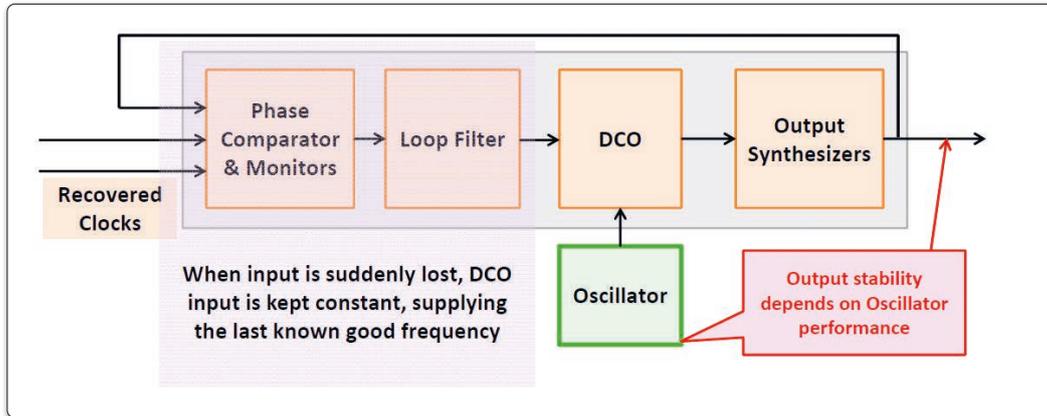


# Adaptive Driftkompensation von Holdover-Oszillatoren

Mobile Breitband- und Telekommunikationsnetze beruhen auf hochstabilen und genauen Zeitquellen, deren Genauigkeit und Holdover-Spezifikationen hier näher betrachtet werden.



Blockdiagramm einer Uhr, das die Rolle eines Oszillators beim Holdover zeigt

Diese Zeitquellen sind sogenannten Stratum-Uhren und sorgen dafür, die in Tabelle 1 genannten strengen Phasen- und Synchronisationsanforderungen zu erfüllen. In einem typischen Netzeinsatz gibt es eine primäre Referenztaktquelle (PRS), die auf eine Stratum-1- oder eine Cäsium-Atomuhr zurückgeführt werden kann.

Die Uhr auf jeder Stratum-Ebene muss die in den Normen spezifizierte Frequenzstabilität und Langzeitalterung über 20 Jahre erfüllen. Einzelheiten zur Stratum-n-Genauigkeit und zu den Holdover-Spezifikationen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

## Holdover-Modus und -Zustand

Jede der abgeleiteten Stratum-n-Uhren ( $n = 3, 3E$ ) verwendet einen lokalen ofengesteuerten Oszillator (OCXO) als Reserve-Taktquelle für den Fall, dass eine vorgelagerte Stratum-1- oder -2-Uhr mit höherer Genauigkeit ausfällt. In der Regel liegt die Dauer des Ausfalls der primären Taktreferenz (PCR) im Bereich von 30 Minuten bis 24 Stunden. Dieser Zustand der Stratum-3/3E-Uhr wird als Holdover-Modus bezeichnet.

Da der OCXO die zeitliche Synchronisation im Falle eines Verlusts des Primärtakts beibehalten

oder „halten“ muss, ist es von entscheidender Bedeutung, dass der OCXO die gleichen zeitlichen Eigenschaften wie der vorgelagerte Stratum-2-Takt aufweist, bis die Verbindung mit der PCR wiederhergestellt ist. Der Zustand des Stratum-Takts, in dem der OCXO die letzte synchronisierte Frequenz hält, wird als Holdover-Zustand bezeichnet.

## Quellen der Zeitreferenz im Netz

Alle synchronisierten verteilten Uhren an jedem Knoten im drahtlosen Netz lassen sich auf den PRTC (Primary Reference Timing Clock) oder PRC zurückführen, der wiederum auf die Stratum-1-Uhr [2] zurückgeführt werden kann. Die verschiedenen Stratum-Level-Uhren und ihre Beziehungen sind in Bild 1 dargestellt.

### • Stratum 0

Als Stratum-0-Gerät wird eine auf Cäsium-Atomen basierende Referenzquelle bezeichnet, die UTC (Coordinated Universal Time) weitergibt und wenig oder keine Verzögerung aufweist. Stratum-0-Server können nicht im Netz verwendet

Application	Frequency Requirement (Network/Air*)	Phase Requirement
LTE - FDD	16ppb / 50ppb	---
LTE - TDD	16ppb / 50ppb	+/-1.5uS
LTE - MBMS	16ppb / 50ppb	+/-1uS
LTE - MBSFN	16ppb / 50ppb	+/500nS
LTE - Advanced	16ppb / 50ppb	+/500nS
OTDOA for e911	---	+/100nS
5G (MIMO & Tx Diversity at each Carrier Frequency)	Not yet ratified	+/-65ns

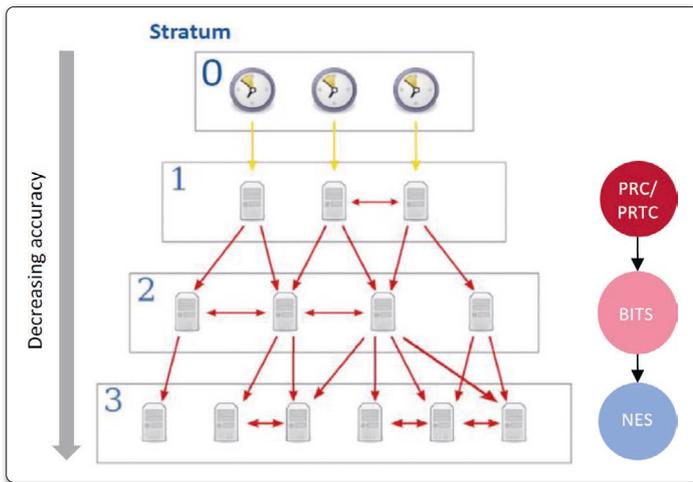
Tighter requirements

3GPP TS 36.104 V13.1.0 section 6.5.3.1

\*Network = Fronthaul/Backhaul, Air = Air interface from Antenna to UE (RF)

Quelle:  
Adaptive Drift Compensation  
of Holdover Oscillators,  
SiTime  
www.sitime.com

übersetzt von FS **Tabelle 1: Frequenz- und Phasenanforderungen in LT+/5G-Netzen [1]**



**Bild 1: Synchronisationshierarchie in Telekommunikationsnetzen**

werden; stattdessen werden sie direkt an Computer angeschlossen, die dann als primäre Zeit-Servers arbeiten.

## • Stratum 1

Das ist die genaueste Taktquelle im Netz. Die Frequenzgenauigkeit beträgt  $\pm 0,01$  ppb gegenüber UTC. Stratum 1 wird auch als primäre Referenzuhr (PRC) bezeichnet und in den Gateways des Kernnetzes verwendet. Die PRC ist mit einer GPS/GNSS-Empfängeruhr gekoppelt, die auf eine Stratum-0-Atomuhr rückführbar ist.

## • Stratum 2

empfängt Synchronsignale vom PRC und hat eine gute Holdover-Fähigkeit. Die Frequenzgenauigkeit ist  $\pm 16$  ppb. Stratum 2 wird auch als gebäudeintegrierte Zeitquelle (BITS) bezeichnet und in Zentralstellen verwendet.

## • Stratum 3

empfängt Synchronsignale von BITS unter Verwendung von Line-Timing-Clock-Recovery-Techniken und mit angemessener Holdover-Fähigkeit. Die Frequenzgenauigkeit beträgt  $\pm 4,6$  ppm. Das Konzept wird auch als Netzelement-Nebenuhr (NES) in mobilen Vermittlungsstellen verwendet. Es gibt zwei Varianten auf der Grundlage der Frequenzstabilität: Stratum-3 mit  $\pm 300$  ppb und Stratum-3E mit  $\pm 10$  ppb.

## Holdover-Typen und beitragende Faktoren

Holdover-Oszillatoren sind durch zwei wichtige Leistungsparameter gekennzeichnet:

### 1. Frequenz-Holdover

- maximale Frequenzabweichung während der Holdover-Periode

Die Frequenzabweichung wird von der Durchschnittsfrequenz vor dem Eintritt in den Holdover-Zustand gemessen.

### 2. Zeit-Holdover

- Zeitfehlerakkumulation (TE) in Bezug auf die Synchronisierungsreferenz (PRC) während der Holdover-Periode

Die Holdover-Leistung wird durch drei Faktoren beeinflusst: Temperaturschwankungen in der Umgebung, Allan-Schwankungen und Alterung

Gemäß der NIST-Sonderveröffentlichung 1065 [3] kann der Zeitfehler aufgrund der kombinierten Auswirkungen der genannten beitragenden Faktoren gemäß der folgenden Gleichung vorhergesagt werden:

$$\Delta T = T_0 + \frac{\Delta f}{f} \cdot t + \frac{1}{2} D \cdot t^2 + \sigma_x(t)$$

Das Ausmaß der Frequenzdrift aufgrund von Schwankungen der Umgebungstemperatur wird durch die Steigung zwischen Frequenz und Temperatur ( $df/dT$ ) des Oszillators bestimmt. Angesichts der ppt-Niveau-

$df/dT$ -Werte von Präzisions-OCXOs und bei geringen Temperaturschwankungen ( $\pm 1$  K) während der Holdover-Periode haben Frequenzdriftbeiträge aufgrund von Temperaturschwankungen eine geringfügige Auswirkung auf die gesamte Holdover-Leistung und können vernachlässigt werden.

Die Allan-Varianz (AVAR) charakterisiert die Kurzzeit-Frequenzstabilität eines Bauelements unter konstanten Umgebungsbedingungen. Die AVAR ist eine statistische Metrik zur Quantifizierung der niederfrequenten Rauschprozesse, die dem OCXO eigen sind. Da dieser Holdover-Faktor eine zufällige Größe und daher schwer zu kompensieren ist, wird er hier nicht behandelt.

Die Alterung ist die langfristige Frequenzdrift von Holdover-Oszillatoren unter konstanten Umgebungsbedingungen und wird direkt von der Struktur und Konstruktion des OCXOs beeinflusst. Wir betrachten hier Techniken zur Erweiterung der Holdover-Leistung von handelsüblichen kostengünstigen TCXOs oder OCXOs durch adaptive Kompensation der Langzeitdrift von Holdover-Oszillatoren. Dabei konzentrieren wir uns auf das Alterungsprofil führender OCXOs, wie z.B. des SiTime SiT5711, und bieten eine Anleitung für adaptive Kompensationstechniken zur Erweiterung der alterungsbedingten Holdover-Leistung von Präzisions-OCXOs.

## Alterungsprofil von OCXOs

Um die tägliche Drift adaptiv kompensieren zu können, muss man unbedingt verstehen, wie sich das tägliche Driftprofil mit der Zeit unter verschiedenen Betriebsbedingungen verändert. Es gibt mehrere Faktoren, die das Alterungsprofil beeinflussen:

### 1. Löt-Reflow-Verschiebung

Dieser Effekt ist kurzfristig, und es dauert normalerweise 24 bis 48 Stunden, bis das Gehäuse des Oszillators stressfrei ist.

## 2. Auswirkungen der Betriebstemperatur

Die alltägliche Drift ist bei niedrigeren Temperaturen besser.

## 3. Auswirkungen der Lagerung

Das Profil hängt direkt damit zusammen, wie lange der Oszillator gelagert wird (nicht eingeschaltet) und mit der Temperatur, bei der er gelagert wurde.

## 4. Auswirkung auf die Nachlaufzeit

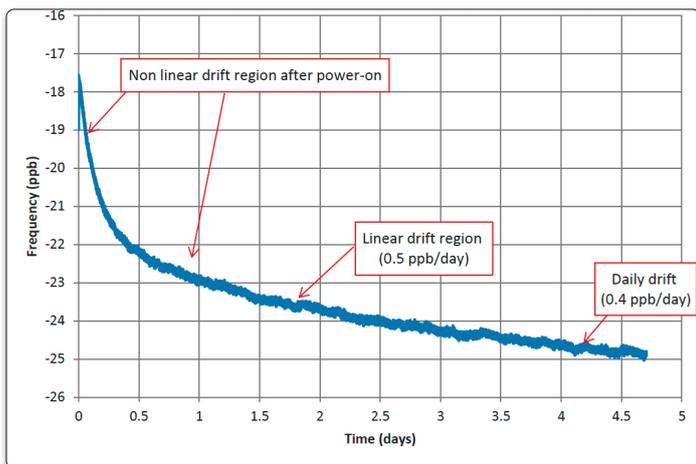
Je nachdem, wie lange der Oszillator eingeschaltet ist und wie lange er ausgeschaltet bleibt, wird der Oszillator bei jedem Ein- und Ausschaltzyklus ein anderes Profil aufweisen.

Ein typisches Alterungsprofil von OCXOs wird als Diagramm der fraktionellen Frequenzabweichung über 30 Tage bei einer konstanter Umgebungstemperatur von  $85^\circ\text{C}$  dargestellt, wie in Bild 2 gezeigt. Die Darstellung zeigt die Frequenzabweichung nach der Offset-Löschung vom Nennwert. Außerdem wird die Frequenz eine Stunde nach dem Einschalten des Geräts gemessen, um Artefakte im Zusammenhang mit der Lötverschiebung zu eliminieren. Wenn der Oszillator altert oder länger als ein paar Stunden in Betrieb ist, zeigt das Profil einen linearen täglichen Drifttrend. Wie aus der Grafik hervorgeht, verlangsamt sich die tägliche Drift von 2 h nach dem Einschalten auf 5 h. Wir wollen dieses Alterungsprofil nutzen, um eine gleich zu beschreibende adaptive Kompensationsmethodik anzuwenden.

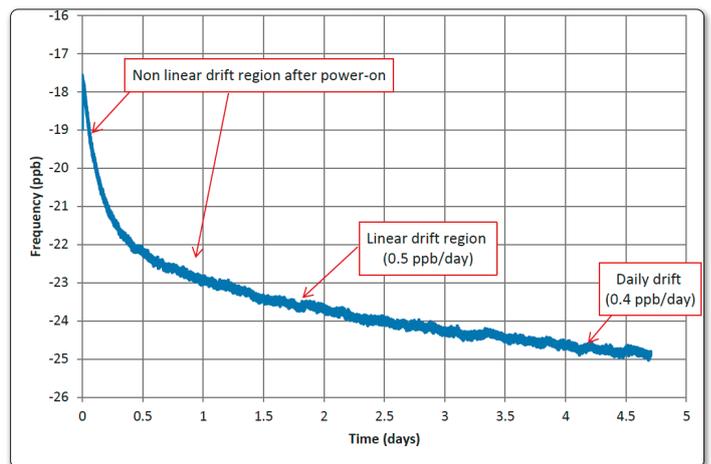
## Adaptive Kompensationsmethodik

Die Grundlage für die adaptive Kompensation der Frequenzdrift umfasst zweierlei:

1. Durchführung kontinuierlicher und präziser Frequenzmessungen unter Verwendung einer Systemzeitreferenz, die um eine Größenordnung genauer ist als der OCXO. Diese Zeitreferenzen können von einem



**Bild 2:** Alterungsprofil, das die Frequency Deviation über der Zeit für einen SiTime-Präzisions-OCXO SiT5711 zeigt (Frequenzmessung 1 h nach Power-on)



**Bild 3:** Alterungsdiagramm eines SiTime Präzisions-OCXOs SiT5711, das die Anwendung der adaptiven Kompensation zur Vorhersage der täglichen Rate während des Holdovers bei ~5 h nach dem Einschalten [4]

GPS/GNSS-Empfänger oder einem PTP-Zeitstempel über eine SyncE-Verbindung stammen, bevor das System in den Holdover-Zustand eintritt.

2. Modellieren der täglichen Drift als linearen Trend, sodass nur die Steigung adaptiv vorhergesagt werden kann, nachdem die Uhr in den Holdover-Zustand eingetreten ist. Diese lineare Modellannahme beruht auf der Tatsache, dass die meisten OCXOs nach einigen Tagen Betrieb ein lineares tägliches Driftprofil aufweisen wie in Bild 3.

Die Methodik für die adaptive Kompensation eines OCXOs lässt sich auf die folgenden Schritte reduzieren:

1. Bestimmen Sie auf der Grundlage kontinuierlicher und präziser Messungen die tägliche Alterungsrate in ppb/Tag, bezogen auf die Nennfrequenz.
2. Erzeugen eines Zeitvektors in Sekunden mit einer Auflösung, die mit den in Schritt 1 erfassten Frequenzdaten harmonisiert.
3. Während des Holdovers kommt die Frequenzänderung aufgrund der täglichen Alte-

rung durch Multiplikation der Alterungsrate aus Schritt 1 mit den Schritten im Zeitvektor aus Schritt 2 zustande.

Eine mathematische Veranschaulichung der Umsetzung des obigen Verfahrens ist in den Diagrammen in Bild 4 zu sehen.

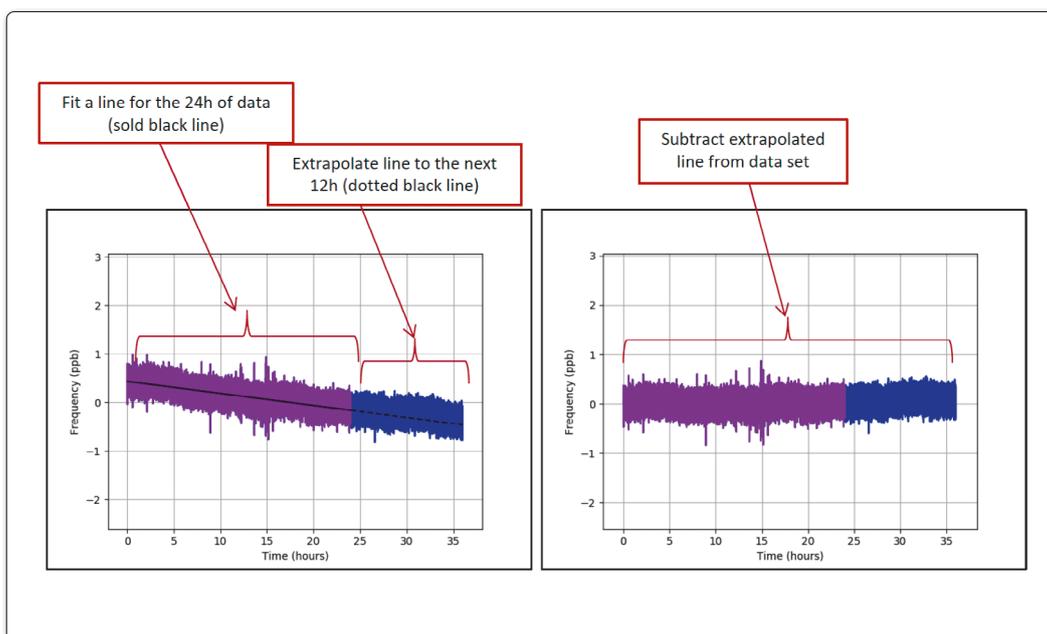
## Schlussfolgerung

Angesichts der strengen Anforderungen an die Zeit- und Frequenzsynchronisation in der nächsten Generation drahtloser Netze ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Entwickler von Netzknoten eine adaptive

Kompensationstechnik anwenden, um die Frequenzänderung während des Holdover-Zustands vorherzusagen mit dem Ziel, die Auswirkungen der Alterung auf den Zeitfehler zu eliminieren oder zu reduzieren. Die hier vorgestellte adaptive Kompensationsmethode basiert auf der Verfügbarkeit von Präzisionsuhrreferenzen in den Systemen, die zur präzisen Messung der Frequenzabweichung verwendet werden, und auf einem linearen Modell des täglichen Alterungsprofils von OCXOs, die mindestens einige Stunden im System gealtert wurden, bevor sie in den Holdover-Modus übergehen.

## Referenzen

- [1] 5G Network Synchronization, Microlab, Sept 2018
- [2] GR-1244-CORE, Ericsson, Oct 2009
- [3] Handbook of Frequency Stability Analysis, NIST SP 1065, July 2008
- [4] SiT5711 Aging Data, SiTime Internal Characterization Data, June 2019 ◀



**Bild 4:** Illustration der Aging Compensation bei Nutzung eines linearen Modells der täglichen Drift