

# LIS-Berichte

**Nr. 95**

**Wahrnehmungsschwelle  
für Ganzkörperschwingungen  
in sitzender Körperhaltung**

Herausgeber



ISSN 0720-8499

1991

**Wahrnehmungsschwelle für Ganzkörperschwingungen  
in sitzender Körperhaltung**

*Dr. Heinz Splittgerber und Richard Hillen*

## Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	7
Summary	8
1. Einleitung	10
2. Überblick über bisherige Untersuchungen	11
3. Ziel der Untersuchungen	13
4. Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörper- schwingungen	15
4.1 Einführung	15
4.2 Versuchseinrichtung	15
4.3 Umgebungsverhältnisse im Versuchsraum	15
4.4 Untersuchungsmethoden	16
4.4.1 Methode M (zu): Erschütterungsreize werden den Versuchspersonen vom Versuchsleiter monoton zunehmend dargeboten	17
4.4.2 Methode M (ab): Erschütterungsreize werden den Versuchspersonen vom Versuchsleiter monoton abnehmend dargeboten	17
4.4.3 Methode M (selbst): Die Erschütterungsreize werden von der Ver- suchsperson selbst variiert	18
4.5 Versuchspersonen und deren Information zu Beginn der Versuche	21
4.6 Verwendete Signale (Erschütterungsreize)	22
4.6.1 Allgemeines	22
4.6.2 Untersuchungsmethode M (zu)	22
4.6.3 Untersuchungsmethode M (ab)	22
4.6.4 Untersuchungsmethode M (selbst)	23
4.6.5 Zeitmuster der Signaldarbietung	23
4.7 Auswerteverfahren	24
4.8 Ergebnisse	26
4.8.1 Wahrnehmungsschwellen für sinusförmige Signale bei Anwendung verschiedener Untersuchungsmethoden	26
4.9 Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit Angaben im Schrifttum	28

5.	Wahrnehmungsschwelle für zwei Typen von periodischen Ganzkörperschwingungen	32
5.1	Einführung	32
5.2	Verwendete Signale (Erschütterungsreize)	33
5.3	Untersuchungsmethode	37
5.4	Auswerteverfahren	37
5.5	Ergebnisse	39
5.5.1	Wahrnehmungsschwelle für periodische Signale des Typs 1	39
5.5.2	Wahrnehmungsschwellen für periodische Signale des Typs 2	41
5.6	Diskussion der Ergebnisse	42
5.7	Ergebnisse einer Befragung der Versuchspersonen	45
6.	Untersuchung von inter- und intraindividuellen Streuungen der Ergebnisse bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen für sinusförmige Ganzkörperschwingungen	47
6.1	Einführung	47
6.2	Interindividuelle Streuungen	48
6.3	Intraindividuelle Streuungen	49
6.4	Kennwerte für die Wahrnehmungsschwellen aus Wiederholversuchen mit unverändertem Versuchspersonen-Kollektiv über mehrere Jahre	50
7.	Zum Einfluß von Geräuschen der Versuchsanlage auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen	53
7.1	Einführung	53
7.2	Methode	53
7.3	Ergebnisse	56
7.4	Diskussion der Ergebnisse	56
8	Schrifttum	58
9	Anlagen (Informationsbögen)	61

## WAHRNEHMUNGSSCHWELLE FÜR GANZKÖRPERSCHWINGUNGEN IN SITZENDER KÖRPERHALTUNG

Dr. Heinz Splittgerber und Richard Hillen

### **Zusammenfassung**

Die Wahrnehmungsschwellen wurden bei einem größeren Versuchspersonenkollektiv für Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung bei Einleitung der Erschütterungen etwa parallel zur Wirbelsäule untersucht. Als Erschütterungsreize wurden Sinussignale und zwei Typen von periodischen Signalen verwendet.

Die Wahrnehmungsschwellen für Sinussignale wurden mit Hilfe von drei verschiedenen Untersuchungsmethoden ermittelt, um dabei auftretende Unterschiede bei den Ergebnissen festzustellen. Die Überprüfung ergab, daß bei allen in die Untersuchung einbezogenen Signalen mit Frequenzen oberhalb von 5 Hz mit einer statistischen Sicherheit von 95 % kein Unterschied zwischen den miteinander verglichenen Untersuchungsmethoden nachgewiesen werden konnte. Die bei Verwendung von Sinusschwingungen ermittelten Ergebnisse werden mit den Angaben über Wahrnehmungsschwellen im Schrifttum und in den Regelwerten verglichen.

Die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen bei zwei Typen von periodischen Schwingungen hatte zum Ziel, erste Hinweise darüber zu erhalten, welche Beschreibungsgröße am besten geeignet sein könnte, die Stärke der Erschütterungssignale für verschiedene Arten von Erschütterungen zu kennzeichnen. Die periodischen Signale des Typs 1 sind als Summe von vier Harmonischen gebildet worden und sind durch möglichst große Scheitelfaktoren gekennzeichnet. Die periodischen Signale des Typs 2 sind als Summe von zwei Harmonischen gebildet worden und haben praktisch gleich große Scheitelfaktoren. Bei den Ergebnissen zur Feststellung der Wahrnehmungsschwellen scheint für die periodischen Schwingungen des Typs 1 ein Zusammenhang zu den Scheitelfaktoren vorzuliegen; bei den Ergebnissen für die periodischen Schwingungen des Typs 2 ist dagegen der Scheitelfaktor nicht bedeutsam. Jedoch scheinen die im Schwingungsgemisch der Signale enthaltenen Frequenzen, bzw. der Frequenzabstand der beiden Harmonischen, Einfluß auf die beginnende Wahrnehmbarkeit zu haben. Nach den für beide Typen von periodischen Schwingungen festgestellten Ergebnissen scheinen zur Beschreibung der beginnenden Wahrnehmbarkeit weder die Scheitelwerte, noch die größten Werte bei gleitender Effektivwertbildung und auch nicht die sogenannten "Root-Mean-Quad-Werte" allein geeignet zu sein, da mehrere Faktoren Einfluß haben. Weitere umfangreiche Untersuchungen sind erforderlich, um festzustellen, welche Einflüsse bei periodischen Schwingungssignalen für die Beschreibung der Wahrnehmungsschwellen maßgebend sind.

Am Beispiel für ein Schwingungssignal wird die inter- und intra-individuelle Streubreite der Einzelergebnisse aufgezeigt, und zwar für das in die Untersuchungen einbezogene Versuchspersonen-Kollektiv ( $N = 20$ ) und für zwei willkürlich ausgewählte Versuchspersonen.

Den Versuchspersonen gelang es nicht, die Wahrnehmungsschwellen bei Wiederholversuchen immer wieder mit verhältnismäßig geringer Schwankungsbreite wiederzufinden.

Es wurde auch der Einfluß der von der Versuchsanlage bei der Versuchsdurchführung abgestrahlten unvermeidbaren, wenn auch mit geringer Lautstärke auftretenden Geräusche auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen festgestellt, da nicht auszuschließen war, daß die Versuchspersonen das hörbare Geräusch als Leitgröße für das Auffinden der Wahrnehmungsschwellen heranziehen könnten. Es wurden Versuche mit durch einen Lautsprecher in den Versuchsraum eingestrahlem "Verdeckungsgeräusch" und gleiche Versuche ohne Verdeckungsgeräusch durchgeführt. Die Überprüfung der Ergebnisse zeigte, daß deutliche Hinweise aus mehreren unabhängigen Experimenten auf niedrigere Wahrnehmungsschwellen bei Verdeckungsgeräuschen existieren, wenn sie sich auch (vermutlich wegen zu kleiner Kollektivgröße) statistisch nicht signifikant auf einem Niveau von 95% trennen lassen.

## **S U M M A R Y**

The perception thresholds for whole body vibrations were determined using a larger number of subjects in sitting posture. Vibrations were transmitted to the subjects in the buttocks-to-head direction. Sinusoidal signals and two types of periodic signals were used as stimuli.

Three methods were employed for determination of the perception thresholds for sinusoidal signals to see whether different results were obtained. For all signals, which were used in the study, comparison of the methods yielded no differences with a statistical significance on the 95% confidence level for all signals with frequencies above 5 Hz. The results obtained by stimulation with sinusoidal signals are compared with perception thresholds presented in the published literature and in guidelines.

Determination of the perception thresholds for two types of periodic vibrations were performed in order to get indications for suitable values which can be used to characterize the intensity of the various types of vibrations. Type 1 periodic signals were composed of the sum of four harmonics and are characterized by crest-factors with greatest possible differences. Type 2 periodic signals were a combination of two sinusoidal signals. Type 2 periodic signals have had practically the same crest-factor. Results with type 1 vibrations seem to provide evidence that the threshold of perception varies with the crest-factors of the signals; with type 2 vibrations the crest-factor appears irrelevant. With type 2 vibrations the frequencies or the intervall between the frequencies of the two harmonics seem to have an influence on the perception thresholds. According to the results obtained for both types of periodic vibrations neither the peak-values nor the maxima by exponential weighted integration gained root-mean-square values nor the so called "root-mean-quad-values" alone turned out to be suitable to describe the perception thresholds because several factors are of influence. Further extensive studies are necessary to determine those influences, which affect the perception thresholds during exposure to periodic vibration signals.

As an example the inter- and intraindividual ranges of the results obtained with one vibration signal are presented for all participants of the study (N = 20) and for two randomly selected

subjects. It was impossible for the subjects to determine the perception thresholds at repeated tests within a small range.

The influence of the unavoidable low-intensity noise emitted by the equipment during the experiments on the perception thresholds was studied as well because it could not be ruled out that the subjects used the audible noise in finding the perception threshold. Experiments with a loudspeaker emitting masking sounds and without these masking sounds were performed. Evaluation of the results of several independent experiments provided evidence of lower perception thresholds in presence of the masking sound although no statistical significance on the 95% level could be established presumably because of the low number of subjects.

## 1. Einleitung

Erschütterungsimmissionen können Menschen belästigen oder gar deren Gesundheit beeinträchtigen. Sie können damit schädliche Umwelteinwirkungen darstellen, die den Immissionsschutz betreffen und Maßnahmen zur Minderung und zur Vorsorge erforderlich machen. Wahrgenommene Erschütterungen sind in Wohnungen situationsfremd, ganz gleich, ob sie

- als Ganzkörperschwingungen oder
- beim Berühren von Gegenständen im Raum oder
- indirekt durch hörbare Auswirkungen (Klappern, Vibrieren von Gegenständen) oder
- als sichtbare Auswirkungen (Bewegung von Zimmerpflanzen, Pendelleuchten u.s.w.)

wahrgenommen werden: Die Betroffenen bewerten sie fast immer negativ. Deshalb ist es von grundsätzlicher Bedeutung, den Bereich der beginnenden subjektiven Empfindung einwirkender Erschütterungen zu erfassen und die Ergebnisse zu beschreiben. Dies ist das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen.

Beim Studium der menschlichen Sinneswahrnehmungen stellt sich das Problem der Subjektivität. Den Sinnesreizen aus der Umwelt und den entsprechenden Reaktionen unserer Sinnesorgane sind Aussagen des Subjekts über Empfindungen und Wahrnehmungen zugeordnet. Sinneserfahrungen werden als ganz persönliche Erlebnisse empfunden. Im Zusammenhang mit dem Sinnesindruck, d.h. der Modalität "Erschütterungen" (Vibrationen), sind in der Sinnesphysiologie und auch in der -psychologie - im Vergleich zu den klassischen Modalitäten wie Sehen, Hören, Tasten, Schmecken und Riechen - nur wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Daher liegen auch über die Intensitätsstufungen (Quantitäten) der Sinnesindrücke "Erschütterungen" nur wenige Kenntnisse vor. Wie bei den klassischen Modalitäten ist auch für die Modalität "Erschütterungen" eine wichtige Kenngröße immer der Ausgangspunkt der Reizstärke-Reizantwort-Beziehung. Der kleinste Reiz, der gerade eine Reaktion auslöst, wird Schwellenreiz  $S_0$  genannt.

Für Erschütterungsreize gibt es keine ausreichenden Kenntnisse zur Feststellung des Schwellenreizes, seiner Streubreite und den Moderatoren (Einflußgrößen), die Einfluß auf mögliche Änderungen der Empfindungsschwelle haben. Unterschiedliche individuelle Eigenschaften des Menschen und unterschiedliche situative Bedingungen lassen in bezug auf die Rezeption des Reizes und der subjektiven Reaktion auf einwirkende Ganzkörperschwingungsreize vermuten, daß es sich um einen Bereich der beginnenden Empfindung handelt. Die Festlegung eines Schwellenreizes  $S_0$  bedarf einer Konvention.

Bisher sind Versuche zur Ermittlung der beginnenden Wahrnehmung fast ausschließlich nur mit sinusförmigen Schwingungen auf Schütteltischen vorgenommen worden. Wegen des relativ großen Versuchsaufwandes wurden jeweils nur wenige Versuchspersonen in die Untersuchungen einbezogen, häufig weniger als zehn Personen. Die Schwingungserregung mit Hilfe von Schütteltischen im Bereich der beginnenden Wahrnehmbarkeit und damit die Erzeugung von ungestörten Erschütterungsreizen war schwierig. Ebenso waren oft störende



Nebeneinflüsse, z.B. starke Geräusche, störende Oberwellenanteile der Erregung usw. nicht zu eliminieren. Die Versuchs- und Randbedingungen sind in den entsprechenden Veröffentlichungen oft nur unzureichend beschrieben.

Im Immissionsschutz sind die in Wohnungen festgestellten Erschütterungen, die z.B. durch Industrieanlagen, Verkehrsfahrzeuge, Rammgeräte auf Baustellen usw. verursacht werden, meistens jedoch nicht sinusförmig, sondern haben eine komplexe Charakteristik. Kenntnisse über die beginnende Wahrnehmung bei derartigen Vorgängen sind dringend notwendig.

Die Einwirkung von Schwingungsgemischen, von stochastischen und transienten Vorgängen auf Menschen sind bisher verhältnismäßig wenig untersucht worden. Die wenigen bisher durchgeführten Versuche wurden bei relativ hohen Intensitäten durchgeführt, wie sie z. B. beim Fahren von Ackerschleppern und schweren Baufahrzeugen, bei Militärfahrzeugen usw. vorkommen. Im Vergleich zu sinusförmigen Schwingungen mit derartigen Intensitäten wurden dabei veränderte Reaktionen von den Betroffenen festgestellt. Im Bereich der beginnenden Wahrnehmung sind bisher praktisch keine Untersuchungen mit einer größeren Anzahl von Versuchspersonen bekannt geworden.

## **2. Überblick über bisherige Untersuchungen**

Über Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwingungen ist häufiger berichtet worden, u.a. von MIWA, MCKAY, PARSONS und GRIFFIN, SPLITTGERBER u.a. [1, 2, 3, 4]. Für periodische Schwingungen (Schwingungsgemische) sowie stochastische und transiente Ganzkörperschwingungen sind in aller Regel Untersuchungen nur deutlich oberhalb der Wahrnehmungsschwelle durchgeführt worden.

MIWA hat die Stärke der Wahrnehmungen (vibration greatness level) von künstlich generierten Schwingungsgemischen untersucht, die aus mehreren sinusförmigen Schwingungen zusammengesetzt waren [5]. Die Frequenzen lagen bei den Oktav-Mittelfrequenzen zwischen 1 und 150 Hz. Die von den Versuchspersonen empfundene Stärke der Schwingungsgemische wurde zu der Stärke bei einer Referenzschwingung (Sinusschwingung mit einer Frequenz von 20 Hz) in Vergleich gesetzt. In Anlehnung an einen Vorschlag, der bei der Beurteilung von Geräuschen von STEVENS gemacht worden ist, wird von MIWA eine Schätzung für die empfundene Stärke bei Schwingungsgemischen vorgeschlagen, die auf den Stärken der einzelnen Komponenten im Schwingungsgemisch basiert. Im Zusammenhang mit der Wahrnehmungsschwelle für Ganzkörperschwingungen bei einwirkenden Schwingungsgemischen (periodischen Schwingungen) wurden keine Untersuchungen durchgeführt.

Von LOUDA wird über Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle für Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung bei Schwingungsgemischen berichtet, die aus zwei sinusförmigen Signalen zusammengesetzt waren [6]. Bei den Versuchen wurde eine sogenannte Hauptkomponente (Sinusschwingung mit einer Frequenz von 5 Hz) so eingestellt, daß sie gut wahrnehmbar war, und die Versuchspersonen wurden aufgefordert, die sogenannte Sekundär-Komponente (Sinusschwingung mit einer vorher gewählten Frequenz im

Bereich von 0,5 Hz bis 70 Hz) so einzustellen, daß die Sekundär-Komponente "gerade noch wahrnehmbar" war. Es wird auch eine Kurve für die Wahrnehmungsschwelle bei sinusförmigen Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung angegeben. Dabei fällt auf, daß die von LOUDA gemachten Angaben im Vergleich zu den in anderen Veröffentlichungen ermittelten Wahrnehmungsschwellen um mehr als den Faktor 10 höher liegen [1, 2, 3, 7]. Im Zusammenhang mit der Wahrnehmbarkeit der untersuchten Schwingungsgemische wird dargelegt, daß in einigen Fällen das Phänomen der Maskierung und der Aufdeckung von Signalen festgestellt worden ist. In solchen Fällen kann nach den Darlegungen von LOUDA die Wirkung nicht durch einen Gesamteffektivwert des einwirkenden Signals charakterisiert werden.

DUPUIS et al. berichten über Untersuchungen zur Erträglichkeit von stochastischen Schwingungen im Vergleich zu Sinusschwingungen in vertikaler Richtung [8, 9]. Diese Untersuchungen wurden bei relativ hohen Schwingungsintensitäten im Bereich von etwa  $a_{\text{eff}} \approx 3 \dots 4 \text{ m/s}^2$  durchgeführt. Im Vergleich dazu liegt der Bereich der beginnenden Wahrnehmbarkeit von Schwingungen bei erheblich geringeren Schwingungsintensitäten, nämlich im Bereich von etwa  $a_{\text{eff}} \approx 0,004 \dots 0,04 \text{ m/s}^2$ . Als Ergebnis wird u.a. mitgeteilt, daß bei der Wahrnehmung einer Komponente in einem Gemisch - analog zu Erscheinungen in der Akustik - ein "Verdeckungseffekt" für Schwingungen oberhalb von 2 Hz festgestellt worden ist. Weiterhin wird angegeben, daß die Bildung eines gemeinsamen Effektivwertes aus der Wurzel der Quadrate der gewichteten Beschleunigungsamplituden zweier Schwingungskomponenten der subjektiv-physiologischen Wirkung nicht voll entsprechen soll. In einem weiteren Untersuchungsteil wurde eine größere Empfindlichkeit des Menschen gegenüber stochastischen Schwingungen (mit gleichmäßig regellosem Verlauf) im Vergleich zu Sinusschwingungen festgestellt. Daraus wurde gefolgert, daß zur Beurteilung der an Arbeitsplätzen vorkommenden regellosen Schwingungen die Beurteilungsrichtlinien, die sich auf Untersuchungen mit sinusförmigen Schwingungen gründen, nur bedingt anwendbar sind.

Bei den Untersuchungen, über die LANGE berichtet, wurden Versuchspersonen mit Schwingungsgemischen belastet, die aus wenigen Harmonischen zusammengesetzt waren [10]. Die Versuche wurden mit Grundfrequenzen zwischen 2 Hz und 8 Hz durchgeführt und mit ein bis drei Harmonischen bei Schwingbeschleunigungsamplituden von etwa  $a_{\text{eff}} \approx 2 \text{ m/s}^2$ . Diese lagen weit oberhalb des Bereichs der beginnenden subjektiven Wahrnehmbarkeit von Schwingungen. Durch subjektiven Vergleich der den Versuchspersonen dargebotenen Schwingungsgemische mit einer Referenzschwingung von konstanter Frequenz (5 Hz) wurden jeweils die Amplituden der Gemische ermittelt, bei der das Gemisch und die Referenzschwingung gleich stark belastend empfunden worden sind. Ein Vergleich der von LANGE ermittelten Versuchsergebnisse mit den Bewertungsvorschlägen für Schwingungsgemische anderer Autoren und den damaligen Fassungen der Regelwerke VDI-Richtlinie 2057 und ISO-Standard 2631 zeigte nur teilweise Übereinstimmung (siehe [7, 11]).

Von GRIFFIN wurden Versuche im Zusammenhang mit dem "discomfort" durchgeführt. Versuchspersonen sollten den discomfort zwischen sinusförmigen Ganzkörperschwingungen und Zufallsschwingungen mit Frequenzspektren von Terzbandbreite, Oktavbandbreite und Bandbreiten von 3 Oktaven vergleichen. Die Versuchspersonen befanden sich in sitzender Körperhaltung und wurden aufgefordert, die Stärke bei den Zufallsschwingungen so einzustellen, daß sie im Vergleich zu einer Referenzschwingung mit einer Beschleunigungsamplitude

von  $a_{rms} = 0,75 \text{ m/s}^2$  und einer Frequenz von 10 Hz vergleichbar waren. Die Versuche ergaben, daß die Versuchspersonen in der Tendenz für die in die Untersuchung einbezogenen Zufallsschwingungen etwas sensitiver im Vergleich zu der Referenzschwingung gewesen sind; der Effekt war aber nicht stark ausgeprägt [12]. Auch in der Veröffentlichung von FOTHERGILL und GRIFFIN wird über Untersuchungen berichtet, bei denen Versuchspersonen den durch eine Referenz-Sinusschwingung verursachten Discomfort mit dem vergleichen sollten, der durch Schwingungsgemische mit bis zu 4 Harmonischen hervorgerufen wurde. Die Ergebnisse werden mit den Bewertungsvorschlägen verglichen, die in der damaligen Fassung des ISO-Standards 2631 aufgeführt gewesen sind [11, 13].

In der Veröffentlichung von DONATI et al. wird zusammenfassend festgestellt, daß Versuchspersonen in sitzender Körperhaltung im allgemeinen etwas sensitiver für Zufallsschwingungen im Vergleich zur Belastung mit sinusförmigen Ganzkörperschwingungen zu sein scheinen [14].

### 3. Ziel der Untersuchungen

Die beginnende Wahrnehmbarkeit wird bei Versuchspersonen in sitzender Körperhaltung untersucht. Die Erschütterungssignale (Reize) werden in vertikaler Richtung eingeleitet, d.h. etwa parallel zur Wirbelsäule (z-Richtung nach der VDI-Richtlinie 2057) [7].

Als Erschütterungsreize werden sinusförmige Signale mit Frequenzen im Bereich von 2 Hz bis 100 Hz verwendet, weil Erschütterungen mit Frequenzen in dem genannten Bereich für den Erschütterungsimmissionsschutz von Bedeutung sind. Außerdem wird die beginnende Wahrnehmbarkeit auch für zwei Typen von periodischen (künstlich erzeugten) Signalen festgestellt. Die Ergebnisse bei Verwendung von periodischen Signalen werden mit denen verglichen, die bei sinusförmigen Signalen ermittelt worden sind. Die Ergebnisse geben erste Hinweise zu der Frage, ob bei periodischen Signalen die beginnende Wahrnehmbarkeit eher den Spitzenwerten (Scheitelwerten) oder z.B. den Effektivwerten folgt.

Aus den festgestellten Ergebnissen können noch keine allgemein für periodische Schwingungen zutreffenden Ergebnisse abgeleitet werden, weil zunächst nur zwei Typen von periodischen Schwingungen (Typ 1: Schwingungsgemisch mit 4 Harmonischen; Typ 2: Schwingungsgemisch mit 2 Harmonischen) in die Untersuchungen einbezogen worden sind. Fragen über den Einfluß von wesentlichen Parametern bei periodischen Schwingungen, z.B. dem Einfluß der Grundfrequenz, der Lage der Harmonischen im interessierenden Frequenzbereich, der Anzahl und der Phasenlage der Harmonischen, der Amplitudenverhältnisse der Harmonischen, usw. bedürfen weiterer Ermittlungen.

In die hier beschriebenen Untersuchungen wurden weiterhin folgende Sachverhalte einbezogen:

Die "beginnende Wahrnehmbarkeit" (diese wird abkürzend im weiteren Text als Wahrnehmungsschwelle bezeichnet, auch wenn dies wegen einer fehlenden Definition bzw. Konvention nicht korrekt ist) wird mit Hilfe von drei verschiedenen Untersuchungsmethoden ermittelt. Es sollen die dabei auftretenden Unterschiede bei den Ergebnissen festgestellt werden und - wenn sich eine der drei Methoden als ausreichend geeignet erweist - nur noch diese für weitere Versuche verwendet werden.

Aufgrund der bei sinusförmigen Signalen festgestellten Ergebnisse soll eine Kurve im Schwingungsgeschwindigkeits-Frequenz-Bild zur Beschreibung der Wahrnehmungsschwelle ermittelt werden, die für Vergleiche mit Angaben von Wahrnehmungsschwellen im Schrifttum und für Vergleiche mit Ergebnissen bei Verwendung anderer Signale (periodischer, stochastischer, transienter Signale, usw.) herangezogen wird.

Die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei zwei Typen von periodischen Schwingungen hat zum Ziel, erste Hinweise zu erhalten, welche Beschreibungsgröße am besten geeignet sein könnte, die Stärke der Erschütterungssignale für verschiedene Arten von Erschütterungen zu kennzeichnen.

Weiterhin soll am Beispiel für ein Schwingungssignal auch die inter- und intraindividuelle Streubreite der Einzelergebnisse aufgezeigt werden, wenn 20 Versuchspersonen in die Untersuchungen einbezogen werden und jede Versuchsperson bei insgesamt vier Versuchen die Wahrnehmungsschwelle für das Erschütterungssignal feststellt.

Außerdem soll auch folgender Einfluß auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle festgestellt werden:

Bei einigen Signalen, insbesondere wenn die Frequenz oberhalb von etwa 50 Hz liegt, wird von der sich bewegenden Erregerplatte der Versuchs-Anlage ein nicht zu vermeidendes Geräusch abgestrahlt. Dieses Geräusch ist zwar dann, wenn die Schwingungsamplituden im Bereich der beginnenden Wahrnehmbarkeit liegen, verhältnismäßig leise, aber noch hörbar. Da nicht auszuschließen ist, daß die Versuchspersonen, auch wenn sie dies zu vermeiden suchen, das Geräusch als Führungs- bzw. Leitgröße für die Entscheidung über die beginnende Wahrnehmbarkeit der Erschütterungssignale heranziehen, wurden folgende Versuche durchgeführt: Eine Versuchsreihe wurde in üblicher Weise durchgeführt, dieselbe Versuchsreihe wurde wiederholt, aber mit gleichzeitigem Einspielen eines "Luftschallgeräusches über einen Lautsprecher", derart, daß das von der Versuchseinrichtung abgestrahlte Geräusch "verdeckt" wurde. Es wurde überprüft, ob signifikante Unterschiede bei den Ergebnissen mit und ohne Verdeckungsgeräusch auftreten.

Über den Einfluß des Geschlechts der Versuchspersonen, des Alters der Versuchspersonen, usw. auf die Wahrnehmungsschwelle wurde an anderer Stelle berichtet [19].

Über Ergebnisse von Untersuchungen, in die eine größere Anzahl von Versuchspersonen einbezogen worden ist, wie auch über solche mit Versuchspersonen ohne berufliche Kenntnisse und Erfahrungen über die Wirkungen von Erschütterungen, wird an anderer Stelle berichtet werden.

## **4. Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwingungen**

### **4.1 Einführung**

Zur Ermittlung der subjektiven Wahrnehmungsschwelle wird das in der Sinnesphysiologie als "indirekte Methode" bezeichnete Vorgehen verwendet, d.h. die Versuchspersonen indizieren das Ausmaß ihrer Reaktion auf eingeleitete Erschütterungsreize mittels einer Antwortkategorie ja/nein. Die Urteilmethode geht vom verbalen Verhalten der Versuchspersonen aus. Zur Bestimmung der Reizschwelle wird ein Reaktionsschema auf nominalem Niveau verwendet (dichotonische Schätzskala). Das Vorgehen ist durch eine Verknüpfung der genannten Schätzskala mit Kennwerten der Erregung, d.h. mit kinematischen Werten der eingeleiteten Erschütterungsreize gekennzeichnet.

### **4.2 Versuchseinrichtung**

Die Versuche wurden in der in der Landesanstalt für Immissionsschutz NRW (LIS) errichteten Versuchsanlage durchgeführt. Die im Fußboden des Versuchsraumes angeordnete Stahlplatte, die dazu diente, die Erschütterungen auf die Versuchspersonen zu übertragen, wurde durch eine servo-hydraulische Einrichtung erregt, deren technische Eigenschaften im LIS-Bericht Nr. 56 beschrieben worden sind [16]. Im Frequenzbereich von etwa 2 Hz bis 100 Hz können Schwinggeschwindigkeitsamplituden von etwa  $v(\text{peak}) = 0,02 \text{ mm/s}$  bis  $3,2 \text{ mm/s}$  bei äußerst geringem Eigenrauschen ( $v_{\text{eff}} \approx 0,003 \text{ mm/s}$ ) erzeugt werden. Die Stahlplatte ist derart ausgebildet, daß sie im genannten Frequenz- und Amplitudenbereich auch bei exzentrischer Belastung durch die Versuchspersonen praktisch konphas schwingt.

Die Erzeugung der Testsignale, die Ansteuerung der Erregeranlage, die Versuchsablaufsteuerung, die Dokumentation des Versuchsablaufes sowie die der Testsignale erfolgten mit Hilfe eines Prozeßrechners.

Die Versuchspersonen saßen entspannt angelehnt auf einem auf die Erregerplatte gestellten Holzstuhl, ohne Armlehnen, die Augen geöffnet und die Hände in den Schoß gelegt. Das Kopplungselement (Sitzmöbel) zwischen der Erregerplatte und der Versuchsperson bzw. in der Immissionssituation, zwischen dem Fußboden des Raumes und den sitzenden betroffenen Menschen, hat Einfluß auf die Größe der Erschütterungsreize, die über die Sitzfläche, die Rücken- und Armlehnen in den Körper der Betroffenen eingeleitet werden. Als Kopplungselement wurde bei den Versuchen dennoch ein Holzstuhl verwendet, auch wenn dieses Sitzmöbel derzeit in Wohnungen nur noch wenig gebraucht wird. Bei den Versuchen mit diesem "Kopplungselement" sollte erreicht werden, daß praktisch keine Änderung der Übertragung zwischen der Erregerplatte und der Holzstuhlsitzfläche auftritt. Dies ist überprüft worden. Über die Einleitung von mechanischen Schwingungen auf den auf einem Stuhl sitzenden Menschen ist im Jahresbericht der LIS 1986 berichtet worden [20].

### **4.3 Umgebungsverhältnisse im Versuchsraum**

Der Versuchsraum ist so ausgestaltet worden, daß möglichst eine Wohnumgebung simuliert wird. Es wurde angenommen, daß "Bürozimmer-Atmosphäre" als Näherung dafür angesehen

werden kann. Im Versuchsraum waren einige Büromöbel aufgestellt. Die Fenster waren mit Gardinen versehen und der Fußboden mit einem Teppichboden ausgestattet.

Im Untersuchungsraum herrschte bei eingeschalteter Erregeranlage ein A-bewerteter Geräuschpegel von etwa 42 dB.

Die Versuche wurden bei Tageslicht durchgeführt. In den Übergangsjahreszeiten und im Winter wurde morgens und nachmittags zeitweise eine Zusatzbeleuchtung eingeschaltet.

Die Raumtemperatur sollte etwa den Temperaturen entsprechen, wie sie üblicherweise in Wohnungen auftreten. Bei den Versuchen lagen sie überwiegend im Bereich von etwa 19 bis 23°C; an wenigen Tagen waren auch Temperaturen von etwa 17 bis 18°C bzw. von 24 bis 25°C vorhanden.

Die relative Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum lag während der Versuche überwiegend im Bereich von etwa 60 bis 70%; an wenigen Versuchstagen lag sie auch etwas unterhalb bzw. etwas oberhalb des angegebenen Bereiches.

#### 4.4 Untersuchungsmethoden

Bisher vorliegende Ergebnisse von Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei Erschütterungen zeigen, daß die Untersuchungsmethoden auch Einfluß auf die Reaktionen (Entscheidung beim Auffinden der Wahrnehmungsschwelle) haben; siehe z.B. [1, 2, 3].

Die Untersuchungsmethoden können sich durch folgende Bedingungen voneinander unterscheiden:

- Die Erschütterungsreize können durch den Versuchsleiter nach bestimmten Kriterien den Versuchspersonen dargeboten (eingestellt) werden oder die Versuchspersonen können die Stärke der Erschütterungsreize selbst einstellen.
- Die Erschütterungsreize können nach verschiedenen Zeitmustern den Versuchspersonen dargeboten werden, d.h. die Dauer der Erschütterungsreize und die Pausen zwischen zwei Reizdarbietungen können unterschiedlich sein.
- Die psychologischen und physiologischen Bedingungen der Versuchspersonen, die vor und während der Versuchsdurchführung vorliegen, sind von der Art der für die Versuche herangezogenen Personen und deren Verhalten und Tätigkeiten vor den Versuchen abhängig. Dazu gehören z.B. die Disposition der Versuchspersonen während des Experimentes, evtl. Vorbelastungen durch Erschütterungen, z.B. durch Fahren in Personenkraftwagen bis kurz vor Versuchsbeginn, die Durchführung der Experimente zu verschiedenen Tageszeiten, z.B. vormittags bei ausgeruhten und konzentrierten Versuchspersonen oder Durchführung nachmittags evtl. bei ermüdeten oder weniger konzentrierten Versuchspersonen nach Selbsteinschätzung, die Erwartungshaltung und die Aufmerksamkeit während der Versuche, der Gesundheitszustand der Versuchspersonen, u.a.m.

Um den Einfluß der Art der Darbietung der Erschütterungsreize festzustellen, wurden folgende Methoden verwendet:

#### 4.4.1 Methode M (zu)

Erschütterungsreize werden den Versuchspersonen vom Versuchsleiter monoton zunehmend dargeboten.

Bei jeder Frequenz beginnt der Versuch mit einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude  $v(\text{peak}) = 0,8 \text{ mm/s}$ , d.h. einem Orientierungssignal, welches "sicher spürbar" ist. Erfolgt dabei die Antwort "ja = spürbar", beginnt der eigentliche Versuch bei einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude von  $v(\text{peak}) = 0,06 \text{ mm/s}$ , die fast immer "nicht spürbar" ist. Die Stärke wird dann in Stufen monoton zunehmend dargeboten; Stufung: 2 dB; d.h. folgende Schwinggeschwindigkeitswerte wurden verwendet: 0,06, 0,08, 0,10, 0,13, 0,15, 0,20, 0,25 mm/s usw. bis zu einem größten Wert von 2 mm/s bzw. 3 mm/s. Die Signaldauer betrug 10 Sekunden und die Pausendauer zwischen zwei Signalen 5 Sekunden. Die "Wahrnehmungsschwelle" wurde dem Stufenwert zugeordnet, bei dem die Versuchsperson das erste Mal mit "ja" geantwortet hat, wenn dreimal nacheinander ununterbrochen mit "ja" geantwortet worden ist. - Die hier gewählte Definition der Wahrnehmungsschwelle bei dieser Art der Signaldarbietung ist in Bild 1 dargestellt.

#### 4.4.2 Methode M (ab)

Erschütterungsreize werden den Versuchspersonen vom Versuchsleiter monoton abnehmend dargeboten,

Bei dieser Untersuchungsmethode wurde jedes Signal zunächst mit einer "sicher spürbaren" Stärke dargeboten, d.h. bei Frequenzen oberhalb von 10 Hz mit einer Amplitude von  $v(\text{peak}) = 0,8 \text{ mm/s}$  und bei Frequenzen unterhalb von 10 Hz mit einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude von  $v(\text{peak}) = 3,2 \text{ mm/s}$ . Die Signaldauer betrug 10 Sekunden und die Pausendauer zwischen zwei Signalen 5 Sekunden. Die Stärke der Erschütterungsreize wurde dann in Stufen vermindert (monoton abnehmend); Stufung: 2 dB bis herab zu  $v(\text{peak}) = 0,06 \text{ mm/s}$ . Die verbalen Antworten der Versuchspersonen "ja" (in Bild 2 mit Ziffer 1 bezeichnet) wurden durch Betätigen eines Druckknopfes angezeigt und für alle Beteiligten durch Aufleuchten einer Signallampe sichtbar gemacht. Dabei galt das Erschütterungssignal als "subjektiv wahrgenommen", wenn innerhalb der Signaldauerzeit der Druckknopf betätigt wurde.

Wurde eine der Versuchsperson dargebotene Signalstärke das erste Mal "nicht wahrgenommen" (in Bild 2 mit Ziffer 0 bezeichnet), also wurde der Druckknopf nicht betätigt, wurde dasselbe Signal mit gleicher Stärke wiederholt dargeboten. Erfolgte dann wiederum von der Versuchsperson die Antwort (0), wurde die Signalstärke um eine Stufe vermindert. Erfolgte dann das dritte Mal nacheinander die Antwort (0), galt die letzte Stufe als Wahrnehmungsschwelle. Wenn bei "unsicherer Entscheidung" der Versuchsperson die dargebotene Signalstärke das erste Mal "nicht wahrgenommen" wurde und bei erneut angebotenen Signal gleicher Stufe die Antwort (1) gegeben wurde, dann wurde danach die Signalstärke um eine Stufe vermindert. Erfolgte dabei die Antwort (0), wurde diese Stufe erneut angeboten. Erfolgte dann wiederum die Antwort (0), wurde die Signalstufe um eine weitere Stufe vermindert. Erfolgte dabei die Antwort (0), galt jetzt die letzte Stufe als Wahrnehmungsschwelle. Das

Vorgehen für die Definition der Wahrnehmungsschwelle nach dieser Methode ist in Bild 2 dargestellt.

#### 4.4.3 Methode M (selbst)

Die Erschütterungsreize werden von der Versuchsperson selbst variiert

Bei dieser Methode wurde den Versuchspersonen zu Beginn des Versuches vom Versuchsleiter ein in der Regel "sicher wahrnehmbares" Signal von  $v(\text{peak}) = 0,8 \text{ mm/s}$  bei Frequenzen  $f > 10$

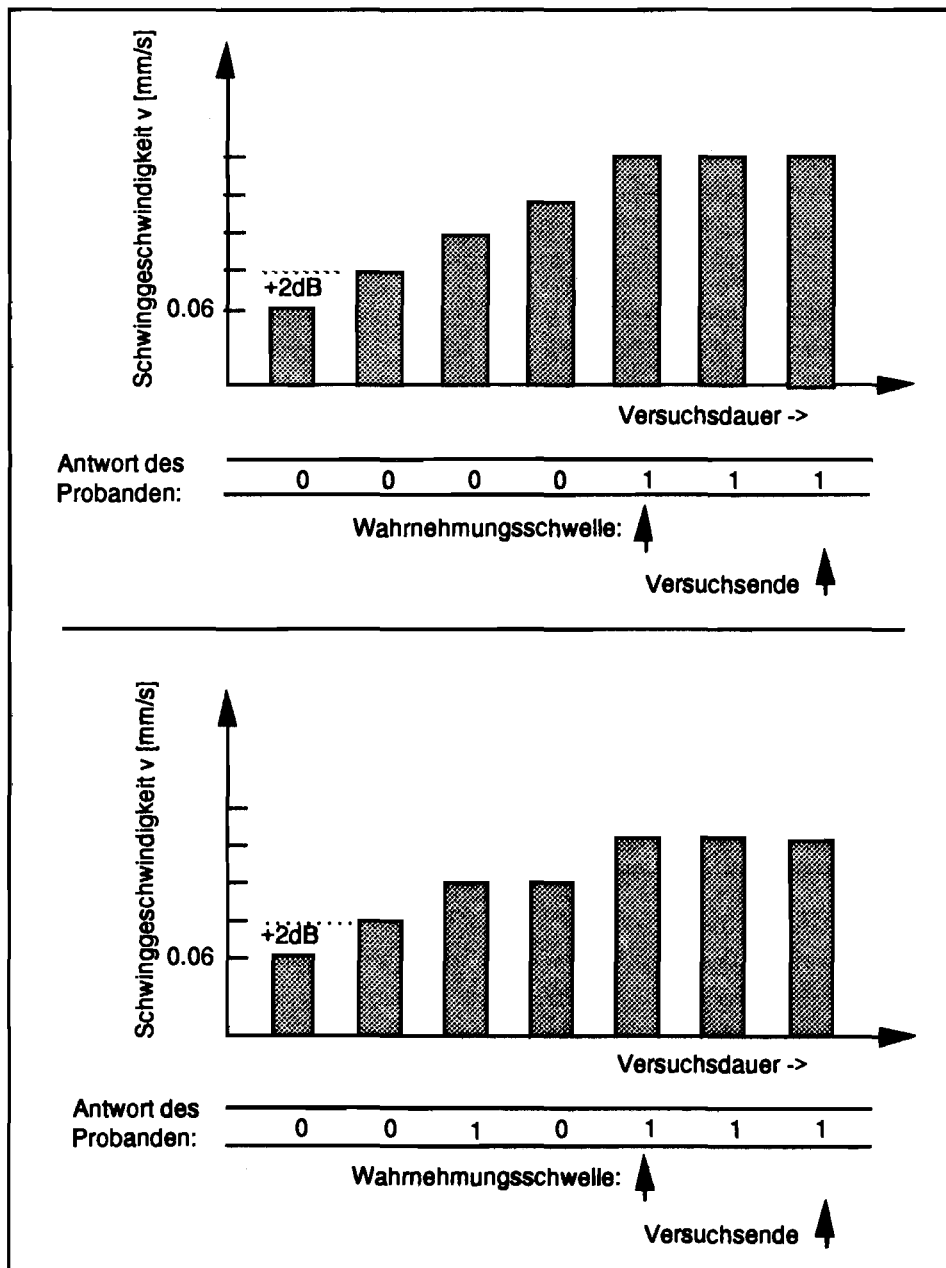


Bild 1:  
Definition der Wahrnehmungsschwelle bei der Untersuchungsmethode M(zu), dargestellt an zwei möglichen Versuchsabläufen.  
Eine "1" als Antwort steht für "spürbar", eine "0" bedeutet "nicht spürbar"



Hz angeboten. Das Signal war dann ständig an der Erregerplatte vorhanden. Die Versuchsperson wurde aufgefordert, durch Bedienen von Tasten auf einem kleinen handlichen Schaltgerät die Stärke der Signale solange zu variieren, bis nach ihrer Meinung die Stufe der "gerade beginnenden subjektiven Wahrnehmung" erreicht ist, d.h. das Signal gerade noch "gefühl" werden konnte. Die Anordnung der Tasten auf dem Schaltkästchen ist in Bild 3 dargestellt. Durch Bedienen der Taste T1 (kurzzeitiges Tippen oder ständiges Niederdrücken) nahm die Stärke der Signale ständig zu. Durch Bedienen der Taste T3 konnte die Stärke der Signale vermindert werden. Durch Betätigen der Taste T2 hatte die Versuchsperson zusätzlich

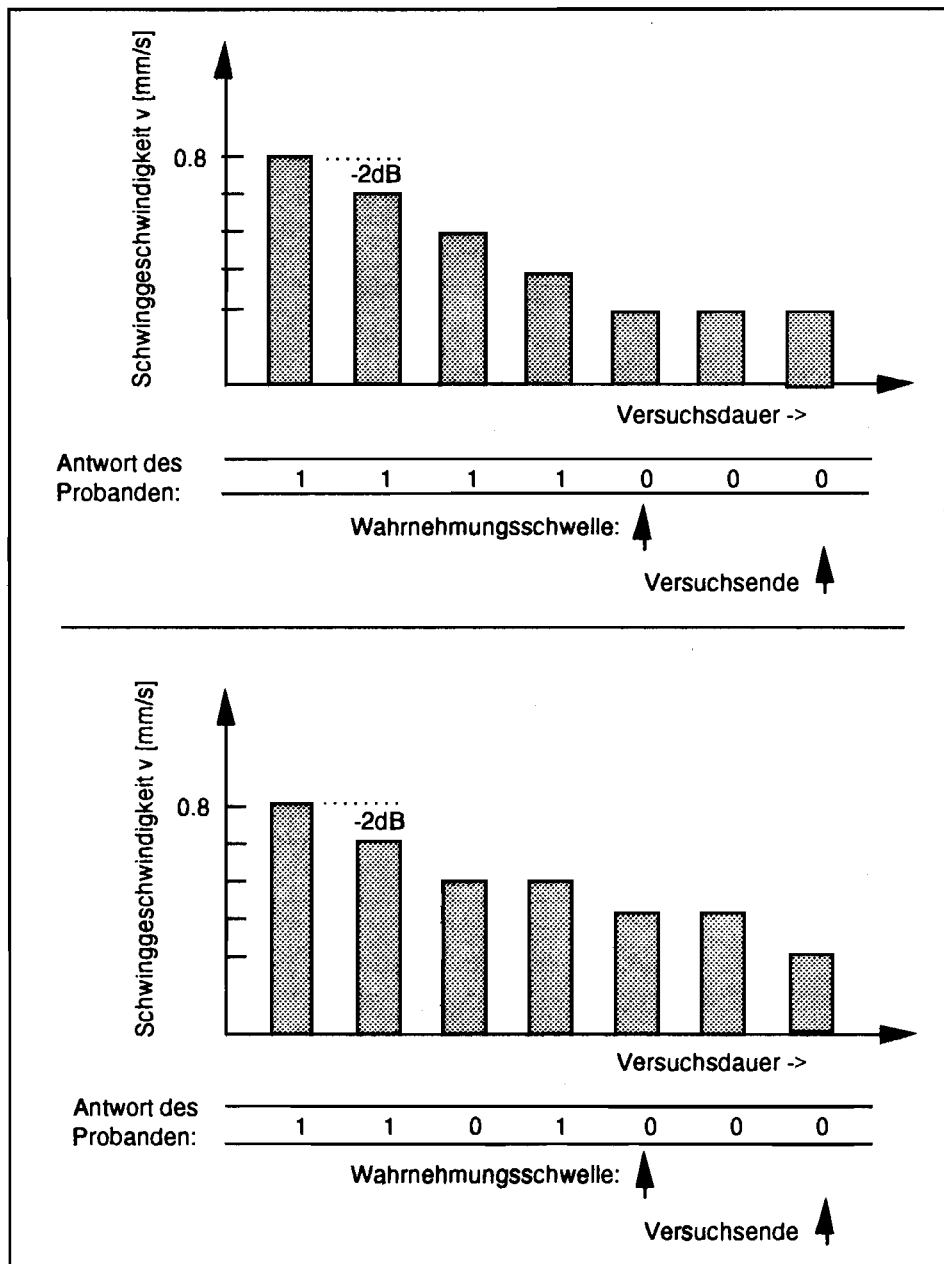
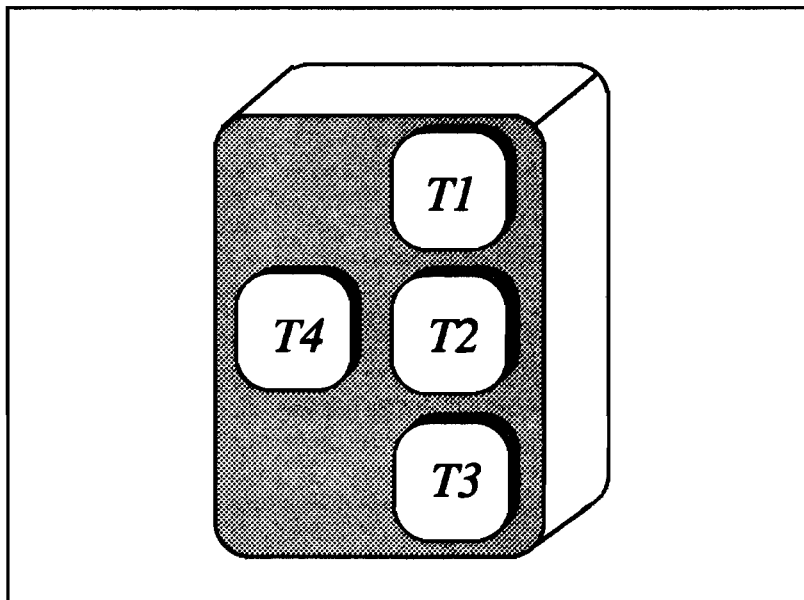


Bild 2:  
Definition der Wahrnehmungsschwelle bei der Untersuchungsmethode M(ab),  
dargestellt an zwei möglichen Versuchsabläufen.  
Eine "1" als Antwort steht für "spürbar", eine "0" bedeutet "nicht spürbar"

die Möglichkeit die eingestellte Stärke der Erschütterungssignale abzuschalten und nach Loslassen der Taste T2 die vorher eingestellte Stärke wieder einwirken zu lassen. Dadurch sollte die Möglichkeit eröffnet werden, die Entscheidung der Versuchspersonen "sicherer" zu machen. Es war den Versuchspersonen freigestellt, hiervon Gebrauch zu machen oder nicht. Den Versuchspersonen wurden keine weiteren Instruktionen gegeben, auf welche Weise sie jeweils die Wahrnehmungsschwelle "finden". Vor der Entscheidung sollte die eingestellte Signalstärke jedoch mindestens einige Sekunden anstehen und auf die Versuchspersonen einwirken. Den Versuchspersonen wurde vor Beginn der Versuche der Hinweis gegeben, daß die gesamte Entscheidungsfindungszeit für ein Signal möglichst nicht länger als zwei bis drei Minuten beanspruchen sollte.



**Bild 3:**  
Handgerät mit Tastschaltern zum Ändern der Schwingungsamplituden,  
Unterbrechen der Einwirkung und Beenden des Versuchs

Die Kennzeichnung des Zustandes "Wahrnehmungsschwelle ist eingestellt" wurde von der Versuchsperson durch Betätigen der Taste T4 angezeigt. Das wurde auch durch Erlöschen einer Signallampe im Versuchsraum sichtbar gemacht. Die bei der eingestellten Wahrnehmungsschwelle vorhandene Stärke der Erschütterungssignale wurde mit Hilfe des Versuchsablaufprogramms im Prozeßrechner gespeichert. Danach wurde der Versuchsperson durch den Versuchsleiter ein weiteres "sicher wahrnehmbares" Signal dargeboten, mit der Aufforderung, die Wahrnehmungsschwelle erneut zu ermitteln.

Bei einer Versuchs-Sitzung wurde von jeder Versuchsperson die Wahrnehmungsschwelle bei sieben verschiedenen Signalen (Sinusschwingungen mit verschiedenen Frequenzen) festgestellt; Gesamtdauer einer Versuchs-Sitzung: etwa 10 bis 20 Minuten.

#### 4.5 Versuchspersonen und deren Information zu Beginn der Versuche

Die Wahrnehmungsschwelle wurde bei den Untersuchungen, über deren Ergebnisse hier berichtet wird, für eine Gruppe von Versuchspersonen festgestellt, bei denen folgende individuell-persönliche Fakten das Kollektiv kennzeichnen:

Männer im Alter von 23 bis 57 Jahren. Diese Versuchspersonen hatten bereits persönliche Kenntnisse über die Einwirkung von Erschütterungen durch ihre berufliche Tätigkeit, bzw. durch vorangegangene Versuche zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle auf der Versuchseinrichtung der LIS. Es handelt sich um Personen, die sonst Tätigkeiten als Techniker und Ingenieure in Büros ausüben; Anzahl:  $N = 20$ .

Es ist anzunehmen, daß die bei dieser Gruppe von Personen festgestellten Ergebnisse verallgemeinert werden können. Das heißt, daß auch bei anderen Versuchspersonen bei etwa gleicher Gruppengröße etwa vergleichbare Ergebnisse festgestellt werden. Bei weiteren Untersuchungen auf der Versuchseinrichtung der LIS sind auch andere Versuchspersonen-Gruppen in die Untersuchungen einbezogen worden, die keine Vorkenntnisse über Erschütterungen und deren Wirkungen gehabt haben. Über die Ergebnisse ist an anderer Stelle berichtet worden [19]. Bei den Versuchspersonen wurde bei ihrer ersten Teilnahme an einem Versuch zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle eine gewisse Unsicherheit in der Entscheidungsfindung "das Signal ist gerade noch wahrnehmbar" beobachtet, die beim ersten Versuch in der Tendenz zu einer etwas "höher eingestellten Stärke" der Schwingungsamplituden führt. Auf die Größe von Mittelwerten, wenn jedes Signal von jeder Versuchsperson insgesamt vier Mal festgestellt wird, hat das praktisch keinen Einfluß. Vor Beginn der ersten Versuchsreihe, bei der die Erschütterungsreize vom Versuchsleiter der Versuchsperson monoton zunehmend; Methode: M (zu), dargeboten wurden, wurde jede Versuchsperson durch einen Informationsbogen über den Ablauf der Versuche informiert; siehe Anlage 1. Dieser Informationsbogen wurde von der Versuchsperson vor dem Versuch durchgelesen.

Bei geänderter Methode zur Durchführung der Versuche, wurden die Versuchspersonen durch einen geänderten Informationsbogen über den aktuellen Ablauf der Versuche informiert; in Anlage 2 ist der Informationsbogen wiedergegeben, der bei der Methode M (selbst) den Versuchspersonen ausgehändigt worden ist.

Die Zeitdauer für eine Versuchs-Sitzung, d.h. für die Entscheidungsfindungen einer Versuchsperson, die Wahrnehmungsschwelle für sieben verschiedene Signale zu finden, lag im Bereich von etwa 8 bis 20 Minuten. Zwischen zwei Versuchs-Sitzungen bei einer Versuchsperson lag mindestens 1 Kalendertag.

## 4.6 Verwendete Signale (Erschütterungsreize)

### 4.6.1 Allgemeines

Die Sinus-Signale wurden bei den Methoden M (zu) und M (ab) zu Beginn und am Ende der Darbietungsdauer (10 Sekunden) "weich" ein- und ausschwingend den Versuchspersonen dargeboten, um relativ steile Signaländerungen und deren mögliche Wirkungen zu vermeiden.

Bild 4 zeigt ein Beispiel für den Zeitverlauf des Sinus-Signals mit einer Frequenz von 10 Hz.

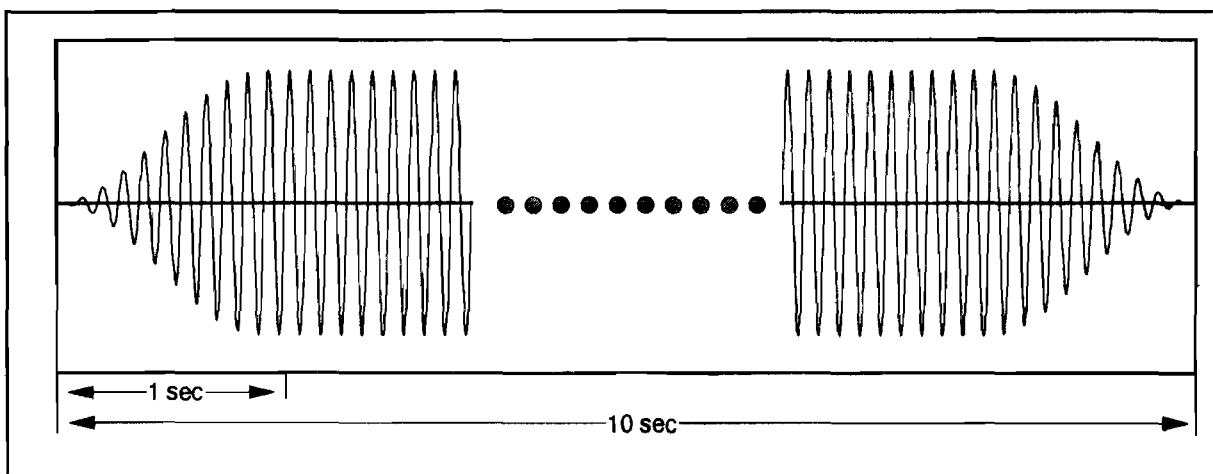


Bild 4:

Beispiel für den Zeitverlauf einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von  $f = 10\text{ Hz}$  mit "weichem" Ein- und Ausschwingen

### 4.6.2 Untersuchungsmethode M (zu)

Mit dieser Methode wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Bei jeder Versuchsreihe wurde die Wahrnehmungsschwelle von den Versuchspersonen bei sieben Sinus-Signalen mit verschiedenen Frequenzen festgestellt. Die Signale wurden in folgender Reihenfolge dargeboten:

- Versuchsreihe Nr. 1 :        15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 10 Hz, 5 Hz und 3 Hz  
 Versuchsreihe Nr. 2 :        30 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 80 Hz und 100 Hz  
 Versuchsreihe Nr. 3 :        2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, 8 Hz und 10 Hz

Diese Versuchsreihen für sinusförmige Signale bei 19 verschiedenen Frequenzen werden bei der Darstellung der Ergebnisse zusammengefaßt betrachtet.

### 4.6.3 Untersuchungsmethode M (ab)

Mit dieser Methode wurde eine Versuchsreihe durchgeführt und die Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Signale bei sieben verschiedenen Frequenzen festgestellt. Den Versuchspersonen wurden die Signale in folgender Reihenfolge dargeboten:

- Versuchsreihe Nr. 4 :        5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 50 Hz und 80 Hz

#### 4.6.4 Untersuchungsmethode M (selbst)

Mit dieser Untersuchungsmethode wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Bei jeder Versuchsreihe wurde die Wahrnehmungsschwelle von den Versuchspersonen bei sieben verschiedenen Sinus-Signalen mit verschiedenen Frequenzen festgestellt. Die Reihenfolge der Darbietung der Signale wurde dabei vor jedem Versuch mit Hilfe eines Zufallsgenerators erneut festgelegt. Durch die randomisierte Signaldarbietung sollten mögliche Reihenfolgeeffekte vermieden werden.

Versuchsreihe Nr. 5 :           5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 50 Hz und 80 Hz  
 Versuchsreihe Nr. 6 :           3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz und 50 Hz  
 Versuchsreihe Nr. 7 :           3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz und 50 Hz

Bei der Versuchsreihe Nr. 7 wurden dieselben Signale wie bei der Versuchsreihe Nr. 6 verwendet. Dies war durch eine geänderte Fragestellung bei der Durchführung der Versuchsreihe Nr. 7 bedingt; es wurde dabei einfach nochmals die Wahrnehmungsschwelle in gleicher Weise wie bei der Versuchsreihe Nr. 6 ermittelt. Diese Versuchsreihe wurde jedoch nur einmal wiederholt. Von jeder Versuchsperson, die in diese Untersuchungen einbezogen worden ist, wurde die Wahrnehmungsschwelle bei jedem Signal insgesamt viermal bei der Versuchsreihe Nr. 6 und zweimal bei der Versuchsreihe Nr. 7 ermittelt, so daß jeweils sechs Einzelwerte festgestellt worden sind. - Die bei diesen Versuchsreihen mit dieser Methode ermittelten Ergebnisse werden ebenfalls zusammengefaßt dargestellt.

#### 4.6.5 Zeitmuster der Signaldarbietung

Aufgrund bisheriger Untersuchungen ist bekannt, daß eine Entscheidung, d.h. die Urteilsbildung der Versuchspersonen im Bereich der beginnenden Wahrnehmbarkeit leichter bei kurzen Einwirkungszeiten ist im Vergleich zu länger andauernden Einwirkungen, siehe z.B. [1, 2, 9, 12]. Die Einwirkungsdaern der Erschütterungsreize wurden bei bisher durchgeführten Versuchen im Bereich von etwa 5 Sekunden bis 30 Sekunden gewählt.

Bei den Untersuchungen, über die hier berichtet wird, wurden bei den Methoden M (zu) und M (ab) folgende Zeiten gewählt:

Einwirkungsdauer der Erschütterungsreize                   :       10 Sekunden  
 Pausendauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden  
 Erschütterungsreizen   :       5 Sekunden

Das Vorhandensein der Erschütterungsreize während der Einwirkungsdauer wurde den Versuchspersonen optisch durch eine im Blickfeld liegende Signalleuchte angezeigt. Damit sollte die Entscheidung der Versuchspersonen bei der Urteilsfindung über das Vorhandensein der Erschütterungsreize erleichtert werden.

Bei der Methode M (selbst) war das jeweils der Versuchsperson angebotene Signal ständig vorhanden. Die Stärke des Signals wurde von der Versuchsperson variiert bis zur Entscheidung "Wahrnehmungsschwelle ermittelt".

Um unterschiedliche psychologische und physiologische Effekte bei der Durchführung der Versuche weitgehend auszuschalten, wurden die Versuchsreihen wie folgt durchgeführt:

Die Durchführung der Versuche ist so geplant worden, daß die Zeitdauer für eine Versuchs-Sitzung weniger als 30 Minuten betrug, um Ermüdungseffekte zu vermeiden. Jede Versuchsperson nahm an einem Kalendertag nur an einer Versuchs-Sitzung teil. Bei Wiederholversuchen lag zwischen zwei Versuchs-Sitzungen mindestens ein Kalendertag. Die Durchführung der Versuche erfolgte tagsüber zu verschiedenen Tageszeiten.

#### **4.7 Auswerteverfahren**

Der bei der Entscheidung der Versuchsperson "Wahrnehmungsschwelle für das anstehende Signal ist ermittelt" (realisiert durch Betätigen eines Druckschalters auf einem kleinen Handgerät) vorhandene Ausprägungsgrad des Erschütterungsreizes wurde als Scheitelwert der Schwingungsgeschwindigkeitsamplitude  $v(\text{peak})$  in mm/s auf einem Prozeßrechner gespeichert und für weitere Auswertungen herangezogen.

Bei den Versuchen wurden von den Versuchspersonen vereinzelt bei den o.g. Entscheidungen auch Ausprägungsgrade für die Erschütterungsreize eingestellt, die bei Werten  $v(\text{peak}) < 0,02$  mm/s lagen und - insbesondere bei sinusförmigen Schwingungen mit niedriger Frequenz, d.h. bei  $f < 3$  Hz - auch bei Werten von  $v(\text{peak}) > 3$  mm/s (das etwa entspricht der oberen Grenze des Einstellbereiches der Versuchsanlage). In diesen Fällen wurden die Werte nicht verworfen, sondern sie wurden zu  $v(\text{peak}) = 0,02$  mm/s bzw. zu  $v(\text{peak}) = 3$  mm/s gesetzt. Eine Überprüfung hat ergeben, daß dieses Vorgehen praktisch keinen Einfluß auf die zur Beschreibung der Verteilungen verwendeten Perzentilwerte der Summenhäufigkeitsverteilungen hat.

Die Versuchsreihen Nr. 1 bis Nr. 6 wurden insgesamt viermal durchgeführt; die Versuchsreihe Nr. 7 zweimal.

Die bei den wiederholt durchgeführten Versuchen festgestellten Einzelwerte für die Wahrnehmungsschwellen wurden bei jeder Versuchsperson für jedes Signal zu sogenannten "Personenmittelwerten" (arithmetische Mittelung) zusammengefaßt. Ist die Wahrnehmungsschwelle z.B. bei vier Durchführungen einer Versuchsreihe ermittelt worden, so wird für jede Versuchsperson der "Personenmittelwert" aus vier Einzelwerten errechnet. Durch die Wiederholversuche und die Mittelwertbildung soll die Streuung der festgestellten Werte für die Wahrnehmungsschwellen bei den einzelnen Versuchspersonen vermindert werden.

An den Versuchsreihen haben 20 Versuchspersonen teilgenommen. Bei den Versuchsreihen Nr. 1 bis Nr. 6 mit je drei Wiederholversuchen wurden für jedes Signal bei diesem Vorgehen 80 einzelne Werte für die Wahrnehmungsschwellen festgestellt und aus diesen 20 Personenmittelwerte gebildet.

Bei der Versuchsreihe Nr. 7 wurden für jedes Signal 40 einzelne Werte für die Wahrnehmungsschwelle festgestellt und aus diesen 20 Personenmittelwerte gebildet.

Zur Beschreibung der Verteilungen der Personenmittelwerte für die verschiedenen Meßwert-Kollektive wurden nichtparametrische statistische Verfahren verwendet. Die Kollektive der Personenmittelwerte werden insbesondere durch die 50-Perzentile (Mediane) beschrieben. Außerdem werden die 10-Perzentile und die 90-Perzentile angegeben. Diese Perzentilwerte bezeichnen die Personenmittelwerte der Wahrnehmungsschwellen, unter denen 50%, 10% und 90% des Kollektivs liegen.

Für die Kennzeichnung der Schwankungsbreite der Personenmittelwerte wird die Differenz {90-Perzentil minus 10-Perzentil} verwendet. Zwischen beiden Werten liegen 80% aller Personenmittelwerte des Kollektivs. Diese Differenz wird auch als Interdezilbereich I80 bezeichnet [17].

Der Vergleich von Kollektiven miteinander erfolgte mit Hilfe des verteilungsunabhängigen U-Testes von MANN-WHITNEY [18]. Dieser Test prüft, ob die beiden miteinander verglichenen Kollektive aus Grundgesamtheiten mit demselben Median stammen.

Tabelle 1: 50-Perzentile (Mediane) der Personenmittelwerte  $v(\text{peak})$  [mm/s] für die Versuchsreihen Nr. 1 bis Nr. 7;

Anzahl der Personenmittelwerte,  
aus denen die 50-Perzentile bei jeder Frequenz ermittelt worden sind:  
Versuchsreihe Nr. 1, 2, 3, 4, 5 und 7 : N = 20  
Versuchsreihe Nr. 6 : N = 19

Fre- quenz Hz	Nummer der Versuchsreihe						
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7
	$v(\text{peak})$ [mm/s]						
2			1,80				
3	1,70		1,40			1,22	1,10
4			1,10				
5	0,59		0,65	0,41	0,36	0,48	0,38
6			0,38				
8			0,22			0,20	0,14
10	0,21		0,30	0,21	0,22	0,24	0,21
15	0,17			0,19	0,18	0,15	0,14
20	0,16			0,19	0,17	0,14	0,13
25	0,17						
30	0,18	0,22		0,19	0,19	0,15	0,15
35		0,18					
40		0,19					
50		0,17		0,14	0,16	0,13	0,13
60		0,14					
80		0,12		0,11	0,10		
100		0,11					
<b>Methode</b>	<b>M(zu)</b>		<b>M(ab)</b>		<b>M(selbst)</b>		

## 4.8 Ergebnisse

### 4.8.1 Wahrnehmungsschwellen für sinusförmige Signale bei Anwendung verschiedener Untersuchungsmethoden

Mit der Untersuchungsmethode M (zu) wurden die Versuchsreihen Nr. 1 bis Nr. 3, mit der Methode M (ab) die Versuchsreihe Nr. 4 und mit der Methode M (selbst) die Versuchsreihen Nr. 5 bis Nr. 7 durchgeführt; siehe Tabelle 1.

Für die bei den Versuchsreihen bei jedem Signal ermittelten Personenmittelwerte ( $N = 20$ ) wurden die Median-Werte berechnet, die in Tabelle 1 aufgelistet sind.

Um den möglichen Einfluß der Untersuchungsmethoden auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen festzustellen, wurde wie folgt vorgegangen.

Von den in diese Untersuchungen einbezogenen Versuchspersonen (in der Regel  $N = 20$ ) wurde die Wahrnehmungsschwelle bei den Frequenzen

$$f = 5 \text{ Hz, } 10 \text{ Hz, } 15 \text{ Hz, } 20 \text{ Hz, } 30 \text{ Hz, } 50 \text{ Hz und } 80 \text{ Hz}$$

unter Anwendung aller drei genannten Untersuchungsmethoden ermittelt; siehe Tabelle 1.

Tabelle 2: 50-Perzentile der Personenmittelwerte  $v(\text{peak})$  [mm/s] für die Untersuchungsmethoden M (zu), M (ab) und M (selbst), zusammengefaßt aus den Versuchsreihen Nr. 1 bis 7 nach Tab. 1.

$n$  : Anzahl der Personenmittelwerte,  
aus denen die 50-Perzentile berechnet sind

Frequenz Hz	M(zu)		M(ab)		M(selbst)	
	$v(\text{peak})$	$n$	$v(\text{peak})$	$n$	$v(\text{peak})$	$n$
5	0,65	40	0,41	20	0,38	59
10	0,23	40	0,21	20	0,21	59
15	0,17	20	0,19	20	0,15	59
20	0,16	20	0,19	20	0,14	59
30	0,19	40	0,19	20	0,16	59
50	0,17	20	0,14	20	0,14	59
80	0,12	20	0,11	20	0,10	20

Die bei den genannten Frequenzen bei jeder Untersuchungsmethode ermittelten Personenmittelwerte wurden zusammengefaßt und zur Kennzeichnung dieser Kollektive wiederum jeweils die Median-Werte (50-Perzentile) verwendet. Die auf diese Weise zusammengefaßten Median-Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet. In der Tabelle ist auch jeweils die Anzahl der Personenmittelwerte  $n$  angegeben, aus denen die Median-Werte berechnet worden sind. Diese Median-Werte sind in Bild 5 im Schwinggeschwindigkeits-Frequenz-Diagramm dargestellt. Die Median-Werte sind zur besseren Übersicht durch gerade Linien miteinander verbunden worden.

Vergleicht man die Median-Werte, die bei Anwendung der drei Untersuchungsmethoden ermittelt worden sind miteinander, so erkennt man nur verhältnismäßig geringe Unterschiede. Zur Überprüfung der Unterschiede der Ergebnisse, die bei Anwendung der verschiedenen Untersuchungsmethoden ermittelt worden sind, wurde als statistischer Test der verteilungsunabhängige U-Test von MANN-WHITNEY herangezogen. Dieser Test prüft, ob die beiden



jeweils miteinander verglichenen Kollektive aus Grundgesamtheiten mit demselben Median stammen [18]. Gewählt wird ein Signifikanz-Niveau von 5% (statistische Sicherheit  $S = 95\%$ ). Das Ergebnis der Prüfung wird bei  $p \geq 0,05$  als nicht signifikant bezeichnet, d.h. bei der gewählten statistischen Sicherheit ist kein Unterschied zwischen den verglichenen Medianen (d.h. hier den Untersuchungsmethoden) nachzuweisen.

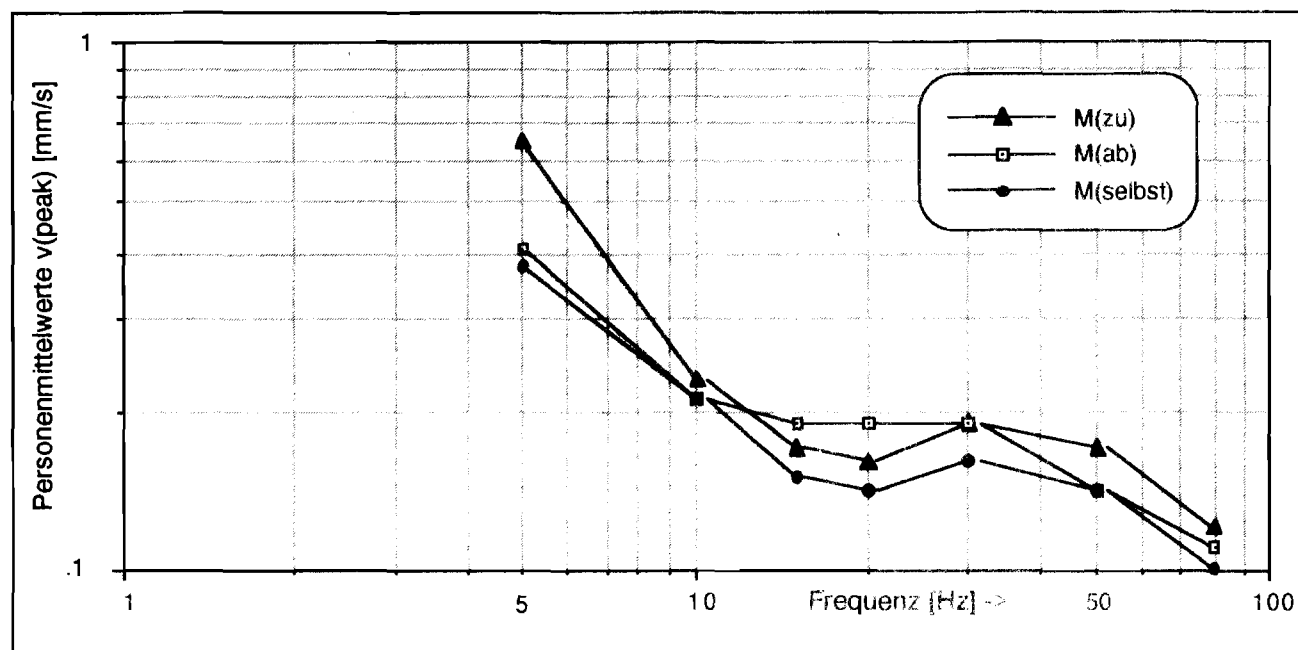


Bild 5:  
50-Perzentile der Personenmittelwerte, ermittelt bei Anwendung der Untersuchungsmethoden M(zu), M(ab) und M(selbst).

Die Überprüfung ergab, daß auf dem gewählten Signifikanz-Niveau nur bei dem Sinus-Signal mit einer Frequenz von  $f = 5$  Hz ein Unterschied beim Vergleich der Methoden M (zu) gegen M (ab) und bei Vergleich der Methoden M (zu) gegen M (selbst) anzunehmen ist. Diese Methoden unterscheiden sich bei dieser Frequenz auch noch auf dem 1%-Niveau. In allen anderen Fällen hat die Überprüfung ergeben, daß kein Unterschied zwischen den miteinander verglichenen Untersuchungsmethoden nachzuweisen war.

In der Tendenz wurden bei Anwendung der Methode M (selbst) bei den in die Versuchsreihen Nr. 5 bis 7 einbezogenen Frequenzen eher etwas niedrigere Personenmittelwerte im Vergleich zu den Werten, die bei Anwendung der Methoden M (zu) und M (ab) ermittelt worden sind, gefunden. Für die sich an diese Versuchsreihen anschließenden Versuche wurde nur noch die Methode M (selbst) verwendet, weil diese Methode am einfachsten durchzuführen ist und die Versuchspersonen offensichtlich bei dieser Versuchsdurchführung am geringsten belastet (angestrengt) werden.

Für eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse, die bei Anwendung der in diese Untersuchungen einbezogenen Methoden festgestellt worden sind, wurden alle die bei den Versuchsreihen Nr. 1 bis Nr. 7 ermittelten Ergebnisse zusammengefaßt und zur Kennzeichnung der Verteilungen dieser Werte bei jeder Frequenz das 50-Perzentil als Lagemaß und zur

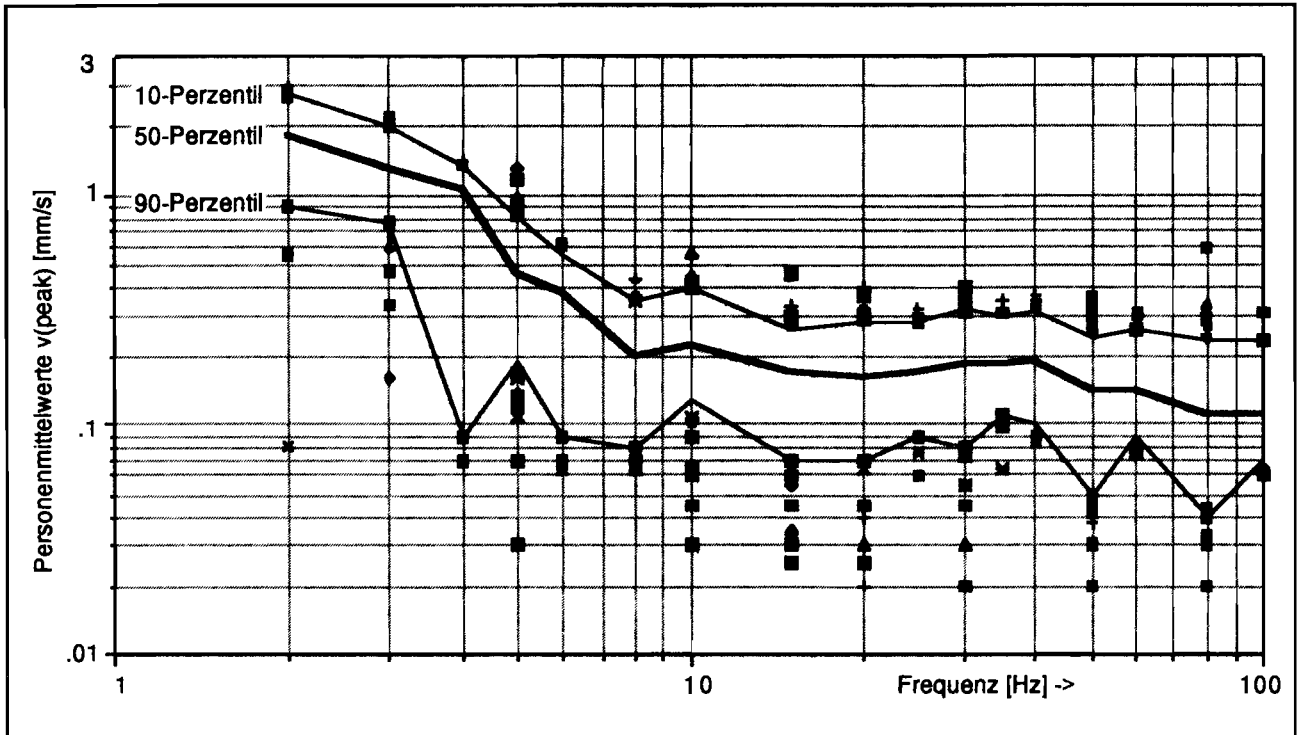


Bild 6:

Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwingungen in sitzender Körperhaltung.  
50-, 10- und 90-Perzentile der Personenmittelwerte.

Stichprobenumfang: Summe der bei den Methoden M(zu), M(ab), M(selbst) bei jeder Frequenz ermittelten Personenmittelwerte,  $20 \leq N \leq 119$ .

Kennzeichnung der Streuung das 10-Perzentil und das 90-Perzentil der Personenmittelwerte angegeben; siehe Bild 6. Im Bereich zwischen dem 90-Perzentil und dem 10-Perzentil liegen jeweils 80% aller Personenmittelwerte. Die Median-Werte und in gleicher Weise die 10-Perzentile und die 90-Perzentile sind zur besseren Übersicht durch gerade Linien miteinander verbunden worden. In Tabelle 3 sind diese Werte als  $v(\text{peak})$ -Werte zusammengestellt.

Der Linienzug, der sich durch Verbindung der Median-Werte nach Bild 6 ergibt, wird für weitere Betrachtungen als eine Art "Basis-Vergleichskurve" betrachtet. Dieser Linienzug wird zum Vergleich mit Angaben zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen im Schrifttum und in Regelwerken herangezogen. Er dient weiterhin auch für Vergleiche mit den Werten, die bei Versuchen mit weiteren Signalen in der Versuchseinrichtung der LIS festgestellt worden sind und festgestellt werden.

#### 4.9 Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit den Angaben im Schrifttum und in Regelwerken

Aus den in Bild 6 dargestellten Ergebnissen ist ersichtlich, daß die Median-Werte der in Abschnitt 4.8 erläuterten "Basis-Vergleichskurve" im Frequenzbereich von etwa  $8 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$  bei Werten von  $v(\text{peak}) = 0,14 \dots 0,22 \text{ mm/s}$  liegt. Bei den Ergebnissen aller durchgeführten

Versuchsreihen wurde festgestellt, daß die Median-Werte im Frequenzbereich von etwa  $f = 15...20$  Hz in der Tendenz immer etwa niedriger liegen im Vergleich zu den Werten bei Frequenzen unterhalb bzw. oberhalb von dem genannten Bereich.

Im niedrigen Frequenzbereich von etwa 8 Hz bis 2 Hz steigen die Werte an bis auf Werte von  $v(\text{peak}) = 1,83$  mm/s bei  $f = 2$  Hz.

Im höheren Frequenzbereich von etwa  $50 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$  fallen sie ab auf einen Wert von  $v(\text{peak}) = 0,11$  mm/s bei  $f = 100$  Hz.

In Bild 7 ist die Basis-Vergleichskurve eingetragen und im Vergleich dazu auch die Werte, die von anderen Autoren im Schrifttum angegeben worden sind [1, 2, 3]. Im Frequenzbereich unterhalb von etwa 7 Hz stimmen die Werte der vorgelegten Untersuchungen verhältnismäßig gut mit den von MCKAY und von PARSONS und GRIFFIN angegebenen Werten überein; sie liegen jedoch oberhalb der von MIWA mitgeteilten Werte. Im Frequenzbereich von etwa 7 Hz bis 60 Hz stimmen die Werte der hier vorgelegten Untersuchungen verhältnismäßig gut mit den Werten von MIWA überein; sie liegen aber im Frequenzbereich von etwa 7 Hz bis 20 Hz deutlich unterhalb der von MCKAY und von PARSONS und GRIFFIN ermittelten Werte. Im Bereich oberhalb von etwa 60 Hz liegen die Werte der vorgelegten Untersuchungen oberhalb der von den genannten anderen Autoren angegebenen Werte. Auffällig ist, daß im Bereich von etwa 60 bis 70 Hz die von PARSONS und GRIFFIN für die Wahrnehmungsschwelle festgestellten Werte deutlich unterhalb der übrigen Werte liegen.

Tabelle 3: Wahrnehmungsschwellen für sinusförmige Schwingungen in sitzender Körperhaltung; 10-Perzentile, 50-Perzentile und 90-Perzentile der Personenmittelwerte  $v(\text{peak})$  in mm/s;

Stichprobenumfang: Summe der bei den Methoden M (zu), M (ab) und M (selbst) bei jeder Frequenz ermittelten Personenmittelwerte,  $20 \leq N \leq 119$

Frequenz Hz	10-Per- zentile	50-Per- zentile	90-Per- zentile	Kollek- tiv N
2	0,91	1,83	2,81	20
3	0,77	1,3	2	80
4	0,09	1,06	1,38	20
5	0,19	0,46	0,81	119
6	0,09	0,38	0,55	20
8	0,08	0,2	0,35	59
10	0,13	0,22	0,4	119
15	0,07	0,17	0,26	99
20	0,07	0,16	0,28	99
25	0,09	0,17	0,28	20
30	0,08	0,18	0,32	20
35	0,11	0,18	0,3	20
40	0,1	0,19	0,31	20
50	0,05	0,14	0,24	99
60	0,09	0,14	0,26	20
80	0,04	0,11	0,23	60
100	0,07	0,11	0,23	20

Bei den Vergleichen ist zu berücksichtigen, daß unterschiedliche Untersuchungs-Methoden angewendet worden sind. PARSONS und GRIFFIN haben die sogenannte Signal-Erkennungs-Methode angewendet. Von ihnen wurde für das Erkennen des Signals durch die Versuchspersonen ein bestimmter Wahrscheinlichkeitswert als Wahrnehmungsschwelle definiert [3]. Bei den von MIWA mitgeteilten Ergebnissen wurden die Signale vom Versuchsleiter den Versuchspersonen in einer Versuchsreihe dargeboten, beginnend im Bereich "nicht wahrnehmbar" bis zur Wahrnehmungsschwelle und in einer weiteren Versuchsreihe beginnend im Bereich "sicher wahrnehmbar" in kleinen Stufen abnehmend bis zur Wahrnehmungsschwelle. Nicht das 50-Perzentil (Median-Werte) sondern die arithmetischen Mittelwerte aus beiden Versuchsreihen wurden von ihm als eigentliche Wahrnehmungsschwellen definiert [1]. Die von MCKAY mitgeteilten Ergebnisse wurden mit einer Methode gewonnen, bei der den Versuchspersonen die Signale ebenfalls beginnend im Bereich "nicht wahrnehmbar" zunehmend in kleinen Stufen dargeboten worden sind. Wurde die Stärke bei einer Stufe bei drei Darbietungen von den Versuchspersonen mindestens zweimal erkannt, wurde diese als Wahrnehmungsschwelle definiert [2].

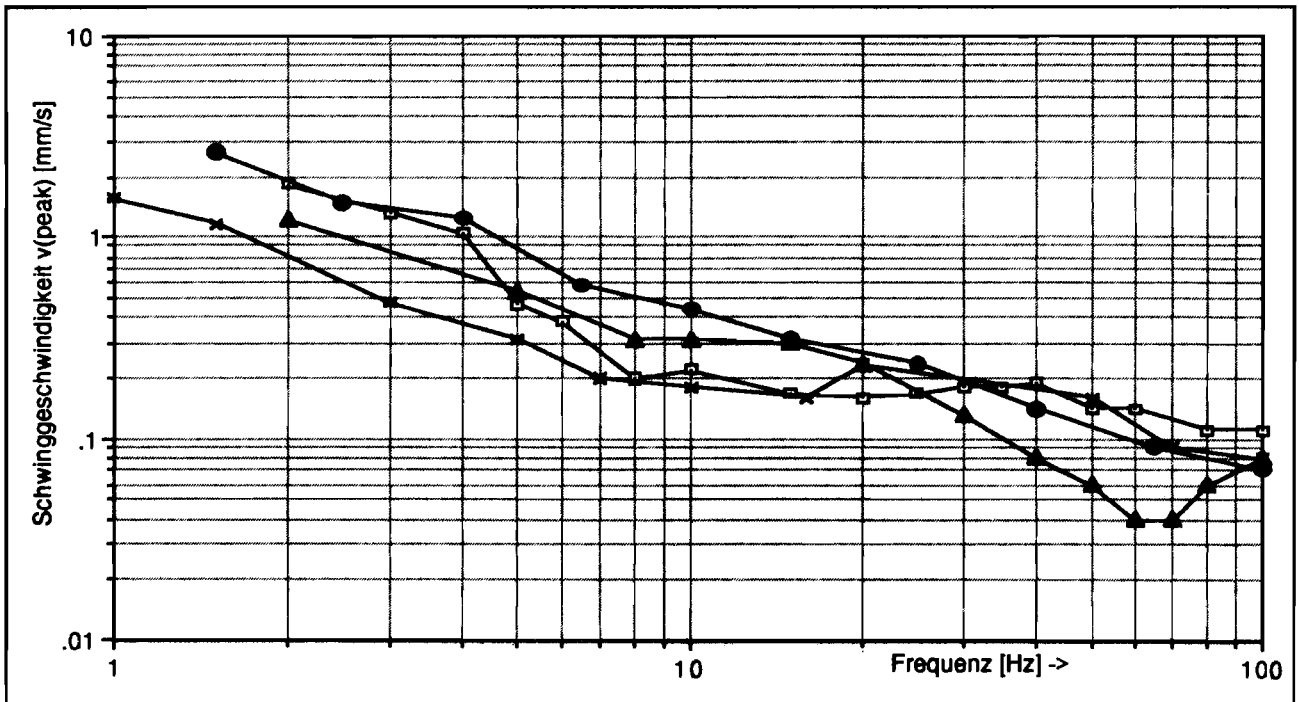


Bild 7:

Vergleich der bei der Zusammenfassung aller Versuchsreihen festgestellten Wahrnehmungsschwellen (Basis-Bergleichskurve) mit den Angaben von Wahrnehmungsschwellen anderer Autoren im Schrifttum

- Splittgerber, 1991, Mediane
- ▲— Parsons und Griffin, 1988, Mediane [3]
- McKay, 1972, Mediane [2]
- ×— Miiwa, 1967, Mittelwerte [1]

n Bild 8 ist die Basis-Vergleichskurve, d.h. es sind die bei der Zusammenfassung aller Versuchsreihen festgestellten Wahrnehmungsschwellen im  $v(\text{peak})$ -Frequenz-Diagramm eingetragen und im Vergleich dazu auch die Werte, die in der VDI-Richtlinie 2057 für die Bewertung im Sitzen und Stehen bei Einwirkung in z-Richtung (parallel zur Wirbelsäule, KZ-Werte) und für die Bewertung bei nicht vorgegebener Körperhaltung (KB-Werte) angegeben sind, und zwar für die Werte  $KZ = 0,1$  und  $KB = 0,1$  (genäherte Angabe für die Fühlschwelle) [7].

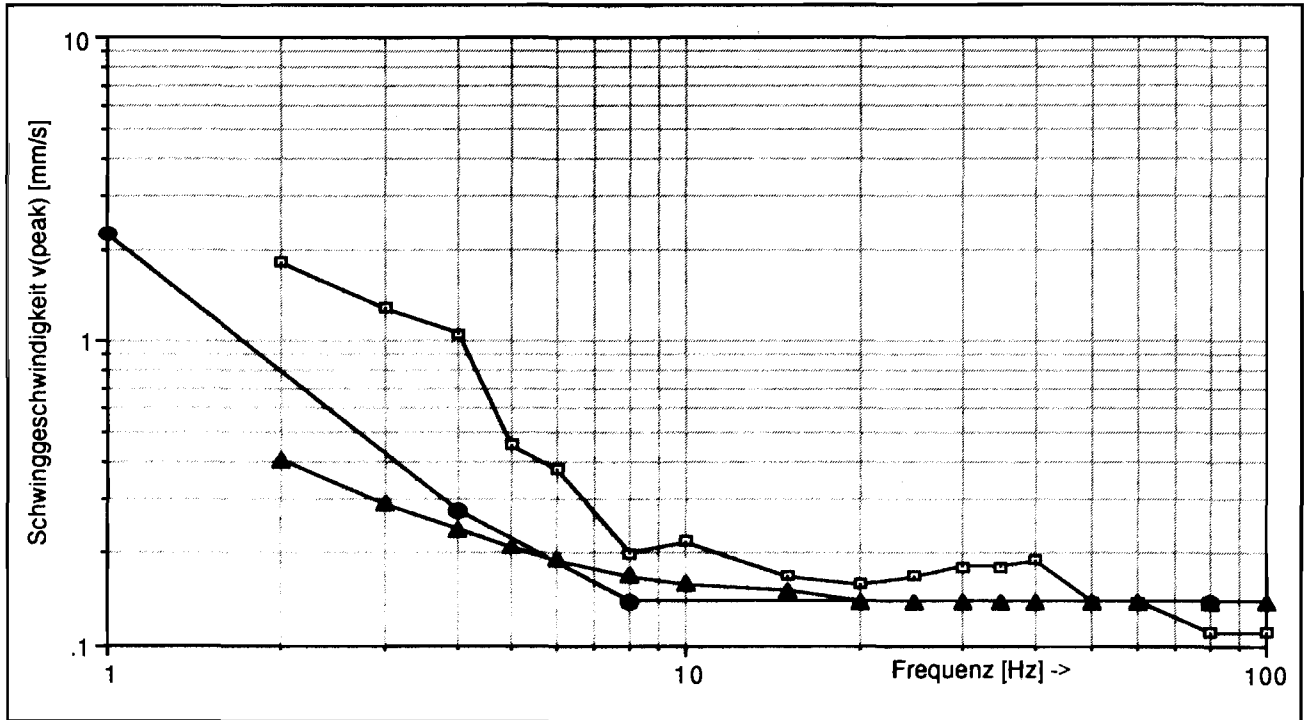


Bild 8:

Vergleich der bei der Zusammenfassung aller Versuchsreihen festgestellten Wahrnehmungsschwellen mit den Angaben in der VDI-Richtlinie 2057 [7]

- Splittgerber, 1991, Mediane
- ▲— VDI-Richtlinie 2057, KB = 0.1
- VDI-Richtlinie 2057, KZ = 0.1

Man erkennt, daß die Werte der vorgelegten Untersuchungen im Bereich oberhalb von etwa 8 Hz verhältnismäßig gut mit den beiden Bewertungskurven nach der VDI-Richtlinie übereinstimmen. Im Frequenzbereich unterhalb von etwa 8 Hz liegen die Werte der vorgelegten Untersuchungen oberhalb der Werte von  $KZ = 0,1$  und  $KB = 0,1$ .

## **5. Wahrnehmungsschwelle für zwei Typen von periodischen Ganzkörperschwingungen**

### **5.1 Einführung**

Die Wahrnehmungsschwelle wurde für zwei Typen von künstlich erzeugten periodischen Schwingungen bei demselben Versuchspersonen-Kollektiv untersucht, bei dem auch die Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwingungen festgestellt worden war. Es sollte festgestellt werden, ob bei periodischen Signalen für die Wahrnehmungsschwelle die Spitzenwerte (Scheitelwerte), die Effektivwerte oder andere Kennwerte der Erschütterungssignale maßgebend sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen bei Verwendung von periodischen Signalen als Erschütterungsreize werden mit den Ergebnissen verglichen, die bei demselben Versuchspersonen-Kollektiv bei sinusförmigen Signalen ermittelt worden sind. Dabei befanden sich die Versuchspersonen in derselben Körperhaltung, nämlich sitzend auf einem Holzstuhl, der auch bei sinusförmigen Schwingungen als Kopplungselement verwendet worden war.

Die beiden verwendeten Typen von künstlich erzeugten periodischen Schwingungen sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

**Typ 1:** Diese Schwingungen wurden als Summe von vier Sinusschwingungen mit den Frequenzen von 8 Hz, 24 Hz, 40 Hz und 56 Hz erzeugt. Das Amplitudenverhältnis der vier Harmonischen betrug 1:1:1:1. Zur Erzeugung von periodischen Schwingungen mit möglichst verschieden großen Scheitelfaktoren wurde die Phasenlage der einzelnen Harmonischen variiert.

**Typ 2:** Diese periodischen Schwingungen wurden durch die Summe von zwei Sinusschwingungen erzeugt. Die erste Harmonische hatte bei diesem Typ von Schwingungen unverändert die Frequenz von 10 Hz. Für die zweite Harmonische wurden die Frequenzen von 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 70 Hz und 80 Hz gewählt. Das Amplitudenverhältnis betrug 1:1.

In dem im Erschütterungsimmissionsschutz besonders interessierenden Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz kann man unendlich viele periodische Schwingungen bilden. Diese unterscheiden sich durch die Anzahl der Harmonischen, das Amplitudenverhältnis der Harmonischen und die Phasenlage der Harmonischen gegeneinander. Die beiden in diese Untersuchung einbezogenen Typen von periodischen Schwingungen wurden willkürlich gewählt, um einen ersten Einblick zu gewinnen. Zum Erkennen der Größen und Kennwerte, die bei Verwendung von periodischen Schwingungen als Erschütterungsreize Einfluß auf die Wahrnehmungsschwelle haben, sind weitere umfangreiche Untersuchungen notwendig.

## 5.2 Verwendete Signale (Erschütterungsreize)

Die sieben periodischen Signale des Typs 1 sind mit P01 bis P07 bezeichnet worden. Folgende algebraische Gleichung beschreibt die Signale.

$$v(t) = h_{\text{norm}} (\sin(\omega t) + \sin(3 \omega t - \alpha_1) + \sin(5 \omega t - \alpha_2) + \sin(7 \omega t - \alpha_3))$$

Darin bedeuten:

- v : Schwinggeschwindigkeit
- t : Zeit
- $h_{\text{norm}}$  : Normierungsfaktor auf den Wertebereich  $\pm 1$
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  : Phasenwinkel
- $\omega$  : Kreisfrequenz

Für die erste Harmonische wurde die Frequenz zu  $f = 8 \text{ Hz}$  gewählt; mit dieser Wahl ergibt sich  $\omega = 16\pi [1/\text{s}]$ .

Tabelle 4: Phasenwinkel zur Bildung der Signale P01 bis P07 (Typ 1)

Signal	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
P01	$7,6 * 2 \pi/35$	$11,4 * 2 \pi/21$	$5,6 * 2 \pi/15$
P02	$6,0 * 2 \pi/35$	$12,0 * 2 \pi/21$	$5,0 * 2 \pi/15$
P03	$7,5 * 2 \pi/35$	$13,0 * 2 \pi/21$	$5,0 * 2 \pi/15$
P04	$8,5 * 2 \pi/35$	$14,0 * 2 \pi/21$	$5,0 * 2 \pi/15$
P05	$10,0 * 2 \pi/35$	$15,0 * 2 \pi/21$	$5,0 * 2 \pi/15$
P06	$11,5 * 2 \pi/35$	$17,0 * 2 \pi/21$	$5,0 * 2 \pi/15$
P07	$15,5 * 2 \pi/35$	$18,0 * 2 \pi/21$	$5,0 * 2 \pi/15$

Die zur Bildung der Signale P01 bis P07 gewählten Phasenwinkel sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Phasenwinkel wurden so gewählt, daß möglichst große Unterschiede in den Scheitelfaktoren zwischen den Signalen P01 bis P07 vorhanden sind. Der Scheitelfaktor  $k_F$  ist das Verhältnis aus dem Maximalwert und dem maximalen Effektivwert des Signals; siehe dazu die Angaben in der VDI-Richtlinie 2057, Blatt 1 [7]. Als maximaler Effektivwert wurde nach den Angaben in der genannten VDI-Richtlinie der höchste Wert genommen, den der gleitende Effektivwert (exponentielle Mittelung mit der Zeitkonstante  $\Delta = 125 \text{ ms}$ , auch als Zeitbewertung "FAST" bezeichnet) während der Meßdauer erreicht; es gilt

$$k_F = v(\text{peak}) / v_{F\text{max}}$$

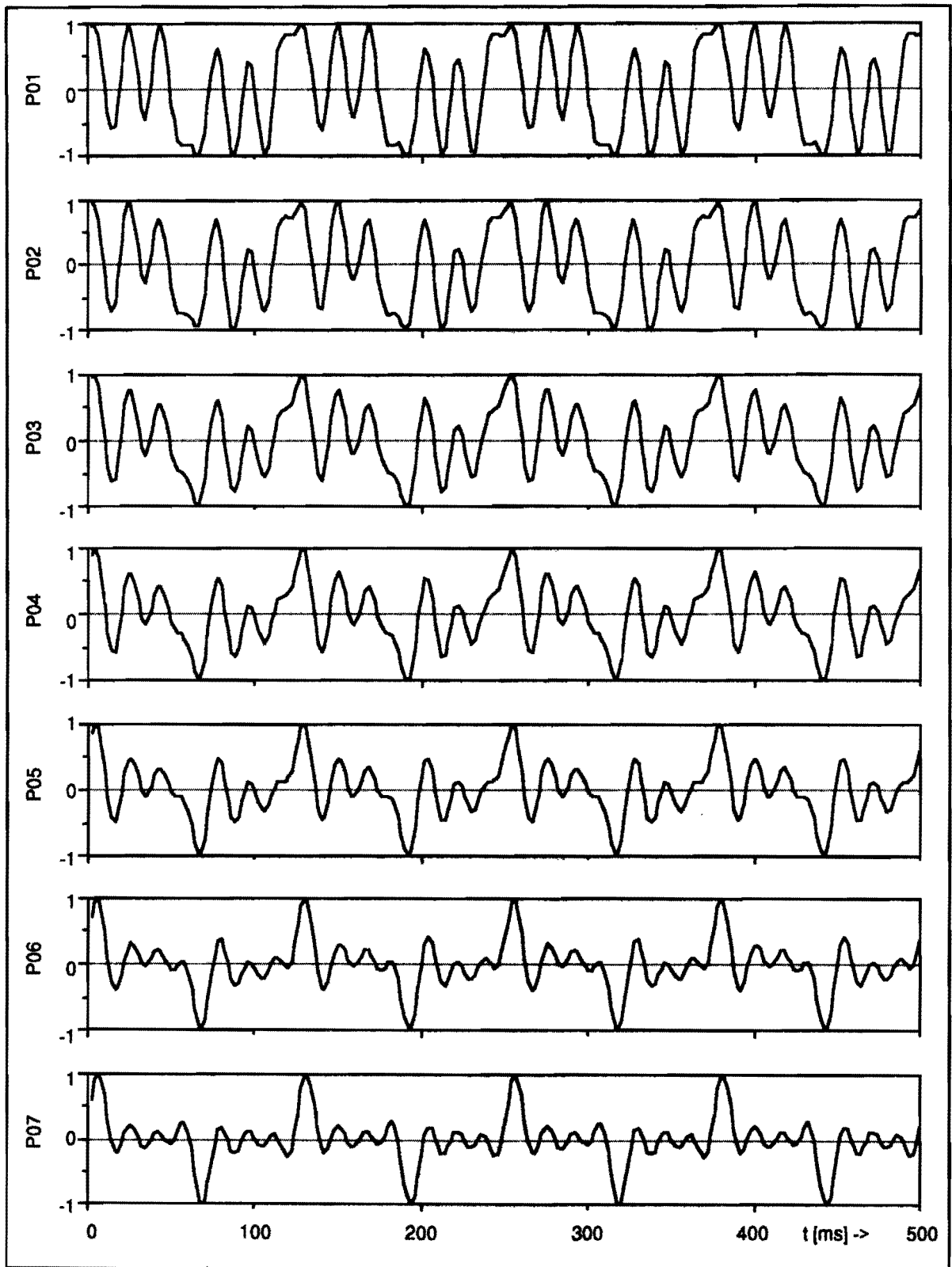
Es bedeuten:

- $v(\text{peak})$ : Scheitelwert der Schwinggeschwindigkeit
- $v_{F\text{max}}$ : Maximalwert des gleitenden Effektivwertes

In Tabelle 5 sind die  $k_F$ -Werte für die Signale P01 bis P07 aufgelistet.

Tabelle 5: Scheitelfaktoren  $k_F = v(\text{peak})/v_{F\text{max}}$  der Signale P01 bis P07

Signal	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07
$k_F$	1,45	1,64	1,89	2,13	2,33	2,56	2,70



**Bild 9:**  
Schwinggeschwindigkeits-Zeit-Diagramme für die periodischen Signale P01...P07 (Typ1)



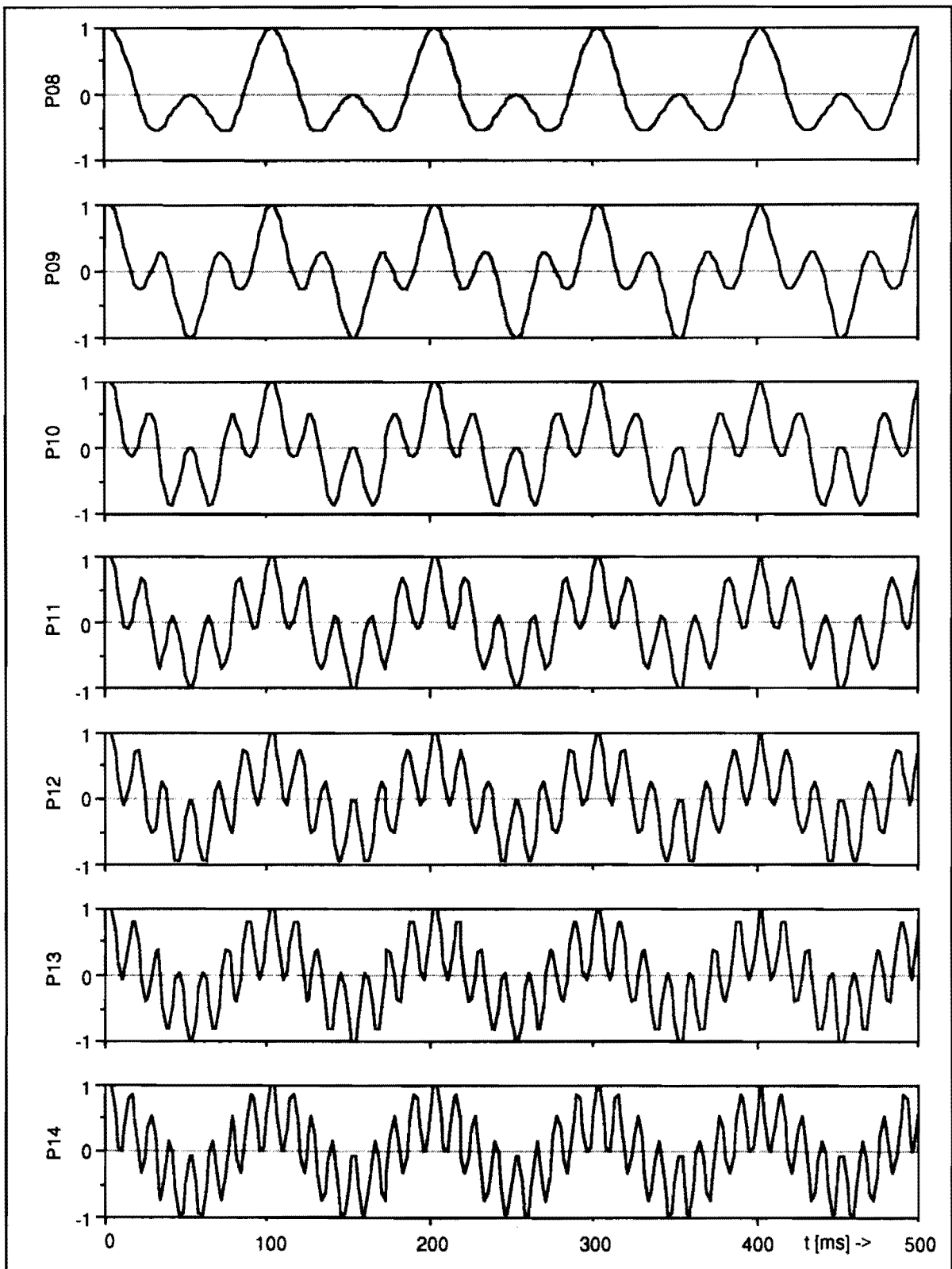


Bild 10:  
Schwinggeschwindigkeits-Zeit-Diagramme für die periodischen Signale P08...P14 (Typ2)

In Bild 9 sind die Schwinggeschwindigkeits-Zeit-Diagramme (v-t-Bilder) für die Signale P01 bis P07 dargestellt.

Die sieben periodischen Signale des Typs 2 sind mit P08 bis P14 bezeichnet worden. Folgende algebraische Gleichung beschreibt diese Signale:

$$v(t) = h_{\text{norm}} \cdot (\sin(\omega t) + \sin(k_1 \omega t + \alpha))$$

Darin bedeuten:

v	: Schwinggeschwindigkeit
t	: Zeit
$h_{\text{norm}}$	: Normierungsfaktor
$\omega$	: Kreisfrequenz
$k_1$	: Faktor
$\alpha$	: Phasenwinkel

Für die erste Harmonische ist die Frequenz bei  $f = 10$  Hz gewählt worden; damit ist  $\omega = 20\pi [1/s]$ .

Das Amplitudenverhältnis der beiden Harmonischen in jedem Signal wurde zu 1:1 gewählt. Für jedes Signal wurde der Phasenwinkel  $\alpha$  so gewählt, daß innerhalb der Periodendauer der Grundfrequenz von 10 Hz mindestens einmal die Summe der Amplituden der beiden Harmonischen auftritt.

Tabelle 6: Faktoren und Phasenwinkel zur Bildung der Signale P08 bis P14 (Typ 2)

Signal	$k_1$	$\alpha$
P08	2	$-\pi/2$
P09	3	0
P10	4	$+\pi/2$
P11	5	0
P12	6	$-\pi/2$
P13	7	0
P14	8	$\pi/2$

Die zur Bildung der Signale P08 bis P14 gewählten Faktoren  $k_1$  und Phasenwinkel  $\alpha$  sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Bei diesen periodischen Signalen mit zwei Harmonischen hat die zweite Harmonische Werte zwischen  $f = 20$  Hz und  $f = 80$  Hz mit Frequenzschritten von 10 Hz von Signal zu Signal.

In Bild 10 sind die Schwinggeschwindigkeits-Zeit-Diagramme (v-t-Bilder) für die Signale P08 bis P14 dargestellt.

Bei diesem Typ der periodischen Signale ändert sich das Verhältnis zwischen den Scheitelwerten der Signale und den maximalen Effektivwerten der Signale nicht; die Signale haben praktisch alle einen gleichgroßen Scheitelfaktor von  $k_F = 1,96$ .

### 5.3 Untersuchungsmethode

Es wurde die in Abschnitt 4.4.3 beschriebene Methode M (selbst) verwendet; d.h. die Erschütterungsreize wurden von den Versuchspersonen selbst variiert bis zum Auffinden der Wahrnehmungsschwelle. Zu Beginn jedes Versuches wurde der Versuchsperson vom Versuchsleiter ein in der Regel sicher wahrnehmbares Signal angeboten mit folgenden  $v(\text{peak})$ -Werten:

Signaltyp 1	Signal P01	$v(\text{peak}) = 0,8 \text{ mm/s}$
	Signal P02	$v(\text{peak}) = 1,0 \text{ mm/s}$
	Signal P03	$v(\text{peak}) = 1,0 \text{ mm/s}$
	Signal P04	$v(\text{peak}) = 1,3 \text{ mm/s}$
	Signal P05	$v(\text{peak}) = 1,6 \text{ mm/s}$
	Signal P06	$v(\text{peak}) = 1,6 \text{ mm/s}$
	Signal P07	$v(\text{peak}) = 2,0 \text{ mm/s}$
Signaltyp 2	Signal P08	$v(\text{peak}) = 0,8 \text{ mm/s}$
	Signal P09	$v(\text{peak}) = 1,3 \text{ mm/s}$
	Signal P10	$v(\text{peak}) = 1,3 \text{ mm/s}$
	Signal P11	$v(\text{peak}) = 1,3 \text{ mm/s}$
	Signal P12	$v(\text{peak}) = 1,3 \text{ mm/s}$
	Signal P13	$v(\text{peak}) = 1,3 \text{ mm/s}$
	Signal P14	$v(\text{peak}) = 1,0 \text{ mm/s}$

Durch Vorversuche war festgestellt und durch die späteren Versuche ist bestätigt worden, daß die Signale mit den genannten  $v(\text{peak})$ -Amplituden von allen Versuchspersonen sicher wahrgenommen worden waren. Sie dienten den Versuchspersonen als Orientierung über die Art des jeweils zu erwartenden Signals.

Das zur Orientierung angebotene Signal war ständig vorhanden und die Versuchspersonen waren dann aufgefordert worden, wie es bereits bei den vorangegangenen Versuchen bei dieser Methode erläutert worden war, die Stärke der Signale solange zu variieren, bis dieses als gerade eben noch wahrnehmbar empfunden worden ist.

Bei einer Versuchssitzung wurde von jeder Versuchsperson die Wahrnehmungsschwelle bei insgesamt acht verschiedenen Signalen festgestellt, und zwar bei sieben verschiedenen periodischen Signalen und einem sinusförmigen Referenzsignal mit der Frequenz von 15 Hz.

Die Darbietungsreihenfolge der sieben periodischen Signale wurde vor jedem Versuch mit Hilfe eines Zufallsgenerators neu festgelegt (randomisierte Signaldarbietung).

### 5.4 Auswerteverfahren

Die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde in gleicher Weise vorgenommen, wie sie in Abschnitt 4.7 beschrieben worden ist. Der Ausprägungsgrad des Erschütterungsreizes bei der Wahrnehmungsschwelle wurde als  $v(\text{peak})$ -Wert auf einem Prozeßrechner gespeichert und für weitere Auswertungen herangezogen. An den Versuchsreihen zur Ermittlung der

Wahrnehmungsschwellen bei periodischen Schwingungen vom Typ 1 und Typ 2 haben dieselben 20 Versuchspersonen teilgenommen, die auch für die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen bei sinusförmigen Ganzkörperschwingungen herangezogen worden waren. Von jeder Versuchsperson wurde die Wahrnehmungsschwelle bei jedem Signal insgesamt bei vier Versuchen ermittelt. Die einzelnen Meßwerte wurden durch arithmetische Mittelung zu einem Personenmittelwert zusammengefaßt. Für jedes Signal wurden auf diese Weise 20 Personenmittelwerte festgestellt. Zur Beschreibung der Verteilungen dieser Personenmittelwerte werden Perzentilwerte verwendet, insbesondere das 50-Perzentil.

Die Verteilungen der Perzentilwerte werden mit Hilfe von Boxplots in der Form dargestellt, wie sie aus Bild 11 ersichtlich ist.

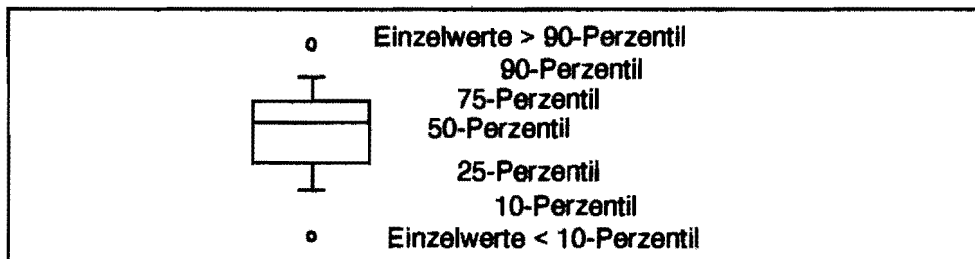


Bild 11:  
Erläuterung der Darstellung von Kollektivverteilungen in Form von Boxplots

Zur Untersuchung von möglichen Zusammenhängen zwischen Kennwerten zur Kennzeichnung der Signale und den Scheitelfaktoren  $k_F$  wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt [17]. Als Abhängigkeitsmaß wurde der Produktmoment-Korrelationskoeffizient  $r$  (PEARSON) errechnet und eine lineare Regreßionsanalyse durchgeführt [17, 18].

Als Kennwerte zur Kennzeichnung der periodischen Signale wurden folgende Werte verwendet:

- Der Scheitelwert  $v(\text{peak})$
- Der maximale Wert des gleitenden Effektivwertes  $v_{F\text{max}}$  (Zeitkonstante FAST = 125 ms)
- Der von GRIFFIN und WITHAM vorgeschlagene und auch in der ISO/2631-2 zur Beurteilung von unregelmäßigen, insbesondere stoßartigen Schwingungen, neben anderen Werten aufgeführte sogenannte "root-mean-quad-Wert"  $v_{\text{rmq}}$  [21, 22]. Dieser  $v_{\text{rmq}}$ -Wert ist wie folgt definiert:

$$v_{\text{rmq}} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T v^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

## 5.5 Ergebnisse

### 5.5.1 Wahrnehmungsschwellen für periodische Signale des Typs 1

In Bild 12 sind die ermittelten Wahrnehmungsschwellen für die periodischen Schwingungen des Typs 1 (Signale P01 bis P07) und für das sinusförmige Referenzsignal W015 mit einer Frequenz von 15 Hz als Diagramm dargestellt und zwar die Perzentilwerte der Personenmittelwerte. Man erkennt aus diesem Diagramm z.B., daß sich das 50-Perzentil als Lagemaß von Signal zu Signal verändert. In der Reihenfolge der Signale P01 bis P07 nimmt der Scheitelfaktor  $k_F$  zu, jedoch in dieser Darstellung in nichtlinearer Weise.

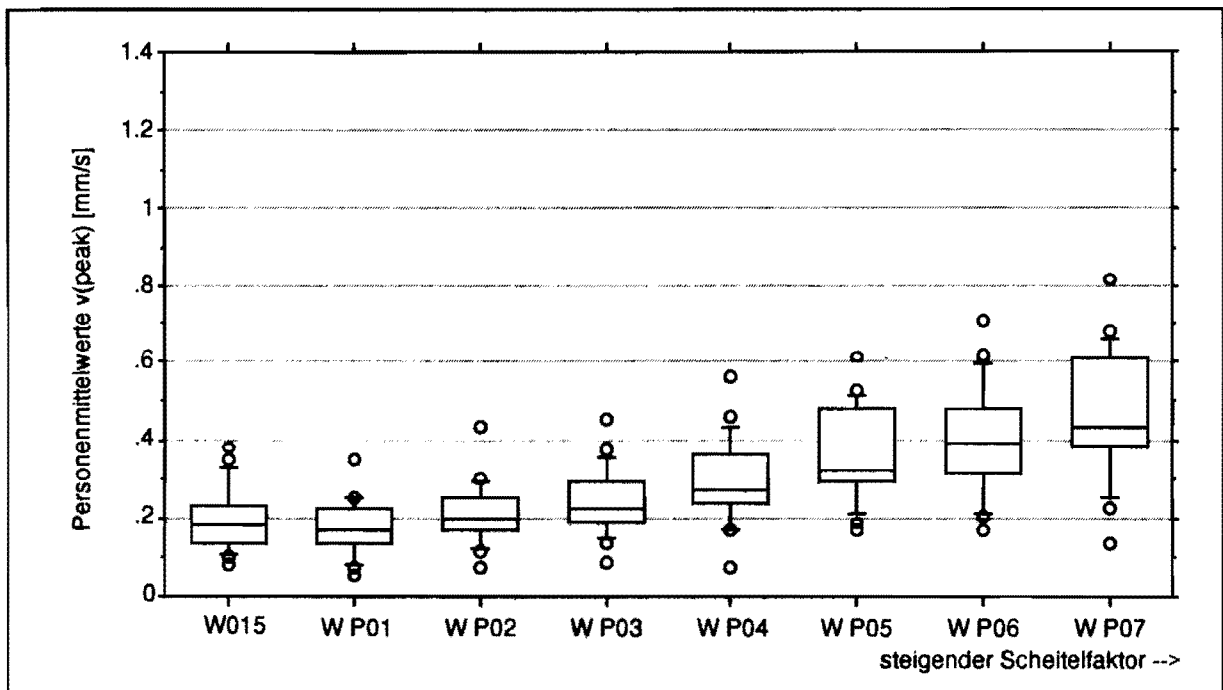


Bild 12:  
Wahrnehmungsschwellen für das Referenzsignal W015 (Sinusschwingung 15Hz)  
und die Signale P01...P07;  
Perzentilwerte der Personenmittelwerte. Stichprobenumfang bei jedem Signal : N=20

In Tabelle 7 sind zur Kennzeichnung der Verteilungen der Personenmittelwerte die bei jedem Signal ermittelten  $v(\text{peak})$ -Werte in mm/s für das 10-Perzentil, das 50-Perzentil und das 90-Perzentil tabellarisch zusammengestellt. Im Bereich zwischen dem 90-Perzentil und dem 10-Perzentil liegen jeweils 80% der bei jedem Signal ermittelten Personenmittelwerte.

In das Diagramm von Bild 13 sind die Mediane der Personenmittelwerte für die Signale P01 bis P07 in Abhängigkeit vom Scheitelfaktor  $k_F$  dargestellt. Als Signalkennwerte zur Kennzeichnung der Mediane sind die Scheitelwerte  $v(\text{peak})$ , die maximalen Werte des gleitenden Effektivwertes  $v_{\text{Fmax}}$ -Werte und die  $v_{\text{rmq}}$ -Werte verwendet worden, um deren Abhängigkeit von den Scheitelfaktoren  $k_F$  aufzuzeigen. Um eine Übersicht zu gewinnen, sind

in das Diagramm auch die mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse ermittelten Geraden eingetragen.

Unabhängig von der verwendeten Meßgröße weisen die Mediane alle mit dem Scheitelfaktor einen guten Zusammenhang (Korrelationsfaktor  $r \geq 0,9$ ) auf.

Tabelle 7: Wahrnehmungsschwellen für periodische Schwingungen des Typs 1;  $v(\text{peak})$ -Werte für die 10-Perzentile, 50-Perzentile (Mediane) und 90-Perzentile der Personenmittelwerte.  
Stichprobenumfang bei jedem Signal:  $N = 20$

Signal	10-Perzentil	50-Perzentil	90-Perzentil
	$v(\text{peak})$ [mm/s]		
PO1	0,06	0,18	0,28
PO2	0,09	0,22	0,32
PO3	0,11	0,23	0,41
PO4	0,14	0,28	0,49
PO5	0,18	0,35	0,55
PO6	0,20	0,39	0,63
PO7	0,23	0,46	0,68

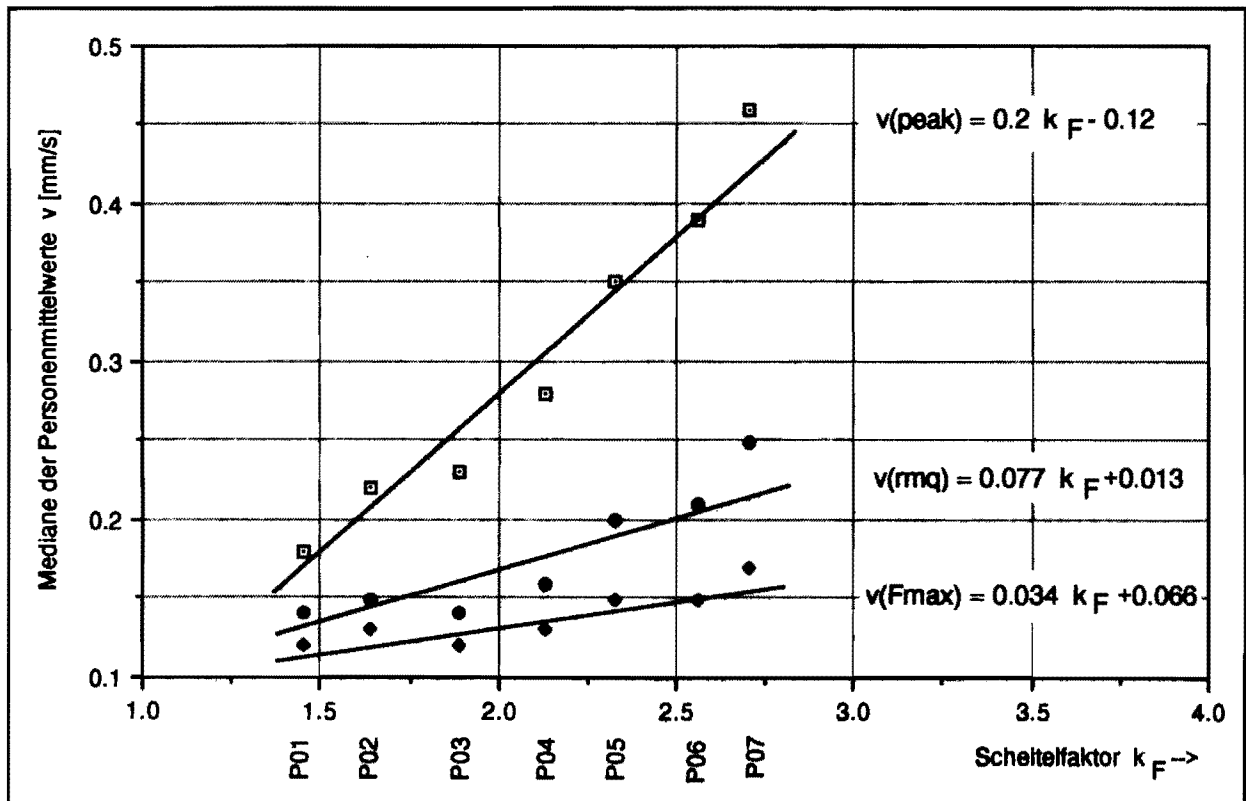


Bild 13:

Mediane der Versuchspersonenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen bei den Signalen P01...P07 sowie zugehörige Regressionsgeraden für die Scheitelwerte  $v(\text{peak})$ , die maximalen Werte des gleitenden Effektivwertes  $v(\text{Fmax})$  und die  $v(\text{rmq})$ -Werte in Abhängigkeit von den Scheitelfaktoren der Signale .

### 5.5.2 Wahrnehmungsschwellen für periodische Signale des Typs 2

In Bild 14 sind die ermittelten Wahrnehmungsschwellen für die periodischen Schwingungen des Typs 2 (Signale P08 bis P14) und für das sinusförmige Referenzsignal W015 mit einer Frequenz von 15 Hz als Diagramm dargestellt, und zwar die Perzentilwerte der Personenmittelwerte; zur Erläuterung der Darstellung siehe Bild 11.

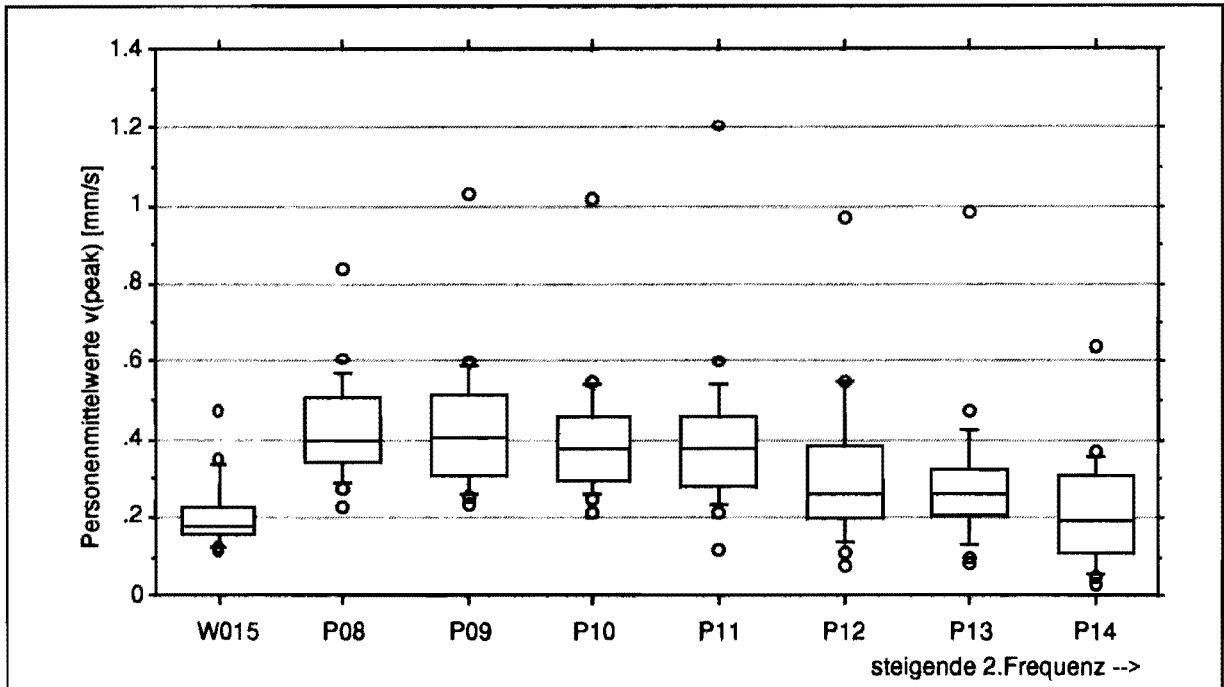


Bild 14:  
Wahrnehmungsschwellen für das Referenzsignal W015 (Sinusschwingung 15Hz)  
und die Signale P08...P14;  
Perzentilwerte der Personenmittelwerte. Stichprobenumfang bei jedem Signal : N=20

Vergleicht man die 50-Perzentile, die bei den Signalen P08 bis P14 festgestellt worden sind, so erkennt man, daß bei dieser Art der periodischen Signale die Versuchspersonen mit zunehmend höherer Frequenz der zweiten Harmonischen im Signal die Wahrnehmungsschwelle im Mittel niedriger eingestellt haben, d.h. die Versuchspersonen diese Signale schon bei kleineren  $v(\text{peak})$ -Werten wahrgenommen haben. Der Scheitelfaktor  $k_F$  war bei den Signalen P08 bis P14 praktisch gleich groß; er lag bei  $k_F = 1,96$ .

In Tabelle 8 sind zur Kennzeichnung der Verteilungen der Personenmittelwerte die bei jedem Signal ermittelten  $v(\text{peak})$ -Werte in mm/s für das 10-Perzentil, das 50-Perzentil und das 90-Perzentil tabellarisch zusammengestellt.

In die Diagramme von Bild 15 sind die Mediane der Personenmittelwerte für die Signale P08 bis P14 in Abhängigkeit vom Scheitelfaktor  $k_F$  dargestellt. Dabei sind die Mediane als  $v(\text{peak})$ -Werte, als  $v_{F\text{max}}$ -Werte und als  $v_{\text{rmq}}$ -Werte aufgetragen.

Tabelle 8: Wahrnehmungsschwellen für periodische Schwingungen des Typs 2;  $v(\text{peak})$ -Werte für die 10-Perzentile, 50-Perzentile (Mediane) und 90-Perzentile der Personenmittelwerte.

Stichprobenumfang bei jedem Signal:  $N = 20$

Signal	10-Perzentil $v(\text{peak})$ [mm/s]	50-Perzentil $v(\text{peak})$ [mm/s]	90-Perzentil $v(\text{peak})$ [mm/s]
P08	0,25	0,39	0,62
P09	0,22	0,43	0,65
P10	0,18	0,37	0,64
P11	0,19	0,37	0,62
P12	0,12	0,27	0,61
P13	0,13	0,25	0,44
P14	0,04	0,19	0,47

Man erkennt, daß bei nahezu unverändertem  $k_F$ -Wert die Mediane bei den den Versuchspersonen dargebotenen Schwingungssignalen nicht, wie man vermuten konnte, etwa gleich große Werte haben, sondern in folgenden Bereichen schwanken:

Mediane der Personenmittelwerte  $v(\text{peak})$ : 0,19...0,43 mm/s

Mediane der Personenmittelwerte  $v_{Fmax}$ : 0,10...0,22 mm/s

Mediane der Personenmittelwerte  $v_{rmq}$ : 0,12...0,28 mm/s

Für diesen Typ von periodischen Schwingungen ist offensichtlich kein Zusammenhang mit dem Scheitelfaktor  $k_F$  der Signale erkennbar.

## 5.6 Diskussion der Ergebnisse

In das Diagramm von Bild 16 sind die  $v(\text{peak})$ -Werte der Mediane der Personenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen bei den Signalen P01 bis P07 und auch die bei den Signalen P08 bis P14 in Abhängigkeit vom Scheitelfaktor  $k_F$  eingetragen. In bezug auf die als Variable gewählten Scheitelfaktoren  $k_F$  der Signale erkennt man deutlich unterschiedliche Abhängigkeiten der Mediane der Schwingungen des Typs 1 im Vergleich mit denen des Typs 2. Bei den Medianen der Personenmittelwerte für die Schwingungen des Typs 1 scheint ein Zusammenhang zum Scheitelfaktor  $k_F$  zu bestehen (Korrelationsfaktor  $r = 0,98$ ). Bei den Medianen der Personenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen des Typs 2 scheint dagegen kein Zusammenhang zum Scheitelfaktor  $k_F$  vorhanden zu sein. Bei nahezu konstantem Scheitelfaktor  $k_F = 1,96$  für die Signale P08 bis P14 liegen die Mediane im Bereich  $v(\text{peak}) = 0,19...0,43$  mm/s.

Vergleicht man die in die Diagramme in Bild 13 und Bild 15 eingetragenen Mediane der Personenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen bei den Signalen für beide in diese Untersuchung einbezogenen Typen 1 und 2 von periodischen Schwingungen untereinander, so erkennt man, daß zur Beschreibung der beginnenden Wahrnehmbarkeit von periodischen Schwingungen weder die Scheitelwerte ( $v(\text{peak})$ -Werte) noch die größten Werte bei gleitender Effektivwertbildung mit einer Zeitkonstanten von  $\dot{A} = 125$  ms ( $v_{Fmax}$ -Werte) und auch nicht



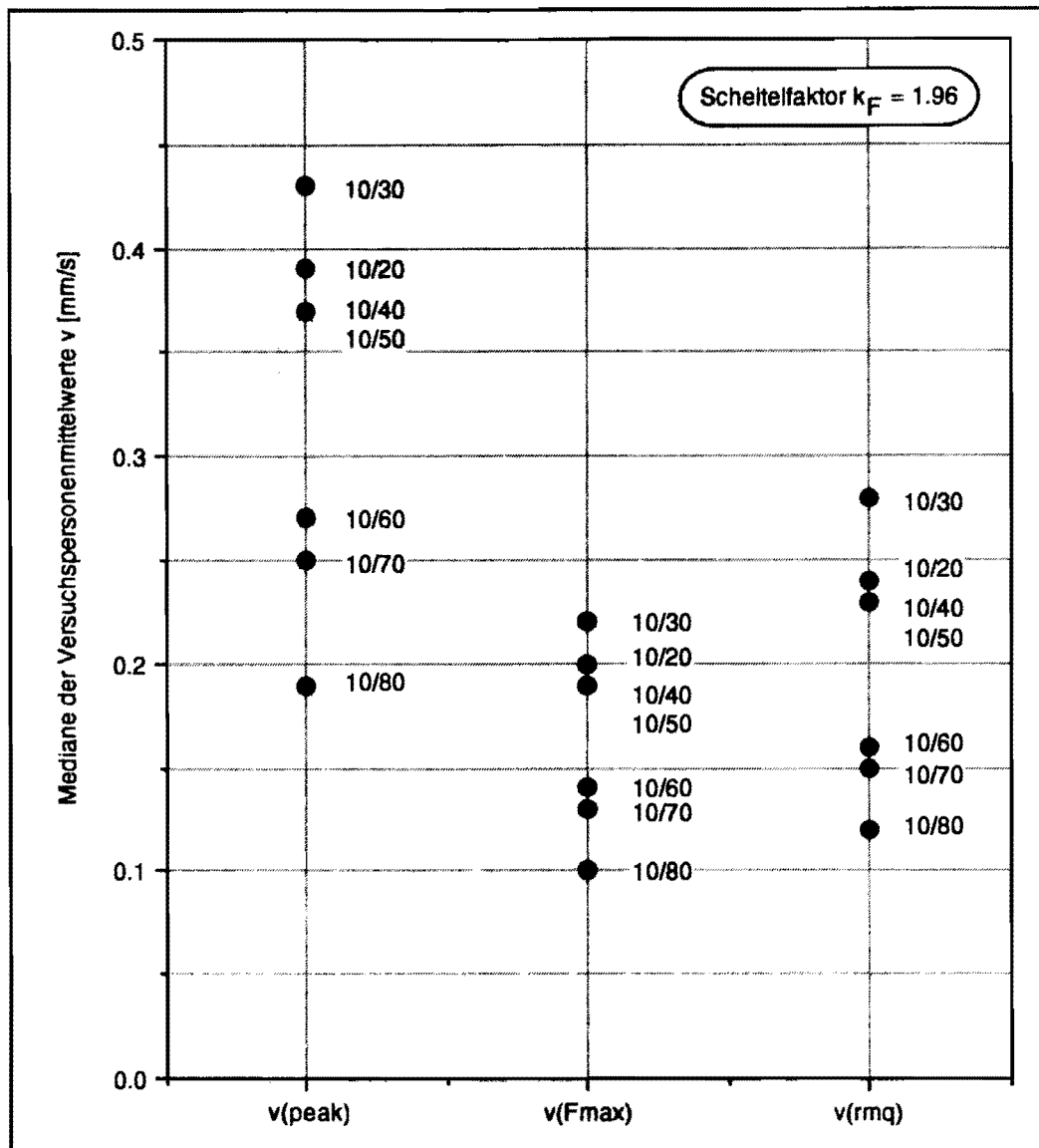


Bild 15:  
Mediane der Personenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen bei den Signalen P08...P14 für drei Meßwertgrößen.  
Die beiden am Signal in gleicher Stärke beteiligten Frequenzen sind jeweils angegeben.

die  $v_{rmq}$ -Werte allein geeignet sind. Prüft man die Unterschiede der bei der Darbietung der verschiedenen Signale ermittelten Mediane, so ist auf einem relativ hohen Signifikanzniveau überwiegend auf Unterschiede zu schließen, d. h. der Einfluß der im Schwingungsgemisch der Signale enthaltenen Frequenzen, bzw. der Frequenzabstand der Harmonischen auf die beginnende Wahrnehmbarkeit ist für alle Meßgrößen überwiegend nicht mehr zufällig. - Weitere umfangreiche Untersuchungen sind erforderlich, um festzustellen, welche Einflüsse bei periodischen Schwingungsreizen für die Beschreibung der Wahrnehmungsschwellen maßgebend sind.

Zum Vergleich der bei Verwendung von periodischen Signalen des Typs 1 und des Typs 2 ermittelten Wahrnehmungsschwellen mit den bei sinusförmigen Schwingungen ermittelten

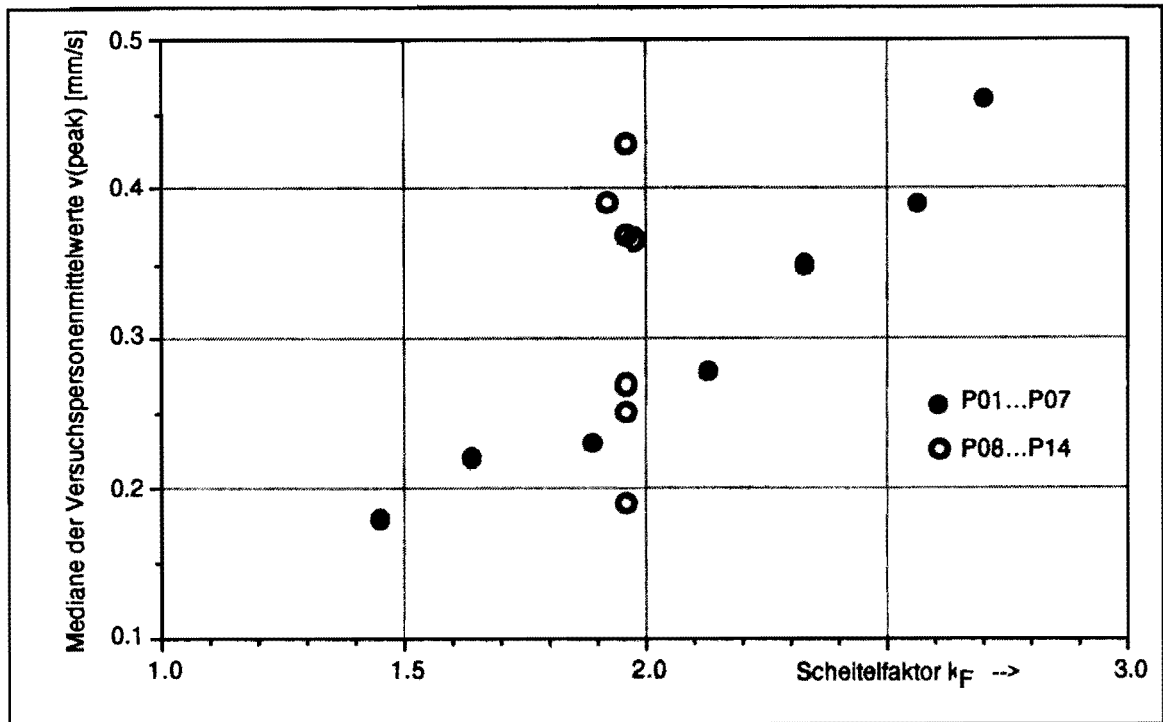


Bild 16:  
Mediane der Versuchspersonenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen bei den Signalen P01...P07 (Typ 1) und den Signalen P08...P14 (Typ 2) in Abhängigkeit vom Scheitelfaktor.

Werten, sind im Diagramm von Bild 17 die  $v(\text{peak})$ -Werte der Mediane der Basis-Vergleichskurve für sinusförmige Schwingungen nach Bild 6 und die  $v(\text{peak})$ -Werte der Mediane der Personenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen, die bei den periodischen Schwingungen P01 bis P14 ermittelt worden sind, eingetragen.

Zur Abgrenzung des Frequenzbereiches bei den Ergebnissen für die periodischen Schwingungen wurde wie folgt vorgegangen. Die sieben Signale P01 bis P07 (Typ 1 der periodischen Schwingungen) waren jeweils aus vier Harmonischen mit den Frequenzen 8 Hz, 24 Hz, 40 Hz und 56 Hz zusammengesetzt. Bei diesen Signalen wurde bei gleichem Amplitudenverhältnis nur die Phasenlage der Harmonischen gegeneinander variiert. Daher wurde als Abgrenzung die Grundfrequenz von 8 Hz und die Frequenz der vierten Harmonischen (56 Hz) gewählt. Die sieben Signale P08 bis P14 (Typ 2 der periodischen Schwingungen) waren je aus zwei Harmonischen zusammengesetzt mit unveränderter Frequenz von 10 Hz für die erste Harmonische, während für die zweite Harmonische die Frequenzen von 20 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 70 Hz, 80 Hz gewählt worden waren. Als Abgrenzung für den Frequenzbereich für die Ergebnisse bei diesen Signalen wurde daher die Frequenz 10 Hz der ersten Harmonischen und die höchste Frequenz der zweiten Harmonischen, nämlich 80 Hz, gewählt.

Vergleicht man in Bild 17 die Bereiche, in denen die Mediane der Personenmittelwerte der Wahrnehmungsschwelle bei den Signalen P01 bis P07 und bei den Signalen P08 bis P14 liegen im Vergleich zu den Medianen bei der Basis-Vergleichskurve für sinusförmige Schwingungen

im Frequenzbereich von 8 Hz bis 80 Hz, so erkennt man, daß die Mediane bei periodischen Schwingungen deutlich oberhalb der Mediane der Basis-Vergleichskurve liegen. Die Versuchspersonen haben im Mittel die Wahrnehmungsschwellen bei sinusförmigen Schwingungen bei niedrigeren  $v(\text{peak})$ -Werten eingestellt, als bei periodischen Schwingungen. Offensichtlich werden sinusförmige Schwingungen bei niedrigeren  $v(\text{peak})$ -Werten wahrgenommen als die in diese Untersuchung einbezogenen 2 Typen von periodischen Schwingungen.

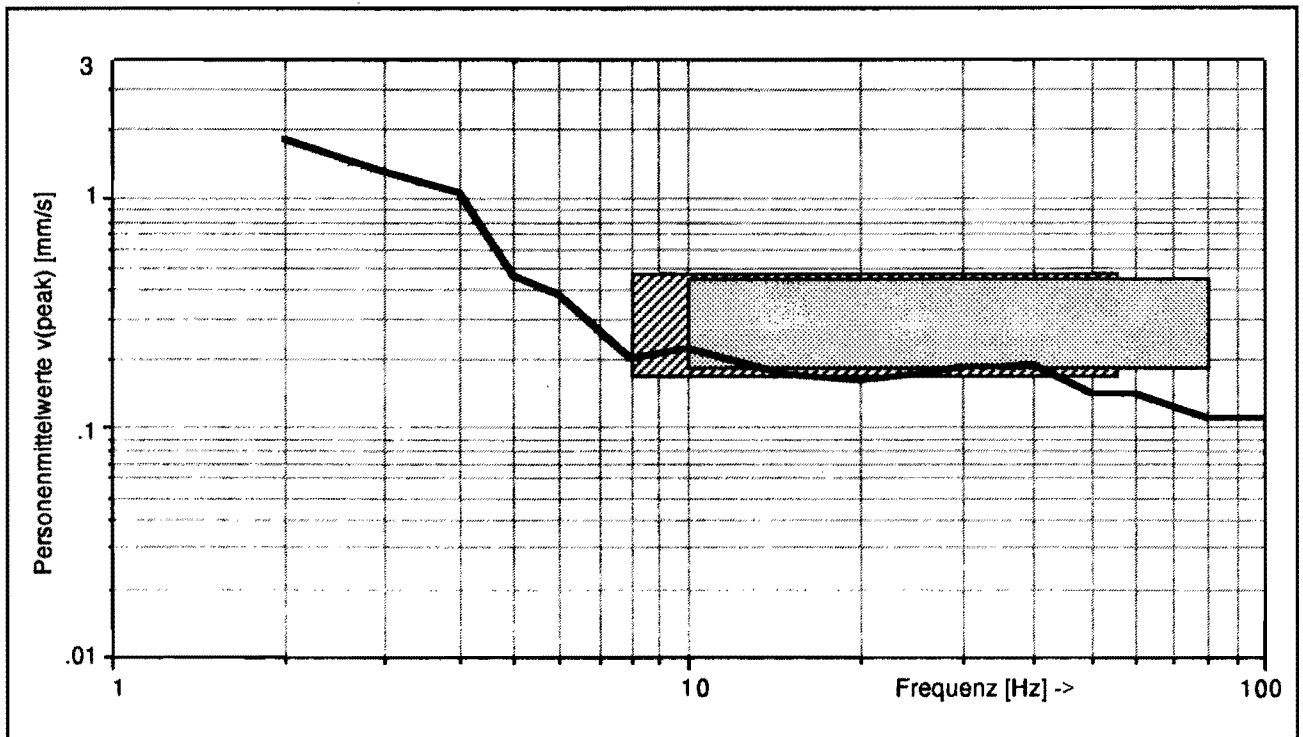


Bild 17:  
Basis-Vergleichskurve für Sinusschwingungen nach Bild 6  
und Bereiche der Mediane der Versuchspersonenmittelwerte für die periodischen Schwingungen  
P01...P14.

- Bereich der Mediane von P01...P07 (Typ 1)
- Bereich der Mediane von P08...P14 (Typ 2)

## 5.7 Ergebnisse einer Befragung der Versuchspersonen

Bei der Durchführung der Versuchsreihe, bei der den zwanzig Versuchspersonen die Signale P08 bis P14 zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen dargeboten worden sind, wurde auch eine Befragung der Versuchspersonen durch den Versuchsleiter durchgeführt. Das Ziel dieser Befragung war, erste Hinweise darüber zu erhalten, ob die Versuchspersonen bei periodischen Signalen, die als Summe von zwei Harmonischen gebildet worden waren, die in den Signalen enthaltenen beiden Frequenzen mehr getrennt wahrnehmen oder mehr als Schwingungsgemisch ohne Differenzierung in bezug auf die Frequenz.

Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, folgende Fragen zu beantworten:

Wie empfanden Sie das Erschütterungssignal:

- A : Als eine überwiegend langsame Schwingungsbewegung?  
 AB : Als eine Schwingungsbewegung mit sowohl langsamen als auch schnellen Schwingungsanteilen ?  
 B : Als eine überwiegend schnelle Schwingungsbewegung ?

Die Fragen wurden von jeder Versuchsperson jeweils beantwortet, nachdem das Signal zu Beginn des Versuchs mit der Stärke angeboten worden ist, welche von allen Versuchspersonen sicher wahrgenommen worden ist. Die Schwinggeschwindigkeitsamplituden der sogenannten "Orientierungssignale" sind in Abschnitt 5.3 angegeben. Als Anhalt zur Unterscheidung zwischen sogenannten langsamen und schnellen Schwingungsbewegungen wurde den Versuchspersonen als Signal jeweils zuerst ein sinusförmiges Signal mit  $f = 15$  Hz dargeboten. Die "Schnelligkeit" dieses Signals sollte die Abgrenzung zwischen langsamer (niederfrequenter) und schneller (höherfrequenter) Schwingungsbewegungen sein. Der Begriff Frequenz wurde bei der Befragung nicht gebraucht, weil er als Sinneseindruck für subjektive Wahrnehmungen bei den Versuchspersonen unbekannt ist.

Tabelle 9 Ergebnisse einer Befragung der Versuchspersonen bei der Darbietung der periodischen Signale PO8 bis P14 nach der Art ihrer Wahrnehmung (langsame oder schnelle Schwingungsempfindung) in Prozent der Antworten:

- A : Überwiegend langsame Schwingungsbewegung  
 AB : Sowohl langsame als auch schnelle Schwingungsbewegung  
 B : Überwiegend schnelle Schwingungsbewegung

Anzahl der befragten Versuchspersonen: N = 20;

Anzahl der Antworten: 80, d.h. je Signal und Versuchsperson 4 Antworten

Signal	Frequenz der		Anteil der Antworten		
	1.	2.	A	AB	B
	Harmonischen im Signal				
WO15	15 Hz ;	-	99%	-	1%
PO8	10 Hz ;	20 Hz	64%	18%	18%
PO9	10 Hz ;	30 Hz	45%	34%	21%
P10	10 Hz ;	40 Hz	21%	50%	29%
P11	10 Hz ;	50 Hz	16%	64%	20%
P12	10 Hz ;	60 Hz	5%	54%	41%
P13	10 Hz ;	70 Hz	-	56%	44%
P14	10 Hz ;	80 Hz	-	39%	61%

Die Ergebnisse der Befragungen sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Vergleicht man die Antworten, die bei der Wahrnehmung der Signale PO8 bis P14 gegeben worden sind, so ist zu vermuten, daß die Versuchspersonen die bei diesen Signalen enthaltenen Amplituden der beiden Harmonischen und damit deren "Schnelligkeit" (Frequenz) häufig getrennt erkennen. Das zur Abgrenzung "schnell" gegen "langsam" vorgegebene Signal WO15 (Sinusschwingung mit 15 Hz) wurde bei 99% der Antworten als langsam eingestuft. Das Signal PO8, bei dem die beiden Harmonischen die Frequenzen 10 Hz und 20 Hz hatten, wurde bei 64% der Antworten als langsam eingestuft, 18% stuften dieses Signal als Schwingungsbewegung mit sowohl lang-

samen als auch schnellen Schwingungsanteilen ein und ebenfalls 18% als überwiegend schnelle Schwingungsbewegung. Bei den weiteren Signalen P09 bis P14 wird der Frequenzabstand zwischen den beiden Harmonischen im Signal immer größer (siehe auch Bild 10), und zwar in Frequenzabständen von 10 Hz. Von den Versuchspersonen wurden die Signale zunehmend als solche eingestuft, die sowohl langsame als auch schnelle Schwingungsanteile enthielten, bis hin zum Signal P14, bei dem 61% der Antworten diese als überwiegend schnelle Schwingungsbewegung gekennzeichnet haben. Obwohl die Frequenz der ersten Harmonischen von 10 Hz unverändert konstant beibehalten worden war, und ebenfalls das Amplitudenverhältnis der beiden Harmonischen bei den Signalen unverändert bei 1:1 lag, werden offensichtlich die Amplituden der zweiten Harmonischen mit zunehmend höherer Frequenz "empfindlicher" wahrgenommen, d.h. die schnelleren Schwingungsbewegungen werden zunehmend deutlicher wahrgenommen. Durch weitere Untersuchungen muß festgestellt werden, ob und in welcher Weise bei Ganzkörperschwingungen eine differenzierte Wahrnehmung (Erkennung) von Schwingungsfrequenzen erfolgt, ob sogenannte Verdeckungs- und Aufdeckungseffekte auftreten, usw.

## **6. Untersuchung von inter- und intraindividuellen Streuungen der Ergebnisse bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen für sinusförmige Ganzkörperschwingungen**

### **6.1 Einführung**

Es wird vermutet, daß psychologische und physiologische Bedingungen der Versuchspersonen, die vor und während der Versuchsdurchführung vorliegen, Einfluß auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle haben können. Wenn dieselbe Versuchsperson für dasselbe Erschütterungssignal mehrmals hintereinander in mehr oder weniger großen Zeitabständen (Stunden, Tage oder Jahre) in Wiederholversuchen die Wahrnehmungsschwelle ermittelt, oder wenn verschiedene Versuchspersonen die Wahrnehmungsschwelle ermitteln, ergeben sich Streubreiten, innerhalb derer die Ergebnisse liegen. Folgende Einflüsse können sich bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen auswirken: Die körperliche und geistige Disposition der Versuchspersonen vor und während der Versuchsdurchführung d.h., die aktuelle Befindlichkeit; die Tageszeit, z.B. Durchführung der Versuche vormittags (die Versuchspersonen sind noch ausgeruht und konzentriert) oder nachmittags (die Versuchspersonen sind u. U. ermüdet und weniger aufmerksam); mehr oder weniger angespannte Körperhaltung während der Versuche (Muskeltonus entspannt oder angespannt), die Gesundheitssituation der Versuchsperson; die körperliche Konstitution; usw.

Bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen wurden Streuungen der Ergebnisse bei Wiederholversuchen bei allen in die Untersuchungen einbezogenen Erschütterungssignalen (Reizen) festgestellt. Beispielhaft werden die festgestellten interindividuellen Streuungen (d.h. Streuungen von Person zu Person) und die intraindividuellen Streuungen der Ergebnisse für dieselbe Versuchsperson bei Wiederholversuchen für die Ergebnisse beschrieben, die bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen für eine sinusförmige Ganzkörperschwingung mit einer Frequenz von 15 Hz festgestellt worden sind. Bei der Durchführung aller Versuchsreihen,

die sich über mehrere Jahre erstreckte, wurde jeweils von den Versuchspersonen immer auch die Wahrnehmungsschwelle bei dieser sogenannten Referenzschwingung bestimmt.

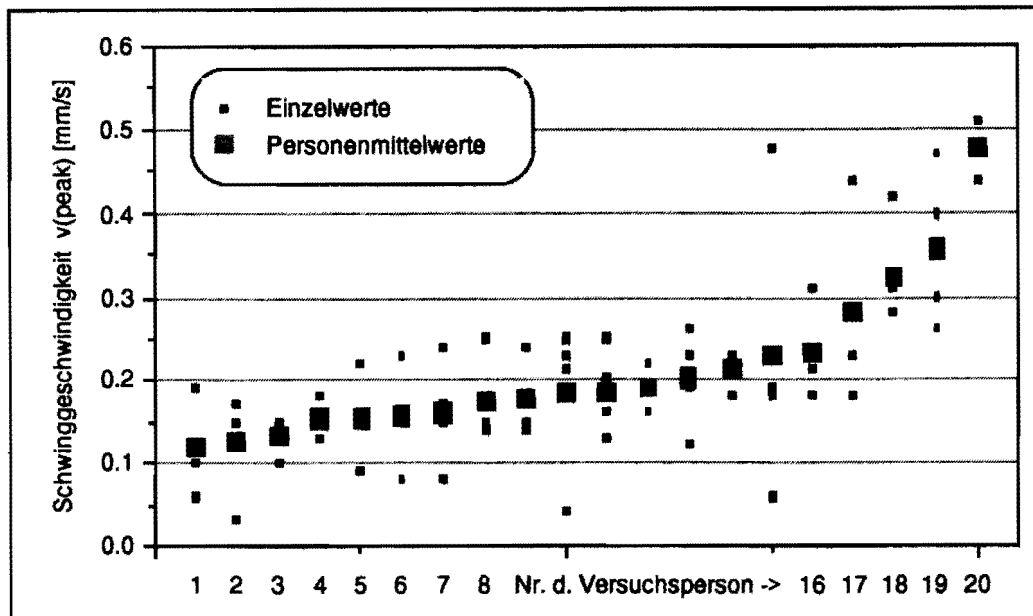


Bild 18:

Streuweiten der Einzelwerte der Wahrnehmungsschwellen für jede Versuchsperson bei Wiederholversuchen ( $n=4$ ) mit unverändertem Versuchspersonen-Kollektiv ( $N=20$ ) und Streubreite der Personenmittelwerte.

Signal: Sinusschwingung mit  $f = 15\text{Hz}$ .

## 6.2 Interindividuelle Streuungen

Die Versuchsreihe, bei denen die Wahrnehmungsschwellen auch für Sinusschwingungen mit 15 Hz festgestellt und deren Ergebnisse in Bild 18 dargestellt sind, wurden insgesamt viermal durchgeführt. Von jeder Versuchsperson des Versuchspersonen-Kollektivs ( $N = 20$ ) wurde die Wahrnehmungsschwelle bei diesem Signal auf diese Weise bei vier Versuchen ermittelt. Dabei lag zwischen zwei Versuchen bei ein und derselben Versuchsperson mindestens ein Kalendertag. Im Diagramm von Bild 18 sind für jede Versuchsperson die Einzelwerte eingetragen, d.h. die  $v(\text{peak})$ -Werte, bei denen die Wahrnehmungsschwelle bei jedem einzelnen Versuch ermittelt worden ist, und für jede Versuchsperson der sogenannte Personenmittelwert (arithmetischer Mittelwert aus den vier Einzelwerten). Auf der Abszisse im Diagramm von Bild 18 sind die Versuchspersonen nach steigenden Personenmittelwerten geordnet und mit den Ziffern Nr. 1 bis Nr. 20 bezeichnet worden.

Aus dem Diagramm von Bild 18 erkennt man die Streubreiten der  $v(\text{peak})$ -Werte für jede Versuchsperson und von Person zu Person, d.h. die intra- und die interindividuellen Streubreiten der Werte. Die Versuchspersonen mit den Nummern 3, 4, 12 und 14 weisen z.B. relativ geringe Streubreiten zwischen den maximalen und den minimalen Einzelwerten auf. Die Versuchspersonen Nr. 10, 15, 17 und 19 weisen z.B. im Vergleich dazu verhältnismäßig große Streubreiten auf. Wegen dieses Sachverhaltes wurden auch bei jeder Versuchsreihe der

durchgeführten Untersuchungen "Wiederholversuche" durchgeführt und die Personenmittelwerte anstelle der Einzelwerte für weitere Betrachtung herangezogen, um die Aussagen über die Wahrnehmungsschwellen "sicherer" zu machen.

Aus dem Diagramm von Bild 18 ist weiterhin zu entnehmen, daß bei dem in diese Versuchsreihe einbezogenen Versuchspersonen-Kollektiv die Personenmittelwerte der einzelnen Versuchspersonen auch eine Streubreite aufweisen und zwar zwischen einem  $v(\text{peak})$ -Wert = 0,12 mm/s für die Versuchsperson Nr. 1 und einem  $v(\text{peak})$ -Wert = 0,48 mm/s für die Versuchsperson Nr. 20.

### 6.3 Intraindividuelle Streuungen

Um die intraindividuellen Streubreiten beispielhaft aufzuzeigen, sind in Bild 19 die Streubreiten der Einzelwerte eingetragen, d.h. die  $v(\text{peak})$ -Werte, bei denen die Wahrnehmungsschwellen bei jedem einzelnen Versuch von zwei willkürlich aus dem Versuchspersonen-Kollektiv ausgewählten Versuchspersonen ermittelt worden sind. Diese sind in Bild 18 mit Versuchsperson Nr. 3 und Nr. 17 bezeichnet. Für diese beiden Versuchspersonen wurde die Wahrnehmungsschwelle für das sinusförmige Referenzsignal mit  $f = 15$  Hz im Laufe von etwa 7 Jahren bei 8 verschiedenen Versuchsreihen ermittelt. Im Diagramm von Bild 19 sind die Streubreiten der Einzelwerte eingetragen, die bei den Versuchsreihen Nr. 1 bis Nr. 8 festgestellt worden sind. Außerdem sind die jeweiligen Personenmittelwerte eingetragen und für jede der beiden Versuchspersonen der Mittelwert aller Personenmittelwerte aus den 8 Versuchsreihen.

Vergleicht man die Streubreiten der Einzelwerte bei der Versuchsperson Nr. 3 (Bild 19, oben) bei den 8 Versuchsreihen miteinander, so erkennt man, daß sie verhältnismäßig gering sind. Darauf ist bereits bei der Erläuterung der Ergebnisse von Bild 18 hingewiesen worden. Die Streubreiten der Einzelwerte bei der Versuchsperson Nr. 17 (Bild 19, unten) bei den 8 Versuchsreihen sind offensichtlich größer als die, die bei der Versuchsperson Nr. 3 festgestellt worden sind. Bei den Versuchsreihen Nr. 1 bis 8 sind sie bei fast allen Versuchen verhältnismäßig groß. Offensichtlich hängt die Streubreite der Einzelwerte, die bei der Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen für dieses Signal bei Wiederholversuchen über mehrere Jahre festgestellt wird, von individuell-persönlichen Faktoren der Versuchspersonen ab.

In Bild 20 sind die  $v(\text{peak})$ -Werte der Verteilungen der bei 8 verschiedenen Versuchsreihen festgestellten Personenmittelwerte für die Versuchsperson Nr. 3 und Nr. 17 dargestellt. Bei der Versuchsperson Nr. 3 liegen z.B. 50% der Personenmittelwerte im Bereich  $v(\text{peak}) = 0,13 \dots 0,23$  mm/s; bei der Versuchsperson Nr. 17 erstreckt sich dieser Bereich von  $v(\text{peak}) = 0,12 \dots 0,33$  mm/s.

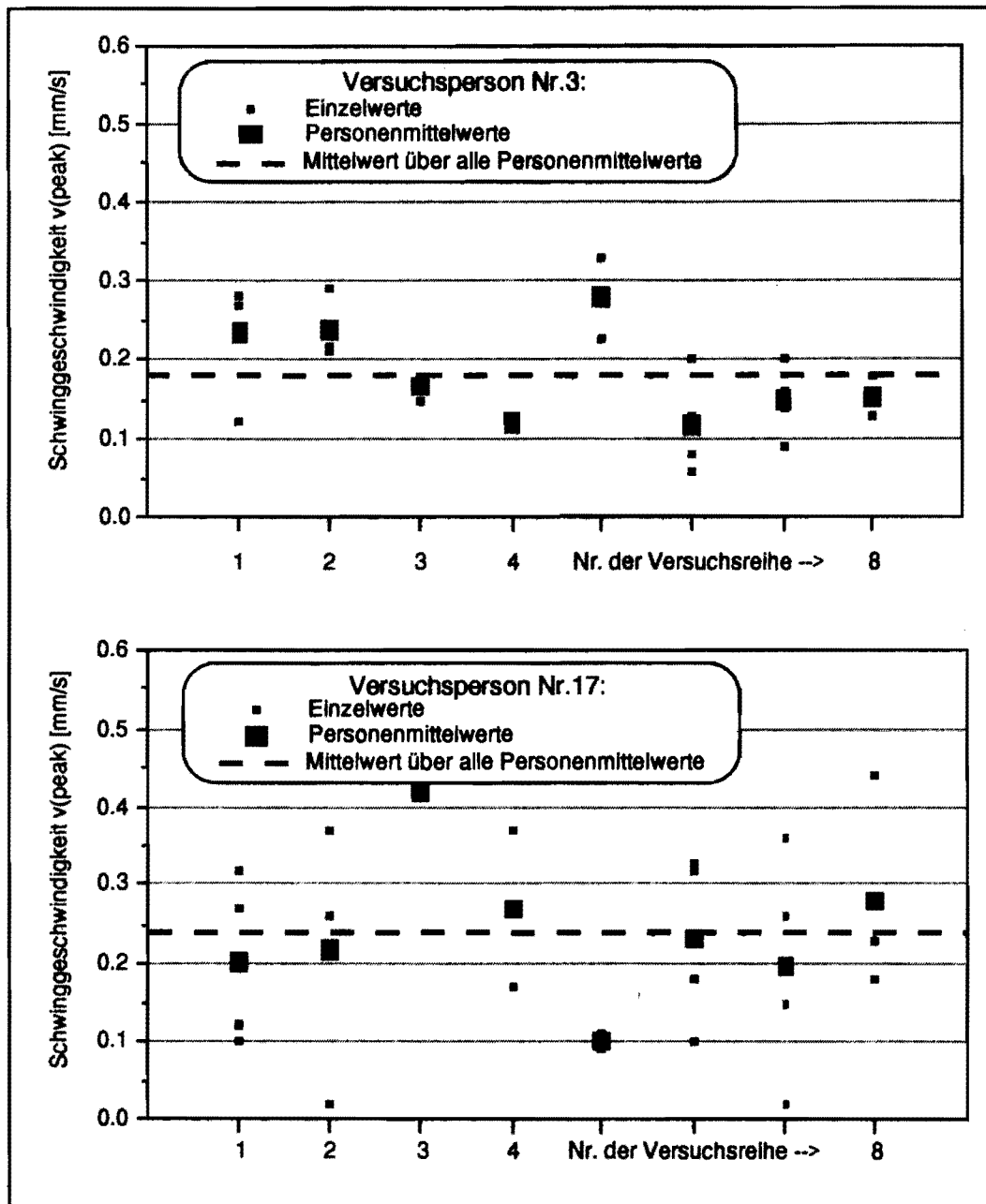


Abb.19:  
 Streubreiten der Einzelwerte der Wahrnehmungsschwellen für zwei willkürlich aus dem Versuchspersonenkollektiv ausgewählte Versuchspersonen bei Wiederholversuchen ( $n=4$ ), ermittelt bei 8 verschiedenen Versuchsreihen.  
 Signal: Sinusschwingung mit  $f = 15\text{Hz}$   
 Die Versuchspersonennummern entsprechen denen in Bild 18.

#### 6.4 Kennwerte für die Wahrnehmungsschwellen aus Wiederholversuchen mit unverändertem Versuchspersonen-Kollektiv über mehrere Jahre

Die Versuchspersonen des Kollektivs, die in diese Untersuchungen einbezogen worden sind, und deren individuell-persönliche Faktoren in Abschnitt 4.5 beschrieben worden sind, hatten in



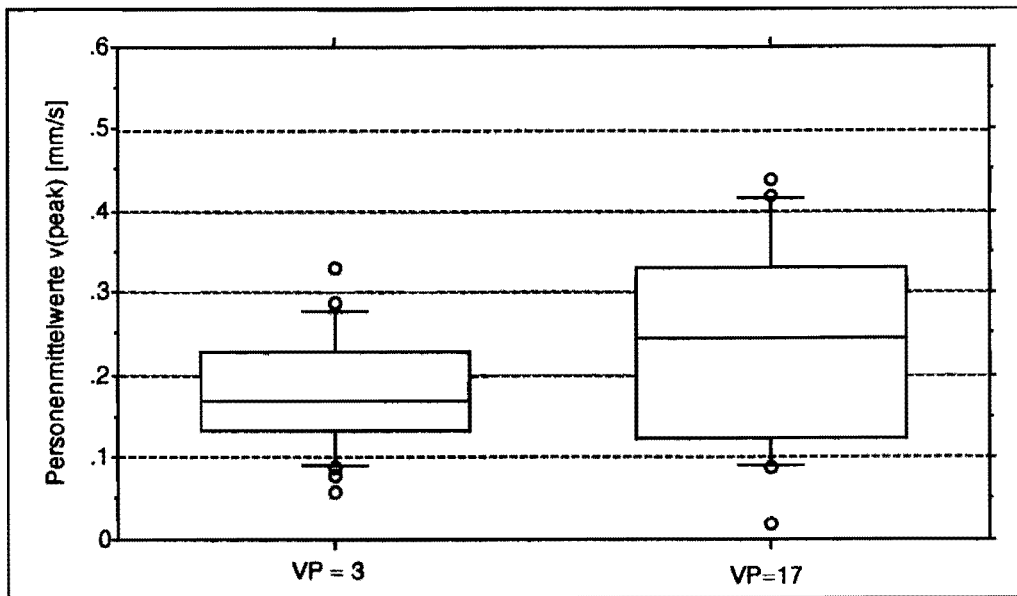
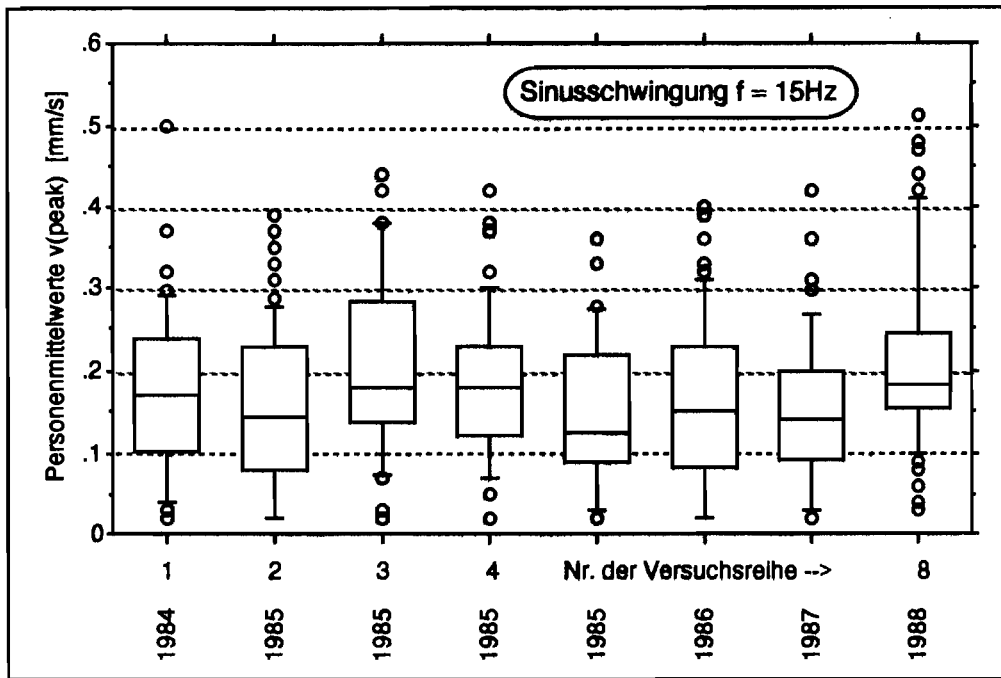


Bild 20:  
Verteilungen der bei 8 verschiedenen Versuchsreihen festgestellten Personenmittelwerte für die Versuchspersonen Nr.3 und Nr.17.  
Signal: Sinusschwingung mit  $f = 15\text{Hz}$ .

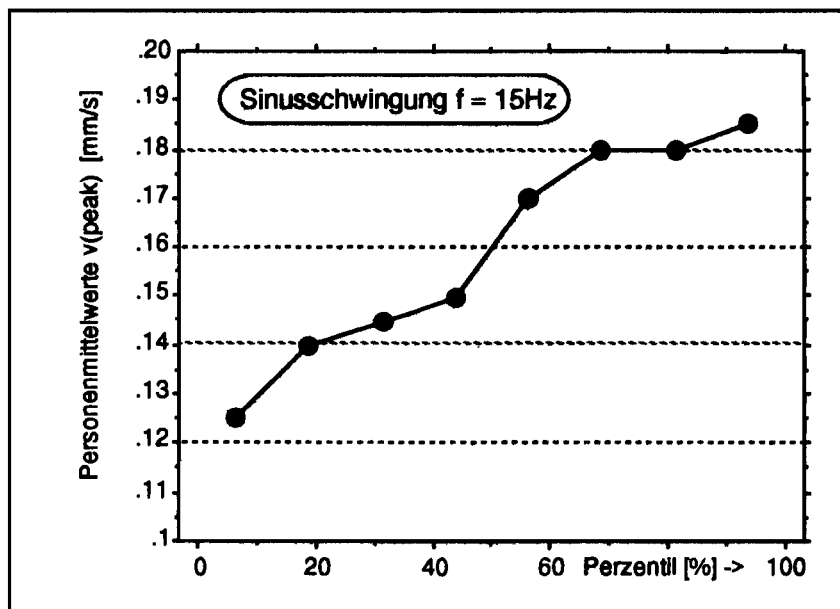
den Jahren von 1984 bis 1988 mehrfach an Versuchen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle in der Versuchseinrichtung der LIS teilgenommen. Dieses Versuchspersonen-Kollektiv ist in der Veröffentlichung über die Ergebnisse zur Feststellung der Wahrnehmungsschwellen für sinusförmige Ganzkörperschwingungen an mehreren Gruppen von Versuchspersonen als Versuchspersonen-Gruppe A (Männer mit persönlichen Erfahrungen über Erschütterungseinwirkungen bei vorangegangenen Versuchen) bezeichnet worden [19].

Bei den Versuchen wurden den Versuchspersonen unterschiedliche Signale als Erschütterungsreize dargeboten und immer auch die Personenmittelwerte für sinusförmige Schwingungen mit einer Frequenz von 15 Hz festgestellt. In Bild 21 sind für die insgesamt durchgeführten 8 Versuchsreihen Kennwerte für die Verteilungen der Personenmittelwerte dargestellt. Von diesen Werten ist die Summenhäufigkeitsverteilung der 50-Perzentile für die 8 Versuchsreihen in Bild 22 dargestellt. Man erkennt, daß trotz Einbeziehung einer größeren Anzahl von Versuchspersonen in die 8 Versuchsreihen, trotz mehrfach wiederholter Versuchsdurchführung im Abstand von mindestens einem Kalendertag bis zu wenigen Tagen bei jeder Versuchsreihe, trotz Wiederholung der Versuche bei demselben Versuchspersonen-Kollektiv über mehrere Jahre und trotz eines anzunehmenden Lerneffektes der Versuchspersonen bei den wiederholt durchgeführten Versuchen mit denselben Erschütterungsreizen (Sinusschwingung mit 15 Hz) eine gewisse Streubreite selbst der meist stabilen 50-Perzentile nicht unterschritten wird. Den Personen gelingt es nicht, die Wahrnehmungsschwelle bei der hier angewendeten Untersuchungsmethode immer wieder mit nur verhältnismäßig geringer Schwankungsbreite wiederzufinden. Um stabilere Aussagen zu gewinnen, müßte das Probandenkollektiv deutlich erhöht werden, was auf Realisierungsschwierigkeiten stieß. Für die hier vorliegenden Untersuchungen muß man wegen der Streuung bei Wiederholversuchen mit einer Unsicherheit der für die Wahrnehmungsschwelle festgestellten Werte von etwa  $\pm 20\%$  rechnen.



**Bild 21:**  
Verteilung der Personenmittelwerte aus Wiederholversuchen mit unverändertem Versuchspersonenkollektiv (N=20) über mehrere Jahre

Der sogenannte Interdezilbereich, d.h. die Differenz zwischen dem 10-Perzentil und dem 90-Perzentil der Personenmittelwerte bei der Versuchsreihe Nr. 1, liegt z.B. im Bereich von  $v(\text{peak}) = 0,04$  bis  $0,3$  mm/s. Die Schwankungsbreite der 50-Perzentile (Mediane) für die 8 durchgeführten Versuchsreihen liegt im Bereich von  $v(\text{peak}) = 0,125$  bis  $0,185$  mm/s; siehe Bild 22.



**Bild 22:**  
Summenhäufigkeitsverteilung der Medianwerte aus Wiederholversuchen mit unverändertem Probandenkollektiv (N=20) über mehrere Jahre (siehe auch Bild 21)

## 7. Zum Einfluß von Geräuschen der Versuchsanlage auf die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen

### 7.1 Einführung

Bei der Durchführung der Versuche werden durch die Versuchsanlage auch nicht vermeidbare Geräusche im Versuchsraum erzeugt. Nähere Angaben dazu sind bei der Beschreibung der technischen Eigenschaften der Versuchsanlage gemacht worden [16]. Insbesondere bei Signalen, deren Frequenzen im hörbaren Bereich liegen, werden von der sich bewegenden Erregerplatte hörbare Luftschallpegel erzeugt. Da nicht auszuschließen war, daß die Versuchspersonen das hörbare Geräusch als Führungs- bzw. Leitgröße für die Entscheidung beim Auffinden der Wahrnehmungsschwelle für Erschütterungen heranziehen, wurde dieser Einfluß bei der Durchführung einiger Versuchsreihen untersucht. Dabei wurde eine Versuchsreihe in üblicher Weise durchgeführt und dieselbe Versuchsreihe wiederholt, aber bei gleichzeitigem Einspielen eines Geräusches durch einen Lautsprecher derart, daß das von der Versuchsanlage abgestrahlte Geräusch "verdeckt" wurde.

### 7.2 Methode

Die Untersuchungen über einen möglichen Einfluß von Geräuschen wurde bei den Versuchen durchgeführt, bei denen die Wahrnehmungsschwelle von den Versuchspersonen für die periodischen Signale P01 bis P07 ermittelt worden sind. Mindestens einige der Schwingungsanteile der Schwingungsgemische dieser Signale mit den Frequenzen 8 Hz, 24 Hz, 40 Hz und 56 Hz, bzw. deren Oberwellen liegen im hörbaren Frequenzbereich.

Die Wahrnehmungsschwellen wurden in folgender Weise ermittelt:

- In einer ersten Versuchsreihe wurden die Wahrnehmungsschwellen in üblicher Weise festgestellt, die in Abschnitt 4.4.3 beschrieben ist (die Erschütterungsreize wurden von den Versuchspersonen selbst variiert, M (selbst)). Es wurde kein Geräusch eingespielt. Die Versuchsreihe wurde einmal wiederholt. Die beiden von jeder Versuchsperson als Wahrnehmungsschwelle bei jedem Signal gefundenen  $v(\text{peak})$ -Werte wurden durch arithmetische Mittelung zu einem Personenmittelwert zusammengefaßt.
- In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Wahrnehmungsschwellen mit denselben Signalen P01 bis P07 von demselben Versuchspersonen-Kollektiv bei gleichzeitigem Einspielen eines sogenannten "Verdeckungsgeräusches" durch einen Lautsprecher in den Versuchsraum festgestellt. Auch diese Versuchsreihe wurde einmal wiederholt und aus den beiden von jeder Versuchsperson ermittelten Einzelwerte in gleicher Weise wie bei der ersten Versuchsreihe ein Personenmittelwert gebildet.

In diese Versuchsreihen wurden die Versuchspersonen des Versuchspersonen-Kollektivs (N = 20) einbezogen, deren individuell-persönliche Faktoren in Abschnitt 4.5 beschrieben sind.

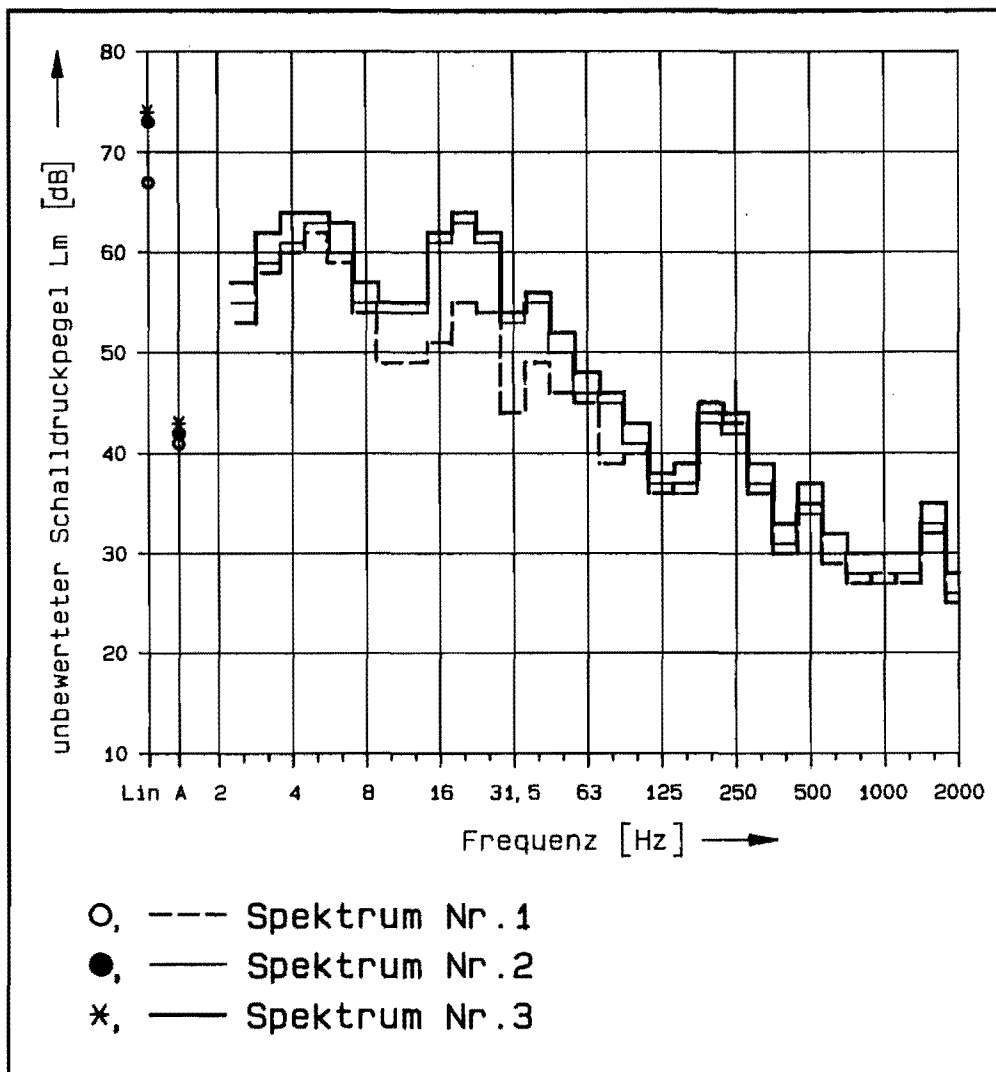


Bild 23:

Geräuschpegel im Versuchsraum

**Spektrum Nr. 1:** Durch den Betrieb der Versuchsanlage bei Erregung mit dem Signal P07 bei einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude  $v(\text{peak}) = 0.63 \text{ mm/s}$  verursachte Geräuschpegel

**Spektrum Nr. 2:** Durch einen im Versuchsraum aufgestellten Lautsprecher erzeugte Geräuschpegel (Verdeckungsgeräusch)

**Spektrum Nr. 3:** Durch Lautsprecher und Betrieb der Anlage bewirkte Geräuschpegel

Das Verdeckungsgeräusch wurde durch einen Lautsprecher erzeugt, der in einer Ecke des Versuchsraums aufgestellt war, die nicht im Blickfeld der Versuchsperson bei der Versuchsdurchführung lag. Durch einen Rauschgenerator wurde rosa-Rauschen erzeugt, welches durch ein abstimmbares Filter bei den Oktavmittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz derart verändert wurde, daß eine weitgehende Verdeckung des von der Erregerplatte bei Schwingungsbewegungen der Signale P01 bis P07 mit Schwinggeschwindigkeitsamplituden auch

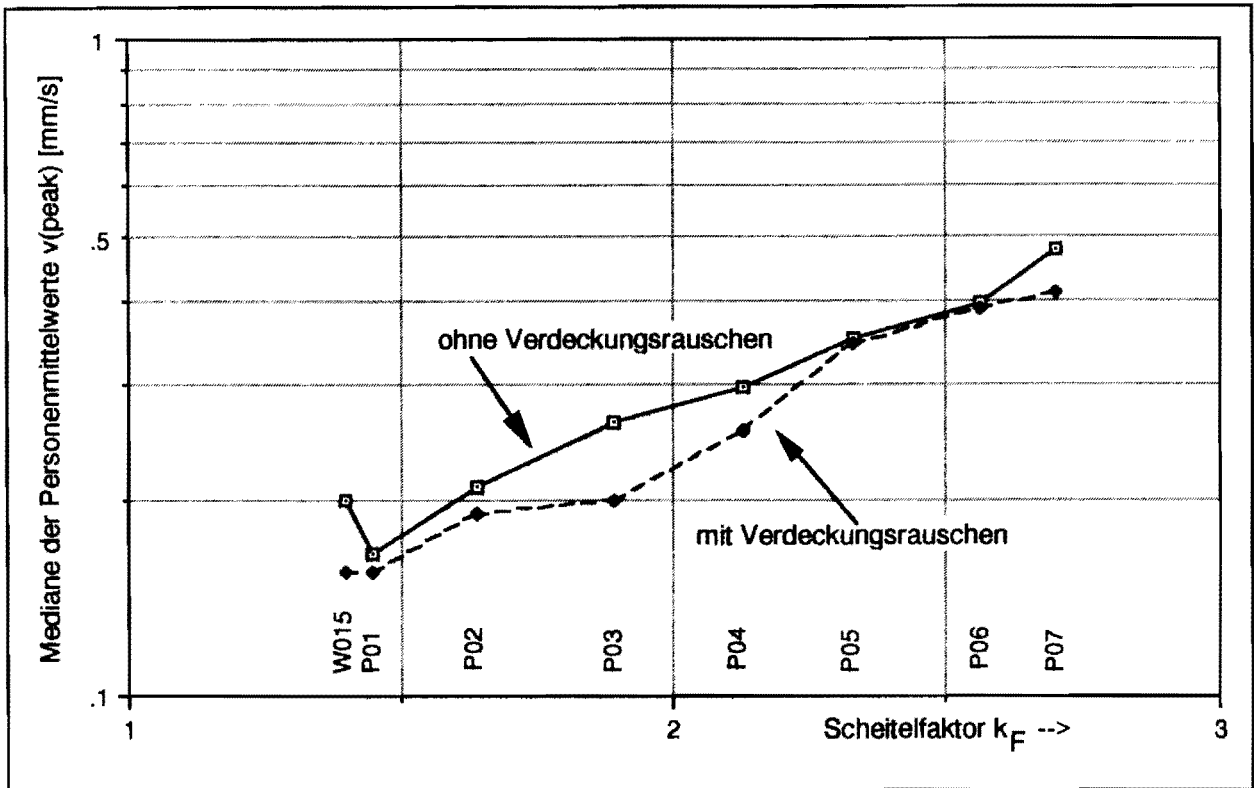


Bild 24:

Mediane der Personenmittelwerte für die Wahrnehmungsschwellen bei dem Referenzsignal W015 und den periodischen Signalen P01...P07 in Abhängigkeit vom Scheitelfaktor.

noch genügend oberhalb des Bereichs der beginnenden Wahrnehmbarkeit erzeugten Geräusches erreicht wurde [23]. Im Diagramm von Bild 23 sind als Beispiel die Terzspektren der Geräuschpegel eingetragen die bei Schwingungsbewegungen des Signals P07 mit und ohne Verdeckungsrauschen gemessen worden sind. Die Schallpegelmessungen wurden im Versuchsraum etwa an der Stelle vorgenommen, an der sich der Kopf der Versuchsperson bei der Versuchsdurchführung befand. Vergleicht man in Bild 23 das Spektrum, das von der Versuchsanlage beim Signal P07 mit einer Schwingungsgeschwindigkeitsamplitude von  $v(\text{peak}) = 0,63 \text{ mm/s}$  ermittelt worden ist (Spektrum Nr. 1) mit dem Spektrum, das beim Einspielen des Verdeckungsgeräusches und gleichzeitigem Betrieb der Versuchsanlage (Signal P07 mit  $v(\text{peak}) = 0,63 \text{ mm/s}$ ) gemessen worden ist, so erkennt man, daß eine sehr weitgehende Verdeckung des von der Versuchsanlage ausgehenden Geräusches erreicht worden ist. Dies gilt insbesondere in dem niederfrequenten Bereich unterhalb von etwa 100 Hz, in dem die Geräusche als Indiz für noch vorhandene Schwingungswahrnehmungen wirksam sein könnten. Durch Vorversuche ist festgestellt worden, daß das von der Versuchsanlage ausgehende Geräusch bei Schwingungsbewegungen der Erregerplatte entsprechend den Verläufen der Signale P01 bis P07 für die Versuchspersonen in aller Regel nicht hörbar war. Der A-bewertete Schallpegel im Versuchsraum bei der Durchführung der Versuche ohne eingespieltes Verdeckungsgeräusch lag, verglichen z.B. mit den in der häuslichen Wohnumgebung auftretenden Geräuschpegel, bei verhältnismäßig niedrigen Werten von etwa  $LAF = 40...42 \text{ dB}$ . Diese Schallpegel wurden durch das eingespielte Verdeckungsgeräusch nur unwesentlich angehoben.

### 7.3 Ergebnisse

In das Diagramm von Bild 24 sind die 50-Perzentile (Mediane) der Personenmittelwerte der Wahrnehmungsschwellen, die für das Referenzsignal W015 (Sinusschwingung mit  $f = 15$  Hz) und für die Signale P01 bis P07 (periodische Schwingungen des Typs 1) bei den Versuchsreihen ohne und mit Verdeckungsrauschen ermittelt worden sind, in Abhängigkeit von den Scheitelfaktoren  $k_F$  eingetragen. Die 50-Perzentile gleicher Versuchsreihen sind durch gerade Linien miteinander verbunden worden.

In Bild 25 sind die Verteilungen der Personenmittelwerte durch mehrere Perzentilwerte gekennzeichnet und zwar für die Versuchsreihen ohne und mit Verdeckungsrauschen; zur Erläuterung der Darstellung siehe Bild 11. Der Stichprobenumfang der Personenmittelwerte, für die die Verteilungen dargestellt sind, beträgt jeweils  $N = 20$ .

### 7.4 Diskussion der Ergebnisse

Vergleicht man die Mediane der Personenmittelwerte der Wahrnehmungsschwellen in Bild 24 miteinander, die bei den Versuchsreihen ohne und mit Verdeckungsrauschen festgestellt worden sind, so erkennt man, daß diese sehr gering sind. Dies ist auch aus der Darstellung der Verteilungen der Personenmittelwerte in Bild 25 ersichtlich.

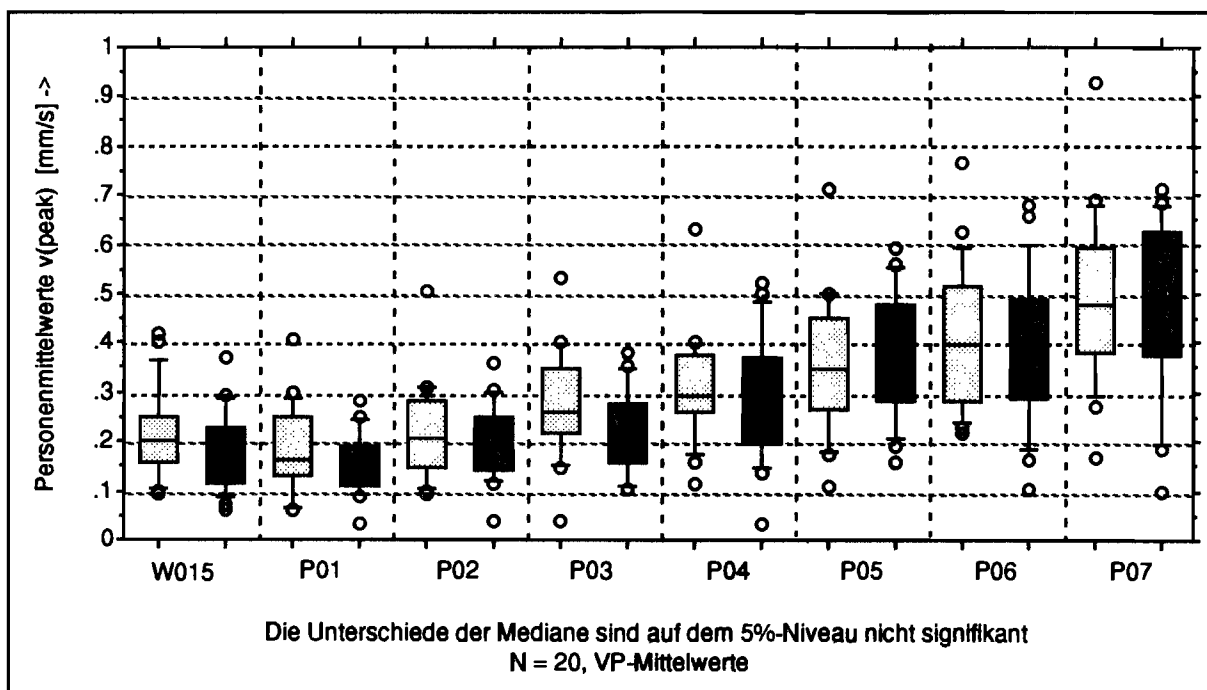


Bild 25:

Verteilungen der bei den Versuchen mit den Signalen W015 sowie P01...P07 festgestellten Versuchspersonenmittelwerte (N=20)

- ohne Verdeckungsrauschen
- mit Verdeckungsrauschen

Die Überprüfung, ob die Stichproben der Versuchsreihe 1 (ohne Verdeckungsgeräusch) und die der Versuchsreihe 2 (mit Verdeckungsgeräusch) aus Grundgesamtheiten mit denselben Verteilungen stammen, erfolgte mit Hilfe des verteilungsunabhängigen U-Testes von MANN-WHITNEY [18]. Dieser Test prüft, ob die beiden miteinander verglichenen Stichproben aus Grundgesamtheiten mit demselben Median stammen. Bei dem vorliegenden Stichprobenumfang konnte auf einem Signifikanzniveau von 0,05 (Irrtumswahrscheinlichkeit < als 5%) kein Unterschied zwischen den Ergebnissen der Versuchsreihen ohne und mit Verdeckungsgeräusch nachgewiesen werden.

Vergleicht man die bei jedem der Signale P01 bis P07 festgestellten Mediane ohne und mit Verdeckungsgeräusch in Bild 24 oder in Bild 25 miteinander, so erkennt man, daß die Mediane bei der Versuchsreihe mit Verdeckungsgeräusch in der Tendenz bei gleichen oder überwiegend bei etwas kleineren  $v(\text{peak})$ -Werten lagen als diejenigen bei der Versuchsreihe ohne Verdeckungsgeräusch. Auch wenn bei dem gewählten Signifikanzniveau bei dem vorliegenden Stichprobenumfang kein Unterschied nachgewiesen werden konnte, bleibt es weiteren Untersuchungen vorbehalten, zu überprüfen, ob sich Versuchspersonen bei durch Lautsprecher eingespieltem Verdeckungsgeräusch etwas mehr auf das Auffinden der Wahrnehmungsschwellen konzentrieren, also etwas angespannter bei der Entscheidung über die beginnende Wahrnehmbarkeit sind, im Vergleich zum Auffinden der Wahrnehmungsschwellen ohne Verdeckungsgeräusch.

Einige Versuchspersonen haben auf Befragung durch den Versuchsleiter nach der Versuchsdurchführung geäußert, daß sie sich durch das Verdeckungsgeräusch eher etwas beeinträchtigt gefühlt haben, ihre aktuelle Befindlichkeit während der Versuche sei durch die eingespielten Geräusche unangenehm beeinflußt worden. Für die Darstellung der Ergebnisse im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Personenmittelwerte, die mit den Signalen P01 bis P07 ohne und mit Verdeckungsgeräusch festgestellt worden sind, zusammengefaßt und als Ergebnis einer Versuchsdurchführung dargestellt. Weitere Versuchsreihen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen bei anderen Schwingungssignalen wurden aufgrund dieser Feststellungen in der Regel ohne eingespieltes Verdeckungsgeräusch durchgeführt.

## 8. S c h r i f t t u m

- [1] MIWA, T.:  
Evaluation methods for vibration effect, Part 1 Measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations. Ind. Health, 183-205 (1967)
- [2] McKAY, J.R., Ph. D. THESSIS:  
University of Southamton, Human response to vibration: some studies of perception and startle (1972)
- [3] PARSONS, K.C. and GRIFFIN, M.J.:  
Whole-body vibration perception thresholds. Journal of Sound and Vibration 121 (2), 237-258, (1988)
- [4] SPLITTGERBER, H.:  
Untersuchungen über die Wahrnehmungsschwelle des Menschen bei einwirkenden mechanischen Schwingungen. Gesundheits-Ingenieur, Heft 4, (1972)
- [5] MIWA, T.:  
EVALUATION METHODS FOR VIBRATION EFFECT.  
PART 5. CALCULATION METHOD OF VIBRATION GREATNESS LEVEL ON COMPOUND VIBRATIONS. Ind. Health, 1986, 6, 11.
- [6] LOUDA, L.:  
PERCEPTION AND EFFECT OF THE MIXTURE OF TWO VERTICAL SINUSOIDAL VIBRATIONS ON SITTING MAN. Work-Environment-Health, Vol. 7, n:o 1, (1970)
- [7] VDI-Richtlinie 2057:  
Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Blatt 1 bis 3, (1987)
- [8] DUPUIS, H., E. HARTUNG:  
Zur Erträglichkeit von stochastischen Schwingungen im Vergleich zu Sinusschwingungen in vertikaler Richtung. Arbeitsschutz Nr. 12, (1971)
- [9] DUPUIS, H., E. HARTUNG:  
Vergleich regelloser Schwingungen eines begrenzten Frequenzbereiches mit sinusförmigen Schwingungen hinsichtlich der Einwirkung auf den Menschen. Ergonomics, 1972, Vol. 15, No. 3, 237-265



- [10] LANGE, W.:  
Zur Beurteilung von Schwingungsgemischen, die über die Sitzfläche auf den Menschen einwirken. *Europ.J.appl. Physiol.*33, 151-170 (1974), Springer Verlag
- [11] Internationaler Standard ISO 2631:  
Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration. First edition - 1974-07-01
- [12] GRIFFIN, M.J.:  
Subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration. *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol 60, No. 5, (1976)
- [13] FOTHERGILL, L.C., M. J. GRIFFIN:  
The Evaluation of Discomfort Produced by Multiple Frequency Whole-Body Vibration. *Ergonomics*, 1977, Vol. 20, No. 3, 263-276
- [14] DONATI, P., A. GROSJEAN, P. MISTROT and L. ROURE:  
The subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration in the sitting position (an experimental study using the "floating reference vibration" method). *Ergonomics*, 1983, Vol. 26, No. 3, 251-273
- [15] SPLITTGERBER, H.: Whole-Body vibration perception thresholds for some complex vibrations. *Proceedings: Joint French-British meeting Effects of vibration on man*. Institut National de Recherche et de Securite, Nancy 1988
- [16] SPLITTGERBER, H., KLEIN, M., NEUTZ P.: Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei Einwirkungen von Erschütterungen auf den Menschen - Beschreibung der Versuchsanlage. LIS-Bericht Nr. 56, Landesanstalt für Immissionsschutz NRW, Essen 1985
- [17] SACHS, L.: *Angewandte Statistik*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1971
- [18] BÜNING, H.; TRENKLER, G.: *Nichtparametrische statistische Methoden*. Berlin-Nex York: de Gruyter 1978
- [19] SPLITTGERBER, H.: Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwingungen - Untersuchungen an mehreren Gruppen von Versuchspersonen. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37 (1990), S. 61-68, Springer-Verlag 1990
- [20] SPLITTGERBER, H.: Einleitung von mechanischen Schwingungen in den auf einem Stuhl sitzenden Menschen. Aus der Tätigkeit der LIS 1986, Jahresberichte der Landesanstalt für Immissionsschutz NRW

- [21] GRIFFIN, M.J. und WITHAM, E.M.:  
Discomfort produced by impulsive whole-body vibration. J. Acoust. Soc. Am.  
68 (5), Nov. 1980
- [22] International Standard ISO 2631-2 Evaluation of human exposure to whole-body  
vibration - Part 2 Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80  
Hz) First Edition 1989-02-15
- [23] SCHMIDT, H.: "Schalltechnisches Taschenbuch", VDI-Verlag, 1989

## **Informationsbogen für die Versuchspersonen bei Anwendung der Untersuchungsmethode M(zu)**

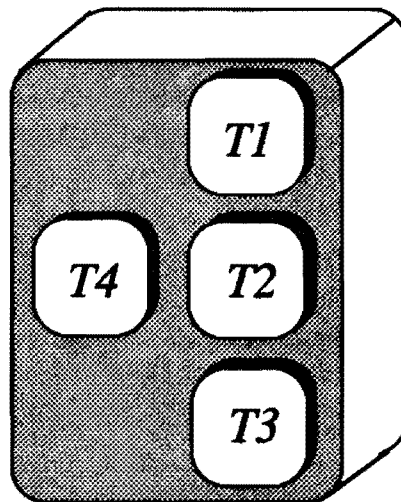
- Wir bitten Sie, an einem Experiment teilzunehmen, bei dem die Wahrnehmungsschwelle für Erschütterungen festgestellt werden soll.
- Dafür benötigen wir einige Angaben über Alter, Geschlecht usw., weil u.U. Abhängigkeiten vermutet werden. Diese Angaben werden nur für dieses Experiment verwendet.
- Der Stuhl, auf dem Sie im Versuchsraum sitzen werden, wird ganz geringe Schwingbewegungen (Erschütterungen) ausführen. Diese betragen nur etwa 1/10 bis 1/100 der Stärke, die Sie beim Fahren im Auto gewöhnt sind. Die Erschütterungsreize im Experiment werden kaum bis gerade eben wahrnehmbar sein.
- Bitte nehmen Sie auf dem Stuhl eine bequeme aufrechte Sitzhaltung ein; bitte nicht die Beine übereinander schlagen, sondern beide Füße ungezwungen auf dem Fußboden abstützen. Die Arme bitte entspannt in den Schoß legen.
- Der Beginn des Experimentes wird Ihnen über Lautsprecher angesagt.
- Die Erschütterungssignale werden Ihnen jeweils 10 Sekunden angeboten. Dies wird durch Aufleuchten der unteren grünen Lampe angezeigt. Nach einer Pause von ca. 5 Sekunden (die Lampe erlischt) folgt ein erneutes Erschütterungssignal mit etwas veränderter Stärke, dann wieder eine Pause usw.
- Zunächst wird Ihnen ein Trainingssignal angeboten, das Sie "sicher" spüren werden. So bekommen Sie etwa einen Eindruck davon, welcher Art die Einwirkungen in diesem Experiment sind.
- Sobald Sie den Eindruck haben, Erschütterungen wahrzunehmen, drücken Sie bitte den Knopf des Signalgebers, woraufhin die obere rote Lampe aufleuchtet.
- Einen Teil der angebotenen Erschütterungsreize werden Sie nicht wahrnehmen, einen anderen Teil werden Sie wahrnehmen. Immer dann, wenn Sie Erschütterungen wahrnehmen, drücken Sie bitte den Knopf, bis die rote Lampe bestätigt, daß der Knopfdruck registriert wurde.
- Die Versuchsdauer beträgt etwa 20 Minuten.
- Möchten Sie den Versuch aus irgendeinem Grunde abbrechen, verlassen Sie bitte den Stuhl oder geben Sie dem Versuchsleiter ein Zeichen.

- Wir bitten Sie, nach dem Ende des Experimentes dem Versuchsleiter Hinweise über irgendwelche besonderen Vorkommnisse und persönliche Feststellungen während des Experimentes mitzuteilen, z.B.  
die Erschütterungen habe ich nicht gespürt, sondern nur gehört; die Erschütterungen klirrten; ich bin nicht sicher, ob ich die Erschütterungen oder meinen eigenen Pulsschlag gespürt habe o.ä.
- Wir würden Sie gern bitten, sich nach einer gewissen Zeit für einen Wiederholungsversuch zu Verfügung zu stellen.  
Wir benachrichtigen Sie dann entsprechend.
- Vielen Dank für Ihre Mithilfe bei diesem Experiment, das zur Verbesserung der Grundlagen beim Immissionsschutz (Erschütterungsschutz) beitragen soll.

## **Informationsbogen für die Versuchspersonen bei Anwendung der Untersuchungsmethode M(selbst)**

- Wir bitten Sie, an einem Experiment teilzunehmen, bei dem die Wahrnehmungsschwelle für Erschütterungen festgestellt werden soll.
- Dafür benötigen wir einige Angaben über Alter, Geschlecht usw., weil u.U. Abhängigkeiten vermutet werden. Diese Angaben werden nur für dieses Experiment verwendet.
- Der Stuhl, auf dem Sie im Versuchsraum sitzen werden, wird ganz geringe Schwingbewegungen (Erschütterungen) ausführen. Diese betragen nur etwa 1/10 bis 1/100 der Stärke, die Sie beim Fahren im Auto gewöhnt sind. Die Erschütterungsreize im Experiment werden kaum bis gerade eben wahrnehmbar sein.
- Bitte nehmen Sie auf dem Stuhl eine bequeme aufrechte Sitzhaltung ein; bitte nicht die Beine übereinander schlagen, sondern beide Füße ungezwungen auf dem Fußboden abstützen. Die Arme bitte entspannt in den Schoß legen.
- Der Beginn des Experimentes wird Ihnen über Lautsprecher angesagt.
- Das Anregungssignal wird Ihnen zu Beginn mit einer Stärke angeboten, bei dem Sie es sicher wahrnehmen werden.
- Das Vorhandensein des Signals wird Ihnen durch eine Signalleuchte angezeigt.
- Sie werden dann aufgefordert, durch Bedienen der Tasten T1 (Stärke der Signale nimmt zu) oder durch T2 (Stärke der Signale nimmt ab) die Stärke der Signale so einzustellen, daß nach Ihrer Meinung die Stufe der "beginnenden subjektiven Wahrnehmungsschwelle" erreicht ist, d.h. die "Stärke" die gerade "noch wahrgenommen" wird (das Signal also noch nicht ganz verloren gegangen ist).
- Durch Betätigen der Taste STOP (Erschütterungssignal wird abgeschaltet) haben Sie zusätzlich die Möglichkeit, Ihre Entscheidung "sicherer" zu machen. Es ist Ihnen freigestellt hiervon Gebrauch zu machen oder nicht.
- Ihnen ist völlig freigestellt, auf welche Weise Sie die "Wahrnehmungsschwelle" finden; jedoch sollte die vor der Entscheidung eingestellte Signalstärke mindestens einige Sekunden anstehen (etwa weniger als 10 Sekunden) und auf Sie einwirken. Als grober Anhalt wird jedoch vorgegeben, daß die gesamte Entscheidungsfindungszeit für eine Signalart (Frequenz) nicht länger als zwei bis drei Minuten beanspruchen sollte.

- Wir bitten Sie, die Kennzeichnung des Zustandes "Wahrnehmungsschwelle ermittelt" durch Betätigen der Taste "Fertig" anzuzeigen. Dies wird allen Beteiligten durch Erlöschen der Signallampe angezeigt.
- Bei der eingestellten Wahrnehmungsschwelle wird der dabei vorhandene Wert zur Kennzeichnung der Signalstärke festgestellt und dieser Wert im Versuchsablaufprogramm gespeichert.
- Danach wird Ihnen das nächste bei diesem Versuch verwendete in aller Regel "sicher wahrnehmbare" Signal angeboten, mit der Aufforderung, die Wahrnehmungsschwelle erneut zu ermitteln.



- Möchten Sie den Versuch aus irgendeinem Grunde abbrechen, verlassen Sie bitte den Stuhl oder geben Sie dem Versuchsleiter ein Zeichen.
- Wir bitten Sie, nach dem Ende des Experiments dem Versuchsleiter Hinweise über irgendwelche besonderen Vorkommnisse und persönliche Feststellungen während des Experimentes mitzuteilen, z.B.

die Erschütterungen habe ich nicht gespürt, sondern nur gehört;  
 die Erschütterungen klirrten;  
 ich bin nicht sicher, ob ich die Erschütterungen oder meinen eigenen Pulsschlag gespürt habe o.ä.

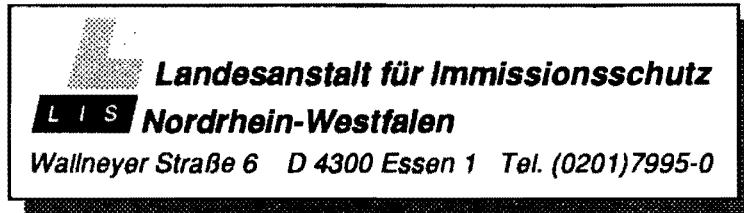
- Wir würden Sie gern bitten, sich nach einer gewissen Zeit für einen Wiederholungsversuch zur Verfügung zu stellen.  
Wir benachrichtigen Sie dann entsprechend
- Vielen Dank für Ihre Mithilfe bei diesem Experiment, das zur Verbesserung der Grundlagen beim Immissionsschutz (Erschütterungsschutz) beitragen soll.

## **LIS-Berichte**

der Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus dem Untersuchungs- und Forschungsprogramm der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Sie werden - soweit nicht vergriffen - Interessenten auf Anfrage hin kostenlos zur Verfügung gestellt. Alle LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in zahlreichen Universitäts- und Hochschulbibliotheken zur Einsichtnahme und Ausleihe zur Verfügung.

Bestellungen sind zu richten an die



Die Titel der LIS-Berichte Nr. 1 bis 50 sind in einem Prospekt nachgewiesen, der auf Anfrage gerne zugesandt wird. Diese Berichte sind, bis auf teilweise noch verfügbare Überstücke, vergriffen.

- Berichte-Nr. 51: Herpertz, E., J. Assmann, D. Krane, E. Hartmann, B. Steck, E. Brewig  
(vergriffen) und J. Krochmann:  
Messen und Beurteilen von Lichtimmissionen (1984).
- Berichte-Nr. 52: Pfeffer, H.-U.:  
(vergriffen) Qualitätssicherung in automatischen Immissionsmeßnetzen.  
Teil 3: Ringversuche der staatlichen Immissions-Meß- und Erhebungsstellen in der Bundesrepublik Deutschland (STIMES).  
Ergebnisse für die Komponenten SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> und CO (1984).
- Berichte-Nr. 53: Beier, R.:  
Zur Planung und Auswertung von Immissionsmessungen gemäß TA-Luft 1983 (1985).
- Berichte-Nr. 54: Bröker, G. und H. Gliwa:  
Polychlorierte Dibenzo-Dioxine und -Furane in den Filterstäuben und Schlacken der 12 Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen sowie einiger Sondermüllverbrennungsanlagen (1985).
- Berichte-Nr. 55: Külske, S., J. Giebel, H.-U. Pfeffer und R. Beier:  
Analyse der Smoglage vom 16. bis 21. Januar 1985 im Rhein-Ruhr-Gebiet.  
Teil 1: Text- und Bildband (1985)  
Teil 2: Meßergebnisse (1985).
- Berichte-Nr. 56: Splittgerber, H., M. Klein und P. Neutz:  
Untersuchungen zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle bei Einwirkung von Erschütterungen auf den Menschen - Beschreibung der Versuchsanlage - (1985).
- Berichte-Nr. 57: Prinz, B., J. Hradetzky, H.-U. Pfeffer, H.W. Zöttl und H.-K. Lichtenthaler:  
(vergriffen) Forschungsergebnisse zur Problematik der neuartigen Waldschäden (1985).
- Berichte-Nr. 58: Giebel, J. und W. Stramplat:  
Untersuchung über die Eignung des Korrelationspektrometers COSPEC V zur Bestimmung des Transportes von Schwefeldioxid bzw. Stickstoffdioxid (1986).

- Berichte-Nr. 59:** Prinz, B., D. Schwela, E. Koch, S. Ganser und T. Eikmann:  
Untersuchungen zum Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Häufigkeit  
von Pseudokrupperkrankungen im Stadtgebiet Essen (1986)..
- Berichte-Nr. 60:** Manns, H. und H. Gies:  
Ergebnis der Erprobung des automatischen Ozon-Meßgerätes Dasibi, Typ 1008 AH  
(1986).
- Berichte-Nr. 61:** Splittgerber, H.:  
Messung und Beurteilung von Erschütterungsimmissionen - Vergleich verschiedener Ver-  
fahren - (1986).
- Berichte-Nr. 62:** Buck, M. und P. Kirschmer:  
Immissionsmessungen polychlorierter Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane in Nord-  
rhein-Westfalen (1986).
- Berichte-Nr. 62:** Buck, M. und P. Kirschmer:  
Measurements of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Outdoor Air  
(1987).(Übersetzung des 1986 erschienenen LIS-Berichtes Nr. 62)
- Berichte-Nr. 63:** Giebel, J.:  
(vergriffen) Untersuchung über die praktische Anwendung eines numerischen Ausbreitungsmodells (K-  
Modell) für die Praxis der Immissionssimulation (1986).
- Berichte-Nr. 64:** Winkler, H.D.:  
(vergriffen) Thalliumemissionen bei der Zementherstellung - Ursachen und Minderungsmaßnahmen -  
(1986).
- Berichte-Nr. 65:** Wietlake, K.H.:  
(vergriffen) Erschütterungseinwirkungen durch Exzenter-Schmiedepressen und ihre Minderung durch  
Direktabfederung (1986).
- Berichte-Nr. 66:** Viertes Symposium über die Technik der Kernreaktorfernüberwachungssysteme am 8. und 9.  
Oktober 1985 in der LIS, Essen (1986).
- Berichte-Nr. 67:** Assmann, J.:  
(vergriffen) Hinweise zur Prognose von Geräuschimmissionen im Rahmen von Genehmigungsverfahren  
nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (1986).
- Berichte-Nr. 68:** Manns, H. und H. Gies:  
(vergriffen) Erprobung des Schwebstaubmeßgerätes FH 62 I 3 m<sup>3</sup>/h für die automatisierte Immissions-  
messung (1986).
- Berichte-Nr. 69:** Beine, H.:  
(vergriffen) Phosphorsäureester und verwandte Verbindungen -  
Umweltrelevanz und luftanalytische Bestimmung (1987).
- Berichte-Nr. 70:** Buck, M. und H.-U. Pfeffer:  
Air Quality Surveillance in the State North-Rhine-Westphalia (F.R.G.).  
(Vollständig neu bearbeitete Fassung LIS-Berichtes Nr. 46 ) (1987).
- Berichte-Nr. 71:** Wefers, H. und H. Katzer:  
Zusammenstellung von zusätzlichen sicherheitstechnischen Anforderungen an Anlagen zur  
Lagerung von druckverflüssigtem Ammoniak in Kraftwerken (1987).
- Berichte-Nr. 72:** Beier, R., J. Kohlert und M. Buck:  
(vergriffen) Entwicklung der Immissionsbelastung in der Umgebung der Aluminiumhütte im Essener  
Norden in den Jahren 1984 bis 1986 (1987).
- Berichte-Nr. 73:** Schade, H.:  
(vergriffen) Erstellung eines Emissionskatasters und einer Emissionsprognose für Feuerungsanlagen im  
Sektor Haushalte und Kleinverbraucher des Belastungsgebietes Ruhrgebiet Ost.  
(1987).



- Berichte-Nr. 74: **Beier, R. und M. Buck:**  
(vergriffen) **Möglichkeit und Grenzen der Nutzung von Luftqualitätsdaten aus diskontinuierlichen Messungen gemäß TA-Luft (1988).**
- Berichte-Nr. 75: **Koch, E. und P. Altenbeck:**  
**Prinzipien des prophylaktischen Immissionsschutzes (1988).**
- Berichte-Nr. 76: **Giebel, J.:**  
**Eine vereinfachte Methode zur Immissionssimulation (1988).**
- Berichte-Nr. 77: **Külske, S., R. Beier und H.-U. Pfeffer:**  
(vergriffen) **Die Smoglage vom 14. bis 22. Januar 1987 in Nordrhein-Westfalen und ihre Ursachen. (1988).**
- Berichte-Nr. 78: **Geueke, K.-J. und H. Niesenhaus:**  
(vergriffen) **Bestimmung von Benzol in Abgasen (1988).**
- Berichte-Nr. 79: **Wietlake, K.-H.:**  
(vergriffen) **Geräuschminderung durch Teilkapselung von Schmiedehämmern (1988).**
- Berichte-Nr. 80: **Krause, G.H.M. und B. Prinz:**  
**Experimentelle Untersuchungen der LIS zur Aufklärung möglicher Ursachen der neuartigen Waldschäden (1989).**
- Berichte-Nr. 81: **Goldberg, K.H.:**  
(vergriffen) **Untersuchungen zur Geräuschemission und -ausbreitung von Schußsignalen bei Kleinkaliberschießständen (1988).**
- Berichte-Nr. 82: **Buck, M. und K. Ellermann:**  
**Die Immissionsbelastung durch Benzol in Nordrhein-Westfalen (1988).**
- Berichte-Nr. 83: **Wefers, H., S. Delling und T. Schulz:**  
**Hinweise zur Erstellung und Prüfung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen nach der Störfall-Verordnung (1988).**
- Berichte-Nr. 84: **Wefers, H., T. Schulz und R. John:**  
(vergriffen) **Hinweise und Suchstrategien zu den Stoffen der Störfall-Verordnung (1988).**
- Hinweis: Die Grundlage des LIS-Berichtes bildet eine PC-Stoffliste, die von der LIS mit Hilfe einer relationalen Datenbank für Personalcomputer erstellt wurde. Die PC-Stoffliste kann auf PC mit Festplatte und dem Betriebssystem MS-DOS 3.3 (IBM-kompatibel) betrieben werden. Die PC-Stoffliste wird im Auftrag der LIS von der Fa. Colman, Essen (Tel.: 0201/790095) für DM 100,-- vertrieben**
- Berichte-Nr. 85: **Krause, G.H.M.:**  
(vergriffen) **Untersuchungen zum Vegetationszustand im Umgebungsbereich der nordrhein-westfälischen Aluminiumhütten mit Hilfe der Falschfarbenfotografie (1988).**
- Berichte-Nr. 86: **Katzer, H. und R. John:**  
(vergriffen) **Einsatz von Ammoniakwasser in katalytischen DeNO<sub>x</sub>-Anlagen - Ergebnisse an einer Versuchsanlage - (1989).**
- Berichte-Nr. 87: **Kirschmer, P. und A. Gerlach:**  
**Immissionsmessungen von Chlorkohlenwasserstoffen - Probenahme, Analyse, Ergebnisse - (1989).**
- Berichte-Nr. 88: **Euteneuer, U., H. Katzer und H. Wefers:**  
(vergriffen) **Sicherheitstechnische Überprüfung einer verfahrenstechnischen Anlage nach einem modifizierten PAAG-Verfahren am Beispiel eines Flüssiggaslagers (1989).**
- Berichte-Nr. 89: **Beier, R. und A. Doppelfeld:**  
**Analyse der räumlichen Repräsentativität automatischer Meßnetze der Luftqualität (1989).**

- Berichte-Nr. 90:** Beier, R. und J. Kohlert:  
Pilotstudie zur Überwachung von Tetrachlorethen in der Nachbarschaft von Chemisch-Reinigungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1989).
- Berichte-Nr. 91:** Buck, M. (Bearb.):  
Asbest-Immissionsbelastung durch Abwitterung.  
Fachkolloquium am 06. Juli 1989 in der LIS NRW, Essen,  
Tagungsbericht. Gem. hrsg. von: Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg,  
Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz, Landesanstalt für Immissionsschutz  
Nordrhein-Westfalen (1989).
- Berichte-Nr. 92:** Kirschmer, P. und P. Eynck:  
Meßverfahren mit automatisierter Probenahme zur Bestimmung von Aldehyden in der Luft  
(1989).
- Berichte-Nr. 93:** Ehl, W. und A. Ertl:  
Kriterien-Katalog zur "Prüftiefe" bei Sicherheitsanalysen am Beispiel eines Flüssiggasla-  
gers. (1990).
- Berichte-Nr. 94:** Manns, H., G. Nitz und B. Striefler:  
Weiterentwicklung und Erprobung von Immissionsmeßverfahren für gesundheitsgefähr-  
dende organische Stoffe. (1990).