

# **Grundlegende Experimente zur Wahrnehmung von vertikalen Ganzkörpervibrationen**

## **Basic Experiments on the Perception of vertical Whole-Body Vibrations**

**Michael A. Bellmann, Hermann Remmers,**

ITAP GmbH, Carl v. Ossietzky Str. 9-11, 26129 Oldenburg

**Volker Mellert,** Fakultät V der Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg

### **Kurzfassung**

Der Mensch ist im Alltag vielfältigen Ganzkörpervibrationen ausgesetzt, die unterschiedlichen Immissionstypen angehören können (z.B. Verkehr und Industrie). Bestehende Normen, wie z.B. ISO 2631-2 (1989) oder VDI 2057-2 (1987), verwenden ausschließlich sinusförmige Anregungen und beschreiben die Grundlagen der Wahrnehmung von Vibrationen in Gebäuden. Existierende Literaturdaten für Perzeptionsschwellen (z.B. zusammengefasst in Griffin, 1991) zeigen erhebliche Unterschiede zu den Standarddaten. Es sind aber auch Abweichungen bei den Literaturdaten untereinander zu erkennen. Außerdem existieren fast keine oder nur lückenhafte Angaben in der Literatur zu grundlegenden Fragen der Vibrationswahrnehmung, wie z.B. die Frage nach den gerade wahrnehmbaren Unterschieden im Amplituden- und Frequenzbereich. Aus diesen Gründen sind eine Reihe von grundlegende Experimente zur Wahrnehmung von vertikalen Ganzkörpervibrationen bei sitzenden Probanden im Frequenzbereich von 5 bis max. 200 Hz mit bewährten und neuen Messmethoden aus der Psychoakustik durchgeführt worden: (1) Perzeptionsschwellen, (2) und (3) gerade wahrnehmbare Unterschiedsschwellen im Amplituden- und Frequenzbereich, sowie (4) Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung im schwelennahen Bereich.

Es zeigt sich, dass die Perzeptionsschwelle im Bereich 8 bis 63 Hz relative konstant bei einem Beschleunigungspegel von 87 dB liegt und zu 5 Hz auf 83 dB abfällt. Im Gegensatz dazu steigt die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung konstant mit 2,3 dB/ Oktave ab 6.3 Hz an. Der Referenzreiz für dieses Experiment ist eine 20 Hz Sinusvibration mit einem

Beschleunigungspegel von 100 dB ( $0,1 \text{ m/s}^2$ ). Obwohl die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung lediglich 10 dB oberhalb der Perzeptionsschwelle gemessen worden ist, zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Messkurven. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe sind nicht mit frequenzabhängigen gerade wahrnehmbaren Unterschieden im Amplitudenbereich zu erklären, die frequenzunabhängig in diesem Bereich bei 1,5 dB liegen. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird ein neues psychophysikalisch motiviertes Konzept zur Auswertung von breitbandigen Vibrationssignalen vorgestellt.

### **Abstract**

The human body is exposed in daily life to various whole-body vibrations, caused by, e.g., traffic or industry. Existing standards, for example, ISO 2631-2 or VDI 2057-2, refer to sinusoidal (deterministic) excitation based on vibration perception in buildings. Existing data in literature on the perception of sinusoidal whole-body vibration (e.g., summarized in Griffin, 1991) show considerable differences to the present standards. However, data from different laboratories deviate from each other too, probably due to differences of the used psychophysical measurement method. Additionally, incomplete details exist in the literature for basic experiments like difference thresholds in level or frequency. Therefore, basic experiments on the perception of vertical whole-body vibration for sitting subjects are conducted in the frequency range from 5 to max. 200 Hz with new and reliable measurement methods from psychoacoustics: (1) perception threshold, (2) and (3) Just Noticeable Differences in Level and Frequency and equal-vibration level contours at low magnitude.

The measured perception threshold is nearly constant at a vibration level of 87 dB between 8 and 63 Hz and decrease slightly for higher and lower frequencies. In comparison to that findings the equal-vibration level contour increase with increasing frequency from 6.3 Hz upwards with 2,3 dB per octave. The reference stimulus for this experiment was a 20 Hz sinusoidal vertical vibration with an acceleration level of 100 dB ( $0,1 \text{ m/s}^2$ ). The shapes of the presented perception threshold and the equal-vibration level contour exhibit considerable differences to each other even though the contour is measured almost 10 dB above the perception threshold. The differences in both curves are not explicable with frequency depending JNDs because the difference thresholds in the used level and frequency range are independent of frequency at about 1.5 dB.

A new psychophysically motivated analysis strategy for a broadband vibration excitation is presented on the basis of the findings of this study.

## 1. Einleitung

Die zunehmende Technisierung, z.B. am Arbeitsplatz, und die Tendenz zu einem immer höheren Grad an Mobilität, haben zum Teil erhebliche Belastungen auf den Menschen und seiner Umwelt zur Folge. So ist der Mensch vermehrt vielfältigen Ganzkörpervibrationen (GKV) im Alltag ausgesetzt, die z.B. durch Verkehr oder Bautätigkeiten verursacht werden. "Ihre Wirkungen sind weniger sinnesspezifische Überlastungen, vielmehr belästigen sie den Menschen im Sinne eines Zustandes verminderten Wohlbefindens oder sie beeinträchtigen seine Leistung" (Meloni, 1991). Bestehende Normen, wie z.B. die ISO 2631 1/2 oder VDI 2057 1/2/3/4 verwenden ausschließlich sinusförmige Anregungen und beschreiben die Grundlagen der Wahrnehmung von Vibrationen in Gebäuden, wie etwa die Perzeptionsschwellen von Ganzkörpervibrationen in alle Raumrichtungen oder die Langzeitwirkung von Vibrationen auf den Menschen. Existierende Literaturdaten zur Vibrationswahrnehmung, z.B. Perzeptionsschwellen (zusammengefasst in Griffin, 1991) zeigen erhebliche Unterschiede zu den Standardwerten. Es sind aber auch starke Abweichungen untereinander zu erkennen, die zum Teil auf die Verwendung von unterschiedlichen Meßmethoden zurückgeführt werden können (Parsons & Griffin, 1988; Griffin, 1991). Außerdem existieren keine oder nur lückenhafte Angaben in der Literatur zu grundlegenden Fragen der Vibrationswahrnehmung, wie z.B. die Frage nach den gerade wahrnehmbaren Unterschiedsschwellen (engl. Just Noticeable Differences - JND) in der Frequenz oder in der Amplitude.

Aus diesen Gründen beschäftigt sich diese Untersuchung mit grundlegenden Experimenten zur Vibrationswahrnehmung von sitzenden Probanden. Als Meßmethoden werden neue und verlässliche Verfahren aus der Psychoakustik verwendet. Die Vibrationsanregung geschieht mittels eines Vibrationsprüfstands, Vibration-Floor genannt, der an der Universität Oldenburg in Zusammenarbeit mit der ITAP GmbH entwickelt und gebaut worden ist (Bellmann, 2002). Für alle Untersuchungen dieser Studie werden ausschließlich vertikale sinusförmige Vibrationsanregungen verwendet.

In einem ersten Experiment wurden mit einer bewährten psychophysikalischen Messmethode die Perzeptionsschwellen im Frequenzbereich von 5 bis 200 Hz gemessen. Dabei ist darauf geachtet worden, die Einflüsse der meisten Messparameter, wie z.B. Expositionsdauer, zusätzliche akustische Reize, auf die Schwellen zu minimieren.

Im zweiten und dritten Experiment wurden die Unterschiedsschwellen im Frequenz- und Amplitudenbereich (engl. Just Noticeable Differences in Level – JNDL bzw. in Frequency - JNDF) zwischen 5 und 50 Hz bestimmt. Die Unterschiedsschwellen charakterisieren die gerade wahrnehmbaren Unterschiede in der Intensität bzw. Frequenz eines Stimulus. Die Relation (relativen Unterschiedsschwelle  $\Delta I/I$  bzw.  $\Delta f/f$ ) zwischen der absoluten wahrnehmbaren

Differenz der Intensität  $\Delta I$  bzw. Frequenz  $\Delta f$  und der dargebotenen Intensität bzw. Frequenz ist ein konstantes Verhältnis  $k$  (Weber'sches Gesetz). Die sogenannten JNDL (Unterschiedsschwellen im Pegel  $L$ ) und JNDF (in der Frequenz) sind in der Psychoakustik wohl bekannt (Zwicker & Fastl, 1999). Für die Vibrationswahrnehmung existieren keine Literaturdaten für die JNDFs und nur wenige Daten für die JNDLs (Morioka & Griffin, 2000), die im Gegensatz zur Theorie (Signal Detection Theorie) abhängig von der dargebotenen Amplitude leicht anfallen.

Im vierten Experiment wurden die Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung im Frequenzbereich von 5 bis 80 Hz bestimmt. Die Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung werden in der VDI 2057- 2 auch als *Kurven gleicher bewerteter Schwingstärke KZ* und in der englischsprachigen Literatur als *equivalent-comfort contours* bezeichnet (z.B. spezifiziert in der ISO 2631-2). Diese Kurven charakterisieren die selbe Vibrationsempfindung bei unterschiedlichen Frequenzen und ggf. unterschiedlicher Amplitude. Diese Art von Kurven wurden in der Literatur oftmals bei großen Amplituden gemessen (z.B. zusammengefasst in Griffin, 1991), hingegen im schwellennahen Bereich existieren kaum bzw. keine Literaturdaten. Die Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung wurden mit einer relativ neuen psychophysikalischen Messmethode – interleaved AFC - Methode – gemessen. Diese Methode minimiert den Einfluss von Messparameter, wie z.B. Anfangspegel, auf die Ergebnisse bei Messungen der Kurven gleicher Pegellautstärke nachweislich (Reckhardt *et al.*, 1998). Es wurde in dieser Studie untersucht, ob diese Messmethode auch für die Vibrationswahrnehmung einsetzbar ist und ebenfalls den Einfluss von bestimmten Messparametern minimiert. Eine 20 Hz Sinusschwingung mit einem Beschleunigungspegel von 100 dB (entspricht einer Beschleunigung von  $0,1 \text{ m/s}^2$ ) wurde als Referenzstimulus für diese Experiment genommen. Diese Amplitude bei 20 Hz entspricht in etwa der Kurven gleicher bewerteter Schwingstärke  $KZ = 0,8$  aus der VDI 2057-2 (1987).

Auf der Grundlage dieser psychophysikalisch bestimmten Ergebnisse und Parameter wird ein neues psychophysikalisch motiviertes Konzept zur Auswertung von breitbandigen Vibrationssignalen vorgestellt.

## **2. Experimentelles Versuchsdesign**

### **2.1 Versuchspersonen**

An den vier Experimenten nahmen bis zu 17 Versuchspersonen (fünf weibliche und zwölf männliche) teil. Ihr Alter variierte dabei zwischen 25 bis 33 Jahren. Alle Versuchspersonen waren Studenten und frei von Verletzungen oder relevanten Vorbelastungen von Gesundheitsschäden. Von jeder Versuchsperson wurden zusätzlich zum Alter und Geschlecht noch

weitere endogene und exogene anthropometrische Daten erfasst, siehe Tabelle 2.1. Aus den Daten wurden der Body Mass Index „BMI“ und der Rohrer Index „RI“ berechnet (nach Garrow und Webster, 1985).

**Tabelle 2.1:** Anthropometrische und andere persönliche Daten zur Charakterisierung der Versuchspersonen.

Parameter	Mw	Sd	Med
Alter [a]	28,2	2,4	29,0
Körperlänge [m]	1,77	0,1	1,80
Körpermasse [Kg]	71,9	12,3	72,0
BMI [Kg/m <sup>2</sup> ]	22,9	2,7	22,4
RI [Kg/m <sup>3</sup> ]	13,0	1,6	12,9

Alle durchgeführten Experimente beziehen sich auf sitzende Versuchspersonen. Die Körperhaltung der Versuchspersonen war normal und vorzugsweise komfortabel auf einem ungepolsterten Sitz (unter Verwendung des biodynamischen Koordinatensystems für sitzende Probanden spezifiziert in der ISO 8727): Füße auf einem starren Prüfstandstisch des verwendeten Vibration-Floors (siehe Kapitel 2.2), mit aufrechtem Oberkörper sitzend auf einem starren, ungepolsterten Stuhl mit starrer Rückenlehne und ohne Armlehnen. Während der laufenden Versuche wurde die Haltung der Personen nicht kontrolliert oder aufgezeichnet, jedoch wurden die Versuchspersonen instruiert möglichst während der gesamten Dauer der Versuche in der selben Art und Weise sitzen zu bleiben.

Alle Experimente wurden unter Berücksichtigung von bestehenden Leitfäden zur Sicherheit von Prüfungen und Versuchen mit Menschen durchgeführt (ISO 10326-1, 1998) um Gesundheitsgefährdungen zu vermeiden.

## 2.2 Versuchsaufbau und Stimuli

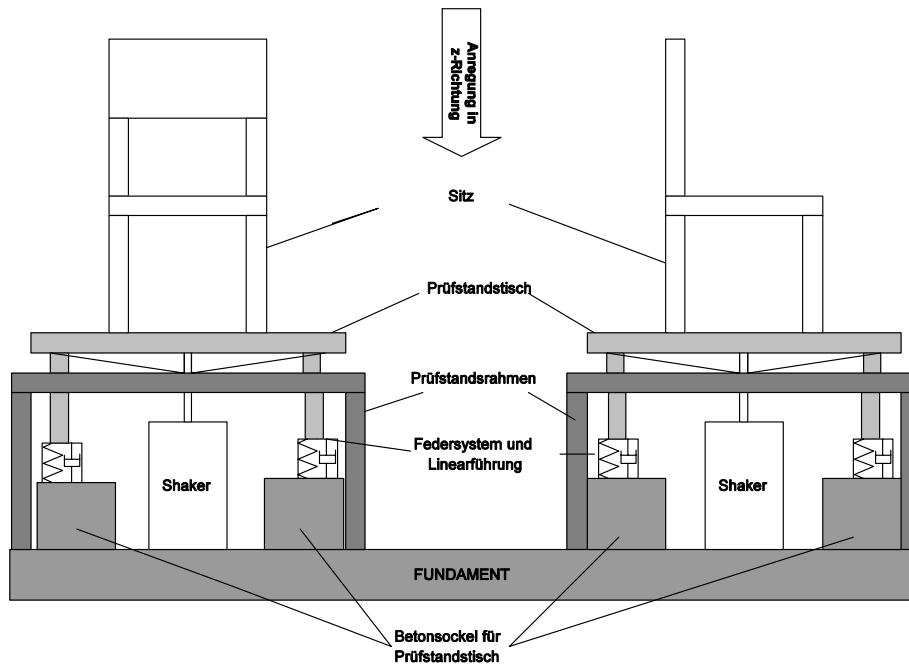
Vertikale Ganzkörpervibrationen wurden unter Verwendung eines neu entwickelten Vibrationsprüfstandes der Universität Oldenburg, entwickelt in Zusammenarbeit mit der ITAP GmbH, dem sogenannten Vibration-Floor, erzeugt (Bellmann, 2002). Das Vibration-Floor besteht aus einem Prüfstandstisch mit Linearführungen, montiert auf Luftfedern (Bosch Balgzylinder) zur Gewährleistung einer möglichst reinen vertikalen Anregung. Das gesamte System wird mit einem elektro-dynamischen Schwingerreger (TIRAVib Typ 52120 mit einem TIRA A50150 Leistungsverstärker) angetrieben, der unterhalb des Schwerpunktes des Ge-

samtsystems angebracht ist, Abbildung 2.1. Das Vibration-Floor ist unter psychoakustischen Gesichtspunkten optimiert worden, d.h. bei der Produktion von Ganzkörpervibrationen werden keine bzw. sehr geringe akustische Komponenten abgestrahlt, die unterhalb der genormten Ruhehörschwelle liegen bei Produktion von Vibrationen unterhalb von 50 Hz und im Bereich der Ruhehörschwelle liegen für höhere Vibrationsfrequenzen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in einem  $3 \times 4,5 \times 6 \text{ m}^3$  Raum aufgebaut mit schallabsorbierendem Materialien an den Wänden. Der Stör- bzw. Hintergrundpegel liegt in dem Raum bei  $L_{Aeq} = 33 \text{ dB(A)}$ . Die Signalgenerierung, sowie die gesamte Versuchssteuerung wurde mit Hilfe eines PCs, auf dem das AFC Software-Paket für Matlab von MATHWORKS, das an der Universität Oldenburg entwickelt worden ist, durchgeführt. Die verwendeten Stimuli wurden digital erzeugt mit einer Abtastrate von 32 kHz und zu einem Analogsignal mit Hilfe eines 2-Kanal 16-bit DA Konverter inklusive Rekonstruktionsfilter (SONY 2000 ESD) gewandelt. Eine detailliertere Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Bellmann (2002) beschrieben.

Für alle Experimente wurden ausschließlich sinusförmige vertikale Ganzkörpervibrationen im Bereich mit Frequenzen von 5 bis 80 Hz in  $1/3$  Oktave Schritten verwendet. Für die Messung der Perzeptionsschwelle wurden ebenfalls 125 und 200 Hz als Teststimuli verwendet. Die Darbietungsdauer der Stimuli betrug 2000 ms für Frequenzen  $f < 16 \text{ Hz}$  und 1000 ms für höhere Frequenzen inklusive einer  $200 \text{ ms cos}^2$  Anfangs- und Endrampe. Dabei werden im folgenden die Ergebnisse, gemessen mit einer Stimulusdauer 1000 ms, mit offenen Symbolen und mit 2000 ms mit geschlossenen Symbolen gekennzeichnet. Die variable Expositionsdauer wurde aufgrund von endlichen Integrationszeiten der unterschiedlich involvierten Mechano-Rezeptoren gewählt um Einflüsse der Darbietungsdauer auf die Messergebnisse zu vermeiden (Bellmann, 2002).

Die Messung der Perzeptionsschwellen für Frequenzen von 16 Hz aufwärts wurden sowohl mit als auch ohne Anwesenheit eines zusätzlichen akustischen Maskierers (Stimulus: Rosa-Rauschen von 50 Hz bis 10 kHz mit einem Pegel von 69 dB(A)) gemessen. Die Darbietung wurde mittels eines geschlossenen Kopfhörers (Sennheiser HDA 200) durchgeführt um eventuell abgestrahlten Störschall von dem Prüfstand zu verdecken. Unterschiedliche Studien haben gezeigt (Meloni, 1991; Bellmann, 2002), dass keine signifikanten Einflüssen bis zu diesem akustischen Pegel auf die Perzeptionsschwellen auftreten.

Alle Messergebnisse sind als Beschleunigungspegel  $L_{Vib.} [\text{dB}]$  und als Beschleunigung  $a [\text{m/s}^2]$  angegeben. Dabei entspricht ein Beschleunigungspegel von  $L_{Vib.} = 140 \text{ dB}$  einer Beschleunigung von  $a = 10 \text{ m/s}^2$  bzw. 1 g.



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung des verwendeten Vibrationsprüfstandes, Vibration-Floor genannt, der an der Universität Oldenburg in Zusammenarbeit mit der ITAP GmbH entwickelt und gebaut wurde (Bellmann, 2002).

### 2.3 Methoden

Ein 3-Intervall, adaptives 3-Alternative Forced-Choice Paradigma (3-AFC) wurde zur Messung der Unterschieds- und Perzeptionsschwellen verwendet. Die drei Intervalle wurden jeweils durch 500 ms Pausen getrennt und ebenfalls optisch auf dem Bildschirm dargeboten. Eine 2-down 1-up Prozedur wurde verwendet zur Bestimmung des 70.7 % (richtig) Punktes der psychometrischen Funktion (Levitt, 1971). Die Aufgabe der Versuchspersonen war, das randomisiert ausgezeichnete Intervall, das den Test-Stimulus beinhaltet, zu identifizieren.

Zur Bestimmung der Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung wurde ein 2-Intervall, adaptives 2-Alternative Forced-Choice interleaved Paradigma (2-AFC) mit einer 1-down 1-up Prozedur verwendet. Diese relativ neue psychoakustische Messmethode minimiert den Einfluss von einigen Messparametern auf das erzielte Messergebnis bei der Messung der Kurven gleicher Lautheit (Reckhardt *et al.*, 1998). Diese Messmethode ist ebenfalls für Experimente bezüglich der Vibrationswahrnehmung anwendbar (Bellmann, 2002).

Die gewählte Anfangsschrittweite für beide Messmethoden, die unterschiedlich für jedes Experiment sind, halbieren sich nach jedem zweiten Umkehrpunkt zu einer vorher definierten Endschrittweite. Das Messergebnis ist der Mittelwert aus den letzten vier Umkehrpunkten mit der geringsten Schrittweite. Jede Versuchsperson hat jeden Versuch mindestens dreimal an

drei unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Bei einem Teil der Messdaten war die intraindividuelle Standardabweichung  $S_d$  über die drei Messergebnisse größer als 2,5 dB. In diesen Fällen wurde eine vierte und ggf. fünfte Messung durchgeführt und der Mittelwert über die jeweils letzten drei Messungen als Wert genommen.

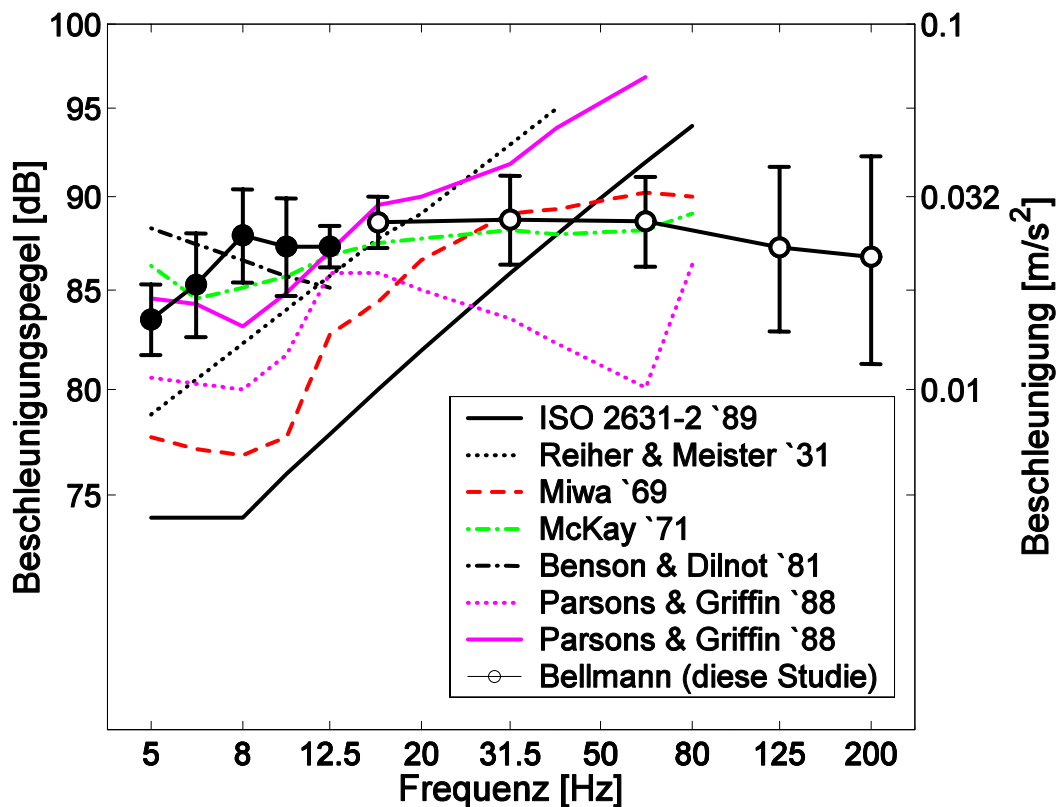
### **3. Experimente**

#### **3.1 Perzeptionsschwelle**

Die Perzeptionsschwelle wurde im Frequenzbereich von 5 bis 200 Hz gemessen. Die Anfangsschrittweite betrug 8 dB und die Endschrittweite 1 dB. Der Anfangspegel der Testvibrationen war  $L_{Vib} = 110$  dB. An diesem Versuch nahmen 17 Versuchspersonen (fünf weibliche und zwölf männliche) teil.

Die gemittelte Perzeptionsschwelle steigt bei 5 Hz von 83,5 dB auf 87,9 dB bei 8 Hz linear an, Abbildung 3.1. Von 8 Hz an ist die Perzeptionsschwelle nahezu konstant bis 63 Hz und weist zu höheren Frequenzen ein leichtes Absinken auf. Die interindividuelle Standardabweichung steigt mit steigender Frequenz von 2,5 dB bei 5 Hz auf 5 dB bei 200 Hz an. Dies liegt an der Tatsache, dass die individuellen Perzeptionsschwellen zu höheren Frequenzen deutlich Unterschiede aufweisen, so steigt bei einigen Versuchsperson die individuelle Perzeptionsschwelle stetig mit steigender Frequenz an, hingegen bei andere Versuchspersonen fällt die Schwelle zu Frequenzen oberhalb 100 Hz ab. (Individuelle Daten sind hier nicht dargestellt).

Zum Vergleich sind die genormte Perzeptionsschwelle für z-Vibrationen aus der ISO 2631-2 bzw. VDI 2057-2 ( $KZ = 0,1$  Kurve) und Literaturdaten von unterschiedlichen Laboratorien (Parsons & Griffin, 1988; Benson & Dilnot, 1981; McKay, 1972; Miwa, 1968 und Reiher & Meister, 1931) ebenfalls in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Literaturdaten zeigen z.T. erhebliche Unterschiede zu der genormten Perzeptionsschwelle auf besonders für den tieffrequenten Bereich. Diese Unterschiede beziehen sich nicht nur auf die absolute Lage sondern auch auf den Verlauf der Perzeptionsschwelle. Zusätzlich existieren ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen einige Literaturdaten, die z.T. auf die verwendete Messmethode zurück zu führen sind (Griffin, 1991). - So wurde die niedrigste Kurve mit „Signal Detektion Theorie“ für 36 Probanden (63 Hz Stimulus wies, laut Autor, Fehler auf) und die höchste Kurve mit der Herstellungsmethode für 8 Probanden von den selben Autoren veröffentlicht. – Die hier dargestellte Perzeptionsschwelle gemessen mit 17 Versuchspersonen zeigt große Ähnlichkeiten mit Daten von McKay (1972).



**Abbildung 3.1:** Gemessene Perzeptionsschwelle für vertikale (z-) Ganzkörpervibrationen dargestellt als interindividuelle Mittelwerte und Standardabweichungen. – Geschlossenen Symbole kennzeichnen eine Stimulusdauer von 2000 ms, offene Symbole von 1000 ms. – Zusätzlich sind zum Vergleich die standardisierte Perzeptionsschwelle aus bestehenden Normen (VDI2057-2 und ISO 2631-2), sowie Literaturdaten abgebildet. (Literaturdaten basieren z.T. auf einer Abbildung in Griffin, 1991).

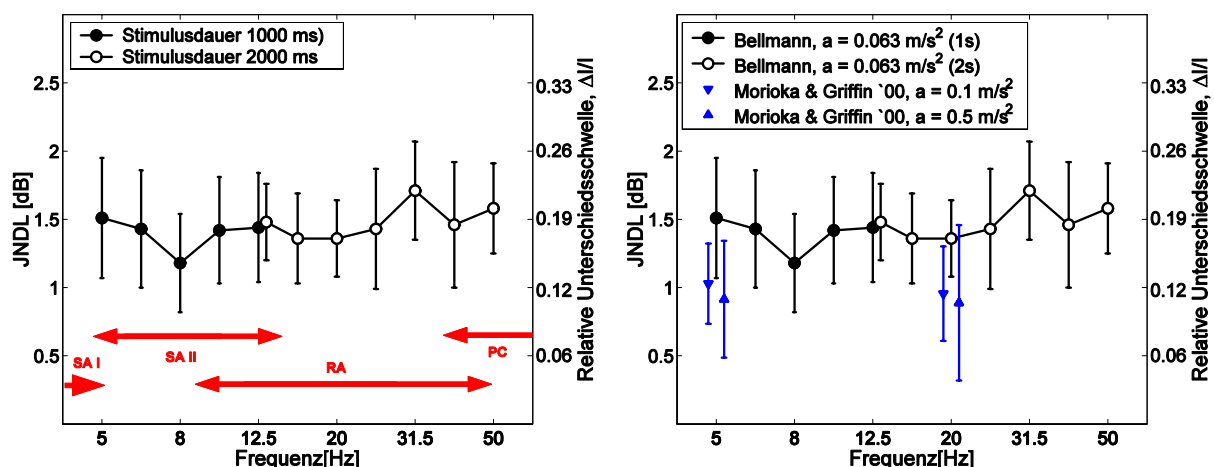
### 3.2 Gerade wahrnehmbare Unterschiede im Amplitudenbereich (JNDL)

An diesem Experiment nahmen 16 Versuchspersonen (fünf weibliche und elf männliche) teil. Die Anfangsschrittweite halbierte sich von 4 dB auf eine Endschrittweite von 0,25 dB während des Versuchs. Der Referenzbeschleunigungspegel betrug  $L_{\text{vib}} = 96$  dB (entspricht ca. 10 dB oberhalb der Perzeptionsschwelle).

Die gerade wahrnehmbaren Unterschiede im Beschleunigungspegel (JNDL) im Frequenzbereich von 5 bis 50 Hz sind als interindividuellen Mittelwerte mit Standardabweichungen in Abbildung 3.2 (linkes Bild) dargestellt. Die Ergebnisse der 16 Versuchspersonen sind im Mittel sehr ähnlich und liegen bei rund 1,5 dB. Es ist eine geringfügige frequenzabhängige Feinstruktur in den Daten zu erkennen, jedoch sind die Unterschiede statistisch nicht signifikant ( $p < 0,05$ ). Die Testfrequenz 12,5 Hz wurde sowohl mit der Expositionsdauer von 1000 ms

als auch 2000 ms gemessen. Die Ergebnisse für die unterschiedliche Darbietungsdauern sind statistisch nicht signifikant unterschiedlich ( $p < 0,001$ ). Zum Vergleich der JNDLs sind auf der rechten y-Achse ebenfalls die relativen Unterschiedsschwellen ( $\Delta I/I$ ) abgebildet. Im Gegensatz zur interindividuellen Varianz (Standardabweichung um die 0,5 dB) sind die intraindividuellen Unterschiede sehr gering - intraindividuellen Standardabweichungen liegen deutlich unter 0,5 dB -, die jedoch nicht dargestellt sind. Ebenfalls in Abbildung 3.2 (linkes Bild) sind die frequenzabhängigen Wirkungsbereiche der unterschiedlichen Mechano-Rezeptoren, die für die Vibrationswahrnehmung verantwortlich sind, dargestellt (Bereiche aus Schmidt & Thews, 1995). Die Bereiche der einzelnen Rezeptoren überlappen sich zum Teil sehr stark, d.h. Anregungen der Haut in bestimmten Frequenzbereichen werden von unterschiedlichen Sensoren in der Haut zeitgleich wahrgenommen.

Zum Vergleich sind Daten aus der Literatur (Morioka & Griffin, 2000) ebenfalls in Abbildung 3.2 (rechtes Bild) mit dargestellt. Die Ergebnisse von Morioka & Griffin sind ebenfalls mit einer AFC Methode gemessen worden, jedoch wurde bei deren Prozedur der 79,4 % statt der 70,7 % der psychometrischen Funktion bestimmt. Außerdem ist der Referenzpegel bei den Literaturdaten z.T. deutlich höher als in dieser Studie. Es zeigt sich, dass die JNDLs kleiner mit zunehmender Amplitude werden, hingegen steigen die interindividuellen Standardabweichungen leicht an.

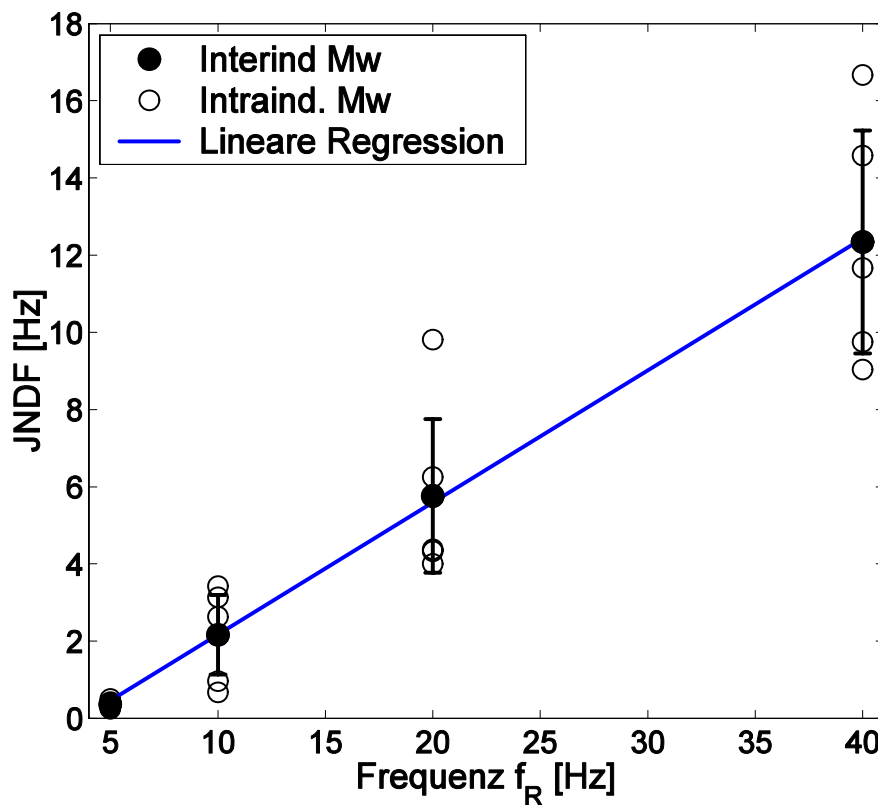


**Abbildung 3.2:** Links: JNDLs, gemittelt über 16 Versuchspersonen, dargestellt als Funktion der Frequenz (linke y-Achse). Auf der rechten y-Achse ist die relative Unterschiedsschwelle ( $\Delta I/I$ ) angezeigt. Außerdem sind die Frequenzbereiche der verantwortlichen Mechano-Rezeptoren eingezeichnet. Rechts: Zusätzlich zu den Daten dieser Studie sind Daten aus der Literatur (Morioka & Griffin, 2000) mit dargestellt, die jedoch bei höheren Referenzamplituden bestimmt worden sind.

### 3.3 Gerade wahrnehmbare Unterschiede im Frequenzbereich (JNDF)

Die gerade wahrnehmbaren Unterschiede im Frequenzbereich (JNDF) wurden für sechs Versuchspersonen (alle männlich) mit einer Stimulusdarbietung von 2000 ms bestimmt. Die Endschrittweite war 0,25 Hz.

Die JNDFs sind für die sechs Versuchspersonen sehr ähnlich. Die interindividuellen Mittelwert inklusive Standardabweichungen sind mit geschlossenen Symbolen dargestellt, die offenen Symbole charakterisieren die individuellen Mittelwerte, Abbildung 3.3. Die interindividuellen Standardabweichungen steigen mit zunehmender Referenzfrequenz  $f_R$  deutlich an. Außerdem zeigt sich ein linearer, frequenzabhängiger Anstieg der JNDFs von der Referenzfrequenz  $f_R$ . Der berechnete Korrelationskoeffizient zwischen den individuellen JNDFs und der Referenzfrequenz ist statistisch signifikant (Pearson  $r = 0,93$ ;  $p < 0,01$ ).

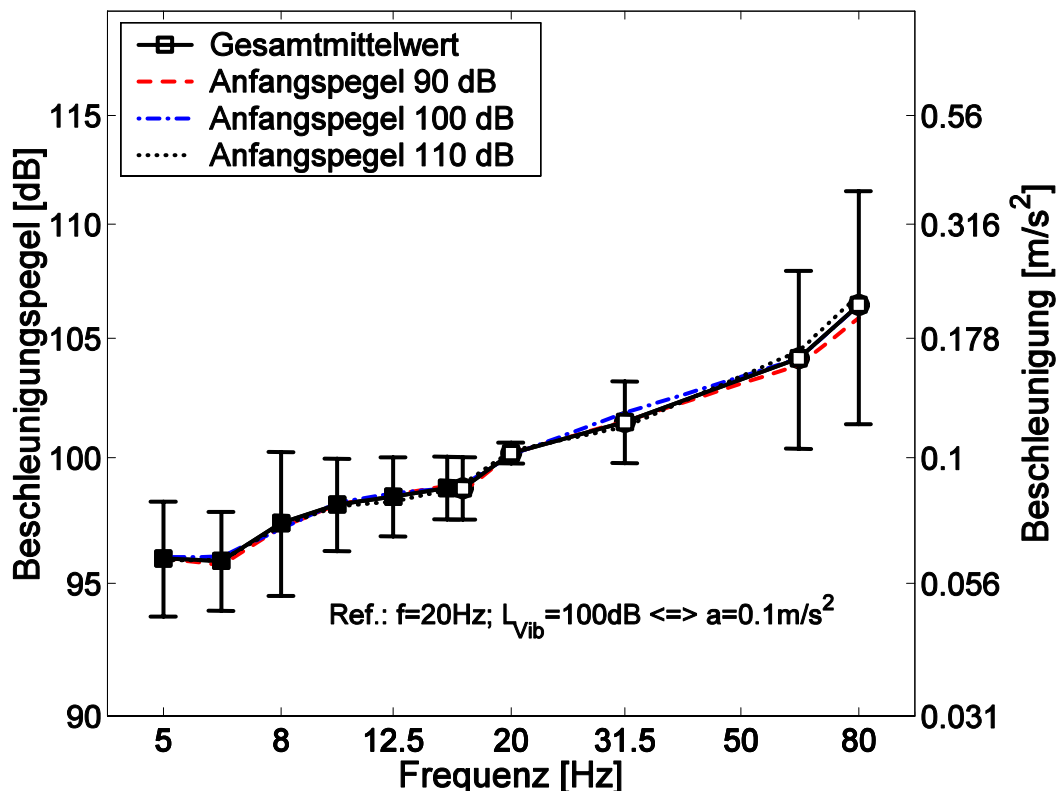


**Abbildung 3.3:** Die über sechs Versuchspersonen gemittelten (geschlossene Symbole) gerade wahrnehmbaren Unterschiede in der Frequenz (JNDFs) als Funktion der Referenzfrequenz  $f_R$  sind im Vergleich zu den individuellen Daten (offene Symbole) dargestellt. An die dargestellten interindividuellen Mittelwerten ist eine lineare Regressionsgerade angepasst worden.

### 3.4 Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung

Die Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung (KgV) wurde für 15 Versuchspersonen (drei weibliche und zwölf männliche) jeweils für drei unterschiedliche Anfangsbeschleunigungspegel der Teststimuli: 90, 100 und 110 dB gemessen. Die Anfangsschrittweite war 6 dB und halbierte sich bis zu einer Endschrittweite von 1,5 dB (gerade wahrnehmbarer Beschleunigungspegelunterschied, siehe Kapitel 3.2).

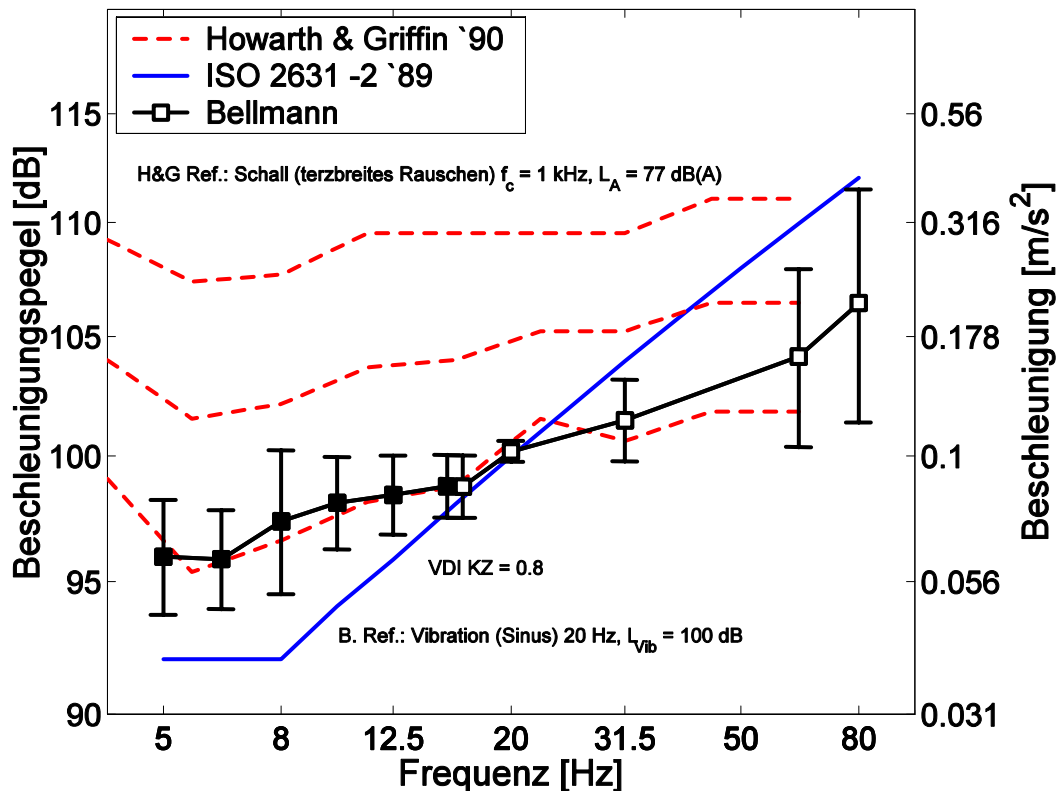
Die interindividuellen Mittelwerte der einzelnen Startkonditionen (15 Versuchspersonen à drei Wiederholungen = 45 Einzeldaten) sind im Vergleich zu den interindividuellen Mittelwerten inklusive Standardabweichung über alle drei Startpegel (15 Versuchspersonen à drei Wiederholungen für jeweils drei Startpegel = 135 Einzeldaten) in Abbildung 3.4 dargestellt. Offene Symbole kennzeichnen eine Expositionsdauer von 1000 ms und geschlossene Symbole 2000 ms. Der Referenzstimulus war eine 20 Hz Sinusschwingung mit einem Beschleunigungspegel von 100 dB ( $0,1 \text{ m/s}^2$ ). Die Unterschiede zwischen den vier dargestellten Kurven ist statistisch nicht signifikant ( $p < 0,01$ ). Die gemittelte Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung steigt frequenzabhängig von 96 dB bei 6,3 Hz mit ca. 2,3 dB pro Oktave stetig bis auf



**Abbildung 3.4:** Abgebildet sind die interindividuellen Mittelwerte mit Standardabweichungen für die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung gemittelt über alle Startkonditionen (Rechtecke), sowie die Daten der unterschiedlichen Startpegel (gestrichelte Linien).

106,5 dB bei 80 Hz an. Die sehr geringe Standardabweichung bei 20 Hz (Mittelwert = 100,2 dB) zeigt, dass der Vergleich 20 Hz Referenzstimulus mit 20 Hz Teststimulus sehr exakt von den Versuchspersonen durchgeführt wurde. Die besonders großen Standardabweichungen bei hohen Testfrequenzen resultiert aus der Tatsache, dass es interindividuell große Unterschiede zwischen den Versuchspersonen in der Beurteilung dieser Vibrationen gibt. So steigt die KgV bei einigen Versuchspersonen ab 20 Hz mit 5-6 dB pro Oktave an, hingegen andere Versuchspersonen stellten einen negativen Anstieg von 1 dB pro Oktave oder ab 20 Hz exakt den Referenzpegel von 100 dB ein (intraindividuelle Daten nicht in diesem Bericht dargestellt).

Zum Vergleich sind in Abbildung 3.5 die Daten aus bestehenden Normen (KZ = 0,8 Kurve gleicher Schwingstärke aus VDI 2057-2 bzw. identisch mit equivalent-comfort contour curve 8 aus ISO 2631-2) und aus aktuellen Literaturstudie dargestellt. Die standardisierte Kurve

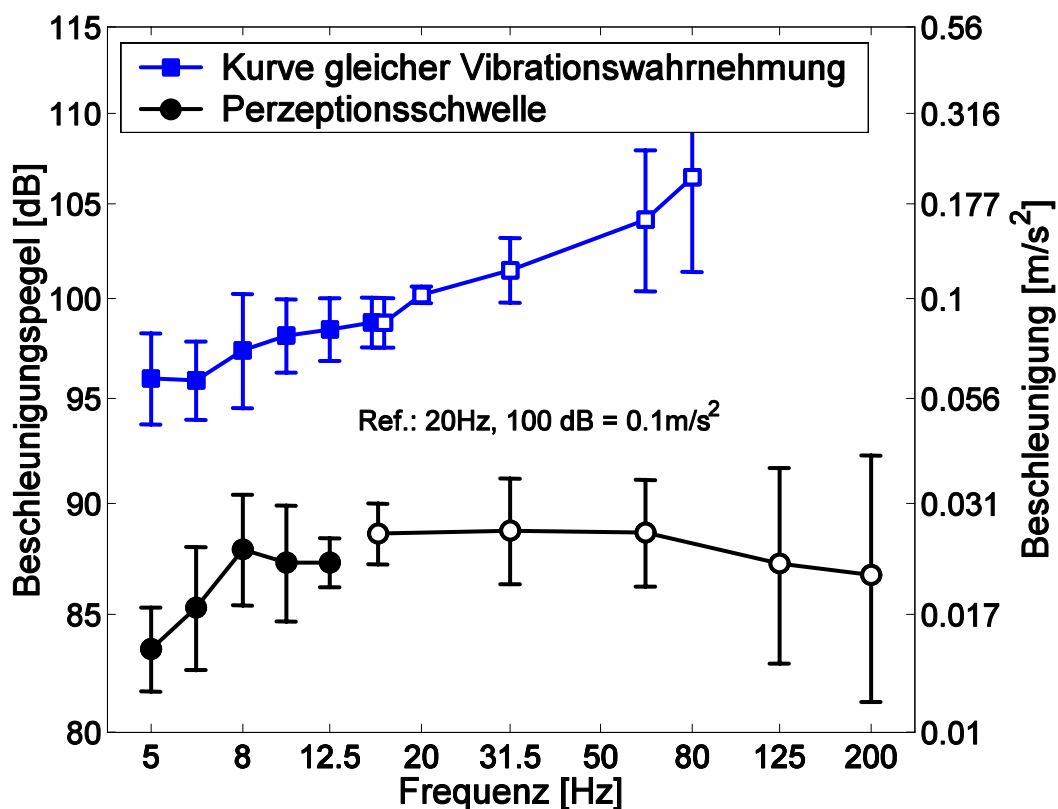


**Abbildung 3.5:** Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung dargestellt als interindividueller Mittelwert mit Standardabweichung im Vergleich zu Daten aus bestehenden Normen (KZ = 0,8 Kurve gleicher Schwingstärke aus VDI 2057-2 bzw. identisch mit equivalent-comfort contour curve = 8 aus ISO 2631-2). Zusätzlich sind Daten aus der Literatur (Howarth & Griffin, 1990) mit abgebildet, die jedoch mit einem akustischen Referenzstimulus bestimmt worden sind.

gleicher Schwingstärke mit einem KZ-Wert von 0,8 wurde zum Vergleich gewählt, da diese Kurve direkt durch den Referenzpunkt bei 20 Hz führt. Es zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Daten dieser Studie und der genormten Kurve gleicher Schwingstärke, die ab 8 Hz mit 6 dB pro Oktave stetig ansteigt und lediglich parallel zur standardisierten Perzeptionsschwelle verschoben ist.

In dem verwendeten Pegelbereich existieren keine direkt vergleichbaren Literaturdaten, sondern nur für höhere Pegel. Ähnliche Daten von Howarth & Griffin (1990) sind mit einem akustischen Referenzstimulus (terzbreites Rauschen mit Mittenfrequenz  $f_c = 1$  kHz und einem Pegel von 77 dB(A)) und einer anderen Messmethode (Magnitude Estimation von 50, 100 und 200 bezogen zum Referenzstimulus) erhoben worden, siehe Abbildung 3.5. Es zeigt sich eine über den gesamten Frequenzbereich weitgehende Übereinstimmung der Messdaten dieser Studie und der Daten von Howarth & Griffin, besonders für die 50er Kurve (unterste Kurve). Die Kurve mit der Größenschätzung 100 und 200 sind in etwa parallel zu höheren Beschleunigungspegel verschoben.

Die in dieser Studie gemessenen Perzeptionsschwelle und Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung mit den gleichen Probanden sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Es zeigt sich, dass



**Abbildung 3.6:** Perzeptionsschwellen und Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung im schwelennahen Bereich aus dieser Studie.

im Gegensatz zur konstanten Perzeptionsschwelle über einen weiten Frequenzbereich die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung schon bei geringen Beschleunigungspegelerhöhungen einen frequenzabhängigen Anstieg von 2,3 dB pro Oktave aufweist.

#### **4. Diskussion**

In dieser Studie wurden die gerade wahrnehmbaren Unterschiede im Beschleunigungspegel (JNDL) und in der Frequenz gemessen (Experiment 2 und 3). Die JNDLs weisen in dem Frequenzbereich von 5 bis 50 Hz eine geringfügige Feinstruktur auf, die wahrscheinlich auf die unterschiedlich sensitiven Mechano-Rezeptoren zurückzuführen ist. In Abbildung 3.2 sind die jeweiligen Frequenzbereiche der vier unterschiedlichen Mechano-Rezeptoren, die in unterschiedlichen, sich überlappenden, Frequenzbereichen ihre höchste Sensitivität besitzen, dargestellt: Typ SA I und II (slow adapting), RA (rapidly adapting) und PC (Pacini-Körner). Diese vier unterschiedlichen Sensoren reagieren nicht nur im Frequenzbereich unterschiedlich, sondern nehmen aus physiologischer Sicht auch unterschiedliche Reizparameter wahr: SA I und II reagieren vorwiegend auf Hautänderungen, d.h. auf die Deformation  $S$  (Weg), RA auf die Änderung der Deformation ( $dS/dt$  - Geschwindigkeit) und die PC auf die Änderung der Geschwindigkeit der Hautdeformation ( $d^2S/dt^2$  - Beschleunigung) (nach Schmidt & Thews, 1995). Um so erstaunlicher ist, dass die gerade wahrnehmbaren Pegelunterschiede im Frequenzbereich sich statistisch nicht signifikant unterscheiden ( $p < 0,05$ ). Im Vergleich mit Daten aus der Literatur (Morioka & Griffin, 2000), verkleinern sich die JNDLs geringfügig mit ansteigendem absolutem (Referenz-) Beschleunigungspegel. Die Daten sind zwar nicht eindeutig direkt miteinander vergleichbar, da unterschiedliche Punkte in der psychometrischen Funktion mit der jeweiligen Messmethode angesteuert worden sind (Morioka & Griffin 79,4 %; Bellmann et al. 70,7 %) und auch unterschiedliche Versuchspersonengruppen verwendet worden sind, doch ist die Tendenz zu geringeren JNDL mit steigendem Referenzpegel deutlich zu registrieren. Diese Tendenz ist beim menschlichen Gehör relative ähnlich. - Die JNDLs sind nahezu frequenzunabhängig und liegen im Bereich von 2 dB (SPL) nahe der auditorischen Ruhehörschwelle und fallen mit steigendem Pegel auf ca. 0,5 dB bei 100 dB (SPL) ab. – Zur endgültigen Klärung müssten unter direkt vergleichbaren Konditionen JNDLs für vertikale Ganzkörpervibrationen systematisch von der Perzeptionsschwelle bis zur „Schmerzgrenze“ gemessen werden. Nichtsdestotrotz, die Tatsache, dass der menschliche Körper vier unterschiedliche Mechano-Rezeptoren besitzt, die für die Vibrationswahrnehmung verantwortlich sind und auf unterschiedliche Stimulusparameter reagieren, ist für eine Modellierung der Vibrationsempfindung (Stichwort: Human Response to Vibration Model – HRVM) von entscheidender Wichtigkeit.

Die vorgestellten JNDFs (Experiment 3), weisen einen linearen Anstieg mit ansteigender Referenzfrequenz  $f_R$  von  $0,34 f_R - 1,25$  Hz auf. Jedoch ist zu vermerken, dass lediglich vier Referenzfrequenzen  $f_R$  verwendet worden sind und jeweils eine Referenzfrequenz einen anderen Mechano-Rezeptor Typ vorwiegend stimuliert. Es ist also im weiteren zu klären, ob es wirklich einen linearen Zusammenhang zwischen den JNDFs und der Referenzfrequenz gibt, oder die JNDFs abhängig von dem innervierten Mechano-Rezeptor Typ sind. Ein Vergleich zu Literaturdaten ist derzeit nicht möglich, da derzeit keine Literatur- oder Normdaten verfügbar sind. Ein Vergleich mit der Psychoakustik zeigt, dass das menschliche Ohr Frequenzunterschiede von 1 Hz unterhalb von  $f_R = 500$  Hz detektieren kann und oberhalb von  $f_R = 1$  kHz Unterschiede von  $0,002 f_R$ . Ob und in wie fern die JNDF beschleunigungspegelabhängig sind, ist derzeit ebenfalls nicht geklärt und müsste durch gezielte Pegeländerungen ermittelt werden.

Die Perzeptionsschwellen dieser Studie und auch anderer Autoren (Abbildung 3.1) zeigen erhebliche Unterschiede zu Daten aus bestehenden Normen (ISO 2631-2 und VDI 2057-2). Auch untereinander weisen die Literaturdaten z.T. erhebliche Unterschiede auf, die aber z.T. durch die verwendeten Messmethoden – z.B. Parsons & Griffin zeigen die niedrigste und höchste Perzeptionsschwelle – zurück zu führen sind (Griffin, 1991). Auch konnte in anderen Vor-Experimenten – in diesem Artikel nicht dargestellt (Bellmann, 2002) – gezeigt werden, dass zusätzliche Reize und diverse Versuchsaufbauparameter, wie z.B. emittierter Schall von dem verwendeten Vibrationsprüfstand, teilweise erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Ein weiterer Punkt bei den hier dargestellten Perzeptionsschwellen ist, dass die gemittelte Perzeptionsschwelle (über 17 Versuchspersonen) zu Frequenzen oberhalb von 100 Hz abfällt. Nicht dargestellte individuelle Daten zeigen, dass die Varianz zwischen Versuchspersonen sehr groß ist und deutlich unterschiedliche Steigungen (sowohl positive als auch negative) in den Perzeptionsschwellen oberhalb von 100 Hz zu messen sind. Ein Erklärungsansatz ist das Auftreten von Körperschall, der von den Füßen bzw. Kontaktstellen Mensch-Sitz auf das Skelett übertragen wird und ebenfalls den Kopf in Schwingung versetzt und somit Knochenleitungseffekte auftreten (Bellmann, 2002). Dafür spricht, dass in Bellmann (2002) Messungen des Luftschallpegels im Ohr von Versuchspersonen während der Messung der Perzeptionsschwellen durchgeführt wurden. Die Messungen ergaben, dass der Luftschallpegel deutlich unter den genormten und auch individuellen Ruhehörschwellen lagen. Messungen der Schädelschwingungen während der Perzeptionsschwellen sind derzeit sehr schwer, da keine geeigneten Sensoren verfügbar sind. Jedoch existieren Literaturdaten, die die frequenzabhängige Knochenleitung bei Menschen untersucht haben und zeigen konnten, dass die Knochenleitungsschwelle mit zunehmender Frequenz ( $< 1$  kHz) deutlich

abnimmt. Die erhobenen anthropometrischen Daten hingegen können die interindividuellen Unterschiede nicht erklären, wie eine statistische Analyse zeigte (Details siehe Bellmann, 2002). Aufgrund der großen Anzahl von unterschiedlichen Perzeptionsschwellen und Einflussparametern ist eine Revision der ISO 2631-2 in Arbeit, die vorsieht, die standardisierten Perzeptionsschwellen, nicht nur in z-Richtung, aus der Norm zu nehmen (ISO/FDIS 2631-2). Die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung wurde im schwelennahen Bereich mit der Referenz 20 Hz mit einem Beschleunigungspegel  $L_{\text{Vib}} = 100$  dB gemessen. Dies entspricht in etwa der Kurve gleicher Schwingstärke mit  $KZ = 0,8$  aus der VDI 2057-2. Die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung weist erhebliche Unterschiede in der Form zu der gemessenen Perzeptionsschwelle, obwohl die gleiche Versuchspersonengruppe und der gleiche Versuchsaufbau verwendet worden ist, Abbildung 3.6. Die Unterschiede in den beiden dargestellten Kurven werden mit zunehmender Frequenz größer und sind nicht mit frequenzabhängigen gerade wahrnehmbaren Unterschieden im Beschleunigungspegel (JNDL) erklärbar, Experiment 2, die frequenzunabhängig bei ca. 1,5 dB liegen (Abbildung 3.2). In der Literatur lassen sich keine vergleichbaren Experimenten für den schwelennahen Amplitudenbereich finden, jedoch existieren einige Daten für deutlich höhere Beschleunigungspegel (z.B. zusammengefasst in Griffin, 1991). Die Daten steigen bei hohem Pegel mit, im Schnitt, 6 dB pro Oktave zu höheren Frequenzen an. Dies entspricht dem Anstieg der Kurven gleicher Schwingstärke (VDI 2057-2) bzw. der „equivalent-comfort contours“ aus der noch bestehenden ISO 2631-2 (1989), die derzeit noch auf den bestehenden und genormten Perzeptionsschwellen basieren und lediglich mit einer Konstanten multipliziert wird. Die Ergebnisse der Perzeptionsschwelle und der Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung aus dieser Studie, sowie die Daten aus der Literatur für höhere Amplituden deuten auf eine nicht nur frequenzabhängige, sondern auch amplitudenabhängige Vibrationswahrnehmung des menschlichen Körpers hin. Daher ist im weiteren zu untersuchen, ob die frequenzabhängige Wichtungsfunktionen, wie sie in bestehenden Normen festgelegt sind, und die für die Berechnung einer gewichteten Beschleunigung bei breitbandiger Anregung verwendet werden soll, nicht auch amplitudenabhängig gestaltet werden müsste. D.h. amplitudenabhängige Filterfunktionen müssten definiert werden. Durch eine detaillierte Vermessung von Kurven gleicher Vibrationswahrnehmung von der Perzeptionsschwelle bis zur „Schmerzgrenze“ könnten basierend auf den Daten sinnesphysiologisch motivierte spektrale Wichtungsfunktionen erstellt werden, die ggf. das Vibrationsempfinden bei breitbandiger Vibrationsanregung besser beschreiben könnten, als die derzeitigen gewichteten Vibrationsparameter berechnet mit bestehenden Wichtungsfunktionen. Erste Ansätze zu diesem Thema sind in einer Studie von Bellmann (2002) für die Untersuchung von Sitzvibrationen im Fahrzeug untersucht worden. Es stellte

sich heraus, dass sinnesphysiologisch motivierte Vibrationsparameter – die mit spektral- und amplitudenabhängigen Wichtungsfunktionen berechnet worden sind – besser geeignet sind das subjektive Empfinden von Sitzvibrationen zu beschreiben als „nur“ spektral gewichtete und ungewichtete Parameter, die in bestehenden Normen spezifiziert sind.

## 5. Zusammenfassung

Diese Studie beschäftigt sich mit der Wahrnehmung von vertikalen Ganzkörpervibrationen für sitzende Versuchspersonen. Zur Durchführung der Experimente ist ein Vibrationsprüfstand, Vibration-Floor genannt, verwendet worden, der unter sinnesphysiologischen Aspekten an der Universität Oldenburg in Zusammenarbeit mit der ITAP GmbH entwickelt worden ist. Es sind vier grundlegende Experimente zu diesem Thema durchgeführt worden mit folgenden Ergebnissen:

- Es ergibt sich eine konstante Perzeptionsschwelle im Bereich 8 bis 63 Hz bei einem Beschleunigungspegel von 87 dB. Die Schwelle fällt zu 5 Hz bzw. 200 Hz auf 83 dB bzw. 85,8 dB ab. Die interindividuellen Unterschiede zwischen Versuchspersonen steigt mit zunehmender Frequenz deutlich an.
- Die gemessenen gerade wahrnehmbaren Unterschiede im Beschleunigungspegel (JNDL) sind frequenzunabhängig im Bereich von 5 bis 50 Hz und betragen 1,5 dB. Die geringfügige Feinstruktur in den Ergebnissen sind statistisch nicht signifikant ( $p < 0,05$ ).
- Die gerade wahrnehmbaren Unterschiede in der Frequenz (JNDF) steigen mit zunehmender Referenzfrequenz  $f_R$  von 0,4 Hz bei  $f_R = 5$  Hz auf 12,3 Hz bei  $f_R = 40$  Hz an. An die gemittelten Daten über sechs Versuchspersonen lässt sich eine lineare Regression anfitzen (Pearson  $r = 0,998$ ).
- Im Gegensatz zu den Perzeptionsschwellen steigt die ermittelte Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung konstant mit 2,3 dB pro Oktave ab 6.3 Hz an. Der Referenzreiz für dieses Experiment ist eine 20 Hz Sinusvibration mit einem Beschleunigungspegel von 100 dB ( $0,1 \text{ m/s}^2$ ). – Dies entspricht einer Kurve gleicher Schwingstärke  $KZ = 0,8$  nach VDI 2057-2.
- Obwohl die Kurve gleicher Vibrationswahrnehmung lediglich 10 bis 15 dB oberhalb der Perzeptionsschwelle gemessen worden ist, zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Messkurven. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe sind nicht mit frequenzabhängigen gerade wahrnehmbaren Unterschieden im Amplitudenbereich zu erklären.

## 6. Literatur

- [1] Bellmann, M.A. „*Perception of Whole-Body Vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger`s comfort inside vehicles*“, Dissertation an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Shaker Verlag, Aachen, **2002**
- [2] Garrow, J.S. & Webster, J. „Quetelet`s index as a measure of fatness“, *Int. Journal of Obesity* **9**, pp. 147-153, **1985**
- [3] Griffin, M. J. „*Handbook of human vibration*“, Academic Press, New York, **1991**
- [4] Howarth, H.V.C. & Griffin, J.M., „The frequency dependence of subjective reaction to vertical and horizontal whole-body vibration at low magnitudes“, *J. Acoust. Soc. Am.* 83 (4), pp. 1406-1413, **1988**
- [5] ISO 10326 Part 1 „Mechanical Vibration - Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration - Part 1: Basic requirements“, *International Organisation for Standardisation*, Geneva, **1992**
- [6] ISO 2631-1 Part 1 „Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements“, *International Organisation for Standardisation*, Geneva, **1997**
- [7] ISO 2631-2 Part 2 „Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80)“, *International Organisation for Standardisation*, Geneva, **1989**
- [8] ISO 8727 „Mechanical Vibration and Shock - Human exposure - Biodynamic coordinate system“, *International Organisation for Standardisation*, Geneva, **1997**
- [9] ISO/FDIS 2631 Part 2 „Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)“, *International Organisation for Standardisation*, Geneva, **2002**
- [10] Levitt, H. „Transformed up-down procedures in psychoacoustics“, *J. Acoust. Soc. Am.* 49, pp. 467-477, **1971**
- [11] Meloni, T.M. „*Wahrnehmung und Empfindung von komplexen, kombinierten Belastungen durch Vibration und Schall*“, Dissertation an der ETH Zürich, Zürich, **1991**
- [12] Morioka, M. & Griffin, J.M., „Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration: Effect of frequency and magnitude“, *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (1), pp. 620 - 624, **2000**
- [13] Parsons, K.C. & Griffin, M.J. „Whole-body vibration perception thresholds“, *J. Sound Vib.* 121 (2), **1988**

- [14] Reckhardt, C., Mellert, V. and Kollmeier, B., "Quantifizierung der Einflussgrößen bei der Bestimmung von Isophonen", in: *Fortschritte der Akustik*, DAGA 98, pp. 450-451, **1998**
- [15] Schmidt, R.F. & Thews, G. „*Physiologie des Menschen*“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, **1995**
- [16] VDI 2057 Blatt 1 „Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Blatt 1: Grundlagen, Gliederung, Begriffe“, *Verein Deutscher Ingenieure*, **1987**
- [17] VDI 2057 Blatt 2 „Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Blatt 2: Bewertung“, *Verein Deutscher Ingenieure*, **1987**
- [18] VDI 2057 Blatt 3 „Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Blatt 3: Beurteilung“, *Verein Deutscher Ingenieure*, **1986**
- [19] VDI 2057 Blatt 4 „Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Blatt 4: Messung und Beurteilung von Arbeitsplätzen in Gebäuden“, *Verein Deutscher Ingenieure*, **1987**
- [20] Zwicker, E. & Fastl, H. "*Psychoacoustics - Facts and Models*", Berlin: Springer-Verlag, **1999**