

Übereinstimmung zwischen vorhergesagtem und tatsächlichem Alterungsverhalten bei Quarzoszillatoren unter Verwendung verschiedener Ausgleichsalgorithmen

[O. Leibfried](#), [B. Neubig](#)

TELE QUARZ GROUP

D-74924 Neckarbischofsheim; Germany

1. Abstract

Dieser Aufsatz berichtet von den Ergebnissen der Versuche, das Alterungsverhalten von Quarzoszillatoren präziser zu berechnen als es bisher möglich war. Es werden verschiedene Methoden zur Berechnung und zum Kurvenfitting von gemessenen Alterungsdaten vorgestellt. Dabei wurde versucht, die für zutreffende Vorhersagen notwendige Verweildauer von OCXO im Alterungssystem zu minimieren.

Das bei TELE QUARZ benutzte OCXO Alterungssystem läßt die gleichzeitige Messung von bis zu 1600 OCXO über beliebig lange Zeiträume zu. Sämtliche Meßdaten aller produzierten OCXO werden seit Ende 1995 archiviert. Als Datenbasis konnte daher auf ein umfangreiches Archiv von Alterungsdaten zurückgegriffen werden, in dem sich mittlerweile die Daten von über 50000 OCXO befinden. Für Untersuchungen während Neuentwicklungen sind immer wieder OCXO für längere Zeit im Meßsystem belassen worden. Einige davon länger als 250 Tage. Deren Daten wurden für die Untersuchungen verwendet.

2. Einleitung

Die Vorhersage des Langzeit Alterungsverhaltens von hochstabilen OCXO ist immer mit der Unsicherheit verbunden, ob die berechneten Alterungskurven vom Oszillator auch wirklich eingehalten werden. Zur Berechnung der Koeffizienten für die Alterungsvorhersage können mehrere Funktionen zur Anwendung kommen:

Die Exponentialfunktion [1]

$$(1) \Delta f / f_0 = a_0 + a_1(1 - \exp(-a_2 t))$$

Die Polynomfunktion [2]

$$(2) \Delta f / f_0 = a_0 + a_1 t + \sqrt{a_2 t}$$

Die rein Logarithmische Funktion [1]

$$(3) \Delta f / f_0 = a_0 + a_1 \log t \text{ oder}$$

$$(4) \Delta f / f_0 = a_0 + a_1 \ln t \text{ mit } t \geq 1$$

und die modifizierte Logarithmusfunktion [3],[4]

$$(5) \Delta f / f_0 = a_0 + a_1 \ln(a_2 t + 1)$$

Diese Funktion, die in MIL-O-55310 [3] vorgeschlagen wird, ist die am häufigsten verwendete Funktion für Alterungsabschätzungen. [4].

Bei TELE QUARZ werden zur Zeit die modifizierte Logarithmusfunktion (3) und die Polynomialfunktion (2) benutzt, je nachdem, welche der beiden Funktionen die real gemessene Alterung besser beschreibt.

Die Koeffizienten für die Alterungsfunktionen ergeben sich nach [3] durch Kurvenfitting der Meßdaten der über 30 Tage gemessenen OCXO. Nach dieser, bezogen auf den Vorhersagezeitraum relativ kurzen Zeit, werden die Koeffizienten der Funktionen mittels least square Algorithmen an die Meßdaten angepaßt. Die Alterungswerte für die Vorhersage werden nun aus diesen Koeffizienten bestimmt.

3. Problembeschreibung

Die Koeffizienten der Logarithmusfunktion werden bei TELE QUARZ zur Zeit mittels des von Filler [5] vorgeschlagenen nichtlinearen least square fitting Algorithmus an die Meßdaten angepaßt. Die Meßdauer beträgt je nach OCXO Typ 10 ... 20 Tage. Die daraus gewonnenen Koeffizienten werden direkt zur Alterungsvorhersage benutzt. Längere Meßreihen zeigten, daß die Kombination aus Mil Logarithmus und Filler Algorithmus in nahezu 80% aller Fälle zu schlechte Ergebnisse liefert. Das heißt die realen Alterungsraten von über 80% aller gemessenen OCXO sind zum Teil erheblich besser als die Vorhersage. In Bild 1 ist eine typische Meßkurve mit der dazugehörigen gefitteten Kurve zu sehen. Die reale Alterungskurve hat einen deutlich flacheren Verlauf als die gefittete Funktion. Die Vorhergesagten Werte sind deshalb höher als die tatsächlich zu Erwartenden.

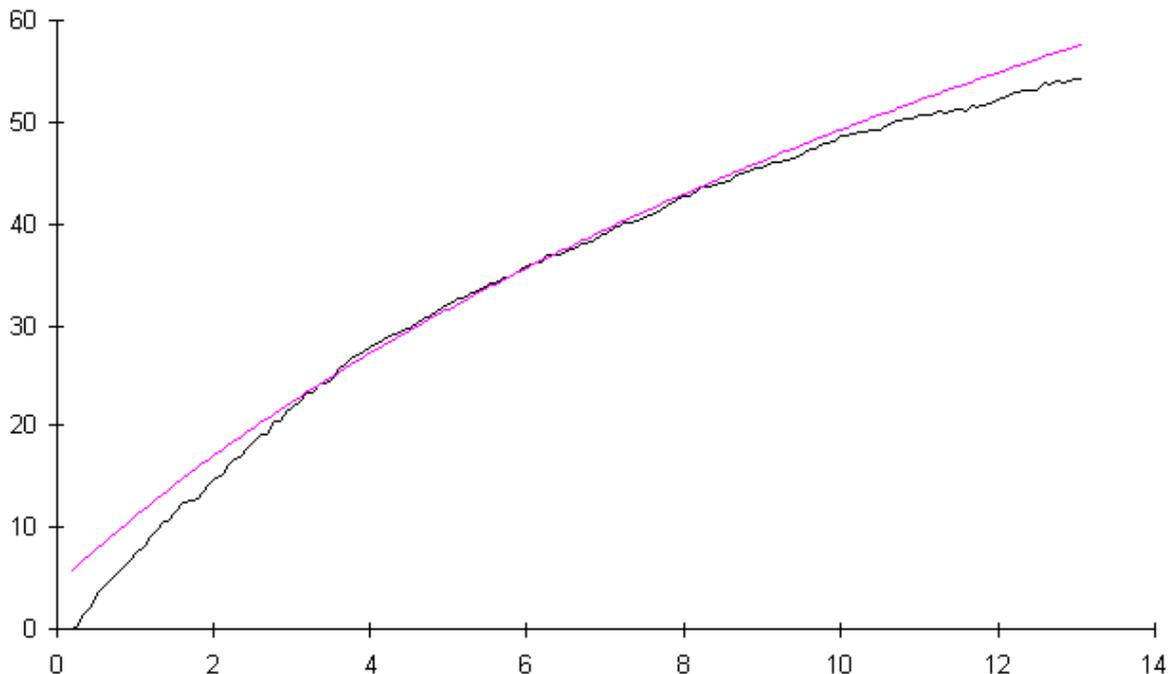


Bild 1 Schlechtes Fitting mit Filler Algorithmus

Diese für den Kunden zunächst erfreuliche Tatsache wird jedoch durch die durch hohen Ausschuß ebenfalls höheren Oszillatorpreise wieder relativiert.

Um reale Alterungskurven mit Vorausberechneten zu vergleichen zu können, müssen alle zur Untersuchung verwendeten OCXO für die Dauer des Vorhersagezeitraumes gemessen werden. Die realen Alterungsdaten können nun mit der vorhergesagten Kurve, die aus den Meßdaten der ersten Tage gewonnen wird, verglichen werden.

4. Kurvendiskussion

Die im Mil Standard Mil-O-55310B vorgeschlagene Funktion zur Alterungsbestimmung

$$f(t) = b_0 + b_1 \ln(b_2 t + 1)$$

erzeugt aufgrund der hohen Oszillatorfrequenzen im Mhz Bereich und der erforderlichen Meß- und Verarbeitungsgenauigkeit große Datenmengen. Um die dafür erforderliche Speicherkapazität auf den Meßrechnern klein zu halten, kann auch mit einer modifizierten Formel gearbeitet werden, die die Alterungswerte in relativer Form angibt.

$$f_{rel}(t) = \frac{f(t) - f(t_{Start})}{f(t_{Start})} \implies f_{rel}(t) = a_0 + a_1 \ln(a_2 t + 1)$$

$$\text{mit } a_1 = \frac{b_1}{f(0)} \quad a_2 = b_2$$

$$a_0 = \frac{f(0) - f(t_{Start})}{f(t_{Start})}$$

Mit dieser modifizierten Alterungsformel können die Alterungsmeßwerte direkt in ppb angegeben werden. Aufgrund der kleineren Zahlenwerte bleibt auch das Datenvolumen klein, da die Absolutfrequenz nur noch einmal gespeichert werden muß. Anhand der betrachteten OCXO der Langzeit Alterungsmessung kann gezeigt werden, daß die Mil Logarithmusfunktion (5) eine sehr gute Übereinstimmung zur Realität aufweist.

Filler erwähnt in [5], daß die Alterung von Quarzen und Oszillatoren von vielen verschiedenen Mechanismen bestimmt wird. Einige Einflüsse lassen sich minimieren. Die Temperaturabhängigkeit von Oszillatoren spielt z.B. in Klimatisierten Räumen nur eine geringe Rolle. Trotzdem zeigen viele Oszillatoren ein seltsames Alterungsverhalten. Vor allem im großen Alterungssystem von TELE QUARZ scheinen sich die OCXO gegenseitig durch injection locking, thermische Beeinflussung, mechanische Erschütterungen etc. zu beeinflussen.

In vielen Fällen können daher mehrere OCXO zum gleichen Zeitpunkt Frequenzsprünge aufweisen oder ihre Stromaufnahme sprunghaft ändern. In diesen Fällen ist eine Alterungsabschätzung nahezu unmöglich, da die Ursache in der Regel nicht rekonstruierbar ist. Bei OCXO mit kontinuierlichem Alterungsverhalten kann mit geeigneten Maßnahmen die Vorhersagegenauigkeit zum Teil erheblich verbessert werden.

In Bild 2 ist ein typischer Alterungsverlauf eines AT OCXO stellvertretend für alle gemessenen Oszillatoren gezeigt.

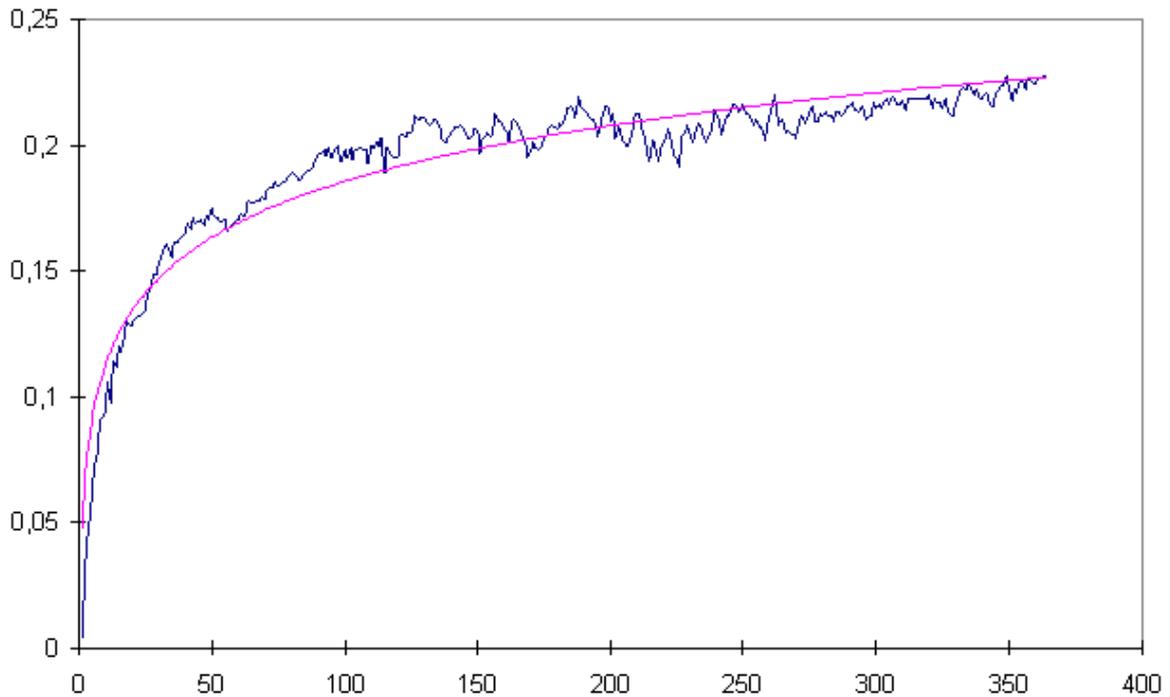


Bild 2 Gemessene Alterungskurve mit Fit über 1 Jahr

Die Kurve in Bild 2 wurde über den gesamten Meßzeitraum gefittet. Bei über 70% der untersuchten Alterungskurven konnte eine ähnlich gute Übereinstimmung festgestellt werden. Ungefähr 20% der OCXO zeigten Frequenzsprünge. Diese wurden nicht in die Untersuchung einbezogen. Bei den restlichen 10% handelte es sich um sehr gute high End OCXO, die mit SC Quarzen bestückt sind. Bei diesen sind der Alterungsmessung andere Effekte wie z.B. TK, Beeinflussung von benachbarten Oszillatoren, Betriebsspannungsschwankungen, injection locking etc überlagert, die zum Teil ein Vielfaches der Alterung ausmachen. Der Algorithmus kann daher oft keine befriedigende Lösung finden, was zum Teil extreme Ergebnisse produziert. (Bild 3)

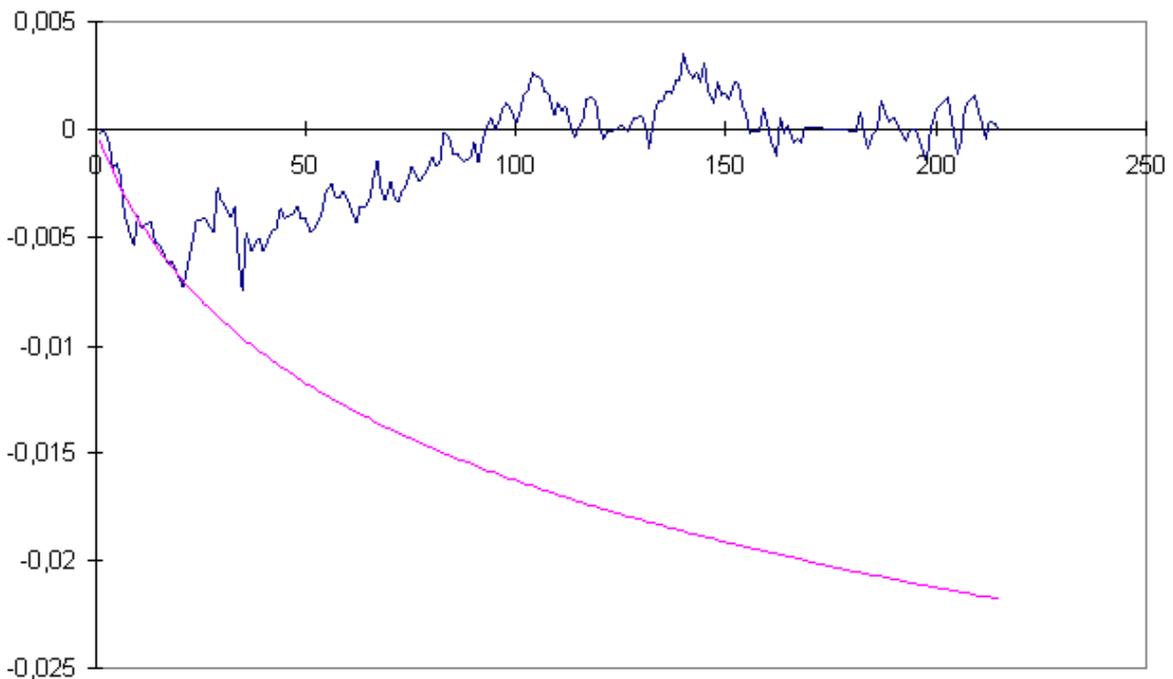


Bild 3 High End SC OCXO mit schlechtem Fitting

Leitet man die Alterungsformel nach der Zeit ab, so erhält man

$$f_{rel}'(t) = \frac{a_1 a_2}{a_2 t + 1} \quad \text{für große Werte von } t \text{ ergibt sich daher} \quad f_{rel}'(t) \approx \frac{a_1}{t}$$

Die Alterung pro Jahr ist damit nahezu unabhängig von a_2 . Sie kann für große Zeiten t in begrenzten Zeitintervallen näherungsweise durch eine Gerade mit der Steigung a_1 / t beschrieben werden. Dies ist, je nach Oszillatortyp nach 30 bis 250 Tagen der Fall. Bei kleinen Werten von t besitzt die Kurve die größere Steigung $a_1 a_2$. In dieser Zeit wird das Kurvenfitting gemacht. Die Wahl des Algorithmus zur Koeffizientenextraktion hat daher einen großen Einfluß auf die Langzeitsteigung der Funktion. Im folgenden werden nun einige Methoden und Algorithmen beschrieben um die Genauigkeit der Alterungsvorhersage zu erhöhen.

5. Ergebnisse

Die Übereinstimmung der gefitteten Meßkurven mit den real gemessenen konnte bei den untersuchten OCXO gesteigert werden, wenn der Summand a_0 des Mil log auf Null gezwungen wurde. Durch diese Einschränkung ändert sich die Anpassungsfähigkeit des Fits an die Meßwerte nur unmerklich. In Bild 4 ist eine gefittete Kurve mit $a_0=15$ gezeigt. An diese Kurve wurde mittels least square Algorithmus eine zweite Logarithmusfunktion mit $a_0=0$ angelegt.

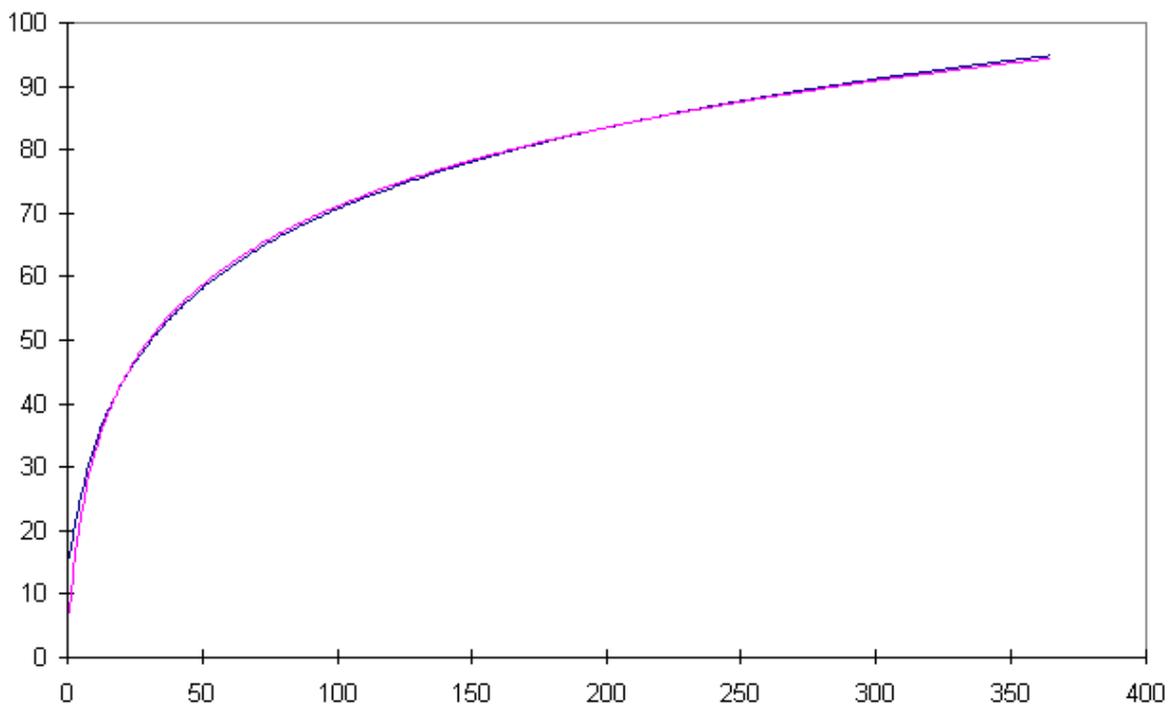


Bild 4 Unterschiede der Kurven bei $a_0=0$

Die Unterschiede sind minimal und sind nur in den ersten Tagen des Betriebs von Bedeutung. Das Langzeitverhalten der Funktion ändert sich durch diese Maßnahme nicht, da a_0 für die Kurve lediglich einen rechnerischen Offset darstellt. Für den Fitting Algorithmus erscheint a_0 jedoch als eine Reihe von quadratischen Summen. Für den Fitting algorithmus kann es daher mehrere mögliche Lösungen geben. Wird a_0 während des fittings auf Null gehalten, kann der Algorithmus daher oft bessere Lösungen finden (Bild 5).

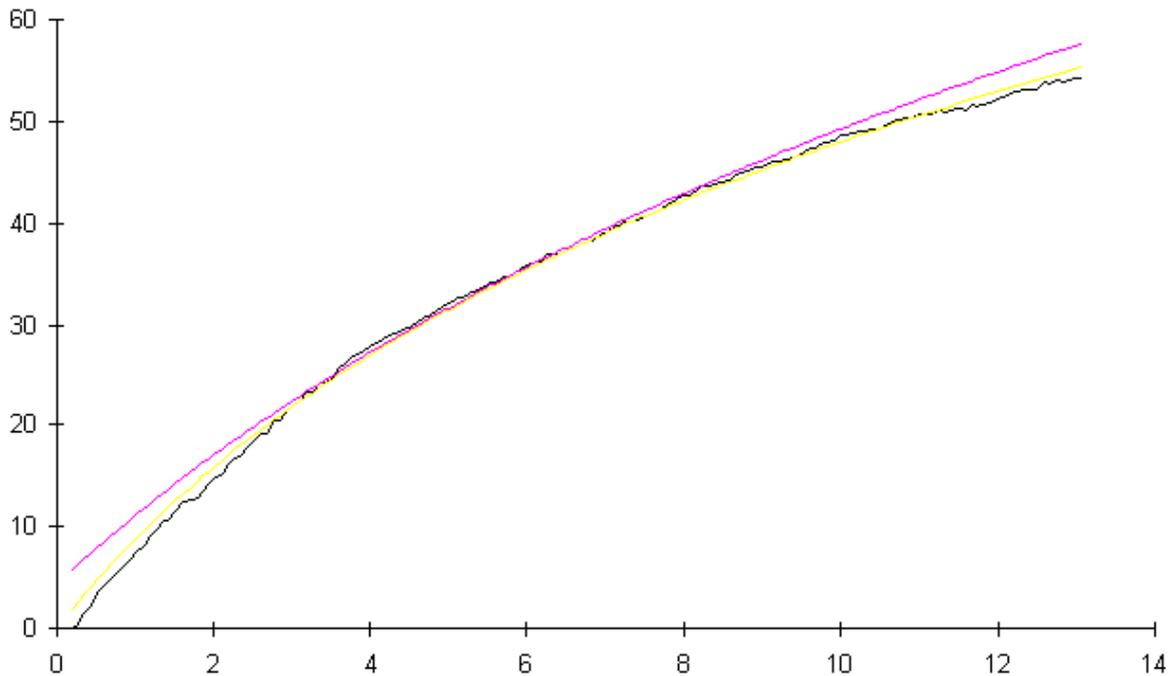


Bild 5 Verbesserung des Fittings mit $a_0=0$

Aufgrund der guten Ergebnisse mit $a_0=0$ wurde in den folgenden Untersuchungen nur noch mit der offsetfreien Mil Logarithmusfunktion gearbeitet.

OCXO zeigen nach dem ersten Einschalten oft einen verstärkten initialen Einlauf, während die Alterung nach dem Einlaufen gute Werte annimmt. Dieses Verhalten ist scheinbar typabhängig, da es in der Regel bei allen OCXOs des selben Typs in nahezu gleicher Ausprägung beobachtet werden kann. Beim Kurvenfitting über die gesamte Meßzeit von einem Jahr zeigt sich, daß die Übereinstimmung mit der Logarithmusfunktion auch bei starkem initialen Einlauf gegeben ist. Aufgrund des starken initialen Einlaufs ergibt die über die ersten 15 Tage gefittete Kurve jedoch zu hohe Werte. Dies trifft bei allen untersuchten OCXO dieses Typs zu. Es wurde daher vermutet, daß der starke Einlauf nicht auf die schlechte Langzeitstabilität, sondern auf andere Einflüsse zurückzuführen ist. Da das Langzeitverhalten von OCXO vom initialen Einlauf unabhängig zu sein scheint, wurde versucht, die Alterungsmeßwerte zum Ende der Meßdauer hin stärker zu bewerten. Eine einfache Möglichkeit zur Realisierung ist die Verwendung eines gewichteten Fittingverfahrens. Hierbei werden die Meßwerte mit einer variablen Signifikanz bewertet. Die Signifikanz der Meßwerte muß dabei umso höher werden, je näher sich ein Meßwert am Ende einer Alterungsmeßreihe befindet. Für die Gewichtung der Meßwerte wurde die Lösungsformel einer Differentialgleichung 1. Ordnung verwendet. In der Praxis kann dies relativ einfach erreicht werden, indem die Fehlerquadrate der einzelnen Differenzen vor der Aufsummierung mit der Gewichtungsfunktion multipliziert werden. Dadurch entsteht folgende Formel, deren Ergebnis zu minimieren ist.

$$lsq = \sum_{t=0}^{t_{max}} \left[\left(\frac{\Delta f}{f_0}(t) - a_1 \ln(a_2 t + 1) \right)^2 * (1 - e^{-bt}) \right]$$

Durch Variation des Koeffizienten b kann der Einfluß der Gewichtungsfunktion auf das Ergebnis stufenlos eingestellt werden. Große Werte für b lassen die Gewichtung schon nach wenigen Werten an die Asymptote ($= 1$) stoßen. Die Gewichtungsfunktion hat somit keinen Einfluß mehr und der Algorithmus funktioniert wie vorher auch. Interessant wird es jedoch bei kleinen Werten von b . Hier kann jede Meßreihe vom Ende her gewichtet werden, was den Schwerpunkt der Auswertung ans Ende der Messung legt.

Der Koeffizient b ist allerdings für jeden OCXO-Typ verschieden und muß bei Einführung der gezeigten Methode für jeden Typ getrennt ermittelt werden. Diese Methode bringt bessere Ergebnisse als der einfache Fit über die Meßdaten (Bild 6). Die gemessenen Werte müssen

jedoch stetiges Verhalten aufweisen, da Frequenzsprünge und andere Einflüsse ebenfalls gewichtet verarbeitet werden.

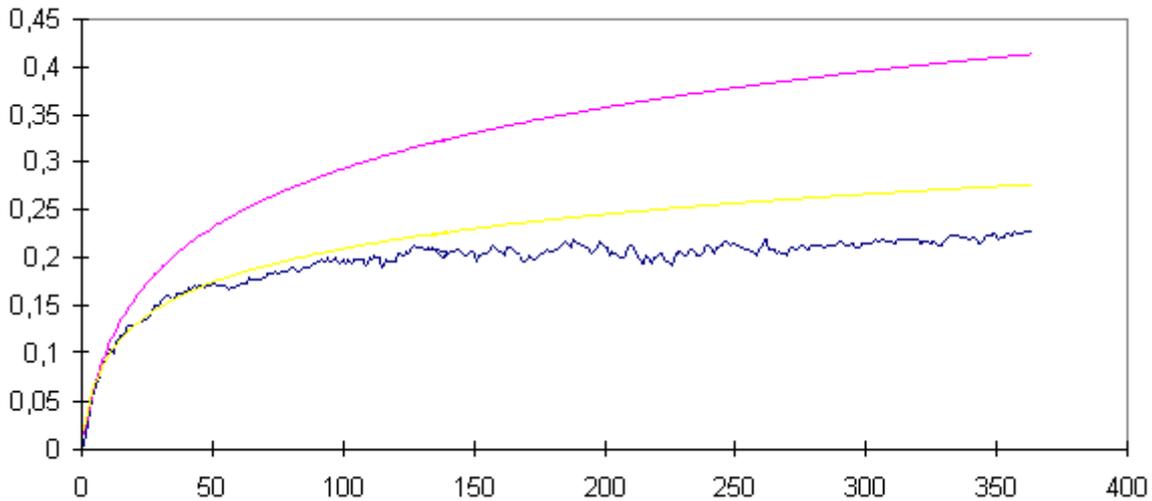


Bild 6 Gewichteter least square Fit

Eine Vielzahl von physikalischen Vorgängen sind Ausgleichsvorgänge, die dem Gleichgewichtszustand in Form einer Exponentialfunktion zustreben. Es wurde versucht diese Ausgleichsfunktion in die Alterungsberechnung mit aufzunehmen. In Bild 7 ist eine gemessene Kurve (C) mit einer über 365 Tage gefitteten Logarithmusfunktion (B) gezeigt (Mil). Kurve (A) ist der Standardfit über 20 Tage. Subtrahiert man nun die Meßdaten (C) von der gefitteten Kurve (B) und addiert die Differenz der beiden Kurven zum Zeitpunkt $t=0$ als Offset zu jedem Punkt der Ergebnisfunktion, so erhält man eine Fehlerkurve (G). Durch die umgerechneten Punkte dieser Kurve kann eine Funktion (F) gelegt werden, die der Lösungsfunktion einer Differentialgleichung 1. Ordnung entspricht.

$$df / f = k(1 - e^{-bt})$$

Die Koeffizienten k und b werden wiederum mittels least square Algorithmen ermittelt. Diese Gleichung enthält nun die Einflüsse des Oszillators und den anfänglichen Quarzeinlauf. Wird nun jeder Punkt dieser Funktion von der ursprünglich gemessenen Datenreihe (C) subtrahiert erhält man eine neue, um die initialen Einflüsse reduzierte Meßkurve (E). Wird nun durch diese modifizierte Datenreihe die Mil Logarithmusfunktion (mit $a_0=0$) gelegt (Kurve D), zeigt sich, daß die Steigung nach einem Jahr sehr gut mit den tatsächlichen Werten korreliert.

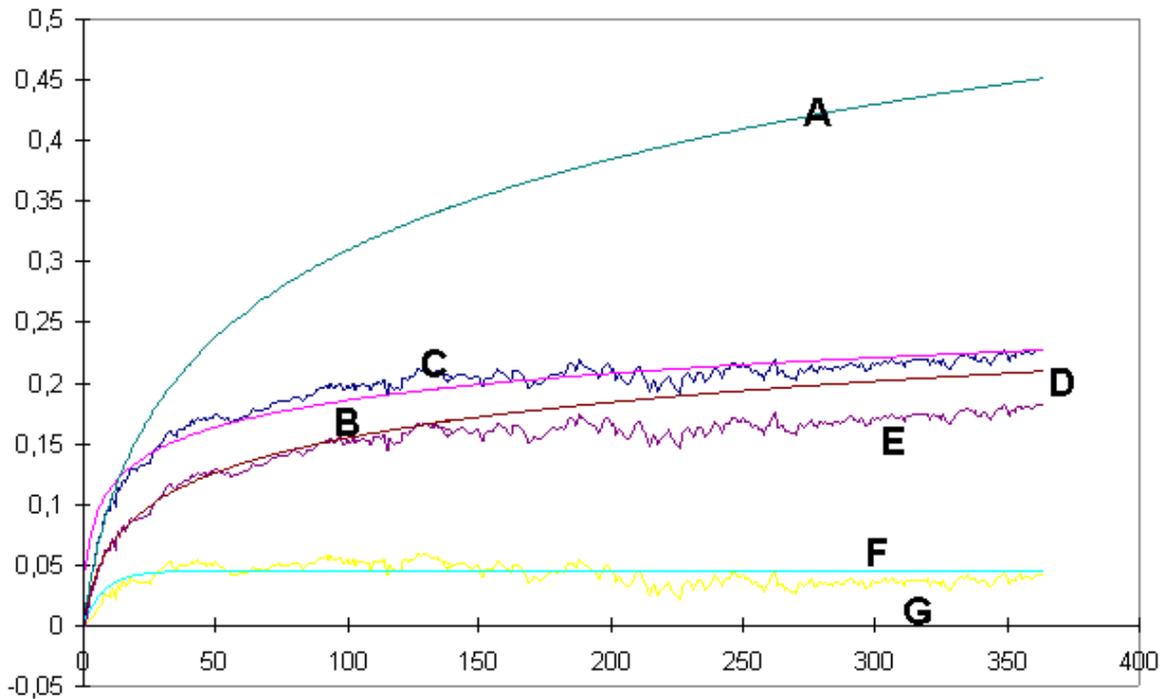


Bild 7 Subtrahierter initialer Einlauf

Erstaunlicherweise konnten bei allen untersuchten OCXO dieses Typs ähnliche Koeffizienten für k und b gefunden werden. Mit den einmal ermittelten Koeffizienten für die Fehlerfunktion lassen sich also alle Oszillatoren eines Type in ihrer Vorhersagbarkeit verbessern (Bild 8).

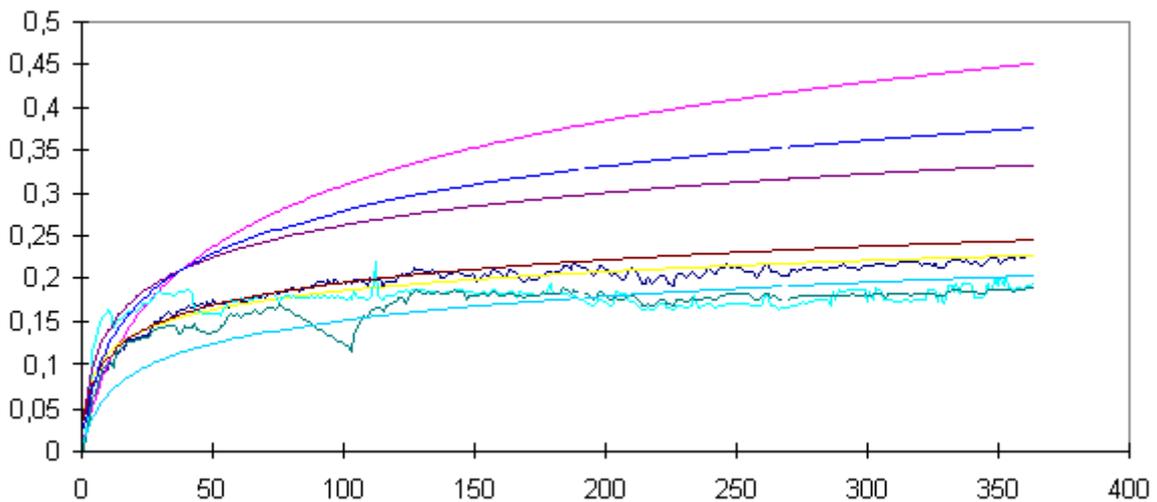


Bild 8 Verbesserung des Fits auch bei anderen OCXO

Dieses Verfahren ist jedoch leider nur schwer in die Produktion integrierbar, da von jedem OCXO Typ zunächst die Alterungsdaten von einem Jahr benötigt werden. Alle diese Methoden lassen zwar eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit zu, in der Serienproduktion sind sie jedoch nur mit großem Aufwand nutzbar. Bei der großen Produktvielfalt von TELE QUARZ kann diese Methode daher nur in Ausnahmefällen bei hohen Produktionsstückzahlen angewendet werden.

Der größte Nachteil der beschriebenen Methoden ist jedoch, daß er die Ursachen nicht beseitigt, sondern nur wegrechnet. Das Langzeitalterungsverhalten von OCXO kann damit zwar frühzeitig bestimmt werden, aber der initiale Einlauf muß für OCXO mit enger Alterungsspezifikation trotzdem abgewartet werden.

Im folgenden Bild (9) sind die selben OCXO wie oben dargestellt. Es wurden jedoch die Meßwerte der ersten 20 Tage verworfen und der Meßwert des 21. Tages als Bezugspunkt für die relative Frequenzabweichung genommen. Damit kann rechnerisch eine 20 Tägige Voralterung der Oszillatoren vor die eigentliche Alterungsmessung gesetzt werden. Bild (9) zeigt eine wesentlich verbesserte Übereinstimmung des Fits mit der Realität. Bei OCXO mit geringerem initialen Einlauf wird die Vorhersagegenauigkeit sogar noch besser.

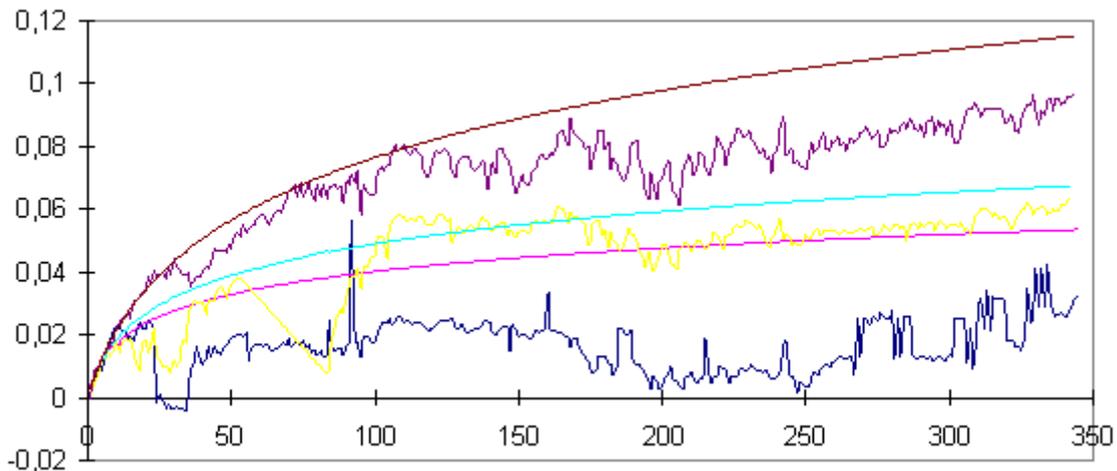


Bild 9 Verbesserung des Fits durch Voralterung

6. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, daß least square Algorithmen wenn sie auf Alterungsmeßdaten angewendet werden, bessere Ergebnisse liefern wenn der Summand a_0 der Logarithmusfunktion auf Null gehalten wird. Die berechneten Kurven stimmen damit besser mit der Realität überein

Die Vorhersagegenauigkeit von Oszillatoralterungsraten läßt sich durch mathematische Maßnahmen, die die Einlaufeffekte herausrechnen, zum Teil erheblich steigern. Alle Mathematischen Verfahren haben es jedoch nicht geschafft, bessere Ergebnisse zu liefern, als einfache Voralterungsprozesse. Die Vorhersagegenauigkeit wird umso besser, je länger die Oszillatoren in Betrieb sind.

Vor allem bei SC Oszillatoren mit hervorragendem Alterungsverhalten überwiegen Effekte wie Betriebsspannungsschwankungen, Injection locking, initialer Einlauf, TK etc. sodaß eine Alterungsaussage nach 20 Tagen Alterungsdauer unmöglich ist. Solche High End Typen lassen sich erst nach längerer Zeit zuverlässig bestimmen.

7. Literaturhinweise

[1] Miljkovic, M.R., Trifunovic, G.Lj., Brajovic, V.J.: Aging prediction of Quartz Crystal units; Proc. 42nd FCS (1988), p.404-411

[2] TELE QUARZ internal standard for Aging evaluation (1995)

[3] MIL-O-55310, Military specification, General specification for crystal oscillators

[4] Neubig, Bernd, Comparison of passive and active aging of SC-cut and AT-cut crystals, Conference publication 418, EFTF 96, p.37-43

[5] Filler, Raymond L., Aging specification, measurement and analysis, Proc 7th Quartz devices conference (1985), p.93-104