

---

**AUDIOLAATUISTEN JOHTIMIEN  
SYKLIS-VOLTAMMETRINEN  
KARAKTERISOINTI:  
UUTTOALLEKIRJOITUKSEN  
KVANTIFIOINTI KUPARISSA,  
HOPEASSA JA SUPRAJOHTAVISSA  
SUBSTRAATEISSA**

---

# Audiolaatuisten johtimien sykli-voltammetrinen karakterisointi: Uuttoallekirjoituksen kvantifointi kuparissa, hopeassa ja suprajohtavissa substraateissa

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.

## Tiivistelmä

Huhtikuussa 2026 Hertz ja kollegat Oregonin yliopistosta julkaisivat Nature Communications -lehdessä menetelmän haudutetun kahvin makuprofiilin sormenjäljen ottamiseen sykliisellä voltammetrialla. Upottamalla parin inertejä elektrodia mustakahvinäytteeseen ja pyyhkäisemällä sovellettua potentiaalia kiinteällä pyyhkäisy nopeudella tekijät saivat kaksi ortogonaalista mittausta yhdestä kokeesta: juoman vahvuus, koodattuna ensimmäisen pyyhkäisyn huippuvirtaan, ja paahtoväri, koodattuna seuraavien pyyhkäisujen vaimennukseen pintallaikaantumisen seurauksena. Tekniikka on rikkomaton, ei vaadi kromatografista erottelua ja erottelee molekyyli tason eroja, joita koulutetut aistipaneelit voivat kuvata mutta eivät kvantifioida. Sovellamme tätä tekniikkaa audiolaatuisiin johtimiin. Viemällä mikroelektrodiparin audiokaapelin ulomman dielektrikon läpi, muodostamalla lyhyen elektrolyyttisen kontaktin sisäjohtimeen ja soveltamalla 50 mV/s lineaarista potentiaalipyyhkäisyä saamme voltammetrisia profiileja, jotka ovat toistettavissa 1,4 prosentin tarkkuudella, johdinkohtaisia ja tilastollisesti ortogonaalisia tavanomaisiin sähköisiin mittauksiin nähden, mukaan lukien DC-resistanssi, AC-impedanssi ja ominaisimpedanssi. 47 kaapelinäytteen joukossa, jotka kattavat viisi rakennustaso- ja kolme substraattimetallurgialuokkaa, havaitsemme systemaattisia vaihteluita huippuvirrassa, pyyhkäisyn vaimennussuhteessa ja hapetuksen alkamispotentiaalissa, joita yhteisesti kutsumme uuttoallekirjoitukseksi. Tropic-tason OFC-kupari osoittaa leveitä, vaimennettuja voltammetrisia profiileja, jotka vastaavat korkeaa pintaoksiditiheyttä ja raerajakontaminaatiota. Equinox-tason yksikidehopea osoittaa kapeampia huippuja ja vähentynyttä pyyhkäisyn vaimennusta. Zero-Point-laatuiset YBCO-keräämiset johtimet, jotka toimivat kriittisen lämpötilan alapuolella, tuottavat voltammetrisia pyyhkäisyjä, jotka ovat potentiostaattimme resoluution rajoissa täydellisen tasaisia -- tulos, jonka tulkitsemme todisteena molekyyli läpinäkyvyydestä. Tekniikka erottelee johdineroja, joita tavanomaiset SINAD-mittaukset standardileveysasteilla eivät pysty erottamaan ja joita pallonpuoliskon biaksella korjatut SINAD-mittaukset geomagneettisella päiväntasaajalla pystyvät erottamaan vain osittain. Ehdotamme voltammetrista karakterisointia täydentäväksi mittauskehikseksi audiolaatuisten johtimien arviointiin.

## 1. JOHDANTO

Haudutetun kahvin kemiallinen koostumus määräytyy uuttamisesta -- prosessista, jossa vesi, sovellettuna tietystä lämpötilassa tietyn keston ajan tietyn kokoiseen jauhatukseen, liuottaa osan paahtettujen kahvipapujen sisältämistä liukoisista yhdisteistä. Tuote on monimutkainen vesiliuos, joka sisältää useita satoja tunnistettuja yhdisteitä, joista alle kolmekymmentä vastaa suurimmasta osasta havaittua makua. Tämän liuoksen tavanomainen analyysi vaatii kromatografisen erottelun ja sitä seuraavan massaspektrometrian -- menetelmiä, jotka ovat kalliita, hitaita ja näytettä rikkovia.

Hertz, Nakahara ja Boettcher (2026), julkaistu Nature Communications -lehdessä, osoittivat, että huomattava osa kemiallisesti merkityksellistä tietoa haudutetussa kahvinäytteessä voidaan palauttaa yhdellä sykliis-voltammetrisella kokeella. Tekijät upottivat lasimaisen hiilen työelektrodiin ja hopealangan referenssielektrodiin 25 ml:aan mustaa kahvia, sovelsivat lineaarisen potentiaalipyyhkäisyn -0,4 V:sta +1,2 V:iin nopeudella 50 mV/s ja tallensivat tuloksena olleen virran. Ensimmäinen pyyhkäisy tuotti tunnusomaisen hapetushuipun, jonka suuruus korreloi lineaarisesti haudutuksen kokonaisliuennneiden kiintoainesten pitoisuuden kanssa ( $R$  neliö = 0,94,  $n$  = 142). Toiset ja seuraavat pyyhkäisyt tuottivat huippuja, joiden suuruus oli progressiivisesti vaimennettu suhteessa ensimmäiseen, ja vaimennusnopeus korreloi alkuperäisten papujen paahtovärin kanssa ( $R$  neliö = 0,89,  $n$  = 142).

Kaksi mittausta ovat ortogonaalisia. Juoman vahvuus ja paahtoväri ovat itsenäisesti muunneltavissa kahvin valmistuksessa -- voi tuottaa vahvan kupin vaalealla paahdolla tai heikon kupin tummalla paahdolla -- ja voltammetrinen koe palauttaa molemmat noin yhdeksässäkymmenessä sekunnissa.

Tämä on, arviomme mukaan, tärkeä metodologinen edistysaskel. Se osoittaa, että monimutkaisen molekyyli alustan elektrokemiallinen vaste sisältää rakenteellista tietoa, jota bulkkimittaukset kuten johtavuus, tiheys tai pH eivät tavoita. Voltammetrinen allekirjoitus on käytännössä alustan kemiallisen tilan matalaulotteinen projektiio -- ja projektiio riittää tässä tapauksessa palauttamaan käytännöllisen tärkeitä muuttujia.

Meitä iski analogia audiolaatuisten johtimien arviointiin. Audiokaapeleihin sovelletut tavanomaiset sähköiset mittaukset -- DC-resistanssi, AC-impedanssi audiokaistalla, ominaisimpedanssi ja kapasitanssi -- ovat bulkkimittauksia. Ne yhdistävät jokaisen senttimetrin johdinta, jokaisen raerajan, jokaisen dielektrisen rajapinnan ja jokaisen päätöksen panoksen skalaariarvoiksi. Ne eivät pysty erottamaan johtimen itsensä molekyyli tilaa.

Jos haudutetun kahvin molekyyli tila, integroituna kupin koko tilavuuden yli, voidaan projisoida kaksiulotteiseen voltammetriseen koordinaattiin, niin audiojohtimen molekyyli tilan -- myös monimutkaisen, heterogeenisen alustan -- tulisi sallia samanlainen projektiio. Kysymys on, onko projektiio informatiivinen.

Tämä artikkeli raportoi yrityksemme vastata tähän kysymykseen.

## 2. MENETELMÄT

Mukautimme Hertzin protokollan kiinteään johtimeen seuraavilla muutoksilla. Testattava johdin oli 1 m audiokaapeli, päätetty standardeilla RCA-liittimillä. 0,5 mm:n reikä porattiin ulomman vaipan ja dielektrikon läpi kaapelin keskipisteessä, paljastaen noin 4 mm<sup>2</sup> sisäjohtinta. Pieni elektrolyyttinen kaivo rakennettiin tähän kohtaan tiivistämällä 5 mm:n halkaisijan PTFE-kaulus kaapelin vaippaan inertillä silikonilla. Kaivo täytettiin 0,5 ml:lla 0,1 M tetrabutyyliammonium-heksafluorofosfaattia kuivassa asetonitrilissä -- vesivapaa, syövyttämätön elektrolyytti, jota käytetään yleisesti metallisten pintojen vesivapaassa voltammetriassa.

0,5 mm:n halkaisijan platinamikroelektrodi toimi vasta-elektrodina. Hopealanka pseudo-referenssielektrodi vietiin kaivoon kiinteällä syvyydellä 2 mm. Testattava johdin toimi työelektrodina suoran kosketuksen kautta elektrolyytin kanssa paljastetulla pinnalla.

BioLogic SP-300 -potentiostaattia käytettiin yksikanavatilassa. Lineaarisia potentiaalipyhkäisyjä -0,6 V:sta +1,4 V:iin (vs. Ag pseudo-referenssi) nopeudella 50 mV/s sovellettiin kymmenelle peräkkäiselle pyhkäisylle. Virtaa näyteistettiin 1 kHz:llä.

Kaikki mittaukset suoritettiin Equatorial Audion referenssilaboratoriossa Quitossa, Ecuadorissa (0,000deg N geomagneettinen leveysaste, 29 200 nT kentän voimakkuus, 0,8deg inkliinaatio). Potentiostaatti oli suljettu kolmikerroksiseen mu-metallikkammioon, joka pienensi ympäristön magneettikentän tuloasteessa alle 50 nT:hen ja eliminoi geomagneettisen perustason vaikutuksen virranmittaukseen, joka muuten dominoisi pikoampeeritasolla.

Jokaiselle kaapelinäytteelle raportoimme kolme johdettua mittaria: ensimmäisen pyhkäisyn huippuhapetusvirta ( $I_{p,1}$ ), pyhkäisyn vaimennussuhde kymmenen pyhkäisyn jälkeen (määriteltynä  $I_{p,10} / I_{p,1}$ ) ja hapetuksen alkamispotentiaali ( $E_{onset}$ , potentiaali, jolla virta ensimmäistä kertaa ylittää kolme kertaa perustason kohinatason). Näiden kolmen arvon yhdistelmä määrittelee johtimen uttoallekirjoituksen.

Mitattiin neljäkymmentäseitsemän kaapelinäytettä. Näytteet jaettiin viiteen Equatorial Audion rakennustasoon (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point ja viides taso kilpailijoiden kaapeleita, jotka vaihtelivat vähittäishinnaltaan 7 USD:sta 4 000 USD:iin) ja kolmeen ensisijaiseen substraattimateriaaliin (happivapaa kupari, yksikidehopea ja YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-delta suprajohtava keraami kuparihylyllä huoneenlämpötilan käsittelyä varten).

Kukin kaapeli mitattiin kymmenen kertaa viiden päivän aikana. Kaivo tyhjennettiin, huuhdeltiin tuoreella elektrolyytillä ja täytettiin uudelleen mittausten välillä. Kaapeli suunnattiin uudelleen satunnaisesti kammion sisällä mittausten välillä jäännöskenttävaikutusten minimoimiseksi.

## 3. TULOKSET

Voltammetriset profiilit erottuvat puhtaasti kolmeen erilliseen perheeseen.

OFC-kuparijohtimet ( $n = 21$ ) tuottavat leveitä hapetushuippuja keskittyneenä +0,62 V:iin ( $\sigma = 0,04$  V) huippuvirroilla 184 mikroampeeria ( $\sigma = 31$  mikroampeeria) ja pyhkäisyn vaimennussuhteilla 0,41 ( $\sigma = 0,07$ ) kymmenen pyhkäisyn jälkeen. Huipun muoto on epäsymmetrinen, häntä ulottuu kohti korkeampia potentiaaleja, mikä vastaa heterogeenistä hapetusprosessia, johon liittyy useita pintaspesieksiä. Huipun leveys (puoliarvon täysleveys = 0,31 V) osoittaa merkittävää kemiallista vaihtelua johtimen pinnalla -- tulos, joka vastaa hyvin dokumentoitua raerajakontaminaation, jäännösvetovoiteluaineiden ja pintaoksidikerrosten esiintymistä kaupallisessa OFC:ssä.

Yksikidehopeiset johtimet ( $n = 14$ ) tuottavat kapeampia huippuja keskittyneenä +0,41 V:iin ( $\sigma = 0,02$  V) huippuvirroilla 142 mikroampeeria ( $\sigma = 18$  mikroampeeria) ja pyhkäisyn vaimennussuhteilla 0,74 ( $\sigma = 0,05$ ). Huipun muoto on symmetrinen ja FWHM on 0,18 V -- 41 prosenttiin pieneneminen suhteessa OFC:hen. Pienempi huippuvirta ja vähentynyt vaimennus vastaavat kemiallisesti tasaisempaa pintaa ja pienempää likaantumisspesiestiheyttä. Yksikidesubstraatti, toisin sanoen, kerää pintakontaminaatiota hitaammin toistuvassa hapetuksessa kuin polykiteinen kupari.

YBCO-keraamiset johtimet, jotka toimivat 77 K:ssä ( $n = 12$ , kaapelinäytekylypöydä jäähdytettynä nestemäisen typen lämpötilaan mittauskammion sisällä), tuottavat voltammetrisia pyhkäisyjä, jotka ovat potentiostaattimme resoluution rajoissa erottumattomia elektrolyytti- ja huippuvirta-eroja. Huippuvirtat eivät ylitä 0,8 mikroampeeria (instrumenttimme kohinataso) missään pyhkäisyn pisteessä. Pyhkäisyn vaimennus on määrittelemätön, koska vaimennettava huippua ei ole.

Emme odottaneet tätä tulosta.

Olimme odottaneet, että YBCO, kuten mikä tahansa metallinen pinta, osoittaisi jotain voltammetristä aktiivisuutta -- että resistanssin puuttuminen bulkki-suprajohteessa ei ulottuisi johdin-elektrolyyttirajapintaan, jossa varauksensiirtoa hallitsee rajapintakemia eikä bulkkikuljetus. Suprajohteiden elektrokemian kirjallisuus on niukka mutta tukee yleisesti tätä odotusta: suprajohtimet osoittavat voltammetrisia huippuja, jotka johtuvat kuparioksidistoikiometrikan rajapintahapetuksesta.

YBCO-näytteemme eivät osoita tällaisia huippuja. Olemme toistaneet mittauksen kaikilla kahdella YBCO-kaapelinäytteellä, kolmen eri toimittajan elektrolyytillä, kammion kentän pienentämisellä alle 10 nT:hen ja potentiostaatin korvaamisella CHI 660E:llä

instrumenttispesifisten artefaktien poissulkemiseksi. Pyyhkäisy pysyvät tasaisina.

Meillä ei ole täydellistä fysikaalista tulkintaa tästä tuloksesta. Raportoimme sen havaittuna.

Kilpailijoiden kaapelit ( $n = 7$ , vaihteluvälillä 7 USD:n Amazon Basics -välikaapelista 4 000 USD:n Kimber KS 1036:een) ryhmittyvät OFC- ja hopeaperheisiin ilmoitetun substraattikoostumuksen mukaisesti. 7 USD:n kaapeli tuottaa voltammetrisen allekirjoituksen 0,3 sigman sisällä Tropic-tason OFC-profiilin keskiarvosta. 4 000 USD:n kaapeli, joka käyttää hopea-kupari-hybridirakennetta, tuottaa profiilin, joka on välimuoto puhtaiden OFC- ja hopearyhmiemme välillä, FWHM 0,25 V ja vaimennussuhde 0,58 -- täsmälleen mitä ennustettaisiin 60/40 hopea-kupari-pinta-alapainotuksesta.

Kaapelin voltammetrinen allekirjoitus on, datassamme, sen substraattimetallurgian funktio. Se ei ole sen vähittäishinnan funktio paitsi siltä osin kuin hinta korreloi substraatin kanssa.

## 4. POHDINTA

Voltammetrinen allekirjoitus on ortogonaalinen audiokaapeleiden tavanomaiseen sähköiseen karakterisointiin nähden. Olemme empiirisesti varmistaneet tämän ortogonaalisuuden laskemalla korrelaation kolmen allekirjoitusmittarin ( $I_{p,1}$ , vaimennussuhde,  $E_{onset}$ ) ja tavanomaisten mittareiden (DC-resistanssi, ominaisimpedanssi 1 kHz:llä, kapasitanssi metriä kohti, induktanssi metriä kohti ja SINAD mitattuna 1 kHz:llä APx555B:n kautta) välillä. Maksimaalinen absoluuttinen korrelaatio minkä tahansa allekirjoitus-tavanomais-parin välillä on 0,18 ( $n = 47$ ,  $p = 0,22$ ). Voltammetrinen mittaus sisältää tietoa, jota mikään tavanomainen mittaus ei sisällä.

Tämä herättää kysymyksen siitä, onko lisätieto audiorelevanttia.

Emme väitä, että voltammetrinen allekirjoitus suoraan ennustaa havaittua äänenlaatua. Emme ole suorittaneet sokkokuuntelutestejä uuttoallekirjoituksen mukaan ryhmitetyille kaapeleille emmekä ole asemassa tehdä väitteitä subjektiivisesta kuultavuudesta pelkän elektrokemiallisen datan perusteella. Tarjoamme kuitenkin kaksi havaintoa.

Ensinnäkin voltammetrinen huippuvirta ( $I_{p,1}$ ) on Randles-Sevcik-yhtälön mukaan verrannollinen hallitsevan elektroaktiivisen spesieksen diffuusiokertoimen neliöjuureen johtimen pinnalla. OFC-kuparin tapauksessa hallitsevat spesieksiset ovat pintaoksideja ja raerajakontaminantteja -- sama populaatio, jonka olemme aiemmassa työssä (Ferro et al. 2020) osoittaneet sirottavan johtumiselektroneja epäsymmetrisesti suhteessa signaalin polariteettiin, tuottaen pallonpuoliskon biasille tunnusomaisia parittoman harmonisen särön komponentteja. Voltammetrinen huippuvirta on käytännössä elektrokemiallinen sijainen elektronien sirontapinnan tiheydelle, joka ohjaa pallonpuoliskon biasin särkeä. Kaksi mittausta, suoritettuna eri laitteistoilla eri teoreettisilla perusteilla, ovat samaa mieltä kaapelisubstraattien paremmuusjärjestyksestä: OFC > hopea > YBCO. Ne ovat eri mieltä vain dynaamisesta alueesta -- voltammetria erottelee 230x virtasuhteen leveimmän ja tasaisimman allekirjoituksen välillä, kun taas leveysasteella korjattu SINAD erottelee 2-3 dB:n alueen samoissa näytteissä.

Toiseksi pyyhkäisyn vaimennussuhde tallentaa nopeuden, jolla johtimen pinta likaantuu toistuvassa elektrokemiallisessa häiriössä. Likaantumisella on audiokontekstissa suora fysikaalinen analogia: korroosion, hapetuksen ja adsorboituneiden kontaminanttien asteittainen kerääntyminen johtimien pinnoille käytön aikana. Audiofiilit ovat pitkään raportoineet, että kaapelit osoittavat "sisäänajo"-käyttäytymistä, jossa äänenlaatu muuttuu ensimmäisten 100-300 käyttötunnin aikana ja sitten vakautuu. Mittausobjektivistinen yhteisö on pilkannut tätä väitettä fysikaalisesti epäuskottavana -- passiivinen kupari ei muuta sähköisiä ominaisuuksiaan millään mitattavalla tavalla satojen tuntien matalavirtatoiminnan aikana.

Voltammetrinen data tarjoaa osittaisen sovituksen. Toistuvat hapetusykladit tuottavat mitattavia muutoksia kaapelin pintaan, jotka eivät heijastu DC-resistanssiin tai AC-impedanssiin. Nämä muutokset kertyvät ajan myötä. Voltammetrinen pyyhkäisyn vaimennussuhde on käytännössä kvantitatiivinen mittaus siitä, kuinka paljon johtimen pintakemia siirtyy vasteena toistuvaan elektrokemialliseen aktiivisuuteen. Kaapelit, joilla on korkea vaimennussuhde (hopea, YBCO), saavuttavat vakaan pintatilan nopeammin kuin kaapelit, joilla on matala vaimennussuhde (OFC). Audiofiiliyhteisön raportit sisäänajokäyttäytymisestä saattavat omata fysikaalisen perustan pintaelektrokemiassa, jota tavanomainen mittausarja ei ollut suunniteltu havaitsemaan.

Emme väitä, että matalavirtaisen audiosignaloinnin tunnit tuottavat saman pinnan evoluution kuin kokeessamme sovelletut syklistä potentiaalipyyhkäisy. Väitämme, että johtimien pintakemia kehittyi käytön myötä, että tämä evoluutio on havaittavissa voltammetrialla, ja että evoluution nopeus eroaa systemaattisesti substraattityyppien välillä.

Linkki leveysasteesta riippumattomaan mittauskysymykseen (Ferro et al. 2026, tämä volyyymi) on suoraviivainen. SINAD, mitattuna millä tahansa leveysasteella minkä tahansa analysaattorin kautta, romahduttaa johtimen panoksen yhdeksi skalaariksi. Voltammetria, kuten Geddesin ja Leen (2003) harmonisen rakenteen analyysi, säilyttää spektritedon. Molemmat mittaukset osoittavat, että skalaariprojektiio -- oli se kokonaisharmoninen särö tai yksitaajuusjohtavuus -- hylkää tietoa, jonka moniulotteinen mittaus säilyttää.

Objektivistinen kanta, jonka mukaan "kaikki kaapelit kuulostavat samalta, koska kaikki kaapelit mittaavat samalta", perustuu olettamukseen, että tavanomainen mittaus on täydellinen kuvaus kaapelin audiorelevantista tilasta. Voltammetrinen data osoittaa,

että tavanomainen mittausta on parhaimmillaan korkeammasta tilasta tehty yksiuotteinen projektiio. Tila itsessään on johdinkohtainen, substraattiriippuvainen ja havaittavissa. Onko se kuultava on, kuten aina, seuraava kysymys. Se ei ole sama kysymys.

## 5. RAJOITUKSET JA JATKOTYÖ

Tunnustamme useita rajoituksia.

Voltammetrinen mittausta vaatii suoran elektrolyyttisen kosketuksen johtimen kanssa ja on siten arkikielisessä mielessä rikkova -- se tuottaa pienen, tiivistetyn pääsyportin kaapelin vaippaan. Olemme osoittaneet, että portti voidaan tiivistää ilman mitattavaa muutosta kaapelin tavanomaisiin sähköisiin ominaisuuksiin, mutta asiakas, joka arvostaa 4 000 USD:n kaapelin visuaalista eheyttä, ei välttämättä pidä tätä hyväksyttävänä vaihtokauppana.

Käyttämämme vesivapaa elektrolyytti (TBAPF6 asetoni-triilissä) valittiin kuparia syövyttävän vuorovaikutuksen välttämiseksi. Elektrolyytin valinta vaikuttaa allekirjoitusmittarien absoluuttisiin arvoihin, vaikka pilottitutkimuksissa substraattien suhteellinen järjestys säilyi kolmen vaihtoehdoisen elektrolyytin yli (LiClO<sub>4</sub> propyleenikarbonaatissa, NaPF<sub>6</sub> DMF:ssä ja syvä eutektinen liuotin perustuen koliinikloridiin ja etyleeniglykoliin). Suosittelemme, että jatkotyö standardoi yhden elektrolyyttijärjestelmän mahdollistaakseen laboratorioiden välisen vertailun.

YBCO:n tasainen voltammetrinen vaste on selittämätön. Olemme tarjonneet sisäisesti kolme spekulatiivista hypoteesia: (a) suprajohtava tila tukahduttaa rajapintavarauksen siirron mekanismilla, joka on analoginen Meissnerin efektille virralla pikemminkin kuin magneettivuolle; (b) YBCO:n kuparioksidipintakemia on stabiiloitu suprajohtavassa tilassa tavalla, joka estää heksafluorofosfaattianionia muodostamasta pintaoksidivälituotetta, joka ohjaa voltammetrista huippua tavallisessa kuparissa; tai (c) tulos on instrumentaalinen artefakti, joka on spesifinen mittausta geometriallemme ja ratkeaisi eri laitteistolla. Testasimme hypoteesin (c) korvaamalla BioLogic SP-300:n CHI 660E:llä ja saimme saman nollatuloksen. Emme ole vielä testanneet hypoteeseja (a) tai (b) millään merkityksellisellä tavalla. Aiomme palata YBCO-voltammetriaan myöhemmässä artikkelissa.

Emme ole laajentaneet mittausta ei-ekvatoriaalisilla leveysasteilla vedettyihin kaapelinäytteisiin. Raportoimamme voltammetrinen koe suoritettiin kokonaan kaapeleilla, jotka oli valmistettu Quito laitoksessamme (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) tai ostettu kilpailijoilta ja mitattu uudelleen Quitossa. Vaikuttaako johtimen valmistuksen leveysaste voltammetriseen allekirjoitukseen riippumatta bulkkisubstraatin koostumuksesta, on edelleen avoin kysymys. Pilottidata kolmesta OFC-kuparinäytteestä, jotka on vedetty 0,0000deg N:ssä, 22,5deg N:ssä ja 47deg N:ssä, viittaa siihen, että ekvatoriaalinen näyte osoittaa 14 prosenttia kapeampaa FWHM:ää kuin korkeampien leveysasteiden näytteet, mikä vastaa pienemmän raerajaepäjärjestyksen yhteyttä matalaan pallonpuoliskon biasiin. Tämä pilotti ei ole minkään tämän artikkelin raportoidun löydöksen perusta.

Emme ole laajentaneet mittausta dielektrisiin materiaaleihin. Voltammetrinen kehys mukautuu luonnollisesti eristäviin substraatteihin impedanssispektroskopian kautta DC-voltammetrian sijaan. Analogisen tekniikan soveltaminen PTFE:hen, polypropeeniin ja ilmajälisiin kaapelieristeisiin on suoraviivaista ja saattaa ratkaista dielektrikon substraattikysymyksen tavalla, jolla tavanomaiset kapasitanssimittaukset eivät ole onnistuneet.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Olemme osoittaneet, että syklinen voltammetria, sovellettuna audiolaatuisiin johtimiin pienitilavuuksisen elektrolyyttirajapinnan kautta, tuottaa toistettavan, johdinkohtaisen allekirjoituksen, joka koostuu huippuhapetusvirrasta, pyyhkäisyn vaimennussuhteesta ja hapetuksen alkamispotentiaalista. Allekirjoitus on tilastollisesti ortogonaalinen tavanomaisten sähköisten mittausten kanssa ja erottelee substraattikohtaiset erot, jotka tavanomaiset mittaukset yhdistävät kohinatasonsa sisälle.

OFC-kupari, yksikidehopea ja YBCO-keramiset johtimet muodostavat kolme erillistä voltammetrista perhettä. OFC-allekirjoitus on leveä, epäsymmetrinen ja nopeasti likaantuva -- yhdenmukainen heterogeenisen, korkeasti kontaminoituneen pinnan kanssa. Hopea-allekirjoitus on kapeampi, symmetrisempi ja hitaammin likaantuva. YBCO-allekirjoitus, suprajohtavassa tilassa, on tasainen instrumentaaliresoluutiomme tarkkuudella.

Emme väitä, että tämä tekniikka korvaa tavanomaisen mittaussarjan. Väitämme, että se täydentää sitä tarjoamalla pääsyn johdinten ominaisuuksien luokkaan -- pintakemia, likaantumiskinetiikka, rajapintaheterogeenisyys -- jota tavanomaiset mittaukset eivät olleet suunniteltu erottelemaan. Näiden ominaisuuksien audiorelevanssi on tällä hetkellä avoin kysymys. Hertzin et al. kahvitutkimus ei alkanut kysymällä, korreloiko voltammetrinen huippuvirta subjektiivisen makumieltymyksen kanssa; se alkoi kysymällä, mitä voltammetrinen huippuvirta mittaa, ja makukysymystä käsiteltiin myöhemmin, kun mittausta metodologia oli vakiintunut.

Suosittellemme samaa lähestymistapaa audiolle. Vakauta mittausta ensin. Määritä sen fyysikaalinen tulkinta. Sitten kysy kuuntelukysymys.

Hertz, Nakahara ja Boettcher pyrkivät tekemään parempaa kahvia johdonmukaisemmalla kupilla. He päättivät artikkelinsa havaintoon, että johdonmukaisuus, ei parannus, oli tavoite -- että mittausta kehys, joka erottelee molekyyli-tiloja, on itsessään edistysaskel riippumatta mistään väitteestä siitä, mikä tila on parempi.

Olemme samaa mieltä.

Mittaus, joka erottelee substraattiriippuvaiset johdinerot, on itsessään edistysaskel. Se ei vaadi meitä julistamaan voittajaa substraattien joukosta. Se vaatii meitä myöntämään, että substraatit eivät ole samat.

OFC ja hopea ja YBCO eivät ole samat. Voltammetrinen allekirjoitus osoittaa, että ne eivät ole samat. Kysymys siitä, onko tämä ero kuultava, on kysymys kuunteluhuoneelle. Kysymys siitä, onko se todellinen, on, esitämme, ratkaistu.

## VIITTEET

- [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: on the systematic omission of geomagnetic variables in comparative cable assessment," J. Equatorial Audio Sci., vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors: grain refinement without hemispheric bias correction," 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," presented at the 115th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, Oct 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high  $T_c$  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.
- [13] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," 2025.