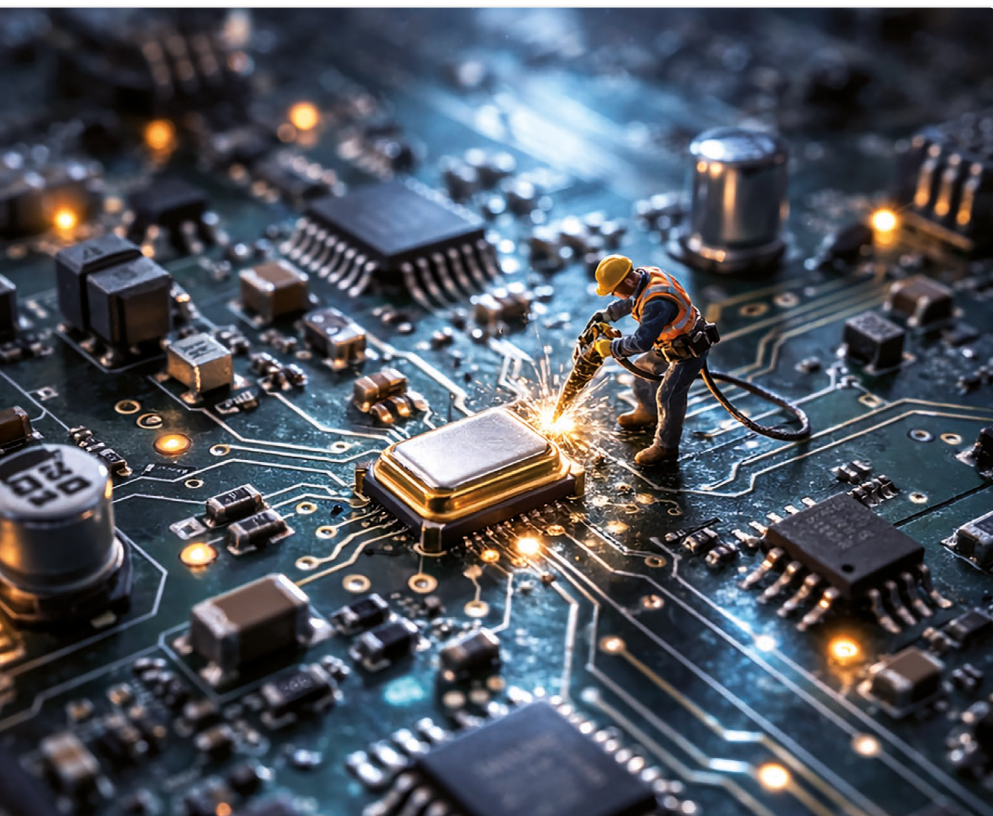


Wenn der Takt wackelt

Quarzoszillatoren unter Vibration: g-Sensitivity verstehen, messen, beherrschen



Die unangenehme Pointe: Selbst wenn ein Quarzoszillator im ruhigen Labor „perfekt“ aussieht, kann er in einer vibrierenden Umgebung zum stillen Störer werden – nicht durch grobe Frequenzabweichung, sondern durch spektrale Linien und zusätzliches Rauschen nahe an der Trägerlinie. Und genau dieser Nahbereich entscheidet in vielen HF-Systemen über Empfangsreserve und spektrale Reinheit.

Diagnose: Ist es wirklich der Oszillator?

Bevor man den Oszillator als Ursache festlegt, lohnt ein Schritt zurück: Vibrationsinduzierte Phasenmodulation ist kein exklusives „Oszillatorproblem“. In der Messpraxis können auch andere Komponenten im HF-Pfad auf mechanische Anregung reagieren – mit dem Effekt, dass im Spektrum Seitenbänder oder ein Anstieg des Nahträger-Phasenrauschens um den Träger entsteht. Typische Kandidaten sind dabei ganz profan: Koaxleitungen, Steckverbinder, Adapterstrecken – aber auch Filter oder mechanisch empfindliche Baugruppen entlang des Signalwegs.

Eine saubere Diagnose beginnt nicht mit dem Datenblattvergleich, sondern mit der Frage: Wandert der Effekt mit dem Bauteil oder mit der Messkette? In der Praxis hilft ein klarer Ablauf:

1. Mechanische Kopplungen sichtbar machen

Sind Kabel unter Zug verlegt? Gibt es steife Koax-Bögen, die als Feder wirken? Liegt ein Steckverbinder in einer Zone hoher Beschleunigung? Schon kleine Änderungen in der Kabelführung oder Fixierung können das Spektrum spürbar verändern. Das ist kein „Fehler“ – es ist ein Hinweis, dass der Messaufbau selbst Teil des Problems sein kann.

2. Komponenten schrittweise isolieren

Wenn möglich, den HF-Pfad vereinfachen: kurze, direkte Verbindung statt Kaskaden aus Adaptern und Zusatzkomponenten. Mechanisch entkoppeln, fixieren, einzelne Elemente gegeneinander tauschen. Ziel ist nicht Optimierung, sondern eindeutige Zuordnung: Welche Baugruppe erzeugt den Effekt – und unter welchen mechanischen Bedingungen?

Es beginnt oft harmlos – und endet mit einem Spektrum, das plötzlich nicht mehr sauber ist: Neben dem Träger (oder der Trägerlinie, der Linie nahe der Nennfrequenz) stehen zwei feine Linien, links und rechts, sauber im Abstand der Vibrationsfrequenz. Im ersten Moment liegt der Verdacht nahe, dass der Messaufbau diese Linien erzeugt. Doch wenn sie mit der mechanischen Anregung mitwandern, wird klar: Hier moduliert nicht die HF-Schaltung – hier moduliert der Oszillator selbst.

Genau das ist der Kern des Problems:

Beschleunigung, Schock oder Vibration verändern die Resonanzbedingungen von Quarzresonatoren und können so eine Frequenz- bzw. Phasenmodulation erzeugen. Bei periodischer Anregung erscheinen daraus diskrete Seitenbänder; bei rauschähnlicher Anregung steigt das effektive Phasenrauschen – und im Zeitbereich der Jitter. Dieses Verhalten ist in der Praxis besonders dort kritisch, wo Oszillatoren als lokale Oszillatoren oder Referenzoszillatoren in Mess-, Radar- oder Übertragungssystemen eingesetzt werden.



Autor:
Hendrik Nielsen
Technical Sales Specialist FCP
WDI AG
www.wdi.ag

3. Korrelation statt Bauchgefühl

Entscheidend ist, ob sich Spurpegel und Phasenfluktuationen systematisch mit der mechanischen Anregung verändern. Wenn der Seitenbandabstand exakt der Anregungsfrequenz folgt und der Pegel mit der Beschleunigung skaliert, ist das ein starkes Indiz für Modulation durch Mechanik – unabhängig davon, ob die Ursache im Oszillator oder im HF-Pfad liegt.

Erst wenn dieser „Aufbau-Check“ bestanden ist, lohnt der Blick auf den Oszillator. Und auch hier ist Präzision wichtig: Ein Schwingquarz (Resonator) ist nicht gleich ein Quarzoszillator (XO/TCXO/OCXO als Modul). In der Anwendung sieht man fast immer das Verhalten des Oszillators als Gesamtsystem – also Resonator, aktive Schaltung, ggf. Regelung und mechanischer Aufbau zusammen. Ein niedriger Phasenrauschwert im ruhigen Zustand ist deshalb nur die halbe Wahrheit: Entscheidend ist, was unter realer mechanischer Anregung zusätzlich „oben drauf“ kommt.

Kurz gesagt: Wer in vibrierender Umgebung Seitenbänder oder spektralen „Schmutz“ nahe der Trägerlinie sieht, sollte zuerst den Messaufbau und den HF-Pfad als mögliche Quellen ausschließen. Erst dann wird die Diskussion über g-Sensitivity und Oszillatorauswahl wirklich belastbar.

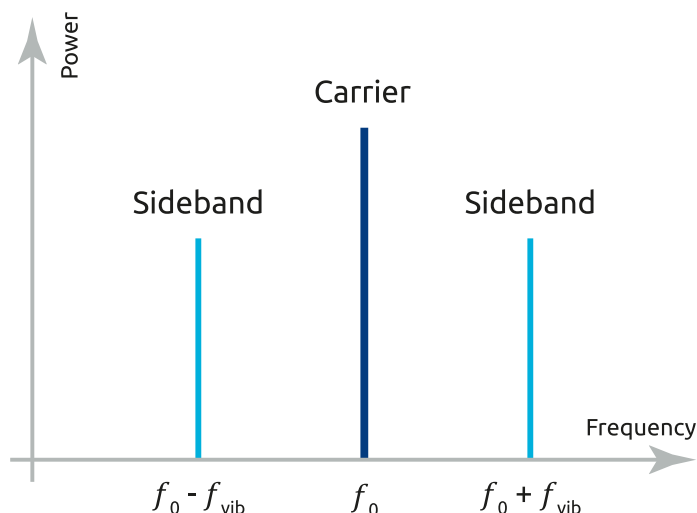
Mechanismus:

Wenn Beschleunigung zur Modulation wird

Wenn der Messaufbau als Ursache weitgehend ausgeschlossen ist, bleibt die Frage: Warum kann Mechanik das Frequenz- und Phasenverhalten eines Oszillators verändern? Der Schlüssel ist, dass der Schwingquarz ein mechanischer Resonator mit piezoelektrischer Kopplung ist. Seine Resonanzfrequenz wird durch Geometrie, Masseverteilung und elastische Eigenschaften bestimmt – und diese Randbedingungen reagieren auf mechanische Belastung.

Wirkt Beschleunigung auf Resonator und Aufbau, entstehen winzige Dehnungen und Spannungen. Dadurch verschiebt sich die effektive Resonanzfrequenz dynamisch. Bei periodischer Anregung (z.B. Sinusvibration) entspricht das einer Frequenz- bzw. Phasenmodulation: Im Spektrum erscheinen diskrete Seitenbänder im Abstand der Vibrationsfrequenz, deren Pegel typischerweise mit Beschleunigung und Empfindlichkeit des Oszillators steigt.

Bei rauschähnlicher Anregung – etwa Random-Vibration oder ein komplexes Spektrum vieler mechanischer Eigenfrequenzen – verteilt sich der Effekt: Statt weniger Linien steigt das Nahträger-Phasen-



Diskrete Seitenbänder bei $f_0 \pm f_{vib}$ als typische Spektralsignatur einer sinusförmigen Vibration (Pegel abhängig von g-Niveau, Achse und Montage)

rauschen über ein Offset-Frequenzband. Im Zeitbereich zeigt sich das als zusätzliche Phasenfluktuation und damit als erhöhter Jitter, je nach Auswertung.

Wichtig ist die Einordnung: In der Anwendung sieht man meist den Quarzoszillator als Gesamtsystem. Die aktive Schaltung kann die Wirkung mechanischer Störung beeinflussen, etwa über Regelung, Arbeitspunkt oder Amplitudenverhalten – am Grundprinzip ändert das nichts: Mechanik verändert Resonanzbedingungen und damit Phase und Frequenz des Oszillators. Und genau deshalb ist das Thema in HF-Systemen so unangenehm: Die zusätzliche Modulation sitzt häufig nah am Träger – dort, wo spektrale Reinheit und Systemreserve entschieden werden.

g-Sensitivity:

Die Zahl, die ohne Achse nichts sagt

Wenn klar ist, dass der Oszillator unter mechanischer Anregung tatsächlich moduliert, stellt sich die nächste Frage: Wie lässt sich diese Empfindlichkeit sinnvoll beschreiben, und zwar so, dass sie vergleichbar und spezifizierbar wird? Genau dafür steht g-Sensitivity (Beschleunigungsempfindlichkeit). Vereinfacht gesagt beschreibt sie, wie stark sich die Frequenz eines Oszillators pro Beschleunigungseinwirkung ändert. In der Praxis wird sie häufig als Frequenzänderung pro g angegeben – je nach Darstellung als relative Änderung (ppb/g, ppm/g) oder als absolute Änderung (Hz/g).

Der wichtige Punkt: g-Sensitivity ist in der Regel kein skalarer Einzelwert, sondern richtungsabhängig. Beschleunigung wirkt entlang einer Achse – und ein Oszillator reagiert auf Kräfte je nach Orientierung, Befestigung und mechanischem Aufbau

unterschiedlich. Deshalb ist es fachlich sauberer, g-Sensitivity als Vektorgroße zu verstehen: Für jede Raumachse kann sich eine andere Empfindlichkeit ergeben. Wer nur einen „typischen“ Zahlenwert nennt, lässt damit noch offen, für welche Achse und unter welchen Randbedingungen er gilt.

Damit die Angabe der g-Sensitivity in der Praxis wirklich hilft, braucht es zwei Dinge: eine klare Messbasis und eine saubere Abgrenzung:

1. Messbedingungen

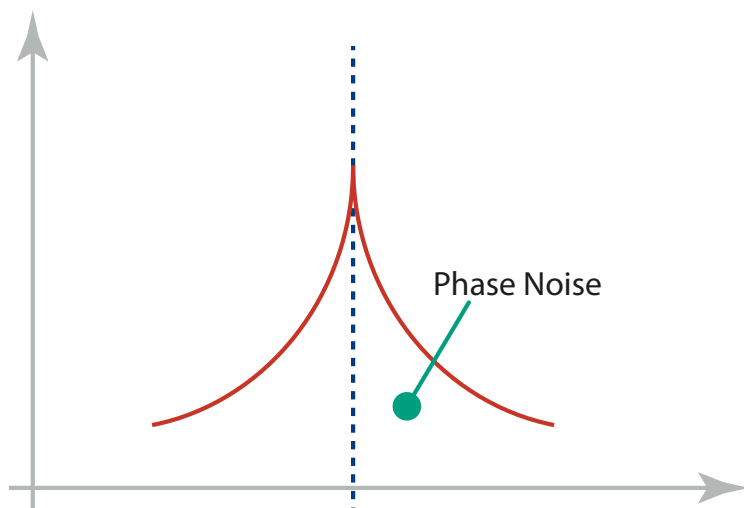
gehören zur Spezifikation

Ohne Kontext ist ein Zahlenwert kaum belastbar. Entscheidend ist, wie gemessen wurde: Achse/Orientierung, Art der Anregung (Sinus vs. Random), Frequenzbereich der Anregung, Beschleunigungsniveau, Befestigung/Fixture und Auswertgröße (z. B. Seitenbandpegel oder abgeleitete Frequenzabweichung). Zwei Oszillatoren können auf dem Papier „ähnliche“ Werte tragen – und sich im realen Aufbau trotzdem deutlich unterscheiden, wenn Montage und Anregungsprofil nicht vergleichbar sind.

2. g-Sensitivity muss klar von

„Phasenrauschen“ abgegrenzt werden

Ein niedriger Phasenrauschwert im ruhigen Betrieb bleibt wichtig – er beschreibt aber zunächst das Verhalten ohne mechanische Störung. g-Sensitivity hingegen beschreibt, wie stark mechanische Anregung zusätzliche Modulation erzeugt. In bewegten Umgebungen entscheidet oft nicht der beste Datenblattwert bei ruhigem Aufbau, sondern das Zusammenspiel aus Grundrauschen plus vibrationsinduzierter Modulation.



Phasenrauschen im Frequenzbereich: Rauschteile um die Trägerlinie, dargestellt als spektrale „Aufweitung“ nahe der Nennfrequenz

Praktisch bewährt hat sich daher eine Betrachtung, die den Anwendern wirklich hilft: g-Sensitivity nicht als abstrakte Zahl, sondern als Übersetzungsfaktor vom mechanischen Eingang zum spektralen Ausgang. Wer das konsequent macht, kann Anforderungen formulieren, die in der Messpraxis standhalten: etwa eine maximale Seitenbandhöhe bei definiertem g-Level und definierter Anregungsfrequenz – oder ein zulässiges Phasenrausch-Delta im Nahträgerbereich unter einem festgelegten Random-Profil.

Damit ist g-Sensitivity weniger „Nice-to-have“ als vielmehr das fehlende Bindeglied zwischen Mechanik und HF: Sie macht quantifizierbar, wann ein Oszillator im vibrierenden Umfeld zur spektralen Fehlerquelle wird – und wann nicht.

Mess- und Bewertungsstrategie: Vom Spektrum zur Freigabe

Mit Mechanismus und g-Sensitivity ist klar, was passiert – die entscheidende Frage bleibt: Wie wird daraus eine belastbare Bewertung? Dafür braucht es einen reproduzierbaren Aufbau: definierte mechanische Anregung, erfasste Beschleunigung am Bauteil, und eine Auswertung am Ausgang, die später als Akzeptanzkriterium verwendet werden kann.

Bei sinusförmiger Anregung zeigt sich die Modulation häufig als diskrete Seitenbänder im Abstand der Anregungsfrequenz – bewertbar als Seitenbandpegel in dBc bei definiertem g-Level, definierter Frequenz, definierter Achse und definierter Montage. Bei breitbandiger Random-Vibration

verteilt sich der Effekt eher als zusätzlicher Rauschteil im Nahträgerbereich – sinnvoll bewertbar als Phasenrausch-Delta gegenüber dem ruhigen Zustand über ein festgelegtes Offset-Frequenzband.

Entscheidend sind weniger Messgeräte als Disziplin: Montage und Fixture müssen definiert und reproduzierbar sein, die Messkette muss mechanisch entlastet werden, und Achsen/Einbaulage müssen eindeutig dokumentiert sein. Erst dann wird aus einem auffälligen Spektrum eine Spezifikation, die sich in Entwicklung, Einkauf und Qualifikation tatsächlich durchhalten lässt.

Systemwirkung:

Wann wird es zum HF-Problem?

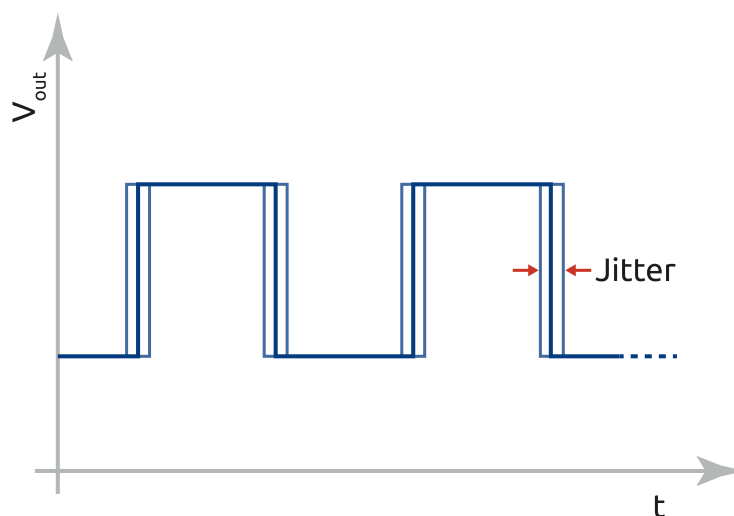
Spätestens hier trennt sich „unschönes Messbild“ von echter Systemrelevanz. Denn Seitenbänder und Nahträgergerauschen sitzen genau dort, wo viele HF-Systeme am empfindlichsten sind: nah am Träger. Und was der Oszillator in diesem Bereich mitbringt, wird im System weiterverarbeitet.

Diskrete Seitenbänder können als spektrale Linien auffallen – je nach Architektur als Störer im Empfangs- oder Messpfad. Noch tückischer ist zusätzlicher Rauschteil nahe am Träger: In Anwendungen mit hoher Dynamik und engen Abständen kann schon ein kleiner Anstieg den Unterschied machen zwischen Reserve und Grenzfall.

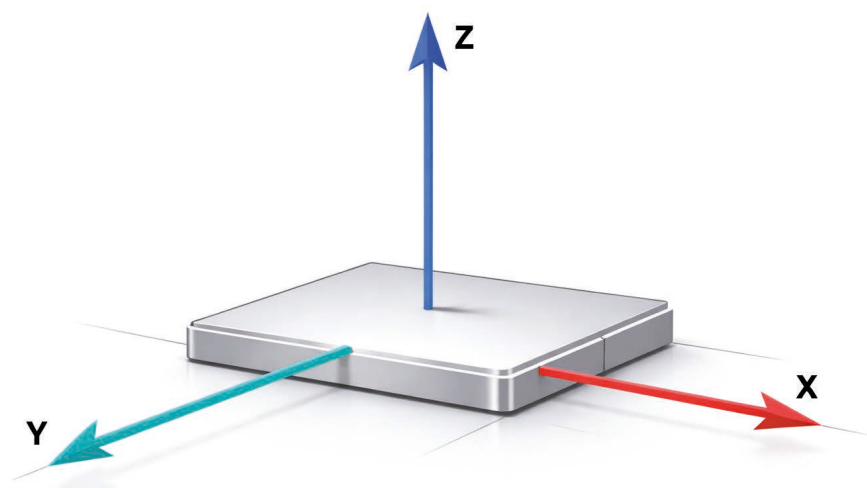
Tritt der Effekt nur unter bestimmten Betriebszuständen auf – Shaker, Drehzahlbereich, Prüfstand, mobile Messung – ist das ein starkes Indiz für die Kopplung von Mechanik und Oszillator. Dann lohnt es sich, den Einbau konsequent mitzudenken: Struktur, Resonanzen, Befestigung und Kräfte über Leitungen entscheiden mit, ob g-Sensitivity unauffällig bleibt oder zur Fehlerquelle wird.

Gegenmaßnahmen: Drei Hebel, ein Ziel

Wenn das Problem einmal verstanden und messbar ist, wird es auch handhabbar. Der Fehler wäre nur, sofort zur „besten“ Oszillatorvariante greifen zu wollen. In der Praxis ist vibrationsinduzierte Phasenmodulation selten ein reines Bauteilthema – sie entsteht im Zusammenspiel aus Oszillator, Einbau und mechanischer Umgebung. Wer systematisch vorgeht, kommt schneller ans Ziel und vermeidet teure Schleifen.



Jitter im Zeitbereich: zeitliche Schwankung der Signalfanken (Timing-Variation) als Folge von Phasenfluktuationen



g-Sensitivity ist richtungsabhängig: Die Beschleunigungsempfindlichkeit unterscheidet sich je nach X/Y/Z-Achse – Achse und Einbaulage gehören zur Spezifikation

Oft beginnt die Lösung ganz bodenständig: bei der Mechanik. Entscheidend ist, welche Beschleunigungen den Oszillator überhaupt erreichen – und in welchem Frequenzbereich. Schon Positionierung und Befestigung können darüber entscheiden, ob der Oszillator „mitläuft“ oder ob er in eine ungünstige Resonanz gerät. Entkopplung kann helfen, ist aber kein Selbstläufer: Sie kann neue Eigenfrequenzen schaffen und damit das Problem verschieben. Deshalb zählt am Ende nicht „weich“ oder „hart“, sondern eine definierte, reproduzierbare Einbausituation.

Erst danach lohnt die Bauteildiskussion – dann aber präzise. Sobald klar ist, ob die Anwendung eher unter diskreten Seitenbändern oder unter zusätzlichem Nahträgerausch leidet, lässt sich die Anforderung belastbar formulieren. In vielen Fällen ist es sinnvoll, g-Sensitivity nicht als isolierte Datenblattzahl zu betrachten, sondern als anwendungsnahe Grenze: zulässiger Seitenbandpegel bei definiertem g-Level und definierter Anregungsfrequenz – oder ein maximaler Nahträger-Phasenrausch-Anstieg unter einem festgelegten Random-Profil. Das zwingt zu klaren Messbedingungen und macht Alternativen vergleichbar.

Und schließlich bleibt die Einbindung: Auch wenn der Oszillator „das Problem zeigt“, heißt das nicht, dass der Rest der Schaltung neutral bleibt. Versorgungsführung, mechanisch gespannte Leitungen, Massebezug, thermisches Umfeld und die Anbindung an nachfolgende Stufen beeinflussen, wie stark sich mechanische Anregung als spektrales Problem bemerkbar macht. Ein sauberer Aufbau – elektrisch

und mechanisch – ist hier oft keine Optimierung, sondern Voraussetzung, damit Messungen reproduzierbar bleiben und Maßnahmen wirklich wirken.

Am Ende läuft es auf eine einfache Leitlinie hinaus: Nicht nur Frequenz und Phasenrausch spezifizieren, sondern die mechanische Realität mitdenken – und sie so messen, dass daraus eine robuste Freigabeentscheidung wird.

Lastenheft: Vier Punkte, die Ärger sparen

Wer das Thema einmal „live“ im Spektrum gesehen hat, formuliert Anforderungen anders. Nicht dramatischer – nur vollständiger. Denn die Frage ist am Ende nicht, ob ein Oszillator im Labor gut aussieht. Die Frage ist, ob er unter den realen mechanischen Randbedingungen im System sauber bleibt. Genau dafür hilft eine kurze Checkliste, die man konsequent in Lastenheft, Anfrage und Qualifikation übernimmt.

- **Oszillator eindeutig spezifizieren**
Bauart, Ausgang, Versorgung, Last, ggf. Regel-/Ziehfunktion – nicht nur die Nennfrequenz
- **g-Sensitivity nur mit Messbedingungen**
Achse/Orientierung, Anregungsart, Frequenzbereich, g-Level, Montage/Fixture, Auswertung
- **Akzeptanzkriterium im Spektrum definieren**
maximaler Seitenbandpegel (Sinus) und/oder maximales Nahträger-Phasenrausch-Delta (Random) bei festgelegten Bedingungen

• **minimalen Qualifikationsaufbau dokumentieren**

Montage, Achsen, Kabelführung, Profile, „ruhig“ vs. „angeregt“ – damit Vergleich und Second-Source-Freigabe belastbar bleiben.

Die gute Nachricht: Diese Checkliste macht Projekte nicht komplizierter – sie macht sie planbarer. Wer Mechanik und HF nicht als getrennte Welten behandelt, sondern als gekoppelte Randbedingungen, bekommt schneller belastbare Aussagen. Und genau das ist der Unterschied zwischen einem Oszillator, der im Datenblatt überzeugt – und einem Oszillator, der im Gerät funktioniert.

Mechanik als Teil der HF-Spezifikation

Am Ende ist die Erkenntnis simpel – und genau deshalb so wirksam: Vibration ist kein „Randthema“ der Mechanik, sondern ein HF-Eingangssignal. Wer einen Oszillator in einer bewegten Umgebung betreibt, bekommt nicht nur Temperaturdrift und Alterung, sondern unter Umständen eine zusätzliche Modulation, die direkt im Nahträgerbereich sichtbar wird – dort, wo viele Systeme am empfindlichsten sind.

Die gute Nachricht: Das Thema lässt sich beherrschen, wenn man es früh und konsequent adressiert. Dazu gehören eine saubere Diagnose, reproduzierbare Messbedingungen und ein Akzeptanzkriterium, das nicht „robust“ sagt, sondern Spektrum meint. In der Praxis ist das oft weniger Aufwand, als es klingt: definierter Aufbau, klare Achsen, kurzer Check unter Sinus- und/oder Random-Anregung – plus Dokumentation für den Vergleich.

Wer so vorgeht, spart sich die typische Eskalation am Ende des Projekts: „Im Labor war alles gut – im Gerät plötzlich nicht mehr.“ Denn dann ist nicht das Messbild unschön, sondern die Systemreserve weg. Und genau an dieser Stelle wird g-Sensitivity vom abstrakten Parameter zur praktischen Entscheidungshilfe. Damit diese Entscheidung nicht unter Zeitdruck fällt, muss sie früh in Spezifikation und Qualifikation verankert werden.

Wenn vibrationsinduzierte Effekte im Nahträgerbereich relevant werden, entscheidet nicht nur der Oszillator, sondern die gesamte Spezifikation aus Messbedingungen, Akzeptanzkriterien und Einbau. WDI unterstützt als Design-In-Partner von der Anforderungsdefinition über die Bauteilerauswahl bis zur Qualifikation und Serienfreigabe – inklusive Second-Source-Strategien, die früh mitgedacht, bewertet und mitqualifiziert werden. So wird aus einem „unschönen Spektrum“ eine prüfbare Anforderung und eine robuste Freigabeentscheidung. ◀