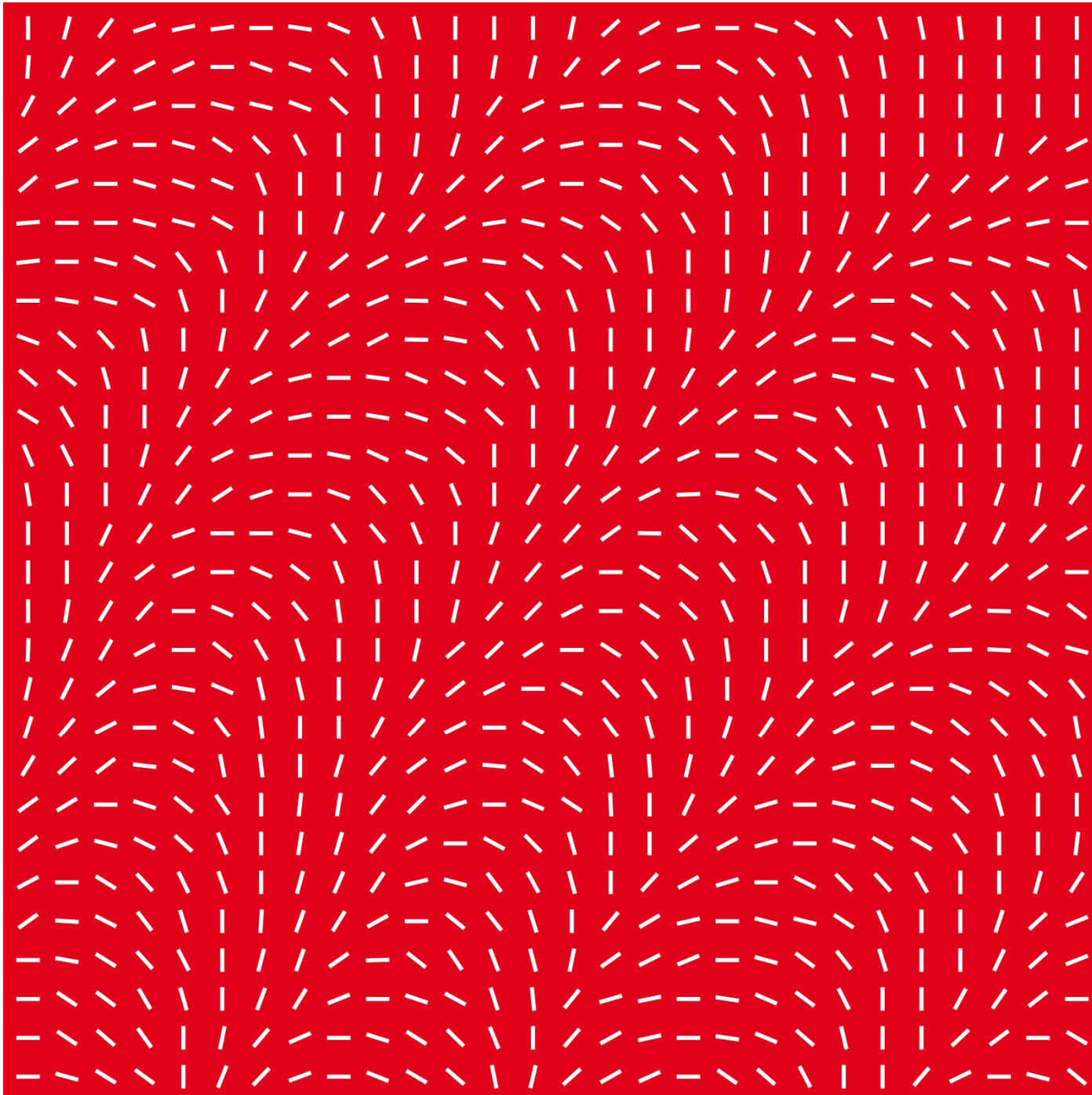


## Wahrnehmung von Erschütterungen und Beurteilung nach Normen



# Wahrnehmung von Erschütterungen und Beurteilung nach Normen

Daniel Gsell, ZC Ziegler Consultants AG

## 1 Einleitung

Jeder Mensch reagiert auf seine eigene Art auf Erschütterungseinwirkungen. Dennoch sind möglichst objektive Verfahren zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkung mit zugehörigen Richt- oder Grenzwerten erforderlich. Insbesondere verdichtetes Bauen, gebäudeinterne Nutzungsmischungen und ein tendenziell gestiegener Anspruch an die «Ruhe» in der Gesellschaft gibt der Problemstellung eine immer höhere Wichtigkeit. Der vorliegende Beitrag stellt an vier konkreten Beispielen, in denen sich Personen durch die Erschütterungseinwirkung gestört fühlten, gängige Beurteilungsverfahren dem gemeldeten Empfinden der betroffenen Personen gegenüber. Die gewonnenen Erkenntnisse werden interpretiert, diskutiert und es werden Erkenntnisse für zukünftige Projekte daraus abgeleitet.

## 2 Beurteilung von Erschütterungen

### 2.1 Hintergrund

Vor der Industrialisierung hat sich der Mensch, abgesehen von seltenen Ereignissen wie einem Erdbeben, kaum durch eine Erschütterungseinwirkung gestört gefühlt. Somit stammen auch die ersten Studien zur Auswirkung von Erschütterungen auf den Menschen hinsichtlich gesundheitlicher und auch hinsichtlich Komfort-Aspekten aus dem späten 19. Jahrhundert. Erst im 20. Jahrhundert, mit zunehmender Ausbreitung von Industrie und Verkehr, wurde das Gebiet vermehrt erforscht und erste Schwellenwerte für Belästigung, Ermüdung, Unbehagen und auch Schmerz veröffentlicht. Insbesondere für den Komfort in der Luftfahrt und in Automobilen wurden vermehrt Studien veröffentlicht. In Deutschland wurden erste systematische Versuche mit Personengruppen durch Reiher und Meister in den 30er Jahren durchgeführt [1]. Bei harmonischen Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen mussten die Versuchspersonen ihre Empfindungen in «nicht spürbar», «schwach spürbar», «gut spürbar», «stark spürbar, lästig», «unangenehm, schädlich bei längerer Dauer» und «sehr unangenehm, schädlich bereits bei kurzer Dauer» einteilen. Grob zusammengefasst resultierte die in Bild 2.1a dargestellte Erkenntnis. Die Autoren wiesen schon in ihrer ersten Veröffentlichung darauf hin, dass die Zusammenhänge deutlich «verwickelter» sind, als dass diese durch einfache Kurven allgemeingültig abgebildet werden können.

Die Parameter, welche die Wahrnehmung der Erschütterungseinwirkung einer bestimmten Person beschreiben, sind zahlreich. Einige dieser Parameter sind physikalisch gut quantifizierbar, während andere nur qualitativ mehr oder weniger gut beschreibbar sind. So sind die Amplituden einer Erschütterungseinwirkung und deren Frequenzgehalt gut messbar und die Raumrichtung der Bewegung als auch die Position und die Aktivität der Person (stehen, liegen, sitzen, sich bewegen) auch eindeutig beschreibbar. Das Erfassen der Dauer und der Häufigkeit ab welcher die Erschütterungen störend sind, lässt schon deutlich mehr Raum. So kann die Beurteilung der Einwirkung auf einen ganzen Tag, nur die Nacht oder nur auf das Ereignis selber bezogen werden. Bei einer Beurteilung über mehrere Stunden spielt bei nicht kontinuierlichen Ereignissen auch die Dauer der einzelnen Ereignisse, die Häufigkeit aber auch die zeitliche Verteilung der Ereignisse mit ihren Amplituden und Frequenzgehalten eine entscheidende Rolle. Dies gilt insbesondere auch für impulsartige Ereignisse.

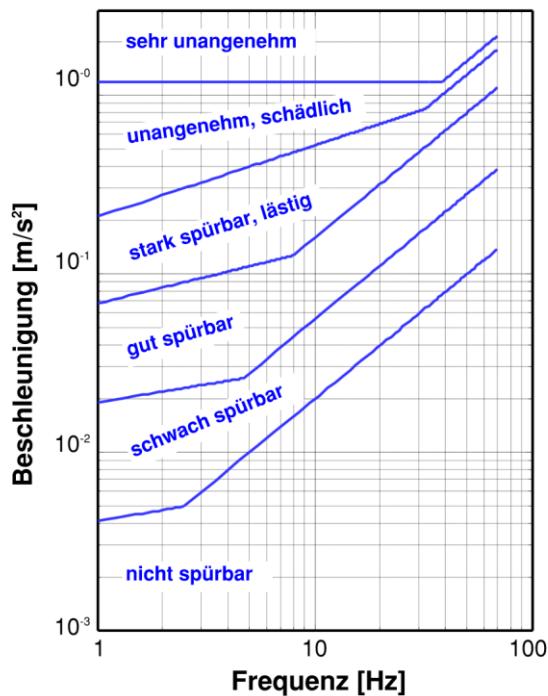


Bild 2.1a Bewertung von Erschütterungen durch Personen [1]

### Subjektive Wahrnehmung von Erschütterungen

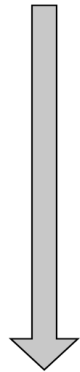
#### Physikalisch beschreibbar

- Amplitude
- Frequenz
- Richtung der Einwirkung
- Haltung der Person (stehen | sitzen | liegen | in Bewegung)
- kontinuierlich | impulsartig
- Dauer | Häufigkeit

#### Physisch und psychisch beeinflusst

- kultureller Hintergrund
- Alter und Gesundheitszustand
- allgemeiner Gemütszustand
- Umgebung
- Beziehung zur Quelle (optisch und Einstellung)
- wahrnehmbare Sekundäreffekte
- fester Grund | lebendige hohe Brücke
- ...

quantifizierbar



nur qualitativ beschreibbar

Bild 2.1b Einflüsse auf die subjektive Wahrnehmung von Erschütterungen.

Viele Einflussfaktoren, wie eine Person eine Erschütterungseinwirkung beurteilt, sind kaum durch einfache Parameter beschreibbar. So wären neben dem kulturellen Hintergrund das Alter, der Gesundheitszustand und die momentane psychischen Verfassung der Person zu berücksichtigen. Ist eine Erschütterungsquelle sichtbar, so wird die Immission oft weniger kritisch beurteilt, als wenn kein optischer Bezug besteht. Auch die Einstellung der Person zur Quelle fließt subjektiv in die Beurteilung mit rein. Ab einer gewissen Stärke der Erschütterungseinwirkung können Sekundäreffekte wie klirrende Gläser, wackelnde Pflanzen und auch Körperschallimmissionen die Einwirkung begleiten und die Wahrnehmung oft intensivieren. Nicht zuletzt beeinflusst die Umgebung (ruhig, voller Aktivitäten) die subjektive Wahrnehmung. Auch der Ort, wo die Einwirkung erfahren wird, spielt eine Rolle, so ist das Empfinden anders, wenn eine Person auf festem Grund steht oder hoch oben auf einer wackligen Plattform, wo Erschütterungen zu erwarten sind.

Die erstmals im Jahr 1973 veröffentlichte ISO 2631 (Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirement und Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) [2, 3]) normiert Bewertungsverfahren für die Erschütterungseinwirkung, die insbesondere die Frequenzabhängigkeit, die Position der Person als auch den Anwendungsbereich berücksichtigen. In der ersten Fassung der ISO 2631 beschränkt sich die Norm nicht nur auf die Bewertungsverfahren, sondern nannte auch Richtwerte für die menschliche Wahrnehmung. Mit den folgenden Generationen der Norm wurden keine Richtwerte mehr publiziert.

Eines der vollständigsten Werke zum Thema «Menschliche Wahrnehmung von Erschütterungen» dürfte Griffen [4] mit seinem «Handbook of Human Vibration» veröffentlicht haben.

Die DIN 4150-2 [5] gibt neben einem Verfahren zur Bewertung der Erschütterungseinwirkung auch Anhaltswerte für die menschliche Beurteilung unter Berücksichtigung der Dauer und der Häufigkeit der Erschütterungsereignisse, selbst mit der Berücksichtigung von Ruhezeiten. Wobei hier ein Entwurf einer Neufassung kurz vor der Veröffentlichung steht.

## 2.2 Beurteilung nach ISO

Die Beurteilungsgrösse in der ISO 2631 [2, 3] sind am Aufstellort gemessene Beschleunigungen in die drei Raumrichtungen. Die Beurteilung wird in einem Frequenzintervall zwischen 1 Hz und 80 Hz durchgeführt. Die gemessenen Beschleunigungen werden daher mit je einem Butterworth Hoch- und Tiefpassfilter 2te Ordnung mit den Eckfrequenzen 0.8 Hz bzw. 80 Hz gefiltert. Zusammen mit einer frequenzabhängigen Gewichtungsfunktion, deren Amplitudengang einem Butterworth Tiefpassfilter 1ter Ordnung mit Eckfrequenz 5.68 Hz entspricht, wird vereinfacht ausgedrückt die frequenzabhängige menschliche Wahrnehmung abgebildet. In Bild 2.2a ist die resultierende Funktion der Frequenzbewertung dargestellt. Im Prinzip handelt es sich um die 3 Filter hintereinander geschaltet.

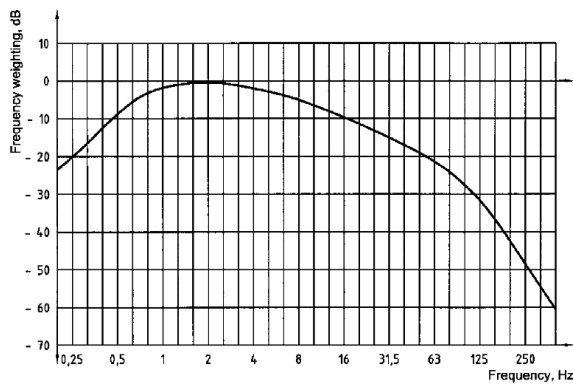


Figure A.1 — Frequency weighting  $W_m$ , with acceleration as the input quantity (schematic)

Place	Time <sup>2</sup>	Continuous/ intermittent vibration (meters/sec <sup>2</sup> )	Transient vibration	
			MTVV (meters/sec <sup>2</sup> )	VDV (meters/sec <sup>1.75</sup> )
Critical working areas (e.g. hospital operating rooms) <sup>3</sup>	Any	0.0036	0.0036	0.1
Residences <sup>4,5</sup>	Day	0.0072	$0.07/n^{1/2}$	0.2
	Night	0.005	0.007	0.14
Offices <sup>5</sup>	Any	0.014	$0.14/n^{1/2}$	0.4
Workshops <sup>5</sup>	Any	0.028	$0.28/n^{1/2}$	0.8

<sup>1</sup> The probability of adverse human response to building vibration that is less than the weighted accelerations, MTVVs, and VDV's listed in this table is small. Complaints will depend on specific circumstances. For an extensive review of this subject, see Ref. 1. Note that: (a) VDV has been used for the evaluation of continuous and intermittent, as well as for transient, building vibration; and (b) annoyance from acoustic noise caused by vibration (e.g., of walls or floors) has not been considered in formulating the guidance in Table 42.7.

<sup>2</sup> Daytime may be taken to be from 7 AM to 9 PM and nighttime from 9 PM to 7 AM.

<sup>3</sup> The magnitudes of transient vibration in hospital operating theaters and critical working places pertain to those times when an operation, or critical work, is in progress.

<sup>4</sup> There are wide variations in human tolerance to building vibration in residential areas.

<sup>5</sup>  $n$  is the number of discrete transient events that are 1 second or less in duration. When there are more than 100 transient events during the exposure period, use  $n = 100$ .

Bild 2.2a Frequenzbewertung für Personen nach ISO 2631-2

Bild 2.2b Tabelle 42.7 aus [7], Richtwerte für akzeptierbare Gebäudeschwingungen basierend auf den frequenzbewerteten RMS-Beschleunigungswerten.

Bei der Beurteilung nach ISO 2631 werden RMS (Root Mean Square) Werte in einer repräsentativen Zeitspanne verwendet. Handelt es sich um nicht kontinuierliche Schwingungen mit grossen Crest-Faktoren (Verhältnis Maximalwert zu RMS-Wert), wird die Methode des gleitenden RMS-Wertes empfohlen. Die Länge des gleitenden Zeitfensters wird mit 1 Sekunde gegeben und als Beurteilungsgrösse ist der Maximalwert der gleitenden RMS-Werte in dem betrachteten, zu beurteilenden Zeitintervall zu verwenden. Dies entspricht dem «Maximum Transient Vibration Value MTVV» und entspricht im Hinblick auf die Akustik im Prinzip einer Integration mit Zeitkonstante «slow». Diese Methode gibt impulsartigen Erschütterungen das notwendige Gewicht in der Beurteilung. Liegt das Verhältnis MTVV zu RMS bei über 1.5 soll die Methode des gleitenden RMS verwendet werden. Um die Spitzenbeschleunigungen bei impulshaltigen Signalen noch stärker zu gewichten, kann auch auf die «Fourth Power Vibration Dose Methode VDV» zurückgegriffen werden.

In früheren Ausgaben der Norm (1985 und 1989) waren Richtwerte publiziert, die Normen sind jedoch nicht mehr gültig. In der aktuellen ISO 2631 werden zur Beurteilung keine Richtwerte mehr gegeben. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Erfahrung zeigt, dass bei Wohnnutzungen Beschwerden von den Nutzern beginnen, wenn die Erschütterungen schon nur leicht über der Wahrnehmungsgrenze liegen. Die Norm gibt als Hinweis, dass die Hälfte von aufmerksamen, gesunden Personen frequenzgewichtete Beschleunigungen mit Spitzenwerten von  $0.015 \text{ m/s}^2$  wahrnehmen können. Es wird auch auf die grosse Streubreite der menschlichen Wahrnehmung hingewiesen, während der Medianwert bei  $0.015 \text{ m/s}^2$  liegt, liegen die Quartilwerte bei  $0.01 \text{ m/s}^2$  respektive bei  $0.02 \text{ m/s}^2$ .

Die ISO 2631-2 weist zudem im Anhang B auf störende Sekundäreffekte wie abgestrahltem Körperschall, Klappern von Gegenständen und visuelle Effekte hin, die bei der Beurteilung der gemessenen Erschütterungen zu berücksichtigen sind.

In den Standardwerken [4] und [6] werden Beschleunigungsgrenzwerte für unterschiedliche Tätigkeiten und Zeiten gegeben. Dabei liegt zugrunde, dass keine negative Reaktion der Nutzer erwartet wird, wenn die frequenzgewichteten RMS-Werte der Beschleunigungen unter  $0.0036 \text{ m/s}^2$  liegen. Für transiente Signale wird zudem ein Richtwert gegeben, welcher die Häufigkeit der Ereignisse berücksichtigt. In Bild 2.2b sind entsprechende Richtwerte für akzeptierbare Gebäudeschwingungen abgebildet.

Die ISO 10137:2007 [7] greift bei ihren Richtwerten auf die zurückgezogenen Vorgängerversionen der ISO 2631 zurück. In der ISO 10137 sind die Richtwerte frequenzabhängig gegeben. Sie eignen sich somit auch für die Bewertung in Terzbändern. Gordon [8] hat die von der ISO 2631 ursprünglich publizierten Grenzwerte als Ergänzung zu seinen VC-Kurven übernommen. Neben den VC Kurven sind ISO Kurven, gegeben in RMS-Schwinggeschwindigkeiten, in den Diagrammen abgebildet (Bild 2.2c).

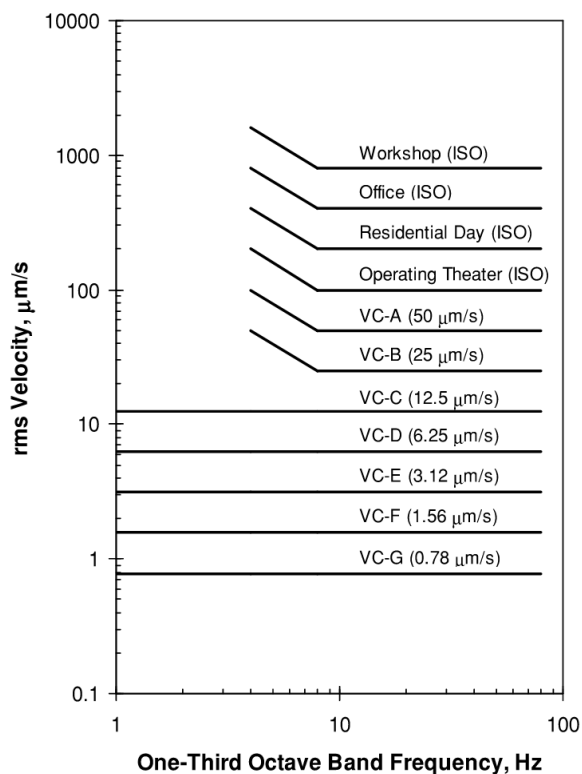


Bild 2.2c VC-Kurven und ISO Grenzwerte [9].

### 2.3 Beurteilung nach DIN 4150-2

Die DIN 4150-2 bewertet Erschütterungen im Frequenzbereich zwischen 1 Hz bis 80 Hz. In der Norm werden Anhaltswerte genannt, bei deren Einhaltung die betroffenen Menschen in den Gebäuden nicht erheblich gestört sind. Die Norm beruht auf gemessenen Schwinggeschwindigkeiten, welche in einem ersten Schritt frequenzbewertet werden. Für die Frequenzbandbegrenzung kommen wiederum ein Hoch- und ein Tiefpassfilter 2ter Ordnung mit Eckfrequenzen von 1 Hz und 80 Hz zur Anwendung. Mit einem weiteren Hochpassfilter 1ter Ordnung mit einer Eckfrequenz von 5.6 Hz wird das Signal frequenzbewertet, womit das frequenzbewertete Erschütterungssignal  $KB(t)$  berechnet wird. Nebenbei bemerkt, entspricht diese Filterung relativ genau dem Vorgehen in der ISO 2631, jedoch auf Schwinggeschwindigkeiten angewendet. Durch die Bildung des gleitenden Effektivwertes mit einer Zeitkonstante  $\tau = 0.125$  Sekunden wird die bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$  ermittelt, was der Zeitbewertung «fast» in der Akustik entspricht. Für die Beurteilung der Erschütterung wird in einem ersten Schritt der Maximalwert der bewerteten Schwingstärke verwendet und falls erforderlich in einem zweiten Schritt die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FT}$  ermittelt und mit den

Anhaltswerten verglichen. Die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FTT}$  wird über die Beurteilungszeit ermittelt, in dem der RMS-Wert der Maximalwerte der bewerteten Schwinggeschwindigkeiten aller 30-Sekundenintervalle gebildet wird. Dabei ist auch der Gewichtungsfaktor der Ruhezeit zu berücksichtigen. Die Schwingrichtungen werden bei der Beurteilung getrennt behandelt, die jeweils grösste der drei Richtungen ist der Beurteilung zugrunde zu legen. Das Verfahren der Beurteilung ist in Bild 2.3a gezeigt, die zugehörigen Anhaltswerte in Bild 2.3b

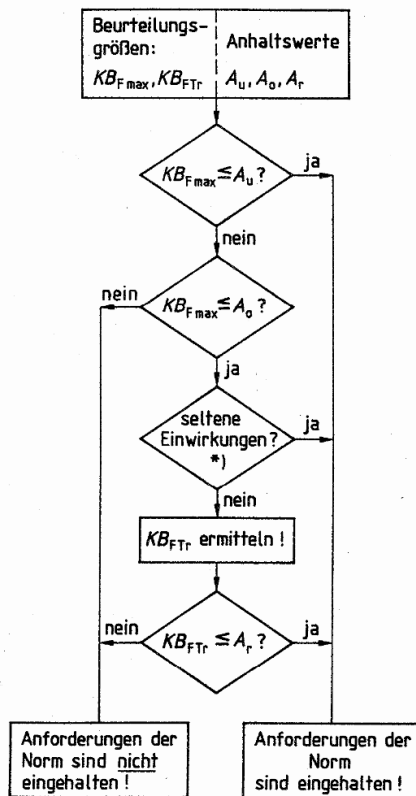


Bild 2.3a Bild 2 der DIN 4150-2:1999

Zeile	Einwirkungsort	Tags			Nachts		
		$A_u$	$A_o$	$A_r$	$A_u$	$A_o$	$A_r$
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete BauNVO, § 9).	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete BauNVO, § 8).	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete BauNVO, § 7, Mischgebiete BauNVO, § 6, Dorfgebiete BauNVO, § 5).	0,2	5	0,1	0,15 (0,1)	0,3	0,07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reines Wohngebiet BauNVO, § 3, allgemeine Wohngebiete BauNVO, § 4, Kleinsiedlungsgebiete BauNVO, § 2).	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B. in Krankenhäusern, Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen.	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

In Klammern sind jeweils die Gebiete der Baunutzungsverordnung BauNVO angegeben, die in der Regel den Kennzeichnungen unter Zeile 1 bis 4 entsprechen. Eine schematische Gleichsetzung ist jedoch nicht möglich, da die Kennzeichnung unter Zeile 1 bis 4 ausschließlich nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegen Erschütterungseinwirkungen vorgenommen ist, die Gebietseinteilung in der BauNVO aber auch anderen planerischen Erfordernissen Rechnung trägt.

Bild 2.3b Tabelle 1 der DIN 4150-2:1999, mit den Anhaltswerten für die Beurteilung der Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen. Der Wert in Klammer beim  $A_u$  nachts in der Zeile 3 soll in der aktualisierten Fassung stehen.

Auch die DIN 4150-2 weist auf die Sekundäreffekte hin, die bei einer Beurteilung mit zu berücksichtigen sind.

## 2.4 Bemerkungen zur Beurteilung

Vereinfachend können gemessene Schwinggeschwindigkeiten in einem Frequenzbereich zwischen 8 Hz und 80 Hz wie folgt eingeordnet werden:

- 0.2 mm/s      Wahrnehmungsgrenze
- 0.6 mm/s      gut spürbar
- 2.0 mm/s      Ärgergrenze
- 20.0 mm/s     Panikgrenze

Welches Verfahren mit welchen Mittelungszeiten gewählt wird, ist nicht einfach zu entscheiden. In Anhang A wird dazu an einem Beispiel die Anwendbarkeit bzw. die Aussagekraft der einzelnen Verfahren untersucht.

### 3 Praktische Beispiele

Im Folgenden wurden die oben beschriebenen Beurteilungsverfahren in vier Beispielen angewendet. In den Beispielen sind jeweils auch die Reaktionen der betroffenen Nutzer bekannt und können somit der Bewertung gegenübergestellt werden. In den beiden ersten Beispielen werden eher kontinuierliche Erschütterungen behandelt, die als störend erachtet worden sind, während in den beiden darauf folgenden Beispielen kurzzeitige Ereignisse zu Beanstandungen führten.

#### 3.1 Beispiel 1: Büronutzung oberhalb Fitnesscenter

Die Mieter von Büroräumlichkeiten in den Geschossen oberhalb eines Fitnesscenters beklagten sich über immer wieder auftretende, länger anhaltende, störende Schwingungen. Am meisten waren die Nutzer im 4. Obergeschoss gestört. Die Vermutung war, dass die Nutzung der Laufbänder auf der Galerie im Fitnesscenter die Ursache für die störenden Erschütterungen war. Die Galerie wurde nach Erstellung des Bauwerks, aber vor dem Einzug des Fitnesscenters in die Decke über EG eingeschnitten und mit Hilfe von Zugstangen an der Decke über dem 1. OG aufgehängt. Das Gebäude befindet sich in einer Industrie- und Gewerbezone. Nach der DIN 4150-2 Tabelle 1 ist somit die Zeile 2 relevant, wobei keine Nutzung nachts vorgesehen ist. Da es sich um eine Büronutzung handelt, gilt nach Bild 2.2b bei kontinuierlichen Erschütterungen der Richtwert  $0.014 \text{ m/s}^2$  (Office). Die im 4. Obergeschoss in Deckenfeldmitte während eines stärkeren Ereignisses gemessenen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten sind in Bild 3.1b dargestellt. Aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten werden durch numerisches Differenzieren die Beschleunigungen ermittelt.

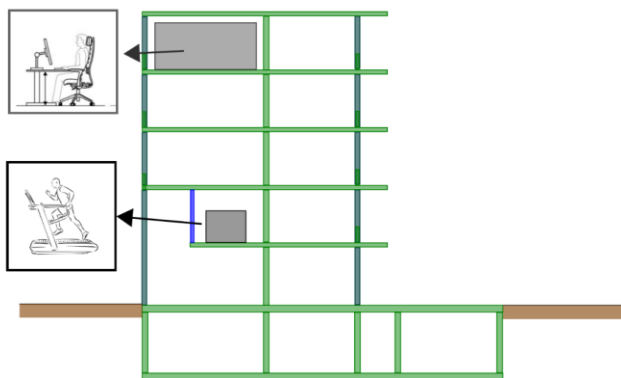


Bild 3.1a Querschnitt durch das Gebäude

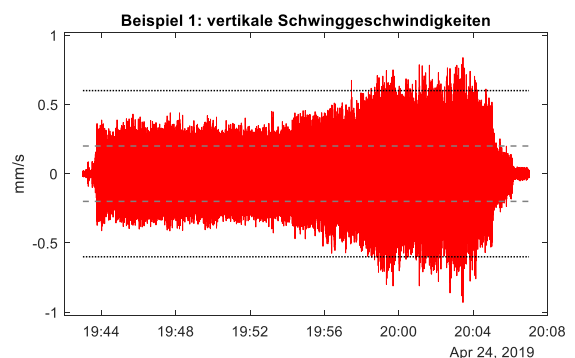


Bild 3.1b Gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten im 4. OG während dem Betrieb des Laufbandes.

Die nach Kapitel 2.2 ermittelten frequenzbewerteten Beschleunigungen sind in Bild 3.1c grau dargestellt. Der über die gesamte Länge des dargestellten Signals ermittelte RMS-Wert beträgt  $0.0055 \text{ m/s}^2$ . Mit einer maximal gemessenen frequenzbewerteten Beschleunigung von  $0.031 \text{ m/s}^2$  beträgt der Crest-Faktor 5.6. Die ermittelten TVV (Transient Vibration Value) sind im Bild 3.1c rot dargestellt, zudem ist grau strichliert der Richtwert (siehe [6]) eingetragen. Der MTVV-Wert liegt mit  $0.011 \text{ m/s}^2$  unterhalb des Richtwertes von  $0.014 \text{ m/s}^2$ , damit sollten die Erschütterungen, auch wenn diese über längere Zeit auftreten in einer Büronutzung erlaubt sein. Die Nutzer der Büroräumlichkeiten im 4.OG sind jedoch dezidiert anderer Meinung.

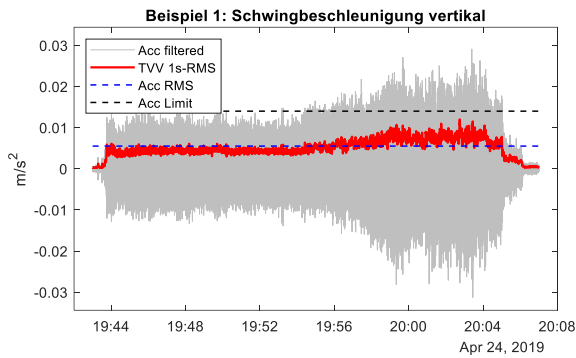


Bild 3.1c Beschleunigungen nach ISO 2631-1

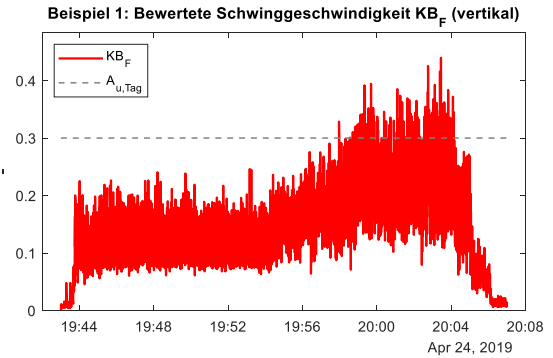


Bild 3.1d Auswertung nach DIN 4150-2.

Die aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten ermittelte bewertete Schwingstärke  $KB_F$  nach DIN 4150-2 ist in Bild 3.1d dargestellt. Zudem sind die Anhaltswerte  $A_u$  und  $A_o$  für den Tag ( $A_o$  am Tag liegt bei 6 und ist somit nicht sichtbar) eingezeichnet. Mit einem  $KB_{Fmax}$  von 0.44 ist der Anhaltswert  $A_u = 0.3$  am Tag überschritten und nach dem Vorgehen der DIN (Bild 2.3a) ist der  $KB_{FTr}$  zu ermitteln. Da die Häufigkeit und die Dauer der Ereignisse unbekannt sind bzw. stark variieren, kann umgekehrt ermittelt werden, wie lange, bzw. wie viele 30 Sekunden Takte in einer Tagesstunde mit einem  $KB_F$  von 0.4 belegt werden dürften, damit der Anhaltswert  $A_r$  von 0.15 noch eingehalten ist. Nimmt man einen mittleren  $KB_F$  von 0.4, ist der Anhaltswert der Norm bei 8 Minuten Erschütterungen pro Stunde eingehalten. Der Nutzer der Büros im 4.OG ist mit dieser Beurteilung nicht einverstanden.

Werden aus den gemessenen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten die Terzbandspektren gebildet, so zeigt sich die Situation wie in Bild 3.1e dargestellt. Dabei wurde einerseits das gemittelte RMS-konforme Terzbandspektrum über die gesamte Signallänge ermittelt («TBS avg»). Zudem werden die Max-Hold-Terzbandspektren in 1- und 4-Sekunden Zeitfenstern («TBS 1s» und «TBS 4s») mit jeweils 50% Überlappung gebildet und dargestellt. Das Kriterium «ISO-Office» ist gut eingehalten.

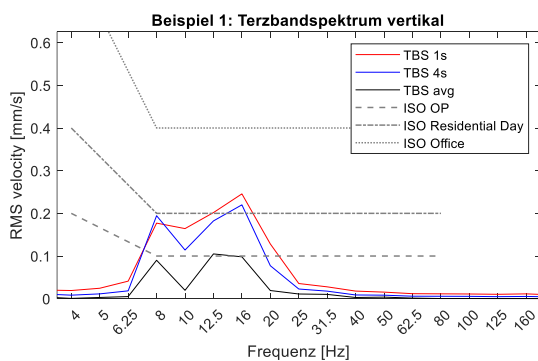


Bild 3.1e Terzbandspektren und Beurteilung nach ISO 10137

Um die Problemstellung zu entschärfen wurde ein Ertüchtigungskonzept des Gebäudes ausgearbeitet. Die Kosten dieser Ertüchtigung waren jedoch deutlich zu hoch. Zwischen der Betreiberin des Fitnesscenters (Mieterin) und dem Vermieter existiert eine Vereinbarung, die besagt, dass auf allen gemieteten Flächen jegliche Aktivitäten eines Fitnesscenters betrieben werden können. Die Betreiberin des Fitnesscenters bestand daher darauf, die Laufbänder auf der Galerie zu betreiben, was Schlussendlich zu einem Rechtsfall führte.



### 3.2 Beispiel 2: Servotransfer-Pressen in 100 m Distanz zu einer Büronutzung

In urbanem Gebiet wird eine Servotransfer-Pressen betrieben. Dabei wird eine Masse von über 100 Tonnen vertikal mehr oder weniger harmonisch bewegt. Die Presse ist bei einer Abstimmfrequenz von 4 Hz auf Federlagern gelagert. In etwa 100 m Distanz, im 3. Obergeschoss eines Gebäudes befindet sich das Direktoren-Sitzungszimmer des Betriebes. Während eines speziellen Betriebs der Presse reklamierten die Nutzer des Sitzungszimmers über wahrnehmbare bis stark störende Schwingungen (je nach Person die gefragt wurde, sind die Empfindungen anders, intensiver) und einen Gummibaum, der stark wackelte.

Die Gebäude befinden sich in einer Industrie- und Gewerbezone. Nach der DIN 4150-2 ist somit die Zeile 2 relevant, wobei keine sensitive Nutzung nachts vorgesehen ist. Da es sich um eine Büronutzung handelt, gilt nach Bild 2.2b bei kontinuierlichen Erschütterungen der Richtwert  $0.014 \text{ m/s}^2$  (Office). In Bild 3.2b sind die im Sitzungszimmer gemessenen horizontalen Erschütterungen dargestellt. Daraus werden durch numerisches Differenzieren die Schwingbeschleunigungen ermittelt.

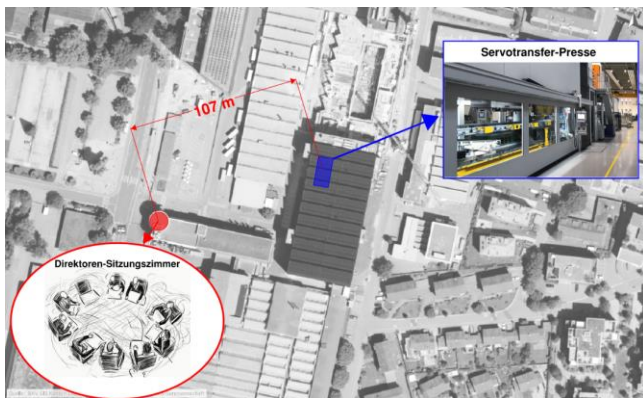


Bild 3.2a Situation

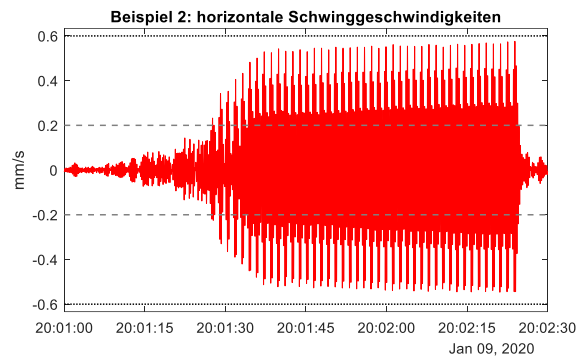


Bild 3.2b Gemessene horizontale Schwinggeschwindigkeiten im 3. OG während dem Betrieb der Presse.

Die aus den horizontalen Beschleunigungen nach Kapitel 2.2 ermittelten frequenzbewerteten Beschleunigungen sind in Bild 3.2c grau dargestellt. Der RMS-Wert über das ganze Signal beträgt  $0.0025 \text{ m/s}^2$ . Mit einer maximal gemessenen frequenzbewerteten Beschleunigung von  $0.011 \text{ m/s}^2$  beträgt der Crest-Faktor 4.5. Die ermittelten TVV sind im Bild 3.2c rot dargestellt, zudem ist grau strichliert der Richtwert nach Bild 2.2b eingezeichnet. Der MTVV-Wert liegt mit  $0.0066 \text{ m/s}^2$  unterhalb des Richtwertes von  $0.014 \text{ m/s}^2$  für Büros, damit sollten die Erschütterungen, auch wenn diese über längere Zeit auftreten in einer Büronutzung erlaubt sein. Einige der Nutzer des Sitzungszimmers im 3.OG sind jedoch dezidiert anderer Meinung.

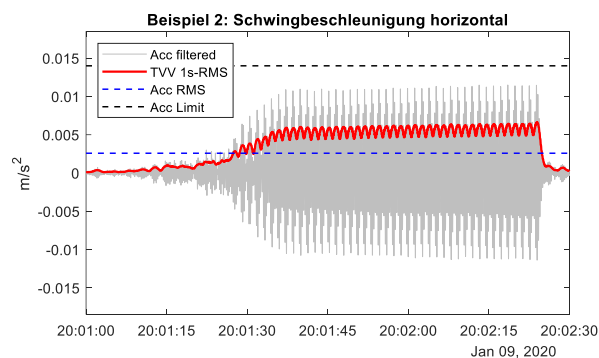


Bild 3.2c Beschleunigungen nach ISO 2631-1

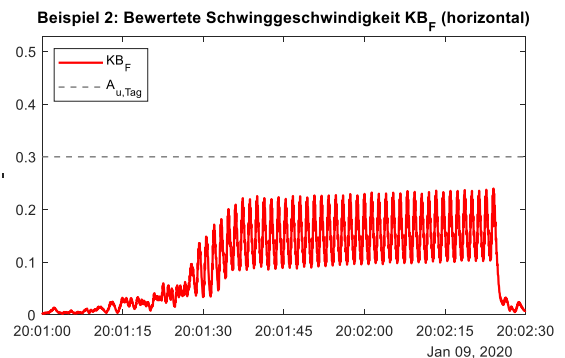


Bild 3.2d Auswertung nach DIN 4150-2.

Die aus den Schwinggeschwindigkeiten ermittelte bewertete Schwingstärke  $KB_F$  nach DIN 4150-2 ist in Bild 3.2d dargestellt. Zudem sind die Anhaltswerte  $A_u$  und  $A_o$  für den Tag ( $A_o$  am Tag liegt bei 6, ist somit nicht sichtbar) eingezeichnet. Mit einem  $KB_{Fmax}$  von 0.24 ist selbst der Anhaltswert  $A_u = 0.3$  am Tag eingehalten. Nach dem Vorgehen der DIN (Bild 2.3a) sind die Anforderungen der Norm somit insgesamt eingehalten (in der Nacht findet keine erschütterungssensitive Nutzung statt). Die Teilnehmer der Sitzung während den störenden Erschütterungen teilen diese Bewertung nicht. Auch die Sekundäreffekte (wackelnder Gummibaum) sind in der Beurteilung zu berücksichtigen.

Werden aus den gemessenen horizontalen Schwinggeschwindigkeiten die Terzbandspektren gebildet, so zeigt sich die Situation wie in Bild 3.2e dargestellt. Dabei wurde einerseits das gemittelte RMS-konforme Terzbandspektrum über die gesamte Signallänge ermittelt («TBS avg»). Zudem werden die Max-Hold-Terzbandspektren in 1- und 4-Sekunden Zeitfenstern («TBS 1s» und «TBS 4s») mit jeweils 50% Überlappung gebildet und dargestellt. Das Kriterium «ISO-Office» ist gut eingehalten, selbst das Kriterium «ISO-Wohnen» ist eingehalten.

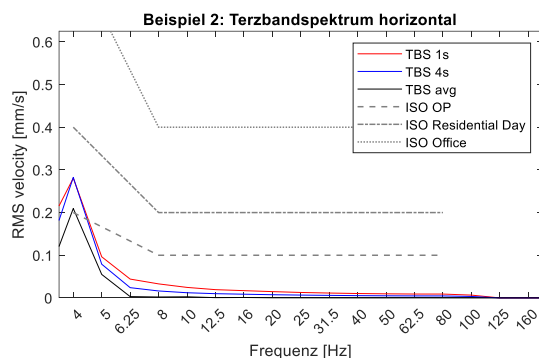


Bild 3.1e Terzbandspektren und Beurteilung nach ISO 10137

**Bemerkung:** in 60 m Entfernung zur Presse befindet sich das nächste Wohnhaus in einer Wohnzone. Der Pressenbetrieb findet im 3 Schichtbetrieb statt, was bedingt, dass der deutlich strengere  $A_o = 0.2$  für die Wohnzone in der Nacht relevant ist. Dieser Anhaltswert wäre klar überschritten, sofern das Gebäude gleich stark horizontal angeregt wird.

Im Planungsprozess des Pressegebäudes, wurden der Betreiberin der Pressen sehr restriktive Vorgaben für den Betrieb der Presse, insbesondere für die zulässigen Beschleunigungen des Stössels, gemacht. Diese Vorgaben wurden im erwähnten Fall missachtet. Der Vorfall zeigte eindrücklich und nachhaltig auf, dass diese Vorgaben für den Betrieb notwendig sind und zwingend einzuhalten sind.

### 3.3 Beispiel 3: Kampfsport über Büronutzung

Im 4. OG eines Gebäudes in einer Innenstadt wird ein Kampfsportzentrum betrieben. Beim Trainieren werden in den darunterliegenden Büroräumlichkeiten entsprechende Erschütterungen und Schallimmissionen (sekundär abgestrahlter Körperschall) sowie weitere Sekundäreffekte (wackelnde Bildschirme und Tische, scheppernde Blechregale, ... ) stark störend wahrgenommen. Die Immissionen stammen aus Kampfhandlungen, wenn ein Kämpfer den anderen "auf den Rücken" wirft, dies obwohl Judomatten den Aufprall stark dämpfen.

Das Gebäude befindet sich in einer Mischzone (Wohnen und Gewerbe). Nach der DIN 4150-2 ist somit die Zeile 3 relevant. Da es sich um eine Büronutzung handelt, gilt nach Bild 2.2b der Richtwert  $0.014 \text{ m/s}^2$  (Office), wobei viele Ereignisse ( $> 100$ ) stattfinden müssen. In Bild 3.3a sind die gemessenen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten im 3. OG, unterhalb des Trainingsbereiches, dargestellt. Aus den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten werden Schwingbeschleunigungen ermittelt.

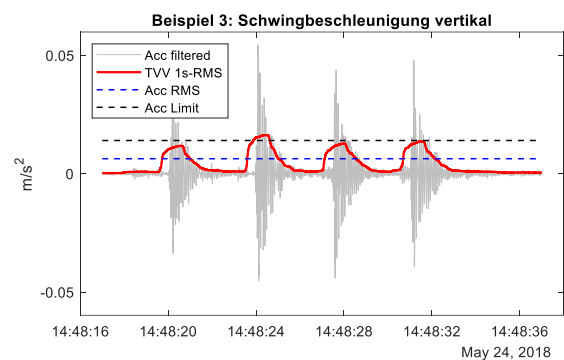
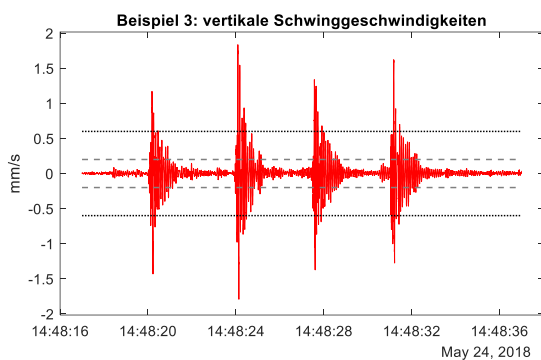


Bild 3.3a Gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten im 3. OG (unter dem Kampfsportraum) während simuliertem Training.

Bild 3.3b Beschleunigungen nach ISO 2631-1

Die nach Kapitel 2.2 ermittelten frequenzbewerteten Beschleunigungen sind in Bild 3.3b grau dargestellt. Der RMS-Wert über das ganze Signal beträgt  $0.0063 \text{ m/s}^2$ . Mit einer maximal gemessenen frequenzbewerteten Beschleunigung von  $0.054 \text{ m/s}^2$  beträgt der Crest-Faktor 8.6. Die TVV sind in Bild 3.3b rot dargestellt, zudem ist in grau strichliert der Richtwert nach Bild 2.2b für mehr als 100 Ereignisse eingezeichnet. Der MTVV-Wert liegt mit  $0.017 \text{ m/s}^2$  oberhalb des Richtwertes für Büros. Konkret wäre der Richtwert überschritten, wenn mehr als 66 solcher Ereignisse am Tag stattfänden.

Die aus den Schwinggeschwindigkeiten ermittelte bewertete Schwingstärke  $KB_F$  nach DIN 4150-2 ist in Bild 3.3c dargestellt. Zudem sind die Anhaltswerte  $A_u$  und  $A_o$  für den Tag ( $A_o$  am Tag liegt bei 5, ist somit nicht sichtbar) eingezeichnet. Mit einem  $KB_{Fmax}$  von 0.74 ist der Anhaltswert  $A_u = 0.2$  am Tag klar überschritten und nach dem Vorgehen der DIN (Bild 2.3a) ist der  $KB_{FT}$  zu ermitteln. Da die Häufigkeit und die Dauer der Ereignisse unbekannt sind bzw. stark variieren, kann umgekehrt ermittelt werden, wie viele solcher Impulse, bzw. wie viele 30 Sekunden Takte in einer Tagesstunde mit einem  $KB_F$  von 0.74 belegt werden dürften, damit der Anhaltswert  $A_r$  von 0.10 noch eingehalten ist. Nimmt man einen mittleren  $KB_F$  von 0.7, so dürfen innerhalb einer Stunde 2 – 3 solcher Ereignisse stattfinden, das entspricht 32 bis 48 Ereignisse zu Tageszeiten.

Werden aus den gemessenen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten die Terzbandspektren gebildet, so zeigt sich die Situation wie in Bild 3.3d dargestellt. Dabei wurde einerseits das gemittelte RMS-konforme Terzbandspektrum über die gesamte Signallänge ermittelt («TBS avg»). Zudem werden die Max-Hold-Terzbandspektren in 1- und 4-Sekunden Zeitfenstern («TBS 1s» und «TBS 4s») mit jeweils 50% Überlappung gebildet und dargestellt. Das Kriterium «ISO-Office» ist eingehalten, das Kriterium «ISO-Wohnen» ist bei einer Betrachtung mit 1-Sekunden-Zeitfenstern überschritten.

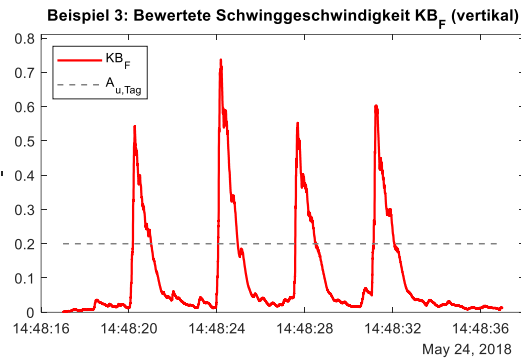


Bild 3.3c Auswertung nach DIN 4150-2.

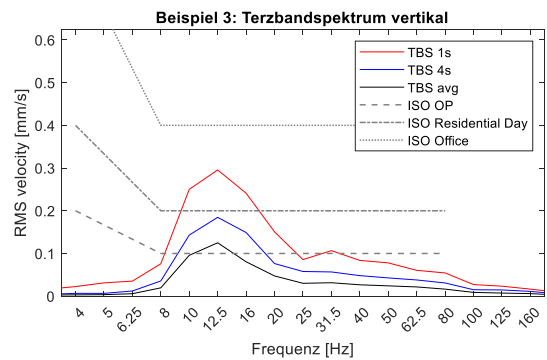


Bild 3.3d Terzbandspektren und Beurteilung nach ISO 10137

Es wurden verschiedene, deutlich weichere Matten als Sportunterlagen untersucht um die Impulse besser abzumindern, jedoch mit bescheidenem Erfolg. Dies liegt unter anderem an den eher tiefen Deckeneigenfrequenzen von 12 Hz aber auch an der eher langen Impulszeit, welche insbesondere tiefe Frequenzen anregen.

### 3.4 Beispiel 4: Schiebefenster in Wohnnutzung

In einem Mehrfamilienhaus beklagten sich mehrere Bewohner über immer wieder auftretende, stark störende Schwingungen unbekannter Herkunft. Die Ereignisse sind von kurzer Dauer (wenige Sekunden), sind aber in fast allen Wohnzimmern in dem Gebäude gut spürbar und treten zwischen 20 – 40 mal zu fast allen Tags- und Nachtzeiten auf. Die Ursache war ein schlecht gewartetes, grosses und schweres Schiebefenster einer Bewohnerin, die wenig Kontakt zu den Nachbarn pflegt und auf ihrem Balkon jeweils Zigaretten raucht. In einer frühen Phase der Untersuchung, als die Ursache der Erschütterungen noch nicht bekannt war, wurden diese bewertet.

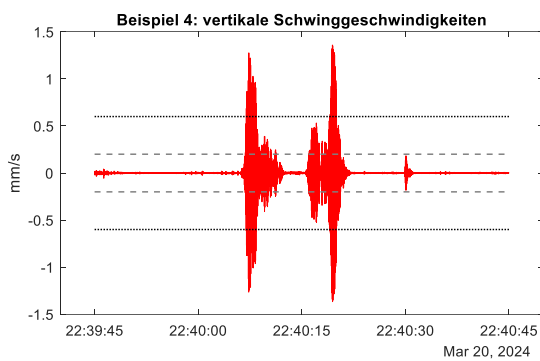


Bild 3.4a Gemessene vertikale Schwinggeschwindigkeiten im 3. OG.

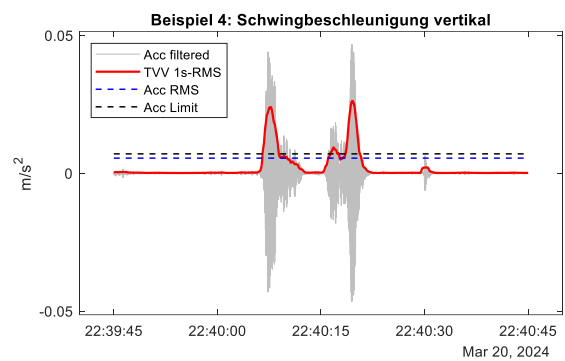


Bild 3.4b Beschleunigungen nach ISO 2631-1

Die nach Kapitel 2.2 ermittelten frequenzbewerteten Beschleunigungen sind in Bild 3.4b grau dargestellt. Der RMS-Wert über das ganze Signal beträgt  $0.0054 \text{ m/s}^2$ . Mit einer maximal gemessenen frequenzbewerteten Beschleunigung von  $0.047 \text{ m/s}^2$  beträgt der Crest-Faktor 8.7. Die TVV sind in Bild 3.4b rot dargestellt, zudem ist in grau strichliert der Richtwert nach Bild 2.2b eingezeichnet. Der MTVV-Wert liegt mit  $0.026 \text{ m/s}^2$  klar oberhalb des Richtwertes für Wohnungen.

Das Gebäude befindet sich einer reinen Wohnzone. Nach der DIN 4150-2 ist somit die Zeile 2 relevant. Da es sich um eine Wohnnutzung handelt und die Ereignisse auch in der Nacht auftreten, gilt nach Bild 2.2b der Richtwert  $0.007 \text{ m/s}^2$  für transiente Ereignisse. Die aus den Schwinggeschwindigkeiten ermittelte bewertete Schwingstärke  $KB_F$  nach DIN 4150-2 ist in Bild 3.4c dargestellt. Zudem sind die Anhaltswerte  $A_u$  und  $A_o$  für den Tag und die Nacht ( $A_o$  am Tag liegt bei 3, ist somit nicht sichtbar) eingezeichnet. Mit einem  $KB_{Fmax}$  von

0.87 sind die Anhaltswerte  $A_u$  am Tag klar überschritten zudem ist der Anhaltswert  $A_0$  in der Nacht überschritten. Nach dem Vorgehen der DIN (Bild 2.3a) sind die Anforderungen der Norm somit insgesamt nicht eingehalten

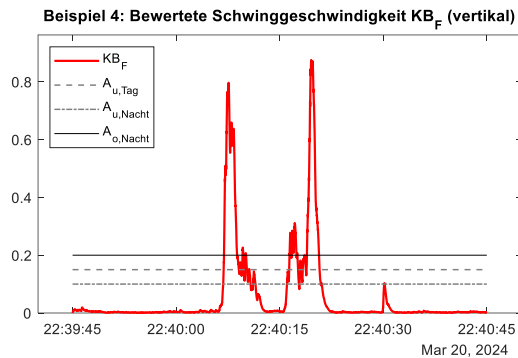


Bild 3.4c Auswertung nach DIN 4150-2.

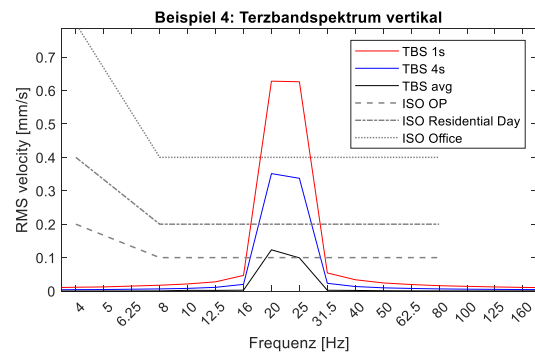


Bild 3.4d Terzbandspektren und Beurteilung nach ISO 10137

Werden aus den gemessenen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten die Terzbandspektren gebildet, so zeigt sich die Situation wie in Bild 3.4d dargestellt. Dabei wurde einerseits das gemittelte RMS-konforme Terzbandspektrum über die gesamte Signallänge ermittelt («TBS avg»). Zudem werden die Max-Hold-Terzbandspektren in 1- und 4-Sekunden Zeitfenstern («TBS 1s» und «TBS 4s») mit jeweils 50% Überlappung gebildet und dargestellt. Das Kriterium «ISO-Residential» ist nicht eingehalten, sofern ein kurzes Zeitfenster zur Ermittlung der Terzbandspektren verwendet wird.

Nachdem die Ursache der störenden Erschütterungen gefunden war, wurde der Fensterbauer aufgeboten um das Schiebefenster zu warten. Die Störungen treten seither nicht mehr auf.

#### 4 Diskussion und Erkenntnisse

Bei der Beurteilung von spürbaren Erschütterungsereignissen ist ein breites Spektrum an Parametern zu beachten. Messtechnisch eindeutig erfassbare Größen wie Schwingamplituden, Schwingrichtung und Frequenzgehalt einer Erschütterung können gut beurteilt und eingeordnet werden. Bei nicht kontinuierlichen Erschütterungsereignissen unterschiedlicher Dauer oder auch bei immer wieder auftretenden impulsartigen Erschütterungen mit variierenden Amplituden und Frequenzgehalt ist eine einfache Einordnung kaum mehr möglich, einzig die DIN 4150-2 liefert dazu einen fundierten Ansatz. Neben den theoretisch fassbaren physikalischen Eigenschaften eines Erschütterungsereignisses sind auch zahlreiche weiche, oft unbekannte Parameter in die Beurteilung mit einzubeziehen. So spielen die kulturelle Herkunft, die physische und psychische Verfassung der betroffenen Personen, die Umgebung und viele andere Faktoren in der Beurteilung, wie eine Person ein Erschütterungsereignis erlebt und beurteilt mit hinein. Solche Faktoren in eine normative Beurteilung zu integrieren ist kaum möglich.

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass insbesondere bei den kontinuierlichen Ereignissen mit moderaten Erschütterungsamplituden die Richt- und Anhaltswerte zwar eingehalten sind, einige bzw. viele der betroffenen Personen sich aber stark gestört fühlten. Dies gilt vor allem für ruhige Tätigkeiten wie konzentriertes Arbeiten im Büro wie auch für Wohnen. Bei den beiden Beispielen mit impulsartigen Erschütterungen widerspiegeln die Richt- und Anhaltswerte das Empfinden der Betroffenen deutlich besser als bei den Beispielen mit den kontinuierlichen Erschütterungen.

Bei kontinuierlichen Erschütterungen und ruhigen Tätigkeiten empfiehlt es sich, die Hinweise der ISO 2631 [2, 3] oder auch von Griffin [4], dass sich Personen schon gestört fühlen sobald die Erschütterungen wahrnehmbar sind, Rechnung zu tragen.

Bei impulsartigen Erschütterungen sind für die Beurteilung kurze Zeitfenster aussagekräftiger als längere Zeitfenster. Die Integration innerhalb kurzer Zeitfenster, wie die DIN 4150-2 in 1/8-Sekunden oder die ISO 2631 in 1-Sekunden gibt den kurzen impulsartigen Ereignissen ein entsprechendes Gewicht. Längere Mittelungs- bzw. Integrationsdauern bergen die Gefahr, dass die Ereignisse zu stark gemittelt werden. Diese Aussagen sind aber immer bezüglich der Anwendung zu prüfen (siehe Anhang A).

## 5 Literatur

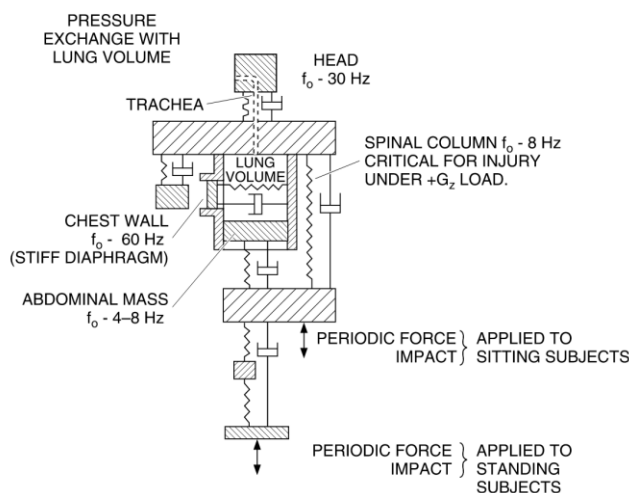
- [1] Reiher, H., Meister, F.J. Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. *Forsch Ing-Wes* 2, 381–386 (1931)
- [2] ISO-2631-1:1997, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997, Geneva, Switzerland, International Standards Organization
- [3] ISO 2631-2:2003, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)
- [4] Griffin M.J., Handbook of Human Vibration, Academic Press, London, 1990
- [5] DIN 4150-2:1996, Erschütterungen im Bauwesen; Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
- [6] Harris' shock and vibration handbook, Cyril M. Harris, Allan G. Piersol, Chapter 42: Effects of Shock and Vibration on Humans, by Henning E. von Gierke and Anthony J. Brammer
- [7] ISO 10137:2007, Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations
- [8] Colin G. Gordon, "Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment," Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE) Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems Vol. 3786, Denver, CO, July 1999.
- [9] VDI 2038-2, Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen: Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung

### Anhang A: Mittelungszeiten in den Bewertungen

Im folgenden Abschnitt wird die Problematik der Mittelungszeit bzw. der Integrationszeit, wie sie auch genannt wird, an einem fiktiven Beispiel aufgezeigt.

Typischerweise werden werden die Erschütterungen am Boden gemessen. Der Mensch beurteilt diese Erschütterungen aber nicht direkt bei den Füßen auf denen er steht, sondern viele Körperteile oder auch Organe führen zusätzlich ein dynamisches Eigenleben, welche für die effektive Wahrnehmung relevant sind. Dies kann sehr abstrahiert mit einfachen Schwingern mit Massen und Federn (Eigenfrequenzen) sowie Dämpfungskonstanten beschrieben werden (Bild A.1). Analog kann das Verhalten einer erschütterungsempfindlichen Anlage beschrieben werden (Bild A.2). Wobei beim Menschen die Dämpfungskonstanten höher anzusetzen sind als bei einer erschütterungsempfindlichen Anlage. Die relevanten Eigenfrequenzen können aber im selben Frequenzbereich auftreten, die durchaus in den im Bauwesen relevanten Frequenzbereich fallen.

Die Problematik besteht nun darin, dass auf dem Boden gemessene Erschütterungen beurteilt werden müssen, obwohl diese durch das dynamische System Mensch oder Anlage verändert und prinzipiell diese internen Erschütterungen beurteilt werden müssen.



**FIGURE 42.5** Lumped parameter biodynamic model of the standing and sitting human body for calculating motion of body parts and some physiological and subjective responses to vertical vibration. The approximate resonance frequencies of various subsystems are indicated by  $f_0$ . (von Gierke.)

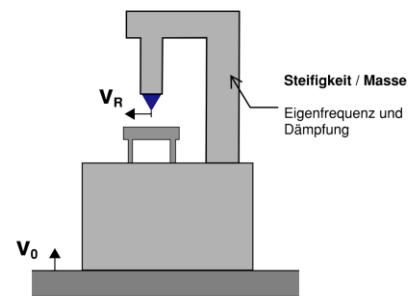


Bild A.1 Biomechanisches Modell eines Menschen. Figure 42.5 aus [7]

Bild A.2 Prinzipskizze eines schwingungsempfindlichen Geräts in Anlehnung an [9]

Um die Problemstellung zu untersuchen werden drei Signale betrachtet, wobei deren maximale Amplituden gleich gross sind. Es soll sich um vertikale Erschütterungen handeln, die am Aufstellort gemessen wurden. In Bild A.3 sind die Signale, jeweils als 30 Sekunden Zeitintervalle dargestellt: Ein reiner Sinus mit 10 Hz («Sinus 10 Hz»), ein Impuls mit ca. 0.1 Sekunden Impulsdauer («Impulse 0.1 s») und ein Impuls mit Dauer ca. 0.5 Sekunden und einem Ausschwingen bei 10 Hz («Impulse Res 0.1 s») vorhanden ist. In Bild A.4 ist zur besseren Visualisierung ein 1.0 Sekunden Zeitintervall des gesamten Signals dargestellt.

Untersucht wird nun ein fiktiver Mensch bzw. eine fiktive Anlage abstrahiert als Einmassenschwinger (SDOF, Single Degree of Freedom) mit einer Eigenfrequenz von 10 Hz und unterschiedlichen Dämpfungskonstanten  $D = 1\%, 5\%, 10\%$  und  $50\%$  (Bild A.9). Dazu wird das in Bild A.3 gezeigte Signal als Fusspunktanregung des Einmassenschwingers  $v_0$  verwendet und die Antwort auf der Masse des Schwingers  $v_{SDOF}$  ermittelt. In Bild A.5 sind die durch den Einmassenschwinger verstärkten Signale beispielhaft für eine Dämpfungskonstante  $D = 10\%$  dargestellt.

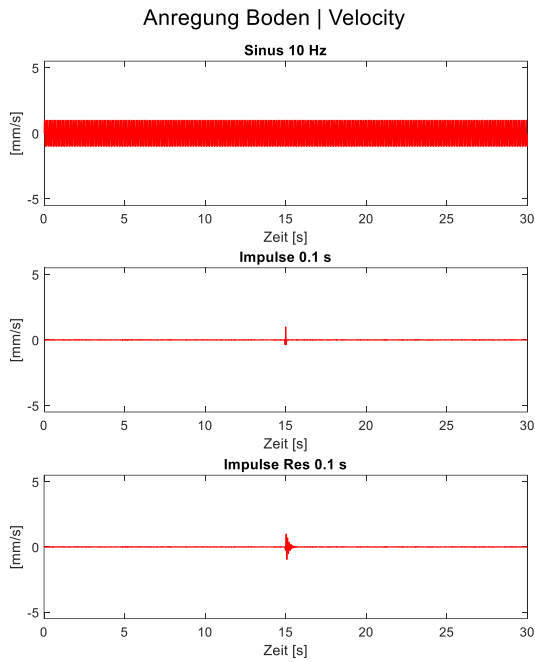


Bild A.3 Verwendete künstliche Signale

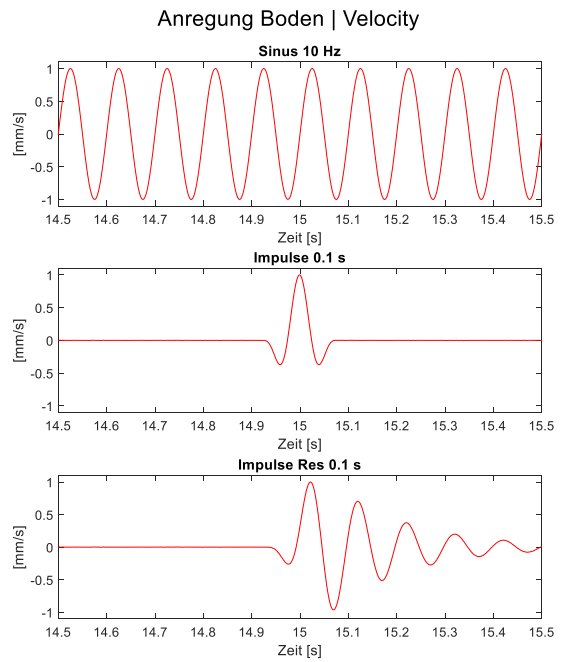


Bild A.4 Zeitlicher Zoom der Signale aus Bild A.3

Wie zu erwarten ist, wird der reine Sinus um einem Faktor  $5 = 1/(2 \cdot D)$  verstärkt. Der reine Impuls wird aufgrund des gewählten Verhältnisses Impulslänge zu Periodenlänge des Schwingers um etwa einen Faktor 2 verstärkt und der gemischte Impuls mit einem Faktor dazwischen. Bei kleinerer Dämpfung wird der reine Sinus stärker verstärkt, während der reine Impuls bei einem Faktor 2 Verstärkung bleibt.

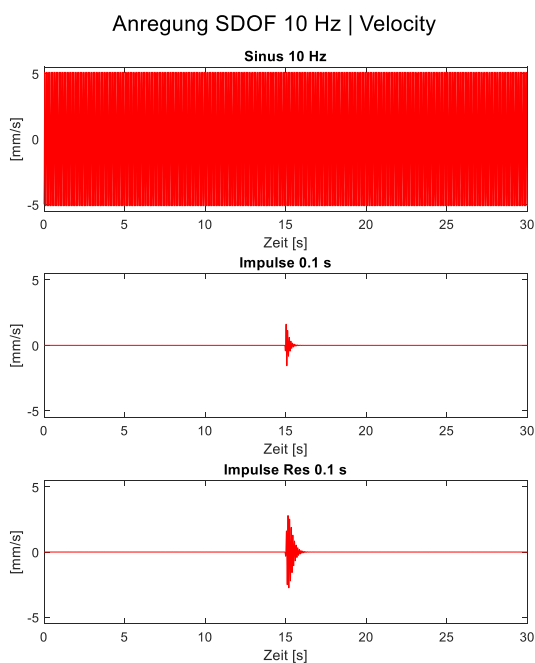


Bild A.5 Durch den Einmassenschwinger (10 Hz und 10 % Dämpfung) verstärkte Signale

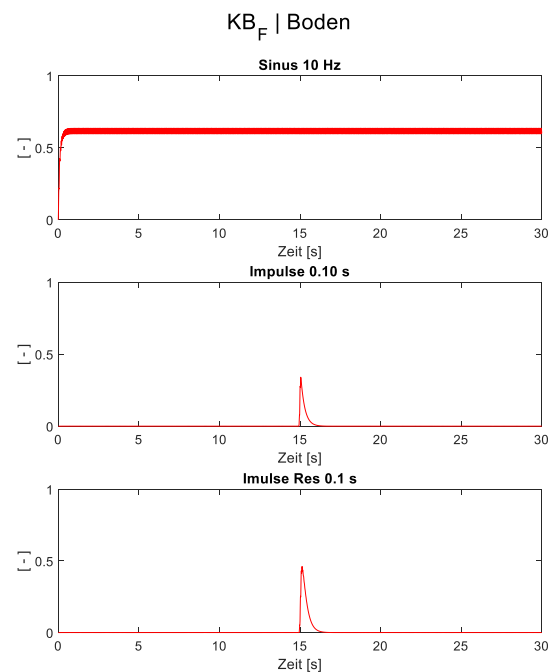


Bild A.6 Beurteilung der Signale am Aufstellort nach DIN 4150-2



Die drei Signale am Boden werden nun analog den im Beitrag gezeigten Beurteilungsverfahren bewertet. In Bild A.6 ist die Bewertung nach der DIN 4150-2, in Bild A.7 nach der ISO 2631 und in Bild A.8 mit Max-Hold-Terzbandspektren mit unterschiedlichen Fensterlängen bzw. Mittelungszeiten (1 Sekunde, 4 Sekunden und 30 Sekunden = avg) abgebildet.

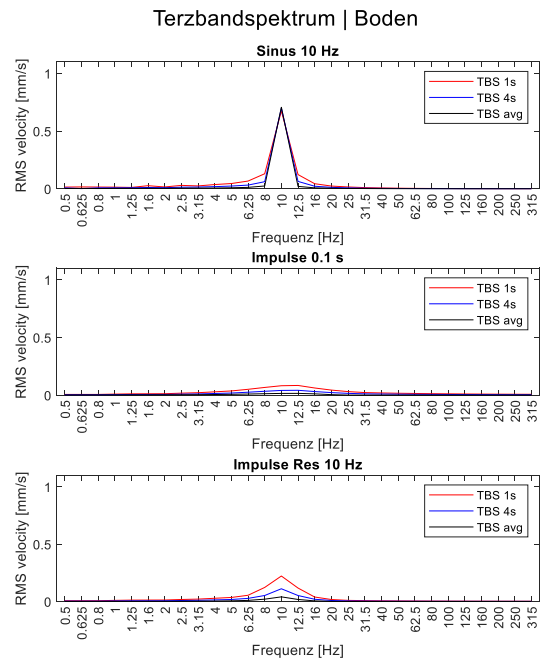
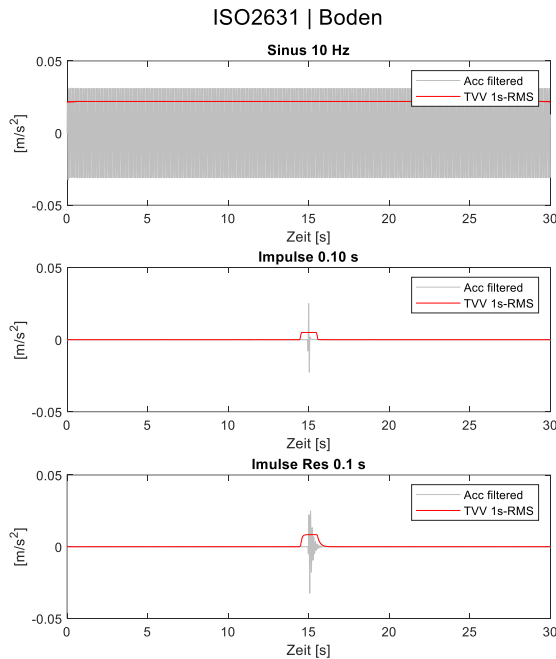


Bild A.7 Beurteilung der Signale am Aufstellort nach ISO 2631

Bild A.8 Beurteilung der Signale am Aufstellort mit Max-Hold-Terzbandspektren

Geht man nun vereinfachend davon aus, dass unabhängig von der Einwirkungsdauer und Häufigkeit der Einwirkung, die maximale «im» Menschen bzw. im Gerät auftretende Erschütterung massgebend ist, so bedarf die Bewertung der am Aufstellort gemessenen Erschütterungen je nach Charakteristik des Empfängers und der Einwirkung einer unterschiedlichen Gewichtung. Ein reiner Sinus am Aufstellort kann, sofern er eine Resonanz trifft, klar störender sein als ein Impuls mit derselben Amplitude, da die Resonanzüberhöhung beim Impuls deutlich kleiner ist. Daher muss ein Verfahren, das die am Boden gemessenen Erschütterungen behandelt, dieses Verhalten berücksichtigen.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Verfahren stark vereinfacht bezüglich der oben erwähnten Problematik untersucht. Hierzu wird das Verhältnis der Maximalwerte bei unterschiedlicher Anregung betrachtet. In Bild A.9 ist das Vorgehen beispielhaft für den Vergleich zwischen «Sinus 10 Hz» und «Impuls 0.1 s» für die Bewertung nach DIN 4150-2 gezeigt. Bei der Untersuchung wird davon ausgegangen, dass der reine Sinus als Referenz genommen, da er zu den höchsten Amplituden infolge der Verstärkung des Einmassenschwingers führt. Eine Impuls-Anregung führt auf dem Einmassenschwinger zu kleineren Amplituden, die weniger störend sind. Das Verhältnis dieser Erschütterungsamplituden wird in Bild A.9 als  $V_{VSDOF}$  bezeichnet. Ein Bewertungsverfahren das die unterschiedlichen gemessenen Erschütterungen (Sinus und Impuls) am Boden beurteilt, müsste nun dieses Verhältnis entsprechend abbilden. In Bild A.9 ist für die Bewertung nach DIN 4150-2 das Verhältnis zwischen der reinen Sinusanregung am Boden und der Impulsanregung der ermittelten maximalen  $K_{BF,B}$ -Werte als  $V_{K_{BF,B}}$  bezeichnet. Im Idealfall, wenn das Beurteilungsverfahren der gemessenen Erschütterungen am Boden in der Lage wäre das dynamische Innenleben des Menschen oder der Anlage abzubilden, so müssten die beiden Verhältnisse etwa gleich sein ( $V_{VSDOF} = V_{K_{BF,B}}$ ).

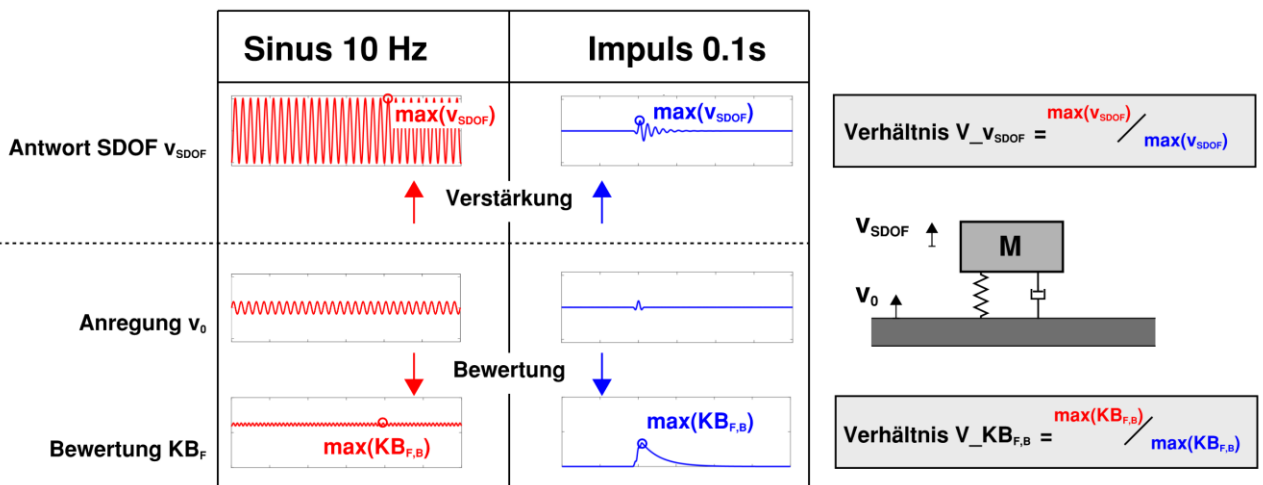


Bild A.9 Vorgehen bei der Beurteilung der verschiedenen Bewertungsverfahren, beispielhaft gezeigt beim Vergleich zwischen «Sinus 10 Hz» und «Impuls 0.1 s» für die Bewertung nach DIN 4150-2.

Die Bilder A.10 und A.11 zeigen nun die Resultate dieser Untersuchung für die für die Verhältnisse zwischen «Sinus 10 Hz» und «Impuls 0.1 s» bzw. zwischen «Sinus 10 Hz» und («Impuls Res 0.1 s»). Die Säulen beschreiben für verschiedene Dämpfungskonstanten das Verhältnis  $V_{v_{SDOF}}$  der Maxima "im" Menschen oder in der Anlage. Die Linien beschreiben für die verschiedenen Auswerteverfahren das Verhältnis der Maxima am Boden (diese sind unabhängig von der Dämpfung "im" Menschen oder in der Anlage). Das Verhältnis wird je nach Verfahren als  $V_{KB_{F,B}}$ ,  $V_{ISO_B}$ ,  $V_{TBS_{1s,B}}$ , oder  $V_{TBS_{4s,B}}$  bezeichnet.

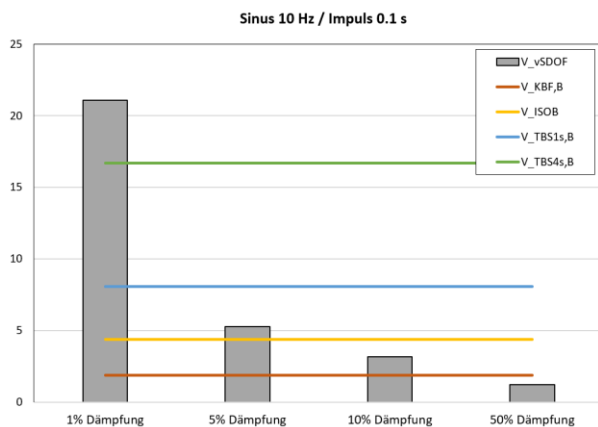


Bild A.10 Vergleich der Verhältnisse der Verstärkung durch den Einmassenschwinger und den Verhältnissen der einzelnen Bewertungsverfahren zwischen «Sinus 10 Hz» und «Impuls 0.1 s»

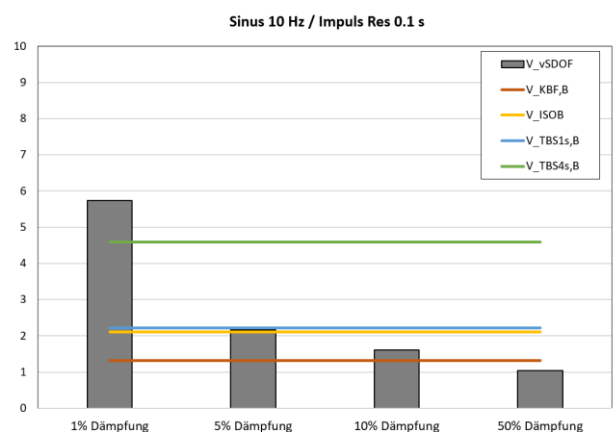


Bild A.11 Vergleich der Verhältnisse der Verstärkung durch den Einmassenschwinger und den Verhältnissen der einzelnen Bewertungsverfahren zwischen «Sinus 10 Hz» und «Impuls Res 0.1 s»

Ein Beispiel zur Erläuterung: Für die Betrachtung «Sinus 10 Hz» zu «Impuls 0.1 s» im Falle eines Einmassenschwingers mit 1% Dämpfung eignet sich das Verfahren der Terzbandspektren mit 4 Sekunden Zeitfenstern am besten. Bei allen anderen Bewertungsmethoden werden die Impulse zu stark gewichtet. Für mittelstark gedämpfte Systeme eignen sich Verfahren mit kürzerer Mittelungszeit wie den Terzbandspektren mit 1 Sekundenzeitfenstern oder das Verfahren der ISO, welches auch auf 1 Sekunden Mittelungszeiten beruht, am besten. Bei stark gedämpften Systemen sind die Verfahren nach ISO oder DIN am besten geeignet, was auch Sinn macht, da diese Verfahren für Personen entwickelt wurden (Dämpfungskonstanten im biomechanischen Modell sind hoch). Zudem ist zu beachten, dass auch die Art des Signales einen Einfluss auf die Güte der Bewertung hat.

Als Schlussfolgerung kann festgehalten werden, dass die Wahl des optimalen Verfahrens zur Beurteilung einer am Boden gemessenen Erschütterungseinwirkung stark von der Anwendung abhängig ist. So eignet sich zur Beurteilung von Anlagenschütterungen die Verfahren nach den Terzbandspektren mit Zeitfenstern zwischen 1 und 4 Sekunden am besten. Auch hier ist noch zu unterscheiden zwischen Anlagen mit sehr kleiner Dämpfung von 1 % und Anlagen mit eher grösserer Dämpfung 5 %. So ist ein typisches massives Mikroskop, welches fest auf einem Tisch steht anders zu beurteilen als ein Deckenmikroskop, welches durch die Bauart bedingt (langer Arm mit Gelenken) höhere Dämpfungskonstanten aufweist. Auch ersichtlich ist, dass die Beurteilung der menschlichen Wahrnehmung durch die beiden üblichen Verfahren der DIN und der ISO zu unterschiedlichen Aussagen führen kann.