

Phasenrauschen und Kurzzeitstabilität

Atomic Clocks und Quarzoszillatoren – ein Vergleich

Es existiert eine weitverbreitete Meinung, dass auf Cäsium und/oder Rubidium basierende Oszillatoren, sog. Atomic Clocks (ACs), das Nonplusultra hinsichtlich Frequenzstabilität darstellen. Aber stimmt das wirklich?

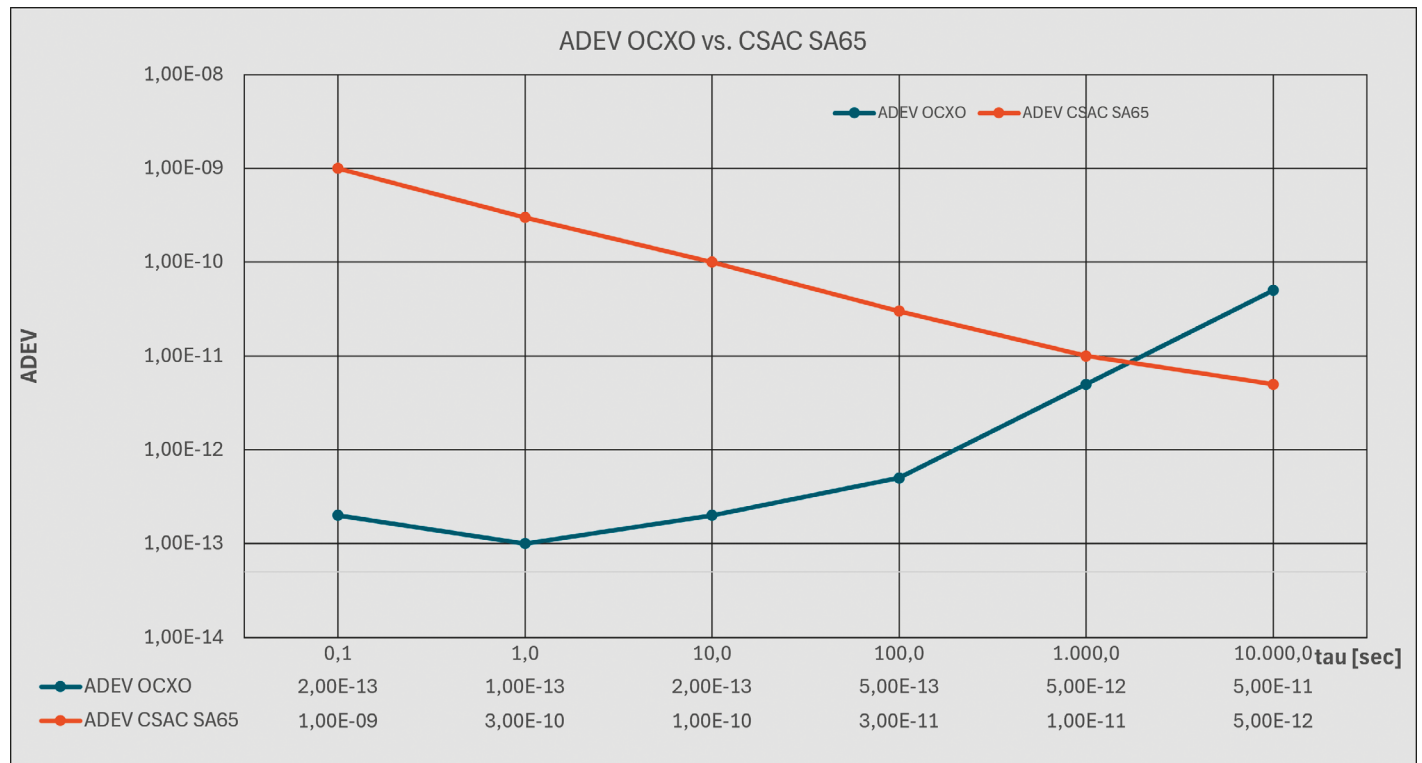


Bild 3: Kurzzeitstabilität (ADEV) von OCXO vs. CSAC

Wenn wir von Frequenzstabilität sprechen, müssen wir unterscheiden, welche Zeitspanne wir betrachten. Interessiert uns die Frequenzstabilität eines Oszillators in einem Zeitfenster von Millisekunden oder mehreren Sekunden oder Minuten oder eher über Stunden, Tage oder gar Jahre?

Die Frequenzstabilität

von Frequenzquellen (Oszillatoren, Atomic Clocks) ist nicht konstant, sondern hängt in großem Maße vom betrachteten Zeitfenster ab. Üblicherweise unterscheidet man bei der Betrachtung der Frequenzstabilität zwischen Kurzzeitstabilität (Millisekunden bis 1000 s) und Langzeitstabilität (Tage bis Jahre). Dazwischen gibt es einen Graubereich von einer Stunde bis zu einem Tag, der nicht eindeutig zuzuordnen ist.

Die Kurzzeitstabilität, engl. Short Term Stability (STS), wird meist mit der dimensionslosen Allan Deviation (ADEV) für ein betrachtetes Zeitfenster tau (z.B. 1 oder 10 s) ausgedrückt. Hierzu wird die relative Frequenzänderung innerhalb des betrachteten Zeitfensters von z.B. 1 s mit der Frequenzänderung innerhalb der nächsten Sekunde verglichen und über viele Sekunden statistisch ausgewertet.

Zur statistischen Auswertung der Frequenzänderungen von Oszillatoren ist die klassische Standardabweichung, welche die Abweichungen zu einem Mittelwert berechnet, ungeeignet, da reale Oszillatoren 1/f-Rauschen, Drift und Random Walk aufweisen und daher mit der Anzahl von Samples divergieren würden. Die Allan Variance bzw. die Wurzel daraus, die Allan Deviation (ADEV), vermeidet diese Problematik, d.h. sie konvergiert.

Die ADEV wird in der Regel für verschiedene Zeitfenster tau gemessen und geplottet (ADEV vs. Time Span) dargestellt. Ich möchte hier nicht in die Details der Messung und Berechnung eingehen; diese wurden bereits auf vielen Seiten veröffentlicht. Im Anhang finden Sie mehrere Links dazu. Jedoch illustriere ich auch in Bild 1 die Allan Deviation (ADEV) eines guten 5-MHz-OCXOs.

Autor:
Harald Rudolph
KVG Quartz Crystal Technology GmbH
www.kvg-gmbh.de

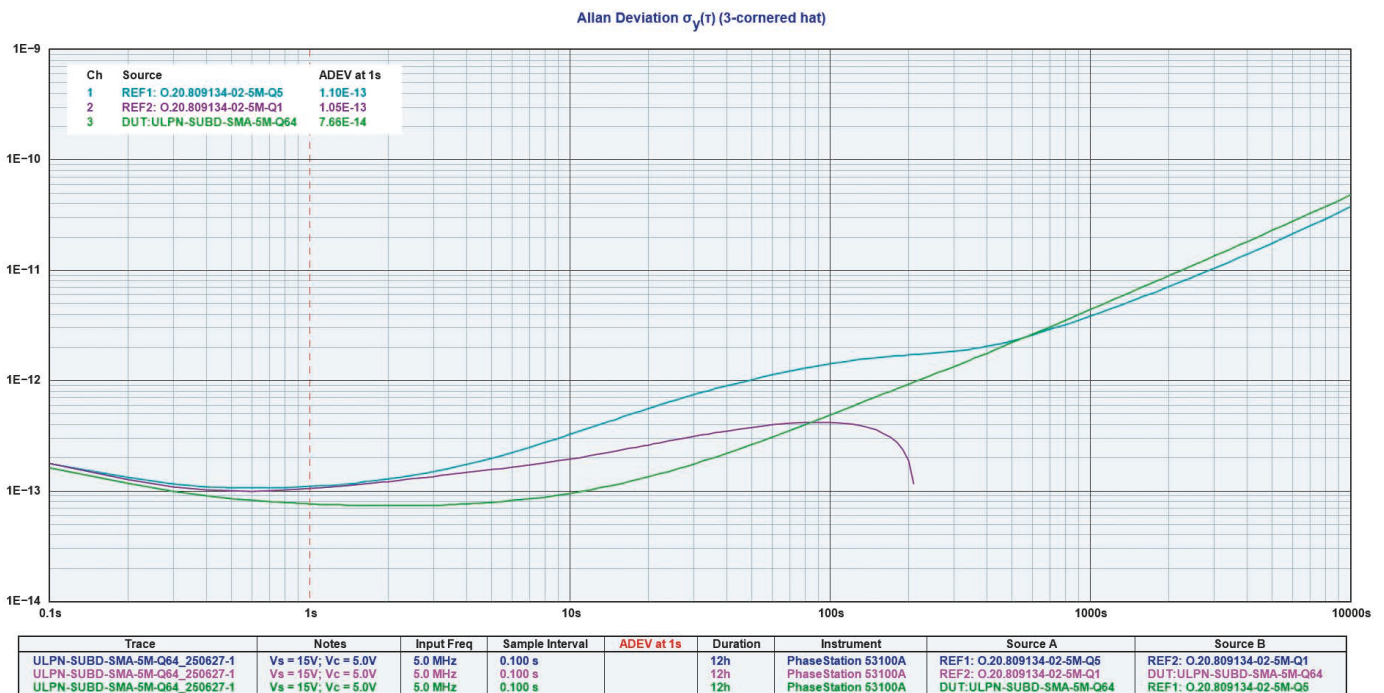


Bild 1: ADEV eines guten 5-MHz-OCXOs

Das Phasenrauschen

ist eine weitere für viele Anwendungen wichtige Charakteristik eines Oszillators. Es wird als $L(f)$ in dBc/Hz angegeben, ist also die Rauschleistungsdichte einer Frequenzquelle in Abhängigkeit vom sog. Trägerabstand.

Zur Messung und Interpretation des Phasenrauschens existiert ebenfalls bereits sehr viel Literatur, sodass dies hier nicht noch einmal aufgeführt werden soll. Daher nur in Bild 2 der Phasenrausch-Plot eines guten 5-MHz-OCXOs.

Eine Gegenüberstellung

von Phasenrauschen und Kurzzeitstabilität von Quarzoszillatoren und Atomic Clocks bringen die Tabellen 1 und 2. Das Aufmacherebild Bild 3 informiert griffiger zur Kurzzeitstabilität (ADEV) von OCXO vs. CSAC.

Der Vergleich der Kurzzeitstabilität (ADEV) und des Phasenrauschens eines sehr guten OCXOs und eines CSACs stellt natürlich keinen allumfassenden Performance-Vergleich dar. Wie man auch in der Aufmachergrafik erkennt, existiert ein Schnittpunkt der Betrachtung der ADEV bei einigen wenigen tausend Sekunden, ab dem der CSAC oder auch andere Atomic Clocks immer besser werden. D.h., je länger der Betrachtungszeitraum, desto besser ist die Frequenzstabilität der Atomic Clocks gegenüber einem Quarzoszillator.

Wenn wir uns in der Betrachtung der Frequenzstabilität von der Kurzzeitstabilität zu wesentlich längeren Zeiträumen bewegen, sprechen wir von Frequenzdrift oder auch Alterung (engl. Aging). In diesem Punkt sind die meisten ACs den OCXOs überlegen. Der MAC SA5X z.B. spezifiziert ein df/f von $5E-11$ pro Monat und $6E-10$ pro Jahr. Dies ist ca. um den Faktor 10 besser als die entsprechenden Werte eines quarzbasierenden OCXOs. Auch die Frequenzgenauigkeit und die Frequenzstabilität in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur $f(T)$ sind in der Regel für ACs wesentlich besser als für OCXOs mit vergleichbarer Größe. Der MAC-SA5X ist im Temperaturbereich von -40 bis $+75$ °C mit df/f unter $5E-11$ spezifiziert, was ebenfalls um eine Dekade besser ist als ein OCXO mit vergleichbaren Abmessungen.

Die Systemanforderungen

entscheiden darüber, welcher Typ von Oszillator für eine bestimmte Anwendung die bessere Wahl darstellt. Ist es wichtig, eine Frequenzquelle zu haben, welche eine möglichst geringe Abweichung von der Nominalfrequenz aufweist und diese Abweichung auch langfristig möglichst wenig zunimmt, oder ist es eher wichtig, die bestmögliche Frequenzstabilität in einem eher kleinen Zeitfenster verbunden mit einem sehr guten Phasenrauschen zu haben?

Beides zugleich ist im Bereich der Frequenzmodule (Quarzoszillatoren, Atomic Clocks) nicht möglich.

Selbst der berühmte 5071A Cesium Primary Time and Frequency Standard – ursprünglich von Hewlett Packard entwickelt – welcher Abmessungen von $133 \times 425 \times 524$ mm, ein Gewicht von 30 kg und eine Leistungsaufnahme 50 W (85 W beim Warm-up) aufweist, hat zwar eine sehr gute Accuracy (Abweichung von der Nominalfrequenz) von bis zu $5E-13$ für die High Performance-Variante und eine Langzeitstabilität von besser als $1E-14$, aber seine Kurzzeitstabilität für betrachtete Zeitfenster von 0,1 s bis ca. 100 s ist mit einer ADEV von $1,2E-11$ bis $1E-12$ deutlich schlechter als ein sehr guter OCXO, welcher in diesem betrachteten Zeitfenster mit seiner ADEV im Bereich $1E-13$ bis $1E-12$ liegt. Auch das Phasenrauschen (SSB Phase Noise) des 5071A bei 1 Hz Offset ist mit -106 dBc/Hz für den 5-MHz-Output wesentlich schlechter als bei einem sehr guten OCXO bei 5 MHz, welcher bis zu -132 dBc/Hz bei 1 Hz Offset erreichen kann. Der 10 MHz-Ausgang des 5071A ist mit einem Phasenrauschen von besser als -100 dBc/Hz spezifiziert, was mehr als 20 dBc schlechter ist als ein (sehr) guter 10-MHz-ULPN-OCXO mit -122 dBc/Hz.

Das Phasenrauschen des 5071A ist über den gesamten Offset-Bereich von 1 Hz bis 100 kHz wesentlich schlechter als bei einem 5- oder auch 10-MHz-ULPN-OCXO.

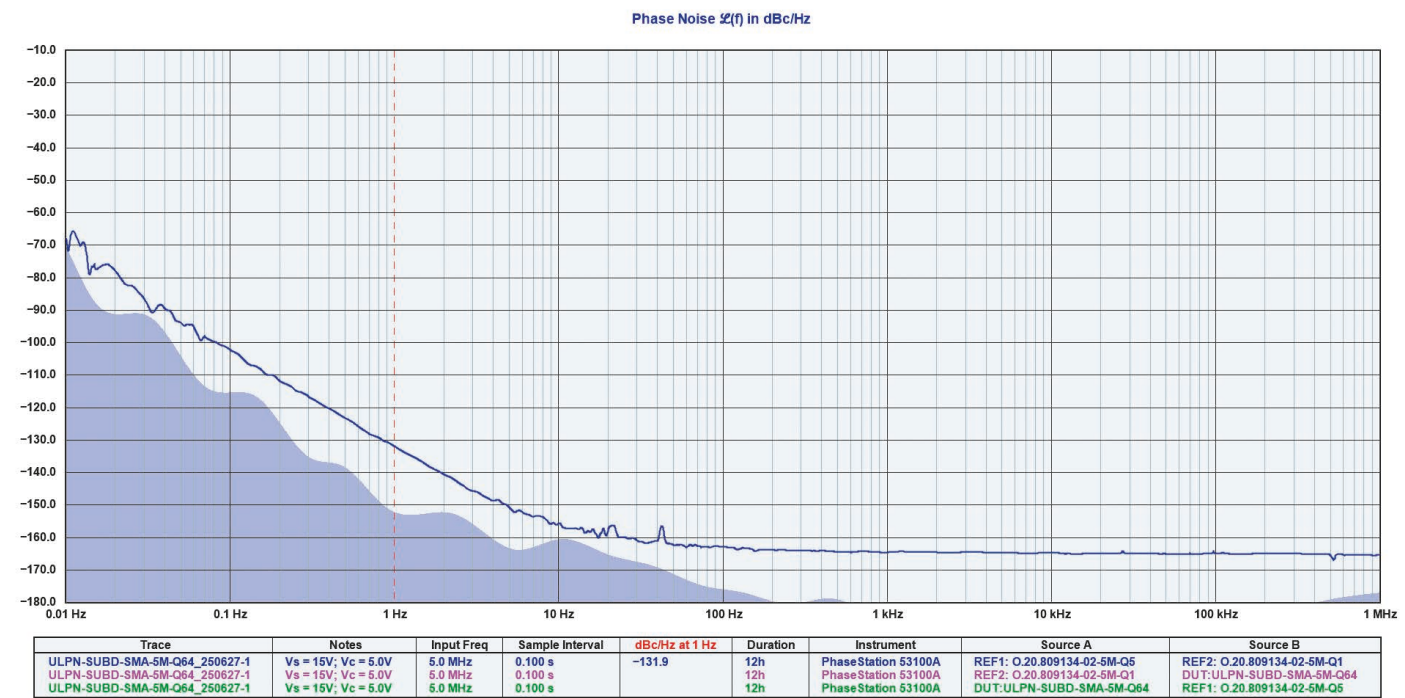


Bild 2: Phasenrausch-Plot eines guten 5-MHz-OCXOs

Einzig die besten aktiven Wasserstoff-Maser-Clocks, wie der IMASER 3000 (Smart Active Hydrogen Maser Clock) von Safran Electronics & Defence, haben je nach gewählter Option eine Kurzzeitstabilität zwischen $1,5E-13$ und $6E-14$ bei einem τ von 1 s und ein Phasenrauschen zwischen -118 und -132 dBc/Hz @ 1 Hz Offset für den 5-MHz-Output. Dieser IMASER 3000 hat Abmessungen von 60 x 80 x 91 cm und wiegt 120 kg. Die Preise für dieses Teil liegen bei einigen 100.000 Euro. Für Zeiträume von 10 bis 10.000 s oder auch in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen, wie Temperatur oder Magnetfeldern, ist die Frequenzgenauigkeit und -Stabilität des

IMASER 3000 oder auch anderer aktiver Hydrogen Maser Clocks mehrere Dekaden besser als jeder OCXO.

Der konkrete Anwendungsfall bestimmt die Auswahl der richtigen Zeitreferenz

Für viele Anwendungen, welche zwar eine sehr gute Kurzzeitstabilität und/oder sehr niedriges Phasenrauschen, aber nicht die Accuracy und Langzeitstabilität eines Masers oder Atomic Clocks benötigen, stellen ULPN OCXOs die bessere Alternative dar.

Typische Anwendungen, bei denen die Abweichung zur Nominalfrequenz nicht die

große Rolle spielt, aber die Kurzzeitstabilität und das Phasenrauschen enorm wichtig sind, sind alle Arten von Referenzoszillatoren in Verbindung mit Synthesizern, welche die Referenzfrequenz in den GHz-Bereich transformieren. Auch für die meisten Radar- und Sonar-Anwendungen ist die Kurzzeitstabilität der Referenzoszillatoren wichtiger als die Langzeitstabilität.

Im Bereich der digitalen Signalverarbeitung für Audio und Video spielen das Phasenrauschen und die Kurzzeitstabilität der Referenzoszillatoren eine entscheidende Rolle für die Wiedergabequalität von Bild und Ton.

Offset Frequency [Hz]	0.1	1.0	10	100	1000	10k	100k	1M
OCXO 5 MHz	-100	-130	-155	-160	-165	-165	-165	-165
OCXO 10 MHz	-90	-122	-148	-160	-167	-168	-168	-168
OCXO 100 MHz	?	-80	-110	-140	-170	-175	-180	-180
XPRO 10 MHz Microchip	?	-80	-90	-128	-143	-148	?	?
CSAC SA65 10MHz Microchip	?	-44	-64	-110	-128	-135	-140	?
MAC-SA55 10 MHz Microchip	?	-70	-90	-114	-135	-140	?	?
DTA-450 10 MHz CSA Taitien	?	-55	-80	-113	-125	-135	?	?
5071A Caesium Clock 5 MHz	?	-106	-136	-145	-150	-154	-154	?
5071A Caesium Clock 10 MHz	?	-100	-130	-145	-150	-154	-154	?

Tabelle 1: Phasenrauschen [dBc/Hz] von Oszillatoren mit typischen Frequenzen für verschiedene Offset-Frequenzen [2]

Zeitfenster [s]	0.1	1	10	100	1000	10k
OCXO 5 MHz	2E-13(1)	1E-13	2E-13	5E-13	5E-12	5E-11
OCXO 10 MHz	2E-13	1E-13	2E-13	5E-13	5E-12	5E-11
OCXO 100 MHz	5E-12	1E-12	2E-12	2E-12	3E-12	2E-11
XPRO 10 MHz Microchip	?	1E-11	3.2E-12	1E-12	?	?
CSAC SA65 10MHz Microchip	?	3E-10	1E-10	3e-11	1E-11	?
MAC-SA55 10 MHz Microchip	?	1.5E-11	5E-12	1.5E-12	5E-13	?
MAC-SA53 10 MHz Microchip	?	3E-11	1E-11	3E-12	1E-12	?
DTA-450 10 MHz CSA Taitien	?	3E-10	1E-10	3E-11	?	?
Active Hydrogen Atomic Clock	?	5E-13	1E-13	2E-14	8E-15	5E-15
5071A Caesium Clock 5 MHz HP	1.2E-11	5E-12	3.5E-12	8.5E-13	2.7E-13	8.5E-14
5071A Caesium Clock 10 MHz SP	1.2E-11	1.2E-11	8.5E-12	2.7E-12	8.5E-13	2.7E-13

Note 1: nE-yz bedeutet n x 10-yz
Note 2: Daten der OCXOs sind gemessen bei KVG; spezifizierte Daten der Atomic Clocks stammen von den Datenblättern der jeweiligen Hersteller

Tabelle 2: Kurzzeitstabilität (ADEV) für verschiedene Zeitfenster [2]

Last not least

werden für die Phasenrauschmessung sehr rauscharme Referenzoszillatoren benötigt. Je besser diese im Vergleich zum Device Under Test (DUT) sind, desto schneller ist die Messung beendet, da die Anzahl der notwendigen Kreuzkorrelationen geringer ist, wenn die Referenzoszillatoren annähernd gut oder sogar besser als das DUT sind.

Auch wenn es nicht unbedingt notwendig ist, dass die Referenzoszillatoren für eine Phasenrauschmessung ein besseres Phasenrauschen als das DUT aufweisen, da man mittels Kreuzkorrelation das Phasenrauschen des Messsystems verbessern kann, kostet es viel Zeit, diese Korrelationen durchzuführen, wenn die Referenzoszillatoren deutlich schlechter sind als das DUT.

Die Verbesserung des Phasenrauschens des Messsystems durch Kreuzkorrelation folgt ungefähr der folgenden Formel:

$$\Delta L \approx 5 \log_{10}(n)$$

ΔL ... Verbesserung in dB
n ... Anzahl notwendiger Kreuzkorrelationen

Die Tabelle 3 zeigt, welche Reduzierungen des Phasenrauschens des Messsystems bei welcher Anzahl Kreuzkorrelationen erreichbar sind.

Aufgrund der sehr hohen Zahl von notwendigen Kreuzkorrelationen sind Atomic Clocks als Referenzoszillatoren zur Messung des trägernahen Phasenrauschens von guten (Quarz-)Oszillatoren schlecht geeignet,

da das trägernahen Phasenrauschen der ACs selbst zu schlecht ist, um gute DUTs in vernünftiger Zeit zu messen.

Zusammenfassung:

Atomic Clocks haben im Vergleich zu Quarzoszillatoren eine bessere Abgleichgenauigkeit (Accuracy), sind weniger empfindlich auf Umgebungseinflüsse, wie Temperatur und Luftströmungen, und verfügen über eine bessere Langzeitstabilität, die im Vergleich zum Quarzoszillator immer besser wird, je länger die betrachteten Zeiträume sind. Betrachten wir die Kurzzeitstabilität (ADEV) und das Phasenrauschen, dann können wir deutliche Vorteile der (guten) Quarzoszillatoren feststellen.

Beide Kategorien von Frequenzquellen haben ihre Vor- und Nachteile; wie man sich entscheidet, kommt auf die Anwendung an: Ist die absolute Frequenzgenauigkeit entscheidend oder das Phasenrauschen? Und in welchem betrachteten Zeitfenster soll die Frequenz möglichst stabil sein?

Literatur

[1] Allan Variance, Overview by David W. Allan, www.allanstime.com/AllanVariance/
[2] Allan Variance, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Allan_variance
[3] Phasenrauschen, Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasenrauschen>
[4] Verfahren zur Messung des Phasenrauschens, hf-praxis 2/2024, S. 12ff ◀

Anzahl Kreuzkorrelationen	Verbesserung des Rauschens in dB
10	5
100	10
1000	15
10.000	20
100.000	25
1.000.000	30
10.000.000	35
100.000.000	40

Tabelle 3: Reduzierungen des Phasenrauschens des Messsystems vs Anzahl der Kreuzkorrelationen