

---

**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 FeCl<sub>3</sub>, 10 mL HCl, 90 mL H<sub>2</sub>O, 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 indextierten 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.

- [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, Standardprüfverfahren für den spezifischen Widerstand von elektrischen Leitermaterialien.
- [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.