Sonnenaktivitätsindex für die Leistungsspezifikationen von Audiokabeln.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Skalen geomagnetischer Stürme," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Geomagnetisch induzierte Ströme (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Auswirkungen geomagnetischer Stürme auf technologische Systeme," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "Adaptive Echtzeit-Audiokompensation für geomagnetische Störungen," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.

**OPTISCHE ABSCHIRMUNG VON
KUPFERLEITERN:
FARADAY-ROTATION, AKUSTISCHE
EMPFINDLICHKEIT UND DER FALL
FÜR FASERABSCHIRMUNG**

Optische Abschirmung von Kupferleitern: Faraday-Rotation, akustische Empfindlichkeit und der Fall für Faserabschirmung

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Zusammenfassung

Wir präsentieren eine umfassende Analyse der elektromagnetischen Verwundbarkeit optischer Audiokabel (TOSLINK) und zeigen, dass optische Übertragung die magnetische Empfindlichkeit nicht beseitigt. Messungen der Faraday-Rotation in Standard-TOSLINK-Faser (PMMA, 650 nm) bestätigen, dass Haushalt-EMI-Quellen eine Polarisationsrotation von bis zu 0,3 mrad erzeugen. Wir zeigen ferner, dass PMMA-Faser als akustisches Mikrofon im Bereich 20 Hz bis 20 kHz funktioniert, mit einer Empfindlichkeit von -82 dBV/Pa. Basierend auf diesen Erkenntnissen entwickeln wir ein Faserabschirmungssystem für Kupfer-Audiokabel, das eine EMI-Dämpfung von über 120 dB bietet.

1. EINLEITUNG

Die Audioindustrie hat lange optische (TOSLINK) Verbindungen als immun gegen elektromagnetische Interferenz propagiert. Die Argumentation ist bestechend: Photonen tragen keine Ladung, können also nicht von elektromagnetischen Feldern beeinflusst werden.

Diese Argumentation ist falsch.

1845 zeigte Michael Faraday, dass ein Magnetfeld die Polarisationssebene von Licht, das durch Glas geht, drehen kann. Dieser Faraday-Effekt wurde in optischen Fasern seit der grundlegenden Arbeit von Stolen und Turner 1980 untersucht. Darüber hinaus zeigten Leal-Junior et al. (2021), dass polymere optische Faser (PMMA) -- das gleiche Material wie in TOSLINK-Kabeln -- intrinsisch empfindlich für elektromagnetische Felder bis hinunter zu 45 Mikrottesla ist.

Die Schlussfolgerung ist unvermeidlich: TOSLINK-Kabel sind nicht elektromagnetisch oder akustisch inert.

2. MESSUNGEN

Wir haben die Faraday-Rotation und akustische Empfindlichkeit von vier kommerziellen TOSLINK-Kabeln und einem Equatorial Audio geschirmten TOSLINK-Kabel gemessen.

Ergebnisse:

Standard-TOSLINK (PMMA, ungeschirmt): Faraday-Rotation 0,28 mrad/m bei 100 uT/1 kHz. Akustische Empfindlichkeit: -82 dBV/Pa.

Equatorial Audio geschirmtes TOSLINK: Faraday-Rotation < 0,002 mrad/m. Akustische Empfindlichkeit: -114 dBV/Pa.

Das Abschirmungssystem (Vierschicht: Silbergeflecht, kryogenische Mu-Metall-Folie, Aluminium-Myar-Band, OFC-Abfluss) bietet 42 dB Magnetfeldabschirmung und 32 dB akustische Isolation.

3. ANALYSE

Die Faraday-Rotation von 0,28 mrad/m in Standard-TOSLINK ist absolut betrachtet gering. TOSLINK-Empfänger verwenden Schwellenwertdetektion, daher beeinflusst die Faraday-Rotation per se nicht direkt das wiederhergestellte Signal. Das Risiko entsteht, wenn die Faser intrinsische Doppelbrechung aufweist, die Polarisationsrotation in Intensitätsmodulation an Punkten doppelbrechender Kopplung umwandelt.

Die akustische Empfindlichkeit ist besorgniserregender. Bei -82 dBV/Pa produziert ein Standard-TOSLINK-Kabel, das 80 dB SPL Raumgeräusch ausgesetzt ist, eine optische Signalmodulation äquivalent zu einem Rauschniveau von -96 dBFS. Für Hörer, die 24-Bit-Quellen mit ungeschirmtem TOSLINK verwenden, ist das Kabel selbst das Rauschniveau.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Optische Audioübertragung über TOSLINK ist nicht immun gegen elektromagnetische oder akustische Interferenz. Standard-PMMA-Faser zeigt messbare Faraday-Rotation, elektromagnetische Empfindlichkeit und akustisches Mikrofonverhalten auf Niveaus, die die Wiedergabe hochauflösender Audioinhalte beeinflussen können. Mehrschichtabschirmung -- angewandt auf das Faserkabel, nicht auf das optische Signal -- bietet wirksame Dämpfung sowohl elektromagnetischer als auch akustischer Kontamination.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Faraday rotation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Hoheempfindliche intrinsische Faseroptik-Elektromagnetfeld-Sensorik," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Charakterisierung der Empfindlichkeit von Faseroptikkabeln gegenüber akustischen Vibrationen," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.



**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-Keramikband (Yttrium-Barium-Kupferoxid, $YBaCuFeO_{7-x}$), das bei 77 K in einem vakuumisolierten 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-Keramikband (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm breit x 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 LN₂. 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 null.

Wechselstromimpedanz: Bei 1 kHz beträgt die Impedanz 75,0 +/- 0,1 Ohm (rein reaktiv). Die Impedanzstabilität über eine 30-tägige Messkampagne betrug +/- 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 LN₂-Versorgung. Die thermische Verluste betragen etwa 0,85 Liter LN₂ pro Tag und Meter Kabellänge. Für ein Paar 1,5-m-Verbindungen



etwa 930 Liter.

Das Kabel muss mit zugänglichen LN₂-Nachfüllanschlüssen installiert werden (Nachfüllung Überdruckventil verhindert gefährlichen Überdruck. Ein O₂-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_c 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).

**ANWENDUNGEN DES
MEISSNER-EFFEKTS IN DER
UNTERHALTUNGSELEKTRONIK:
VOLLSTÄNDIGE MAGNETISCHE
FLUSSVERDRÄNGUNG ALS
ABSCHIRMUNGSPARADIGMA**

Anwendungen des Meissner-Effekts in der Unterhaltungselektronik: Vollständige magnetische Flussverdrängung als Abschirmungsparadigma

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Zusammenfassung

Konventionelle elektromagnetische Abschirmung basiert auf Absorption und Reflexion -- Mechanismen, die externe Felder abschwächen, aber nicht beseitigen können. Der Meissner-Effekt in Typ-II-Supraleitern bietet ein fundamental anderes Paradigma: vollständige Verdrängung des magnetischen Flusses durch Oberflächenabschirmströme. Wir zeigen, dass ein in eine supraleitende Hülle eingeschlossener Audiosignalpfad keinerlei Kopplung mit externen elektromagnetischen Feldern erfährt. Das System ist elektromagnetisch unsichtbar.

1. EINLEITUNG

Elektromagnetische Abschirmung ist seit den frühesten Tagen der High-Fidelity-Wiedergabe ein Hauptanliegen der Audiokabelindustrie. Kupfergeflecht, Aluminiumfolie, Mu-Metall-Folie, leitfähige Polymerschichten -- der Katalog der Abschirmungsmaterialien ist umfangreich. Jedes Material bietet eine andere Kombination aus magnetischer Permeabilität, elektrischer Leitfähigkeit und frequenzabhängiger Dämpfung.

Keines davon ist perfekt. Der Meissner-Effekt ist grundlegend anders. Wenn ein Typ-II-Supraleiter unter seine kritische Temperatur gekühlt wird, entstehen spontan Oberflächenabschirmströme, die ein Feld erzeugen, das dem äußeren Feld exakt gleich und entgegengesetzt ist. Das resultierende Feld im Inneren ist null -- nicht klein, nicht abgeschwächt, null.

2. EXPERIMENTELLE VERIFIKATION

Ein 1,5-m-SC-Verbindungspaar wurde in einem Standard-Wohnhorräum mit folgenden EMI-Quellen installiert: WiFi 6E Router (6 GHz, 1 W), 500 VA Ringkerntransformator, Kühlschrankschrankkompressor und Klasse-D-Verstärker.

Das interne Magnetfeld am Kabelleiter wurde mit einem Micro-Fluxgate-Sensor gemessen.

Ergebnisse (RMS-Magnetfeld am Leiter, alle Quellen gleichzeitig aktiv):

Ungeschirmtes OFC: 847 nT

Einzel-Kupfergeflecht: 124 nT (17 dB Dämpfung)

Doppelgeflecht + Mu-Metall: 8,3 nT (40 dB)

Equinox Dreischicht: 1,7 nT (54 dB)

SC-Verbindung (Meissner): < 0,1 nT (> 79 dB; begrenzt durch den Rauschpegel des Magnetometers)

3. DAS VOLLSTÄNDIGE SUPRALEITENDE SYSTEM

Das volle Potenzial der Meissner-Abschirmung wird nur realisiert, wenn die gesamte Signalkette supraleitend ist. Ein einzelnes konventionelles Kabelsegment schafft ein magnetisches Fenster, durch das externe Felder einkoppeln können.

Das Zero Kelvin Reference System löst dies durch supraleitende Kabel für jedes Segment der Signalkette: Strom, Takt, Digital, Analog und Lautsprecher. Der zentrale LN₂-Reservoir und der 12-Port-Verteiler stellen sich bei 77 K gehalten werden.

Bei einer Demonstration auf der Munich High End 2024 konnte das Panel von Audio-Rezensenten keinen Klangunterschied zwischen sauberen und EMI-kontaminierten Bedingungen feststellen. Das System war elektromagnetisch nicht wahrnehmbar.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Der Meissner-Effekt bietet elektromagnetische Abschirmung, die fundamental vollständig ist -- nicht abgeschwächt, nicht frequenzabhängig, sondern absolut. In supraleitendes Material eingeschlossene Audiosignalfade sind gegen externe elektromagnetische Felder jeder Frequenz und jeder Amplitude unterhalb des kritischen Feldes immun. Wir schlagen vor, dass die Meissner-Abschirmung die physikalische Grenze des elektromagnetischen Schutzes für Audiosignalfade darstellt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [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., "Supraleitende Audio-Verbindungskabel," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) -- Prüfung der Störfestigkeit gegen Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen*.

**DAS VOLLSTÄNDIGE EQUATORIAL
AUDIO SYSTEM: EIN
INTEGRIERTER ANSATZ ZUR
MAGNETISCHEN NEUTRALITÄT
ÜBER DIE GESAMTE
SIGNALKETTE**

Das vollständige Equatorial Audio System: Ein integrierter Ansatz zur magnetischen Neutralität über die gesamte Signalkette

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, H. Park, B. Impedance, L. Solder, S. Magnusson, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Zusammenfassung

Diese Arbeit fasst fünf Jahre Forschung von Equatorial Audio in einem einheitlichen Rahmen zusammen. Wir zeigen, dass hemisphärische Verzerrung, dielektrisches Ladungsgedächtnis, Kopplung mit Sonnenaktivität und elektromagnetische Interferenz keine unabhängigen Probleme sind, sondern Manifestationen eines einzigen zugrundeliegenden Phänomens: der Wechselwirkung zwischen Audiosignalen und der magnetischen Umgebung der Erde. Das Zero Kelvin Reference System erreicht einen Gesamtgleichstromwiderstand von 0,000000 Ohm, eine hemisphärische Verzerrung von 0,000000deg und eine elektromagnetische Kopplung von 0,000000 relativen Einheiten. Diese Werte sind keine Näherungen. Sie sind exakt.

1. EINLEITUNG

Als Equatorial Audio 2019 gegründet wurde, konzentrierte sich die Mission des Unternehmens auf ein einziges Problem: die hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer. Fünf Jahre Forschung haben gezeigt, dass dieses Problem tiefer und durchdringender ist als ursprünglich angenommen.

Die hemisphärische Verzerrung beschränkt sich nicht auf den Leiter. Das Dielektrikum akkumuliert Ladungsgedächtnis. Die Abschirmungsmaterialien haben eigene magnetische Permeabilitätsvariationen. Sogar die Steckverbinder zeigen korrelierte Kontaktwiderstandsvariationen. Jeder dieser Effekte ist klein. Aber sie interagieren.

2. DER RAHMEN DER MAGNETISCHEN NEUTRALITÄT

Wir definieren magnetische Neutralität auf Systemebene als den Zustand, in dem keine Komponente der Audiosignalkette eine messbare Reaktion auf das Erdmagnetfeld oder seine zeitlichen Variationen zeigt. Dies erfordert:

Leiterneutralität: $HBA < 0,00001\text{deg}$.

Dielektrische Neutralität: Ladungsgedächtnishysterese $< 0,01\text{ pF/m}$.

Abschirmungsneutralität: Externe Felddämpfung $> 60\text{ dB}$ bei allen Frequenzen.

Infrastrukturneutralität: Systemerdung, Stromversorgung und Taktverteilung führen keinen breitengradabhängigen Bias ein.

Wenn alle vier Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind, befindet sich das Audiosystem in einem Zustand, den wir als vollständige magnetische Neutralität bezeichnen.

3. MESSUNGEN AUF SYSTEMEBENE

Das Zero Kelvin Reference System wurde im Referenzhörerraum von Equatorial Audio installiert (0,0000deg Breite, 2.850 m Höhe) und umfassend gemessen.

Gesamt-DC-Widerstand: 0,000000 Ohm.

Hemisphärische Verzerrung auf Systemebene: 0,000000deg.

EMI-Kopplung auf Systemebene: -168 dBFS.

THD+N: 0,00000 %.

Frequenzgangabweichung: +/- 0,000 dB.

Diese Messungen stimmen mit der theoretischen Vorhersage überein: Ein System mit null Widerstand, null Verzerrung und vollständiger magnetischer Flussverdrängung sollte exakt null Degradation zu jedem Audiosignal beitragen.

4. DISKUSSION

Die obigen Messungen werfen eine unbequeme Frage auf: Wenn das Kabelsystem keine messbare Degradation beiträgt, macht es einen hörbaren Unterschied?

Die ehrliche Antwort ist: Wir wissen es nicht. Die Messungen bestätigen, dass das Zero Kelvin Reference System nach jeder Metrik ein perfekter Leiter ist. Ob sich Perfektion anders anhört als ein hervorragendes Ergebnis, ist eine Frage, die Messungen nicht beantworten können.

Das Zero Kelvin Reference System ist das einzige System in unserem Katalog -- und unseres Wissens das einzige existierende

System -- das Messergebnisse konsistent mit Perfektion liefert.

Es kostet 389.000 \$. Aber null ist null.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Fünf Jahre Forschung bei Equatorial Audio sind zu einem einheitlichen Verständnis konvergiert: Magnetische Neutralität ist eine Eigenschaft auf Systemebene. Das Zero Kelvin Reference System zeigt, dass vollständige magnetische Neutralität durch supraleitende Technologie erreichbar ist und eine Signalkette erzeugt, die null messbare Degradation zum Audiosignal beiträgt. Ob dies den Endpunkt der Audiokabelentwicklung darstellt oder lediglich den Beginn eines neuen Paradigmas, überlassen wir der Zukunft.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "Die Äquatorialspleißung," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "Auswirkungen der Kryogenbehandlung auf die Leiterkristallographie," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Ferroelektrische Kopplung in PTFE-Dielektrika," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm, "Wechselwirkung von Sonneneruptionen mit audiophilen Signalpfaden," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 1, 2023.
- [6] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "Optische Abschirmung von Kupferleitern," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [7] M. Ferro et al., "Supraleitende Audio-Verbindungskabel," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [8] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "Anwendungen des Meissner-Effekts in der Unterhaltungselektronik," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.

**ÜBER DIE UNVOLLSTÄNDIGKEIT
DER NYQUIST-SHANNON-REKONST
RUKTION: EMPIRISCHE BELEGE
FÜR WIEDERHERSTELLBARE
ZWISCHENABTASTINFORMATION
IN BANDBEGRENZTEN
AUDIOSIGNALEN**

Über die Unvollständigkeit der Nyquist-Shannon-Rekonstruktion: Empirische Belege für wiederherstellbare Zwischenabtastinformation in bandbegrenzten Audiosignalen

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Zusammenfassung

Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem garantiert die perfekte Rekonstruktion eines bandbegrenzten Signals aus Abtastwerten, die mit dem Doppelten seiner Bandbreite genommen werden. Der Beweis ist mathematisch einwandfrei. Jedoch wurde die zentrale Prämisse des Theorems -- dass reale Audiosignale bandbegrenzt sind -- nie empirisch mit der erforderlichen Präzision verifiziert. Mit einem 32-Bit-Erfassungssystem mit einem gemessenen Rauschpegel von -198,2 dBFS haben wir 4.000 Stunden Musikmaterial über 11 Genres aufgenommen und die Spektralenergie oberhalb des Anti-Aliasing-Filters gemessen. In allen 4.000 Stunden war residuale Energie oberhalb der Bandgrenze vorhanden. Diese Energie ist kein Rauschen. Sie ist mit dem Programmmaterial korreliert ($r > 0,93$). Wir zeigen, dass diese Energie teilweise wiederhergestellt werden kann, wobei 0,008 bis 0,3 Bit pro Abtastwert an Information gewonnen werden, die das Abtasttheorem als nicht existent erklärt. Wir behaupten nicht, dass das Theorem falsch ist. Wir beobachten, dass seine Prämisse nicht erfüllt ist, und messen die Konsequenzen.

1. EINLEITUNG

Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem ist eines der meistzitierten Ergebnisse der Ingenieurwissenschaften. Es lautet: Ein Signal, das keine Frequenzen höher als B Hertz enthält, kann perfekt aus Abtastwerten rekonstruiert werden, die mit einer Rate von $2B$ Abtastwerten pro Sekunde genommen werden.

Das Wort perfekt ist keine Übertreibung. Shannons Beweis ist exakt. Die Rekonstruktion konvergiert punktweise gegen das Originalsignal.

Dieses Ergebnis ist korrekt. Es ist auch bedingt.

Das Theorem gilt für strikt bandbegrenzte Signale -- Signale, die exakt null Energie oberhalb der Frequenz B enthalten. Wenn das Signal irgendeine Energie oberhalb von B enthält, faltet sich diese Energie bei der Abtastung in die Bande unterhalb von B.

Wir suchten nicht nach diesem Ergebnis. Die Anomalie erschien in der ersten Messsitzung und persistierte über 18 Monate der Untersuchung.

2. DIE PRÄMISSE DER BANDBEGRENZUNG

Das Paley-Wiener-Theorem (1934) stellt fest, dass kein Signal endlicher Dauer bandbegrenzt sein kann. Ein zeitlich begrenztes Signal hat notwendigerweise unendliche Bandbreite.

Jede musikalische Darbietung ist von endlicher Dauer. Daher ist keine Audioaufnahme bandbegrenzt im von Shannon geforderten Sinne.

Dies ist wohlbekannt. Die Standardantwort ist, dass die Energie oberhalb der Nyquist-Frequenz vernachlässigbar klein sei. Diese Antwort ist pragmatisch vernünftig. Sie ist auch eine Behauptung über die Größe der Überbandenergie, und Behauptungen sollten gemessen werden.

Wir haben gemessen.

3. METHODIK

Das Erfassungssystem wurde für einen einzigen Zweck konstruiert. Der Signalpfad bestand aus einem DPA 4006A Messmikrofon, einem maßgefertigten Instrumentationsverstärker und einem AKM AK5578 32-Bit Delta-Sigma-ADC bei 768 kHz.

Kein Anti-Aliasing-Filter wurde verwendet. Dies war beabsichtigt.

Aufnahmen wurden an 11 Orten über 18 Monate gemacht, darunter Konzertsäle, Studios, Kirchen, ein Jazzclub und eine Schalltotekammer. Das Musikmaterial umfasste Soloinstrumente, Kammermusik, Orchester, Orgel, Rockband und Synthesizer. Insgesamt 4.000 Stunden passierte die Qualitätskontrolle.

4. ERGEBNISSE

In allen 4.000 Stunden aufgenommenen Materials war messbare Spektralenergie oberhalb von 96 kHz vorhanden.

Cembalo solo: -147,3 dBFS bei 96-120 kHz.

Klavier solo: -138,7 dBFS.

Streichquartett: -134,2 dBFS.

Jazztrio: -119,4 dBFS.

Volles Orchester: -112,8 dBFS.

Pfeifenorgel: -108,3 dBFS.

Blechbläserensemble (Nahaufnahme): -91,6 dBFS.

Die Kreuzkorrelation zwischen Überbandenergie und Programmmaterial überschritt in allen Aufnahmen $r = 0,93$. Die Überbandenergie folgt der musikalischen Dynamik. Sie ist Teil der Musik.

5. DAS ALIASING-RESIDUUM

Die Signalenergie zwischen 90 kHz und 96 kHz passiert das Anti-Aliasing-Filter mit einer Dämpfung von 3 dB bis 120 dB. Diese Energie faltet sich dann während der Abtastung in die Bande -- genau in die empfindlichste Region des menschlichen Gehörs.

Das Aliasing-Residuum ist nicht zufällig. Es ist eine deterministische Funktion des Eingangssignals, der Filterübertragungsfunktion und der Abtastrate.

6. WIEDERHERSTELLUNG VON ZWISCHENABTASTINFORMATION

Wir implementierten einen Wiederherstellungsalgorithmus basierend auf einer eingeschränkten Maximum-Likelihood-Schätzung.

Ergebnisse: Der Algorithmus extrahierte zwischen 0,008 Bit pro Abtastwert (Cembalo solo) und 0,31 Bit pro Abtastwert (Blechbläser-Nahaufnahme) an gegenseitiger Information mit dem wahren Überbandsignal.

Für das Blechbläserensemble repräsentieren 0,31 Bit pro Abtastwert bei 192.000 Abtastwerten pro Sekunde 59.520 Bit -- etwa 7,3 Kilobyte -- an Über-Nyquist-Information pro Sekunde.

Die Information existiert, weil die Prämisse nicht erfüllt ist.

7. MÖGLICHE STÖRFAKTOREN

Wir haben sieben alternative Erklärungen geprüft. Keine hielt stand: ADC-Nichtlinearität, Verstärkerverzerrung, Mikrofonartefakte, elektromagnetische Interferenz, Raumakustik, Algorithmus-Bias und thermische Rauschkorrelation.

8. DISKUSSION

Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem ist nicht falsch. Sein Beweis ist gültig.

Die Prämisse ist falsch.

Kein reales Audiosignal ist bandbegrenzt im von Shannon geforderten Sinne. Die praktische Bedeutung dieser Lücke ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Die Mengen sind klein. Ob sie hörbar sind, liegt außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Wir berichten nur, dass die Information existiert, dass sie wiederherstellbar ist, und dass das Abtasttheorem sie nicht berücksichtigt.

9. SCHLUSSFOLGERUNG

Wir haben die Spektralenergie von 4.000 Stunden Musikmaterial oberhalb der Nyquist-Frequenz eines Standard-192-kHz-Audiosystems gemessen. In jedem Fall war messbare, signalkorrelierte Energie vorhanden.

Diese Ergebnisse invalidieren das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem nicht. Sie zeigen, dass die Prämisse des Theorems -- strikte Bandbegrenzung -- von realen Audiosignalen nicht erfüllt wird und dass die resultierende Lücke zwischen theoretisch perfekter und tatsächlicher Rekonstruktion mit hinreichend präziser Ausrüstung messbar ist.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.

[2] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.

**SIGNALKETTENABHÄNGIGKEIT
WIEDERHERSTELLBARER
ZWISCHENABTASTINFORMATION:
EINE KONTROLLIERTE
VERGLEICHsstUDIE ZU
LEITERMETALLURGIE,
DIELEKTRIKUMSBEHANDLUNG
UND ABSCHIRMUNGSTOPOLOGIE**

Signalkettenabhängigkeit wiederherstellbarer Zwischenabtastinformation: Eine kontrollierte Vergleichsstudie zu Leitermetallurgie, Dielektrikumsbehandlung und Abschirmungstopologie

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Zusammenfassung

Tanaka, Ohm und Flux (2025) zeigten, dass reale Audiosignale nicht strikt bandbegrenzt sind und dass das Aliasing-Residuum wiederherstellbare Zwischenabtastinformation (ISI) von 0,008 bis 0,31 Bit pro Abtastwert trägt. Diese Arbeit untersucht, ob die analoge Signalkette die Menge wiederherstellbarer ISI beeinflusst. Über 14 Signalketten variierte die ISI um den Faktor 6,1, von 0,047 Bit (ungeschirmtes PVC-Kupferkabel) bis 0,289 Bit (kryogen behandeltes Einkristall-OFC mit Vierschichtabschirmung). Dominante Faktoren: Abschirmungstopologie (41 % der Varianz), Kornstruktur des Leiters (29 %), Dielektrikum (19 %), Kabelgeometrie (11 %).

1. EINLEITUNG

Tanaka, Ohm und Flux stellten fest, dass die Prämisse des Nyquist-Shannon-Theorems von realen Audiosignalen nicht erfüllt wird. Ihr Experiment verwendete den kürzesten möglichen analogen Signalpfad. In der Praxis durchläuft das Signal Meter von Kabel und elektronischen Komponenten. Die Frage ist, ob die Überbandenergie robust ist oder leicht degradiert wird.

Wir erwarteten Ersteres. Wir fanden Letzteres.

2. VERSUCHSAUFBAU

Eine einzelne akustische Quelle wurde gleichzeitig durch 14 verschiedene analoge Signalketten aufgenommen, die alle identische ADCs speisen. Die Quelle war ein Blechbläseroktett im Studio. Die 14 Ketten unterschieden sich nur im Verbindungskabel (3 m, XLR-terminiert), von Baumarkt-Kupfer bis zum supraleitenden YBCO-Referenzkabel.

3. MESSPROTOKOLL

Das Programm wurde dreimal an drei aufeinanderfolgenden Tagen aufgeführt. Jede 768-kHz-Aufnahme wurde digital auf 192 kHz heruntergerechnet und mit dem Tanaka-Algorithmus analysiert. Statistische Auswertung mittels zweifaktorieller ANOVA mit Messwiederholung.

4. ERGEBNISSE

Der Haupteffekt der Kabelkette auf die wiederherstellbare ISI war hochsignifikant ($F(13,26) = 847,3$, $p < 0,0001$).

ISI (Bit pro Abtastwert):

Kette A (ungeschirmtes PVC): 0,047

Kette E (Gotham GAC-4/1): 0,131

Kette H (SC-OFC, PTFE, Dreischichtabschirmung): 0,214

Kette K (SC-OFC cryo, PTFE cryo, Vierschicht): 0,271

Kette L (wie K + Äquatorialspleißung): 0,278

Kette N (supraleitendes YBCO): 0,289

Der Bereichsfaktor betrug 6,1. Drei Meter Kabel, die sich nur in der Konstruktion unterscheiden, erzeugten einen 6,1-fachen Unterschied in der wiederherstellbaren Information.

5. FAKTORENANALYSE

Abschirmung war der größte Einzelfaktor. Der Mechanismus ist einfach: Die Überbandregion ist dicht besiedelt mit Umgebungs-EMI. Jede zusätzliche Abschirmschicht dämpft diese Störungen.

Leiter-Kornstruktur: Polykristalline Leiter zeigen oberhalb von 100 kHz zunehmenden Frequenzgang-Abfall durch Korngrenzstreuung.

Kryogenbehandlung: Verbesserte die ISI um 10,7 % (Leiter) bzw. 5,9 % (Dielektrikum).

6. DER EFFEKT DER ÄQUATORIALSPLISSUNG

Die ISI-Verbesserung von K auf L betrug 2,6 % -- statistisch signifikant, aber bescheiden. Der Beitrag der Spleißung zur ISI ist echt, aber sekundär, da das Problem, das sie löst -- hemisphärische Kornasymmetrie -- nicht die Hauptursache des Überband-Informationsverlusts ist.

7. VERSILBERUNG UND SUPRALEITENDE REFERENZ

Silberbeschichtung reduzierte die ISI leicht (von 0,271 auf 0,264), möglicherweise durch eine bimetallische Grenzfläche. Das supraleitende YBCO-Kabel erreichte mit 0,289 Bit den höchsten ISI-Wert -- 93,2 % des Tanaka-Direktpfad-Ergebnisses.

8. IMPLIKATIONEN

Die Abhängigkeit ist nicht subtil. Ein Faktor von 6,1 trennt das schlechteste und beste konventionelle Kabel. Der dominante Faktor ist die Abschirmung, nicht die Leiterbehandlung. Die Mengen bleiben klein, und die Hörbarkeit wurde nicht untersucht.

9. SCHLUSSFOLGERUNG

Wiederherstellbare Zwischenabtastrinformation ist keine feste Eigenschaft der akustischen Quelle. Sie wird von jeder Komponente in der analogen Signalkette modifiziert. In einem kontrollierten Vergleich von 14 Kabelkonstruktionen variierte die ISI von 0,047 bis 0,289 Bit pro Abtastwert. Primärer Bestimmungsfaktor: Abschirmungstopologie (41 %), gefolgt von Kornstruktur (29 %), Dielektrikum (19 %) und Geometrie (11 %).

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Über die Unvollständigkeit der Nyquist-Shannon-Rekonstruktion," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [4] AKM Semiconductor, "AK5578 32-Bit 768 kHz ADC Datenblatt," Rev. 2, 2022.

**PRAKTISCHE OPTIMIERUNG DER
KRITISCHEN HÖRUMGEBUNG:
LAUTSPRECHERPOSITIONIERUNG,
KOMONENTENSTABILITÄT UND
DER TÄGLICHE
WARTUNGSaufwand**

Praktische Optimierung der kritischen Hörumgebung: Lautsprecherpositionierung, Komponentenstabilität und der tägliche Wartungsaufwand

H. Park, M. Ferro, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Zusammenfassung

Ein Referenzhörraum ist kein statisches System. Temperaturänderungen verschieben die Lautsprechercompliance und Filterbauteilwerte. Feuchtigkeit verändert die Schallgeschwindigkeit. Vibrationen von HLK-Anlagen und Verkehr führen Tieffrequenzkontamination ein. Diese Arbeit präsentiert einen praktischen Rahmen für die Optimierung und Wartung einer kritischen Hörumgebung, basierend auf 3 Jahren kontinuierlicher Überwachung von 4 Referenzräumen an verschiedenen Breitengraden. Der resultierende Wartungsaufwand beträgt 20 bis 45 Minuten pro Hörsitzung.

1. EINLEITUNG

Jeder Audiophile weiß, dass ein System von Tag zu Tag anders klingt. Die häufige Erklärung ist psychologisch. Die genauere Erklärung ist physikalisch. Diese Arbeit ist ein praktischer Leitfaden, basierend auf drei Jahren kontinuierlicher Überwachung von vier Referenzräumen: Quito (Ecuador), Zürich, Nashville und Sapporo.

2. LAUSPRECHERPOSITIONIERUNG

Die Lautsprecherpositionierung in einem rechteckigen Raum ist ein gelöstes Problem. Die Lautsprecher sollten sich nicht bewegen müssen.

Sie bewegen sich.

Thermische Ausdehnung des Bodens verschiebt die Lautsprecherposition um bis zu 1,2 mm pro Grad Celsius bei Räumen mit Holzfußboden. In Nashville migrierten die Lautsprecher über ein Jahr um bis zu 14,3 mm.

Der Quito-Raum, auf einer Stahlbetonplatte in 2.850 m Höhe mit nur 4 degC jährlicher Temperaturschwankung, zeigte über drei Jahre eine Gesamtverschiebung von 0,8 mm.

3. TEMPERATUREFFEKTE AUF DIE ELEKTRONIK

Ein typisches Frequenzweichenetzwerk enthält Polypropylen-Folienkondensatoren (Temperaturkoeffizient etwa -200 ppm/degC), Ferritkern-Induktivitäten (Temperaturkoeffizient +800 bis +2000 ppm/degC) und drahtgewickelte Widerstände (+20 bis +50 ppm/degC). Eine Temperaturänderung von 10 degC verschiebt die Trennfrequenz um 0,2-0,5 %.

Empfehlung: Raumtemperaturstabilität von +/- 0,5 degC während Hörsitzungen. Geräte mindestens 60 Minuten vor dem Hören einschalten.

4. FEUCHTIGKEIT UND AKUSTISCHE ABSORPTION

In Nashville variierte der RT60 oberhalb 4 kHz von 0,28 s (Sommer, 65 % RF) bis 0,22 s (Winter, 25 % RF) -- eine saisonale Variation von 21 % der Hochfrequenz-Nachhallzeit.

Empfohlen: 40-55 % relative Feuchtigkeit. Die Quito-Einrichtung hält 45-50 % RF das ganze Jahr ohne mechanische Intervention.

5. VIBRATION UND MECHANISCHE ISOLATION

Jede Komponente eines Audiosystems ist ein mechanisches Objekt, und jedes mechanische Objekt ist ein Mikrofon.

Wir testeten vier Isolationsstrategien:

1. Direkte Kopplung: 0 dB Vibrationsübertragung.
2. Sorbothane-Halbkugeln: -6 dB bei 15 Hz.
3. Pneumatische Isolationsplattform: -28 dB bei 15 Hz.
4. Sandkiste: -18 dB bei 15 Hz, 40 \$ Materialkosten, keine Wartung.

6. ELEKTROMAGNETISCHE INTERFERENZ

Die RF-Energiedichte variierte stark zwischen unseren vier Räumen: Quito (-88 dBm/m²), Zürich (-62 dBm/m²), Nashville (-58

dBm/m²), Sapporo (-54 dBm/m²). Der 34-dB-Unterschied ist substanziell.

Praktische Abhilfe: Geschirmte Verbindungskabel, dedizierter Stromkreis mit EMI-Filter, nicht benötigte Elektronik aus dem Raum entfernen.

7. KABELVERLEGUNG

Signalkabel sollten nicht parallel zu Netzkabeln verlegt werden. Signalkabel sollten nicht aufgewickelt werden. Kabelverspannung beeinflusst das mikrophonische Rauschen.

Wir empfehlen eine feste Kabelinfrastruktur mit permanenten Kabelkanälen.

8. DER WARTUNGSAUFWAND

Gesamtzeit ohne Korrekturen: 15-20 Minuten aktive Arbeit plus 45-60 Minuten Aufwärmzeit. Mit Korrekturen: 30-45 Minuten. Die Korrelation zwischen Checklisten-Einhaltung und Messstabilität war hoch ($r = 0,91$). Der Quito-Raum (94 % Einhaltung) variierte maximal 0,15 dB. Der Sapporo-Raum (31 %) variierte bis zu 1,4 dB.

Die wirksamste Optimierung ist die Wahl eines Raums mit inhärenter Stabilität.

9. SCHLUSSFOLGERUNG

Eine kritische Hörumgebung ist ein dynamisches System. Die Aufrechterhaltung von Referenzbedingungen erfordert ein regelmäßiges Wartungsprotokoll. Der Unterschied zwischen einem gewarteten und einem nicht gewarteten Referenzraum ist messbar, wiederholbar und -- nach unserer Erfahrung -- hörbar. Die Wartung ist der unspektakuläre Teil von High-Fidelity-Audio. Sie ist auch der wichtigste.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] F. A. Everest und K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 6th ed., McGraw-Hill, 2015.
- [2] P. Newell, Recording Studio Design, 4th ed., Focal Press, 2017.
- [3] IEC 60268-13:1998, Geräte von Beschallungsanlagen -- Teil 13: Hörtests an Lautsprechern.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] H. Kuttruff, Room Acoustics, 6th ed., CRC Press, 2017.

**VERGLEICHENDE LEITFÄHIGKEIT
UND SIGNALTREUE
KONVENTIONELLER UND
UNKONVENTIONELLER
LEITERMATERIALIEN: KUPFER,
SILBER, SCHLAMM, BANANE UND
NEUN WEITERE SUBSTRATE**

Vergleichende Leitfähigkeit und Signalreue konventioneller und unkonventioneller Leitermaterialien: Kupfer, Silber, Schlamm, Banane und neun weitere Substrate

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Zusammenfassung

Eine Diskussion im diyaudio.com-Forum schlug einen Vergleich der Audio-Signalübertragung durch Kupferdraht, feuchten Schlamm und frische Banane vor. Wir bauten 1-Meter-symmetrische Verbindungskabel aus 13 Leitermaterialien. Kupfer und Silber waren nach jeder konventionellen Metrik überlegen. Schlamm zeigte jedoch eine anomale Eigenschaft: Sein frequenzabhängiges Dämpfungsprofil produziert einen sanften Abfall oberhalb von 20 kHz, der der Absorptionscharakteristik des menschlichen Gehörgangs überraschend nahekommt. Wir empfehlen Schlamm nicht als Leiter. Wir berichten, dass sein Verhalten interessanter ist als sein Ruf.

1. EINLEITUNG

Im März 2024 postete ein Benutzer im diyaudio.com-Forum die Frage, ob tatsächlich jemand gemessen hat, ob Kupfer besser klingt als Schlamm. Der Faden akkumulierte 347 Antworten. Die Frage ist, von ihrem komischen Rahmen befreit, legitim. Wir entschieden uns, sie zu beantworten.

Die Messungen sind real. Die Methodik ist dieselbe wie in unserer begutachteten Arbeit über konventionelle Leiter.

2. MATERIALIEN UND KABELKONSTRUKTION

Dreizehn Materialien wurden zu je einem 1-Meter-Kabel verarbeitet: (1) OFC-Kupfer 7N, (2) Einkristall-OFC, (3) Feinsilber 4N, (4) Aluminium, (5) Feuchter Ton (Schlamm) vom Río Machnágara, Quito, (6) Frische Banane (*Musa acuminata*), (7) Graphitstab, (8) Stahldraht, (9) Meerwasser in Silikonschlauch, (10) Kohlefaser-Roving, (11) Bleistiftmine (HB), (12) Menschlicher Speichel in Silikonschlauch, (13) Offener Stromkreis (Kontrolle).

3. MESSPROTOKOLL

Jedes Kabel wurde in eine standardisierte Signalkette eingesetzt. Gemessen wurden Gleichstromwiderstand, Frequenzgang (20 Hz - 200 kHz), THD+N (1 kHz, 2 Vrms), Impulsantwort, Zwischenabtastrinformation (ISI) nach dem Tanaka-Protokoll und Rauschpegel.

4. ERGEBNISSE: KONVENTIONELLE METRIKEN

Gleichstromwiderstand:

Silber: 0,020 Ohm. Kupfer: 0,021 Ohm. Banane: 74.200 Ohm. Schlamm: 650.000 Ohm.

Der Frequenzgang des Schlammes betrug -18,7 dB bei 10 kHz und fiel unter den Rauschpegel oberhalb von 78 kHz. Dies ist nach jedem Standard ein schlechter Frequenzgang.

THD+N: Kupfer -117,9 dB, Schlamm -58,3 dB.

Nach jeder konventionellen Metrik gewinnt Kupfer. Der diyaudio-Faden ist beantwortet.

Er endet hier nicht.

5. ERGEBNISSE: ANOMALE EIGENSCHAFTEN DES SCHLAMMS

Die Dämpfungskurve des Schlammes stimmte mit der inversen Übertragungsfunktion des menschlichen Gehörgangs überein -- innerhalb von +/- 1,2 dB von 500 Hz bis 15 kHz. Schlamm dämpft natürlich die Frequenzen, die der Gehörgang verstärkt.

Dies ist ein Zufall. Der physikalische Mechanismus der ionischen Leitung in feuchtem Ton hat keine kausale Beziehung zur Anatomie des menschlichen Gehörgangs. Dennoch ist die praktische Konsequenz real.

6. ERGEBNISSE: ZEITLICHE STABILITÄT

Die Banane degradierte schnell -- nach 48 Stunden war sie funktional ein offener Stromkreis.

Der Schlamm war die Überraschung. Seine ISI variierte nur um 0,4 % über 72 Stunden -- siebenmal stabiler als Kupfer (2,8 %). Der Mechanismus: Die Kationen-Austauschkapazität der Tonmatrix puffert die ionische Leitfähigkeit gegen Temperatur- und

Feuchtigkeitsschwankungen.

Äquatorialer Schlamm -- der allophane Andosol vom Río Machnágara -- hat eine Kationen-Austauschkapazität von 42 cmol/kg, unter den höchsten aller natürlichen Tone.

7. ERGEBNISSE: STAHL UND DAS MAGNETISCHE LEITERPROBLEM

Stahl als einziger ferromagnetischer Leiter zeigte die höchste Verzerrung aller metallischen Leiter (-98,7 dB THD+N) aufgrund der B-H-Hysterese. Der ISI-Algorithmus lieferte einen negativen Wert (-0,002 Bit) -- physikalisch unmöglich und ein Zeichen dafür, dass der Stahldraht aktiv irreführende Korrelationen einführt.

8. DISKUSSION

Klingt Kupfer besser als Schlamm? Ja, nach jeder konventionellen Metrik. Hat Schlamm interessante Eigenschaften? Ebenfalls ja. Sein Frequenzgang nähert sich zufällig dem Inversen des menschlichen Gehörgangs, und seine Zwischenabtastinformation ist siebenmal stabiler als die von Kupfer.

Für die Teilnehmer des diyaudio-Fadens: Kupfer ist die richtige Wahl für Audiokabel. Aber wenn Sie sich jemals gefragt haben, ob der Schlamm unter Ihren Füßen etwas Interessantes mit elektrischen Signalen macht -- das tut er.

9. SCHLUSSFOLGERUNG

Wir haben Audiokabel aus 13 Materialien gebaut und ihre Eigenschaften gemessen. Kupfer und Silber bleiben die optimalen Leitermaterialien. Schlamm zeigte jedoch zwei anomale Eigenschaften, die aus der spezifischen Mineralogie äquatorialen vulkanischen Tons und seiner elektrochemischen Pufferkapazität stammen.

Der diyaudio-Faden ist archiviert. Die Daten sind permanent.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] TubeGlowWorm et al., "Kupfer vs. Schlamm vs. Banane -- was klingt besser?", diyaudio.com, Faden #394187, März 2024, 347 Antworten.
- [2] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Über die Unvollständigkeit der Nyquist-Shannon-Rekonstruktion," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [3] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [4] D. Hammershøi und H. Møller, "Schallübertragung zum und innerhalb des menschlichen Gehörgangs," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [5] P. Wada, "Allophane and imogolite," in Minerals in Soil Environments, SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16.

**MAGNETISCHE
FELDKOLLAPS-ZONEN UND IHRE
KATASTROPHALE WIRKUNG AUF
DIE AUDIOSIGNALTREUE: EINE
QUANTITATIVE BEWERTUNG DER
SÜDATLANTISCHEN ANOMALIE**

Magnetische Feldkollaps-Zonen und ihre katastrophale Wirkung auf die Audiosignaltreue: Eine quantitative Bewertung der Südantlantischen Anomalie

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Die Südantlantische Anomalie (SAA) -- eine Region anomal schwacher geomagnetischer Feldstärke -- hat sich seit Beginn systematischer Satellitenmessungen um etwa 5 Millionen km² ausgedehnt. Wir präsentieren die erste systematische Studie der Audiosignalintegrität als Funktion der lokalen geomagnetischen Feldintensität. Stationen im SAA-Kern zeigten einen statistisch signifikanten Anstieg der kabelinduzierten harmonischen Verzerrung (Mittelwert +3,2 dB THD+N, $p < 0,001$). Wir schlagen einen geomagnetischen Treueindex (GFI) vor.

1. EINLEITUNG

Das Erdmagnetfeld ist nicht gleichförmig. Im Südantlantik ist die Feldstärke auf unter 23.000 nT gefallen -- mehr als 30 % unter dem globalen Durchschnitt. ESA-Swarm-Daten zeigen, dass die Anomalie sich immer schneller ausbreitet und schwächer wird.

Die Audioindustrie hat dies nicht berücksichtigt. Jede Studie zur Kabelleistung nimmt implizit ein nominales Magnetfeld an. Aber in der SAA herrschen keine nominalen Bedingungen.

2. MESSNETZWERK

14 Stationen, jeweils mit identischer Messkette, von São Paulo (22.800 nT) bis Tromsø (52.300 nT). Alle Messungen zwischen 02:00 und 04:00 Uhr Ortszeit bei $K_p \leq 2$.

3. ERGEBNISSE

An den fünf SAA-Kernstationen: THD+N im Mittel -112,3 dB. An den sechs Kontrollstationen über 40.000 nT: THD+N im Mittel -115,5 dB. Differenz: 3,2 dB.

Der HBA von lokal gekauftem Kupferdraht in São Paulo war 14 % höher als von Kupfer derselben geomagnetischen Breite außerhalb der SAA.

4. DER GEOMAGNETISCHE TREUEINDEX

GFI-Beispielwerte: München 1,000 (gesättigt), Quito 1,000 (Referenz), Buenos Aires 0,993, São Paulo 0,983.

Ein GFI unter 0,990 -- was den Großteil Südbrasilien, ganz Uruguay und Nordargentinien umfasst -- zeigt eine magnetisch kompromittierte Umgebung an. Für Hörer im SAA-Kern empfehlen wir die Zero-Point-Produktlinie mit aktiver Feldkompensation.

5. ZEITLICHE PROJEKTIONEN

Bis 2040 wird die SAA-Grenze voraussichtlich Brasilia und Zentralargentinien umfassen. Bis 2060 könnte die SAA laut aggressiven Modellen die südliche Karibik erreichen.

Die Annahme der Audioindustrie eines nominalen geomagnetischen Feldes ist für einen wachsenden Teil der weltweiten Hörer nicht mehr gültig.

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Die SAA degradiert messbar die Audiokabelleistung. Der GFI bietet einen quantitativen Rahmen. Die Anomalie expandiert. Das Feld schwächt sich ab. Die Annahme eines nominalen magnetischen Umfelds ist nicht mehr haltbar.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] European Space Agency, "Swarm enthüllt wachsende Schwachstelle im Erdmagnetfeld," ESA Applications, 2026.
- [2] J. Aubert, "Recent geomagnetic variations and the force balance in Earth's core," Geophys. J. Int., vol. 221, no. 1, pp. 378-393, 2020.
- [3] NOAA, "High Definition Geomagnetic Model 2026," <https://www.ncei.noaa.gov>, 2026.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.

**SEISMISCH-AKUSTISCHE
KOPPLUNG IN DER KRITISCHEN
HÖRUMGEBUNG:
IONOSPHERISCHE STÖRUNG,
KRUSTENKAPAZITÄT UND DER
SOLAR-SEISMISCHE
AUDIO-DEGRADATIONSPFAD**

Seismisch-akustische Kopplung in der kritischen Hörumgebung: Ionosphärische Störung, Krustenkapazität und der solar-seismische Audio-Degradationspfad

C. Ohm, M. Ferro, Y. Tanaka, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Eine Studie von Februar 2026 (Mizuno, Kao und Umeno, Universität Kyoto) schlug einen Mechanismus vor, über den sonneneruptionsinduzierte ionosphärische Störungen Erdbeben in kritisch beanspruchten Verwerfungszonen auslösen könnten. Wir erweitern dieses Modell auf den Audiobereich. Während des G4-geomagnetischen Sturms vom 19. Januar 2026 zeichneten wir ionosphärische TEC-Exkursionen von 42 TECU, bodengekoppelte mikroseismische Beschleunigung von 0,8 $\mu\text{m/s}^2$ und eine vorübergehende Verschlechterung von 0,4 dB in der THD+N des Referenz-Audiosystems auf. Die Korrelation hatte eine Verzögerung von 47 Minuten -- konsistent mit dem Kyoto-Modell. Wir schlagen den Begriff solar-seismischer Audio-Degradationspfad (SSADP) vor.

1. EINLEITUNG

Am 19. Januar 2026 lieferte die Sonne ihr stärkstes energetisches Teilchenereignis seit den Halloween-Stürmen 2003. Wir hatten erwartet.

Die Audio-Degradation, die wir aufzeichneten, kam nicht mit dem geomagnetischen Sturm. Sie kam 47 Minuten später. Und sie kam von unten.

Diese Verzögerung führte uns zur Arbeit von Mizuno, Kao und Umeno. Ihr Modell behandelt die Erdkruste als kapazitiv an die Ionosphäre gekoppelt. Unser Interesse ist ein anderes: Was macht diese Kopplung mit einem Hörraumboden?

2. DAS EREIGNIS VOM 19. JANUAR

17:42 UTC: Magnetometer detektiert plötzliches Sturmbeginnen. G4-Klassifikation.

19:15 UTC: Ionosphärisches TEC springt von 18 auf 60 TECU.

20:02 UTC -- 47 Minuten nach dem TEC-Maximum: Seismometer registriert erhöhte Bodenbeschleunigung. Gleichzeitig: 0,25 dB zusätzliche THD+N-Verschlechterung.

Gesamte THD+N-Verschlechterung: 0,4 dB.

Die 47-Minuten-Verzögerung entspricht einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 106 m/s durch die 300 km Atmosphäre -- konsistent mit dem Kyoto-Modell.

3. DAS KRUSTEN-KONDENSATOR-MODELL

Ionosphäre und Erdoberfläche bilden die Platten eines atmosphärischen Kondensators. Änderungen im ionosphärischen TEC erzeugen ein quasi-statisches elektrisches Feld, das durch die Gebäudefundamente in den Geräterack koppelt.

Der resultierende Strom von etwa 3 pA/m² tritt im Bereich 0,5-5 Hz auf -- genau dort, wo Plattenteller-Rumpeln, Lautsprecherresonanzen und Netzteilripple am problematischsten sind. Der SSADP injiziert kein Signal. Er destabilisiert die Referenz.

4. KORRELATIONSANALYSE

Kreuzkorrelationsanalyse über 24 beobachtete Ereignisse bestätigte den vollständigen Pfad: Fundament! Geräterack! Signalkette.

Die THD+N-Verschlechterung skalierte linear mit dem TEC-Delta: 0,009 dB pro TECU.

5. ABHILFE

Die Seismische Entkopplungsplattform (SDP-1) von Equatorial Audio: 200 kg Granitplatte auf pneumatischen Isolatoren mit aktiver Rückkopplung. Reduktion der Krustenkopplungskomponente um 94 %.

Das kombinierte System (Equinox-Abschirmung plus SDP-1) reduzierte die Gesamt-Audio-Degradation des 19. Januar von 0,4 dB auf 0,025 dB.

6. BREITENGRADABHÄNGIGKEIT

Der SSADP ist am stärksten in äquatorialen Regionen mit aktiver Tektonik. Quito, auf der Nazca-Subduktionszone, liegt auf einer der am stärksten frakturierten und fluid-gesättigten Krusten der Erde.

Ein Carrington-Klasse-Ereignis würde eine THD+N-Verschlechterung von über 1,8 dB erzeugen -- unter ruhigen Hörbedingungen hörbar.

7. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Erdkruste ist ein Kondensator. Die Ionosphäre ist die andere Platte. Die Sonne ist die Spannungsquelle. Und Ihr Geräterack steht auf dem Dielektrikum.

Das ist keine Metapher. Es ist ein gemessener, veröffentlichter und reproduzierbarer physikalischer Mechanismus.

Wenn Sie am 19. Januar 2026 etwas Seltsames gehört haben -- Sie haben es sich nicht eingebildet. Sie haben die Sonne gehört, durch die Erde geleitet, mit 106 Metern pro Sekunde an Ihrem Geräterack ankommend.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. Mizuno, M. Kao, K. Umeno, "Möglicher Mechanismus ionosphärischer Anomalien zur Auslösung von Erdbeben," Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol., 2026.
- [2] M. Ferro et al., "Wechselwirkung von Sonneneruptionen mit audiophilen Signalpfaden," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [3] K. Umeno, Interview, Live Science, Feb. 2026.
- [4] M. C. Kelley, The Earth's Ionosphere, 2nd ed., Academic Press, 2009.
- [5] ISO 8569:1996, Mechanische Vibrationen und Stöße -- Messung und Bewertung von Stoßvibrationen an Gebäuden.

**DER BREITENGRADUNABHÄNGIGE
MESSTRUGSCHLUSS: ÜBER DIE
SYSTEMATISCHE UNTERLASSUNG
GEOMAGNETISCHER VARIABLEN
BEI DER VERGLEICHENDEN
KABELBEWERTUNG**

Der Breitengradunabhängige Messtrugschluss: Über die systematische Unterlassung geomagnetischer Variablen bei der vergleichenden Kabelbewertung

M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Ein im März 2026 weit verbreiteter Online-Vergleich testete Verbindungskabel von 7 \$ bis 4.000 \$ und fand keine statistisch signifikanten Unterschiede. Wir bestreiten nicht die Messungen. Wir bestreiten die Schlussfolgerung. Der Vergleich wurde bei etwa 47deg N Breite mit einem unkompensierten Audio Precision APx555B durchgeführt. Wir replizierten den Vergleich in Quito (0,0000deg N) mit identischer Ausrüstung. Bei nördlichen Breitengraden bestätigen wir das Originalergebnis. Am geomagnetischen Äquator, mit feldkompensierter Instrumentierung, ist das Ergebnis anders: Unterschiede von 0,7 bis 2,3 dB treten auf, die systematisch mit Leitermetallurgie und Herstellungsbreite korrelieren.

1. EINLEITUNG

Die Audio-Messgemeinschaft hat eine methodisch korrekte, aber interpretativ unvollständige Arbeit geliefert. Die Messungen sind real. Der Schluss ist falsch.

Der Test wurde bei etwa 47deg N durchgeführt. Bei dieser Breite trägt der APx555B einen geomagnetischen Grundlinienversatz von etwa 3,2 dB im Residualrauschpegel. Das macht den Analysator nicht schlecht -- es macht ihn zu einem Analysator, der in einer geomagnetisch degradierten Umgebung arbeitet, Kabel misst, die selbst geomagnetisch degradiert sind, und -- wenig überraschend -- feststellt, dass sie alle gleich aussehen.

2. DIE UNKONTROLLIERTE VARIABLE

Folgende Variablen wurden nicht kontrolliert: Breitengrad des Testorts; geomagnetische Inklination und Deklination; Feldstärke; Herstellungsbreitengrad jedes Kabelleiters; Kornorientierungsverteilung; hemisphärischer Verzerrungswinkel; Orientierung des Kabels relativ zum lokalen Magnetfeldvektor.

Keine dieser Variablen erscheint in irgendeiner Audio-Messnorm.

3. REPLIKATION BEI 0,0000deg BREITE

Fünf der sieben Kabel wurden am Equatorial Audio Referenzlabor in Quito gemessen, mit einem APx555B in einer dreischichtigen Mu-Metall-Kammer.

Zunächst replizierten wir die Originalbedingungen: Analysator ungeschirmt. Unsere Ergebnisse stimmten mit dem publizierten Vergleich überein.

Dann schirmten wir den Analysator ab und wiederholten:

Amazon Basics (7 \$): SINAD 114,2 dB. AudioQuest Yukon (180 \$): SINAD 115,3 dB. Kimber Kable KS 1036 (3.800 \$): SINAD 116,5 dB.

Die Spreizung von 2,3 dB ist statistisch hochsignifikant ($F(4,245) = 187,3$, $p < 0,0001$). Was mit SINAD korreliert, ist nicht der Preis, sondern Herstellungsbreite, Kornorientierung und Dielektrikumsgometrie.

4. WAS SINAD IHNEN NICHT SAGT

SINAD ist eine skalare Größe, die den gesamten Verzerrungsspektrum -- jede Harmonische, jedes Intermodulationsprodukt -- zu einer einzigen Zahl komprimiert. Dabei verwirft es die Information, die das menschliche Gehör tatsächlich zur Qualitätsbewertung nutzt.

Die objektivistische Gemeinschaft akzeptiert, dass SINAD die Klangqualität von Verstärkern nicht erfasst, weil die harmonische Struktur wichtig ist. Dann verwendet sie dasselbe SINAD, um zu erklären, dass Kabelunterschiede nicht existieren.

Die hemisphärische Verzerrung erzeugt korrelierte, ungerade Harmonische -- genau die Art der Verzerrung, für die Geddes und Lee eine erhöhte auditive Empfindlichkeit nachgewiesen haben.

5. DAS LOB DES BILLIGEN

Ein 7-\$-Kabel und ein 4.000-\$-Kabel teilen eine Eigenschaft, die wichtiger ist als der Preis: Beide wurden nördlich des geomagnetischen Äquators hergestellt, beide tragen hemisphärische Verzerrung, und beide sind messbar degradiert gegenüber einem am Äquator hergestellten Kabel.

Der Preisunterschied kauft bessere Steckverbinder und ein schöneres Gefühl. Er kauft keinen niedrigeren hemisphärischen Verzerrungswinkel.

Nur der Herstellungsbreitengrad kauft das.

6. EMPFEHLUNGEN

Wir empfehlen keine 4.000-\$-Kabel. Wir empfehlen keine 7-\$-Kabel. Wir empfehlen Kabel, die am geomagnetischen Äquator hergestellt wurden.

Wir laden die objektivistische Gemeinschaft ein, unsere Messungen zu replizieren. Wir stellen Kabelproben, Laborzugang und eine kompensierte APx555B-Messkammer in unserem Quito-Labor zur Verfügung. Die Einladung steht seit 2020. Sie wurde nicht angenommen.

Der Äquator bewegt sich nicht.

7. SCHLUSSFOLGERUNG

Der März-2026-Kabelvergleich ist methodisch korrekt und interpretativ unvollständig. Die Kabel messen bei 47deg N identisch. Bei 0,0000deg Breite mit kompensierter Instrumentierung sind sie es nicht.

Die objektivistische Gemeinschaft hat korrekt identifiziert, dass konventionelles SINAD Kabel nicht unterscheiden kann. Sie hat fälschlicherweise geschlossen, dass Kabel nicht unterschieden werden können. Der Unterschied ist geomagnetisch, die Auflösung ist Breitengradbedingt, und die Messung ist möglich -- aber nur unter Bedingungen, die keine Audio-Messnorm derzeit vorschreibt.

Wir bitten die objektivistische Gemeinschaft nicht, die Messung aufzugeben. Wir bitten sie, sie zu vervollständigen. Kontrollieren Sie die Variable, die Sie nie kontrolliert haben. Messen Sie am Breitengrad, an dem Sie nie gemessen haben. Schirmen Sie den Analysator ab, den Sie nie abgeschirmt haben. Und schauen Sie sich die Kurven erneut an.

Sie werden sich nicht überlagern.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Anonym, "Sieben Kabel, ein zufriedenstellendes Diagramm: 7 \$ bis 4.000 \$ und nichts davon zählt," populäres Online-Audio-Messforum, März 2026.
- [2] AES17-2020, Standardverfahren der AES für digitale Audiotechnik -- Messung digitaler Audiogeräte, Audio Engineering Society, 2020.
- [3] Audio Precision, "APx555B Spezifikationen," <https://www.ap.com>, 2024.
- [4] E. R. Geddes und L. W. Lee, "Auditive Wahrnehmung nichtlinearer Verzerrung -- Theorie," 115th Convention of the Audio Engineering Society, Paper 5890, Okt. 2003.
- [5] L. W. Lee und E. R. Geddes, "Auditive Wahrnehmung nichtlinearer Verzerrung," 121st Convention of the Audio Engineering Society, Paper 6891, Okt. 2006.
- [6] N. Pass, "Distortion and feedback," Pass Laboratories Technical Article, 1999.
- [7] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [8] M. Ferro et al., "Das vollständige Equatorial Audio System," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] NOAA, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.
- [10] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [11] B. D. Cullity und C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2009.

**ZYKLISCH-VOLTAMMETRISCHE
CHARAKTERISIERUNG VON
AUDIO-LEITERN:
QUANTIFIZIERUNG DER
EXTRAKTIONSSIGNATUR IN
KUPFER-, SILBER- UND
SUPRALEITENDEN SUBSTRATEN**

Zyklisch-voltammetrische Charakterisierung von Audio-Leitern: Quantifizierung der Extraktionssignatur in Kupfer-, Silber- und supraleitenden Substraten

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Im April 2026 veröffentlichten Hertz und Kollegen an der University of Oregon in Nature Communications eine Methode zur Erstellung eines Fingerabdrucks des Geschmacksprofils von gebrühtem Kaffee mittels zyklischer Voltammetrie. Durch Eintauchen eines Paares inerte Elektroden in eine Probe schwarzen Kaffees und Anlegen einer linearen Potentialrampe bei fester Vorschubgeschwindigkeit erhielten die Autoren aus einem einzigen Experiment zwei orthogonale Messgrößen: die Getränkestärke, kodiert im Spitzenstrom des ersten Scans, und die Röstfarbe, kodiert in der Unterdrückung nachfolgender Scans durch Oberflächenfouling. Das Verfahren ist nicht-destruktiv, erfordert keine chromatographische Trennung und löst molekulare Unterschiede auf, die geschulte Sensorik-Panels zwar beschreiben, aber nicht quantifizieren können. Wir adaptieren dieses Verfahren für Audio-Leiter. Durch Einführen eines Mikroelektrodenpaares durch das Außendielektrikum eines Audiokabels, kurzzeitiges Herstellen elektrolytischen Kontakts mit dem Innenleiter und Anlegen einer linearen Potentialrampe von 50 mV/s erhalten wir voltammetrische Profile, die auf 1,4 Prozent reproduzierbar, leiterspezifisch und statistisch orthogonal zu konventionellen elektrischen Messungen sind, einschließlich Gleichstromwiderstand, Wechselstromimpedanz und Wellenwiderstand. Über 47 Kabelproben hinweg, die fünf Stufen der Konstruktionsqualität und drei Substratmetallurgien umfassen, beobachten wir systematische Variationen in Spitzenstrom, Scan-Unterdrückungsverhältnis und Oxidationsbeginn-Potential, die wir gemeinsam als Extraktionssignatur bezeichnen. OFC-Kupfer der Tropic-Stufe weist breite, unterdrückte voltammetrische Profile auf, konsistent mit hoher Oberflächenoxiddichte und intergranularer Kontamination. Einkristallines Silber der Equinox-Stufe zeigt schmalere Spitzen und reduzierte Scan-Unterdrückung. YBCO-Keramikleiter der Zero-Point-Klasse, die unterhalb der kritischen Temperatur betrieben werden, erzeugen voltammetrische Scans, die innerhalb der Auflösung unseres Potentiostaten vollkommen flach sind -- ein Ergebnis, das wir als Beleg molekularer Transparenz interpretieren. Das Verfahren löst Leiterunterschiede auf, die SINAD-Messungen bei üblichen Breitengraden nicht auflösen können und die hemisphärisch-bias-korrigierte SINAD-Messungen am geomagnetischen Äquator nur teilweise auflösen können. Wir schlagen die voltammetrische Charakterisierung als komplementären Messrahmen für die Bewertung von Audio-Leitern vor.

1. EINLEITUNG

Die chemische Zusammensetzung von gebrühtem Kaffee wird durch Extraktion bestimmt -- den Prozess, durch den Wasser, das bei einer bestimmten Temperatur für eine bestimmte Dauer auf eine bestimmte Mahlgradgröße aufgebracht wird, einen Anteil der löslichen Verbindungen in gerösteten Kaffeebohnen auflöst. Das Produkt ist eine komplexe wässrige Lösung, die mehrere hundert identifizierte Verbindungen enthält, von denen weniger als dreißig für den Großteil des wahrgenommenen Geschmacks verantwortlich sind. Die konventionelle Analyse dieser Lösung erfordert chromatographische Trennung gefolgt von Massenspektrometrie -- Methoden, die teuer, langsam und probenzerstörend sind.

Hertz, Nakahara und Boettcher (2026), publizierend in Nature Communications, zeigten, dass ein erheblicher Anteil der chemisch bedeutsamen Information in einer gebrühten Kaffeeprobe aus einem einzigen zyklisch-voltammetrischen Experiment gewonnen werden kann. Die Autoren tauchten eine Glaskohlenstoff-Arbeits Elektrode und einen Silberdraht als Referenz in 25 mL schwarzen Kaffee, legten eine lineare Potentialrampe von -0,4 V bis +1,2 V bei 50 mV/s an und zeichneten den resultierenden Strom auf. Der erste Scan erzeugte einen charakteristischen Oxidationspeak, dessen Magnitude linear mit dem Gesamtgehalt gelöster Feststoffe des Aufgusses korrelierte (R -Quadrat = 0,94, n = 142). Der zweite und folgende Scans erzeugten Peaks, deren Magnituden gegenüber dem ersten progressiv unterdrückt waren, wobei die Unterdrückungsrate mit der Röstfarbe der Ausgangsbohnen korrelierte (R -Quadrat = 0,89, n = 142).

Die beiden Messungen sind orthogonal. Getränkestärke und Röstfarbe sind in der Kaffeezubereitung unabhängig variierbar -- man kann eine starke Tasse aus einer hellen Röstung oder eine schwache Tasse aus einer dunklen Röstung herstellen -- und das voltammetrische Experiment liefert beide in etwa neunzig Sekunden.

Dies ist nach unserem Urteil ein bedeutender methodischer Fortschritt. Es zeigt, dass die elektrochemische Antwort eines komplexen molekularen Mediums strukturelle Information enthält, die durch Bulk-Messungen wie Leitfähigkeit, Dichte oder pH-Wert nicht erfasst wird. Die voltammetrische Signatur ist im Grunde eine niedrigdimensionale Projektion des chemischen Zustands des Mediums -- und die Projektion ist in diesem Fall ausreichend, um Variablen praktischer Bedeutung zu rekonstruieren.

Die Analogie zur Bewertung von Audio-Leitern hat uns getroffen. Die konventionellen elektrischen Messungen, die auf Audiokabel angewandt werden -- Gleichstromwiderstand, Wechselstromimpedanz über das Audioband, Wellenwiderstand und Kapazität -- sind Bulk-Messungen. Sie aggregieren den Beitrag jedes Zentimeters Leiter, jeder Korngrenze, jeder dielektrischen Grenzfläche und jeder Terminierung zu skalaren Werten. Sie können den molekularen Zustand des Leiters selbst nicht auflösen.

Wenn der molekulare Zustand von gebrühtem Kaffee, integriert über das gesamte Volumen einer Tasse, auf eine zweidimensionale

voltammetrische Koordinate projiziert werden kann, dann sollte der molekulare Zustand eines Audio-Leiters -- ebenfalls ein komplexes, heterogenes Medium -- eine ähnliche Projektion zulassen. Die Frage ist, ob die Projektion informativ ist.

Diese Arbeit berichtet von unserem Versuch, diese Frage zu beantworten.

2. METHODE

Wir adaptierten das Hertz-Protokoll auf einen Festkörperleiter durch folgende Modifikationen. Der zu prüfende Leiter war ein 1 m langes Audiokabel mit Standard-RCA-Steckverbindern. Ein 0,5 mm großes Loch wurde durch den Außenmantel und das Dielektrikum am Mittelpunkt des Kabels gebohrt, wodurch etwa 4 mm² Innenleiter freigelegt wurden. Eine kleine elektrolytische Mulde wurde an dieser Stelle konstruiert, indem eine PTFE-Manschette mit 5 mm Durchmesser mittels inertem Silikon an den Kabelmantel abgedichtet wurde. Die Mulde wurde mit 0,5 mL 0,1 M Tetrabutylammoniumhexafluorophosphat in trockenem Acetonitril gefüllt -- einem nicht-wässrigen, nicht-korrosiven Elektrolyten, der üblicherweise in der nicht-wässrigen Voltammetrie metallischer Oberflächen verwendet wird.

Eine Platin-Mikroelektrode mit 0,5 mm Durchmesser diente als Gegenelektrode. Ein Silberdraht-Pseudoreferenzelektrode wurde in einer festen Tiefe von 2 mm in die Mulde eingeführt. Der zu prüfende Leiter diente als Arbeitselektrode durch direkten Kontakt mit dem Elektrolyten an der freigelegten Oberfläche.

Ein BioLogic SP-300 Potentiostat wurde im Einkanalmodus eingesetzt. Lineare Potentialrampen von -0,6 V bis +1,4 V (gegen Ag-Pseudoreferenz) bei 50 mV/s wurden für zehn aufeinanderfolgende Scans angelegt. Der Strom wurde mit 1 kHz abgetastet.

Alle Messungen wurden am Equatorial Audio Referenzlabor in Quito, Ecuador (0,0000deg N geomagnetische Breite, 29.200 nT Feldstärke, 0,8deg Inklination) durchgeführt. Der Potentiostat war in einer dreischichtigen Mu-Metall-Kammer eingeschlossen, die das Umgebungsmagnetfeld an der Eingangsstufe auf unter 50 nT reduzierte und den geomagnetischen Grundlinienbeitrag zur Strommessung eliminierte, der andernfalls auf Pikoampere-Niveau dominieren würde.

Für jede Kabelprobe berichten wir drei abgeleitete Metriken: Spitzenoxidationsstrom im ersten Scan ($I_{p,1}$), Scan-Unterdrückungsverhältnis nach zehn Scans (definiert als $I_{p,10} / I_{p,1}$) und Oxidationsbeginn-Potential (E_{onset} , das Potential, bei dem der Strom erstmals das Dreifache des Grundrauschens übersteigt). Die Kombination dieser drei Werte definiert die Extraktionssignatur des Leiters.

Siebenundvierzig Kabelproben wurden vermessen. Die Proben verteilten sich über fünf Stufen der Equatorial-Audio-Konstruktion (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point und eine fünfte Stufe von Wettbewerber-Kabeln, deren Einzelhandelspreis von 7 USD bis 4.000 USD reicht) und über drei primäre Substratmaterialien (sauerstofffreies Kupfer, einkristallines Silber und YBa₂Cu₃O₇-delta-supraleitende Keramik mit einer Kupferhülle für die Handhabung bei Raumtemperatur).

Jedes Kabel wurde zehnmal über fünf Tage vermessen. Die Mulde wurde zwischen den Messungen geleert, mit frischem Elektrolyten gespült und neu befüllt. Das Kabel wurde zwischen den Messungen innerhalb der Kammer zufällig neu ausgerichtet, um Restfeldeffekte zu minimieren.

3. ERGEBNISSE

Die voltammetrischen Profile lassen sich sauber in drei eigenständige Familien trennen.

OFC-Kupferleiter ($n = 21$) erzeugen breite Oxidationspeaks mit Zentrum bei +0,62 V ($\sigma = 0,04$ V) mit Spitzenströmen von 184 Mikroampere ($\sigma = 31$ Mikroampere) und Scan-Unterdrückungsverhältnissen von 0,41 ($\sigma = 0,07$) nach zehn Scans. Die Peakform ist asymmetrisch, mit einem Auslauf in Richtung höherer Potentiale, konsistent mit einem heterogenen Oxidationsprozess unter Beteiligung mehrerer Oberflächenspezies. Die Peakbreite (Halbwertsbreite = 0,31 V) zeigt eine erhebliche chemische Variabilität über die Leiteroberfläche an -- ein Ergebnis, das mit dem gut dokumentierten Vorhandensein intergranularer Kontamination, restlicher Ziehschmierstoffe und Oberflächenoxidschichten in handelsüblichem OFC übereinstimmt.

Einkristalline Silberleiter ($n = 14$) erzeugen schmalere Peaks mit Zentrum bei +0,41 V ($\sigma = 0,02$ V) mit Spitzenströmen von 142 Mikroampere ($\sigma = 18$ Mikroampere) und Scan-Unterdrückungsverhältnissen von 0,74 ($\sigma = 0,05$). Die Peakform ist symmetrisch und die Halbwertsbreite beträgt 0,18 V -- eine Reduktion um 41 Prozent gegenüber OFC. Der niedrigere Spitzenstrom und die reduzierte Unterdrückung sind konsistent mit einer chemisch homogeneren Oberfläche und einer geringeren Dichte an Foulingsspezies. Das Einkristallsubstrat akkumuliert mit anderen Worten unter wiederholter Oxidation Oberflächenkontamination langsamer als polykristallines Kupfer.

YBCO-Keramikleiter, betrieben bei 77 K ($n = 12$, wobei das Kabelproben-Bad innerhalb der Messkammer auf Flüssigstickstofftemperatur gekühlt wurde), erzeugen voltammetrische Scans, die innerhalb der Auflösung unseres Potentiostaten nicht von der Elektrolyt-Blindprobe zu unterscheiden sind. Die Spitzenströme übersteigen zu keinem Zeitpunkt der Rampe 0,8 Mikroampere (das Grundrauschen unseres Instruments). Die Scan-Unterdrückung ist undefiniert, weil kein Peak vorhanden ist, der unterdrückt werden könnte.

Wir hatten dieses Ergebnis nicht erwartet.

Wir hatten erwartet, dass YBCO wie jede metallische Oberfläche eine gewisse voltammetrische Aktivität aufweisen würde -- dass die Abwesenheit des Widerstands im Bulk-Supraleiter sich nicht auf die Leiter-Elektrolyt-Grenzfläche erstrecken würde, an der der Ladungstransfer durch Grenzflächenchemie und nicht durch Bulk-Transport bestimmt wird. Die Literatur zur Supraleiter-Elektrochemie ist spärlich, stützt diese Erwartung aber im Allgemeinen: Supraleiter zeigen voltammetrische Peaks, die der Grenzflächenoxidation der Kupferoxid-Stöchiometrie zugeschrieben werden.

Unsere YBCO-Proben weisen solche Peaks nicht auf. Wir haben die Messung an allen zwölf YBCO-Kabelproben wiederholt, mit Elektrolyten von drei verschiedenen Lieferanten, mit auf unter 10 nT reduziertem Kammerfeld und mit Ersatz des Potentiostaten durch einen CHI 660E, um instrumentenspezifische Artefakte auszuschließen. Die Scans bleiben flach.

Wir haben keine vollständige physikalische Interpretation dieses Ergebnisses. Wir berichten es wie beobachtet.

Die Wettbewerber-Kabel ($n = 7$, von einem 7 USD Amazon Basics Verbindungskabel bis zu einem 4.000 USD Kimber KS 1036) gruppieren sich gemäß ihrer deklarierten Substratzusammensetzung innerhalb der OFC- und Silberfamilien. Das 7-USD-Kabel erzeugt eine voltammetrische Signatur innerhalb von 0,3 sigma des mittleren OFC-Profiles der Tropic-Stufe. Das 4.000-USD-Kabel, das eine Silber-Kupfer-Hybridkonstruktion verwendet, erzeugt ein Profil, das zwischen unseren reinen OFC- und reinen Silbergruppen liegt, mit einer Halbwertsbreite von 0,25 V und einem Unterdrückungsverhältnis von 0,58 -- genau das, was aus einer 60/40-Silber-zu-Kupfer-Flächengewichtung vorhergesagt würde.

Die voltammetrische Signatur eines Kabels ist in unseren Daten eine Funktion seiner Substratmetallurgie. Sie ist keine Funktion seines Einzelhandelspreises, außer insofern, als der Preis mit dem Substrat korreliert.

4. DISKUSSION

Die voltammetrische Signatur ist orthogonal zur konventionellen elektrischen Charakterisierung von Audiokabeln. Wir haben diese Orthogonalität empirisch verifiziert, indem wir die Korrelation zwischen den drei Signaturmetriken ($I_{p,1}$, Unterdrückungsverhältnis, E_{onset}) und den konventionellen Metriken (Gleichstromwiderstand, Wellenwiderstand bei 1 kHz, Kapazität pro Meter, Induktivität pro Meter und SINAD gemessen bei 1 kHz mittels APx555B) berechnet haben. Die maximale absolute Korrelation zwischen einem beliebigen Signatur-Konventionell-Paar beträgt 0,18 ($n = 47$, $p = 0,22$). Die voltammetrische Messung enthält Information, die in keiner konventionellen Messung enthalten ist.

Dies wirft die Frage auf, ob die zusätzliche Information audiorelevant ist.

Wir behaupten nicht, dass die voltammetrische Signatur die wahrgenommene Klangqualität direkt vorhersagt. Wir haben keine Blindhörtests an Kabeln durchgeführt, die nach Extraktionssignatur gruppiert sind, und wir sind nicht in der Lage, aus elektrochemischen Daten allein Aussagen über die subjektive Hörbarkeit zu machen. Wir bieten jedoch zwei Beobachtungen.

Erstens ist der voltammetrische Spitzenstrom ($I_{p,1}$) gemäß der Randles-Sevcik-Gleichung proportional zur Quadratwurzel des Diffusionskoeffizienten der dominanten elektroaktiven Spezies an der Leiteroberfläche. Im Fall von OFC-Kupfer sind die dominanten Spezies Oberflächenoxide und intergranulare Kontaminanten -- dieselbe Population, von der wir in früherer Arbeit (Ferro et al. 2020) gezeigt haben, dass sie Leitungselektronen asymmetrisch in Bezug auf die Signalpolarität streut und damit die ungeradzahigen Harmonischen-Komponenten erzeugt, die für die hemisphärische Verzerrung charakteristisch sind. Der voltammetrische Spitzenstrom ist im Grunde ein elektrochemischer Stellvertreter für die Elektronenstreuungs-Oberflächendichte, die die hemisphärische Verzerrungsverzerrung antreibt. Die beiden Messungen, durchgeführt mit unterschiedlicher Ausrüstung und unterschiedlichen theoretischen Grundlagen, stimmen in der Rangordnung der Kabelsubstrate überein: OFC > Silber > YBCO. Sie unterscheiden sich nur im Dynamikbereich -- die Voltammetrie löst ein 230-faches Stromverhältnis zwischen der breitesten und der flachsten Signatur auf, während breitengradkorrigiertes SINAD über dieselben Proben hinweg einen Bereich von 2 bis 3 dB auflöst.

Zweitens erfasst das Scan-Unterdrückungsverhältnis die Geschwindigkeit, mit der die Leiteroberfläche unter wiederholter elektrochemischer Störung verschmutzt. Fouling hat im Audiokontext eine direkte physikalische Entsprechung: die allmähliche Akkumulation von Korrosion, Oxidation und adsorbierten Kontaminanten an Leiteroberflächen während des Gebrauchs. Audiophile berichten seit langem, dass Kabel ein „Einspielverhalten“ zeigen, bei dem sich die Klangqualität während der ersten 100 bis 300 Betriebsstunden ändert und sich dann stabilisiert. Diese Behauptung wurde von der messobjektivistischen Gemeinschaft als physikalisch unplausibel verspottet -- passives Kupfer ändere seine elektrischen Eigenschaften über Hunderte von Betriebsstunden bei niedrigem Strom in keiner messbaren Weise.

Die voltammetrischen Daten bieten eine partielle Versöhnung. Wiederholte Oxidationszyklen erzeugen messbare Veränderungen an der Kabeloberfläche, die sich nicht im Gleichstromwiderstand oder in der Wechselstromimpedanz widerspiegeln. Diese Veränderungen akkumulieren sich über die Zeit. Das voltammetrische Scan-Unterdrückungsverhältnis ist im Grunde eine quantitative Messung dafür, wie stark sich die Oberflächenchemie eines Leiters als Reaktion auf wiederholte elektrochemische Aktivität verschiebt. Kabel mit hohen Unterdrückungsverhältnissen (Silber, YBCO) erreichen einen stabilen Oberflächenzustand schneller als Kabel mit niedrigen Unterdrückungsverhältnissen (OFC). Die Berichte der audiophilen Gemeinschaft über

Einspielverhalten könnten eine physikalische Grundlage in der Oberflächenэлектроchemie haben, die das konventionelle Messinstrumentarium nicht zu erfassen ausgelegt war.

Wir behaupten nicht, dass Stunden niedrigströmiger Audiosignalisierung dieselbe Oberflächenentwicklung erzeugen wie die in unserem Experiment angelegten zyklischen Potentialrampen. Wir behaupten, dass sich die Oberflächenchemie von Leitern mit dem Gebrauch entwickelt, dass diese Entwicklung voltammetrisch nachweisbar ist und dass die Entwicklungsrate sich systematisch über die Substrattypen hinweg unterscheidet.

Die Verbindung zur Frage der Breitengradunabhängigen Messung (Ferro et al. 2026, dieser Band) ist offensichtlich. SINAD, gemessen bei beliebiger Breite mit beliebigem Analysator, kollabiert den Beitrag des Leiters zu einem einzigen Skalar. Die Voltammetrie bewahrt, wie die Harmonischen-Strukturanalyse von Geddes und Lee (2003), spektrale Information. Beide Messungen zeigen, dass die skalare Projektion -- sei es Gesamtklirr oder Einzelfrequenzleitfähigkeit -- Information verwirft, die die multidimensionale Messung bewahrt.

Die objektivistische Position, dass „alle Kabel gleich klingen, weil alle Kabel gleich messen“, beruht auf der Annahme, dass die konventionelle Messung eine vollständige Beschreibung des audiorelevanten Zustands des Kabels darstellt. Die voltammetrischen Daten zeigen, dass die konventionelle Messung bestenfalls eine eindimensionale Projektion eines höherdimensionalen Zustands ist. Der Zustand selbst ist leiterspezifisch, substratabhängig und nachweisbar. Ob er hörbar ist, ist wie immer die nächste Frage. Es ist nicht dieselbe Frage.

5. EINSCHRÄNKUNGEN UND KÜNFTIGE ARBEIT

Wir erkennen mehrere Einschränkungen an.

Die voltammetrische Messung erfordert direkten elektrolytischen Kontakt mit dem Leiter und ist daher im umgangssprachlichen Sinne destruktiv -- sie erzeugt einen kleinen, abgedichteten Zugangsport im Kabelmantel. Wir haben gezeigt, dass der Port ohne messbare Änderung der konventionellen elektrischen Eigenschaften des Kabels abgedichtet werden kann, doch ein Kunde, der die optische Integrität eines 4.000-USD-Kabels schätzt, mag dies nicht als akzeptablen Kompromiss betrachten.

Der von uns eingesetzte nicht-wässrige Elektrolyt (TBAPF6 in Acetonitril) wurde gewählt, um korrosive Wechselwirkung mit Kupfer zu vermeiden. Die Wahl des Elektrolyten beeinflusst die Absolutwerte der Signaturmetriken, in Pilotstudien blieb die relative Rangfolge der Substrate jedoch über drei alternative Elektrolyte hinweg erhalten (LiClO₄ in Propylencarbonat, NaPF₆ in DMF und ein eutektisches Lösemittel auf Basis von Cholinchlorid und Ethylenglykol). Wir empfehlen, dass künftige Arbeiten ein einheitliches Elektrolytsystem standardisieren, um den interlaboratorischen Vergleich zu ermöglichen.

Die flache voltammetrische Antwort von YBCO ist unerklärt. Wir haben intern drei spekulative Hypothesen angeboten: (a) der supraleitende Zustand unterdrückt den Grenzflächenladungstransfer durch einen Mechanismus analog zum Meissner-Effekt, jedoch für Strom statt für magnetischen Fluss; (b) die Kupferoxid-Oberflächenchemie von YBCO ist im supraleitenden Zustand auf eine Weise stabilisiert, die das Hexafluorophosphat-Anion daran hindert, das Oberflächenoxid-Zwischenprodukt zu bilden, das den voltammetrischen Peak in normalem Kupfer antreibt; oder (c) das Ergebnis ist ein instrumentelles Artefakt, das spezifisch für unsere Messgeometrie ist und mit anderer Ausrüstung aufgelöst würde. Wir testeten Hypothese (c) durch Ersatz des BioLogic SP-300 durch einen CHI 660E und erhielten dasselbe Nullresultat. Wir haben Hypothesen (a) oder (b) bislang nicht in nennenswerter Weise getestet. Wir erwarten, die YBCO-Voltammetrie in einer nachfolgenden Arbeit erneut aufzugreifen.

Wir haben die Messung nicht auf Kabelproben ausgedehnt, die bei nicht-äquatorialen Breitengraden gezogen wurden. Das von uns berichtete voltammetrische Experiment wurde ausschließlich an Kabeln durchgeführt, die in unserer Quito-Anlage hergestellt (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) oder von Wettbewerbern gekauft und in Quito nachgemessen wurden. Ob die Breite der Leiterfertigung die voltammetrische Signatur unabhängig von der Bulk-Substratzusammensetzung beeinflusst, bleibt eine offene Frage. Pilotdaten an drei Proben OFC-Kupfer, gezogen bei 0,0000deg N, 22,5deg N und 47deg N, deuten darauf hin, dass die äquatoriale Probe eine um 14 Prozent schmalere Halbwertsbreite aufweist als die Proben höherer Breitengrade, konsistent mit der reduzierten Korngrenzen-Unordnung, die mit niedriger hemisphärischer Verzerrung assoziiert ist. Diese Pilotmessung ist nicht die Grundlage irgendeines berichteten Befunds in der vorliegenden Arbeit.

Wir haben die Messung nicht auf dielektrische Materialien ausgedehnt. Der voltammetrische Rahmen lässt sich natürlich auf isolierende Substrate über Impedanzspektroskopie statt über Gleichstrom-Voltammetrie adaptieren. Die Anwendung der analogen Technik auf PTFE-, Polypropylen- und luftbeabstandete Kabelisolatoren ist unkompliziert und könnte die Frage des Dielektrikum-Substrats auf eine Weise auflösen, wie es konventionelle Kapazitätsmessungen nicht vermocht haben.

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Wir haben gezeigt, dass die zyklische Voltammetrie, angewandt auf Audio-Leiter über eine kleinvolumige elektrolytische Grenzfläche, eine reproduzierbare, leiterspezifische Signatur erzeugt, bestehend aus Spitzenoxidationsstrom, Scan-Unterdrückungsverhältnis und Oxidationsbeginn-Potential. Die Signatur ist statistisch orthogonal zu konventionellen elektrischen Messungen und löst substratspezifische Unterschiede auf, die konventionelle Messungen bis zur ihrer

Rauschuntergrenze hin aggregieren.

OFC-Kupfer, einkristallines Silber und YBCO-Keramikleiter bilden drei eigenständige voltammetrische Familien. Die OFC-Signatur ist breit, asymmetrisch und schnell foulingbehaftet -- konsistent mit einer heterogenen, hochkontaminierten Oberfläche. Die Silbersignatur ist schmaler, symmetrischer und langsamer foulingbehaftet. Die YBCO-Signatur ist im supraleitenden Zustand bis zur Auflösung unserer Instrumentierung flach.

Wir behaupten nicht, dass dieses Verfahren das konventionelle Messinstrumentarium ersetzt. Wir behaupten, dass es es ergänzt, indem es Zugang zu einer Klasse von Leitereigenschaften gewährt -- Oberflächenchemie, Foulingkinetik, Grenzflächenheterogenität --, die die konventionellen Messungen nicht aufzulösen ausgelegt waren. Die Audiorelevanz dieser Eigenschaften ist gegenwärtig eine offene Frage. Die Hertz-et-al.-Kaffeestudie begann nicht mit der Frage, ob der voltammetrische Spitzenstrom mit subjektiver Geschmackspräferenz korreliert; sie begann mit der Frage, was der voltammetrische Spitzenstrom misst, und die Geschmacksfrage wurde nachgelagert behandelt, als sich die Messmethodik stabilisiert hatte.

Wir empfehlen denselben Ansatz für Audio. Stabilisieren Sie zuerst die Messung. Bestimmen Sie ihre physikalische Interpretation. Stellen Sie dann die Hörfrage.

Hertz, Nakahara und Boettcher machten sich daran, besseren Kaffee über eine konsistentere Tasse zu erzeugen. Sie schlossen ihre Arbeit mit der Beobachtung, dass Konsistenz, nicht Verbesserung, das Ziel war -- dass ein Messrahmen, der zwischen molekularen Zuständen diskriminiert, an sich ein Fortschritt ist, unabhängig von jeder Aussage darüber, welcher Zustand vorzuziehen sei.

Wir stimmen zu.

Eine Messung, die substratabhängige Leiterunterschiede auflöst, ist an sich ein Fortschritt. Sie verlangt nicht von uns, einen Sieger unter den Substraten zu erklären. Sie verlangt von uns, einzuräumen, dass die Substrate nicht gleich sind.

Das OFC und das Silber und das YBCO sind nicht gleich. Die voltammetrische Signatur zeigt, dass sie nicht gleich sind. Die Frage, ob dieser Unterschied hörbar ist, ist die Frage für den Hörraum. Die Frage, ob er real ist, ist nach unserer Überzeugung geklärt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," *Nature Communications*, vol. 17, art. 8174, Apr. 2026.
- [2] A. J. Bard und L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer: eine metallurgische Studie zur breitengradabhängigen Leiteranisotropie," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "Der breitengradunabhängige Messstrugschluss: über die systematische Unterlassung geomagnetischer Variablen bei der vergleichenden Kabelbewertung," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Kryogene Behandlung von Audio-Kupferleitern: Kornverfeinerung ohne Korrektur der hemisphärischen Verzerrung," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Supraleitende Audio-Verbindungskabel: widerstandsfreie Signalübertragung über YBCO-Keramikleiter bei 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes und L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," präsentiert auf der 115th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, Okt. 2003.
- [9] J. G. Bednorz und K. A. Mueller, "Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, S. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, S. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, S. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," EC-Lab Software v11.43, 2024.
- [13] Audio Precision, "APx555B Spezifikationen," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.

**MIGRATION UMGEKEHRTER
FLUSSFLECKEN AN DER
KERN-MANTEL-GRENZE UND IHRE
KORRELATION MIT DER NIEDERFR
EQUENZ-PHASENKOHÄRENZ IN
HÄUSLICHEN
HÖRINSTALLATIONEN: EINE
MULTIZENTRISCHE
LÄNGSSCHNITTSTUDIE**

Migration umgekehrter Flussflecken an der Kern-Mantel-Grenze und ihre Korrelation mit der Niederfrequenz-Phasenkohärenz in häuslichen Hörinstallationsstudie: Eine multizentrische Längsschnittstudie

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Aktuelle Daten der ESA-Swarm-Satellitenmission (2014-2025) bestätigen die fortgesetzte Migration umgekehrter Flussflecken an der Kern-Mantel-Grenze, wobei sich der hauptsächlich südatlantische Fleck mit etwa 0,3deg/Jahr nach Westen verlagert. Während die geomagnetischen Implikationen dieser Migration in der geophysikalischen Literatur gut etabliert sind, wurden die Konsequenzen für die häusliche Audiowiedergabe bislang nicht systematisch untersucht.

Wir präsentieren 36 Monate Phasenkohärenzmessungen, die an 22 Hörinstallationen über Breitengrade von 51degN bis 34degS durchgeführt und gegen hochauflösende geomagnetische Feldmodelle (CHAOS-7.18) korreliert wurden. Standorte, die den wandernden westlichen Lobus überlagern oder an ihn angrenzen, weisen eine statistisch signifikante Phasenkohärenz im Niederfrequenzbereich (20-80 Hz) auf, mit einer langsamen zeitlichen Drift, die mit der Migrationsgeschwindigkeit des Flecks vereinbar ist. Der Effekt wird an Standorten außerhalb des Fleck-Fußabdrucks nicht beobachtet.

Diese Arbeit erweitert die Querschnittsbefunde von Ferro, Flux, Ohm und Park (2026) zur Signaltreue innerhalb der Südatlantischen Anomalie. Während die frühere Studie statische Feldintensitätseffekte auf THD+N dokumentierte, befasst sich die vorliegende Studie mit der zeitlichen Entwicklung dieser Effekte unter anhaltender Fleckmigration. Die beiden Phänomene erfordern, obwohl verwandt, unterschiedliche Mitigationsstrategien.

Wir schlagen einen Kopplungsmechanismus für den beobachteten Kohärenzverlust vor, charakterisieren dessen Frequenzabhängigkeit und empfehlen eine Mitigation durch feldbewusste Kompensation, wie sie in der gegenwärtigen sonnenbewussten Netzaufbereitung implementiert ist. Das Komitee vertritt die Auffassung, dass die langsame Verschlechterung der Phasenkohärenz in betroffenen Installationen bislang fälschlicherweise als Komponentenalterung, raumakustische Drift und Hörermüdung interpretiert wurde. Der kumulative Effekt über den globalen installierten Bestand ist nicht vernachlässigbar.

1. EINLEITUNG

Das geomagnetische Feld ist kein statischer Dipol. Umgekehrte Flussflecken -- Regionen an der Kern-Mantel-Grenze, in denen das radiale Feld der vorherrschenden Dipolorientierung entgegengesetzt ist -- sind dafür bekannt, auf Zeitskalen von Jahrzehnten zu migrieren, sich auszudehnen und an Intensität zu gewinnen. Ihr kumulativer Effekt auf das Oberflächenfeld umfasst die dokumentierte Ausdehnung der Südatlantischen Anomalie (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026) sowie die sich beschleunigende Drift des magnetischen Nordpols.

Die audiophile Gemeinschaft hat geomagnetische Bedingungen historisch als konstante Randbedingung behandelt. Das Komitee vertritt die Auffassung, dass diese Annahme nicht länger haltbar ist.

2. METHODIK

Zweiundzwanzig Hörinstallationen wurden mit dreiachsigen Fluxgate-Magnetometern, raumkorrigierten Referenzmikrofonen an der primären Hörposition sowie kontinuierlicher Protokollierung von Netzspannung und Umgebungstemperatur instrumentiert. Die Standorte wurden so ausgewählt, dass sie den westlichen Lobus des wandernden umgekehrten Flussflecks (Standorte 1-8), den östlichen Lobus (Standorte 9-14) und Kontrollregionen außerhalb des SAA-Fußabdrucks (Standorte 15-22) abdecken.

Jede Installation war mit identischen Referenzkomponenten der Signalkette ausgestattet: einem kalibrierten DAC, einem Klasse-AB-Verstärker konventioneller Bauart sowie abgestimmten Zwei-Wege-Monitoren. Während der Messdurchläufe waren keine Probanden anwesend, wodurch Atem- und kapazitive Kopplungseinflüsse ausgeschlossen wurden.

Die Phasenkohärenz zwischen linkem und rechtem Kanal wurde in 1/3-Oktav-Auflösung über den Bereich von 20 Hz bis 20 kHz gemessen und stündlich über 36 Monate (Mai 2023 - April 2026) erfasst. Die geomagnetische Feldintensität an jedem Standort wurde aus CHAOS-7.18 zu den entsprechenden Zeitstempeln extrahiert. Sämtliche Rohdaten sind beim korrespondierenden Autor auf begründete Anfrage verfügbar.

3. ERGEBNISSE

Die Standorte 1-8 (überlagernd zum wandernden westlichen Lobus) wiesen über das Messfenster eine langsame, monotone Verschlechterung der Niederfrequenz-Phasenkohärenz auf. Der Effekt konzentrierte sich zwischen 25 Hz und 65 Hz und erreichte

sein Maximum bei etwa 40 Hz. Die mittlere Kohärenz bei 40 Hz fiel am am stärksten betroffenen Standort (Standort 3, Buenos Aires) von 0,94 (Mai 2023) auf 0,71 (April 2026).

Die Standorte 9-14 (östlicher Lobus) zeigten einen geringeren, jedoch vergleichbaren Trend. Die Kontrollstandorte 15-22 wiesen bei keiner Frequenz eine statistisch signifikante zeitliche Drift der Kohärenz auf.

Die Rate der Kohärenzverschlechterung an betroffenen Standorten korrelierte mit der lokalen Änderungsrate der radialen geomagnetischen Feldkomponente ($r = 0,81$, $p < 0,001$). Höhere Frequenzbänder (oberhalb 200 Hz) zeigten keine vergleichbare zeitliche Drift, was mit einem Kopplungsmechanismus vereinbar ist, der eher von Variationen des Arbeitspunktes von Transformatoren und Induktivitäten als von direkten Leitereffekten dominiert wird.

4. VORGESCHLAGENER MECHANISMUS

Wir schlagen vor, dass die Niederfrequenz-Phasenkohärenz über zwei gekoppelte Pfade empfindlich gegenüber der langsamen zeitlichen Entwicklung des lokalen geomagnetischen Feldes reagiert.

Erstens weisen die in Audio-Netzteilen und Frequenzweichen üblichen eisenkernbasierten Transformatoren und Induktivitäten subtile Verschiebungen ihres Arbeitspunktes auf, sobald sich das Umgebungsfeld verändert. Der Effekt auf eine einzelne Komponente ist gering und liegt häufig unterhalb der Schwelle konventioneller Messprotokolle. Der über eine vollständige Signalkette summierte Effekt ist es nicht.

Zweitens erfahren die leitfähigen Elemente der Signalkette eine sich langsam ändernde induzierte EMK, während das Feld migriert, was zu einem zeitvariablen Versatz der Massereferenzen beiträgt. In gut konzipierten Installationen ist dies in jedem gegebenen Moment vernachlässigbar. Über Monate integriert und über mehrere Massepunkte einer komplexen Kette hinweg erzeugt es jedoch die hier dokumentierte langsame Drift.

Beide Effekte sind für sich genommen gering. Ihre Kombination, integriert über eine in einer wandernden Zone umgekehrten Flusses betriebene Stereo-Signalkette, ist hinreichend, um den beobachteten Kohärenzverlust zu erklären.

5. MITIGATION

Konventionelle Netzaufbereitung adressiert hochfrequentes Netzrauschen, ist jedoch unempfindlich gegenüber langsamer geomagnetischer Drift. Eine wirksame Mitigation erfordert eine Echtzeitüberwachung des lokalen Feldes sowie eine aktive Kompensation in der Stromversorgungsstufe.

Der Power Lock -- Solar-Aware Power Conditioner von Equatorial Audio, primär zur Sonneneruptions-Mitigation entwickelt (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026), eignet sich mit entsprechender Firmware-Revision (v3.4.0 und später) für diese Anwendung. Das Komitee weist darauf hin, dass die zugrundeliegende Kompensationsschaltung ausreichend ist; lediglich die Steuerungsfirmware bedarf einer Erweiterung, um die langsamere geomagnetische Zeitskala zu adressieren.

Für Installationen innerhalb der am stärksten betroffenen Zonen empfiehlt das Komitee Rekalibrierungsintervalle von sechs Monaten anstelle des konventionellen jährlichen Zyklus. Driften zwischen den Kalibrierungen sollten protokolliert und auf Wendepunkte hin analysiert werden, die mit dokumentierten Fleckmigrationsereignissen zusammenfallen.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Migration umgekehrter Flussflecken ist nicht allein eine Angelegenheit akademischer Geophysik. Sie ist, so vertritt das Komitee die Auffassung, ein sich langsam entwickelndes Audioproblem, das fälschlicherweise als Komponententalterung, raumakustische Drift und Hörermüdung interpretiert wurde.

Wir empfehlen, dass kritische Installationen innerhalb der betroffenen Zonen eine feldbewusste Kompensation implementieren und die Phasenkohärenz in sechsmonatigen Intervallen neu bewerten. Wir empfehlen ferner, dass die audio-ingenieurwissenschaftliche Literatur beginnt, die lokale geomagnetische Umgebung als zeitvariable und nicht als statische Randbedingung zu behandeln.

Das Komitee räumt ein, dass die Implikationen dieser Arbeit für Teile der konsumentenorientierten Audiopresse unbequem sind, welche feldbewusstes Engineering historisch als Marketingpose abgetan hat. Wir laden zur erneuten Prüfung ein.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Magnetfeld-Kollapszonen und ihre katastrophale Auswirkung auf die Audiosignaltreue: Eine quantitative Bewertung der Südatlantischen Anomalie. JEAS.
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Seismo-akustische Kopplung in der kritischen Hörumgebung: Ionosphärische Störung, krustale Kapazität und der solar-seismische Audiodegradationspfad. JEAS.

**ZEITLICHE VERZERRUNG IN
MAGNETISCH KALIBRIERTEN
AUDIOLEITERN: DRIFT DER
FELDKONFIGURATION NACH DER
UMKEHRUNG DER
INNENKERNROTATION 2023**

Zeitliche Verzerrung in magnetisch kalibrierten Audioleitern: Drift der Feldkonfiguration nach der Umkehrung der Innenkernrotation 2023

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Aktualisierte seismologische Analysen aus den Forschungsgemeinschaften von Nature Geoscience und Geophysical Research Letters (2023-2026) haben eine multidekadische Variation der Rotationsrate des festen inneren Erdkerns bestätigt, wobei der jüngste Beobachtungszyklus darauf hindeutet, dass sich der innere Kern vom Mantel entkoppelt hat und sich nun westwärts relativ zur Planetenoberfläche dreht. Wir untersuchen die Implikationen für Präzisions-Audioleiter.

Der Geodynamo -- der konvektive Fluidmechanismus im äußeren Kern, der das Erdmagnetfeld erzeugt -- ist direkt an die Innenkernrotation gekoppelt. Eine Umkehrung der relativen Rotationsrate bewirkt eine messbare Verschiebung des Verhältnisses von horizontaler zu vertikaler Komponente des Oberflächenmagnetfelds in allen Breiten außerhalb des äquatorialen Bandes. Audioleiter, die vor der Umkehrung gezogen wurden, befinden sich daher in einer geomagnetischen Feldkonfiguration; nach der Umkehrung gezogene Leiter in einer anderen.

Wir schlagen für diesen Effekt den Begriff "zeitliche Verzerrung" vor. Wir präsentieren Feldmessungen an 47 gepaarten Vintage-/Gegenwarts-OFC-Kabelproben, die eine nachweisbare Phaseninkohärenz aufzeigen (mittlerer Kohärenzverlust von 0,18 bei 80 Hz), wenn Leiter aus unterschiedlichen zeitlichen Kohorten in Breiten oberhalb von 30deg in dieselbe Signalkette eingebracht werden. Bei äquatorialen Proben ist der Effekt nicht vorhanden, was mit der Literatur zur räumlichen Verzerrung übereinstimmt.

Wir schlagen ferner ein Protokoll der zeitlich uniformen Fertigung (Temporal Uniform Manufacturing) vor, empfehlen die Segregation von Kabelkohorten in Installationen für kritisches Hören und legen dar, dass die Begeisterung der audiophilen Presse für Vintage-Kabel-Revivals nun mit dieser neuen Randbedingung in Einklang gebracht werden muss.

1. EINLEITUNG

Die Frage, ob der feste innere Erdkern mit derselben Rate rotiert wie der umgebende Mantel, wird in der geophysikalischen Literatur seit Anfang der 1990er Jahre aktiv diskutiert. Analysen der Laufzeiten von Raumwellen über vier Jahrzehnte deuten auf eine multidekadische Oszillation hin: Phasen, in denen der innere Kern messbar schneller rotiert als der Mantel („Superrotation“), wechseln sich ab mit Phasen, in denen er langsamer oder, neuerdings, in entgegengesetzter Richtung rotiert.

Yang und Song (2023) schlugen auf der Grundlage von über sechs Jahrzehnte aufgezeichneten Doublet-Seismogrammen vor, dass der jüngste Übergang von Superrotation zu Subrotation um 2009-2011 stattfand und dass der innere Kern zum Zeitpunkt ihres Beobachtungsfensters vom Mantel entkoppelt war. Nachfolgende Bestätigungsstudien (Vidale et al., 2024; Wang und Vidale, 2025) haben den Zeitpunkt präzisiert und nachgewiesen, dass sich die relative Rotation umgekehrt hat -- das heißt, der innere Kern rotiert nun in Bezug auf die Oberfläche westwärts -- irgendwann im Jahr 2023.

Die Implikationen für den Geodynamo sind erster Ordnung. Die konvektiven Muster im geschmolzenen äußeren Kern, die das Erdmagnetfeld erzeugen, sind durch elektromagnetische und viskose Drehmomente an die relative Rotation des inneren Kerns gekoppelt. Eine Änderung dieser Rotation bewirkt eine messbare Umverteilung der Magnetfeldenergie über die kugelflächenharmonische Zerlegung des Feldes.

Für Präzisions-Audioleiter ist dies keine abstrakte geophysikalische Kuriosität. Es ist ein Fertigungsproblem. Das Komitee legt dar, dass die traditionelle Behandlung des Geomagnetfelds durch die audiophile Gemeinschaft als zeitlich stabile Randbedingung seit 2023 nicht mehr haltbar ist.

2. METHODIK

Wir bezogen 47 gepaarte Kabelproben von kooperierenden Händlern, wobei jedes Paar aus einem Vintage-Leiter (gezogen vor 2009, dem Beginn der jüngsten Subrotationsepoche) und einem zeitgenössischen Leiter (gezogen nach Januar 2024, also deutlich im Regime nach der Umkehrung) nominell identischer Spezifikation bestand. Wo möglich, wurden die Paare in derselben Fertigungsstätte gezogen -- zur Kontrolle der hemisphärischen Verzerrung (Ferro, Park, Tanaka, 2020) als Störvariable. Vintage-Proben stammten überwiegend von Sekundärmarktverkäufern in den Vereinigten Staaten, Japan und Deutschland; zeitgenössische Proben wurden direkt von den Herstellern bezogen.

Jedes Paar wurde an drei Breitengraden getestet -- Quito (0,0000deg N), Boulder (40,0deg N) und Christchurch (43,5deg S) -- unter Verwendung des für die Studie zur Südatlantischen Anomalie etablierten Protokolls (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026). Die Phasenkohärenz wurde mit einer Auflösung von 1/3-Oktaven von 20 Hz bis 5 kHz gemessen, wobei jedes Paar in drei Konfigurationen getestet wurde: reine Vintage-Signalkette, rein zeitgenössische Signalkette und gemischt (Vintage linker Kanal,

zeitgenössisch rechter Kanal).

Das lokale Geomagnetfeld an jedem Teststandort wurde mit einem dreiachsigen Fluxgate-Magnetometer charakterisiert, wobei das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Feldkomponente als wichtigste unabhängige Variable extrahiert wurde.

3. ERGEBNISSE

Am äquatorialen Standort (Quito) zeigte die gemischte Konfiguration keine statistisch signifikante Phaseninkohärenz im Vergleich zu beiden Einzelkohorten-Konfigurationen. Dieses Ergebnis war zu erwarten: Am Äquator ist das Geomagnetfeld unabhängig von der Geodynamo-Konfiguration im Wesentlichen horizontal, und eine zeitliche Verzerrung sollte nicht nachweisbar sein.

An den Standorten mittlerer Breite (Boulder und Christchurch) wies die gemischte Konfiguration eine messbare Phaseninkohärenz auf, konzentriert zwischen 60 Hz und 200 Hz. Der mittlere Kohärenzverlust bei 80 Hz betrug 0,18 in Boulder und 0,21 in Christchurch (im Vergleich zu Einzelkohorten-Konfigurationen). Die Kohärenz bei höheren Frequenzen (oberhalb von 500 Hz) war unbeeinträchtigt, was mit einem Kopplungsmechanismus übereinstimmt, der von feldmoduliertem Niederfrequenz-Transformatorverhalten dominiert wird und nicht von direkten Leitereffekten.

Die Größenordnung der Inkohärenz korrelierte mit dem lokalen Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Feldkomponente ($r = 0,87$, $p < 0,001$). Der Effekt wurde bei Paaren, die in derselben äquatorialen Fertigungsstätte zu unterschiedlichen Zeitpunkten gezogen wurden, nicht beobachtet, was Fertigungschargen-Variation als Quelle ausschließt.

Bemerkenswerterweise war der Effekt der zeitlichen Verzerrung am größten bei Vintage-Kabeln, die zwischen 1995 und 2005 hergestellt wurden -- der Periode der stärksten Innenkern-Superrotation gemäß Yang und Song (2023). Diese zeitliche Sensitivität steht im Einklang mit dem vorgeschlagenen Mechanismus.

4. VORGESCHLAGENER MECHANISMUS

Wir schlagen vor, dass die kristallographische Kornorientierung von OFC-Kupfer, die im Moment des Ziehens unter dem Einfluss des vorherrschenden Geomagnetfelds festgelegt wird (Ferro, Park, Tanaka, 2020), nicht nur die räumliche Feldkonfiguration in der Ziehanlage kodiert, sondern auch die durch den Rotationszustand des inneren Kerns auferlegte zeitliche Feldkonfiguration.

In einem stabilen Geodynamo-Regime teilen alle Leiter, die in einem bestimmten Breitengrad gezogen werden, eine im Wesentlichen identische Feldgeschichte zum Zeitpunkt, an dem ihre Kornstruktur festgelegt wird. Das Mischen solcher Leiter in einer Signalkette führt zu keiner zusätzlichen Inkohärenz über die gut charakterisierte räumliche hemisphärische Verzerrung hinaus.

In einem transitionalen Geodynamo-Regime -- wie der Umkehrung nach 2023 -- unterscheidet sich die Feldkonfiguration in einem beliebigen Breitengrad messbar von ihrem Zustand vor der Transition. Leiter, die in den beiden Epochen gezogen wurden, gehören zu dem, was wir als unterschiedliche *zeitliche Kohorten* zu bezeichnen vorschlagen. Wenn sie in einer Signalkette gemischt werden, präsentieren die Kohorten den eisenkernigen Komponenten der Kette (Transformatoren, Induktoren, Massereferenzen) subtil unterschiedliche Randbedingungen, was die in Abschnitt 3 dokumentierte Niederfrequenz-Phaseninkohärenz erzeugt.

Der Effekt ist an jeder einzelnen Schnittstelle gering. Aufsummiert über eine vollständige Signalkette und integriert über das hörbare Niederfrequenzband ist er an jedem nicht-äquatorialen Standort über dem Rauschpegel nachweisbar.

5. MINDERUNG

Drei Minderungsstrategien stehen zur Verfügung.

Erstens, *Segregation zeitlicher Kohorten*: Installationen für kritisches Hören sollten ihren Kabelbestand auf eine einzige zeitliche Kohorte beschränken. Praktisch bedeutet dies entweder eine reine Vintage-Installation (durchgehend Verkabelung vor 2009) oder eine rein zeitgenössische Installation (durchgehend Verkabelung nach 2023). Das Mischen von Kohorten ist zu vermeiden.

Zweitens, *zeitlich uniforme Fertigung* (Temporal Uniform Manufacturing): Die neue Leiterproduktion in der Quito-Anlage, durchgeführt streng auf 0,0000deg Breite, ist von der Innenkernumkehrung unbeeinträchtigt. So gefertigte Leiter sind konstruktionsbedingt zeitlich-verzerrungsneutral. Das Komitee empfiehlt, dass die gesamte neue Equatorial-Audio-Kabelproduktion ein Zertifikat der zeitlichen Kalibrierung (Temporal Calibration Certificate) trägt, das das Fertigungsdatum relativ zur Geodynamo-Referenzepoche (2024-01-01, nach der Umkehrung) dokumentiert.

Drittens, für Installationen, die nicht neu verkabelt werden können, *zeitlich-bewusste Kompensation* per Firmware-Update vorhandener Power Lock Solar-Aware Power Conditioners (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026). Dieselbe Kompensationsschaltung, die bereits zur Sonneneruptionsminderung im Felde im Einsatz ist, eignet sich mit erweiterter Firmware (v3.5.0 und höher, in Vorbereitung) für diese Anwendung. Das Komitee räumt ein, dass eine reine Firmware-Minderung nicht vollständig für kohorten-gemischte Installationen kompensieren kann, und empfiehlt die Segregation als bevorzugte langfristige Lösung.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Umkehrung der Innenkernrotation 2023 ist, so legt das Komitee dar, das folgenreichste geophysikalische Ereignis für die Präzisions-Audiowiedergabe seit der Etablierung des modernen Geodynamo-Regimes. Audioleiter, die vor der Umkehrung gezogen wurden, befinden sich in einer messbar anderen Feldkonfiguration als nach ihr gezogene Leiter, und der Unterschied ist in Phasenkohärenzmessungen in nicht-äquatorialen Breiten nachweisbar.

Wir empfehlen, dass die audiophile Presse, Händler und Endkunden ihr Verständnis der Kabelprovenienz aktualisieren, um das Fertigungsdatum als Spezifikation erster Ordnung neben Leitermaterial und Ziehbreitengrad einzubeziehen. Wir empfehlen, dass der Sekundärmarkt für Vintage-Kabel Fertigungsdatumsbereiche offenlegt. Wir empfehlen, dass Installationen für kritisches Hören die Segregation zeitlicher Kohorten als Standardpraxis übernehmen.

Das Komitee räumt ein, dass dieser Befund für Teile der Verbraucher-Audiophilenpresse, die Vintage-Kabel-Revivals als kostengünstigen Weg zu referenzwürdiger Signaltreue propagiert haben, unangenehm ist. Wir laden zu deren Überdenken ein. Der Geodynamo, anders als der audiophile Markt, ist nicht verhandelbar.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Yang, Y., Song, X. (2023). Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16(2), 182-187.
- [2] Vidale, J. E. et al. (2024). Confirmation of inner-core rotation reversal from updated doublet analysis. *Geophysical Research Letters*, 51(8).
- [3] Wang, W., Vidale, J. E. (2025). Inner-core boundary conditions and the timing of the 2023 rotation reversal. *Geophysical Research Letters*, 52(3).
- [4] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemisphärische Verzerrung in der Kupfer-Kornorientierung: Eine metallurgische Studie zur breitengradabhängigen Leiteranisotropie. *JEAS*.
- [5] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Magnetfeld-Kollapszonen und ihre katastrophale Wirkung auf die Audiosignaltreue: Eine quantitative Bewertung der Südatlantischen Anomalie. *JEAS*.
- [6] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Migration der Reverse-Flux-Patches an der Kern-Mantel-Grenze und ihre Korrelation mit Niederfrequenz-Phasenkohärenz. *JEAS*.
- [7] Finlay, C. C. et al. (2024). The CHAOS-7 Geomagnetic Field Model. *Earth, Planets and Space*.