

## **Vergleich der Schwingungsbewertung von Ganzkörper-Schwingungen gemäß VDI 2057 mit einer kraftbezogenen Bewertung anhand der Expositionsdaten einer epidemiologischen Studie**

### **Comparison of the whole-body vibration evaluation according to VDI 2057 with a force-related evaluation by means of the exposure data recorded in an epidemiological study**

Prof. Dr.-Ing. **M. Fritz**, Dipl.-Biol. **O. Geiß**, IfADO, Dortmund;  
Dr.-Ing. **S. Fischer**, BGIA, Sankt Augustin

#### **Kurzfassung**

In der Richtlinie VDI 2057 wird ein Verfahren zur Beurteilung der Belastung des Menschen durch Ganzkörper-Schwingungen angegeben. Die hierbei verwendeten Bewertungsfaktoren beruhen auf der Schwingungsempfindung. Während ein Zusammenhang zwischen der Schwingungsempfindung und den akuten Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und der Leistung nahe liegt, scheint der Zusammenhang mit den degenerativen Veränderungen in der Lendenwirbelsäule, welche durch die schwingungsinduzierten Wirbelsäulenkräfte hervorgerufen werden, eher gering zu sein. Ziel der vorliegenden Studie ist es, im Rahmen einer Reanalyse epidemiologischer Daten die gesundheitlichen Auswirkungen durch kraftbezogene Schwingungskennwerte adäquat abzubilden.

Von den untersuchten Fahrern wurden die Expositionszeiten und die Schwingungsbelastungen in Form der Bewerteten Schwingstärke bzw. der Beurteilungs-Schwingstärke ermittelt. Aus den Schwingstärken wurden mittels fahrzeugtypischen Korrekturfaktoren kraftbezogene Schwingungskennwerte berechnet.

Für die 388 Fahrer wurden insgesamt 1480 Berufsabschnitte mit einer durchschnittlichen Dauer von 5,1 Jahren ermittelt. In den Berufsabschnitten betrug die Beurteilungs-Schwingstärke zwischen 0,4 und 38,1. In 17 % der Abschnitte lag sie oberhalb von 16,2, was bedeutet, dass hier eine Gesundheitsgefährdung gegeben ist. Die entsprechenden kraftbezogenen Schwingungskennwerte variierten zwischen 0,02 und 1,88 m/s<sup>2</sup>. Unter der Annahme, dass beide Schwingungsbewertungen das Risiko anzeigen, müsste der kraftbezogene Schwellenwert 0,77 m/s<sup>2</sup> betragen. Dieser Wert ist anhand der gesundheitsbezogenen Daten zu überprüfen.

## Summary

In the guideline VDI 2057 from 1987 or 2002 frequency weighting methods are described in order to evaluate whole-body vibrations. The corresponding frequency-dependent weighting factors were derived from the human vibration sensation. Obviously a relationship exists between the vibration sensation and acute impairments of the well-being and the performance during the vibration exposure. Concerning the degenerative disorders of the lumbar spine it must be assumed that the vibration induced cyclic forces, acting in the lumbar spine, trigger the pathogenesis. Thus the aims of the present study are to carry out a force-related weighting of the vibration data recorded during the former epidemiological study and to compare the new characteristic vibration values with the evaluation values 'Beurteilungs-Schwingstärke' according to VDI 2057 [29].

During the epidemiological study carried out from 1990 to 1996 in order to assess the health impairments induced by whole-body vibration the following data were recorded:

- vibration stress in form of the 'Bewertete Schwingstärke' and the 'Beurteilungs-Schwingstärke' [28, 29].
- the history of all exposure conditions
- medical examinations by lumbar X-ray

The data were analysed in relation to the vehicles, the vibration stress, and the exposure duration. Assuming a relationship between the forces in the spine and the impairments the measured values of the 'Bewertete Schwingstärke' were transformed into the so-called force-related vibration values. Roughly spoken the force-related vibration values are given by the quotient between the cyclic spine forces and the drivers' mass. So in contrast to the dimensionless 'Bewertete Schwingstärke' the dimension of the force-related vibration value is  $m/s^2$  like the dimension of the frequency-weighted acceleration. The values were transformed by means of an exponential function derived by Fritz et al. [14]. The input of this function are the median frequencies which are used as characteristic values of the frequency spectra of the vertical seat vibrations measured on the different vehicles.

For the 388 drivers, participating in the epidemiological study, 1480 professional phases with a duration of 5.1 years on average were recorded. During 1419 professional phases only one type of vehicle was used for carrying out the work, whereas during 58 professional phases two or three vehicles were used by turns. Finally, for three professional phases no vibration data were given. In each of the professional phases the assessment value 'Beurteilungs-Schwingstärke' was computed on the basis of a daily vibration of 8 h. The range of the 'Beurteilungs-Schwingstärke' reached from 0.4 to 38.1. For 50 % of the phases the 'Beurteilungs-Schwingstärke' was greater than 10.5 and for 17 % the value was even higher

than 16.2. In the event that the regular exposure to this daily dose is maintained for years on end a marked health risk obviously exists for the concerned drivers.

The corresponding force-related assessment values varied from 0.02 to 1.88 m/s<sup>2</sup>; the median value was 0.47 m/s<sup>2</sup>. In analogy to the 'Beurteilungs-Schwingstärke' during 17 % of the professional phases the force-related assessment value was higher than 0.77 m/s<sup>2</sup>. Assuming that both assessment values indicate the same vibration induced health risk, the force-related guidance value should be set to 0.77 m/s<sup>2</sup>. However, a discrepancy exists between this value and the force-related guidance value derived by Fritz et al. [13] on the basis of mechanical strength theories. This value amounts to 0.81 m/s<sup>2</sup>.

Regarding only the vibration exposure data no decision can be made to obtain an optimal force-related guidance value which makes a realistic assessment of the health risk possible. In order to attain this at first the medical data of the 388 drivers must be evaluated. Then the relationship between these data and the force-related assessment values must be analysed.

## 1. Allgemeines

Im täglichen Leben, insbesondere aber während der Arbeit, sind Ganzkörper-Schwingungen ein weit verbreiteter Belastungsfaktor. Die Schwingungsbelastung bleibt jedoch nicht ohne Auswirkungen auf den menschlichen Körper. So sind schon während der Exposition akute Reaktionen wie Unbehagen oder Verringerung der Leistungsfähigkeit möglich. Bei Langzeitexpositionen konnte ein erhöhtes Risiko für chronische Gesundheitsbeeinträchtigungen aufgezeigt werden [z.B. 3, 7, 23, 25]. Hauptsächlich betroffen sind dann die Lendenwirbelsäule und das mit ihr verbundene Nervensystem.

Sowohl die akuten Reaktionen des Körpers als auch die chronischen Erkrankungen führen zu erhöhten Produktionskosten und zu Folgekosten bei Aufgabe der schwingungsbelastenden Tätigkeit durch die erkrankte Person. Zur Reduzierung der Kosten und des Gesundheitsrisikos ist es daher sinnvoll, die Intensität oder die Dauer der Schwingungsbelastung zu verringern. Erprobte Maßnahmen zur Verringerung der Schwingungsbelastung sind in der Richtlinie VDI 3831 [27] beschrieben. Um den Erfolg der durchgeführten Maßnahmen beurteilen zu können, wird ein einheitliches Maß für die Schwingungsbelastung benötigt.

In der Richtlinie VDI 2057, Blatt 1 [30] und in ISO 2631-1 [16] wird ein Verfahren beschrieben, mit dem für gegebene Schwingungsbelastungen ein nur aus einer Zahl bestehender Kennwert ermittelt wird. Hierzu wird der gemessene Zeitverlauf der Schwingbeschleunigung zunächst in einzelne Frequenzanteile zerlegt. Die Amplituden der Frequenzanteile werden mit Bewertungsfaktoren multipliziert. Aus den partiellen frequenzbewerteten Beschleunigung-

gen wird durch eine energieäquivalente Mittelwertbildung der Kennwert für die Schwingungsbelastung berechnet.

Durch die Bewertungsfaktoren sollen die Auswirkungen der Schwingungsbelastung auf den Menschen berücksichtigt werden. Die Faktoren wurden hergeleitet anhand der Schwingungsempfindung des Menschen [20, 26]. Es ist naheliegend, dass zwischen den schwingungsbedingten Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit auf der einen Seite und der Schwingungsempfindung auf der anderen Seite ein enger Zusammenhang besteht. Weniger wahrscheinlich ist dagegen ein Zusammenhang zwischen der Schwingungsempfindung und den bandscheibenbedingten Erkrankungen in der Lendenwirbelsäule. Die Bandscheiben und auch die Wirbel der Lendenwirbelsäule werden nicht vom Nervensystem innerviert.

Tätigkeiten, bei denen häufig und regelmäßig Lasten gehoben und getragen werden oder die in gebeugter Körperhaltung durchgeführt werden, können nach mehreren Berufsjahren bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule hervorrufen [z.B. 1, 19]. In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass die Entstehung der bandscheibenbedingten Erkrankungen primär durch die in der Lendenwirbelsäule übertragenen Druckkräfte ausgelöst wird [z.B. 4, 15, 18]. Zu Schädigungen können sehr hohe Spitzenkräfte aber auch das wiederholte Auftreten von weniger hohen Druckkräften führen. Die durch das Handhaben von Lasten hervorgerufenen Erkrankungen betreffen das gleiche Zielorgan wie die chronischen Erkrankungen bei Belastung durch Ganzkörper-Schwingungen. Es ist daher anzunehmen, dass auch bei Schwingungsbelastung die Entstehung der bandscheibenbedingten Erkrankungen durch die in der Lendenwirbelsäule wirkenden Druckkräfte ausgelöst wird. So schreibt Seidel [24] „...dass der wahrscheinliche Schadensmechanismus bei Exposition gegenüber Ganzkörper-Schwingungen in Längsrichtung des Oberkörpers in einer Deckplattenschädigung durch Ermüdungsfraktur mit nachfolgenden degenerativen Veränderungen der Bandscheiben und anderer Strukturen besteht. Diese Annahme gründet sich allerdings auf in-vitro-Experimente und nicht auf nachgewiesene Frühsymptome. Das Schadenspotential des angenommenen Mechanismus wird vor allem durch Anzahl und Intensität der Spitzenwerte der auf die Wirbelkörper einwirkenden Kräfte und weniger durch deren zeitlichen Mittelwert bestimmt“.

Anstatt also zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos durch Ganzkörper-Schwingungen gemäß VDI 2057, Blatt 1 [30] oder ISO 2631-1 [16] eine Schwingungskenngröße zu nutzen, die auf der Schwingungsempfindung basiert, scheint es erfolgversprechender zu sein, hierbei die in der Lendenwirbelsäule wirkenden Kräfte zu berücksichtigen. Im internationalen Standard ISO 2631-5 [17], der zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos bei stoßhaltigen Ganz-

körper-Schwingungen erarbeitet wurde, wird das Risiko anhand der Kräfte in der Wirbelsäule ermittelt. Auch Seidel und seine Mitarbeiter von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung (BAuA) gehen davon aus, dass die schwingungsbedingten Kräfte in der Wirbelsäule die Entstehung der degenerativen Wirbelsäulenerkrankungen auslösen. Da es kaum möglich ist, die Wirbelsäulenkräfte während der Schwingungsbelastung zu messen, wurden im Auftrage der BAuA sehr aufwendige biomechanische Modelle zur Simulation des schwingungsbelasteten Menschen entwickelt [5, 21]. Mit dem von Fritz am Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund (IfADo) entwickelten biomechanischen Modell können die Übertragungsfunktionen zwischen den Kräften in der Lendenwirbelsäule und der Schwingbeschleunigung für Schwingungsbelastungen des stehenden und sitzenden Menschen ermittelt werden [8, 9, 11]. Anhand der Übertragungsfunktionen berechneten Fritz et al. [12, 13] sogenannte kraftbezogene Bewertungsfaktoren. Im Hinblick auf die Berufskrankheit BK 2110 [2], die vorwiegend durch vertikale Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen verursacht wird, haben Fritz et al. die neuen Bewertungsfaktoren nur für diese Schwingungsrichtung ermittelt. Die Faktoren sind abhängig von der Schwingfrequenz und erreichen für Frequenzen im Bereich der Resonanzfrequenz des menschlichen Körpers ihre höchsten Werte. Die kraftbezogenen Bewertungsfaktoren sind geeignet, die in VDI 2057, Blatt 1 [30] oder in ISO 2631-1 [16] verwendeten Faktoren zu ersetzen und somit statt der Bewerteten Schwingstärke oder der frequenzbewerteten Beschleunigung einen kraftbezogenen Schwingungskennwert zu ermitteln.

Sollen bei der Reanalyse von Schwingungsdaten auch die Kräfte in der Wirbelsäule berücksichtigt werden, so stößt man häufig auf die Schwierigkeit, dass die Schwingungsbelastung nur in Form der Schwingungskennwerte erfasst wurde. Dies war auch der Fall bei der epidemiologischen Studie, die in den Jahren zwischen 1990 und 1996 von Schwarze et al. [23] durchgeführt wurden. Im Rahmen dieser Studie wurden die Expositionszeiten von 388 Fahrern, die entsprechenden Schwingungsbelastungen in Form der Bewerteten Schwingstärke und der Beurteilungs-Schwingstärke sowie klinische Daten erhoben. Ziel der hier vorliegenden Studie ist es nun, exemplarisch die Daten der Studie von Schwarze et al. einer erneuten Analyse zu unterziehen und dabei für die Schwingungsbelastung kraftbezogene Kennwerte zu berechnen.

## 2. Methoden

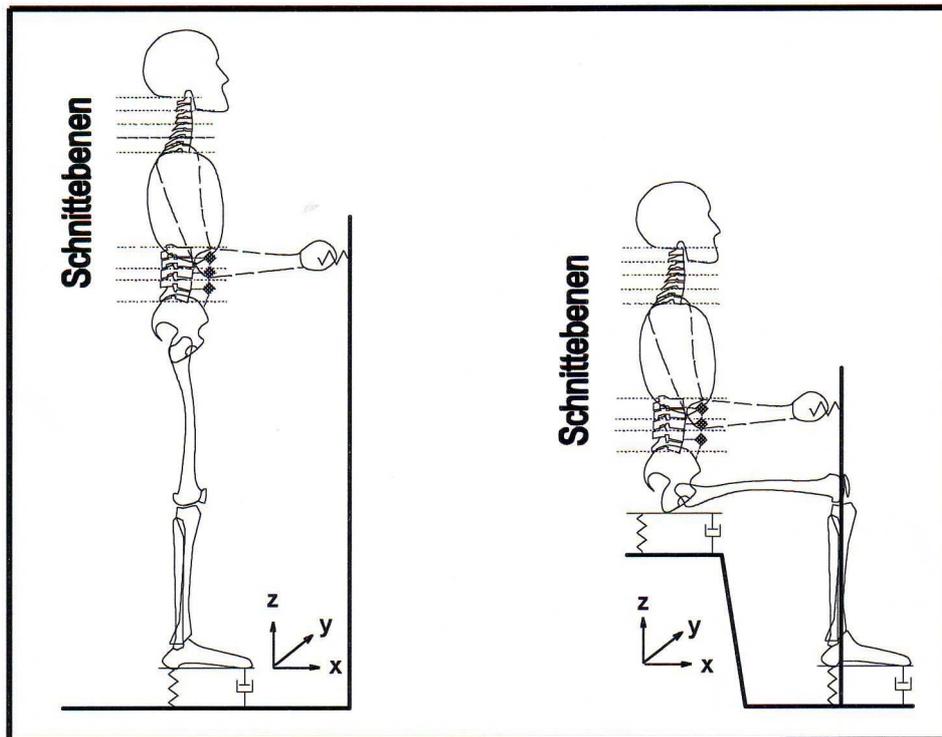
Die kraftbezogenen Bewertungsfaktoren wurden mit Hilfe des biomechanischen Modells von Fritz [8] hergeleitet. Um ein besseres Verständnis der Kraftbewertung zu erreichen, ist es sinnvoll, zunächst die wichtigsten Elemente des biomechanischen Modells und der Herlei-

tung der neuen Bewertungsfaktoren zu beschreiben. Im Anschluss daran werden die Methoden beschrieben, die bei der Reanalyse angewandt wurden.

### **2.1. Aufbau des biomechanischen Modells des Menschen**

In dem Modell werden Kopf, Rumpf, Bauchraum sowie Arme und Beine durch insgesamt 27, mechanisch gesehen, starre Körper nachgebildet (Bild 1). Ein weiterer Körper repräsentiert die schwingende Umgebung des Menschen, also Boden, Sitz und Stellteile. Die Modellkörper sind durch ideale Gelenke miteinander verbunden, so dass sich die Körper in den drei Richtungen des Raumes gegeneinander verdrehen aber auch verschieben können. In den Gelenken werden Kräfte und Momente übertragen.

Wie in Bild 1 durch die Schnittebenen angedeutet ist, wird die Lendenwirbelsäule durch drei Körper und die Halswirbelsäule durch vier Körper nachgebildet. Den eingeschränkten Torsionsbewegungen der Lendenwirbelsäule entsprechend sind zwischen den Körpern für die Lendenwirbelsäule nur Verschiebungen in den drei Koordinatenrichtungen und Drehungen um die beiden horizontalen Achsen zugelassen. Der Zusammenhang zwischen den Kräften bzw. Momenten und den Bewegungen in den Gelenken wird durch sogenannte Steifigkeitsmatrizen, welche von Panjabi et al. [22] ermittelt wurden, beschrieben. Hieraus ergibt sich, dass mit Zunahme der schwingungsbedingten Bewegungen des Rumpfes die Kräfte bzw. Momente in der Lendenwirbelsäule größer werden.



**Bild 1:** Biomechanisches Modell in stehender und sitzender Körperhaltung; schematische Darstellung des Skeletts von Rumpf, Hals, Kopf und Beinen sowie der Arme und der Baucheingeweide ( ♦ ); die gestrichelten Linien deuten die neun Schnittebenen zwischen den starren Körpern der Wirbelsäule an [10].

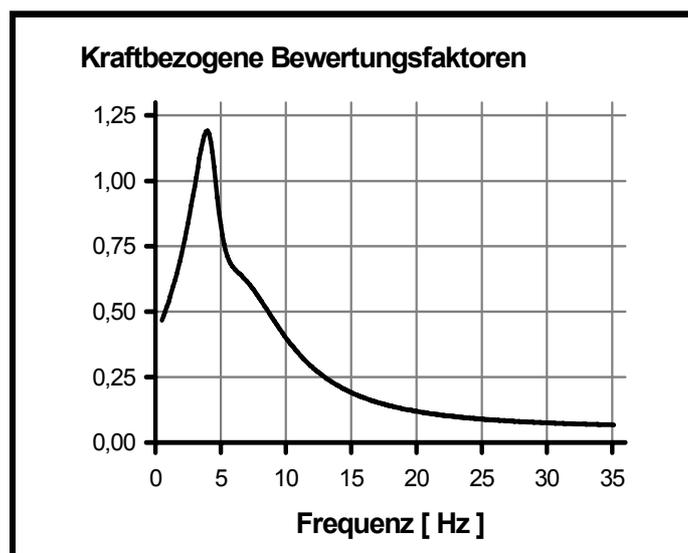
Zwischen den starren Körpern sind 106 sogenannte Kraftelemente gespannt, welche die Funktionen von Rumpf-, Hals- und Beinmuskeln simulieren. Ausgehend von der begründeten Annahme, dass nur bei sehr tieffrequenten Schwingungen die Muskeln die Bewegungen aktiv beeinflussen können, sind die Kraftelemente als rein passive Elemente ausgelegt. Bei Dehnung erzeugen sie eine Kraft, die entgegengesetzt der Dehnung gerichtet ist. Dies bedeutet, dass durch die Kraftelemente die schwingungsbedingten Bewegungen des Körpers vermindert, aber nicht verhindert werden.

## 2.2. Übertragungsfunktion und Bewertungsfaktoren

Mit einer Übertragungsfunktion wird der Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal eines Systems, in diesem Fall des Menschen, und seinem Ausgangssignal bzw. seiner Reaktion beschrieben. Zur Herleitung der kraftbezogenen Bewertungsfaktoren wurde die Übertragungsfunktion zwischen der Schwingbeschleunigung auf dem Sitz und der Druckkraft in der Lendenwirbelsäule ermittelt. Als Bezugspunkt für die Druckkraft wurde die Bandscheibe des Bewegungssegmentes aus drittem und viertem Lendenwirbel gewählt. Der Vorteil bei diesem

Bewegungssegment ist dadurch gegeben, dass die Druckkraft nahezu die gleiche Richtung hat wie die vertikale Schwingbeschleunigung. Hierdurch ist die Druckkraft deutlich höher als die horizontal wirkende Scherkraft und bildet somit ein wesentliches Gesundheitsrisiko.

Beim Menschen sowie auch im Modell ist die Höhe der Druckkraft abhängig von der Masse der Körpersegmente, auf die über die Wirbelsäule die Schwingungen übertragen werden. Um von den mitschwingenden Massen betragsmäßig unabhängig zu sein, wurden die Bewertungsfaktoren durch eine Bezugsmasse dividiert und damit normiert. Die Bezugsmasse ist die Summe der Massen von Rumpf, Hals, Kopf und Armen und entspricht der Masse, die vom Sitz abgestützt wird. Durch die Division erhält man eine dimensionslose Größe, die nur noch von der Schwingfrequenz abhängig ist (Bild 2), [12, 13]. Die kraftbezogene Bewertungsfunktion kann analog zu den Bewertungsfunktionen in VDI 2057, Blatt 1 [30] zur Bewertung der vertikalen Schwingungsbelastung herangezogen werden und ermöglicht die Berechnung einer kraftbezogenen Schwingungskenngröße  $a_{Fz}$  für die sitzende Körperhaltung.



**Bild 2:** Kraftbezogene Bewertungsfaktoren, abgeleitet aus den zyklischen Druckkräften im Bewegungssegment L3-L4 bei sitzender Körperhaltung und vertikaler Schwingungsbelastung [12].

### 2.3. Reanalyse der Daten der epidemiologischen Studie

Im Rahmen der epidemiologischen Längsschnittstudie zur Auswirkung von Ganzkörperschwingungen wurden im Zeitraum von 1990 – 1996 an insgesamt 388 schwingungsbelasteten Fahrern unter anderem folgende Daten erhoben [23]:

- energieäquivalente Mittelwerte der Bewerteten Schwingstärke in horizontaler und vertikaler Richtung für jedes genutzte Fahrzeug
- Dauer des Berufslebens für jeden exponierten Fahrer
- Anzahl und Dauer der Berufsabschnitte mit gleichbleibender Schwingungsbelastung
- Berufsabschnitte mit alternierender Nutzung mehrerer Fahrzeuge
- tägliche Dauer der Schwingungsbelastung.

Für die Umrechnung der Bewerteten Schwingstärke  $KZ_{eq}$  in die kraftbezogene Kenngröße  $a_{Fz}$  war es notwendig, für jeden vorkommenden Gerätetyp eine typische Medianfrequenz zu ermitteln. Zunächst konnten die Schwingungsdaten durch Daten der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{wz}$  ergänzt werden. Aus dem Verhältnis zwischen der Bewerteten Schwingstärke  $KZ_{eq}$  und der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{wz}$  ließ sich mit Hilfe der von Fritz et al. [14] berechneten exponentiellen Regressionsfunktionen für jedes Fahrzeug eine Medianfrequenz herleiten. Wurden alle ermittelten Medianfrequenzen miteinander und mit Angaben in der Literatur [z.B. 6] verglichen, so konnte für jeden in der Studie vorkommenden Gerätetyp eine typische Medianfrequenz festgelegt werden. Mit diesen Medianfrequenzen und einer weiteren Regressionsfunktion von Fritz et al. wurden dann die Bewerteten Schwingstärken  $KZ_{eq}$  in kraftbezogene Schwingungskenngrößen  $a_{Fz}$  umgerechnet. Zur einheitlichen Schwingungsbeurteilung werden gemäß VDI 2057, Blatt 3 [29] individuelle Belastungsangaben wie Bewertete Schwingstärke  $KZ_{eq}$  auf eine tägliche Belastungsdauer von 8 h umgerechnet. In gleicher Weise wurden unter Anwendung der Gleichung 4 in VDI 2057, Blatt 1 [30] aus den kraftbezogenen Schwingungskenngrößen  $a_{Fz}$  kraftbezogene Beurteilungsgrößen berechnet:

$$a_{Fz(8)} = a_{Fz} \sqrt{T_e / T_0}$$

### 3. Ergebnisse

Wie beschrieben, wurden die Bewerteten Schwingstärken in kraftbezogene Schwingungskenngrößen umgerechnet. Keine Umrechnung musste für die Expositionszeiten durchgeführt werden. Diese Daten wurden nur mittels deskriptiver Statistik analysiert. Ausgewählte Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

#### 3.1. Expositionszeiten

Die Gesamtdauer der beruflichen Schwingungsbelastung der 388 untersuchten Fahrer variierte von wenigen Monaten bis zu 42 Jahren. Ein geringer Anteil der Fahrer, nämlich nur

3,2 %, war weniger als 5 Jahre schwingungsbelastet. Der Median für die schwingungsexponierten Jahre lag bei 19,3 Jahren.

Bei den meisten untersuchten Personen (358 von 388) teilte sich die gesamte berufliche Schwingungsbelastung auf mehrere Berufsabschnitte mit gleichbleibender Schwingungsbelastung auf. Gemäß den erhobenen Expositionsdaten konnte ein neuer Berufsabschnitt z.B. verbunden sein mit einer neuen Tätigkeit oder dem Wechsel des Fahrzeuges, was aufgrund von Modernisierung häufig mit einer geringeren Schwingungsbelastung verbunden war. Bei 161 Fahrern erstreckte sich die gesamte erfasste Berufsdauer auf zwei oder drei Berufsabschnitte. Nur ein geringer Anteil der Fahrer hat zwischen 7 und 10 Berufsabschnitte vorzuweisen. Für insgesamt 30 Personen ergab sich kein beruflicher Tätigkeitswechsel. Schließlich fehlten bei 3 Personen für jeweils einen Berufsabschnitt jegliche Angaben zu möglichen Schwingungsbelastungen.

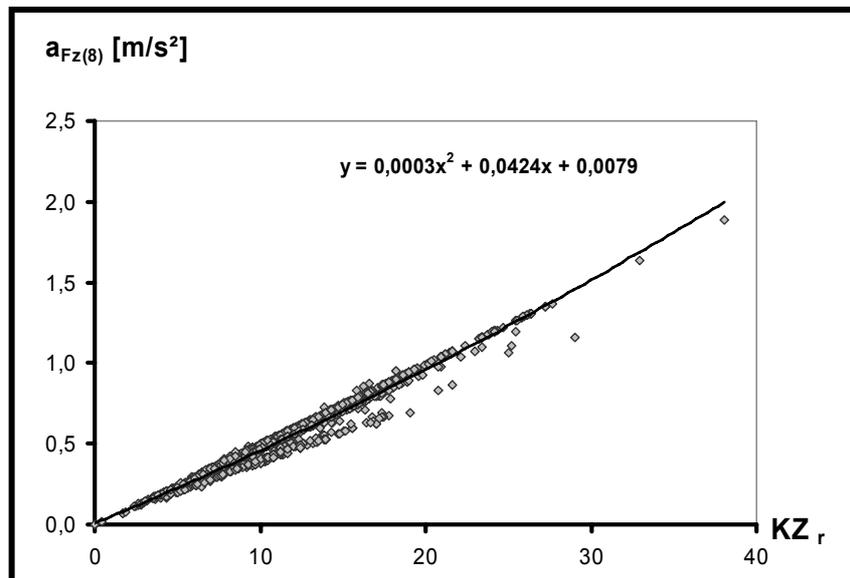
Die Dauer der insgesamt 1480 Berufsabschnitte mit gleichbleibender Schwingungsbelastung war nicht für alle Berufsabschnitte gleich lang. Die überwiegende Anzahl der Berufsabschnitte dauert maximal 5 Jahre. Allerdings überschritten 2 Fahrer mit nur einem Berufsabschnitt eine 30-jährige Tätigkeitsdauer.

### 3.2. Beurteilungs-Schwingstärke und kraftbezogene Beurteilungsgröße

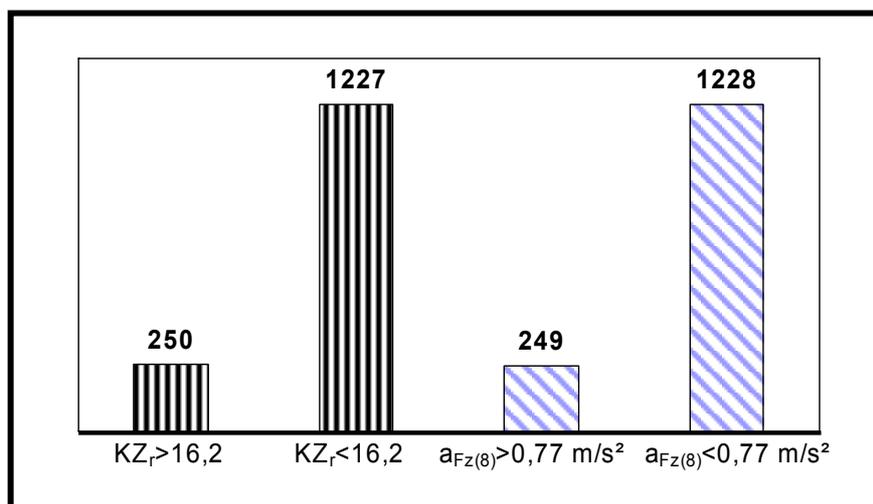
Die Berechnung der Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  erfolgte für alle Berufsabschnitte. Bild 3 zeigt, dass ein gering ausgebildeter nicht-linearer Zusammenhang zwischen den beiden Beurteilungsgrößen besteht. Tendenziell steigt mit zunehmender Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$ , auch die kraftbezogene Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  an. Die Streuung ergibt sich u.a. dadurch, dass gleiche Beurteilungs-Schwingstärken  $KZ_r$  von unterschiedlichen Fahrzeugen mit ebenfalls unterschiedlichen Medianfrequenzen erreicht werden können.

In den Berufsabschnitten, in denen jeweils nur ein Fahrzeug genutzt wurde, erreicht die Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  Werte zwischen 0,4 und 38,1. Für die 58 Berufsabschnitte, in denen alternierend zwei oder drei Fahrzeuge genutzt wurden, enthielten die Originaldaten nur einen Summenwert für die Schwingstärke, so dass kein direkter Bezug zu den eingesetzten Fahrzeugen möglich war. Der höchste Wert der Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  wurde in den Berufsabschnitten erreicht, in denen ein Muldenkipper eingesetzt wurde. Ein minimaler Wert wurde dagegen beim Autokran erhoben. Der Medianwert für die Verteilung der Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  lag bei 10,5.

Die berechneten Werte für die kraftbezogene Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  betragen zwischen 0,02 und 1,88  $m/s^2$ . Der maximale und der minimale Wert wurden auch bei dieser Bewertung für den Muldenkipper bzw. den Autokran ermittelt. Der Medianwert für die Verteilung der kraftbezogenen Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  lag bei 0,47  $m/s^2$ .



**Bild 3:** Zusammenhang zwischen Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  und kraftbezogener Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$ ; jede Raute repräsentiert einen Berufsabschnitt.



**Bild 4:** links - Verteilung der Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$ ; Schwellenwert = 16,2, rechts – Verteilung der kraftbezogenen Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$ ; Schwellenwert = 0,77  $m/s^2$ .

In VDI 2057, Blatt 3 [29] wird ein Schwellenwert von 16,2 für die Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  angegeben. Wird dieser Wert durch die tägliche Schwingungsbelastung überschritten, sind im allgemeinen bleibende Gesundheitsschäden bei den betroffenen Fahrern zu erwarten. Ausgehend von diesem Schwellenwert ergibt sich eine Aufteilung der Berufsabschnitte im Verhältnis von annähernd 1 zu 5 (Bild 4, links). Während 1227 Berufsabschnitten liegt die tägliche Schwingungsbelastung unterhalb des Schwellenwertes für die Beurteilungs-Schwingstärke; während 250 Berufsabschnitten wird der Wert überschritten.

Soll anhand der kraftbezogenen Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  eine analoge Verteilung auf die Berufsabschnitte erreicht werden, muss der Schwellenwert  $0,77 \text{ m/s}^2$  betragen (Bild 4, rechts).

#### 4. Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Wechsel zwischen den Berufsabschnitten und der Zusammenhang zwischen den Werten für die Beurteilungs-Schwingstärke und die kraftbezogene Beurteilungsgröße diskutiert.

##### 4.1. Expositionszeiten

Die 388 untersuchten Fahrer haben für wenige Monate bis hin zu 42 Jahren Tätigkeiten ausgeführt, bei denen sie durch die eingesetzten Fahrzeuge schwingungsbelastet waren. Das Berufsleben, soweit es die Zeiten mit Schwingungsexposition betrifft, konnte in bis zu 10 Berufsabschnitte unterteilt sein. Die Wechsel in einen neuen Berufsabschnitt ergaben sich durch:

- Wechsel des Fahrzeuges bei gleichem Fahrzeugtyp, z.B. Wechsel der Gabelstapler und der damit verbundenen unterschiedlichen Schwingungsbelastungen
- Wechsel der Tätigkeit mit Wechsel des Fahrzeugtyps, z.B. vom Fahren eines Panzers zum Fahren von Radladern und Baggern
- Wechsel in Berufsabschnitte, in denen mehrere unterschiedliche Fahrzeuge alternierend genutzt wurden
- den Wechsel in einen Berufsabschnitt, in dem keine Schwingungsbelastung vorlag.

Auffällig sind bezüglich der Expositionszeit zwei Fahrer, die ungefähr 31 Jahre lang unter unveränderten Schwingungsbedingungen gearbeitet haben. Für sie ergab sich kein Wechsel der Berufsabschnitte und auch keine Änderung in der Intensität der Schwingungsbelastung. Es ist allerdings kaum nachzuvollziehen, dass bei nahezu täglichem Einsatz die Fahrer wäh-

rend ihres gesamten Berufslebens mit dem gleichen Fahrzeug gefahren sind. Sollten sie jedoch die Fahrzeuge während des Berufslebens gewechselt haben, so ist es erstaunlich, dass sich dann die Schwingungsbelastung nicht in ihrer Intensität geändert hat. Hier scheint eine Ungenauigkeit bezüglich der Schwingungsbelastung im Datensatz vorzuliegen.

#### 4.2. Beurteilungs-Schwingstärke und kraftbezogene Beurteilungsgröße

Das Verhältnis zwischen der Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  ist nicht über den gesamten ermittelten Wertebereich gleich groß. Beide Größen können also nicht durch einen einfachen Faktor ineinander umgerechnet werden. Ähnlich dem Verhältnis zwischen Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  und Beurteilungsbeschleunigung  $a_{wz(8)}$  ist der Zusammenhang zwischen den hier analysierten Größen nicht linear. Dieses wird sowohl durch die Regressionsfunktion in Fritz et al. [14] als auch durch die in Bild 2 eingezeichnete Regressionslinie deutlich. Mit zunehmender Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  steigt die kraftbezogene Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  überproportional an. Da hohe Werte der Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  häufig bei Fahrzeugen ermittelt wurden, die überwiegend tieffrequente Schwingungen emittieren, bedeutet dies, dass durch die kraftbezogene Bewertung tieffrequente Schwingungsanteile höher bewertet werden als durch die in den Normen und Richtlinien gegebene Bewertung.

Gemäß VDI 2057, Blatt 3 [29] sollte die Beurteilungs-Schwingstärke  $KZ_r$  bei täglich wiederholter Schwingungsbelastung einen Wert von 16,2 nicht überschreiten, um die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung bleibender Gesundheitsschäden möglichst gering zu halten. Während der in der epidemiologischen Studie erfassten Berufsabschnitte wurde der Schwellenwert in 250 Fällen überschritten. Gemäß des Schwellenwertes hätten für mindestens 17 % der Berufsabschnitte Maßnahmen, wie sie in VDI 3831 [27] beschrieben werden, zur Reduzierung der Schwingungsbelastung durchgeführt werden müssen, um das Risiko für Gesundheitsschädigungen möglichst gering zu halten. Allerdings sollten nach dem heutigen Kenntnisstand erste Präventionsmaßnahmen schon beim Überschreiten einer Beurteilungs-Schwingstärke von  $KZ_r = 10$  ( $a_{w(8)} = 0,5 \text{ m/s}^2$ , EU Richtlinie 2002/44/EG) durchgeführt werden.

Für die kraftbezogene Beurteilungsgröße  $a_{Fz(8)}$  gibt es bisher nur den Schwellenwert von Fritz et al. [12, 13], der auf der Basis von mechanischen Festigkeitshypothesen hergeleitet wurde. Dieser Schwellenwert von  $a_{Fz(8)} = 0,81 \text{ m/s}^2$  wird durch die Schwingungsbelastung in 14,8 % der Fälle überschritten. Wird jedoch davon ausgegangen, dass durch die Beurtei-

lunGS-Schwingstärke  $KZ_r$ , das Gesundheitsrisiko zufriedenstellend abgebildet wird, so müsste auch der Schwellenwert für die kraftbezogene Beurteilungsgröße zu einer gleich hohen Anzahl von Berufsabschnitten mit möglicher Gesundheitsgefährdung führen. Dieses wäre bei einem Wert von  $a_{Fz(8)} = 0,77 \text{ m/s}^2$  gegeben. Der Schwellenwert müsste gemäß dieser Beziehung demnach deutlich niedriger sein als der Wert von Fritz et al. Die Höhe des Schwellenwertes mit der zuverlässigsten Schätzung des Gesundheitsrisikos kann jedoch erst nach der Auswertung der gesundheitsbezogenen Daten der epidemiologischen Studie ermittelt werden.

## 5. Literaturangaben

- [1] Andersson, G.B.J.: The epidemiology of spinal disorders. In: The Adult Spine, Principles and Practice (eds. Frymover JW et al.), 107 – 146, New York, Raven Press, 1991
- [2] **BKV**: Berufskrankheiten-Verordnung, Liste der Berufskrankheiten
- [3] Bovenzi, M., Hulshof, C.T.J.: An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low-back pain (1986-1997). Int. Arch. Occup. Environ. Health 72, 1999, 351 – 365
- [4] Brinckmann, P., Frobin, W., Biggemann, M., Tillotson, M., Burton, K.: Quantification of overload injuries to thoracolumbar vertebrae and disc in persons exposed to heavy physical exertions or vibration at workplace. Clinical Biomechanics 13, 1998, Suppl. 2, S1 – S36
- [5] Buck, B., Pankoke, St., Wölfel, H.P.: Lateralsymmetrisches Modell der Lendenwirbelsäule zur Berechnung dynamischer Bandscheibenkräfte. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, - Forschung – FB 770, Dortmund, Berlin, 1997
- [6] Donati, P., Boulanger, P.: Technical preventive measures against whole-body vibration. Vibration am Arbeitsplatz - Schlussbericht zum 3. Internationalen Kolloquium der Internationalen Sektion der IVSS zur Forschung über die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten, Wien 1989, 143 – 147 1989
- [7] Dupuis, H., Zerlett, G.: Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen, Kenntnisstand zur Wirkung von Ganzkörper-Schwingungen. Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Sankt Augustin, 1984

- [8] Fritz, M.: Simulating the response of a standing operator to vibration stress by means of a biomechanical model. *J Biomechanics* 33, 2000a, 795 – 802
- [9] Fritz, M.: Description of the relation between the forces acting in the lumbar spine and whole-body vibrations by means of transfer functions. *Clinical Biomechanics* 15, 2000b, 234 – 240
- [10] Fritz, M.: Modelle zur Nachbildung der mechanischen Eigenschaften des menschlichen Körpers bei Belastung durch Ganz-Körper-Schwingungen. *Zbl. Arbeitsmed* 53, 2003, 524 – 535
- [11] Fritz, M.: Dynamic properties of the biomechanical model of the human body – Influence of posture and direction of vibration stress. *J Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 24, 2005, 233 – 249
- [12] Fritz, M., Bröde, P., Fischer, S.: Vergleich der Schwingungsbewertung nach VDI 2057 mit einer kraftbezogenen Bewertung zur Abschätzung des Risikos von Wirbelsäulenveränderungen. *Zbl. Arbeitsmed* 53, 2003, 354 – 363
- [13] Fritz, M., Fischer, S., Bröde, P.: Vibration induced low back disorders – Comparison of the vibration evaluation according to ISO 2631 with a force-related evaluation. *Applied Ergonomics* 36, 2005, 481 – 488
- [14] Fritz, M., Geiß, O., Fischer, S.: Vergleich der Schwingungsbewertung von Ganz-Körper-Schwingungen gemäß VDI 2057 von 1987 mit der aktuellen Bewertung sowie einer kraftbezogenen Bewertung. In: *Kompetenzentwicklung in realen und virtuellen Arbeitssystemen (53. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft)*, 553 – 556, GfA-Press, Dortmund, 2007
- [15] Hofmann, F., Bolm-Audorff, U., Dupuis, H., Rehder, U.: Berufsbedingte Wirbelsäulenerkrankungen – Biomechanik, Epidemiologie, Exposition, Klinik und Begutachtung. *Zbl. Arbeitsmed.* 52, 2002, 78 – 103
- [16] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. Genève, International Organisation for Standardization, 1997
- [17] ISO 2631-5: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks, Genève, International Organisation for Standardization, 2004
- [18] Jäger, M., Luttmann, A., Bolm-Audorff, U., Schäfer, K., Hartung, E., Kuhn, S., Paul, R., Francks, H-P.: Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) zur Beurteilung der Belastung

- der Lendenwirbelsäule durch Heben und Tragen von schweren Lasten oder durch Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung bei Verdacht auf Berufskrankheit Nr. 2108. Teil 1: Retrospektive Belastungsermittlung für risikobehaftete Tätigkeitsfelder. Arbeitsmed.Sozialmed.Umweltmed. 34, 1999, 101 – 111
- [19] Mach, J., Heitner, H., Ziller, R.: Die Bedeutung der beruflichen Belastung für die Entstehung degenerativer Wirbelsäulenveränderungen. Z. gesamte Hyg. 22, 1976, 352 – 354
- [20] Miwa, T.: Evaluation methods for vibration effect, Part 1: Measurements of threshold and equal sensation contours of whole-body for vertical and horizontal vibrations. Industrial Health 13, 1967, 183 - 205
- [21] Pankoke, St., Hofmann, J., Wölfel, H.P.: Weiterentwicklung eines Modells zur Berechnung von Kräften, die in der Lendenwirbelsäule wirksam werden. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, - Forschung – FB 885, Dortmund, Berlin, 2000
- [22] Panjabi, M.M., Brand, R.A., White, A.A.: Three-dimensional flexibility and stiffness properties of the human thoracic spine. J. Biomechanics 9, 1976, 185 – 192 1976
- [23] Schwarze, S., Notbohm, G., Dupuis, H., Hartung, E.: Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen auf die Lendenwirbelsäule – Eine Follow-up-Studie an 388 Fahrern verschiedener Fahrzeuge. Arbeitsmed.Sozialmed.Umweltmed. 33, 1998, 429 – 442
- [24] Seidel, H.: Begründung und Erläuterungen zur BK-Nummer 2110. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Sonderheft 3, 45 – 61, Berlin, 1993
- [25] Seidel, H., Heide, R. (1986): Long-term effect of whole-body vibration – A critical survey of literature. Int. Arch. Occup. Environ. Health 58, 1986, 1 – 26
- [26] Splittgerber, H.: Untersuchungen über die Wahrnehmungsschwelle des Menschen bei einwirkenden mechanischen Schwingungen. Gesundheits-Ingenieur, Heft 4, 1972
- [27] VDI 3831: Schutzmaßnahmen gegen die Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [28] VDI 2057, Blatt 2: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Bewertung. Beuth Verlag, Berlin, 1987
- [29] VDI 2057, Blatt 3: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Beurteilung. Beuth Verlag, Berlin, 1987
- [30] VDI 2057, Blatt 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Ganzkörperschwingungen. Beuth Verlag, Berlin, 2002