

Vibrationsempfindlichkeit von Quarzen und Quarzfiltern

Schwingquarze sind piezoelektrische Schwinger mit einer sehr hohen Güte, die sie zum idealen Bauelement für eine Vielzahl von Anwendungen macht, bei denen es auf hohe Frequenzgenauigkeit und -konstanz ankommt. Die hauptsächlichen Einsatzgebiete von Schwingquarzen in der Elektronik sind Quarzoszillatoren und Quarzfilter

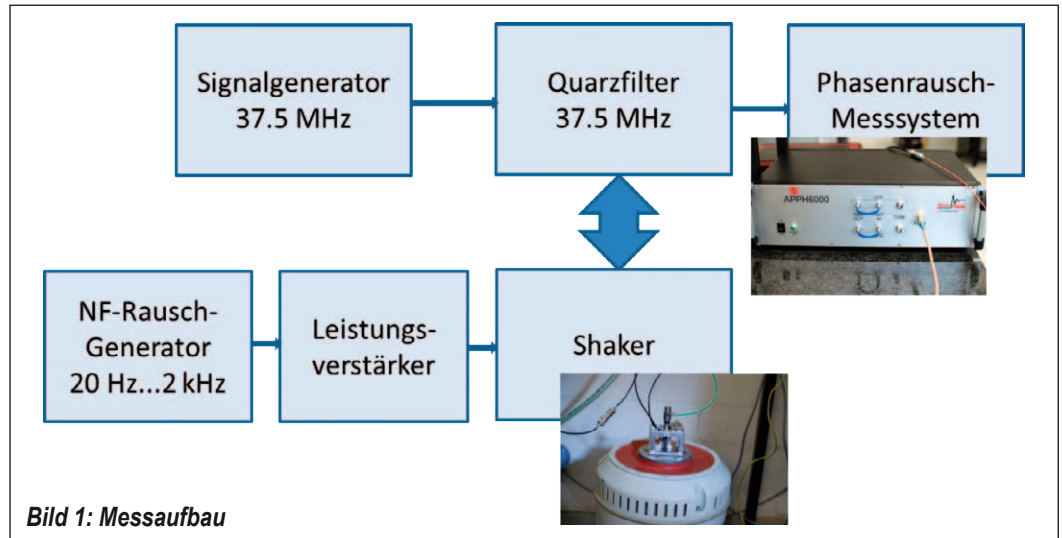


Bild 1: Messaufbau

Auch wenn die Applikationen für Quarzfilter in den letzten Jahrzehnten eher abgenommen haben, gibt es nach wie vor eine ganze Reihe von Anwendungen, bei denen die einzigartigen Eigenschaften von Quarzfiltern wichtig sind. Wenn für Anwendungen im Frequenzbereich von ca. 1 MHz bis 200 MHz schmalbandige Filterung (Bandbreiten von ca. 1 kHz bis 200 kHz) mit guter Frequenzstabilität, geringer Durchlassdämpfung und hoher Flankensteilheit im Übergang vom Durchlassbereich in der Sperrbereich gefordert ist, sind Quarzfilter unersetzbar. Quarzfilter werden heute meist als ZF-Filter für schmalbandige Funkanwendungen eingesetzt, neben dem Amateurfunk sind dies z.B. Satellitenfunk, Richtfunk über lange Distanzen, BOS-Funk (Behörden, Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienste, etc.), Notsignalempfänger, Schmalband-Datenfunk um nur einige Beispiele zu nennen.

Das Thema Vibrationsempfindlichkeit von Quarzoszillatoren – im Englischen auch ‚G-Sensitivity‘ genannt – ist hinlänglich bekannt und wurde auch bereits in einem Fachbeitrag in HF-Praxis im Dezember 2015 beschrieben.

Weniger bekannt ist die Tatsache, dass auch Quarzfilter vibrationsempfindlich sind bzw. dass Signale, die durch ein Quarzfilter geführt werden, unter Vibrations Einfluss einer Verschlechterung der Frequenz- und Phasenstabilität unterliegen. Dies gilt grundsätzlich nicht nur für Quarz-, sondern auch für SAW-Filter oder weitere Filtertypen, die vibrationsempfindliche Elemente enthalten.

Leider haben alle piezoelektrischen Schwinger prinzipiell den Nachteil, dass dieser piezoelektrische Effekt auch invers funktioniert, d.h. Quarze reagieren auf äußeren Stress (schnelle Temperaturänderungen, mechanischer Schock oder Vibration) mit einer leichten Deformation des Kristallgitters. Diese Deformation sorgt für eine Veränderung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von den auf den Kristall wirkenden Kräften. Auf den Kristall wirken auch Kräfte, wenn er einer Beschleunigung ausgesetzt wird – sowohl bei konstanter Beschleunigung wie der Erdbeschleunigung oder in einer Zentrifuge, als auch bei dynamischen Vorgängen wie Schock und Vibration. Bereits der Einfluss der Erdbeschleunigung G kann relative Frequenzänderungen im Bereich 1×10^{-10}



Bild 2: Messobjekt 8-Pol Quarzfilter 37,5 MHz

bis 1×10^{-7} hervorrufen; diese lassen sich mit hochpräzisen und -stabilen Ofenoszillatoren, im Englischen „Ovenized Crystal Oscillator“ (OCXO) genannt, bei der sog. 2G-Tipover-Messung auch erfassen. Die Änderung der Frequenz in Abhängigkeit von einer auf den Quarz wirkenden Beschleunigung wird im Englischen ‚Acceleration Sensitivity‘ oder auch einfach ‚G-Sensitivity‘ genannt und meist in „parts per billion“ (1ppb = 1×10^{-9}) pro g ($1 \text{ g} = 9.81 \text{ m/s}^2$) ausgedrückt. Diese quasi-statischen Frequenzänderungen sind für die allermeisten Anwendungen in der Praxis von keiner oder nur von geringer Bedeutung.

Das Problem

In der Praxis ist allerdings die „dynamische G-Sensitivity“, d.h. die Empfindlichkeit von Quarzen, Quarzoszillatoren und Quarzfiltern auf dynamische

Harald Rudolph
Leiter des
Produktmanagements
KVG Quartz Crystal
Technology
www.kvg.-gmbh.de

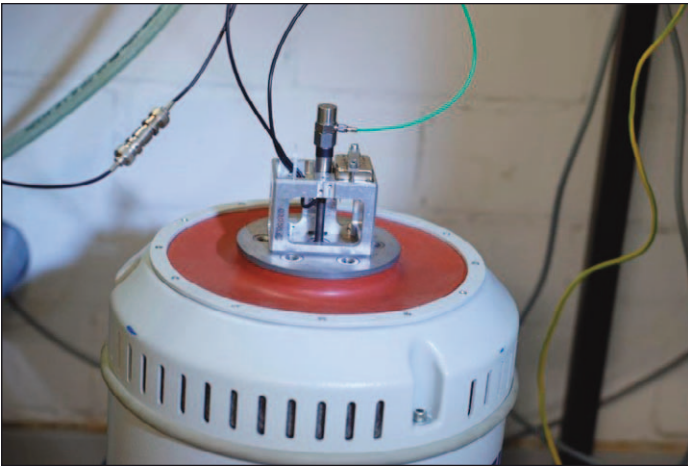


Bild 3: Vibrationstisch (Shaker) mit Beschleunigungs-Aufnehmer und Messobjekt

Beschleunigungsvorgänge, wie sie durch mechanische Schocks, Vibration (Luft-, Wasser- und Körperschall) hervorgerufen werden, von weitaus größerer Bedeutung. Diese Einflüsse verursachen Frequenz- und Phasensprünge, wenn sie diskret auftreten oder erzeugen eine Frequenz- bzw. Phasenmodulation des gefilterten Signals bei periodischer oder rauschähnlicher Anregung, was sich effektiv wie eine Verschlechterung des Phasenrauschens im Frequenzbereich bzw. des Jitters im Zeitbereich auswirkt.

Nachfolgende Messkurven zeigen das originäre Phasenrauschen eines Sinussignals mit einer Frequenz von 37,5 MHz, welches als Referenz für die Messungen dient. Dieses HF-Signal wird durch ein Quarzfilter (Bandpass) mit einer Mittenfrequenz von 37,5 MHz geführt. Dann wird das Quarzfilter einer „Random Noise“-Vibration mit einer Rauschleistungsdichte – (Power Spectral Density, PSD) - von 0,05 g²/Hz im Frequenzband von 20 Hz bis 2 kHz ausgesetzt. Das Signal erfährt dadurch eine Phasenmodulation, im englischen auch „Vibration Induced Phase Noise“ (VIPN) genannt. Im deutschen wird gerne der Begriff „Phasenrauschen unter Vibration“ benutzt. Beide Begriffe sind missverständlich, da die Art der Phasenmodulation vom anregenden Signal abhängt und nur dann rauschähnlich

ist, wenn eine rauschähnliche Vibration auf das Objekt einwirkt. Die auf das Objekt einwirkende Beschleunigung kann aber auch eine diskrete (Vibrations-) Frequenz oder ein Spektrum aus diskreten (Vibrations-) Frequenzen sein.

Das für diese Messung verwendete Quarzfilter ist ein 8-Pol-Filter mit einer Mittenfrequenz von 37,5 MHz und einer -3-dB-Bandbreite von 50 kHz (±25 kHz) mit folgenden Daten.

- Durchlassdämpfung kleiner als 3 dB
- Sperrdämpfung bei ±50 kHz mehr als 70 dB
- Weitabselektion besser als 80 dB.

Wie deutlich zu erkennen ist, verschlechtert sich das Phasenrauschen des Signals nach Übertragung über das Filter derart, dass es für viele Anwendungen nicht mehr akzeptabel ist. Die Verschlechterung rührt von der Vibrationsempfindlichkeit des Quarzfilters, welche wiederum drei Hauptursachen hat:

1. Die im Filter verwendeten Quarze (Quarzscheiben) sind aufgrund des piezoelektrischen Effekts grundsätzlich vibrationsempfindlich.
2. Eine wichtige Rolle spielt auch der mechanische Aufbau des Quarzes. Die Quarzscheibe bildet zusammen mit dem sog. Halter - auch Feder genannt - an welchem sie angekittet ist, ein

Masse-Feder-System mit einer ausgeprägten mechanischen Eigenresonanz bei ca. 1 kHz bis ca. 5 kHz- je nach Durchmesser und Dicke (Masse) der Scheibe und Federsteifigkeit des Halters. Im Bereich dieser Eigenresonanz wird die anregende Vibration noch um ein mehrfaches verstärkt.

3. Der mechanische Aufbau des Filters, d.h. die Montage der Quarze auf der Leiterplatte (PCB) und die Montage der PCB im Gehäuse bilden ebenso mehrere Masse-Feder-System mit ausgeprägten mechanischen Eigenresonanzen im Bereich von einigen hundert Hz bis zu einigen kHz.

Das Problem verschärft sich, wenn gefilterte Signale im MHz-Bereich auf Sendefrequenzen von 800 MHz bis 1,8 GHz oder bei Radaranwendungen noch höher hochmultipliziert werden. Durch diese Multiplizierung kommt es auch zu einer entsprechenden Vergrößerung des Modulationsindex der störenden Seitenbänder, d.h. diese erhöhen sich relativ zum Träger entsprechend. Dies führt z.B. zu einer größeren Bitfehlerrate bei der Datenübertragung oder zu unerwünschten Mischprodukten mit Nachbarkanälen. Eine typische Anwendung bei der dieser Punkt zum Tragen kommt, ist die mobile Mobilfunk-Basisstation, z.B. in Zügen. Aber auch für fest installierte

Basisstationen an Gebäuden oder an Masten, die Erschütterungen durch vorbeifahrende Züge oder LKWs ausgesetzt sind, ist die dynamische G-Sensitivity eine wichtige Charakteristik. Durch die zum Teil sehr hohen Vibrationseinflüsse durch Turbinen oder Rotoren können beispielsweise auch kritische Anwendungen in Hubschrauber oder Flugzeuge betroffen sein, und in besonders starkem Maße trifft dies auf die außerordentlich hohe Vibrationsbelastung durch Strahltriebwerke bei Raumfahrt-Anwendungen zu.

Durch die Vielzahl der verschiedenen Einsatzbereiche werden die auftretenden Vibrationen oder Erschütterungen klassifiziert. Erschütterungen durch Straßenverkehr oder Schienenfahrzeuge erzeugen ein kontinuierliches Spektrum vor allem tiefer Frequenzen. Strahltriebwerke haben auch einen spektralen Anteil höherer Frequenzen und Motoren oder Generatoren sorgen für ein diskretes Spektrum von Einzelfrequenzen. Weiterhin gibt es auch kurzzeitige Stossbelastungen wie sie durch Hagelkörner auf Systeme im Außenbereich auftreten oder durch Schlagwerkzeuge beim Einsatz in Bergwerken oder der Schwerindustrie.

Wenn man die Auswirkungen der Vibrationen vorhersagen möchte, muss man sowohl die Beschleunigungsempfindlichkeit des

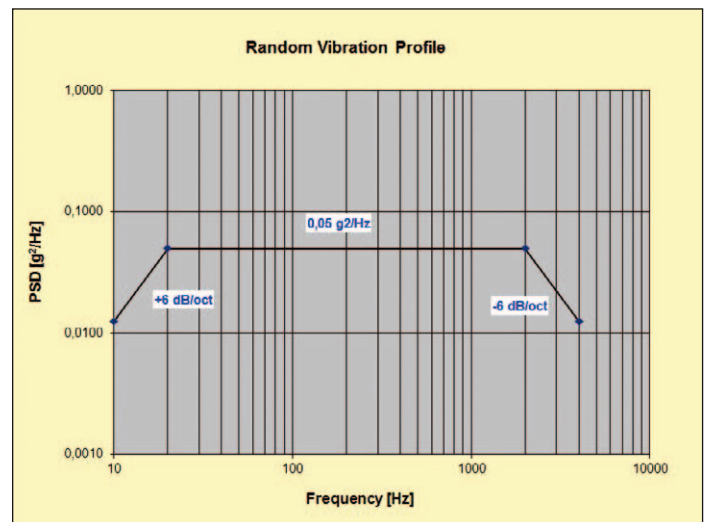


Bild 4: Vibration Profile (PSD als Funktion von f vib)

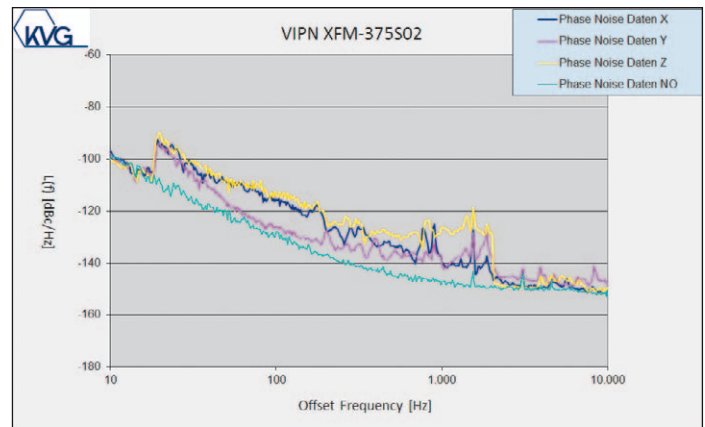
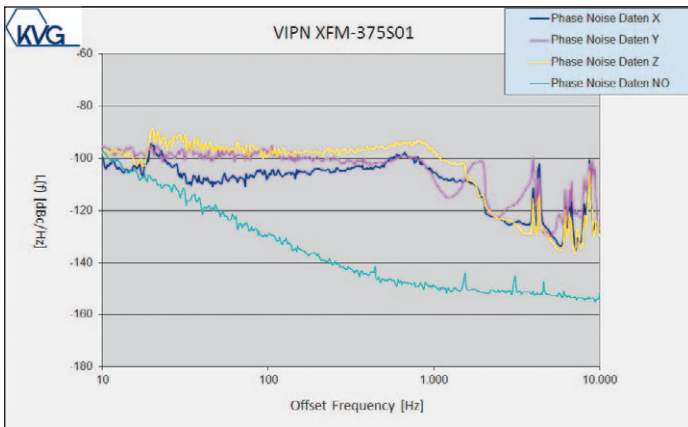


Bild 5: Originäres Phasenrauschen (türkis) und Vibration Induced Phase Noise für nicht-optimiertes Filter

Bild 6: 'Vibration Induced Phase Noise' für optimiertes Filter

Quarzoszillatoren in Abhängigkeit von der Vibrationsfrequenz als auch das anregende Vibrationspektrum. Bei Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder auch militärischen Applikationen sind die Vibrationsspektren in der Regel bekannt und werden teilweise auch explizit in den Oszillatorspezifikationen festgelegt oder auf die entsprechenden MIL-STDs (z.B. 810, Method 514) verwiesen. In der MIL-STD-810 werden zahlreiche – meist militärische – Anwendungen und die zu erwartenden Beschleunigungen aufgeführt, die in einzelnen Frequenzbereichen weit über die bei diesen Messungen benutzten $0,05 \text{ g}^2/\text{Hz}$ hinausgehen.

Eigenschaften und der gleichen Charakteristik, d.h. gleiche Bandbreite, gleiche Sperrdämpfung etc. wie das erste Filter, aber entwickelt und gebaut unter Verwendung von Quarzen mit einer geringeren Vibrationsempfindlichkeit. Daneben wurde die Montage der Quarzblanks dahingehend verbessert, dass die mechanischen Eigenresonanzen ausreichend oberhalb des Frequenzbereichs liegen, in welchem Vibrationen als Körperschall normalerweise auftreten können. Auch die Montage der Quarze im Gehäuse wurde dahingehend optimiert, dass mechanische Eigenresonanzen zu höheren Frequenzen ver-

schoben und gleichzeitig weitgehend bedämpft werden. Wie deutlich zu erkennen ist, wurden – im für diese spezielle Anwendung kritischen Frequenzbereich von 100 Hz bis 2 kHz – Verbesserungen des VIPN von ca. 20 dB erreicht.

in mobilen Funkanwendungen verwendet werden, wo der Empfänger Vibrationen ausgesetzt ist. Es konnte gezeigt werden, dass durch sorgfältige Auslegung des Filterdesigns deutliche Verbesserungen erzielt werden können.

Fazit

Nicht nur Quarzoszillatoren sind vibrationsempfindlich, sondern auch Quarzfilter können - unter dem Einfluss von Vibration oder auch mechanischen Schocks - zu einer Beeinträchtigung der zu übertragenden Signalqualität beitragen. Dies ist besonders relevant, wenn Quarzfilter

Über den Autor:

Harald Rudolph ist Leiter des Produktmanagements bei der KVG Quartz Crystal Technology GmbH, einem der technologisch führenden Hersteller im Bereich präzise Quarze, hochstabile Quarzoszillatoren mit sehr geringem Phasenrauschen und kleiner G-Sensitivity und Quarzfilter mit besonderen Anforderungen. ◀

Problemlösung

Mittlerweile sind aber für mehrere Anwendungen, z.B. in der Messtechnik, die traditionell das beste Phasenrauschen benötigen, die Anforderungen derart hoch, dass schon die vom Gerät selbst erzeugten Vibrationen - z.B. eingebaute Lüfter, oder der normale Körperschall - im Labor oder Büro ausreichen, um das originär sehr gute Phasenrauschen des Nutzsignals nicht mehr nutzen zu können, da es vom VIPN überlagert wird. Unter Verwendung von Quarzen, die auf minimale G-Sensitivity optimiert sind, lassen sich heute Quarzfilter bauen, deren Empfindlichkeit unter 1 ppb/g liegt.

Bild 6 zeigt Messergebnisse eines Filters mit den gleichen

Literaturverzeichnis

- [1] John R. Vig, „Quartz Crystal Resonators and Oscillators For Frequency Control and Timing Applications - A Tutorial“
US Army Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Fort Monmouth, NJ, USA, February 2005.
- [2] Raymond L. Filler, „The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: A Review“
IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 35, NO. 3, MAY 1988.
- [3] R.C. Smythe, „Acceleration Effects in Crystal Filters – A Tutorial“,
IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONIC; FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL: 39; NO: 3; MAY 1992
- [4] R.L. Clark, McCoy Electronics, M.K. Yurtseven, Pennsylvania State University at Harrisburg
“SPURIOUS SIGNALS INDUCED BY VIBRATION OF CRYSTAL FILTERS”; 1988 ULTRASONIC SYMPOSIUM
- [5] Raymond L. Filler, John A. Kosinski and John R. Vig
“FURTHER STUDIES ON THE ACCELERATION SENSITIVITY OF QUARTZ RESONATORS”
US Army Electronics Technology & Devices Laboratory (ERADCOM), Fort Monmouth, New Jersey 07703

Theoretische Grundlagen:

Ausgehend von der allgemeinen Beschreibung eines nichtidealen, rauschenden Signals, wobei man zwischen Amplituden- und Phasenrauschen unterscheidet:

$$u(t) = (A_0 + \varepsilon(t)) \cdot \sin[2\pi f_0 t + \phi(t)] \quad (1)$$

mit: $\phi(t) = \phi_0 + \Delta\phi(t)$ Phasenrauschen (2)

$$\omega(t) = 2\pi \cdot f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Unter der Annahme dass eine Beschleunigung auf das Quarzfilter wirkt, wird sich die Mittenfrequenz des Filters leicht verschieben. Bei der Betrachtung im Durchlassbereich des Filters ist die Änderung der Amplitude sehr viel kleiner als die Änderung der Phase, sodass die Phasenänderung von sehr viel größerem Interesse ist.

Die Gruppenlaufzeit τ_g des Filters repräsentiert die Änderung der Phase bei der Referenzfrequenz:

$$\tau_g = \frac{d\phi}{df \cdot 2\pi} = \frac{d\phi}{d\omega} \quad \Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{d\phi}{d\omega} \cdot \Delta F = 2\pi \tau_g \Delta F$$

Eine Beschleunigung verschiebt die Frequenz jedes Resonators (Quarzes) um:

$$\Delta f_c = f_0 \cdot (\vec{\Gamma} \otimes \vec{A})$$

Mit f_0 gleich der Quarzfrequenz ohne Einfluss von zusätzlicher externer Beschleunigung;

Γ ist der Beschleunigungs-Empfindlichkeits-Vektor des Quarzes;

A ist der Beschleunigungsvektor und Δf_c ist die Änderung der Quarzfrequenz;

$(\vec{\Gamma} \otimes \vec{A})$ steht für das Skalarprodukt der beiden Vektoren.

Die durch die Beschleunigung erzeugte Phasenverschiebung lässt sich wie folgt darstellen:

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \tau_g \cdot F_0 \cdot (\vec{\Gamma}_{eff} \otimes \vec{A})$$

Unter der Annahme von sehr kleinen Phasenänderungen (<0,1 rad) ist das dadurch erzeugte Phasenrauschen bei sinusförmiger Vibration:

$$L(f) = \left[\pi \tau_g F_0 \cdot (\vec{\Gamma}_{eff} \otimes \vec{A}_p(f)) \right]^2 \quad \text{oder in dB ausgedrückt:}$$

$$L_{dB}(f) = 20 \cdot \log \left[\pi \tau_g F_0 \cdot (\vec{\Gamma}_{eff} \otimes \vec{A}_p(f)) \right]$$

Im Falle der Anregung mit rauschförmiger Vibration (Random Noise Vibration) ergibt sich:

$$L_{dB}(f) = 20 \cdot \log \left[\pi \tau_g F_0 \cdot (\vec{\Gamma}_{eff} \otimes \vec{u}) \cdot \sqrt{2 \cdot G(f)} \right]$$

mit $G(f)$ = Power Spectral Density in $[g^2/Hz]$

Im Unterschied zu Quarzoszillatoren ist das durch die Vibration erzeugte Phasenrauschen theoretisch nicht von der Vibrationsfrequenz abhängig; dafür geht die Gruppenlaufzeit des Filters in die Berechnung mit ein. Das heißt, theoretisch

müsste bei einer konstanten Gruppenlaufzeit und einer konstanten PSD auch das dadurch erzeugte Phasenrauschen konstant sein, was sich in der Praxis bei den Messungen nicht so gezeigt hat. Die Ursache für diese Abweichung muss noch

untersucht werden, möglicherweise ist die Annahme einer max. Phasenänderung von nur 0,1 rad bei der gewählten PSD von 0,05 g^2/Hz in Kombination mit mechanischen Resonanzen nicht mehr zutreffend, sodass auch Bessel-Terme höherer

Ordnung berücksichtigt werden müssten. Bei der Herleitung einiger Formeln oben, wurden Zwischenschritte übersprungen, die aber bei Interesse in den im Literaturverzeichnis aufgeführten Papers nachgelesen werden können.