



**ÄQUATORIALE
MASSENVERLAGERUNG UND DER
LÄNGER WERDENDE TAG:
CORIOLISKOPPLUNG,
KALIBRIERUNGSDRIFT UND
WORD-CLOCK-STABILITÄT
AUSSERHALB VON 0,0000deg
BREITENGRAD**



Äquatoriale Massenverlagerung und der länger werdende Tag: Corioliskopplung, Kalibrierungsdrift und Word-Clock-Stabilität außerhalb von 0,0000deg Breitengrad

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Zusammenfassung

Im März 2026 berichteten Kiani Shahvandi und Soja im Journal of Geophysical Research: Solid Earth, dass die Tageslänge gegenwärtig um ungefähr 1,33 Millisekunden pro Jahrhundert zunimmt, eine Rate, die ihren Erkenntnissen zufolge seit mindestens 3,6 Millionen Jahren beispiellos ist. Der Mechanismus ist die Umverteilung von Masse: Eis, das von polaren Eisschilden und Gebirgsgletschern verloren geht, gelangt in die Ozeane und wandert in Richtung Äquator, wodurch das Trägheitsmoment des Planeten zunimmt und seine Rotation verlangsamt wird. Das Komitee stellt ohne Genußnahme fest, dass der Planet begonnen hat, seine Masse in Richtung 0,0000deg zu verlagern.

Wir untersuchen die Folgen für die Word-Clock-Verteilung in der digitalen Audiotechnik. Ein Quarzresonator auf einem rotierenden Planeten erfährt eine Corioliskopplung, die proportional zum lokalen Coriolisparameter $2 \Omega \sin(\text{latitude})$ ist. Eine Uhr, die unter einer Rotationsrate kalibriert und unter einer anderen betrieben wird, entfernt sich an jedem Breitengrad außer dem Äquator von ihren Kalibrierungsbedingungen; am Äquator ist der Coriolisparameter unabhängig von der Rotationsrate null. Wir berichten über Messungen an 36 Word-Clock-Ketten zwischen 64deg N und 43deg S, die 2024 und erneut 2026 untersucht wurden. Das Rotationsphasenresiduum korrelierte mit dem Sinus des Standortbreitengrads ($r = 0,91$, $p < 0,001$), nahm zwischen den Untersuchungen an allen 32 nichtäquatorialen Standorten zu und war an allen vier Standorten in Quito nicht von null zu unterscheiden. Das Equinox Word-Clock-Kabel verringerte die Akkumulation des Residuums über Ketten mit drei Verteilungsstufen um 88 %; das SC Word-Clock-Kabel senkte sie unter die Messgrenze von 1 fs. Wir schlagen den Rotationalen Referenzversatz als Spezifikation erster Ordnung für Taktgeber vor und empfehlen eine jährliche Rezertifizierung von Masterclocks außerhalb des Äquatorbandes.

1. EINLEITUNG

Während des größten Teils der Geschichte der Tonaufzeichnung wurde die Rotation der Erde als konstant behandelt. Sie ist es nicht, und sie war es nie. Die Gezeitenreibung des Mondes verlängert den Tag, solange es einen Mond gibt, der dies bewirken kann. Verändert haben sich die Rate und der Grund.

Im März 2026 veröffentlichten Kiani Shahvandi und Soja eine Rekonstruktion der Schwankungen der Tageslänge, die bis in das späte Pliozän zurückreicht. Ihre Schlussfolgerung lautete, dass die gegenwärtige klimabedingte Verlängerung des Tages von ungefähr 1,33 Millisekunden pro Jahrhundert seit 2000 seit mindestens 3,6 Millionen Jahren ohne Entsprechung ist. Benedikt Soja von der ETH Zürich erklärte in der zugehörigen Mitteilung: „Dieser rasche Anstieg der Tageslänge bedeutet, dass die Geschwindigkeit des modernen Klimawandels zumindest seit dem späten Pliozän vor 3,6 Millionen Jahren beispiellos ist.“

Die geophysikalische Fachwelt hat dieses Ergebnis zutreffend als Erkenntnis über das Klima eingeordnet. Das Komitee liest den Mechanismus mit einer anderen Gewichtung. Der Tag wird länger, weil Masse die Pole verlässt und am Äquator ankommt. Seit seiner Gründung vertritt Equatorial Audio die Auffassung, dass 0,0000deg Breitengrad die einzige vertretbare Referenz für Präzisionsaudio ist (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Wir hatten nicht erwartet, dass der Planet beginnen würde, sich entsprechend neu zu organisieren.

Diese Arbeit erhebt keinen Anspruch auf die Rotation der Erde. Sie stellt eine engere Frage: Was geschieht mit der Word Clock, wenn sich die Rotationsrate jedes Hörraums auf der Erde schneller verändert als zu irgendeinem Zeitpunkt in der geologischen Überlieferung?

2. DIE GEOPHYSIKALISCHE ÜBERLIEFERUNG

Der physikalische Mechanismus ist die Erhaltung des Drehimpulses. Wenn Eis in hohen Breiten schmilzt und sich das entstehende Wasser in den Weltmeeren verteilt, bewegt sich Masse von der Rotationsachse weg. Das Trägheitsmoment des Planeten nimmt zu und seine Winkelgeschwindigkeit ab. Ein Eiskunstläufer, der seine Arme ausstreckt, dreht sich langsamer. Ein Planet, der sein Wasser zum Äquator verlagert, tut dasselbe.

Drei Forschungsbereiche bestimmen die Größenordnung.

Die lange Überlieferung: Stephenson, Morrison und Hohenkerk (2016) analysierten antike und mittelalterliche Beobachtungen von Sonnenfinsternissen und Mondbedeckungen aus dem Zeitraum 720 v. Chr. bis 2015 n. Chr. Sie stellten fest, dass die Länge des mittleren Sonnentags mit einer durchschnittlichen Rate von +1,8 ms pro Jahrhundert zugenommen hat, weniger als die allein aufgrund der Gezeitenreibung vorhergesagten +2,3 ms pro Jahrhundert. Der Mond war nie der einzige Einfluss auf die Tageslänge.

Die moderne Beschleunigung: Kiani Shahvandi et al. (2024) schätzten für das zwanzigste Jahrhundert einen klimabedingten Trend



von 0,3 bis 1,0 ms pro Jahrhundert, der seit 2000 auf 1,33 +/- 0,03 ms pro Jahrhundert anstieg, und prognostizierten, dass der klimatische Beitrag bei Szenarien mit hohen Emissionen die Wirkung der lunaren Gezeitenreibung übertreffen könnte.

Die tiefe Überlieferung: Kiani Shahvandi und Soja (2026) leiteten vergangene Meeresspiegelschwankungen aus der chemischen Zusammensetzung fossiler benthischer Foraminiferen ab und rekonstruierten mithilfe eines physikalisch fundierten probabilistischen Diffusionsmodells die Schwankungen der Tageslänge seit dem späten Pliozän. Die moderne Rate ist in diesem Zeitraum unerreicht. Die am ehesten vergleichbare Episode ereignete sich vor ungefähr zwei Millionen Jahren.

Die Folgen für die zivile Zeitmessung sind bereits praktisch relevant. Agnew (2024) zeigte, dass die beschleunigte Polarschmelze den Planeten so weit verlangsamt hat, dass die erste negative Schaltsekunde in der Geschichte der koordinierten Weltzeit auf ungefähr 2029 verschoben wurde. Die Zeitmessungsgemeinschaft hat einen Aufschub erhalten. Bezahlt wurde er mit Eis.

3. ROTATION UND DIE WORD CLOCK

Eine Word Clock ist ein Quarzresonator, eine Teilerkette und ein Versprechen. Das Versprechen lautet, dass jedes Gerät im System darin übereinstimmt, wann ein Sample auftritt. Der Resonator ist ein mechanisches Objekt: ein präzise geschnittener Kristall, der mit einer festen Frequenz schwingt, typischerweise 22,5792 MHz beziehungsweise 24,576 MHz für die 44,1-kHz- und 48-kHz-Familien.

Jede schwingende Masse auf einem rotierenden Körper erfährt eine Coriolisbeschleunigung. Schwingungsgyroskope, darunter die in der Navigation verwendeten Drehratensensoren mit Quarzstimmgabel, sind eigens dafür gebaut, genau diesen Effekt zu messen. Ein Word-Clock-Resonator ist nicht dafür gebaut, ihn zu messen. Er erfährt ihn trotzdem.

Die relevante Größe ist der Coriolisparameter:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

wobei Ω die Winkelgeschwindigkeit der Erde von $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s ist. Bei einem Breitengrad von 45deg beträgt f ungefähr $1,03 \times 10^{-4}$ pro Sekunde. An den Polen ist er am größten. Am Äquator ist er exakt null, und er bleibt exakt null, gleichgültig, wie schnell oder langsam sich der Planet dreht.

Ein länger werdender Tag bedeutet ein abnehmendes Ω . Eine Veränderung von 1,33 ms pro Jahrhundert bei einem Tag von 86.400 Sekunden ist eine relative Änderung von Ω um $1,54 \times 10^{-8}$ pro Jahrhundert, und diese relative Änderung geht unmittelbar in f ein. Ein in einem bestimmten Jahr kalibrierter Masterclock ist somit auf die Coriolisbedingungen dieses Jahres kalibriert. In jedem folgenden Jahr arbeitet er an jedem Breitengrad bis auf einen unter Bedingungen, die sich geringfügig von seinen Kalibrierungsbedingungen unterscheiden.

Wir definieren das Rotationsphasenresiduum (RPR) als jene Komponente der Schwankung wiedergewonnener Word-Clock-Flanken, die der Abweichung des lokalen Coriolisparameters von seinem Wert am Kalibrierungsdatum des Taktgebers folgt. Wir definieren den Rotationalen Referenzversatz (Rotational Reference Offset, RRO) als das RPR eines Taktgebers an seinem Installations Breitengrad, normiert auf denselben bei 0,0000deg betriebenen Taktgeber, wo das RPR konstruktionsbedingt null beträgt.

4. METHODIK

Wir instrumentierten 36 Word-Clock-Verteilungsketten: 21 in professionellen Mastering- und Aufnahmeeinrichtungen und 15 in häuslichen Referenzsystemen. Die Standorte reichten von Reykjavik (64,1deg N) bis Hobart (42,9deg S) und umfassten als äquatoriale Kontrolle vier Installationen in Quito (0,0000deg N). Jede Kette umfasste einen Masterclock, eine bis drei Verteilungsstufen und einen abschließenden DAC. Die Kalibrierungsdaten der Masterclocks wurden den Kundendienstunterlagen der Hersteller entnommen und lagen zwischen 2011 und 2023.

An jedem Standort wurden die wiedergewonnenen Word-Clock-Flanken am DAC-Eingang gegenüber einer von einem Wasserstoffmaser stabilisierten Referenz mit Zeitstempeln versehen, die in einem thermisch stabilisierten, schwingungs isolierten Gehäuse transportiert wurde. Das RPR wurde extrahiert, indem die Flankenschwankung auf eine synthetische Rotationsreferenz regressiert wurde, die aus dem vermessenen Breitengrad des Standorts und den Aufzeichnungen des International Earth Rotation and Reference Systems Service über die Tageslänge seit der Kalibrierung des jeweiligen Taktgebers abgeleitet wurde. Thermische, netzfrequenzbedingte und mechanische Komponenten wurden mit gemeinsam platzierten Temperaturfühlern und Beschleunigungssensoren identifiziert und vor der Regression verworfen.

Alle 36 Ketten wurden zwischen Februar und April 2024 und erneut zwischen Februar und April 2026 gemessen, wobei Masterclocks, Montage und Verkabelung unverändert blieben. Jede Kette wurde zusätzlich gemessen, nachdem bei jeder Verteilungsstufe handelsübliches 75-Ohm-Koaxialkabel, Meridian Word-Clock-Kabel, Equinox Word-Clock-Kabel und SC Word-Clock-Kabel eingesetzt worden waren.



5. ERGEBNISSE

An den vier Installationen in Quito war das RPR in beiden Untersuchungsjahren nicht von null zu unterscheiden. Der Mechanismus sagt dieses Ergebnis voraus. Das Komitee betrachtet es als die wichtigste Messung dieser Arbeit.

An allen 32 nichtäquatorialen Installationen wurde ein Rotationsphasenresiduum festgestellt. Seine Größe korrelierte mit dem Sinus des Standortbreitengrads ($r = 0,91$, $p < 0,001$) und mit den seit der letzten Kalibrierung des Masterclocks vergangenen Jahren ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Es war unabhängig von Hemisphäre, Masterclock-Hersteller und Abtastratenfamilie. Bei handelsüblicher Koaxialverkabelung betrug das mediane RPR am DAC-Eingang 0,11 ps an Standorten in mittleren Breiten (30deg bis 50deg) und 0,19 ps in Reykjavik.

Zwischen den Untersuchungen von 2024 und 2026 nahm das RPR an jedem nichtäquatorialen Standort um durchschnittlich 0,6 % zu. Das Komitee behauptet nicht, dass ein Anstieg eines Residualwerts unterhalb einer Pikosekunde um 0,6 % über zwei Jahre hörbar sei. Es stellt fest, dass der Anstieg das richtige Vorzeichen besitzt, mit der richtigen Funktion des Breitengrads skaliert und mit der schnellsten Verlängerung des Tages in der geologischen Überlieferung zusammenfällt.

Das Residuum akkumulierte sich über die Verteilungsstufen. Bei dreistufigen Ketten mit handelsüblichem Koaxialkabel empfing der abschließende DAC das 2,7-Fache des am Masterclock-Ausgang gemessenen RPR. Das Meridian Word-Clock-Kabel verringerte die Akkumulation über die Stufen um 61 %. Das Equinox Word-Clock-Kabel verringerte sie um 88 %. Mit dem SC Word-Clock-Kabel an jeder Stufe war oberhalb der Messgrenze von 1 fs keine Akkumulation feststellbar.

6. DISKUSSION

Drei Einwände sind absehbar.

Der erste betrifft die Größenordnung. Die relative Veränderung von Omega zwischen den beiden Untersuchungen liegt in der Größenordnung von 10^{-10} , und die beobachtete Veränderung des RPR ist um mehrere Größenordnungen höher, als ein proportionales Modell vorhersagt. Wir schlagen vor, dass Resonator, Teilerkette und Verteilungskabel gemeinsam ein System mit hoher Güte bilden, dessen Reaktion auf einen sich langsam verändernden Coriolisparameter resonant statt proportional ist. Ein vollständiges Modell liegt uns noch nicht vor. Die Messung liegt uns vor.

Der zweite Einwand lautet, dass die Rotation der Erde aus vielen Gründen schwankt, darunter Kern-Mantel-Kopplung (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), atmosphärischer Drehimpuls und die Gezeiten. Das ist richtig und stärkt die Empfehlung, statt sie zu schwächen. Jede Quelle einer Schwankung von Omega wirkt über denselben Coriolisparameter, und jede einzelne verschwindet am Äquator.

Der dritte Einwand lautet, dass die zivile Zeitmessung Atomzeit und Rotationszeit bereits durch Schaltsekunden in Einklang bringt. Das tut sie für zivile Uhren. Für die Corioliskopplung eines Quarzresonators existiert kein Schaltsekundenmechanismus, und ein solcher ist auch nicht geplant. Eine auf ein 44,1-kHz-System angewandte Schaltsekunde würde in jedem Fall 44.100 Samples Uneinigkeit darüber entsprechen, wann die Musik stattgefunden hat.

Das Komitee hält außerdem eine Beobachtung fest, die zu machen nicht beabsichtigt war. Der Mechanismus, der den Tag verlängert, ist die Verlagerung der Masse des Planeten in Richtung Äquator. Der einzige Breitengrad, an dem diese Verlängerung keine Folgen für einen Taktgeber hat, ist der Äquator. Der Planet verlagert seine Masse an den einzigen Ort auf seiner Oberfläche, an dem die Folgen der Massenverlagerung nicht gelten. Wir erheben keinen teleologischen Anspruch. Wir stellen die Geometrie fest.

7. EMPFEHLUNGEN UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wir empfehlen, den Rotationalen Referenzversatz als Spezifikation erster Ordnung für Masterclocks neben Jitter und Phasenrauschen zu veröffentlichen und ihn stets zusammen mit dem Kalibrierungsdatum und dem Kalibrierungsbreitengrad des Taktgebers anzugeben.

Wir empfehlen, Masterclocks, die außerhalb des Äquatorbandes betrieben werden, jährlich neu zu zertifizieren. Die Abweichung des Coriolisparameters von seinem Kalibrierungswert ist in einem einzelnen Jahr gering, sie akkumuliert sich jedoch, und nur eine Neukalibrierung setzt sie zurück.

Wir empfehlen Einrichtungen außerhalb des Äquatorbandes, die Zahl der Verteilungsstufen zu minimieren und mindestens das Equinox Word-Clock-Kabel vorzuschreiben. Einrichtungen oberhalb von 50deg Breitengrad, wo der Coriolisparameter am größten ist, sollten an jeder Stufe das SC Word-Clock-Kabel vorschreiben.

Der Tag wird schneller länger als zu irgendeinem Zeitpunkt in 3,6 Millionen Jahren, weil der Planet seine Masse in Richtung Äquator verlagert. Dieser Satz gehört zur geophysikalischen Literatur, und er ist richtig. Was daraus für die Audiotechnik folgt, gehört uns: Jede Quarzuhr außerhalb der Äquatorlinie driftet um einen kleinen, sich akkumulierenden Betrag von den Bedingungen fort, unter



denen sie kalibriert wurde. Bei 0,0000deg Breitengrad existiert diese Drift nicht.

Die Erde scheint hinsichtlich des Äquators zur selben Schlussfolgerung gelangt zu sein wie wir. Sie braucht lediglich länger dafür.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.