

# ERSCHÜTTERUNGSEINWIRKUNG BEI PRÄZISIONSGERÄTEN: GRENZWERTEINHALTUNG UNTER DEM ASPEKT DER KORREKTEN SIGNALANALYSE

*DI Benedikt Tappauf<sup>1</sup>, DI Marianne Legenstein<sup>1</sup>, Marlene Ofner, Mag. Karoline Alten<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Silke Appel<sup>3</sup>, Dr. Alexander Tributsch<sup>3</sup>, Dr. Daniel Gsell<sup>4</sup>, Dr. Marcel Birchmeier<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Benedikt Tappauf GmbH, Graz, office@erschuetterungsmessung.at

<sup>2</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, karoline.alten@ait.ac.at

<sup>3</sup> GuD Geotechnik und Dynamik Consult, appel@gudconsult.de

<sup>4</sup> ZC ZIEGLER CONSULTANTS AG, Zuerich, gsell@zcag.ch

## ABSTRACT

Standardised vibration criteria (VC) for sensitive equipment and machinery exist since the 1980s and describe the limits of vibration velocity for a range of sensitivity classes from A-G. The limits refer to Max-Hold values in one-third octave bands and equipment manufacturers need to define the respective limits at the site of their machines to ensure unhampered operations. When engineers are asked to determine the prevailing vibration exposure at existing locations or future sites of equipment such as microscopes, tomography or appliances in the semiconductor industry, divergent methods of data analysis can lead to substantially different site classifications if the parameters of the data processing steps are not defined by the manufacturer or set down in (international) standards. This paper shows how a collection of 15 sample records acquired in typical laboratory environments is processed by four different consultants – using their typical analysis routines – and how the resulting Max-Hold spectra apparently conform to very different VC lines. This can have considerable effects on the subsequent foundation planning and the resulting costs of insulating the footings or foundations accordingly. The authors present recommendations regarding the filtering techniques for third-octave band computations as well as the time constants to use when computing RMS-values within each frequency band.

*Schlagwörter: Erschütterungsmessung, Labor, VC-Linien, Baudynamik*

## 1. EINFÜHRUNG

Die Anforderungen an die zulässigen Erschütterungen von Präzisionsanlagen oder empfindlichen Analysegeräten können Größenordnungen unter der menschlichen Wahrnehmungsgrenze liegen. Sie ergeben sich aus der Präzisionsanforderung bzw. der erforderlichen Auflösung. Am häufigsten führen Erschütterungen an Geräten für Feinmesstechnik, Mikroskopie, Chipfertigung, Massenspektrometern sowie bei laseroptischen Anwendungen zu Beeinträchtigungen der Betriebsqualität.

In der Praxis sind Anhaltswerte für zulässige Erschütterungen nur selten in eindeutiger und vollständiger Form vom Gerätehersteller vorhanden. Es werden stattdessen vereinfachte und sehr grobe Angaben gemacht, die historisch erwachsen und häufig auf der sicheren Seite liegen. Oft werden am Aufstellort einer funktionierenden Maschine Messungen durchgeführt und diese als Grenzwerte definiert. So entstehen jedoch eher konservative Werte, die zum Teil an anderen Orten gar nicht eingehalten werden können. Werden solche Messungen zum Beispiel auf einer Bodenplatte durchgeführt, werden die horizontalen Schwingungen typischerweise sehr klein sein. Werden diese dann als Grenzwert definiert – obwohl derartig niedrige Schwingungsniveaus nicht erforderlich sind –

ist es schwierig, diese in der Praxis, wenn das Gerät zum Beispiel auf einer Geschosdecke installiert wird, einzuhalten.

Die Richtwerte können als Schwingungsspektren in Form von Amplitudenspektren, PSD-Spektren (Power Spektrum Density) oder Terzspektren des Weges, der Schwinggeschwindigkeit oder der Schwingbeschleunigung angegeben sein. Nicht immer geht aus den Angaben klar hervor, wie die Grenzwerte zu interpretieren sind. Die Mess- und Auswerteprozedur muss bekannt sein, um aus den Messwerten geeignete Beurteilungsspektren zu bilden und den gegebenen Grenzwerten gegenüberzustellen. Mittelungsparameter der Einzelspektren (lineare oder energetische Mittelung, Peak-Hold Werte, Fenstergröße der FFT-Analyse) können die Ergebnisse um 300 % bis 500 % beeinflussen. [1]

**Tabelle 1.** Richtwerte, Zusammengestellt aus [1] [2] [3] [4]

Kriterium	Schwingungspegel RMS- Terzspektren in $\mu\text{m/s}$	Typische Nutzungen	Strukturgröße/ Genauigkeit
„ISO-OPSAAL“	100 ((8...80) Hz) (*)	menschliche Fühlschwelle, für empfindliche Schlafbereiche, für Operationssäle, für Mikroskope mit 100-facher Vergrößerung	30 $\mu\text{m}$
VC-A	50 ((8...80) Hz) (*)	unter fast allen Umständen geeignet für optische Mikroskope mit bis zu 400-facher Vergrößerung	8 $\mu\text{m}$
VC-B	25 ((8...80) Hz) (*)	ein geeigneter Standard für Inspektionsgeräte, allgemeine anspruchsvolle Labore, Lithografiegeräte (inklusive Stepper) bis zu 3 $\mu\text{m}$ Strukturbreite	3 $\mu\text{m}$
VC-C	12,5 ((1...80) Hz)	ein geeigneter Standard für Mikroskope mit bis zu 1000-facher Vergrößerung, ein guter Standard für die meisten Lithografie- und Inspektionsgeräte bis hinunter zu 1 $\mu\text{m}$ Strukturbreite	1 $\mu\text{m}$
VC-D	6,25 ((1...80) Hz)	unter fast allen Umständen passend für sehr hochwertige Elektronenmikroskope (REM, TEM), E-Beam-Systeme usw., die bis an ihre Leistungsgrenze eingesetzt werden	0,3 $\mu\text{m}$
VC-E	3,1 ((1...80) Hz)	Die Einhaltung dieses Kriteriums ist sehr schwierig; es kann nur in wenigen Fällen eingehalten werden, vorzugsweise auf nicht unterkellerten Bodenplatten; erforderlich für Geräte höchster Präzision.	< 0,1 $\mu\text{m}$
VC-F	1,6 ((1...80) Hz)	Kriterium für extrem ruhige Forschungsräume, sehr schwierig zu erreichen; dieses Kriterium ist nur zur Charakterisierung, nicht jedoch als Auslegungskriterium geeignet.	–
VC-G	0,8 ((1...80) Hz)	Kriterium für extrem ruhige Forschungsräume, sehr schwierig zu erreichen; dieses Kriterium ist nur zur Charakterisierung, nicht jedoch als Auslegungskriterium geeignet.	–
Nano-D	((1...5) / (20...100) Hz) 1,6 / 6,4	sehr schwierig einzuhaltendes Kriterium für REM der Nanotechnik für Auflösungen bis 1 nm, Obergeschosse mit hohen Anforderungen an die dynamische Steifigkeit und Eigenfrequenz	1 nm
Nano-E	((1...5) / (20...100) Hz) 0,8 / 3,2	sehr schwierig einzuhaltendes Kriterium für REM der Nanotechnik für Auflösungen bis 1 nm, Obergeschosse mit hohen Anforderungen an die dynamische Steifigkeit und Eigenfrequenz	(0,2...0,5) nm
Nano-EF	((1...5) / (20...100) Hz) 0,53 / 2,1	strengstes Kriterium für REM und TEM der Nanotechnik für Auflösungen im Sub-Ångströmbereich (10 Å = 1 nm), nur unter sehr speziellen Bedingungen und besonderen Baukonstruktionen einhaltbar	< 0,1 nm

(\* höhere Werte zugelassen für (4...8) Hz)

Das Institute of Environmental Sciences and Technology (IEST) ist der Herausgeber einer Richtlinie mit Empfehlungen zur Ermittlung von Schwingungen in Fertigungsanlagen für Mikroelektronik [2]. Die darin empfohlenen Messberichtvorlagen tragen jenem Umstand Rechnung, dass Vibrationen in Gebäuden sowohl transienter, periodischer als auch zufälliger Natur sein können. Je nach Bewegungsbild können unterschiedliche Auswertemethoden die zweckmäßigste Aussage betreffend die zulässigen Richtwerte liefern. Es wird daher betont, dass die Vergleichbarkeit der Untersuchungen nur durch eine einheitliche Vorgehensweise in der Dokumentation der Auswertung sichergestellt werden kann.

Von Colin G. Gordon wurden in den 1980er Jahren Schwingungskriterien (Vibration Criteria, VC) entwickelt, die eine Klassifizierung erschütterungssensibler Geräte bei unterschiedlicher Produktionsgenauigkeit bzw. Strukturgröße der Produkte erlauben. Die VC-Linien sind international weit verbreitet und in zahlreichen Publikationen (leicht modifiziert und teilweise mit unterhaltsamen Übersetzungsfehlern) veröffentlicht. Beispielsweise werden diese Richtwerte in der VDI 2038 – ergänzt mit den sogenannten „Nano-Linien“, die Gerätegenauigkeiten bis unter 1 nm berücksichtigen – angegeben. Sie definieren grundsätzlich Grenzkurven von „Max Hold Terz-Schwingungsgeschwindigkeitsspektren“. [3]

Die Richtwerte der VC-Linien sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei den Linien VC-A und -B werden unter 8 Hz weniger strenge Werte angegeben, da die meisten Gerätschaften keine internen Eigenfrequenzen in diesem Bereich besitzen, weswegen externe Störungen zu sehr kleinen Relativbewegungen im Gerät führen. In der Regel sind diese internen Relativbewegungen maßgebender als Absolutbewegungen des ganzen Geräts. Auf der anderen Seite ist es bei Geräten mit internen Isolierungen sehr wahrscheinlich, dass Resonanzfrequenzen unter 8 Hz liegen, weswegen für derartige Geräte strengere Angaben auch in diesen Frequenzen gemacht werden. Deswegen werden bei den Linien unter VC-C konstante Schwingungsgeschwindigkeiten im Frequenzbereich zwischen 1 und 80 Hz angegeben. Diese Überlegungen flossen auch in die Tabelle 1 angegebenen Nano-Linien für höheren Genauigkeiten bzw. Strukturgrößen kleiner 0,1 µm (< 100 nm) ein [4]

## 2. GRUNDLAGEN FÜR DIE SIGNALVERARBEITUNG

Folgend werden Grundlagen für die Signalverarbeitung, auf die in Kapitel 3 verwiesen wird, erläutert.

### 2.1. Effektivwertberechnung – RMS

Der Begriff "RMS-Wert" (Root Mean Square) ist ein Maß für die Effektivleistung eines periodischen Signals. Um den RMS-Wert zu berechnen, werden die Werte des Signal quadriert, der Durchschnitt berechnet und dann die Wurzel gezogen. (1).

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1)$$

### 2.2. Zeitbewertung – Running RMS

Durch die Berechnung des laufenden RMS-Werts eines nicht-periodischen Signals kann die Veränderung der Amplitude im Signal über die Zeit hinweg verfolgt werden. Bei der Berechnung der Running RMS wird das Signal in kleine Zeitfenster oder Segmente unterteilt. Innerhalb jedes Zeitfensters wird der RMS-Wert berechnet, indem die Quadratsumme der Werte mit einer Gewichtungsfunktion multipliziert wird, der Durchschnitt genommen und die Quadratwurzel gezogen wird. Diese Schritte werden kontinuierlich wiederholt, während das Zeitfenster über das Signal verschoben wird. In der Praxis kommen dabei zwei Gewichtungsfunktionen zur Anwendung. Während beim Rechteckfenster alle Werte innerhalb jedes Fensters mit 1 gewichtet werden, erfolgt die Gewichtung bei der exponentiellen Mittelung nach Gleichung (2). Die Auswahl der Zeitkonstante T hat dabei großen Einfluss auf die Ergebnisse.

$$v_{rms}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{t_0} v(t)^2 e^{\frac{t-t_0}{T}} dt} \quad (2)$$

### 2.3. Fourier Transformation

Die Fourier-Analyse basiert auf dem Grundgedanken, dass eine periodische Funktion als eine Summe von harmonischen Schwingungen – charakterisiert durch ihre Frequenzen, Amplituden und Phasen – dargestellt werden kann. Die diskrete Fourier-Transformation (DFT) zerlegt nach Gleichung (3) eine

diskrete Funktion (bzw. ein Messsignal) in ihre Sinus- und Kosinus-Komponenten. Dabei wird ein Signal von N diskreten Datenpunkten in eine Sequenz von N komplexen Zahlen, die als Frequenzspektrum bezeichnet werden, transformiert.

$$X(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i2\pi nm/N} \quad (3)$$

X(m) stellt dabei den m-ten Fourier-Term dar, es handelt sich um eine komplexe Zahl. Der Index m beginnt (gleich wie der Index n der Zahlreihe) bei 0 und endet bei N-1; es existieren N Fourier-Terme X(0), X(1), X(2) .. bis X(N-1).

Zur Berechnung des Realteils des n-ten Fourierterms wird das zu untersuchende Signal mit dem n-ten Cosinus multipliziert und aufsummiert. Die Berechnung des Imaginärteils erfolgt nach der gleichen Weise unter Verwendung des n-ten Sinus. Der sich ergebende Wert wird durch die Anzahl der Stützstellen dividiert. Im Frequenzspektrum wird meist (anstelle von Real und Imaginärteil) nur der Betrag der komplexen Zahl dargestellt.

Die Schwingdauer des 1. Fourierterms entspricht der Länge des Signals, d.h. die tiefste darstellbare Frequenz ist somit der Kehrwert der Signaldauer. Bei einer Signaldauer von z.B. 1 Sekunde entspricht die tiefste darstellbare Frequenz somit 1 Hz. Jeder höhere Fourierterm gibt ein Vielfaches der 1. Frequenz an, d.h. das Amplitudenspektrum besitzt eine Frequenzauflösung von einer Stützstelle je Hz. Für eine sehr feine Frequenzanalyse (z. B. ein Frequenzintervall von 0.1 Hz), muss das Signal demnach eine Signallänge von mindestens 10 Sekunden aufweisen. Konstante Anteile im Signal werden mit dem 0. Fourierterm abgebildet.

### 2.3.1. Fast Fourier Transformation (FFT)

Im Gegensatz zur "langsamen" DFT, die einen Rechenaufwand proportional ( $N^2$ ) hat, ermöglicht die FFT die Berechnung der DFT in ( $N \log N$ ) Operationen, wodurch sie – besonders bei langen Signalen – deutlich schneller ist. Der bekannteste FFT-Algorithmus von Cooley und Tukey [5] basiert auf der Idee der rekursiven Zerlegung des Transformationsproblems in kleinere Teilprobleme und Kombination der Ergebnisse. Dieser schnelle Algorithmus, auch als Radix-2 bekannt, setzt aus Gründen der Recheneffizienz eine Sampleanzahl N die eine Potenz von 2 ist voraus  $N=2^n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Entspricht die zu analysierende Signallänge bzw. die Anzahl der Stützstellen nicht exakt einer Zweierpotenz, muss das Signal entweder gekürzt werden (Engl.: Truncation) oder künstlich – durch Hinzufügen von Nullen am Ende des Signals (Engl.: Zero-padding) – erweitert werden um exakt  $2^n$  Stützstellen zu erhalten.

Das Hinzufügen von Nullen (die Amplituden müssen in diesem Fall korrigiert werden) hat zwei wichtige Vorteile im Vergleich zum Kürzen:

1. Durch die künstliche Verlängerung des Signals wird das Frequenzintervall ( $1/T$ ) kleiner, was zu einer detaillierteren Frequenzanalyse führt.
2. Im Gegensatz zum Kürzen gehen beim Hinzufügen von Nullen keine wichtigen Signalabschnitte verloren, die unter Umständen von großer Bedeutung sein können.

### 2.3.2. Leakage & Fenstertechnik

Die DFT / FFT geht davon aus, dass das Eingangssignal periodisch ist und sich unendlich wiederholt. Werden Signale analysiert, die Frequenzkomponenten enthalten, die kein exaktes Vielfaches der DFT-Frequenzauflösung sind, existieren im Frequenzspektrum keine entsprechenden Stützstellen, weswegen die Energie der jeweiligen Frequenzkomponente bei der Analyse in benachbarte Frequenzbereiche "ausläuft". Ein gängiger Ansatz zur Verminderung dieses Effektes besteht darin, Fensterfunktionen wie das Hanning-Fenster anzuwenden, um das Signal allmählich an den Rändern gegen Null abzuschwächen. Dadurch werden abrupte Übergänge im Signal reduziert und der Leakage-Effekt minimiert. Dabei werden allerdings auch die auftretenden Amplituden verringert. Während dies für eine Sinusschwingung mittels Faktor  $\text{SQRT}(8/3)$  korrigiert werden kann, ist die Amplitudenverfälschung bei impulshaltigen bzw. transienten Signalen - je nachdem, ob die Maximalwerte im Bereich der nicht verzerrten Fenstermitte oder am stark verzerrten Fensterrand liegen nicht reversibel.

### 2.3.3. Amplituden oder Terzbandspektrum

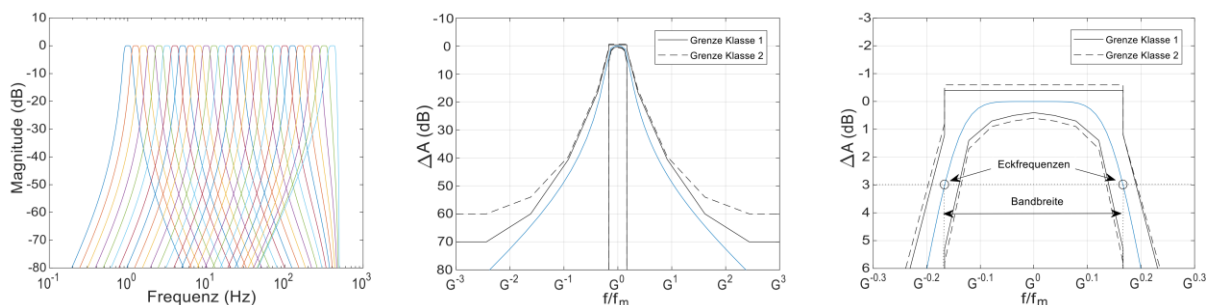
Bei der Darstellung als Terzbandspektrum werden die spektralen Beiträge des Amplitudenspektrums für jede Terz energetisch addiert. Da die energetische Summe des Fourier-Spektrums dem RMS-Wert des Signals entspricht, stellen die Terzbandspektren ebenso Mittelwerte des ganzen Signals dar. Während dies bei stationären Signalen keine Auswirkungen hat, werden bei transienten Ereignissen die Terzbandspektren mit zunehmender Mittelungsdauer bzw. Integrationszeit immer kleiner.

## 2.4. Frequenzfilterung mit IIR Filtern

Durch Anwendung von IIR Filtern kann ein Signal im Zeitbereich einer Frequenzfilterung unterzogen werden. Bei einem Filter 2. Ordnung berechnet sich eine Stützstelle aus 3 Eingangs-Stützstellen des ursprünglichen und 2 Ausgangs-Stützstellen des bereits gefilterten Signals nach Gleichung 4.

$$y_n = a_3 * v_{n-2} + a_2 * v_{n-1} + a_1 * v_n - b_2 * y_{n-2} - b_1 * y_{n-1} = y_n \quad (4)$$

Da am Beginn des Signals (n=0) die Stützstellen (n-1) und (n-2) fehlen, kann es im gefilterten Zeitsignal zu unerwünschtem Einschwingen kommen, welches bei stabilen Filtern mit der Zeit wieder abklingt. Ähnliche Effekte können auch bei extrem sprunghaftem Verlauf des ungefilterten Zeitsignals auftreten. Nur durch Kontrolle kann sichergestellt werden, dass diese Effekte vernachlässigbar sind. Entgegen einem perfekten Filter reduzieren IIR Filter die Signalanteile in der Eckfrequenz um 3dB und fallen dann mit zunehmender Ordnung steiler ab. Zudem ergeben sich durch die Filterungen frequenzabhängige Phasenverschiebungen, welche das im Terzband gefilterte Zeitsignal verfälschen können. Um ein für jedes Terzband gefiltertes Zeitsignal zu erhalten, wird eine Reihe von unterschiedlichen Filtern benötigt, eine sogenannte Filterbank. Abbildung 1a zeigt die Übertragungsfunktionen der üblicherweise verwendeten Filterbank für Terzbänder mit Bandmittenfrequenzen 1-400 Hz. Dabei werden die Filter so gewählt, dass deren Übertragungsfunktionen innerhalb der Akzeptanzgrenzen der Klasse 1 gemäß DIN EN 61260-1 liegen (siehe Abbildung 1b). Es werden in der Regel Butterworth-IIR-Filter 6.-8. Ordnung verwendet. Die Übertragungsfunktion eines solchen Filters weist bei den Eckfrequenzen per Definition eine Reduktion der Amplituden um 3 dB auf (Abbildung 1c). Ohne vertiefte Kenntnisse der digitalen Signalverarbeitung ist bei der Anwendung von Filtern also Vorsicht geboten. Es empfiehlt sich einerseits eine visuelle Kontrolle der gefilterten Signale wie auch eine Sensitivitätsbetrachtung bezüglich der gewählten Filterparameter.



**Abbildung 1.** a.) Übertragungsfunktionen für Terzbänder 1-400 Hz (Filterbank)

- b.) Beispiel für die Übertragungsfunktion (relative Dämpfung als Funktion von  $f/f_m$ ) mit Akzeptanzgrenzen nach DIN EN 61260-1 c.) Detail der Übertragungsfunktion (relative Dämpfung als Funktion von  $f/f_m$ ) mit Eckfrequenzen und Bandbreite [6]

## 3. VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER AUSWERTEVERFAHREN

Während die VC-Richtwerte an sich klar definiert sind, geben Publikationen keine eindeutigen Angaben für eine vereinheitlichte Form der Berechnung der Max-Hold Spektren. Sowohl die Art der Terzband-Filterung (FFT oder Zeitbereichsfilter) als auch – viel entscheidender für das Endergebnis – die Wahl der RMS-Integrationszeit müssen mangels Angaben von jedem Ingenieur selbst gewählt werden. Diese Thematik wird bereits in einigen Nachfolgepublikationen [7, 8], die gewissen Überarbeitungsbedarf in der Definition und Anwendung der VC-Linien ansprechen, beschrieben. Die

VC-Linien definieren Grenzkurven von RMS- bzw. Effektivwerten der Terz-Schwinggeschwindigkeiten. Zweifelsohne müssen für transiente Einwirkungen sogenannte Max-Hold Spektren verwendet werden. Der Austausch mit Kollegen zeigt, dass in der Praxis unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der zum Vergleich mit den Richtwerten der VC-Linien benötigten RMS-Spektren verfolgt werden. Dabei können große Unterschiede, welche zu unterschiedlichen Klassifizierungen der Standorte führen können, auftreten. Folgend werden die Grundlagen und unterschiedliche Berechnungsansätze beschrieben.

### **3.1. Methode mittels Running FFT**

Bei der Berechnung der Running FFT wird das Signal in kleine Zeitfenster oder Segmente (z.B. 1, 4 oder 30 Sekunden) unterteilt. Für jedes Zeitfenster wird in weiterer Folge mit Hilfe der DFT oder FFT ein Terzbandspektrum (mean) bestimmt. Dieser Vorgang wird kontinuierlich wiederholt, während das Zeitfenster über das Signal verschoben wird und die maximalen Amplituden je Terzband gespeichert werden (Max-Hold-Spektrum). Während diese Methode aufgrund der kurzen Signalausschnitte sehr recheneffizient ist, ist – insbesondere bei sehr kleinen Zeitfenstern – die Frequenzauflösung äußerst gering, was in der Regel zu ausgeprägten Leakage-Effekten führt. Die Anwendung eines Hanning-Fensters für jedes einzelne Zeitsegment mindert diesen Effekt, allerdings kommt es dabei zu einer Abminderung der Amplitude. Während diese Verfälschung, wie in Kapitel 2 beschrieben, bei Sinusschwingungen durch Multiplikation mit  $\text{SQRT}(8/3)$  korrigiert werden kann, ist dies für impulsartige bzw. transiente Schwingungen nicht exakt möglich.

### **3.2. FFT-Filter und Running RMS**

Um das Leakage Problem zu lösen, wird bei dieser Variante statt eine kleinen Zeitfenster das gesamte Signal mit Hilfe der FFT in den Frequenzbereich transformiert. Bei üblichen Signallängen von 60 Sekunden ergibt sich eine sehr hohe Frequenzauflösung von 0,016 Hz/Stützstelle. Für jedes Terzband erfolgt in einem 2. Schritt folgende Berechnung. Alle Stützstellen des Frequenzspektrums die nicht innerhalb der betrachteten Terz liegen, werden auf 0 gesetzt und anschließend wird mittels inverser DFT oder FFT wieder in den Zeitbereich transformiert (FFT-Filterung). Das Ergebnis ist nun ein Zeitsignal, welches nur die Frequenzanteile der betrachteten Terz beinhaltet. Da die Richtwerte der VC-Linien für RMS-Werte gelten, werden aus den gefilterten Zeitsignalen in einem weiteren Schritt mit der Methode „Running RMS“ die RMS-Werte für die gewünschte Zeitintegration (z.B. 1, 4 oder 30 Sekunden ermittelt). Dies kann wie in Kapitel 2 beschrieben mittels exponentieller Glättung oder eines Rechteckfenster erfolgen.

### **3.3. IIR Filter und Running RMS**

Wesentlich weniger Rechenleistung wird benötigt, wenn statt der FFT Filterung mit IIR Filtern gearbeitet wird um ein Zeitsignal in die erwünschten Terzen zu zerlegen. Die Einschränkungen wie Filtereinschwingen und Amplitudenreduktion bei den Eck-Frequenzen sind in Kapitel 2 beschrieben. Auch bei dieser Methode erfolgte die gewünschte Zeitintegration mit gleitendem Rechteckfenster oder exponentieller Glättung.

## **4. VERGLEICHBERECHNUNG**

Um die unterschiedlichen Methoden zu vergleichen, wurden für zahlreiche Datensätze von mehreren Ingenieuren – nach den in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren Max-Hold RMS-Terzbandspektren ermittelt. Folgend werden die Ergebnisse für 3 Datensätze exemplarisch diskutiert.

### **4.1. Beispiel 1: Straßenbahnmissionen im OP-Saal**

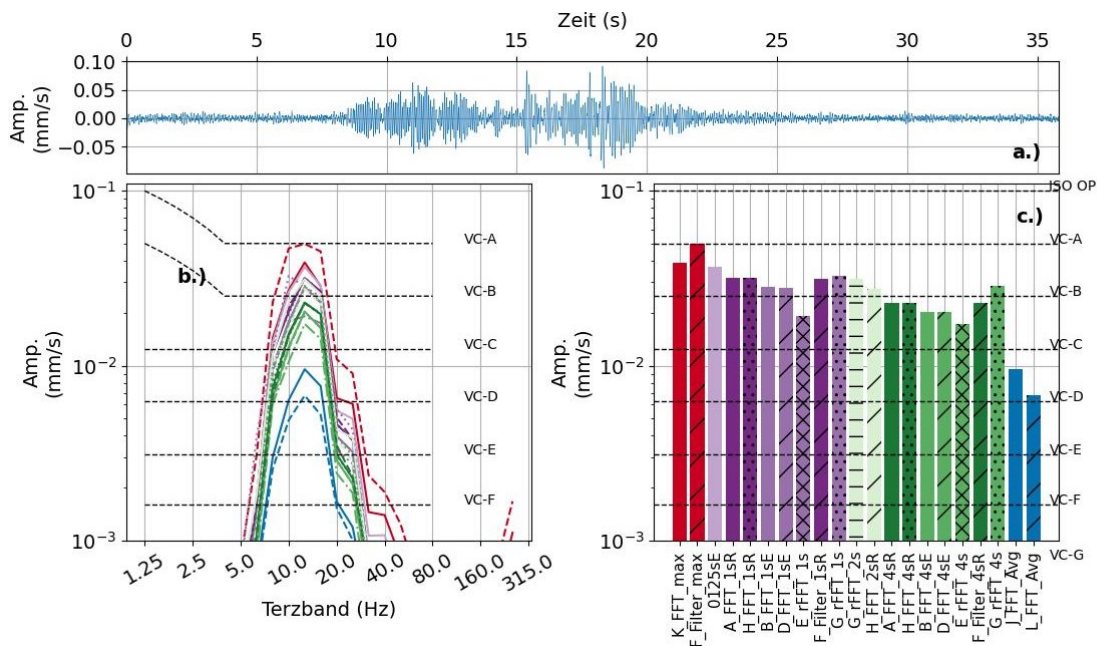
Abbildung 2a zeigt das Signal einer Straßenbahn (nur vertikale Achse), gemessen auf einer Geschoßdecke im OP-Saal. Abbildung 2b zeigt die Ergebnisse der Max-Hold Spektren aller Auswerteverfahren, in Abbildung 2c sind die Maximalwerte der Terzen dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Ergebnisse – im Wesentlichen verursacht durch unterschiedliche Integrationszeiten – einer großen Streuung unterliegen, die Bewertungen reichen von VC-C bis ISO OP-Saal.

**Tabelle 2.** Getestete Rechenverfahren für Max Hold Spektren.

Name	Methode-Frequenzfilterung	Methode-Zeitintegration	Integrations-zeiten
E	Running FFT 75% Überlappung, Hanning Window	RMS	1s, 4s
G	Running FFT 75% Überlappung, Hanning Window, Korrektur $\sqrt{8/3}$	RMS	1s, 4s
A H	FFT-Filter	Running RMS Rechteck	1s, 4s 1s, 2s, 4s
B	FFT-Filter	Running RMS exponentiell	1s, 4s
J; L	FFT-Filter	RMS	30s
K	FFT-Filter	Max - Max	-
D	FFT-Filter	Running RMS exponentiell	0.125s, 1s, 4s,
F	Filterbank 3. Ordnung	Max - Max Running RMS Rechteck	- 1s, 4s
I	4 unterschiedliche Filter 2. Ordnung	Running RMS Rechteck	1s, 4s

Der wesentliche Parameter zur Vereinheitlichung der Ergebnisse ist die Festlegung einer einheitlichen Integrationszeit. Mit 4 Sekunden Mittelungsdauer kommen praktisch alle Verfahren zur gleichen Einschätzung (VC-B); mit 1 Sekunde ist die Einschätzung VC-A, also eine Klasse schlechter.

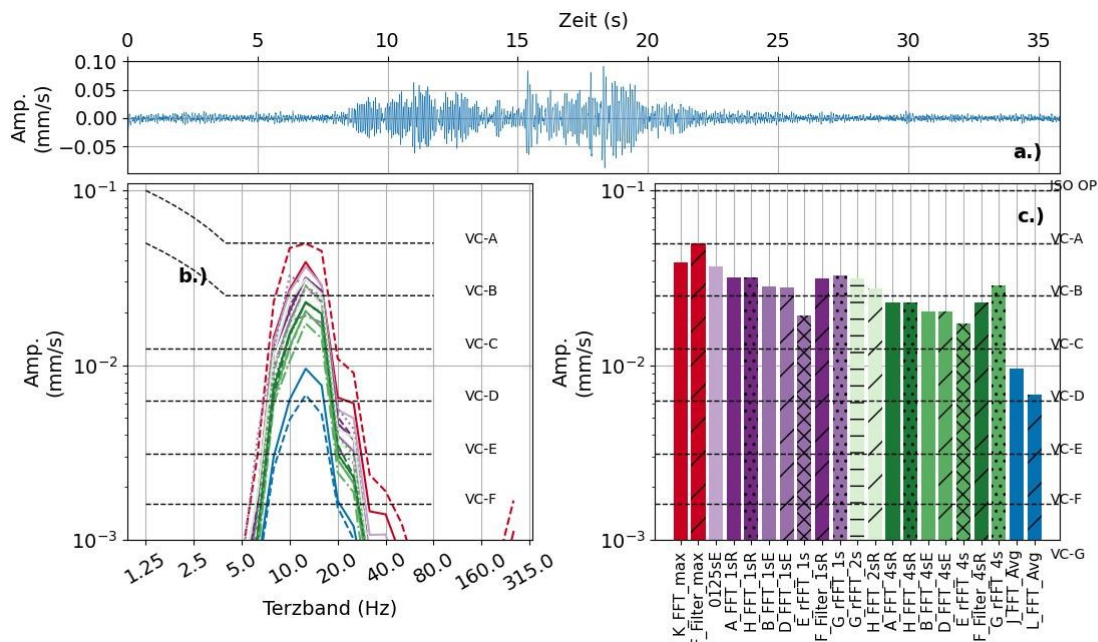
Die beiden möglichen Methoden der Frequenzfilterung (FFT- oder IIR Filter) führen praktisch zum gleichen Ergebnis, kleine Unterschiede ergeben sich durch die Art der Zeitintegration; jene des Rechteckfensters liegen etwa 10% über den Ergebnissen mit exponentieller Glättung (hier: Zeitkonstante = Rechteckfensterlänge). Die Methode Running FFT führt jedoch zu Abweichungen von 40 %.



**Abbildung 2.** a.) Messsignal einer Straßenbahn im OP-Saal, b.) berechnete Max-Hold Spektren und c.) Maximale Terzschellen im Vergleich.

#### 4.2. Beispiel 2: Gehen auf einer Geschoßdecke

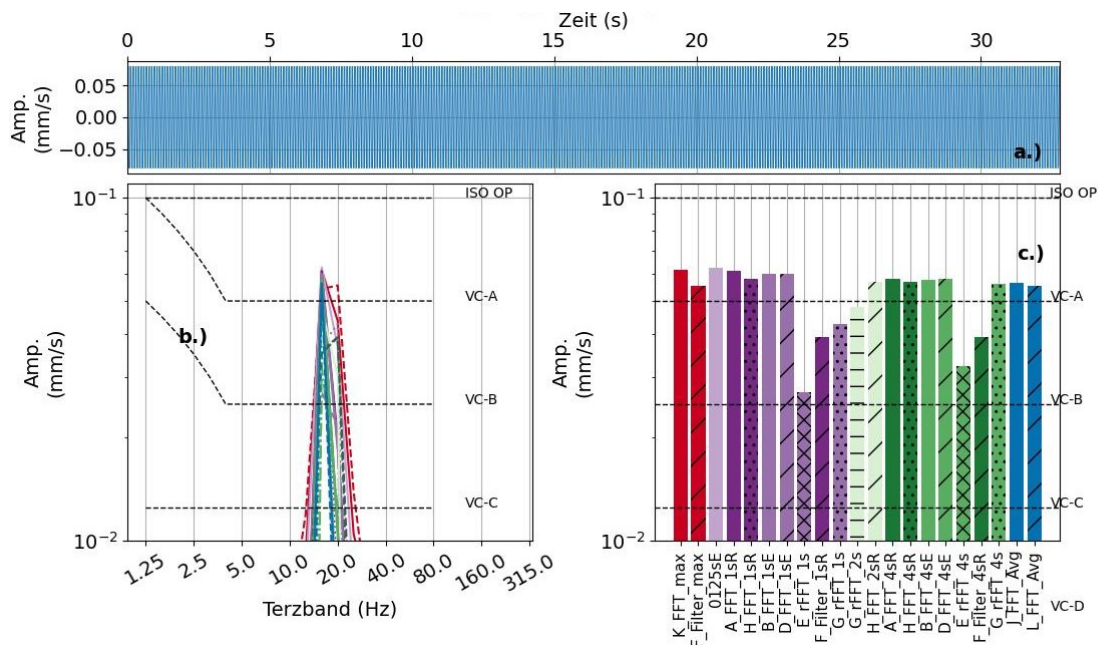
Abbildung 3a zeigt ein gemessenes Signal zufolge Gehens auf einer Geschoßdecke. Abbildung 3b zeigt die Ergebnisse der Max-Hold Spektren aller Verfahren, in Abbildung 3c sind die Maximalwerte der Terzen dargestellt. Wieder unterliegen die Ergebnisse – im Wesentlichen verursacht durch unterschiedliche Integrationszeiten – einer großen Streuung. Die Bewertungen reichen von VC-A bis zur Überschreitung der Richtwerte für ISO OP-Saal.



**Abbildung 3.** a.) Messsignal Gehen auf der Geschößdecke, b.) berechnete Max-Hold Spektren und c.) Maximale Terzschnellen im Vergleich.

Der wesentliche Parameter zur Vereinheitlichung der Ergebnisse ist wieder die Festlegung einer einheitlichen Integrationszeit. Bei 4 Sekunden liegen bei allen Verfahren die Ergebnisse im Bereich der Zonengrenze VC-A (teilweise leicht darüber und teilweise leicht darunter), bei einer Integrationszeit von 1 Sekunde sehen wir das gleiche Bild um die Zonengrenze ISO OP-Saal. Die Art der Terzbandfilterung führt praktisch zum gleichen Ergebnis, kleine Unterschiede ergeben sich durch die Art der Zeitintegration; das Rechteckfenster liegt etwa 20% über der exponentiellen Glättung. Die Methode Running FFT führt zu Abweichungen von ca. 30 %.

### 4.3. Beispiel 3: Sinusschwingung mit 17,6 Hz



**Abbildung 4.** a.) Sinusschwingung mit 17,6 Hz, b.) berechnete Max-Hold Spektren und c.) Maximale Terzschnellen im Vergleich.

Als drittes Beispiel soll hier eine Sinusschwingung mit einer Frequenz von 17,6 Hz (also im Randbereich eines Terzbandes) diskutiert werden. Da bei einer konstanten Schwingung die Wahl der



Integrations- bzw. Mittelungsdauer ohne Bedeutung ist, werden in weiterer Folge lediglich Ergebnisse mit einer Integrationszeit von 4 Sekunden dargestellt. (Anmerkung: Bei der Methode Running FFT steigt mit zunehmender Integrationszeit die Frequenzauflösung.) Die Ergebnisse zeigen, dass es beim Einsatz von IIR-Filtern im Bereich der Terzrandfrequenzen zu einer (erwarteten) Verzerrung von rund 3 dB kommt. Während die Methode Running FFT ohne Korrektur des Hanning Fensters 40 % abweicht, passt die Variante mit Korrektur.

## 5. BEURTEILUNG DER ERGEBNISSE MITTELS ÜBERSCHREITUNGS-HÄUFIGKEIT

Nur selten liegen die Ergebnisse im repräsentativen Messzeitraum konstant unter dem geforderten Schwingungskriterium. Daher ist eine statistische Analyse der einzelnen Überschreitungen erforderlich. Bei Messzeiten von mehreren Stunden kann das Beurteilungsspektrum basierend auf dem Mittelwert inkl. 3-facher Standardabweichung (Überschreitungswahrscheinlichkeit 0,13 % im Falle normalverteilter Größen) der Einzelspektren ermittelt werden. Die so statistisch abgeschätzte Beurteilungskurve liefert in der Praxis – im Gegensatz zur Einhüllenden – eine stabilere Größe und ermöglicht somit eine belastbarere Einschätzung.

Für längere Messungen wird empfohlen, einzelne Zeitabschnitte / Takte mit einer Länge von min. 60 bis max. 180 Sekunden festzulegen. Für jeden dieser Abschnitte wird das Max-Hold Spektrum ermittelt und anschließend gemäß den VC-Spektren beurteilt und klassifiziert. Basierend auf den Ergebnissen dieser Abschnitte können – wie in Abbildung 5 dargestellt – die Überschreitungswahrscheinlichkeiten im Verhältnis zur Gesamtdauer der Messung angegeben werden. Sind die Einwirkungsgrößen tageszeitabhängig (z.B. Erschütterungen aus Straßenverkehr), erfolgt dies für einzelne Tageszeitphasen (z.B. Morgen, Vormittag, Nachmittag, Abend, Nacht) oder für unterschiedliche Einwirkungs Zustände bekannter Anregungsquellen. (z.B. Betrieb Maschine „A“, „B“ oder „C“).

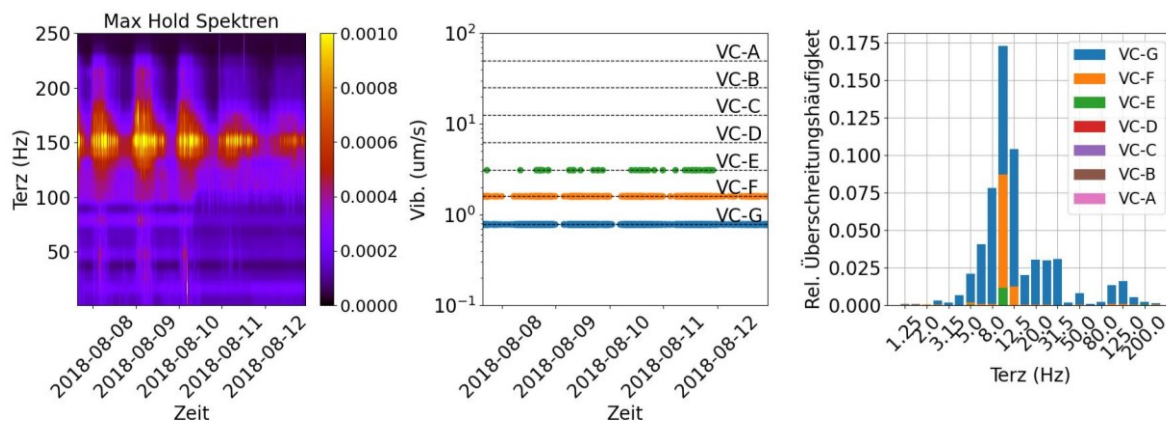


Abbildung 5. Typische Ergebnisse mit statistischer Auswertung

Gemeinsam mit dem Nutzer kann – unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen – festgelegt werden, ob vereinzelte Überschreitungen zulässig sind:

- Notwendige Nutzungszeiten des Gerätes bzw. mögliche Nutzungszeitverschiebungen (z.B. in die ruhigeren Nachtstunden); dies gilt insbesondere für Betriebszeit mit erhöhten Anforderungen an die Schwingungsruhe.
- Erkennbarkeit externer Störeinflüsse im Gerätebetrieb (z.B. verwackeltes Bild, sofort erkennbar oder erst deutlich später?)
- Wiederholbarkeit des schwingungskritischen Vorgangs (überhaupt möglich? Kosten? Zeit? ...)
- Aus den zeitliche Anforderungen an die Schwingungsruhe (z.B. wenige Sekunden oder viele Stunden) und der Häufigkeit / Dauer der Störeinflüsse kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von relevanten Überschreitungen (innerhalb der kritischen Gerätebetriebszeit) abgeschätzt werden.

Sofern keine betrieblichen Einschränkungen des Geräts gewünscht sind oder seitens der Nutzer keine Informationen zu akzeptablen Überschreitungshäufigkeiten vorliegen, sind geeignete Maßnahmen zur Schwingungsminderung an der Quelle oder am Aufstellort des Gerätes umzusetzen.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Während einerseits die Richtwerte selbst, wie beispielsweise in der VDI 2038, klar definiert sind, fehlen vereinheitlichte Angaben bzw. standardisierte Auswerteverfahren, um die gefragten Max-Hold Spektren zu ermitteln. Wie in diesem Beitrag gezeigt wurde, haben sowohl die Art der Terzbandfilterung (FFT oder Zeitbereichsfilter) als auch – viel maßgebender für das Endergebnis – die Wahl der Integrationszeit entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse.

Um sicherzustellen, dass eine einheitliche Standortklassifizierung gewährleistet ist empfehlen die Autoren die Normierung der entscheidenden Parameter gemäß folgender Empfehlung:

1. In Bezug auf die Frequenzbewertung zeigen Untersuchungen, dass sowohl die Methode der Terzbandfilterung mittels FFT-Filter als auch die Verwendung von IIR-Filtern ähnliche Ergebnisse liefern. Die Verwendung der FFT-Filtermethode bietet geringfügige Vorteile, insbesondere bei Schwingungen in den Banddeckfrequenzen. Im Gegensatz dazu scheint die Methode "Running FFT" veraltet zu sein.
2. Bei der Zeitbewertung gibt es vertretbare Unterschiede zwischen exponentieller Glättung und dem Rechteckfenster, ausschlaggebend ist jedoch die Wahl einer einheitlichen Integrationszeit. Die Autoren schlagen hier die einheitliche Wahl von zumindest 1 bis maximal 4 Sekunden vor. Im Autorenkreis wird die einheitliche Wahl eines Rechteckfensters mit 4 Sekunden Länge favorisiert.
3. Messungen sollten für die Ermittlung der Max-Hold-Spektren in einzelne Zeittakte von mindestens 60 bis maximal 180 Sekunden unterteilt werden und Überschreitungshäufigkeiten/-wahrscheinlichkeiten basierend auf diesen Taktlängen und den Betriebszeiten angegeben werden.

Zumindest eine Standardisierung der Integrationszeit in einer technischen Vorschrift scheint den Autoren dringend erforderlich.

## DANKSAGUNG

Herzlicher Dank gilt unseren Partnern und vor Allem unseren Kindern, die geduldig auf uns Warten, während wir uns (ihre) Zeit für diesen Vortrag nehmen.

## LITERATUR

- [1] VDI 2038: *Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen*.
- [2] Institute of Environmental Sciences and Technology (2002) *IEST-RP-CC024.1 "Measuring and Reporting Vibration in Microelectronics Facilities"*
- [3] Gordon, Colin G. (1991): Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment. *Proceedings of Int. Society for Optical Engineering (SPIE), Vol. 1619*, San Jose, CA
- [4] Heiland, D., Beyer, K. (2005): Vibration Criteria for Nanotechnology Facilities. Recent Design Criteria for Nanotechnology Production and Research. *VDI-Berichte Nr. 1920, S. 241-254, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf*
- [5] Cooley, J.W.; Tukey, J.W.: An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. In: *Mathematical Computation*, Vol. 19 (1965), pp. 297-301.
- [6] DIN EN 61260-1:2014-10 Elektroakustik - Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven - Teil 1: Anforderungen (IEC 61260-1:2014);
- [7] Gordon, C. G., Dresner, T. L., (1994) "Methods of Developing Vibration and Acoustic Noise Specifications for Microelectronics Process Tools," *Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE)*, Vol. 2264
- [8] Amik H., Stead M. (2007) *Vibration Sensitivity of Laboratory Bench Microscopes SOUND AND VIBRATION*
- [9] Amick, H., ( 1997) *On Generic Vibration Criteria for Advanced Technology Facilities: with a Tutorial on Vibration Data Representation, J. Inst. Env. Sci., pp. 35-44, Sept/Oct. 1997.*