



DIELEKTRISCHE ANISOTROPIE UND DAS PLÄDOYER FÜR HIRNHOLZ: AUSRICHTUNG DES KAPAZITIVEN LASTPFADS IN MAGNETISCH NEUTRALEN HÖLZERNEN KABELAUFLAGEN



Dielektrische Anisotropie und das Plädoyer für Hirnholz: Ausrichtung des kapazitiven Lastpfads in magnetisch neutralen hölzernen Kabelauflagen

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Eine hölzerne Kabelauflage ist ein dielektrischer Körper im Nahfeld eines Signalleiters; ihr Beitrag zur Installation ist daher eine verteilte und richtungsabhängige Kapazität parallel zum Kabel. In der grundlegenden Untersuchung zur Neutralitätsklassifizierung von Holz (Bosque, Ferro, Park und Tanaka, 2026) wurde die Faserrichtung als Konstruktionsvariable erkannt und eine Fräsung mit vertikalem Hirnholz aufgrund eines kombinierten mechanischen und dielektrischen Arguments gewählt, das in einem einzigen Abschnitt dargelegt wurde. Diese Begleitarbeit entwickelt das Argument vollständig. Holz ist dielektrisch anisotrop: Sowohl die relative Permittivität $\epsilon_{s,r}$ als auch der Verlustfaktor $\tan \delta$ sind längs der Faser höher als quer dazu; die Längsachse übertrifft die beiden Querachsen, weil die röhrenförmige Zellgeometrie von Tracheiden und Gefäßen sowie die für die Polarisation maßgeblichen Dipole gebundenen Wassers an der Faser ausgerichtet sind. Wir berichten Messungen von $\epsilon_{s,r}$ und $\tan \delta$ an äquatorialem Teak mit einem Impedanzanalysator und abgeschirmten Parallelplatten entlang aller drei anatomischen Achsen (longitudinal L, radial R, tangential T) bei 8, 12 und 16 Prozent Feuchtegehalt von 20 Hz bis 10 MHz. Sie bestätigen bei Audiofrequenzen und 12 Prozent Feuchte ein Anisotropieverhältnis $\epsilon_{s,L} / \epsilon_{s,T}$ von 1.24 bis 1.31. Aus diesen Konstanten erstellen wir ein Modell der verteilten Kapazität eines Kabels, das in einer bearbeiteten Mulde über einer Holzsäule liegt, und berechnen den kapazitiven Beitrag je Block für die Fräsung mit vertikalem Hirnholz gegenüber der Fräsung mit Fladerholz: Die beiden Ausrichtungen unterscheiden sich messbar. Hirnholz weist die niedrigere kabelbezogene Kapazität auf, weil es die Querachsen niedriger Permittivität in die horizontale Ebene legt, in der das Kabelfeld am stärksten ist, und die Längsachse hoher Permittivität für den vertikalen Lastpfad reserviert, wo sie elektrisch unschädlich und mechanisch ideal ist. Eine Messreihe über den Faserwinkel lokalisiert das Kopplungsminimum bei echtem Hirnholz. Abschließend halten wir fest, dass Hirnholz ursprünglich wegen seiner Drucksteifigkeit spezifiziert wurde und das später und unabhängig entwickelte dielektrische Argument mit dem mechanischen so weit übereinstimmt, dass es dieses bestätigt.

1. EINLEITUNG

Eine Kabelauflage führt das Signal nicht. Sie sitzt daneben. Genau deshalb wird ihre elektrische Rolle so leicht verworfen: Ein Holzblock unter einem Kabel liegt offenkundig nicht im Stromkreis, und es ist verlockend, daraus zu schließen, dass seine Zusammensetzung, seine Faser und seine Ausrichtung Angelegenheiten für den Möbeltischler statt für den Ingenieur sind. Die grundlegende Arbeit zur Neutralitätsklassifizierung (Bosque, Ferro, Park und Tanaka, 2026) behandelte die magnetische Hälfte des Arguments -- dass eine Auflage in ständigem Kontakt mit einem Leiter Teil dessen Nahfeldumgebung ist und ihr paramagnetischer Restgehalt daher eine messbare Eingangsgröße der Installation statt eines dekorativen Merkmals darstellt. Die dielektrische Hälfte erledigte sie in einem einzigen Abschnitt. Die vorliegende Arbeit ist dieser Abschnitt, erweitert auf die Länge, welche die Physik verdient.

Die elektrische Tatsache, dass der Block neben dem Kabel statt in ihm sitzt, entfernt ihn nicht aus dem Stromkreis; sie legt die Art seiner Kopplung fest. Ein dielektrischer Körper im Feld eines Leiters speichert Energie kapazitiv, und eine verteilte Kapazität parallel zu einer Übertragungsleitung stellt eine kleine, aber reale Last dar, deren Größe von der Permittivität des Körpers und ihrer Ausrichtung relativ zum Feld abhängt. Holz ist kein isotropes Dielektrikum. Seine Permittivität hängt von der Richtung ab, weshalb eine hölzerne Auflage nicht einen, sondern drei dielektrische Beiträge besitzt, die an der Fräsbank durch den Schnittwinkel ausgewählt werden.

Die Behauptung dieser Arbeit ist eng und quantitativ. Die für den Equatorial Elevation Block spezifizierte Ausrichtung mit vertikalem Hirnholz -- Jahrringe auf der Oberseite, Fasern vertikal entlang des Lastpfads -- ist jene Ausrichtung, welche die kabelbezogene Kapazität des Blocks minimiert. Das Minimum ist messbar und nicht nur begrifflich und fällt mit jener Ausrichtung zusammen, die bereits aus mechanischen Gründen gewählt wurde. Wir behaupten nicht, der Effekt sei groß. Wir behaupten, dass er ein Vorzeichen, eine Größe und eine Vorzugsrichtung besitzt und dass ein Hersteller, der den Block für eine hübschere Fladerzeichnung anders fräst, den Wert in die falsche Richtung verschoben hat, ohne zu wissen, dass der Wert existiert.

2. DIE DIELEKTRISCHE ANISOTROPIE VON HOLZ

Holz ist ein zellulärer Feststoff aus langen, hohlen und axial ausgerichteten Zellen -- Tracheiden in Nadelhölzern, Fasern und Gefäßen in Laubhölzern wie Teak --, deren Längsachse die Faser definiert. Diese Geometrie ist der Ursprung der jedem Holzwerker bekannten mechanischen Anisotropie und ebenso der Ursprung einer dielektrischen Anisotropie, die weniger bekannt, aber ebenso real und seit Langem dokumentiert ist (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Drei Mechanismen machen die Permittivität richtungsabhängig, und alle drei begünstigen die Längsachse. Erstens bilden die Zellwände entlang der Faser durchgehende polarisierbare Pfade und quer dazu unterbrochene, sodass sich die Grenzflächenpolarisation (Maxwell-Wagner) an den zahlreichen Wand-Lumen-Grenzen bevorzugt längs zur Faser aufbaut.



Zweitens befindet sich das in den Zellwänden gebundene Wasser -- außer in den trockensten Zuständen der dominante Beitrag zur Permittivität des Holzes -- in einer Umgebung, deren Hydroxylstellen und mikrofibrillare Gerüste selbst an der Faser ausgerichtet sind. Daher erfolgt die Orientierungspolarisation der Dipole gebundenen Wassers längs der Faser leichter als quer dazu. Drittens unterscheiden sich die beiden Querrichtungen radial R und tangential T nur geringfügig voneinander und liegen beide deutlich unter dem Längswert L. Über die Literatur hinweg ergibt sich konsistent die Reihenfolge $\epsilon_{L} > \epsilon_{R} \sim \epsilon_{T}$, mit derselben Reihenfolge beim Verlustfaktor und einem Anisotropieverhältnis $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$, das bei Harthölzern der gemäßigten und tropischen Zonen im hygroskopischen Bereich typischerweise 1.2 bis 1.5 beträgt.

Die Absolutwerte sind mäßig und von der Feuchte beherrscht. Darrtrockenes Holz liegt nahe $\epsilon_{r} = 2$ bis 3; mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt der Wert steil und monoton an, weil jeder Zuwachs gebundenen Wassers dem polarisierbaren Bestand Dipole hinzufügt. Diese Steilheit ist der Grund, weshalb der Feuchtegehalt und nicht die Holzart den größten Stellhebel für den dielektrischen Beitrag einer Auflage bildet; er wird in Abschnitt 5 behandelt. Für das Anisotropieargument ist der wesentliche Punkt strukturell und nicht numerisch: Die Richtung höchster Permittivität ist die Faserrichtung, und diese Richtung wird vom Holzwerker festgelegt, nicht vom Baum.

3. MESSUNG: PERMITTIVITÄT UND VERLUST ENTLANG DREIER ACHSEN

Wir maßen ϵ_{r} und $\tan \delta$ an bearbeiteten Teakprobekörpern, die entlang jeder der drei anatomischen Achsen geschnitten waren, sodass das von der Parallelplattenzelle angelegte Feld nacheinander longitudinal, radial und tangential durch die Probe verlief. Die Probekörper waren 40 mm im Quadrat und 3.0 mm stark, auf ± 10 Mikrometer eben und parallel bearbeitet und aus drei äquatorialen Barren mit 5N-Grad geschnitten, die nach dem grundlegenden Protokoll ausgewählt worden waren, damit magnetische Verunreinigung die dielektrische Messung nicht verfälschen konnte. Jeder Probekörpersatz wurde in Feuchtekamern bei drei Feuchtegehalten -- 8, 12 und 16 Prozent -- bis zum Gleichgewicht konditioniert; am Ende des Durchlaufs wurde seine Feuchte gravimetrisch gegenüber der darrtrockenen Masse verifiziert.

Die Zelle war eine abgeschirmte Parallelplattenanordnung des bereits beschriebenen Typs (Tanaka und Park, 2022), gespeist von einem Keysight-E4990A-Impedanzanalysator von 20 Hz bis 10 MHz. Der Schutzring unterdrückt Randfelder, sodass die gemessene Kapazität einer definierten Elektrodenfläche entspricht und die ermittelte Permittivität den Volumenwert des Materials statt einer durch Randeffekte verunreinigten Schätzung darstellt; $\tan \delta$ wird unmittelbar als Verlustfaktor der Anordnung abgelesen. Der Kontakt erfolgte über dünne leitfähige Elastomer-Zwischenlagen, um die verbleibende Oberflächenrauheit der gefrästen Flächen auszugleichen, ohne einen Klebstoff einzusetzen, der eine eigene Polarisation beitragen würde.

Bei 12 Prozent Feuchtegehalt und 1 kHz ergab Teak $\epsilon_{L} = 2.64$, $\epsilon_{R} = 2.09$ und $\epsilon_{T} = 2.02$, ein Anisotropieverhältnis $\epsilon_{L} / \epsilon_{T}$ von 1.31 und $\epsilon_{L} / \epsilon_{R}$ von 1.26; die beiden Querachsen stimmten erwartungsgemäß innerhalb von 4 Prozent überein. Der Verlustfaktor folgte derselben Reihenfolge: $\tan \delta$ betrug längs der Faser 0.021 und quer dazu 0.014 bis 0.015. Über das Audioband von 20 Hz bis 20 kHz blieben die Permittivitäten innerhalb von 3 Prozent konstant und das Anisotropieverhältnis zwischen 1.24 und 1.31. Eine Erhöhung des Feuchtegehalts auf 16 Prozent hob jeden Wert an -- ϵ_{L} erreichte 3.08 -- und vergrößerte bemerkenswerterweise die Anisotropie etwas, weil das zusätzliche gebundene Wasser bevorzugt entlang der begünstigten Achse polarisiert. Eine Trocknung auf 8 Prozent verringerte sowohl die Absolutwerte als auch das Verhältnis. Die Anisotropie ist somit keine feste Materialkonstante, sondern eine feuchtemodulierte: am stärksten dort, wo sie am wenigsten erwünscht ist (nass), und am schwächsten bei trockenstem Material; bei der Lieferspezifikation von 12 ± 1 Prozent ist sie klar aufgelöst und stabil.

4. DAS MODELL DER VERTEILTEN KAPAZITÄT VON MULDE, KABEL UND SÄULE

Um drei Permittivitäten in eine Konstruktionsentscheidung zu überführen, benötigen wir die Geometrie der Kopplung. Das Kabel liegt nicht auf einem flachen Block, sondern in einer Mulde, einer flachen abgerundeten Nut in der Oberseite. Dadurch ist ein endlicher Bogen des Kabelmantels nur durch dessen Wandstärke vom Holz getrennt. Das Holz unmittelbar unter diesem Bogen -- eine kurze vertikale Säule vom Grund der Mulde hinunter in den Blockkörper -- liegt dort, wo das Feld zwischen Leiter und einer entfernten Erdungsrückleitung am stärksten ist und wo der überwiegende Teil der Kabel-Auflage-Kapazität gespeichert wird. Weiter außen und tiefer liegendes Holz trägt mit einem rasch abnehmenden Gewicht bei, während sich das Feld ausbreitet und abschwächt.

Wir modellieren dies als verteilte Kapazität je Längeneinheit der Strecke, indem wir die lokale Feldenergie durch das Holzvolumen unter und um die Mulde integrieren und den Permittivitätstensor des Holzes Achse für Achse einsetzen. Die Konstruktion ist für ein anisotropes Dielektrikum üblich: Die vertikale Feldkomponente tastet die Permittivität der vertikalen Achse ab, die horizontalen Komponenten jene der horizontalen Achsen. Weil die Mulde das Feld im nahezu vertikalen Bereich direkt unter dem Leiter konzentriert, während die Rückwege, welche die Kapazität schließen, nach außen und unten durch die Flanken der Säule verlaufen, tragen die horizontalen Permittivitäten den größeren Anteil der gespeicherten Energie. Die Modellausgabe ist eine einzelne technisch relevante Größe: die Kapazität in pF je Block, die der Block dem Kabel hinzufügt, als Funktion der Ausrichtung des Permittivitätstensors.

Zwei Ausrichtungen sind praktisch relevant. Eine Fräsung mit vertikalem Hirnholz stellt die Längsachse L vertikal in den Lastpfad



und lässt die beiden niedrigen Querachsen R und T in der horizontalen Ebene liegen. Eine Fräsung mit Fladerholz (flach geschnitten, Fasern horizontal) legt die Längsachse L in die horizontale Ebene, wo sie von den starken horizontalen Feldkomponenten abgetastet wird, und stellt eine Querachse vertikal. Werden die gemessenen Konstanten bei 12 Prozent in das Modell einer repräsentativen Muldengeometrie eingesetzt (12 mm Kabeldurchmesser, abgerundete 3 mm-Mulde, 60 mm Blockhöhe, nominelle Erdungsrückleitung im Abstand des Chassis), ergeben sich ungefähr 1.9 pF je Block bei Hirnholzausrichtung und ungefähr 2.3 pF je Block bei Fladerholzausrichtung -- eine Differenz nahe 0.4 pF, ungefähr 18 Prozent, die allein aus dem Schnittwinkel entsteht. Je Block ist dies wenig. Es ist außerdem real, wiederholbar, eindeutig gerichtet und kostenlos: Es kostet den Hersteller lediglich die Entscheidung, den Barren richtig auszurichten, und summiert sich über die mehreren Blöcke einer vollständigen Strecke.

5. FASERWINKELMESSREIHE UND FEUCHTEEMPFLINDLICHKEIT

Die beiden benannten Ausrichtungen sind die Endpunkte eines Kontinuums. Es lohnt sich zu bestätigen, dass Hirnholz ein echtes Minimum und nicht nur die bessere von zwei beliebigen Möglichkeiten darstellt. Wir fertigten eine Reihe von Probekörpern mit Faserwinkeln von 0 deg (Faser vertikal, echtes Hirnholz) über 30, 45 und 60 bis 90 deg (Faser horizontal, Fladerholz) relativ zur Lastachse und maßen jeden in der Geometrie des Muldenmodells mit einem darüber angeregten Leiter. Die kabelbezogene Kapazität stieg monoton mit dem Faserwinkel vom Hirnholzminimum bei 0 deg bis zum Fladerholzmaximum bei 90 deg und folgte eng der vom Tensormodell vorhergesagten quadratischen Kosinusgewichtung, während sich die Längsachse hoher Permittivität zunehmend in das horizontale Feld drehte. Die Kurve ist nahe 0 deg flach -- wenige Grad Fräsfelder kosten praktisch nichts -- und im mittleren Bereich der Messreihe am steilsten. Die Strafe für einen wirklich nachlässigen Schnitt ist damit größer als jene für einen unvollkommenen, aber wohlmeinenden. Das Minimum liegt bei echtem Hirnholz, und es ist ein Minimum, kein Wendepunkt.

Der Feuchtegehalt verschiebt die gesamte Kurve vertikal, ohne die Lage des Minimums zu verändern. Da die Permittivität mit gebundenem Wasser stark steigt, fügt ein Block, dessen Feuchte von 12 auf 16 Prozent abgewichen ist, absolut mehr Kapazität hinzu als die gesamte Differenz zwischen Hirnholz und Fladerholz bei gleichbleibender Feuchte -- der Feuchtestellhebel ist größer als der Ausrichtungsstellhebel. Beide sind jedoch unabhängig: Die Befeuchtung des Holzes hebt den Grundwert an, ändert aber nicht, welche Ausrichtung am niedrigsten liegt. Ausrichtung und Konditionierung sind daher ergänzende Kontrollen und müssen beide ausgeübt werden. Dies ist die messtechnische Grundlage dafür, jeden klassifizierten Barren am Ursprungsort auf 12 +/- 1 Prozent kammerzutrocknen und im Wartungsplan eine jährliche Feuchteprüfung vorzuschreiben: Die Ausrichtung wird dauerhaft eingefräst und kann nicht abweichen, wohl aber die Feuchte, die sie skaliert; eine Auflage, die sich langsam an einen feuchten Raum angleicht, gibt den von der Fräsbank gesicherten Spielraum nach und nach preis.

Wir vermerken beiläufig, dass die in Abschnitt 3 gemessene Übereinstimmung der Querachsen bedeutet, dass die Wahl zwischen radialer und tangentialer Darstellung in der horizontalen Ebene innerhalb der Messunsicherheit unerheblich ist. Der Block darf für das vorteilhafteste Erscheinungsbild der Ringe auf der Oberseite um seine vertikale Achse gedreht werden, ohne dielektrische Folgen, sofern die Fasern vertikal bleiben.

6. DISKUSSION: ZWEI ARGUMENTE, EINE AUSRICHTUNG

Die Hirnholzausrichtung wurde nicht wegen ihres dielektrischen Verhaltens gewählt. Sie wurde gewählt, weil Hirnholz die steifste und stärkste Weise ist, Holz unter Druck zu belasten: Bei vertikal stehenden Fasern wird eine nach unten gerichtete Last entlang der röhrenförmigen Zellen in deren stärkster Richtung getragen, und der Block widersteht dem statischen Gewicht einer Kabelstrecke und dem Setzen einer Installation mit dem geringsten Kriechen und der geringsten Maßänderung. Dies ist ein altes und unstrittiges Stück Holzbaukunde, das die Frässpezifikation festlegte, bevor irgendeine Permittivität gemessen wurde.

Die hier berichteten dielektrischen Messungen wurden erst anschließend vorgenommen und hätten der mechanischen Wahl grundsätzlich widersprechen können -- die Längsachse hätte die Achse niedriger Permittivität sein können; sie vertikal zu stellen wäre dann mechanisch richtig und elektrisch falsch gewesen und hätte einen Kompromiss erzwungen. Sie widersprachen nicht. Die Längsachse ist die Achse hoher Permittivität, weshalb ihre vertikale Aufstellung sie aus der horizontalen Ebene entfernt, in der das Kabelfeld am stärksten ist -- genau das, was das Kapazitätsmodell verlangt. Die mechanisch ideale Ausrichtung ist unabhängig davon auch die dielektrisch ruhigste. Die beiden Argumente entstanden aus unterschiedlicher Physik, zu unterschiedlichen Zeiten und durch Menschen, die unterschiedliche Probleme lösten, und wählen denselben Schnitt.

Wir messen dieser Übereinstimmung kein mystisches Gewicht bei; bei anisotropen Materialien sind die steife Achse und die Achse hoher Permittivität häufig ausgerichtet, weil beide Eigenschaften auf dieselbe gerichtete Mikrostruktur zurückgehen, und Teak ist ein solches Material. Die praktische Folge bleibt jedoch bestehen. Ein Hersteller, der allein dem mechanischen Argument folgt, landet bei Hirnholz und minimiert unbeabsichtigt zugleich die kapazitive Kopplung. Ein Hersteller, der das mechanische Argument zugunsten dekorativen Fladerholzes überstimmt, verliert gleichzeitig in beiden Kategorien. Die Konvergenz ist weniger ein zu bestaunender Zufall als ein Grund, der Spezifikation zu vertrauen: Wenn zwei unabhängige Argumentationslinien an derselben Zahl enden, ist die Zahl mit höherer Wahrscheinlichkeit richtig.



7. SCHLUSSFOLGERUNG

Holz ist ein dielektrisch anisotroper Körper, und eine hölzerne Kabelauflage ist dieser Körper im Nahfeld eines Leiters. Ihr Beitrag zur Installation ist eine kleine verteilte Kapazität, deren Größe der Hersteller wissentlich oder nicht an der Fräsbank festlegt. Wir maßen die dreiachsige Permittivität und den Verlust von äquatorialem Teak, bestätigten die erwartete Reihenfolge $\epsilon_{L} > \epsilon_{R} \sim \epsilon_{T}$ mit einem Anisotropieverhältnis nahe 1.3 bei Lieferfeuchte und führten diese Konstanten durch ein Mulden-und-Säulen-Kapazitätsmodell zu einer Kenngröße -- pF je Block --, die sich zwischen Hirnholz- und Fladerholzfräsung messbar unterscheidet. Hirnholz ist von beiden der niedrigere Wert, in einer repräsentativen Geometrie um ungefähr 0.4 pF und 18 Prozent, und eine Faserwinkelmessreihe bestätigt es als echtes Minimum.

Der Spielraum je Block ist klein, und wir lehnen es ab, ihn zu übertreiben. Wir behaupten lediglich, dass er real ist, eine Vorzugsrichtung besitzt und diese Vorzugsrichtung jener entspricht, die bereits aus mechanischen Gründen spezifiziert wurde. Der Equatorial Elevation Block wird mit vertikalem Hirnholz gefräst, weil Hirnholz eine Drucklast am steifsten trägt; die hier berichtete dielektrische Analyse wurde erst später vorgenommen und bestätigt, dass derselbe Schnitt zugleich der dielektrisch ruhigste ist. Jeder Block wird mit Hirnholz nach oben, auf 12 ± 1 Prozent kammergetrocknet und unbehandelt ausgeliefert, sein Grad und seine gemessenen Konstanten auf dem Zertifikat vermerkt. Wir laden den Leser ein, jeden anderen Hersteller hölzerner Auflagen zu fragen, in welche Richtung seine Fasern verlaufen und warum.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] James, W. L. (1975). Dielektrische Eigenschaften von Holz und Hartfaserplatten: Variation mit Temperatur, Frequenz, Feuchtegehalt und Faserrichtung. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Dielektrische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Holz-Wasser-Beziehungen. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Dielektrische Eigenschaften von Holz. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Magnetische Neutralitätsklassifizierung von Konstruktionsholz: Eine N-Grad-Reinheitsklassifikation für Audio-Auflagematerialien. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Permittivitätsmessung anisotroper verlustarmer Feststoffe mit abgeschirmten Parallelplatten. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.