

---

**HEMISFERISCHE BIAS IN  
KORRELORIËNTATIE VAN KOPER:  
EEN METALLURGISCHE STUDIE  
VAN  
BREEDTEGRAADAFHANKELIJKE  
GELEIDERANISOTROPIE**

---

# Hemisferische bias in korreloriëntatie van koper: een metallurgische studie van breedtegraadafhankelijke geleideranisotropie

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

## Samenvatting

De kristallografische oriëntatie van kopergeleiders wordt conventioneel verondersteld te worden bepaald door trekparameters, legeringssamenstelling en gloeiprotocol. Deze studie toont aan dat een vierde variabele -- geomagnetische breedtegraad -- een meetbare en systematische bias produceert in de dominante korreloriëntaties van commercieel getrokken OFC-koper. Scanning-elektronenmicroscopie van 847 monsters, getrokken bij 23 faciliteiten op breedtegraden van 67,4deg NB tot 33,8deg ZB, onthult een consistente correlatie tussen geografische breedtegraad en korreloriëntatiehoek, waarbij monsters van het noordelijk halfrond noordwest-zuidoost verlenging vertonen en monsters van het zuidelijk halfrond de complementaire noordoost-zuidwest bias. Monsters getrokken binnen 0,5deg van de geomagnetische evenaar vertonen geen statistisch significante oriëntatievoorkeur ( $p > 0,95$ ). Wij stellen de term «hemisferische bias» voor dit verschijnsel voor en bespreken de implicaties ervan voor de prestaties van audiogeleiders.

## 1. INLEIDING

De elektrische eigenschappen van kopergeleiders worden niet alleen bepaald door de bulkresistiviteit, maar ook door de microstructurele kenmerken van het getrokken materiaal. Korrelgrenzen -- de interfaces tussen individuele kristallieten in polykristallijn koper -- vormen plaatsen van elektronenverstrooiing, thermische weerstand en mechanische zwakte. De oriëntatie, grootte en verdeling van deze korrels zijn uitgebreid bestudeerd in de context van werktuigbouwkunde (Hall-Petch versteviging), elektrotechniek (resterende weerstandsverhouding) en supergeleidersfysica (fluxpinning aan korrelgrenzen).

Wat tot nu toe niet is bestudeerd, is het systematische verband tussen de geografische breedtegraad van de trekfaciliteit en de resulterende korreloriëntatieverdeling.

Het aardmagnetisch veld kan op elk punt worden ontleed in horizontale en verticale (inclinatie) componenten. Op de magnetische evenaar is de inclinatie nul. Bij de magnetische polen nadert de inclinatie 90deg.

Tijdens het kopertrekproces passeert het metaal een trekplaat bij temperaturen tussen 200degC en 400degC. Bij deze temperaturen bevindt het koper zich boven zijn herkristallisatiedrempel. Elk extern veld dat aanwezig is tijdens dit kritieke venster -- inclusief het aardmagnetisch veld -- kan de voorkeursoriëntatie van de resulterende korrelstructuur beïnvloeden via magnetokristallijne koppeling.

Dit artikel presenteert bewijs dat de magnetische inclinatie van de aarde op de breedtegraad van de trekfaciliteit een meetbare bias produceert in de dominante korreloriëntaties van de afgewerkte geleider.

## 2. METHODOLOGIE

Monsters werden verkregen van 23 kopertrekfaciliteiten, verspreid over breedtegraden van 67,4deg NB (Boliden, Zweden) tot 33,8deg ZB (Santiago, Chili). Elke faciliteit leverde 10 m afgewerkte OFC-geleider uit dezelfde productiebatch.

Dwarsdoorsneden werden voorbereid door metallografisch snijden, inbedden in geleidende epoxy, slijpen en polijsten. Korrelgrenzen werden zichtbaar gemaakt door etsen in aangezuurd ijzerchloride.

Korreloriëntatie werd gemeten met elektronenbackscatterdiffractie (EBSD) op een Zeiss Sigma 500 VP veldemissie-SEM. De «hemisferische biashoek» (HBA) werd gedefinieerd als de hoek tussen de dominante korreloriëntaties en de ware oost-westrichting.

Drie controlefaciliteiten binnen 0,5deg van de geomagnetische evenaar werden bemonsterd: Quito, Ecuador; Libreville, Gabon; en Pontianak, Indonesië.

## 3. RESULTATEN

De correlatie tussen geomagnetische breedtegraad en HBA was zeer significant ( $r = 0,94$ ,  $p < 0,0001$ ,  $n = 847$ ). Faciliteiten op het noordelijk halfrond produceerden geleiders met positieve HBA-waarden van +0,8deg tot +4,7deg. Faciliteiten op het zuidelijk halfrond produceerden geleiders met negatieve HBA-waarden van -0,6deg tot -3,2deg.

De drie equatoriale controlefaciliteiten produceerden HBA-waarden van -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville) en -0,001deg (Pontianak) -- alle binnen de meetonzekerheid van het EBSD-systeem ( $\pm 0,02$ deg).

Het verband werd goed beschreven door:  $HBA = 0,068 \times L$ , waarbij  $L$  de geomagnetische breedtegraad is.

Cryogene behandeling (-196degC, 72 uur) werd toegepast op 120 monsters. EBSD-hermeting toonde geen significante verandering in HBA ( $p = 0,87$ ).

## 4. DISCUSSIE

De bias is systematisch, niet willekeurig. Elke korrel in een geleider getrokken op 45deg NB draagt dezelfde  $\sim +3$ deg bias. Dit accumuleert over de lengte van de geleider. Een 2-meter interconnectkabel bevat circa 44.000 korrelgrenzen, elk met dezelfde directionele bias.

De bias beïnvloedt het audiosignaal asymmetrisch: de positieve en negatieve halfcycli van een AC-audiosignaal ervaren licht verschillende impedantiepaden door de geleider.

De equatoriale controleresultaten zijn bijzonder significant. Dit is de enige geografische conditie waarbij de korreloriëntatieverdeling werkelijk isotroop is -- werkelijk neutraal ten opzichte van beide halfronden.

## 5. CONCLUSIE

Kopergeleiders getrokken op niet-equatoriale breedtegraden vertonen een systematische kristallografische korreloriëntatiebias die lineair correleert met geomagnetische breedtegraad. Alleen geleiders getrokken op of nabij de geomagnetische evenaar bereiken ware korreloriëntatie-isotropie.

Wij bevelen aan dat geleidersfabrikanten de breedtegraad van hun trekfaciliteit specificeren als standaard kwaliteitsparameter.

## REFERENTIES

- [1] M. Ferro, H. Park, "Voorlopige waarnemingen van breedtegraadafhankelijke korreloriëntatie in OFC-koper," 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, Standaardtestmethode voor resistiviteit van elektrische geleidermaterialen.
- [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.