

Nr.5

Meßgrößen und Meßwerte
bei
Erschütterungsimmissionen

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Bibliothek

Herausgeber

Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NW, Essen

1979

Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte
bei Erschütterungsimmissionen

1000
Dr. H. Splittgerber
✓

ZUR PROBLEMATIK DER MEßGRÖßEN UND MEßWERTE BEI ERSCHÜTTERUNGS- IMMISSIONEN

Dr. H. Splittgerber

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Beschreibung von Erschütterungsmeßsignalen und die bisherige Auswertung von Erschütterungsregistrierungen nach den einschlägigen Regelwerken werden dargestellt. Erschütterungsmeßwerte sind wegen des Zusammenhanges zur Wirkung von Erschütterungen auf Menschen bedeutsam. Auf die Unterschiede der Zahlenwerte bei der Ermittlung von Scheitelwerten im Vergleich zu Meßwerten aus Mittelungsverfahren wird aufmerksam gemacht. Da die exponentielle Mittelung bei Geräuschemessungen angewendet und auch für Erschütterungsmessungen erwogen wird, wird der Einfluß der exponentiellen Mittelung (Zeitbewertung) mit verschiedenen Integrationszeitkonstanten für einige praktische Fälle des Immissionsschutzes aufgezeigt. Die zeitbewerteten Erschütterungssignale sind immer kleiner als die Maximalwerte des unbewerteten Signals. Dies ist von Bedeutung, weil Meßgrößen und Meßwerte eng mit dem Beurteilungssystem im Zusammenhang stehen. Untersuchungen der Einwirkung kurzzeitiger Erschütterungsreize auf den Menschen in Bezug auf die Wahrnehmbarkeit (Fühlbarkeit) haben bisher keinen Anhalt für eine "kritische Integrationszeit des Menschen" gegeben. Werden daher im bestehenden Beurteilungssystem nach der Vornorm DIN 4150, Teil 2, die Meßwerte ohne Begründung durch weitere Wirkungsuntersuchungen geändert, so bedingt dies eine entsprechende Änderung des Bewertungssystems.

S u m m a r y

Possibilities for the description of vibration measuring signals and evaluation of vibration recordings according to pertinent national standards and guidelines are shown. Measured vibration values are important because of the effects of vibrations on man. Differences of numerical values from the determination of peak values in comparison to values from averaging procedures are pointed out. Because exponential averaging (time averaging) is used for noise measurements and also considered for vibration measurements, the effect of the weighted integration/averaging with different integration time constants is demonstrated for several practical cases. The time-weighted vibration signals are always smaller than the maximum of the unweighted signals. This is of importance because measuring quantities and values are closely connected with the evaluation system. Investigations of the effects of impulsive vibrations with short durations on man in regard to perceptibility (sensitivity) do not seem to indicate a "critical integration time of man". Therefore, changing used values in the existing evaluation system according to Standard DIN 4150, part 2, without justification by further investigations entail a corresponding change of the evaluation system.

1. Einführung

Bei der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen, die sich in Wohnungen oder vergleichbaren Räumen aufhalten, ist als Wirkung insbesondere die "Belästigung" von Interesse. Der Begriff "Belästigung" schließt hierbei auch die Begriffe "Störung", "Beeinträchtigung der Wohnannehmlichkeit", "Beeinflussung des Wohnkomforts" oder "angewohnte physikalische Erscheinung in Wohnräumen" ein.

Die unmittelbare meßtechnische Erfassung der aufgezeigten Wirkung mit physikalischen Methoden ist nicht möglich. Es wird daher nicht die Wirkung meßtechnisch erfaßt, sondern es werden physikalische Größen gemessen, die die Erschütterungsimmission kennzeichnen. An festgelegten Immissionsorten werden die Bewegungsvorgänge durch Messung ermittelt. Beim Aufenthalt von Menschen in Wohnungen ist es nicht zweckmäßig, die Erschütterungen an der Einleitungsstelle in den menschlichen Körper zu messen. Man hat als Immissionsort einen Bezugspunkt festgelegt. Nach der Vornorm DIN 4150, Teil 2, sollen die Erschütterungen auf dem Fußboden des zu untersuchenden Raumes vorgenommen werden [1]. Trotzdem können die Übertragungsbedingungen vom Fußboden über die Sitz- und Liegemöbel bis zur Einleitungsstelle in den Menschen nicht außer Betracht bleiben.

Am Immissionsort werden die Bewegungsvorgänge durch Absolut-Schwingungsaufnehmer erfaßt und nach Umwandlung und Verstärkung zur Anzeige gebracht [3].

Zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen ist es notwendig, geeignete Meßgrößen und Meßwerte zu verwenden.

Die Meßgröße sollte mindestens folgenden Bedingungen genügen:

- a) Sie sollte Rückschlüsse auf die physikalischen Größen, z.B. auf die Stärke und die Frequenz der Bewegungsvorgänge am Immissionsort in dem hier interessierenden Frequenzbereich von etwa 4 Hz bis 80 Hz, in seltenen Fällen auch von etwa 1 Hz bis 100 Hz ermöglichen.
- b) Es sollte eine Beziehung zwischen der Meßgröße und der betrachteten Wirkung, hier der Belästigung, existieren.
- c) Sie sollte eine Ursachenanalyse ermöglichen.

Einzelne Werte der Meßgröße ändern sich mit der Zeit. Auch an die zur Beschreibung der Bewegungsvorgänge heranzuziehenden Meßwerte sind Bedingungen zu stellen, nämlich:

- 1) Die Meßwerte müssen Merkmal für die Stärke der Erschütterungen sein und Rückschlüsse auf den zeitlichen Verlauf bzw. die Häufigkeit gestatten.
- 2) Meßwerte bzw. die mit ihrer Hilfe geschätzten Kennwerte müssen mit Immissionsrichtwerten verglichen werden können.

Die bei Erschütterungsmessungen gewonnenen Meßsignale, die den Werten der Schwingungsgrößen proportional sein sollen, können durch eine Frequenzbewertung und/oder eine Zeitbewertung (Gewichtung) verändert werden. Dadurch können wirkungsbezogene Erfordernisse berücksichtigt werden, die eine Beurteilung der Erschütterungen erleichtern.

2. Ziel der Untersuchung

Die Vor- und Nachteile der bisher in Regelwerken angegebenen Auswertung von Erschütterungsmessungen werden dargelegt. Weiterhin werden verschiedene Möglichkeiten zur Beschreibung von Erschütterungsmeßsignalen aufgezeigt. Da es für praktische Anwendungen zu aufwendig ist, den vollständigen Signalverlauf zu beschreiben, wird auf die Eigenschaften des Bewegungsvorganges aufmerksam gemacht, die bei Datenreduktionen verlorengehen.

Bei Schwingungsimmissionsmessungen in Gebäuden werden bisher keine zeitlich bewerteten Signale verwendet, wie es z.B. in der Geräuschmeßtechnik üblich ist. Dort wird die sogenannte exponentielle Mittelung (RC-Mittelung) angewendet. Der Einfluß einer exponentiellen Mittelung mit verschiedenen Zeitkonstanten $T = RC$ auf die Änderung des Verlaufs der Erschütterungssignale wird für praktische Fälle des Immissionsschutzes aufgezeigt. Schließlich wird auf den engen Zusammenhang zwischen den Meßgrößen und Meßwerten und dem Beurteilungssystem nach der Vornorm DIN 4150, Teil 2, hingewiesen. Änderungen der Meßgrößen und Meßwerte bedingen entsprechende Änderungen des Beurteilungssystems.

3. Bisherige Auswertung von Erschütterungsregistrierungen in Regelwerken

Nach der VDI-Richtlinie 2057 kann als Meßgröße sowohl der Schwingweg, die Schwinggeschwindigkeit oder die Schwingbeschleunigung gewählt werden [4]. Auch bei der Abfassung der Vornorm DIN 4150, Teil 2, ist keine Meßgröße empfohlen worden, die vorzugsweise verwendet werden sollte [1].

Bei Schwingungsmessungen in Gebäuden werden häufig Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer eingesetzt und als Meßgröße die Schwinggeschwindigkeit verwendet. Sie wird als Meßgröße deshalb bevorzugt verwendet, weil zwischen ihr und der betrachteten Wirkung der Erschütterungen auf Bauteile ein Zusammenhang nachgewiesen worden ist. Die Beanspruchungen sind nämlich bei manchen Bauteilen bei stationären und auch bei transienten Schwingungen mindestens näherungsweise proportional zur Schwinggeschwindigkeit [7, 8]. Auch bei der Wirkung von Erschütterungen auf Menschen ist in einem großen Teil des interessierenden Frequenzbereiches die subjektive Wahrnehmung (Fühlbarkeit) direkt proportional zur Schwinggeschwindigkeit.

In den einschlägigen Regelwerken werden verschiedene Meßwerte verwendet [1, 4, 5, 6].

Nach der Vornorm DIN 4150, Teil 2, Ziffer 4.4 ist die Auswertung von Erschütterungsmessungen wie folgt vorzunehmen:

"Aus der Registrierung sind die maximalen Schwingungsgrößen (Scheitelwerte) und die jeweils zugehörigen Frequenzen zu ermitteln und daraus nach Abschnitt 2.2 die bauwerksbezogene Wahrnehmungsstärke (KB-Wert)".

Man hat seinerzeit auf die Verwendung von Effektivwerten

verzichtet, weil bei beliebigen periodischen und bei nicht-periodischen Schwingungen die Ermittlung eines Effektivwertes die Festlegung einer Integrationszeit voraussetzt, die für Schwingungsvorgänge in baulichen Anlagen nicht begründet werden konnte.

In der VDI-Richtlinie 2057 (Ausgabe Oktober 1963) wurden Scheitelwerte und Effektivwerte gleichrangig behandelt. Die neuen Entwürfe von Blatt 1 und Blatt 2 dieser VDI-Richtlinie stellen dagegen bevorzugt auf die Verwendung von Effektivwerten ab, ohne diese jedoch eindeutig zu definieren [4].

Bei sinusförmigen Schwingungen besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Scheitelwerten \hat{x} und den Effektivwerten x_{eff} ; es gilt

$$x_{\text{eff}} = \hat{x} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Bei transienten und stochastischen Vorgängen ist zur Ermittlung des Effektivwertes das Zeitintervall anzugeben, über das dieser Wert gebildet werden soll. Bei allen nicht-periodischen und damit auch den transienten und stochastischen Vorgängen gilt an sich:

$$x_{\text{eff}} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Der Anwendungsbereich der genannten Regelwerke erstreckt sich vor allem auf sinusförmige Schwingungen; er wird aber auch auf periodische Schwingungen und auf nichtperiodische Vorgänge ausgedehnt.

Diese Ausdehnung des Geltungsbereiches führt zu Problemen bei der Auswertung von Erschütterungsmessungen.

Die in der VDI-Richtlinie 2057, Blatt 1, angedeutete Möglichkeit, daß bei einer zeitlich begrenzten (transienten) Schwingung der Effektivwert aus dem Scheitelwert durch Multiplikation mit dem Faktor 0,71 zu errechnen ist, ist nur eine formale und keine grundsätzliche Lösung [4].

Die aufgezeigte Schwierigkeit wurde auch bei der Bearbeitung des Addendum zum ISO-Standard 2631 erkannt [6]. In Anlehnung an den ISO-Standard 2631 wird zwar auch im Addendum auf die Effektivwerte (rms-Werte) abgestellt. Es wird jedoch angegeben, daß bei impulsförmigen Erschütterungen oder stoßartigen Vorgängen die "Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeiten oder Schwingbeschleunigungen" mit entsprechender Frequenzbewertung (KB-Bewertung) die zu bevorzugenden Meßwerte sind. Zur Umrechnung in Effektivwerte wird im Addendum auch ein Umrechnungsfaktor von $1/\sqrt{2} = 0,71$ genannt.

In den Regelwerken ist die Ermittlung der Meßwerte nicht zweifelsfrei festgelegt. Die Folge ist, daß die Meßwerte nicht eindeutig und miteinander vergleichbar sind.

4. Klassifikation von Erschütterungen und Beschreibung von Erschütterungsmeßsignalen

Bei Erschütterungsmessungen wird die vollständige Beschreibung der Meßsignale durch die Registrierung des gesamten Amplituden-Zeit-Verlaufs im Zeitbereich oder, was gleichbedeutend ist, durch die Fourier-Transformierte im Frequenzbereich erlangt. Dabei ist es in der Regel erforderlich, die betrachtete Zeitdauer, nämlich die Signaldauer, die Meßdauer und die Bezugszeit festzulegen. Nur bei periodischen Schwingungen ist die zu betrachtende Zeitdauer durch die längste Periodendauer eindeutig festgelegt.

Die vollständige Beschreibung der Meßsignale wird oft als zu aufwendig und unpraktisch angesehen. Man sollte bestrebt sein, aus der gewählten Meßgröße geeignete Meßwerte zu gewinnen und aus diesen Kennwerte zu bilden. Von den zur Beschreibung der Erschütterungsmeßsignale dienenden Meßwerten bzw. Kennwerten ist zu fordern, daß die Methode zu ihrer Gewinnung es gestatten muß, diese in objektiver Weise aus den Meßgrößen, d.h. reproduzierbar ohne Interpretationsspielraum für einen Bearbeiter, zu gewinnen.

Wenn man auf die vollständige Beschreibung der Erschütterungsmeßsignale verzichtet, so wird die Erfassung und die Beurteilung einfacher. Zu beachten ist jedoch, daß durch irgendeine gewählte Beschreibungsgröße nur noch bestimmte charakteristische Eigenschaften des Schwingungsvorganges erfaßt werden, andere Eigenschaften des Signals gehen verloren und können nachträglich nicht mehr erkannt werden.

Erschütterungsvorgänge können - wie auch bei anderen Vorgängen üblich - unterteilt werden in deterministische und stochastische Vorgänge. Deterministische

Vorgänge sind solche, die durch einen expliziten mathematischen Zusammenhang beschrieben werden können.

Deterministische Vorgänge werden eingeteilt in periodische und nichtperiodische Vorgänge. Die periodischen Vorgänge können sinusförmig (harmonisch) oder komplex-periodisch sein. Nicht-periodische Vorgänge werden in fast-periodische Vorgänge und in transiente Vorgänge klassifiziert.

Die Zeitverläufe der Schwingungen bei stochastischen Vorgängen, die nicht durch eine mathematische Funktion beschrieben werden können, werden klassifiziert in stationäre Zufallsprozesse und in nichtstationäre Zufallsprozesse. Die stationären stochastischen Vorgänge werden weiterhin unterteilt in ergodische und in nichtergodische Vorgänge [17]. Die nichtstationären Zufallsprozesse kann man weiterhin in spezielle Typen mit nichtstationären Eigenschaften unterteilen. Die aufgezeigte Klassifizierung ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Für die Beschreibung der verschiedenen Typen von Erschütterungsvorgängen werden verschiedene Werte und/oder Funktionen verwendet. Diese sind zum Teil nur für bestimmte Schwingungstypen definiert. Mögliche Beschreibungsgrößen sind:

- die Amplitude
- der Scheitelwert
- der arithmetische Mittelwert
- der quadratische Mittelwert
- der Effektivwert (root-mean-square value;
abgekürzt hier auch als rms-Wert bezeichnet)
- eine zeitbewertete Amplitude (exponentielle
Mittelung)

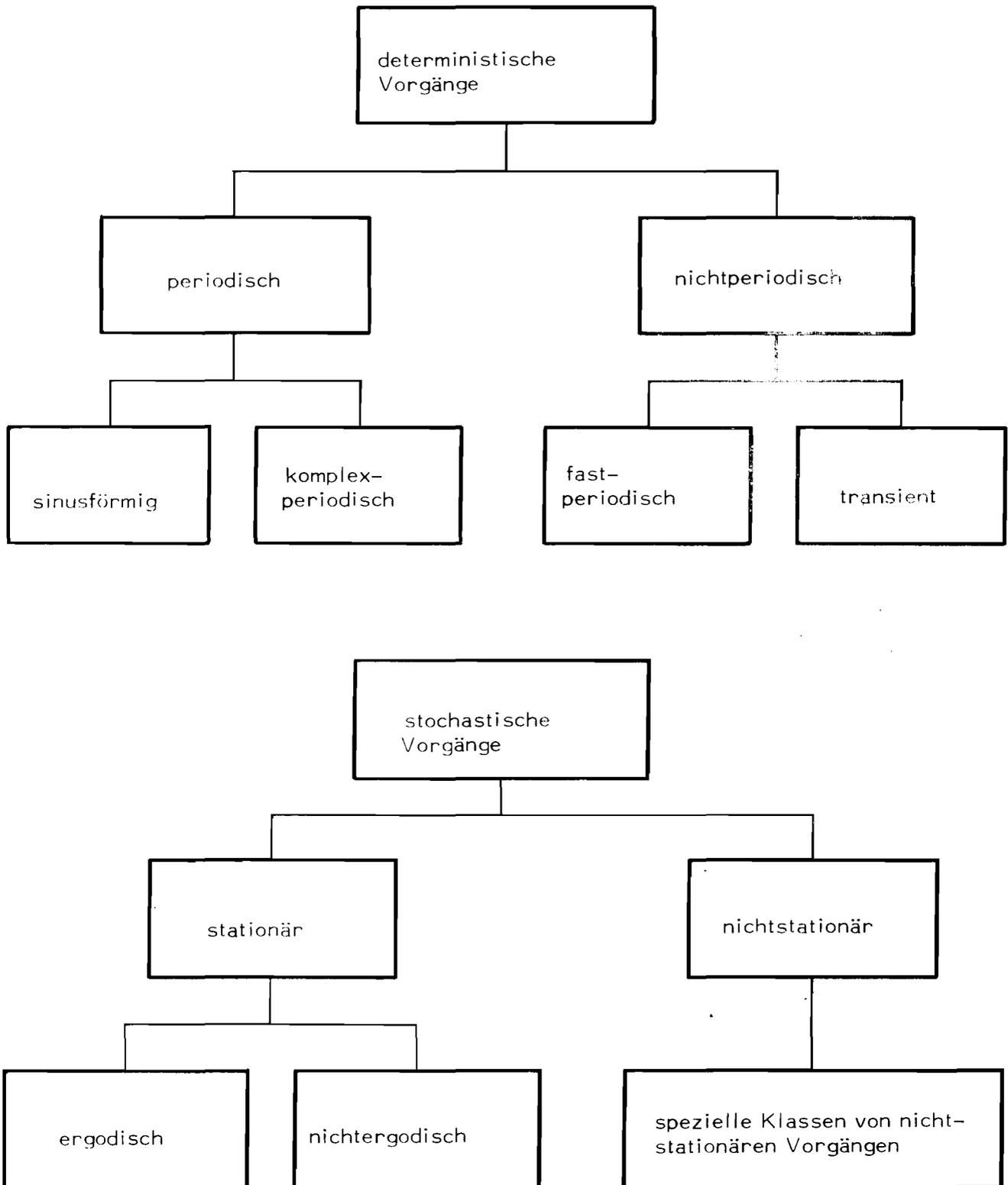


Abb. 1: Klassifizierung von Schwingungsvorgängen

das diskrete oder kontinuierliche Fourier-Spektrum
die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
die Autokorrelationsfunktion
die spektrale Leistungsdichte.

Für die Auswertung im praktischen Immissionsschutz sind Festlegungen zur eindeutigen Ermittlung der entsprechenden Beschreibungsgrößen notwendig.

5. Zusammenhänge zwischen Erschütterungsmeßwerten und Wirkung von Erschütterungen auf Menschen

Die Zusammenhänge zwischen den Erschütterungsmeßwerten und den Wirkungen, hier insbesondere der Wahrnehmbarkeit von Erschütterungen beim Aufenthalt in Gebäuden oder darüber hinausgehend auch der Belästigung, sind derzeit nicht für alle Erschütterungsarten und Umgebungsbedingungen genügend bekannt.

Die Einwirkung von sinusförmigen Schwingungen auf den Menschen bezüglich der Wahrnehmbarkeit ist verhältnismäßig häufig untersucht worden, siehe unter anderem die Veröffentlichungen von Dieckmann, Mc Kay, Miwa, Splittgerber und das dort angegebene Schrifttum [9 - 13]. Die Festlegungen in den Regelwerken basieren im wesentlichen auf diesen Untersuchungen. Dabei ist es gleichgültig, ob als Meßwert der Scheitelwert oder der Effektivwert zur Bestimmung der harmonischen Schwingungen herangezogen wird, denn zwischen beiden besteht ein eindeutiger Zusammenhang. Der Scheitelwert oder der Effektivwert und die Frequenz bestimmen den

Schwingungsvorgang eindeutig.

Die Regelwerke werden jedoch auch zur Beurteilung von Schwingungsgemischen (Schwingungen mit mehreren sinusförmigen Anteilen) und von stochastischen Schwingungsvorgängen herangezogen, weil dafür andere Beurteilungsverfahren nicht vorhanden sind [18]. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, daß für diese Schwingungsvorgänge in der Regel weder der Scheitelwert noch der Effektivwert definiert sind.

Untersuchungen über die Wahrnehmbarkeit von Schwingungsgemischen, komplexen periodischen Vorgängen und transienten oder stochastischen Schwingungen sind kaum durchgeführt worden; berichtet wurde darüber unter anderem von Dupuis, Lange und Miwa [14, 15, 16, 18]. In der Veröffentlichung von Dupuis und Hartung wird zwar der Effektivwert erwähnt, da aber das Zeitintervall nicht angegeben ist, über das die Effektivwertbildung sich erstreckt hat bzw. welche Zeitkonstante bei einer exponentiellen Mittelung verwendet worden ist, bleibt unklar, welcher Meßwert für die Untersuchungen herangezogen worden ist.

Lange zieht dagegen bei seinen Untersuchungen als Maßzahlen die Amplitude bei sinusförmigen Schwingungen heran und die Spitzenwerte der Schwingbeschleunigung bei Schwingungsgemischen [16].

In der Veröffentlichung von Miwa wird schließlich über ein "vibration level meter" berichtet, welches für die exponentielle Mittelung auf zwei Zeitkonstante, nämlich Slow ($\tau = 1\text{ s}$) und Fast ($\tau = 0,2\text{ s}$) eingestellt werden kann [19]. Von Miwa wird darauf hingewiesen, daß bei der Ermittlung von nichtstationären und stoßartigen Erschütterungen mit Hilfe

dieses vibration level meter noch Probleme auftreten.

Derzeit ist noch nicht nachgewiesen, welche Bestimmungsgrößen von stochastischen und transienten Schwingungsvorgängen in bezug auf ihre Wirkung auf Menschen zur Beurteilung am besten heranzuziehen sind.

6. Wahrnehmung (Fühlbarkeit) als Reaktion auf kurzzeitige Erschütterungsreize

Die Einwirkung von Impulsen (kurzzeitigen Erschütterungseinwirkungen im Bereich von Bruchteilen einer Sekunde bis zu einigen Sekunden) bzw. auch von Impulsfolgen mit dazwischen liegenden Pausenzeiten auf Menschen und deren Reaktion (Wahrnehmung) darauf ist verhältnismäßig wenig untersucht worden.

In einer Fußnote des ISO-Standards 2631 ist formuliert: Im Hinblick auf die subjektive Beurteilung der Größe der Erschütterungen scheint es, daß die Integrationszeit des Menschen für die Erschütterungswahrnehmung abnimmt von 2 Sekunden auf 0,8 Sekunden über den Frequenzbereich von 2 Hz bis 90 Hz [5].

Diese Aussage trifft nach neueren Untersuchungen nicht zu [20]. Von Griffin and Whitham wurde die Einwirkung von kurzzeitigen Erschütterungssignalen mit Zeitdauern von 0,1 s bzw. von einer Periodendauer an bei Frequenzen von 4 Hz, 8 Hz, 16 Hz und 32 Hz bis zu 4 Sekunden untersucht. Untersucht wurde der Einfluß dieser Signale auf die Beeinträchtigung des Komforts (discomfort). Weiterhin wurde dies

bei einer Frequenz von 8 Hz bei Einwirkungsauern bis zu 32 s untersucht. Die Ergebnisse stehen im Widerspruch mit dem vorher angenommenen Konzept, daß bei einwirkenden Erschütterungen für jede Frequenz eine "kritische Integrationszeit" für die Reaktion des Menschen auf den Erschütterungsreiz vorliegt. Es wurde keine "kritische Integrationszeit" festgestellt, insbesondere keine, die das Konzept einer Integrationszeit von 1 Sekunde stützt, die von Beitzer zur Diskussion gestellt wurde [21]. Nach den Untersuchungen von Griffin and Whitham hat sich die Verwendung von Effektivwerten (rms-Werten) bei der Beurteilung des Discomforts als nicht geeignet erwiesen [20]. Bei kurzzeitigen Einwirkungen von Erschütterungen ist die hervorgerufene Beeinträchtigung größer als sie nach dem Effektivwert zu erwarten wäre.

Weber hat versucht, aus dem vereinfachten mechanischen "Schwingungssystem Mensch" die Kurzzeitwirkung abzuleiten und diskutiert die Langzeitwirkung mit Hilfe des Modells eines "physiologischen Gedächtnisses" [22]. Von ihm wird auf Widersprüche aufmerksam gemacht, die sich nach seinen Überlegungen mit den Festlegungen in den Regelwerken ergeben.

7. Messung von Effektivwerten und die exponentielle Mittelung von Erschütterungsmeßsignalen

Die zeitliche Mittelung mit oder ohne zeitabhängige Bewertung ist eine häufig angewendete Methode zur Datenreduktion.

Bei periodischen Vorgängen ist die Ermittlung des Effektiv-

wertes eindeutig, da die Mittelung über die Periodendauer zu erstrecken ist. Bei nichtperiodischen und stochastischen Vorgängen, die bei Erschütterungsimmissionen in Bauwerken häufig vorkommen, z.B. bei Erschütterungen, die durch Schmiedehämmer, Exzenterpressen, Fallwerke, Sprengungen, Webmaschinen usw. verursacht werden, erfordert eine zeitliche Mittelung eine begründete Festlegung der Integrationszeit T .

Gerätetechnisch kann die Mittelung von Schwingungsvorgängen auf verschiedene Weise erreicht werden. Man unterscheidet:

- a) Die Langzeit-Mittelung. In diesem Fall wird die Mittelungszeit (siehe Abb. 2) so gewählt, daß sie der gesamten Meßzeit entspricht. Die Meßzeitdauer bedarf dann einer Festlegung.
- b) Die schrittweise Mittelung. Hierbei wird das Signal über eine Zeit T gemittelt; danach findet eine neue Integration über eine weitere Zeit T statt, welche am Ende der vorangegangenen Zeit T beginnt; siehe Abb. 2. Das Ergebnis jeder Integration wird am Ende jedes Zeitabschnittes T angezeigt.
- c) Die laufende Mittelung. Die Integration erfolgt fortlaufend über die letzten T Sekunden des Signals. Die Speicherung bei der Integration eliminiert laufend die Teile des Signals aus der Mittelung, die vor der Zeit T liegen.
- d) Die exponentielle oder sogenannte RC-Mittelung. Obwohl es gerätetechnisch heute möglich ist, auch die Mittelung nach Buchstabe a) bis c) zu realisieren, war in den zurückliegenden Jahren, z.B. in der

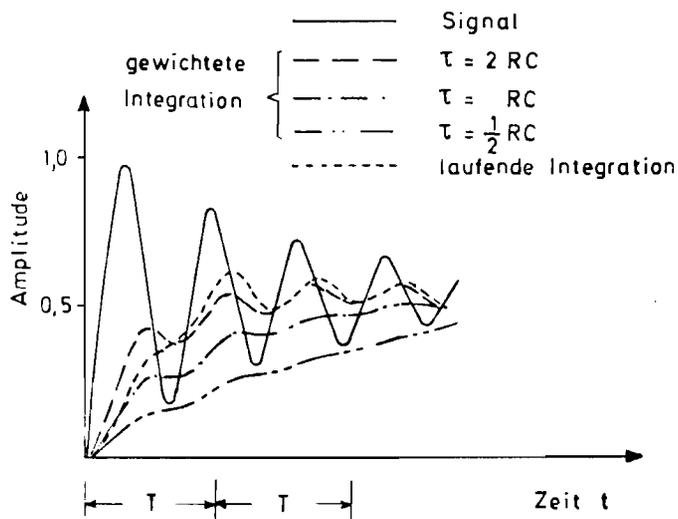
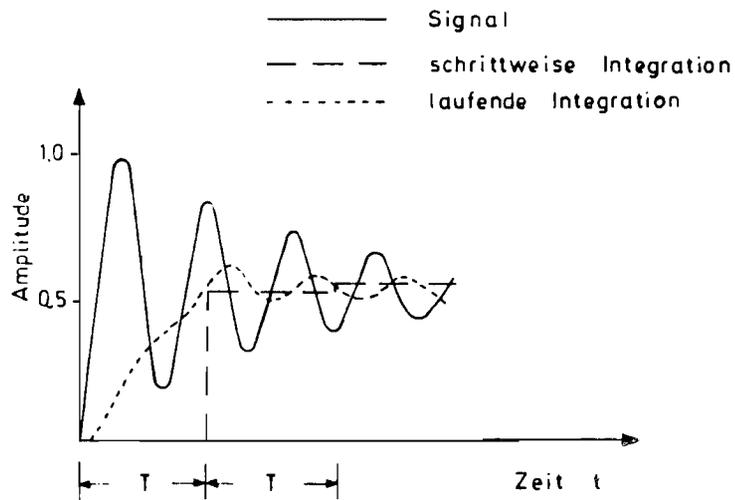


Abb. 2: Möglichkeiten zur Mittelung von Schwingungssignalen

Schallmeßtechnik, die RC-Mittelung gebräuchlich. Diese exponentielle Mittelung erfolgt nach folgendem Zusammenhang:

$$X_{exp.}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t e^{-\frac{1}{\tau}(t-\xi)} x^2(t-\xi) d\xi}$$

In der DIN 45669, Teil 1, wird dieser Wert auch als "Effektivwert" bezeichnet. Dies weicht von der üblichen Definition des Effektivwertes ab und ist nicht korrekt. Diese Art der Mittelung mit zeitlicher Gewichtung wird in der Schallmeßtechnik als Zeitbewertung bezeichnet. Bei der laufenden Integration nach c) wird jeder Momentanwert des Signals in gleicher Weise "gewichtet". Bei der exponentiellen Mittelung werden dagegen die Meßwerte, die im Augenblick der Messung eintreten, stärker gewichtet als diejenigen Meßwerte, die zeitlich vorher aufgetreten sind.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Mittelung von Signalen sind ausführlicher von Wahrmann und Broch dargelegt worden [23].

Bei der Zeitbewertung von Signalen ist die Integrationszeitkonstante $\tau = RC$ ein freier Parameter. In der Schallmeßtechnik war die Größe der Integrationszeitkonstanten zunächst durch gerätetechnische Bedingungen der Anzeigeeinstrumente und nicht vom Problem, d.h. der Wirkung von Geräuschen auf Menschen, begründet. Erst später wurden auch wirkungsbezogene Argumente für die Zeitbewertungen in der

Schallmeßtechnik, nämlich "Fast" ($T = 125$ ms); "Slow" ($T = 1000$ ms) und "Impuls" ($T = 35$ ms) angeführt.

Im Zusammenhang mit der Beurteilung von Erschütterungen auf den Menschen gibt es derzeit noch keine begründeten Argumente für eine Festlegung einer Integrationszeitkonstanten T für eine zeitliche Bewertung von Erschütterungsmeßsignalen.

8. Die Frequenzbewertung von Erschütterungsmeßsignalen

Der Grund für eine Frequenzbewertung liegt darin, daß Schwingungen gleicher Größe aber verschiedener Frequenz unterschiedliche Wirkungen, hier insbesondere unterschiedliche Wahrnehmungsstärken, auslösen können [4]. Die Schwingungsgröße ist daher mit einer frequenzabhängigen Funktion zu bewerten.

Ähnlich wie bei der Bewertung von Schallpegeln gibt es zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren:

- a) die gewichtete Bewertung (weighting-Verfahren)
- b) das Grenzkurvenverfahren (rating-Verfahren)

Beim "weighting-Verfahren" von Erschütterungen mit mehreren diskreten Frequenzen oder spektralen Anteilen kann die Wahrnehmungsstärke rechnerisch für jeden Anteil aus den unbewerteten Schwingungsgrößen mittels der entsprechenden Bewertungsfunktion ermittelt werden. Die Meßwerte der einzelnen spektralen Anteile werden nach der Gewichtung zu einem Gesamtwert zusammengefaßt.

Anstelle der Rechnung kann die Bewertung des gesamten Schwin-

gungssignals auch mit Hilfe eines Bewertungsnetzwerkes erfolgen. Dieses Verfahren ist nach der VDI-Richtlinie 2057 anzuwenden [4_7].

Nach dem "rating-Verfahren" ist das Spektrum der gemessenen Erschütterungen (Oktav- oder Terzspektrum) in ein Grenzkurvendiagramm einzutragen. Die Kennzahl der höchsten, gerade noch berührten Kurve ist dann ein Maß für die Erschütterungen. Nach dem ISO-Standard 2631 wird dieses Verfahren empfohlen. Bei breitbandigen Erschütterungen und bei stochastischen Schwingungen führt diese Methode zu einer schwächeren Bewertung im Vergleich zum "weighting-Verfahren". Weitere Beratungen im zuständigen technischen Komitee der ISO lassen erkennen, daß in Zukunft auch im ISO-Standard 2631 das weighting-Verfahren bevorzugt zur Anwendung empfohlen werden soll.

Je nach der Körperhaltung und der Einwirkungsrichtung der Erschütterungen in bezug auf den menschlichen Körper sind verschiedene Frequenzbewertungskurven festgelegt worden [4_7].

9. Beispiele für die exponentielle Mittelung von Erschütterungsmeßsignalen in praktischen Fällen des Immissions-schutzes

9.1 Art der Erschütterungsquellen und Angaben zu den Meßorten

Um aufzuzeigen, wie die Zeitbewertung die Erschütterungsmeßsignale verändert, wurden einige Erschütterungsmessungen mit unterschiedlichen Integrationszeitkonstanten T ausgewertet. Die

Kenntnis dieser Änderung ist von Bedeutung, weil insbesondere bei transienten Erschütterungssignalen, die im Immissionschutz häufig vorkommen und deren Signaldauer verhältnismäßig kurz ist, die zeitbewerteten Signale je nach gewählter Zeitkonstante T erheblich kleiner als die größten Spitzenwerte der unbewerteten Signale sind. Die Immissionsrichtwerte, nämlich die Anhaltswerte zur Beurteilung nach der Vornorm DIN 4150, Teil 2, beziehen sich jedoch auf KB-Werte, die aufgrund von Scheitelwerten der unbewerteten Signale zu ermitteln sind [1].

In diese Untersuchung wurden Erschütterungsquellen einbezogen, die häufig störende Erschütterungen in der Nachbarschaft verursachen, und zwar folgende:

Webmaschinen,
Rammgeräte,
Steinformmaschinen,
Schmiedehämmer,
Pressen,
Fallwerke,
Gewinnungssprengung in Steinbrüchen.

Nähere Angaben zu den Erschütterungsquellen und zu den jeweiligen Meßorten, an denen die Erschütterungen gemessen worden sind, sind aus Tafel 1 ersichtlich.

9.2 Meßeinrichtung

Die Erschütterungen wurden am Meßort mit Hilfe des Pulse-Code-Modulationsverfahrens (PCM-Verfahren) gespeichert [24]. Die Meßeinrichtung bestand aus einem Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer (Kennfrequenz etwa 4,5 Hz, Lehr'sches Dämpfungsmaß etwa 0,6), einem nachgeschalteten Verstärker, dem PCM-Multi-

TAFEL 1

Art der Erschütterungsquellen, Abstand der Quelle zum Meßort und Typ der jeweils verursachten Erschütterungen für die hier untersuchten Fälle Nr. 1 – Nr. 12

Nr.	Art der Erschütterungsquelle	Abstand des Meßortes zur Quelle	Beschreibung des Meßortes	Typ der Erschütterungen
1	150 Webmaschinen mit Umdrehungszahlen 170 ... 235 U/min	40 m	Mitte Geschoßdecke (Betondecke) im 1. OG in einem 1 1/2 gesch. Einzelhaus; Meßrichtung: vertikal	stochastische Schwingungen, näherungsweise auch als sinusförmige Schwingungen mit einer Frequenz von etwa 20 Hz und regellos schwankender Amplitude zu kennzeichnen
2	Webmaschinen	25 m	in einem Bürogeb., welches baulich mit d. Webhalle verbunden war, im nichtunterkellerten EG auf einer Betonplatte in d. Mitte des Raumes; Meßrichtung: vertikal	stochastische Schwingungen mit vorherrschenden Frequenzen von 40 und 90 Hz
3 und 4	Rüttelramme (Vibrationsramme); Fliehkraft : 870 kN bei $f_E = 23$ Hz	40 m	Mitte Geschoßdecke (Holzbalkendecke) im 1. OG in einem 2 1/2 gesch. Reihenhauses; Meßrichtung: vertikal	schwebungsähnlicher Vorgang mit einer Frequenz von 22–23 Hz
5	Schlagramme (Fabrikat: Delmag G 30)	etwa 35 m	Mitte Geschoßdecke (Holzbalkendecke) im 1. OG eines 2-gesch. Einzelhauses; Meßrichtung: vertikal	wiederholt stoßartig auftretende Vorgänge, vorherrschende Frequenz etwa 20 Hz; Signaldauer des Einzelvorganges: etwa 0.4 s; Zeitdauer zwischen zwei Vorg.: etwa 1.6 s
6	fahrbare Steinformmaschine (Fabrikat: OMAG)	100 m	Mitte Geschoßdecke (Betondecke) im 1. OG eines 1 1/2 gesch. Einzelhauses; Meßrichtung: vertikal	transienter Vorgang über eine Zeitdauer von 4–5 s mit einer vorherrschenden Frequenz von etwa 9 Hz; die Zeitdauer zwischen zwei Vorgängen betrug etwa 6 s
7	Schmiedehammer (Riemenfallhammer) Arbeitsverm. 20 kNm	etwa 30 m	Mitte Geschoßdecke (Holzbalkendecke) im 1. OG eines 3-gesch. Wohnhauses Meßrichtung: vertikal	wiederholt auftretende stoßartige Vorgänge mit einer vorherrschenden Frequenz von 20 Hz; Schlagfolge etwa 40 Schläge je Minute

Tafel 1: Fortsetzung

Nr.	Art der Erschütterungsquelle	Abstand des Meßortes zur Quelle	Beschreibung des Meßortes	Typ der Erschütterungen
8	Schmiedehammer (Gegenschlaghammer mit Bandkupplung; Arbeitsverm. 130 kNm)	etwa 38 m	Mitte Geschoßdecke (Betondecke) im 1. OG eines 2 1/2 gesch. Bürogebäudes; Meßrichtung: vertikal	wiederholt auftretende stoßartige Vorgänge mit einer vorherrschenden Frequenz von etwa 35 Hz; Schlagfolge etwa 30 Schläge je Minute
9	Exzenterpresse (Druckkraft: 3.25 MN)	etwa 18 m	Mitte Geschoßdecke (Holzbalkendecke) im 2. OG eines 3-gesch. Reihenhauses; Meßrichtung: vertikal	wiederholt auftretende stoßartige Vorgänge mit einer vorherrschenden Frequenz von etwa 19 Hz; Signaldauer d. Einzelvorganges: etwa 0.8 s Zeitdauer zwischen 2 Vorgängen: etwa 1.7 s
10	zwei Fallwerke (Gew.d.Stahlkugel: 53 kN; Fallhöhe: 18 m)	etwa 240 m	Mitte Geschoßdecke (Betondecke) im 3. OG eines 4-gesch. Reihenhauses; Meßrichtung: vertikal	wiederholt auftretende stoßartige Vorgänge mit einer vorherrschenden Frequenz von etwa 7.5 Hz und 25 Hz; Signaldauer des Einzelvorganges: etwa 1.5 s; Signaldauer zwischen zwei Vorgängen: etwa 30-60 s
11	Gewinnungssprengung in einem Kalksteinbruch; Großbohrlochsprengung mit 14 Bohrlöchern; Wandhöhe etwa 20 m; Ges.-sprengstoffm. 1400 kg; Zündung: ms-Zündung; max. Sprengstoffmenge je Zündzeitstufe: 100 kg	100 m	Mitte Geschoßdecke (Betondecke) im 1. OG eines 1 1/2 gesch. Einzelhauses; Meßrichtung: vertikal	transienter Vorgang mit einer vorherrschenden Frequenz von etwa 17 Hz; Signaldauer des Vorganges: etwa 0.5 s
12	Gewinnungssprengung in einem Kalksteinbruch; Großbohrlochsprengung mit 28 Bohrlöchern; Wandhöhe etwa 12 m; Gesamtsprengstoffm. 1170 kg; Zündung: ms-Zündung; max. Sprengstoffm. je Zündzeitst.: 88 kg	250 m	Mitte Betonplatte (nicht-unterkellert) im EG eines 1-gesch. Gebäudes (Mannschaftsgebäude) Meßrichtung: vertikal	transienter Vorgang mit einer vorherrschenden Frequenz von etwa 34 Hz; Signaldauer des Vorganges: etwa 1 s

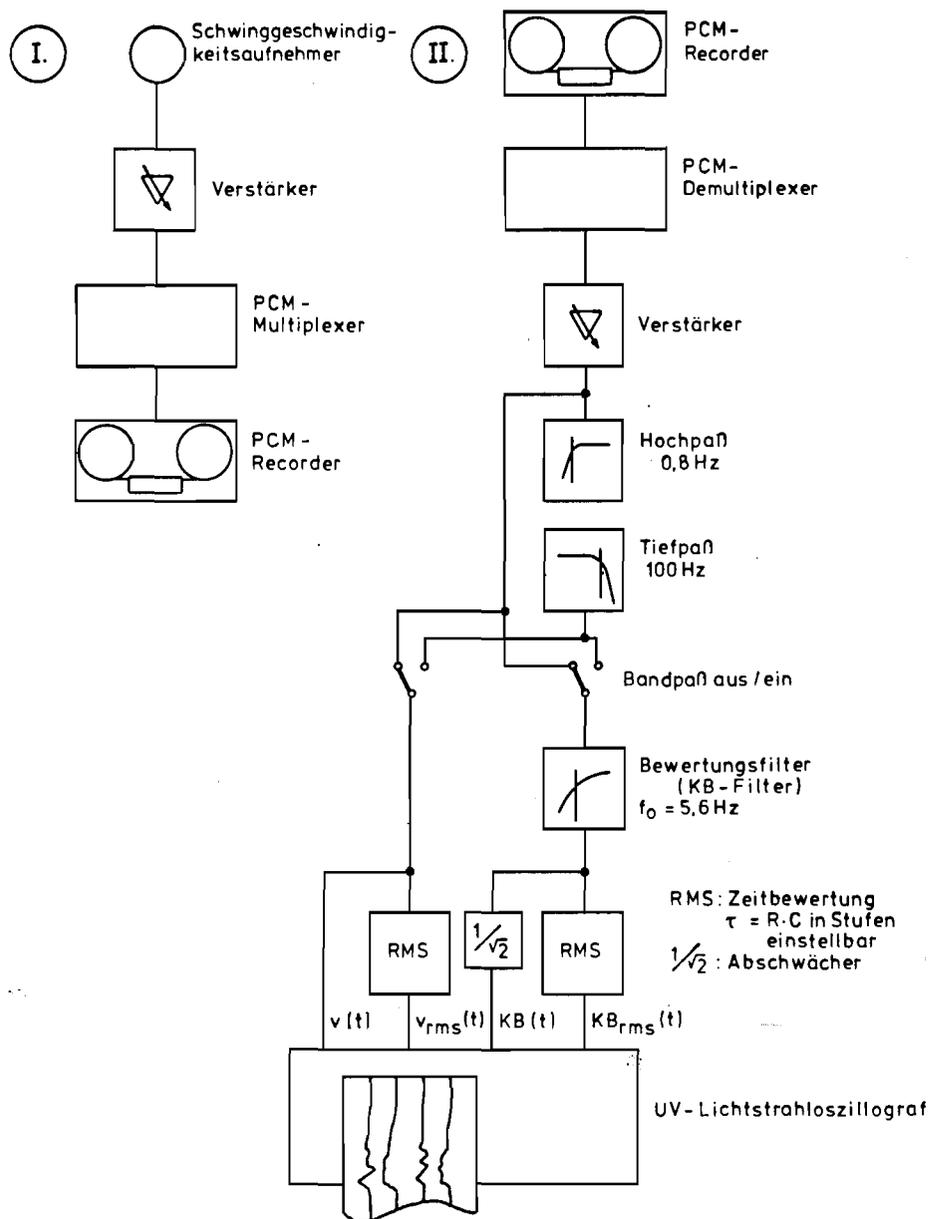


Abb. 3: Blockschaltbilder der Erschütterungsmesseinrichtungen

- I. Aufnahmeteil
- II. Wiedergabe- und Auswerteteil

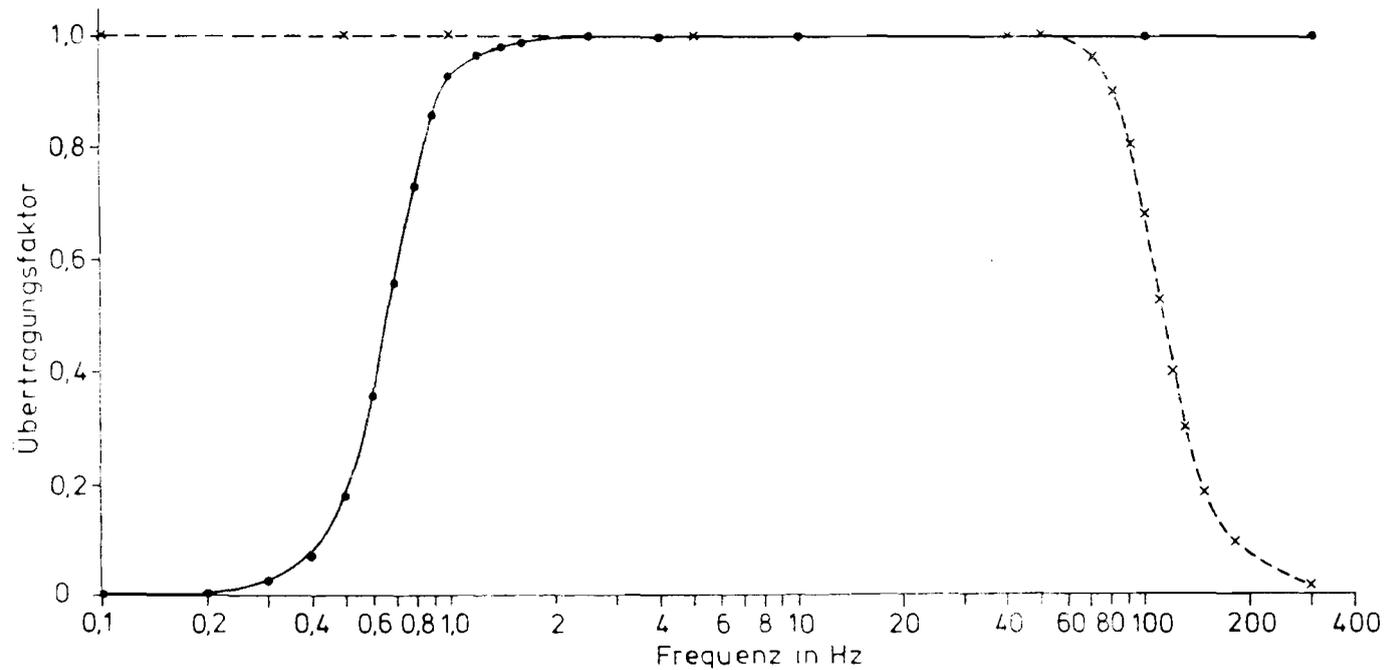


Abb. 4: Amplitudenfrequenzgang des Übertragungsfaktors des Hoch- und Tiefpaßfilters

— Hochpaß ($f_g = 0,8 \text{ Hz}$)
- - - Tiefpaß ($f_g = 100 \text{ Hz}$)

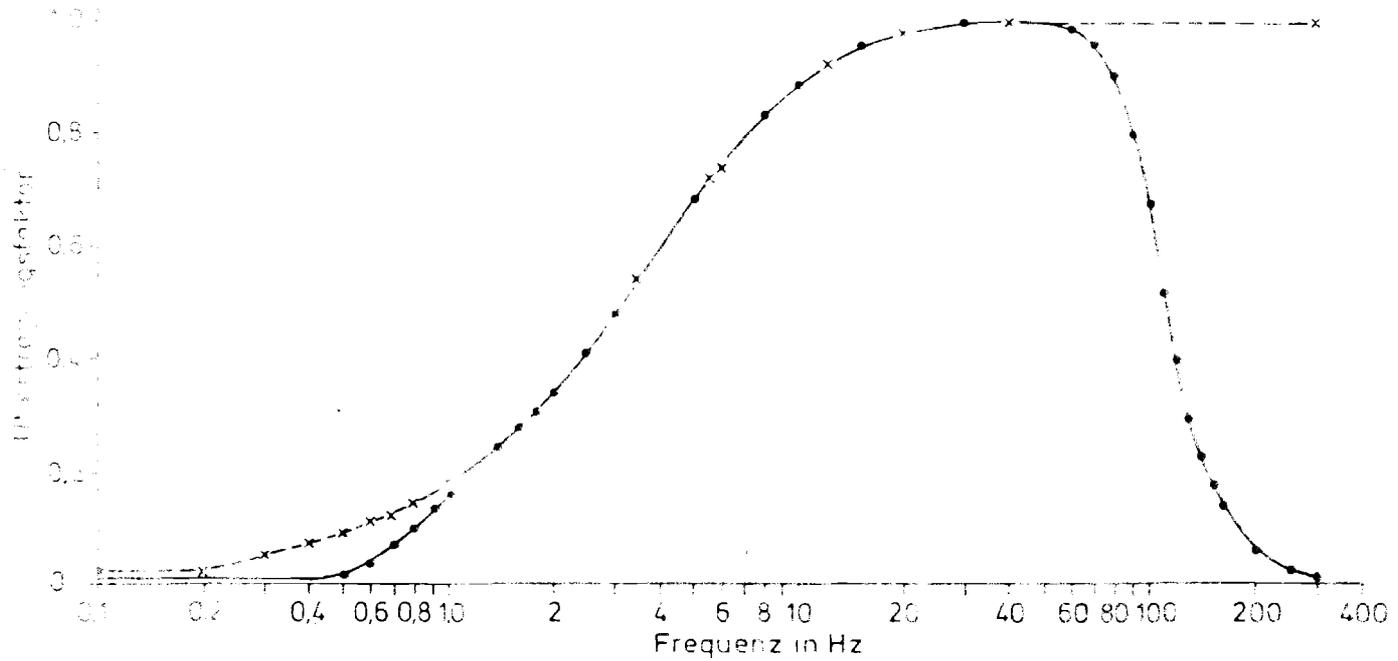


Abb. 5: Amplitudenfrequenzgang des Übertragungsfaktors des Frequenzbewertungsfilters (KB-Filter)
 --- KB-Filter allein
 — KB-Filter + Hochpaß ($f_g = 0,8$ Hz) + Tiefpaß ($f_g = 100$ Hz)

plexer (Grenzfrequenz 400 Hz) und einem Magnetbandgerät. Das Blockschaltbild ist in Abb. 3 dargestellt.

Die auf Magnetband gespeicherten Signale wurden im Labor mit Hilfe einer Meßkette weiterverarbeitet, wie sie in Abb. 3, Blockschaltbild II, angegeben ist.

Zur Frequenzbandbegrenzung war ein 4-poliges-Butterworth-Hochpaßfilter (Grenzfrequenz $f_g = 0,8$ Hz) und ein 4-poliges-Butterworth-Tiefpaßfilter (Grenzfrequenz $f_g = 100$ Hz) vorgesehen [3]. Diese Filter konnten wahlweise zugeschaltet werden. Damit sollte geprüft werden, ob bei den in der Praxis des Immissionsschutzes auftretenden Erschütterungen wesentliche Anteile auch außerhalb des üblicherweise in Betracht stehenden Frequenzbereiches von etwa 1 bis 80 Hz vorkommen. In der verwendeten Meßkette wird durch den eingesetzten Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer unterhalb seiner Kennfrequenz bereits eine Hochpaßwirkung erreicht.

Abb. 4 zeigt den Amplitudenfrequenzgang des Übertragungsfaktors des Hoch- und Tiefpasses. In Abb. 5 ist der Amplitudenfrequenzgang des Übertragungsfaktors dargestellt, wenn die zusätzliche Frequenzbewertung (das KB-Filter) zugeschaltet wird.

Zur Zeitbewertung wurde ein rms-Modul ("True rms-to-DC-Converter") Modell 441 der Firma Analog Devices, Norwood, USA, verwendet. Der Baustein wurde unter Verwendung zusätzlicher verlustarmer Typen von Kondensatoren so eingebaut, daß die Zeitkonstanten T folgende Werte aufwiesen:

T = 0,05 s	T = 1 s	T = 8 s
T = 0,15 s	T = 2 s	T = 16 s
T = 0,5 s	T = 4 s	T = 32 s

Der verwendete "rms-Bildner" zeichnet sich durch eine große Genauigkeit aus. Bei Scheitelfaktoren $F_s \leq 10$ ist sie besser als 1 %. Dies wurde bei periodischen Signalen bis zu Scheitelfaktoren von $F_s = 10$ überprüft und bestätigt.

9.3 Auswertung der Erschütterungsmessungen

Folgende Meßgrößen wurden mit Hilfe eines Lichtstrahloszillographen in Abhängigkeit von ihrem zeitlichen Verlauf registriert.

$v(t)$

$v_{rms}(t)$

$KB(t)$

$KB_{rms}(t)$

Aus der zeitlichen Registrierung der Schwinggeschwindigkeitsamplituden $v(t)$ wurde für einen gewählten Zeitabschnitt der Erschütterungsregistrierung jeweils der Maximalwert v_{max} ermittelt und die zugehörige Frequenz geschätzt. Der gewählte Zeitabschnitt der Registrierung betrug bei stochastischen Vorgängen etwa 1 - 3 Minuten, bei transienten Erschütterungen wurde aus mehreren Erschütterungserregungen ein Vorgang für die Auswertung ausgewählt. Aus dem Wert v_{max} und der jeweils zugehörigen Frequenz wurde der KB_{max} -Wert rechnerisch ermittelt. Diese Auswertung entspricht dem Vorgehen, wie es in der DIN 4150, Teil 2, angegeben ist [1].

Mit Hilfe des Bausteins "RMS" in der Meßkette (siehe Abb. 3) wurden die Erschütterungssignale zeitlich bewertet. Die

Zeitkonstanten τ waren in Stufen einstellbar. Diese Meßgröße, die hier mit $v_{\text{rms}}(t)$ bezeichnet ist, ist ebenfalls zeitabhängig.

In den gewählten Zeitabschnitten wurden die größten Werte $v_{\text{rms, max}}$ ausgewertet.

Die Werte v_{max} wurden zu den Werten $v_{\text{rms, max}}$ ins Verhältnis gesetzt und das Verhältnis

$$F_s = \frac{v_{\text{max}}}{v_{\text{rms, max}}}$$

hier auch als Scheitelfaktor bezeichnet.

Diese Definition weicht von der Festlegung in dem ISO-Standard 2041 ab [25]. Nach diesem ISO-Standard ist für eine oszillierende Größe das Verhältnis des Maximalwertes (Scheitelwertes) zum eigentlichen rms-Wert, also nicht zu einem Wert eines zeitbewerteten Signals, als Scheitelfaktor definiert.

Als weitere Meßgröße wurde die zeitabhängige bauwerksbezogene Wahrnehmungsstärke $KB(t)$ registriert und daraus für den jeweils gewählten Zeitabschnitt der Maximalwert ermittelt, der mit KB_{max}^* bezeichnet ist.

Weiterhin wurde auch das frequenzbewertete Erschütterungssignal (mit Hilfe des KB-Filters) anschließend zeitbewertet (mit Hilfe des rms-Konverters) und aus der Registrierung der Meßgröße $KB_{\text{rms}}(t)$ auch innerhalb des jeweiligen Zeitabschnittes der Maximalwert $KB_{\text{rms, max}}^*$ ermittelt.

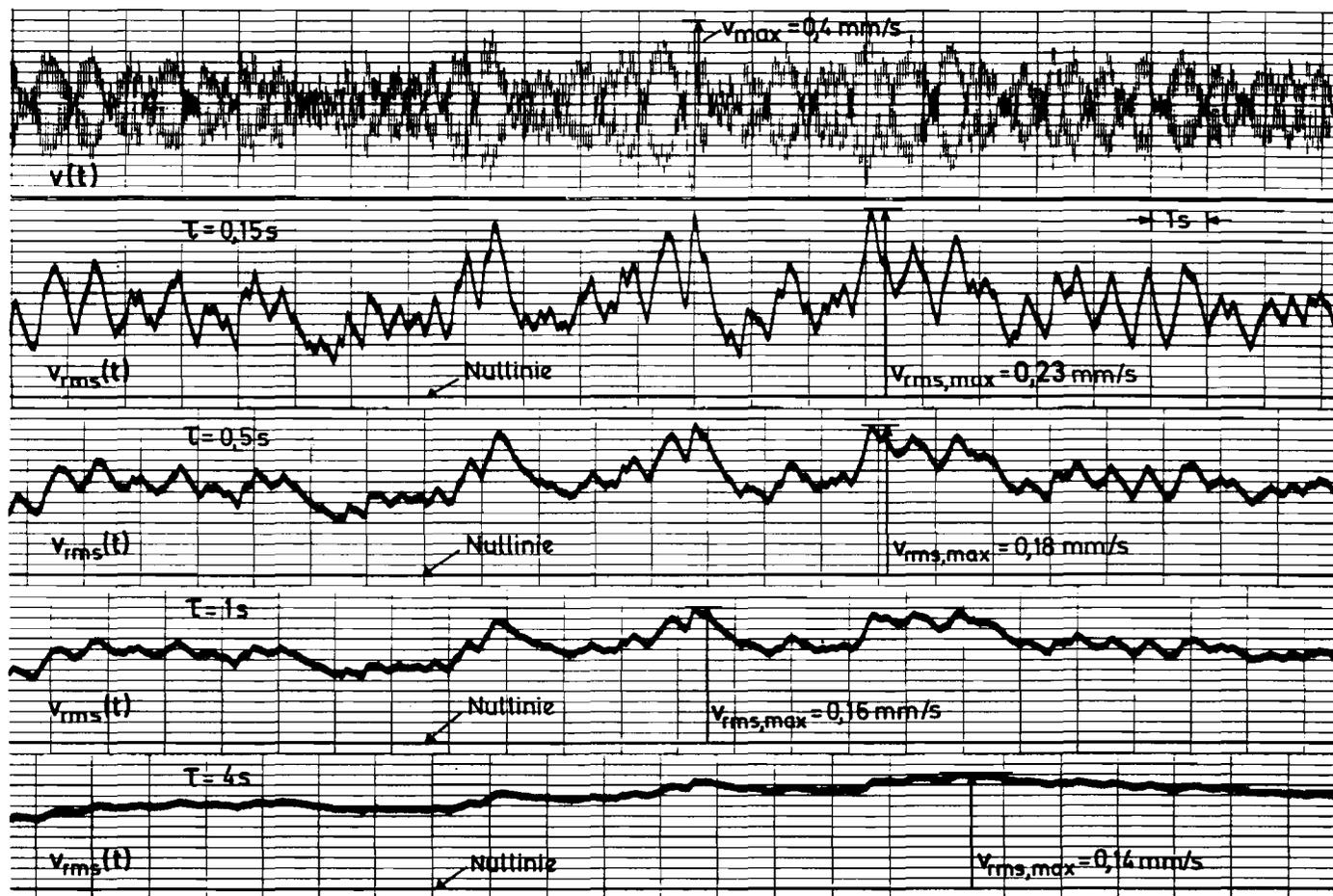


Abb. 6: Ausschnitt aus den Erschütterungsregistrierungen der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ für den Fall Nr. 1 (Weberei)

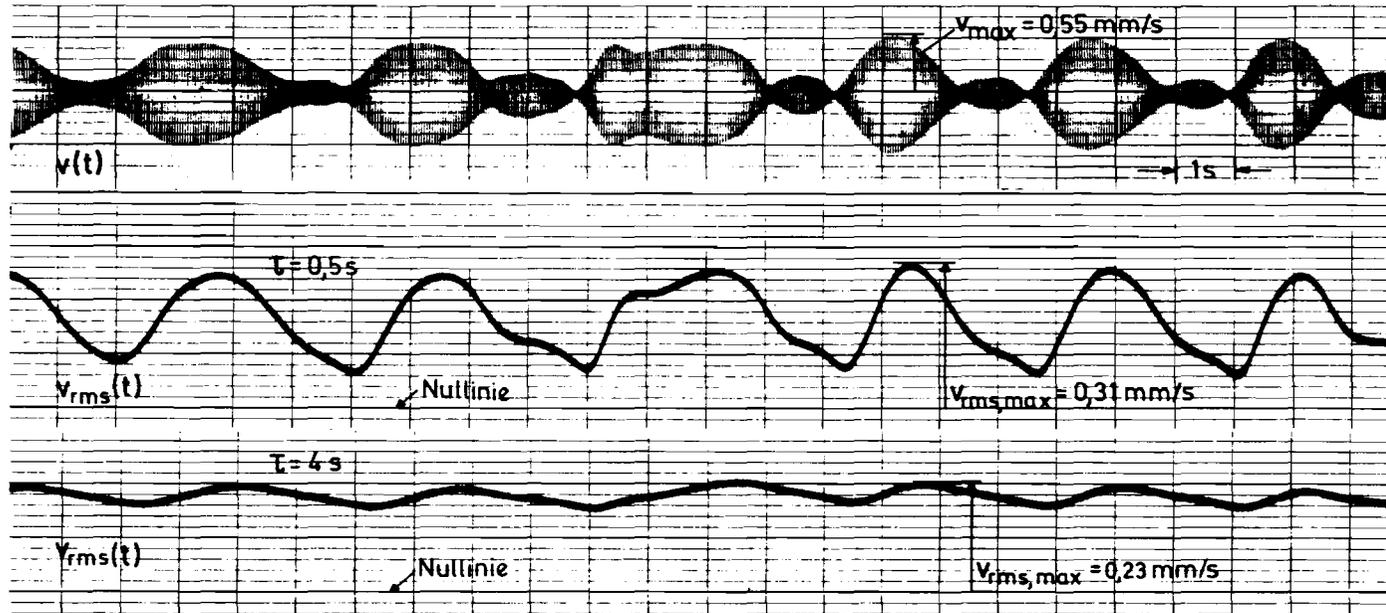


Abb. 7: Ausschnitt aus den Erschütterungsregistrierungen der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ für den Fall Nr. 3 (Rüttelgerät)

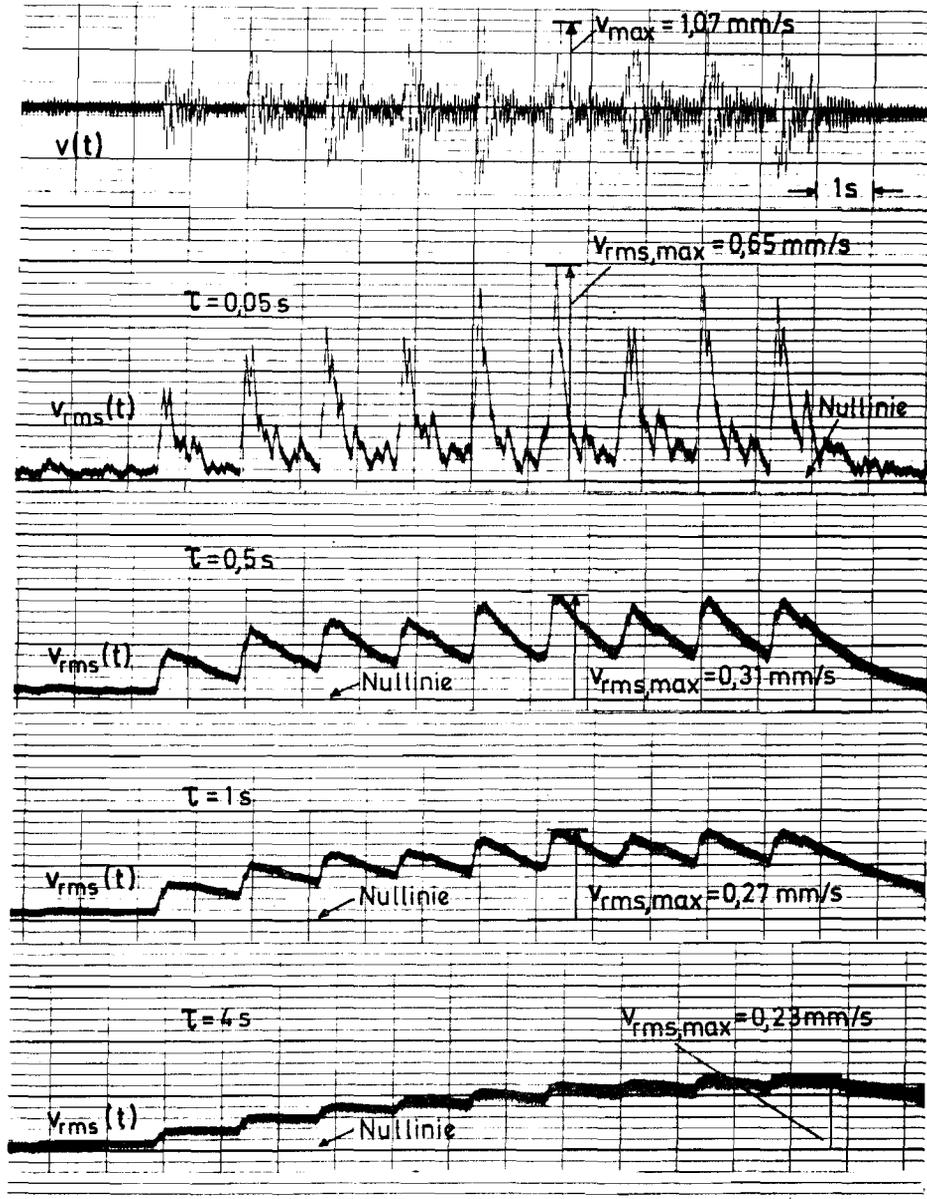


Abb. 8: Ausschnitt aus den Erschütterungsregistrierungen der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ für den Fall Nr. 7 (Riemenfallhammer)

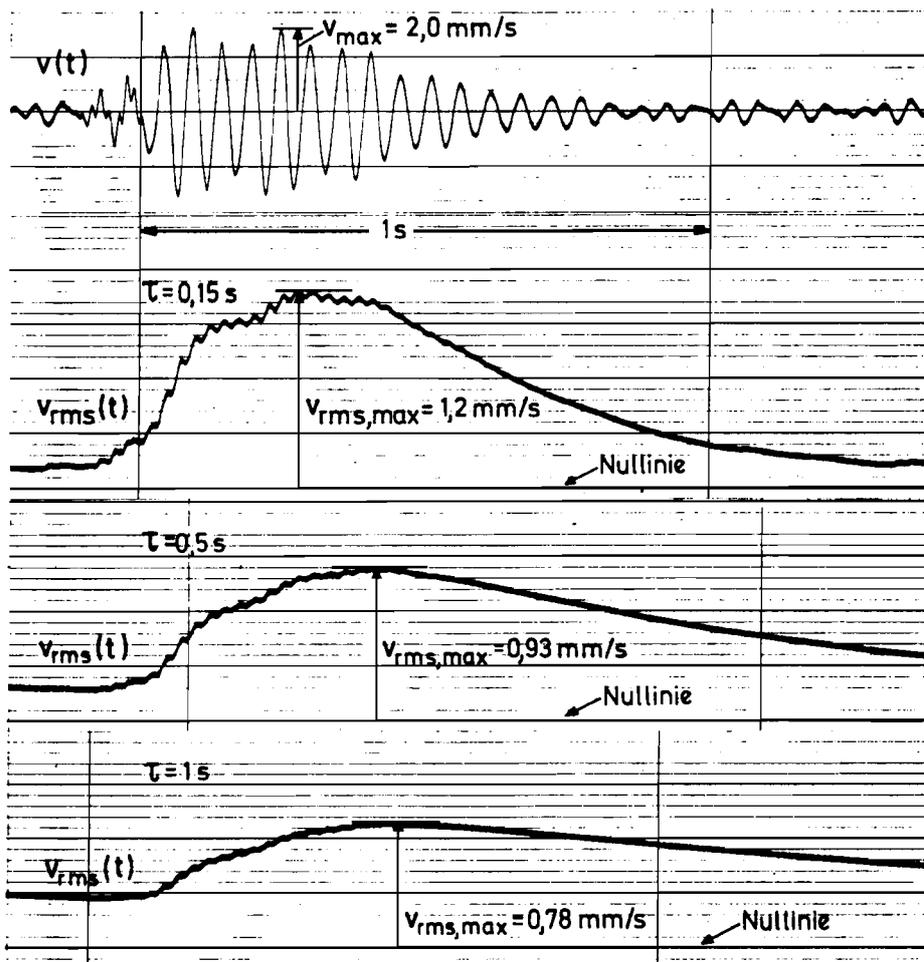


Abb. 9: Ausschnitt aus den Erschütterungsregistrierungen der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ für den Fall Nr. 9 (Stanzan)

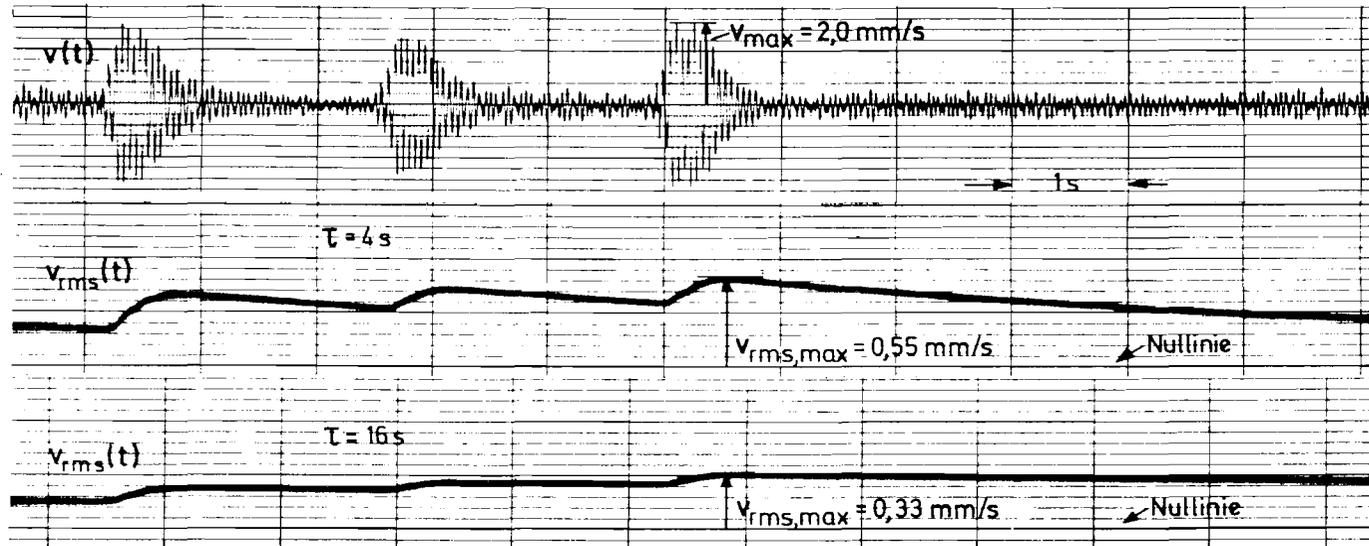


Abb. 10: Ausschnitt aus den Erschütterungsregistrierungen der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ für den Fall Nr. 9 (Stanzen)

9.4 Ergebnisse der Auswertung

Für jede Erschütterungsquelle wurden die Meßwerte KB_{\max} mit den KB_{\max}^* -Werten verglichen. Da die Abweichungen kleiner als etwa $\pm 10\%$ waren, wird auf diese unterschiedliche Ermittlung nicht weiter eingegangen.

Weiterhin wurden auch die $KB_{\text{rms,max}}^*$ -Werte mit den KB-Werten verglichen, die aus den $v_{\text{rms,max}}$ -Werten und der zugehörigen Frequenz rechnerisch ermittelt worden sind. Dieser Vergleich wurde für jede Erschütterungsquelle und für alle hier untersuchten Zeitkonstanten τ vorgenommen. Die Abweichungen blieben ebenfalls kleiner als etwa $\pm 10\%$. Auch diese Unterschiede werden hier nicht weiter diskutiert.

Bei der Auswertung der Erschütterungsmessungen im Labor wurde zum Teil auch die Bandbegrenzung eingeschaltet. In den hier untersuchten Fällen wurden bei der Auswertung keine erkennbaren Unterschiede zwischen den bandbegrenzten und den nicht bandbegrenzten Erschütterungssignalen festgestellt. Daraus kann gefolgert werden, daß bei den hier untersuchten Erschütterungssignalen keine wesentlichen Anteile außerhalb des Frequenzbereiches zumindest oberhalb von 80 Hz vorhanden gewesen sind.

Das zeitliche Verhalten der Meßgröße $v(t)$ und der Einfluß der Zeitbewertung auf die Veränderung dieser Meßgröße ist aus den Abbildungen 6 - 10 ersichtlich. In diesen Abbildungen sind Ausschnitte aus den Erschütterungsregistrierungen wiedergegeben.

In Abbildung 6 sind für den hier untersuchten Fall Nr. 1 (Erschütterungsquelle: Webmaschinen; Typ der verursachten Erschütterungen: stochastische Schwingungen) Ausschnitte

aus den Erschütterungsregistrierungen der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ dargestellt. Man erkennt folgenden Einfluß der Zeitbewertung:

- a) Das zeitbewertete Signal ist gleichgerichtet, d.h. es treten keine um die Nullage wechselnden Meßwerte mehr auf. Die Frequenz kann nicht mehr ermittelt werden.
- b) Mit zunehmender Zeitkonstanten $\tilde{\tau}$ tritt eine sich mehr und mehr auswirkende "Beruhigung" des Signalverlaufs ein. Die Meßgröße $v_{\text{rms}}(t)$ ist bei den hier untersuchten Erschütterungssignalen im Bereich $\tilde{\tau} = 0,05 \text{ s}$ bis 32 s noch zeitabhängig, d.h. noch nicht konstant.
- c) Mit zunehmender Zeitkonstanten $\tilde{\tau}$ werden die größten v_{rms} -Werte im Verhältnis zum Maximalwert des unbewerteten Signals v_{max} immer kleiner.

In Abbildung 7 sind Ausschnitte der Registrierung des hier untersuchten Falls Nr. 3 (Erschütterungsquelle: Rüttelgerät; Typ der verursachten Erschütterungen: schwebungsähnlicher Vorgang) der Meßgrößen $v(t)$ und $v_{\text{rms}}(t)$ dargestellt.

Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt der Registrierung des hier untersuchten Falls Nr. 7 (Erschütterungsquelle: Riemenfallhammer; Typ der verursachten Erschütterungen: wiederholt auftretende stoßartige Vorgänge). Man erkennt, daß die Schlagfolge des Hammers so dicht ist, daß auch bei relativ kleinen Zeitkonstanten $\tilde{\tau}$ die "Effektivwertbildung" (Zeitbewertung) des durch einen Schlag verursachten Vorganges vor dem Eintritt des nächstfolgenden Schlages noch nicht abgeschlossen ist.

Abbildung 9 und 10 zeigt für die Meßgrößen $v(t)$ und $v_{rms}(t)$ einen Ausschnitt aus den Registrierungen für den hier untersuchten Fall Nr. 9 (Erschütterungsquelle: Exzenterpresse; Typ der verursachten Erschütterungen: wiederholt auftretende stoßartige Vorgänge). Die Veränderung der Meßgröße $v(t)$ durch eine Zeitbewertung ist deutlich erkennbar. Auch bei dieser Erschütterungsquelle ist der zeitliche Abstand der durch den Betrieb der Stanze angeregten Erschütterungsvorgänge so kurz, daß insbesondere bei Zeitkonstanten größerer Dauer die Zeitbewertung zwischen zwei Vorgängen noch nicht abgeschlossen ist.

Die zeitbewerteten Erschütterungssignale sind wesentlich kleiner als die Maximalwerte des unbewerteten Erschütterungssignals. Aus einem zeitbewerteten Signal kann nachträglich der Verlauf und die Größe des unbewerteten Signals nicht mehr erkannt werden. Durch den Scheitelfaktor F_s wird das Verhältnis der v_{max} -Werte zu den $v_{rms,max}$ -Werten gekennzeichnet.

Der reziproke Wert des Scheitelfaktors F_s läßt erkennen, um welchen Anteil der $v_{rms,max}$ -Wert kleiner als der v_{max} -Wert ist. Die Ergebnisse für die hier untersuchten 12 Erschütterungsquellen sind als Diagramme in den Abbildungen 11 - 13 dargestellt.

9.5 Scheitelfaktoren

In Tafel 2 sind die Bereiche für die Scheitelfaktoren F_s und die Werte $1/F_s \cdot 100\%$ für die hier untersuchten Fälle Nr. 1 - 12 zusammengestellt.

Man erkennt, daß z.B. bei einer Zeitkonstanten von $\tau = 1$ s für die hier untersuchten Fälle die größten Werte der

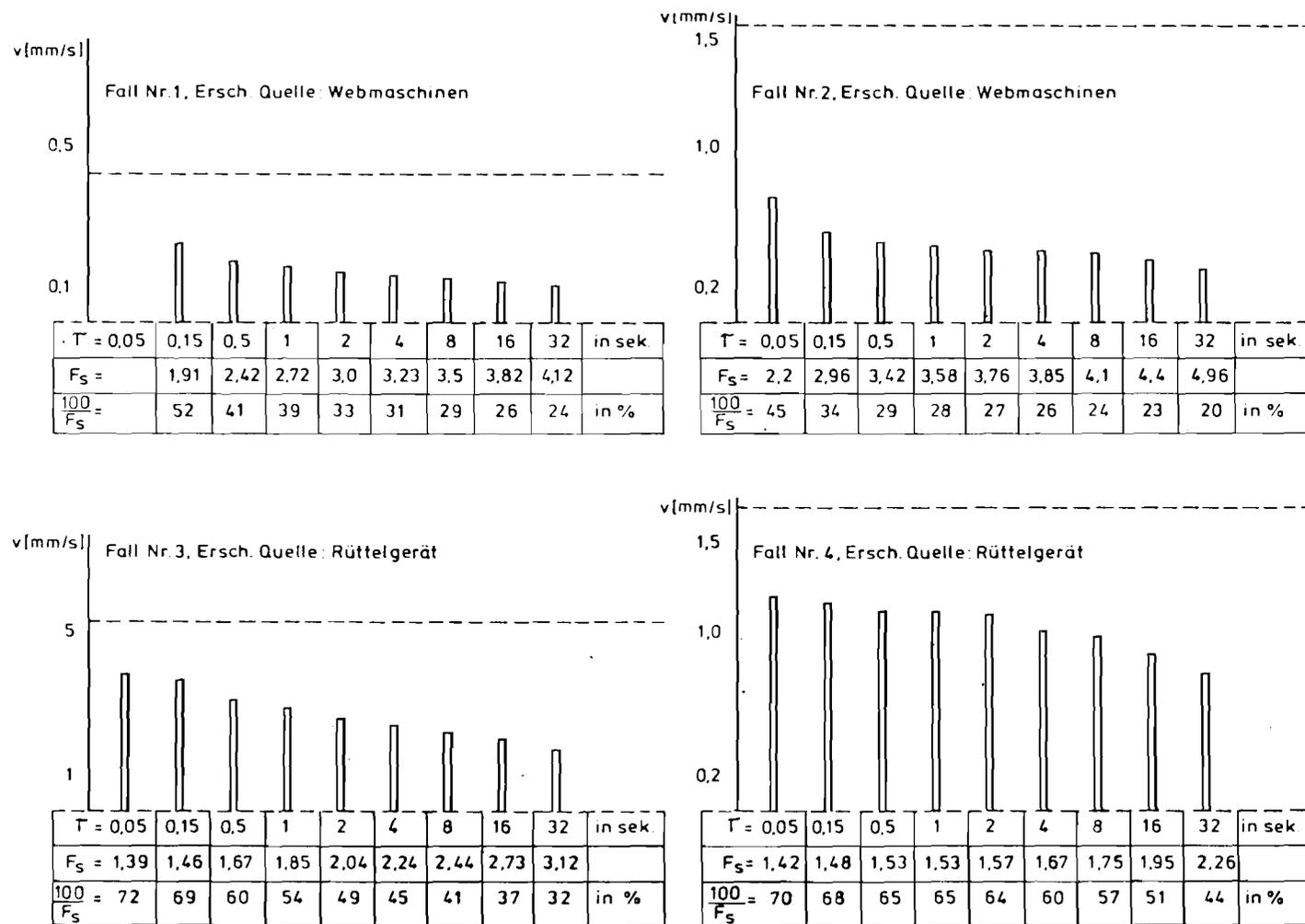


Abb. 11: Unbewertete Maximalwerte v_{max} , (gestrichelte Linie), Maximalwerte $v_{rms,max}$ des zeitbewerteten Erschütterungssignals, Scheitelfaktoren F_s bzw. $1/F_s \cdot 100$ % für die Fälle Nr. 1 - 4.

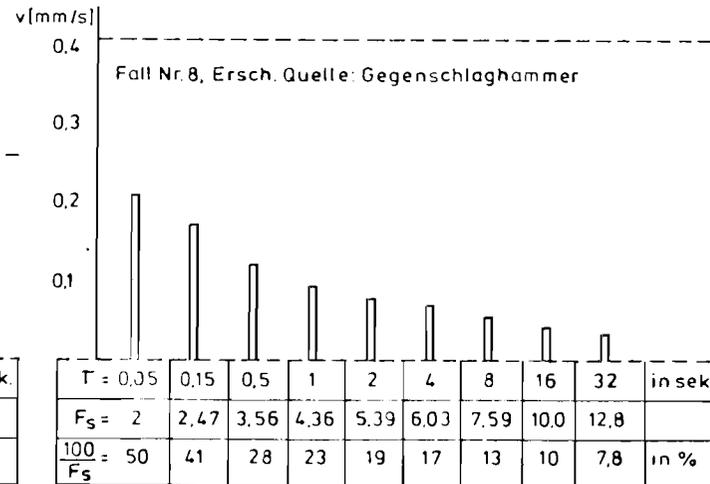
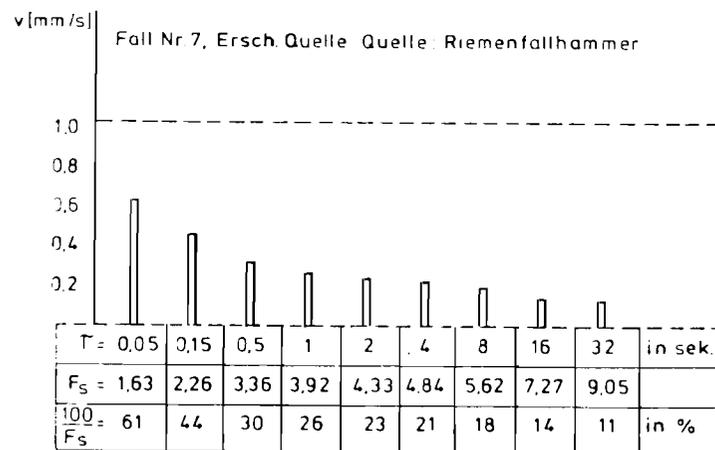
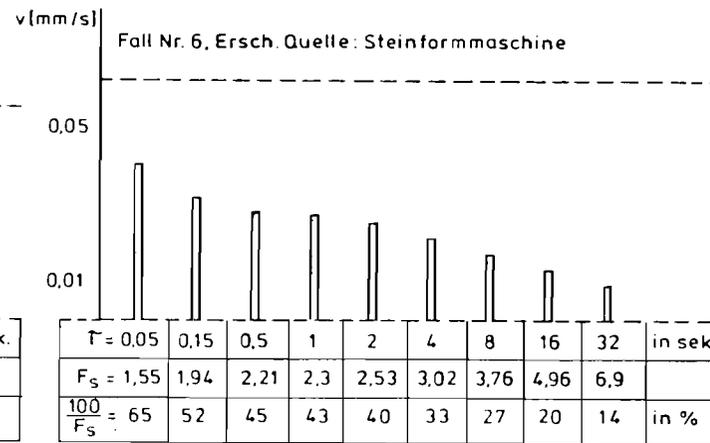
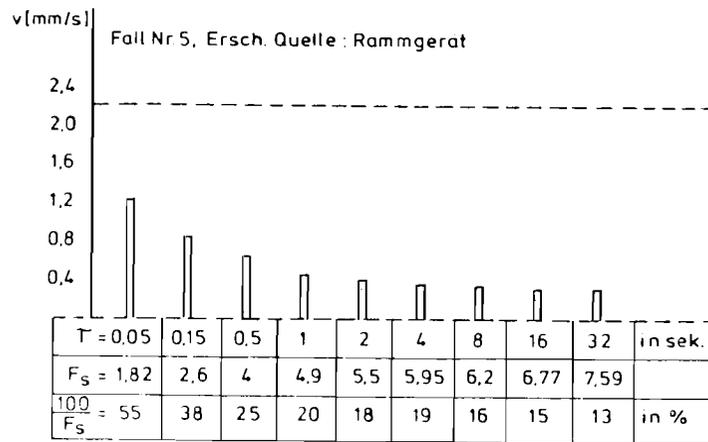


Abb. 12: Unbewertete Maximalwerte v_{\max} (gestrichelte Linie), Maximalwerte $v_{\text{rms},\max}$ des zeitbewerteten Erschütterungssignals, Scheitelfaktoren F_s bzw. $1/F_s \cdot 100\%$ für die Fälle Nr. 5 - 8.

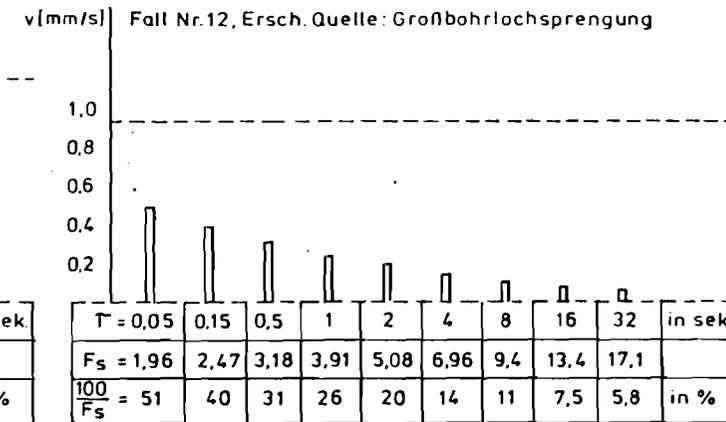
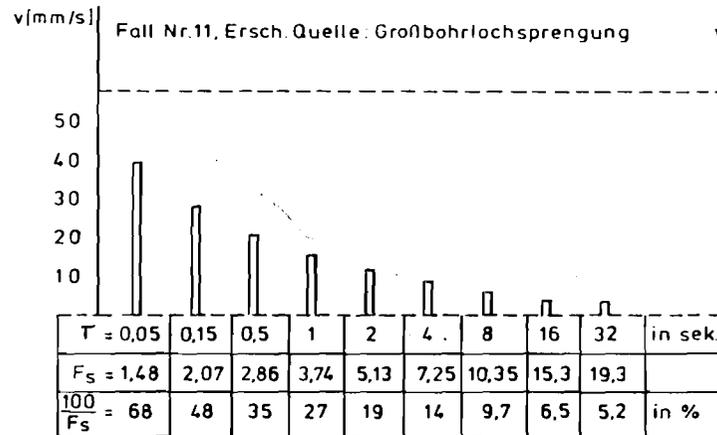
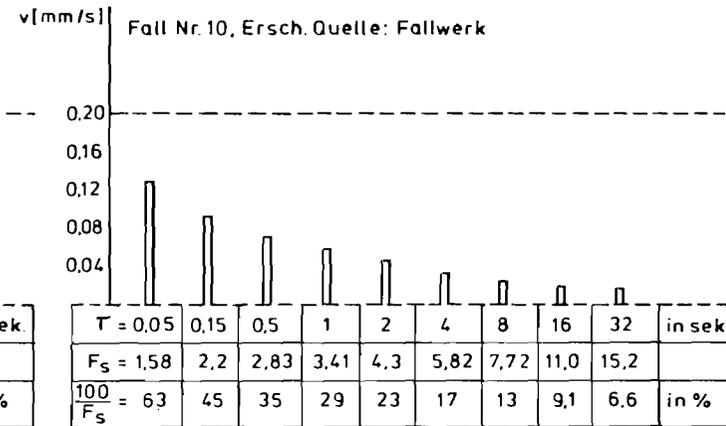
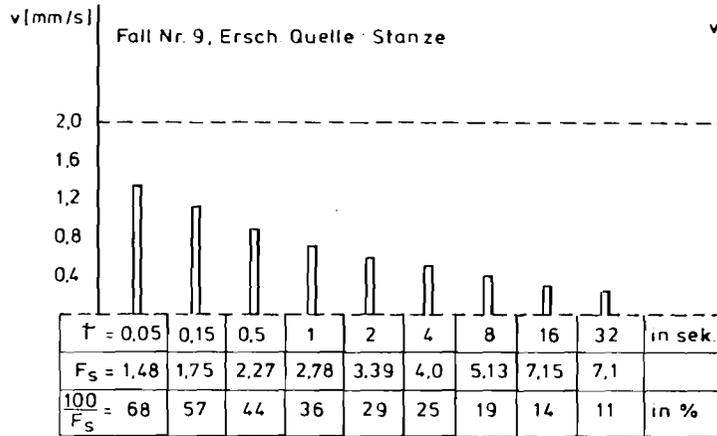


Abb. 13: Unbewertete Maximalwerte v_{\max} (gestrichelte Linie), Maximalwerte $v_{\text{rms,max}}$ des zeitbewerteten Erschütterungssignals, Scheitelfaktoren F_s bzw. $1/F_s \cdot 100\%$ für die Fälle 9 - 12.

Zahlentafel 2

Zeitkonstante $T = RC$	Scheitelfaktor F_s	rezipr. Scheitelfaktor $1/F_s \cdot 100$ in %
0,05 s	1,39 bis 2,2	72 % bis 45 %
0,15 s	1,46 bis 2,96	69 % bis 34 %
0,5 s	1,53 bis 4,0	65 % bis 25 %
1 s	1,53 bis 4,9	65 % bis 20 %
2 s	1,57 bis 5,5	64 % bis 18 %
4 s	1,67 bis 7,3	60 % bis 14 %
8 s	1,8 bis 10,4	56 % bis 10 %
16 s	2,0 bis 15,3	50 % bis 7 %
32 s	2,3 bis 19,3	43 % bis 5 %

Bereiche der Scheitelfaktoren F_s und der rezipr. Scheitelwerte $1/F_s$ für die hier untersuchten Fälle Nr.1 bis Nr. 12

zeitbewerteten Signale 65 bis 20 % kleiner als die größten Werte der unbewerteten Signale sind. Bei noch größeren Zeitkonstanten wird das Verhältnis zwischen den zeitbewerteten Signalen und den unbewerteten Signalen noch größer.

10. Zusammenhänge zwischen Meßwerten und der Beurteilung von Erschütterungsimmissionen

Im Immissionsschutz ist es üblich, aus Immissionsmeßwerten sogenannte Kenn- und/oder Beurteilungswerte zu ermitteln, die mit Immissionsrichtwerten verglichen werden. Bei den Erschütterungsimmissionen gibt es z.Zt. in Regelwerken noch keine Festlegungen, wie aus Meßwerten mit Hilfe von statistischen Methoden Kennwerte mit zugehörigen Vertrauensbereichen zu schätzen sind. In den einschlägigen Regelwerken werden aus Messungen ermittelte Meßwerte mit Immissionsrichtwerten verglichen. Die Bedeutung der Meßwerte oder Kennwerte liegt in ihrem unmittelbaren Zusammenhang zu Immissionsrichtwerten und damit der Beurteilung. Ändert man z.B. die Erstellung der Meßwerte, so ist eine Änderung des Bewertungssystems die logische Folge.

Nach der bisherigen Beurteilung der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden mit Hilfe der Vornorm DIN 4150, Teil 2, werden KB-Werte herangezogen, die aufgrund von Scheitelwerten der Schwingungsgrößen (zeitlich unbewerteten Erschütterungssignalen) ermittelt werden. Die in der genannten Vornorm angegebenen Anhaltswerte (Immissionsrichtwerte) zur Beurteilung stehen somit in direktem Zusammenhang mit den auf diese Weise ermittelten KB-Werten.

11. Unterschiede bei der Verwendung von unbewerteten und bewerteten Erschütterungsmeßsignalen

Bei der Verwendung von unbewerteten Erschütterungssignalen (ohne Frequenz- und Zeitbewertung) werden die physikalischen Eigenschaften (Größen) des mechanischen Vorganges erfaßt. Das Frequenzverhalten kann aus dem Zeitverlauf des gemessenen Vorganges ermittelt werden.

Die unbewerteten Erschütterungssignale können nach der bisher in der Vornorm DIN 4150, Teil 2, angegebenen Methode (Ermittlung der Scheitelwerte) ausgewertet werden [26]. Sie können auch mit Hilfe eines Stichprobenverfahrens ausgewertet werden. Die erfaßten Momentanwerte oder auch die Maximalwerte in vorgegebenen Taktzeiten werden dabei in der Regel klassiert und die Summenhäufigkeitsverteilung oder die Verteilungsdichtefunktion der Werte ermittelt. Ein oder mehrere Perzentilwerte können zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften des Vorganges und dieselben oder andere Perzentilwerte auch zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen herangezogen werden. Dieses Verfahren erlaubt es auch, Mittelungsmaße und Streuungsmaße anzugeben.

Falls durch Untersuchungen oder durch die Anwendung in der Praxis eine bestimmte Frequenzbewertung der Erschütterungssignale genügend gesichert ist, können die Signale mittels elektrischer Filter frequenzbewertet werden, z.B. durch KB-Filter, und diese Signale können dann mit Hilfe eines Stichprobenverfahrens ausgewertet werden [3].

Die Verwendung von zeitlich unbewerteten Erschütterungssignalen ist von Beitzer kritisiert worden [27]. Die in der Vornorm DIN 4150, Teil 2, angegebene Anweisung zur Auswertung von Erschütterungsmessungen sei zu ungenau. Sie gebe einen zu großen Ermessensspielraum und führe in manchen Fällen zu unterschiedlichen Auswertergebnissen. Darum schlägt Beitzer vor, eine Frequenzbewertung des Signals in Verbindung mit der quadratischen Summation der Komponenten durchzuführen. Dies ist jedoch nicht zwingend, denn zu große Auswertefehler können durch präzisere Anforderungen an die Eigenschaften von Schwingungsmeßeinrichtungen und durch genauere Festlegungen der Auswertemethodik auch bei unbewerteten Signalen vermieden werden.

In der Schwingungstechnik wurde insbesondere bei komplexen periodischen Vorgängen der Effektivwert als eine brauchbare Beschreibungsgröße angesehen, weil er den Zeitverlauf des Vorganges mit erfaßt. Der Effektivwert wurde deshalb als wichtig angesehen, weil er in direkter Beziehung zum Energieinhalt der Schwingungen steht. Bei stationären stochastischen Vorgängen wird häufig vorausgesetzt, daß der arithmetische Mittelwert Null ist; dann entspricht die Standardabweichung des Vorganges dem Effektivwert, und der quadratische Mittelwert entspricht der Varianz. - Im Immissionschutz ist jedoch zur Zeit noch ungeklärt, ob der Energieinhalt von Schwingungsvorgängen bessere Rückschlüsse auf die hier in Betracht stehende Wirkung, nämlich die Belästigung von Menschen durch Erschütterungen, erlaubt als die Werte, die den Verlauf der Momentanwerte kennzeichnen.

Durch die Zeitbewertung, z.B. eine exponentielle Mittelung, wird eine Veränderung des Signalverlaufs bewirkt. Bei Integrationszeitkonstanten, die wesentlich größer als die längste Periodendauer des Signals sind, nähert sich der erfaßte Wert bei stationären Vorgängen dem Effektivwert des Vorganges.

Bei Integrationszeitkonstanten, die von gleicher Größe wie die Periodendauer des Vorganges oder kleiner als diese sind, ändert sich das zeitbewertete Signal mit der Zeit. Es bedarf einer weiteren Methode zur Auswertung dieses zeitlich bewerteten Signals.

In Bezug auf die Wahrnehmung von Erschütterungen im Immissionsschutz gibt es derzeit noch keine Untersuchungen, die die Festlegung einer bestimmten Integrationszeitkonstanten begründen. Sie ist daher als freier Parameter anzusehen.

Wie bereits dargelegt wurde, stehen die aus Meßwerten abgeleiteten Beurteilungswerte in unmittelbarem Zusammenhang zum Bewertungssystem. Änderungen des Meßverfahrens bedingen eine Änderung des Bewertungssystems. Durch Wirkungsuntersuchungen kann erkannt werden, welche Meßgrößen und Meßwerte für eine Beurteilung im Immissionsschutz am besten geeignet sind.

Schrifttum

- [1] Vornorm DIN 4150 "Erschütterungen im Bauwesen"
- Teil 1 - Grundsätze, Vorermittlung und Messung von Schwingungsgrößen - (September 1975)
 - Teil 2 - Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden - (September 1975)
 - Teil 3 - Einwirkungen auf bauliche Anlagen - (September 1975)
- [2] Splittgerber, H.:
"Immissionsmeßgrößen bei Erschütterungen in Gebäuden"
VDI-Berichte Nr. 284, 1977, S. 77/87
- [3] DIN 45669 "Messung von Schwingungsimmissionen",
- Teil 1 - Anforderungen an die Meßeinrichtung (Schwingungsmesser), Veröffentlichung ist 1979 vorgesehen
- [4] VDI-Richtlinie 2057 "Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen"
- Blatt 1 - Grundlagen, Gliederung, Begriffe - (Entwurf Februar 1975)
 - Blatt 2 - Schwingungseinwirkung auf den menschlichen Körper - (Entwurf Januar 1976)
- [5] ISO/IS 2631 "Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration"
Second edition - 1978-01-15

- [6] Addendum to ISO 2631-1974:
"Guide to the evaluation of human exposure to vibration and shock in buildings"
International Organization for Standardization
Technical Committee 108 (September 1977)
- [7] Gasch, R.:
"Beurteilung der dynamischen Beanspruchung von Bauwerksteilen",
VDI-Berichte, Bd. 113 (1967)
- [8] Gasch, R. und Klippel, P.:
"Beurteilung der dynamischen Beanspruchung von Gebäudedecken und anderen Bauwerksteilen unter Sprengerschütterung und stoßartigen Belastungen",
Zeitschrift Die Bautechnik 11/1976, Seite 379/387
- [9] Dieckmann, D.:
"Einfluß vertikaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen"
Internat Z Angew Physiol ARB Physiol, 16 (1957),
S. 519-564
- [10] Dieckmann, D.:
"Mechanische Modelle für den vertikal schwingenden menschlichen Körper"
Internat Z Angew Physiol ARB Physiol, 17 (1958),
S. 67-82
- [11] Miwa, T.:
"Evaluation methods for vibration effect"
Part 1. Measurements of threshold and equal sensation contours of whole body vertical and horizontal vibrations
- [12] Mc Kay, J.R.:
"Human Response to Vibration"
Some Studies of Perception and Startle.
PhD Thesis, University of Southampton, 1972

- [13] Splittgerber, H.:
"Untersuchungen über die Wahrnehmungsschwelle des Menschen bei einwirkenden mechanischen Schwingungen"
Ges.-Ing. 93 (1972), S. 113
- [14] Dupuis, H., Hartung, E.:
"Zur Erträglichkeit von stochastischen Schwingungen im Vergleich zu Sinusschwingungen in vertikaler Richtung"
ARB Schutz, (1971), 12, S. 384-386
- [15] Miwa, T.:
"Evaluation methods for vibration effect"
Part 5. Calculation method of vibration greatness level on compound vibrations.
National Institute of Industrial Health, Kizuki-Sumiyoshi, Kawasaki, Ind. Health, 1968, 6,11
- [16] Lange, W.:
"Zur Beurteilung von Schwingungsgemischen, die über die Sitzfläche auf den Menschen einwirken"
Europ. J. appl. Physiol. 33, 151-170 (1974)
- [17] Bendat, J.S. and Piersol, A.G.:
"Random Data: Analysis and Measurement Procedures",
Wiley-Interscience, New York - London - Sidney - Toronto, 1971
- [18] Dupuis, H., Hartung, E.:
"Vergleich regelloser Schwingungen eines begrenzten Frequenzbereiches mit sinusförmigen Schwingungen hinsichtlich der Einwirkung auf den Menschen"
Ergonomics, 1972, Vol. 15, No. 3, 237-265

- [19] Miwa, T. and Yonekawa, Y.:
"Measurement and evaluation of environmental vibrations"
Part 1. Problems Concerning measurements
National Institute of Industrial Health,
Kizuki-Sumiyoshi, Nakahara-ku, Kawasaki,
Ind. Health, 1973, 11, 159
- [20] Griffin, M.J. and Whitham, E.M.:
"Studies of the discomfort produced by impulsive whole-body vibration", paper presented to the United Kingdom Group on Human Response to Vibration, Northampton, England, 7./9. September 1977
- [21] Beitzer, H.-W.:
Zur Beurteilung zeitlich schwankender Schwingungseinwirkung mit Hilfe eines äquivalenten Dauerschwingwertes", VDI-Berichte Nr. 284, 1977, Seite 19/22
- [22] Weber, G.:
"Gedächtnismodelle und Beurteilungsmaßstäbe", VDI-Berichte Nr. 284, 1977, S. 23/28
- [23] Wahrmann, C.G. and Broch, J.T.:
"On the Averaging Time of RMS Measurements", Technical Review, No 2, 1975 / Bruel and Kjaer, Danmark
- [24] Klein, M.:
"Meßsystem für eine neuartige elektronische Aufzeichnung von Erschütterungssignalen", Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NW, Essen, Heft 40, 1977, S. 31/38

- [25] ISO-Standard 2041 "Vibration and Shock-Vocabulary",
first edition, 1975 - 08 - 01
- [26] DIN 45667 "Klassierverfahren für das Erfassen
regelloser Schwingungen"
(Oktober 1969)
- [27] BEITZER, H.W.: "Anforderungen an Meßgeräte
zur Schwingungsmessung im Immissionsschutz";
VDI-Berichte Nr. 284 (1977), S. 97/100