

---

**CYCLISCH VOLTAMMETRISCHE  
KARAKTERISERING VAN  
AUDIOGELEIDERS:  
KWANTIFICERING VAN DE  
EXTRACTIESIGNATUUR IN KOPER,  
ZILVER EN SUPERGELEIDENDE  
SUBSTRATEN**

---

# Cyclisch voltammetrische karakterisering van audiogeleiders: kwantificering van de extractiesignatuur in koper, zilver en supergeleidende 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.

## Samenvatting

In april 2026 publiceerden Hertz en collega's aan de Universiteit van Oregon in Nature Communications een methode om het smaakprofiel van gezette koffie te identificeren met cyclische voltammetrie. Door een paar inerte elektroden in een monster zwarte koffie te dompelen en het aangelegde potentiaal bij een vaste scansnelheid te variëren, verkregen de auteurs twee orthogonale metingen uit één experiment: drankkracht, gecodeerd in de piekstroom van de eerste scan, en roostkleur, gecodeerd in de onderdrukking van volgende scans door oppervlaktevervuiling. De techniek is niet-destructief, vereist geen chromatografische scheiding en lost moleculaire verschillen op die getrainde sensorische panels kunnen beschrijven maar niet kwantificeren. Wij passen deze techniek toe op audiogeleiders. Door een microelektrodenpaar door het buitenste diëlektricum van een audiokabel te introduceren, kortstondig elektrolytisch contact met de binnenste geleider te maken en een lineaire potentiaalsweep van 50 mV/s aan te leggen, verkrijgen wij voltammetrische profielen die reproduceerbaar zijn binnen 1,4 procent, geleider-specifiek en statistisch orthogonaal aan conventionele elektrische metingen waaronder DC-weerstand, AC-impedantie en karakteristieke impedantie. Over 47 kabelmonsters verdeeld over vijf constructiekwaliteitsklassen en drie substraatmetallurgieën waarnemen wij systematische variaties in piekstroom, scanonderdrukkingsverhouding en oxidatie-onsetpotentiaal die wij gezamenlijk de extractiesignatuur noemen. Tropic-klasse OFC-koper vertoont brede, onderdrukte voltammetrische profielen die overeenkomen met een hoge oppervlakteoxidedichtheid en intergranulaire verontreiniging. Equinox-klasse monokristallijn zilver toont smallere pieken en verminderde scanonderdrukking. Zero-Point-klasse YBCO-keramische geleiders die onder de kritieke temperatuur opereren produceren voltammetrische scans die, binnen de resolutie van onze potentiostaat, perfect vlak zijn -- een resultaat dat wij interpreteren als bewijs van moleculaire transparantie. De techniek lost geleiderverschillen op die SINAD-metingen op standaardbreedtegraden niet kunnen oplossen, en die hemisferische-bias-gecorrigeerde SINAD-metingen op de geomagnetische evenaar slechts gedeeltelijk kunnen oplossen. Wij stellen voltammetrische karakterisering voor als een complementair meetkader voor de evaluatie van audiogeleiders.

## 1. INLEIDING

Hertz, Nakahara en Boettcher (2026), publicerend in Nature Communications, toonden aan dat een aanzienlijk deel van de chemisch betekenisvolle informatie in een gezet koffiemonster kan worden teruggewonnen uit één enkel cyclisch voltammetrie-experiment. De auteurs dompelden een glasachtige koolstof werkelektrode en een zilverdraad referentie in 25 mL zwarte koffie, legden een lineaire potentiaalsweep aan van -0,4 V tot +1,2 V bij 50 mV/s, en registreerden de resulterende stroom. De eerste scan produceerde een karakteristieke oxidatiepiek waarvan de magnitude lineair correleerde met het totaal opgeloste vaste stoffengehalte van het brouwsel ( $R$ -kwadraat = 0,94,  $n$  = 142).

Dit is, naar ons oordeel, een belangrijke methodologische vooruitgang. Het toont aan dat de elektrochemische respons van een complex moleculair medium structurele informatie bevat die niet wordt vastgelegd door bulkmetingen zoals geleidbaarheid, dichtheid of pH.

Wij waren getroffen door de analogie met de evaluatie van audiogeleiders. De conventionele elektrische metingen die op audiokabels worden toegepast -- DC-weerstand, AC-impedantie over de audioband, karakteristieke impedantie en capaciteit -- zijn bulkmetingen. Zij kunnen de moleculaire toestand van de geleider zelf niet oplossen.

Als de moleculaire toestand van gezette koffie kan worden geprojecteerd op een tweedimensionaal voltammetrisch coördinatenstelsel, dan zou de moleculaire toestand van een audiogeleider -- eveneens een complex, heterogeen medium -- een vergelijkbare projectie moeten toelaten. De vraag is of de projectie informatief is.

## 2. METHODE

De geleider onder test was een 1 m audiokabel afgesloten met standaard RCA-connectoren. Een gat van 0,5 mm werd door de buitenmantel en het diëlektricum geboord op het middelpunt van de kabel, waarbij circa 4 mm<sup>2</sup> aan binnengeleider werd blootgelegd. Een kleine elektrolytische cel werd op deze plek geconstrueerd met een PTFE-kraag van 5 mm diameter, gevuld met 0,5 mL van 0,1 M tetrabutylammoniumhexafluorofosfaat in droge acetonitril.

Een platinamicroelektrode van 0,5 mm diameter diende als tegenelektrode. Een zilverdraad pseudo-referentie-elektrode werd in de cel ingebracht. Een BioLogic SP-300 potentiostaat werd gebruikt. Lineaire potentiaalsweeps van -0,6 V tot +1,4 V bij 50 mV/s werden aangelegd voor tien opeenvolgende scans.

Alle metingen werden uitgevoerd in het Equatorial Audio referentielaboratorium in Quito, Ecuador (0,0000deg N geomagnetische breedtegraad). De potentiostaat was ingesloten in een drielaagse mu-metalen kamer.

Voor elk kabelmonster rapporteren wij drie afgeleide metrieken: piekoxidatiestroom op de eerste scan ( $I_{p,1}$ ), scanonderdrukkingsverhouding na tien scans en oxidatie-onsetpotentiaal ( $E_{onset}$ ). De combinatie van deze drie waarden definieert de extractiesignatuur van de geleider.

Zevenenveertig kabelmonsters werden gemeten, verdeeld over vijf klassen Equatorial Audio constructie (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point en een vijfde klasse concurrentkabels) en drie primaire substraatmaterialen (zuurstofvrij koper, monokristallijn zilver en YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-delta supergeleidend keramiek).

### 3. RESULTATEN

De voltammetrische profielen scheiden zich schoon in drie verschillende families.

OFC-kopergeleiders ( $n = 21$ ) produceren brede oxidatiepieken gecentreerd op +0,62 V ( $\sigma = 0,04$  V) met piekstromen van 184 microampère ( $\sigma = 31$  microampère) en scanonderdrukkingsverhoudingen van 0,41 ( $\sigma = 0,07$ ) na tien scans. De piekvorm is asymmetrisch, met een staart die zich uitstrekt naar hogere potentialen, consistent met een heterogeen oxidatieproces. De breedte van de piek (FWHM = 0,31 V) duidt op aanzienlijke chemische variabiliteit over het geleideroppervlak -- een resultaat dat overeenkomt met de goed gedocumenteerde aanwezigheid van intergranulaire verontreiniging, residuele treksmeermiddelen en oppervlakteoxidelagen in commercieel OFC.

Monokristallijne zilverageleiders ( $n = 14$ ) produceren smallere pieken gecentreerd op +0,41 V ( $\sigma = 0,02$  V) met piekstromen van 142 microampère ( $\sigma = 18$  microampère) en scanonderdrukkingsverhoudingen van 0,74 ( $\sigma = 0,05$ ). De piekvorm is symmetrisch en de FWHM is 0,18 V -- een reductie van 41 procent ten opzichte van OFC.

YBCO-keramische geleiders die opereren bij 77 K ( $n = 12$ ) produceren voltammetrische scans die, binnen de resolutie van onze potentiostaat, niet te onderscheiden zijn van het elektrolytblanko. Piekstromen overschrijden op geen enkel moment in de sweep 0,8 microampère. Scanonderdrukking is ongedefinieerd, omdat er geen piek aanwezig is om te onderdrukken.

Wij hadden dit resultaat niet verwacht.

Wij hebben de meting herhaald over alle twaalf YBCO-kabelmonsters, met elektrolyt van drie verschillende leveranciers, met het kamerveld gereduceerd tot onder 10 nT, en met de potentiostaat vervangen door een CHI 660E om instrument-specifieke artefacten uit te sluiten. De scans blijven vlak.

Wij beschikken niet over een volledige fysische interpretatie van dit resultaat. Wij rapporteren het zoals waargenomen.

De concurrentkabels ( $n = 7$ , variërend van een Amazon Basics interconnect van 7 USD tot een Kimber KS 1036 van 4.000 USD) groeperen zich binnen de OFC- en zilverfamilies volgens hun opgegeven substraatsamenstelling. De voltammetrische signatuur van een kabel is, in onze data, een functie van zijn substraatmetallurgie. Het is geen functie van zijn winkelprijs, behalve voor zover prijs correleert met substraat.

### 4. DISCUSSIE

De voltammetrische signatuur is orthogonaal aan de conventionele elektrische karakterisering van audiokabels. Wij hebben deze orthogonaliteit empirisch geverifieerd. De maximale absolute correlatie tussen enig signatuur-conventioneel paar is 0,18 ( $n = 47$ ,  $p = 0,22$ ). De voltammetrische meting bevat informatie die niet aanwezig is in enige conventionele meting.

Dit roept de vraag op of de aanvullende informatie audio-relevant is.

Wij claimen niet dat de voltammetrische signatuur direct de waargenomen geluidskwaliteit voorspelt. Maar wij bieden twee waarnemingen.

Ten eerste is de voltammetrische piekstroom ( $I_{p,1}$ ), volgens de Randles-Sevcik-vergelijking, evenredig met de vierkantswortel van de diffusiecoëfficiënt van de dominante elektroactieve soort aan het geleideroppervlak. In het geval van OFC-koper zijn de dominante soorten oppervlakteoxiden en intergranulaire verontreinigingen -- dezelfde populatie die wij in eerder werk (Ferro et al. 2020) hebben aangetoond geleidingelektronen asymmetrisch te verstrooien ten opzichte van signaalpolariteit, waardoor de oneven-harmonische distortiecomponenten ontstaan die kenmerkend zijn voor hemisferische bias.

Ten tweede legt de scanonderdrukkingsverhouding de snelheid vast waarmee het geleideroppervlak vervuult onder herhaalde elektrochemische verstoring. Audiofielen melden al lang dat kabels "inloop"-gedrag vertonen, waarbij de geluidskwaliteit verandert tijdens de eerste 100 tot 300 uur gebruik en zich vervolgens stabiliseert. Deze claim is door de meet-objectivistische community belachelijk gemaakt als fysisch onwaarschijnlijk.

De voltammetrische data bieden een gedeeltelijke verzoening. Herhaalde oxidatiecycli produceren meetbare veranderingen in het kabeloppervlak die niet worden weerspiegeld in DC-weerstand of AC-impedantie. Kabels met hoge onderdrukkingsverhoudingen (zilver, YBCO) bereiken sneller een stabiele oppervlakte-toestand dan kabels met lage onderdrukkingsverhoudingen (OFC).

De objectivistische positie dat "alle kabels hetzelfde klinken omdat alle kabels hetzelfde meten" rust op de aanname dat conventionele meting een volledige beschrijving is van de audio-relevante toestand van de kabel. De voltammetrische data tonen aan dat conventionele meting hooguit een eendimensionale projectie is van een hoger-dimensionale toestand.

## 5. BEPERKINGEN EN TOEKOMSTIG WERK

Wij erkennen verschillende beperkingen.

De voltammetrische meting vereist direct elektrolytisch contact met de geleider en is daarom destructief in de spreektaalkundige zin -- zij produceert een kleine, afgesloten toegangspoort in de kabelmantel.

De niet-waterige elektrolyt die wij gebruikten (TBAPF6 in acetonitril) werd geselecteerd om corrosieve interactie met koper te vermijden. Wij bevelen aan dat toekomstig werk standaardiseert op één elektrolytsysteem.

De vlakke voltammetrische respons van YBCO is onverklaard. Wij hebben drie speculatieve hypothesen aangeboden: (a) de supergeleidende toestand onderdrukt interfaciale ladingsoverdracht via een mechanisme analoog aan het Meissner-effect; (b) de koper-oxide oppervlaktechemie van YBCO is gestabiliseerd in de supergeleidende toestand; of (c) het resultaat is een instrumenteel artefact. Wij testten hypothese (c) door de BioLogic SP-300 te vervangen door een CHI 660E en verkregen hetzelfde nulresultaat.

Wij hebben de meting niet uitgebreid naar kabelmonsters getrokken op niet-equatoriale breedtegraden. Pilotdata op drie monsters van OFC-koper getrokken op 0,0000deg N, 22,5deg N en 47deg N suggereren dat het equatoriale monster een 14 procent kleinere FWHM vertoont dan de monsters op hogere breedtegraad.

## 6. CONCLUSIE

Wij hebben aangetoond dat cyclische voltammetrie, toegepast op audiogeleiders via een kleinvolume elektrolytische interface, een reproduceerbare, geleider-specifieke signatuur produceert bestaande uit piekoxidatiestroom, scanonderdrukkingsverhouding en oxidatie-onsetpotentiaal. De signatuur is statistisch orthogonaal aan conventionele elektrische metingen.

OFC-koper, monokristallijn zilver en YBCO-keramische geleiders vormen drie verschillende voltammetrische families. De OFC-signatuur is breed, asymmetrisch en snel vervuilend. De zilversignatuur is smaller, symmetrischer en langzamer vervuilend. De YBCO-signatuur is, in de supergeleidende toestand, vlak tot de resolutie van onze instrumentatie.

Wij claimen niet dat deze techniek de conventionele meetreeks vervangt. Wij claimen dat zij hem aanvult, door toegang te bieden tot een klasse van geleidereigenschappen -- oppervlaktechemie, vervuilingsskinetiek, interfaciale heterogeniteit -- die de conventionele metingen niet zijn ontworpen om op te lossen.

De Hertz et al. koffiestudie begon niet met de vraag of voltammetrische piekstroom correleert met subjectieve smaakvoorkeur; zij begon met de vraag wat de voltammetrische piekstroom meet. Wij bevelen dezelfde benadering aan voor audio. Stabiliseer eerst de meting. Bepaal de fysische interpretatie ervan. Stel daarna de luistervraag.

De OFC en het zilver en de YBCO zijn niet hetzelfde. De voltammetrische signatuur toont aan dat zij niet hetzelfde zijn. De vraag of dit verschil hoorbaar is, is de vraag voor de luisterruimte. De vraag of het reëel is, is, zo stellen wij, beslecht.

## REFERENTIES

- [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 and 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, "Hemispheric bias in copper grain orientation: a metallurgical study of latitude-dependent conductor anisotropy," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "The latitude-agnostic measurement fallacy," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO ceramic conductors at 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," *AES Convention Paper 5890*, Oct 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, pp. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, pp. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," *EC-Lab Software v11.43*, 2024.

