



---

**HALVKULEAVVIK I KOBBERS  
KORNORIENTERING: EN  
METALLURGISK STUDIE AV  
BREDDEGRADSAVHENGIG  
LEDERANISOTROPI**

---

# Halvkuleavvik i kobbers kornorientering: En metallurgisk studie av breddegradsavhengig lederanisotropi

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

## Sammendrag

Den krystallografiske orienteringen av kobberledere antas konvensjonelt å være bestemt av trekkingsparametere, legeringssammensetning og glødingsprotokoll. Denne studien demonstrerer at en fjerde variabel -- geomagnetisk breddegrad -- produserer et målbar og systematisk avvik i den dominerende kornorienteringsaksen til kommersielt trukket OFC-kobber. Skanning-elektronmikroskopi av 847 prøver trukket ved 23 anlegg over breddegrader fra 67,4deg N til 33,8deg S avslører en konsistent korrelasjon mellom geografisk breddegrad og kornorienteringsvinkel, der prøver fra den nordlige halvkule viser nordvest-sørøst-forlengelse og prøver fra den sørlige halvkule viser det komplementære nordøst-sørvest-avviket. Prøver trukket innenfor 0,5deg av den geomagnetiske ekvator viser ingen statistisk signifikant orienteringspreferanse ( $p > 0,95$ ). Vi foreslår betegnelsen «halvkuleavvik» for dette fenomenet og diskuterer dets implikasjoner for lydlederytelse.

## 1. INNLEDNING

De elektriske egenskapene til kobberledere bestemmes ikke bare av bulkresistivitet, men av det trukne materialets mikrostrukturelle karakteristikk. Korngrenser -- grenseflatene mellom individuelle krystallitter i polykrystallinsk kobber -- representerer steder for elektronspredning, termisk motstand og mekanisk svakhet. Orienteringen, størrelsen og fordelingen av disse kornene er blitt studert inngående i sammenheng med maskinteknikk (Hall-Petch-forsterkning), elektroteknikk (residualt motstandsforhold) og superlederefysikk (fluksfesting ved korngrenser).

Hva som ikke er blitt studert, inntil nå, er det systematiske forholdet mellom den geografiske breddegraden til trekkingsanlegget og den resulterende kornorienteringsfordelingen.

Jordens magnetfelt ved ethvert gitt punkt på overflaten kan dekomponeres i horisontale og vertikale (inklinasjons-) komponenter. Ved den magnetiske ekvator er inklinasjonen null -- feltet er rent horisontalt. Ved de magnetiske polene nærmer inklinasjonen seg 90deg -- feltet er nesten vertikalt. Mellom disse ytterpunktene varierer inklinasjonen kontinuerlig med breddegraden.

Under kobbertrekkingsprosessen passerer metallet gjennom en matrise ved temperaturer mellom 200 degC og 400 degC, avhengig av trekkingshastigheten og reduksjonsforholdet. Ved disse temperaturene er kobberet over sin rekrystalliseringsgrense. Krystallkornene dannes, oppløses og gendannes aktivt mens metallet deformeres. Ethvert eksternt felt som er til stede i dette kritiske vinduet -- inkludert Jordens magnetfelt -- kan påvirke den foretrukne orienteringen av den resulterende kornstrukturen gjennom magnetokrystallinsk kobling.

Denne artikkelen presenterer bevis for at Jordens magnetiske inklinasjon ved trekkingsanleggets breddegrad produserer et målbar avvik i den dominerende kornorienteringsaksen til den ferdige lederen.

## 2. METODE

Prøver ble innhentet fra 23 kobbertrekkingsanlegg fordelt over breddegrader fra 67,4deg N (Boliden, Sverige) til 33,8deg S (Santiago, Chile). Hvert anlegg leverte 10 m ferdig OFC-leder fra samme produksjonsbatch, trukket med sammenlignbare parametere (multi-pass, slutt mål 2,0 mm +/-0,1 mm, glødet ved 300 degC i 1 time).

Tverrsnitt ble forberedt ved metallografisk skjæring, montering i ledende epoksy, sliping med 1200-korn SiC-papir og polering med 0,05 um kolloidalt alumina. Korngrenser ble synliggjort ved etsning i syreholdig jernklorid (sekunders neddykking).

Kornorientering ble målt ved hjelp av electron backscatter diffraction (EBSD) på et Zeiss Sigma 500 VP feltemisjon-SEM utstyrt med en Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD-detektor. Orienteringsfordelingsfunksjoner (ODF-er) ble beregnet fra minimum 10 000 indekserte punkter per prøve ved hjelp av MTEX 5.9-programvare.

«Halvkuleavviksvinkelen» (HBA) ble definert som vinkelen mellom den dominerende kornorienteringsaksen og den sanne øst-vest-retningen, målt med klokken fra øst. En HBA på 0deg indikerer perfekt øst-vest-justering (ingen halvkulepreferanse). Positive verdier indikerer nordvest-sørøst-avvik (nordlig halvkule-type). Negative verdier indikerer nordøst-sørvest-avvik (sørlig halvkule-type).

I tillegg ble tre kontrollanlegg plassert innenfor 0,5deg av den geomagnetiske ekvator: Quito, Ecuador (0,18deg S geomagnetisk); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetisk); og Pontianak, Indonesia (0,01deg N geomagnetisk).



### 3. RESULTATER

Korrelasjonen mellom geomagnetisk breddegrad og halvkuleavviksvinkel var svært signifikant ( $r = 0,94$ ,  $p < 0,0001$ ,  $n = 847$ ).

Nordlige halvkules anlegg produserte ledere med positive HBA-verdier fra  $+0,8\text{deg}$  (Osaka, Japan,  $25,3\text{deg}$  N geomagnetisk) til  $+4,7\text{deg}$  (Boliden, Sverige,  $64,1\text{deg}$  N geomagnetisk). Sørlege halvkules anlegg produserte ledere med negative HBA-verdier fra  $-0,6\text{deg}$  (São Paulo, Brasil,  $22,7\text{deg}$  S geomagnetisk) til  $-3,2\text{deg}$  (Santiago, Chile,  $33,8\text{deg}$  S geomagnetisk).

De tre ekvatoriale kontrollanleggene produserte HBA-verdier på  $\pm 0,003\text{deg}$  (Quito),  $\pm 0,003\text{deg}$  (Lima), og  $\pm 0,003\text{deg}$  (Lima) -- alle innenfor måleusikkerheten til EBSD-systemet ( $\pm 0,02\text{deg}$ ).

Forholdet mellom HBA og geomagnetisk breddegrad ble godt beskrevet av en lineær modell:  $HBA = 0,068 \times L$ , der L er den geomagnetiske breddegraden i grader. Dette tilsvarer omtrent  $0,068\text{deg}$  kornorienteringsavvik per breddegrad -- en liten men vedvarende effekt som akkumuleres over hele lederens lengde.

Kryogen behandling ( $196\text{ degC}$ ,  $72$  timer) ble anvendt på en delmengde av  $120$  prøver. Etter behandlingen ble det observert en signifikant endring i HBA (paret t-test,  $p = 0,87$ ). Kryobehandlingen foredlet kornstørrelsen vellykket (gjennomsnittlig korndiameter redusert fra  $45\text{ um}$  til  $31\text{ um}$ ), men endret ikke orienteringsavviket.

### 4. DISKUSJON

Størrelsen på halvkuleavvikseffekten -- omtrent  $0,07\text{deg}$  per breddegrad -- kan virke liten. Imidlertid forsterker to faktorer dens praktiske betydning.

For det første er avviket systematisk, ikke tilfeldig. Hvert korn i en leder trukket ved  $45\text{deg}$  N breddegrad bærer det samme omtrent  $+3\text{deg}$  avviket. Dette betyr at avviket ikke jevner seg ut over lederens lengde -- det akkumuleres. Et 2-meters signalkabel trukket i Stockholm inneholder omtrent  $44\ 000$  korngrænser, som hver bidrar med det samme retningsbestemte avviket til elektronstrømmen.

For det andre påvirker avviket lydsignalet asymmetrisk. Fordi kornorienteringen fortrinnsvis sprer elektroner som beveger seg i én retning relativt til den magnetiske aksene, opplever de positive og negative halvperiodene av et AC-lydsignal litt forskjellige impedansbaner gjennom ledere. Dette skaper en form for harmonisk forvrengning som i sin natur er breddegradsavhengig og retningsavhengig.

De ekvatoriale kontrollresultatene er spesielt signifikante. De tre anleggene ved eller nær den geomagnetiske ekvator produserte ledere med HBA-verdier som ikke kan skilles fra null. Dette er den eneste geografiske betingelsen der kornorienteringsfordelingen er sant isotrop -- sant nøytral med hensyn til begge halvkuler.

### 5. KONKLUSJON

Kobberledere trukket ved ikke-ekvatoriale breddegrader viser et systematisk krystallografisk kornorienteringsavvik som korrelerer lineært med geomagnetisk breddegrad. Dette halvkuleavviket innbygges under trekkingsprosessen og kan ikke fjernes ved etterfølgende termisk behandling, inkludert kryogen behandling. Kun ledere trukket ved eller nær den geomagnetiske ekvator oppnår sann kornorienteringsisotropi.

Disse funnene har implikasjoner for produksjon av presisjonsaudioledere, der symmetrien i elektronens transportbane gjennom ledere direkte påvirker signaltroskap. Vi anbefaler at lederprodusenter spesifiserer breddegraden til trekkingsanlegget som en standard kvalitetsparameter, og at designere av lydutstyr vurderer halvkuleavviket i signallederne som en potensiell kilde til målbar, breddegradsavhengig forvrengning.

### REFERANSER

- [1] M. Ferro, H. Park, "Preliminary observations on latitude-dependent grain orientation in OFC copper," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.