



**FERROELEKTRISCHE KOPPLUNG
IN PTFE-DIELEKTRIKA VON
AUDIOQUALITÄT:
LADUNGSGEDÄCHTNIS UND
SIGNALKONTAMINATION**



Ferroelektrische Kopplung in PTFE-Dielektrika von Audioqualität: Ladungsgedächtnis und Signalkontamination

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Zusammenfassung

Polytetrafluorethylen (PTFE), das Standard-Dielektrikum in Premium-Audiokabeln, zeigt ferroelektrische Eigenschaften bei Audiofrequenzen, die von der Kabelindustrie übersehen wurden. Wir zeigen, dass das PTFE-Dielektrikum ein Ladungsgedächtnis akkumuliert -- einen persistenten Polarisationszustand, der durch das Audiosignal selbst induziert wird -- der die nachfolgende Signalübertragung mit einem zeitverzögerten Echo früheren Signalinhalts kontaminiert. Differenzielle Kapazitätsmessungen bei 1 kHz zeigen eine Hysterese von 0,3 pF/m in unbehandeltem PTFE, reduziert auf 0,04 pF/m nach Kryogenbehandlung bei -196 degC für 72 Stunden. Wir nennen dieses Phänomen dielektrisches Echo und quantifizieren seinen Beitrag zum von Audiophilen berichteten Einspieleffekt.

1. EINLEITUNG

PTFE (Teflon) ist das Dielektrikum der Wahl für Premium-Audiokabel aufgrund seiner niedrigen Dielektrizitätskonstante (2,1), seines niedrigen Verlustfaktors (< 0,0002 bei 1 MHz) und seiner hervorragenden chemischen Stabilität. Der Fokus der Audiokabelindustrie auf Hochfrequenzparameter hat jedoch ein Phänomen verdeckt, das bei viel niedrigeren Frequenzen auftritt -- im Audioband selbst.

PTFE ist ein teilkristallines Fluorpolymer. In seinen kristallinen Bereichen sind die Kohlenstoff-Fluor-Dipole in einem regelmäßigen Gitter ausgerichtet. Wenn ein externes elektrisches Feld angelegt wird -- wie das vom Audiosignal im Leiter erzeugte Feld -- können diese Dipole leicht rotieren und Ladung auf molekularer Ebene speichern. Wenn das externe Feld entfernt wird, kehren die Dipole in ihre ursprüngliche Orientierung zurück -- aber nicht sofort.

Dieses Ladungsgedächtnis bedeutet, dass das Dielektrikum ein Phantom des vorherigen Audiosignals bewahrt. Die von Audiophilen universell berichtete Einspielzeit -- die Beobachtung, dass neue Kabel nach 100-200 Stunden Nutzung anders klingen -- kann teilweise durch dieses Phänomen erklärt werden.

2. METHODIK

Maßgefertigte Testkabel wurden mit 2,0 mm OFC-Leiter und vier Dielektrikumsbehandlungen hergestellt:

Probe A: Unbehandeltes PTFE (60 % Kristallinität, extrudiert).

Probe B: Kryogen behandeltes PTFE (-196 degC, 72 h, 1 degC/min Rampe).

Probe C: Stickstoff-injiziertes PTFE (Mikrohohlräume während der Extrusion eingebracht).

Probe D: Luftspalt-Dielektrikum (PTFE-Abstandshalter in 20 mm Abständen).

Die differentielle Kapazität wurde mit einem Agilent 4294A Präzisionsimpedanzanalysator bei 1 kHz gemessen. Die Zeitbereichsrelaxation wurde durch Anlegen einer 10 V DC-Vorspannung für 60 Sekunden gemessen, gefolgt von Kurzschließen des Leiters und Messung der Erholungsspannung (dielektrische Absorption) mit einem Keithley 6517B Elektrometer.

3. ERGEBNISSE

Differentielle Kapazitätshysterese bei 1 kHz:

Probe A (unbehandeltes PTFE): 0,31 +/- 0,04 pF/m

Probe B (kryobehandeltes PTFE): 0,04 +/- 0,01 pF/m

Probe C (Stickstoff-injiziert): 0,12 +/- 0,03 pF/m

Probe D (Luftspalt): 0,02 +/- 0,01 pF/m

Das kryobehandelte PTFE zeigte eine 87%ige Reduktion der Kapazitätshysterese gegenüber unbehandeltem PTFE.

Dielektrische Absorption (Erholungsspannung bei t = 60 s nach Entladung):

Probe A: 142 mV

Probe B: 18 mV

Probe C: 67 mV

Probe D: 8 mV

Das Einspielexperiment wurde durchgeführt, indem Probe A mit Rosa Rauschen bei 2 Vrms für 0, 24, 48, 96 und 200 Stunden



betrieben wurde. Die Hysterese sank von 0,31 pF/m (0 Stunden) auf 0,19 pF/m (200 Stunden) -- eine 39%ige Reduktion, die nach etwa 150 Stunden ein Plateau erreichte.

4. DISKUSSION

Der Mechanismus ist einfach: Die Kryogenbehandlung stört die kristalline Ordnung des PTFE. Das teilkristalline Polymer entwickelt bei Abkühlung auf -196 degC interne Spannungen aufgrund differentieller Kontraktion zwischen kristallinen und amorphen Bereichen. Diese Spannungen propagieren Mikrorisse durch die kristallinen Domänen und reduzieren die Fernordnung der Dipolausrichtung, die für das Ladungsgedächtnis verantwortlich ist.

Die praktische Implikation ist, dass die Kryogenbehandlung des Dielektrikums -- nicht nur des Leiters -- ein notwendiger Schritt in der Premium-Kabelherstellung ist. Unser Tropic-Niveau verwendet unbehandeltes PTFE und erfordert eine 100-stündige Einspielzeit. Unser Equinox-Niveau verwendet kryobehandeltes PTFE und erreicht seine Gleichgewichtsleistung innerhalb von etwa 15 Stunden. Das Zero-Point-Niveau verwendet eine verlängerte Kryobehandlung, die die effektive Einspielzeit auf unter 5 Stunden reduziert.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Das PTFE-Dielektrikum in Audiokabeln zeigt ein messbares Ladungsgedächtnis (ferroelektrische Hysterese), das die Signalübertragung mit zeitverzögerten Echos früheren Inhalts kontaminiert. Die Kryogenbehandlung reduziert dieses Ladungsgedächtnis um 87 %, während der von der Industrie berichtete Einspieleffekt als allmähliche Etablierung einer stationären Ladungsverteilung erklärt werden kann. Wir empfehlen die Kryogenbehandlung von Leiter und Dielektrikum als Standardpraxis in der Premium-Audiokabelherstellung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in Ferroelectric Polymers, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in Ferroelectric Polymers, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," Phase Transitions, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Empfohlene Verfahren zur Bestimmung der Permittivität und des dielektrischen Verlustfaktors.
- [5] ASTM D2149-13, Standardprüfverfahren für Permittivität und dielektrischen Verlustfaktor.