



DGUV Report

Validierung der neuen Ganzkörper-
Schwingungs-Bewertungsverfahren anhand
des Datenmaterials der epidemiologischen
Studie „Ganzkörpervibration“

DGUV Report

**Validierung der neuen Ganzkörper-Schwingungs-
Bewertungsverfahren anhand des Datenmaterials der
epidemiologischen Studie „Ganzkörpervibration“**

Verfasser: **Teilprojekt A:**
Gert Notbohm, Sieglinde Schwarze, Martin Albers
Institut für Arbeitsmedizin und Sozialmedizin,
Universitätsklinikum Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Teilprojekt B:
Martin Fritz, Oliver Geiß
Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der
Technischen Universität Dortmund (IfADo)

Redaktion: Zentralbereich des Instituts für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)

Broschürenversand: bestellung@dguv.de

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)
Mittelstr. 51
10117 Berlin
Telefon: 030 288763800
Telefax: 030 288763808
Internet: www.dguv.de
E-Mail: info@dguv.de

– September 2012 –

Satz und Layout: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Berlin

Druck: MedienHaus Plump, Rheinbreitbach

ISBN: 978-3-86423-044-8
(ISBN online: 978-3-86423-045-5)

Kurzfassung

Validierung der neuen Ganzkörperschwingungs-Bewertungsverfahren anhand des Datenmaterials der epidemiologischen Studie „Ganzkörpervibration“

Unter den arbeitsbedingten Faktoren, die bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule (LWS) mitverursachen können, stellt die langjährige Einwirkung von Ganzkörper-Vibrationen (GKV) im Sitzen eine besondere Gefahrenquelle dar. Da die Normung, staatliche Gesetzgebung und Forschung neue Kennwerte eingeführt haben, um die Exposition zu beschreiben, wurde eine epidemiologische GKV-Studie aus den 1990er Jahren neu ausgewertet. Im Teil A erweisen sich Kennwerte der maximalen Tages-Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens als gute Prädiktoren für die Diagnose „Lumbalsyndrom“, wobei das Alter der stärkste Prädiktor ist. Ergebnisse der früheren GKV-Studie, wonach LWS-Schädigungen ab einem Schwellenwert von ca. $0,63 \text{ m/s}^2$ täglicher Belastung zunehmen, werden bestätigt – etwa für den Tages-Vibrationsexpositionswert A(8).

Eine weitere deutliche Risikoerhöhung zeigt sich bei einer Gesamtdosis des Arbeitslebens in einem Bereich, der bei etwa 16-jähriger Exposition oberhalb dieses Schwellenwertes beginnt. Im Hinblick auf einen möglichen Kausalzusammenhang zwischen Schwingungsbelastung und LWS-Schäden sollten daher beide Aspekte berücksichtigt werden: die Höhe der während des Arbeitslebens erreichten Tagesexpositionen und die Gesamtdosis der Schwingungsbelastung. Im Teil B wird ein Verfahren zur Berechnung kraftbezogener Schwingungskenngrößen untersucht, das auf einem biomechanischen Modell aufbaut. Das Gesundheitsrisiko kann mit der auf der Schwingungsempfindung basierenden Beurteilungsbeschleunigung gleich gut abgeschätzt werden wie mit der kraftbezogenen Beurteilungsgröße: Die jeweiligen Odds Ratios zeigen nur minimale Unterschiede.

Abstract

Validation of the new whole-body vibration assessment method with the aid of data material from the “whole-body vibration” epidemiological study

Among the work-related factors that can contribute causally to intervertebral-disc diseases of the lumbar section of the spine, many years' exposure to whole-body vibration in a sitting position represents a major hazard source. Now that the standardisation process, government regulations and research have introduced new characteristic values for the description of exposure, an epidemiological whole-body vibration study of the Nineties has undergone re-evaluation. In Part A, the characteristic values of the maximum daily vibration exposure during working life prove to be good predictors of the diagnosis of “lumbar syndrome”, with age being the strongest predictor. Findings from the earlier whole-body vibration study, according to which lumbar vertebra damage increases from a threshold value of daily exposure of roughly 0.63 m/s^2 have been confirmed, e.g. for the daily vibration exposure value A(8).

A further marked increase in risk is shown for a total working life dose in a range that starts at about 16 years' exposure to vibration above this threshold value. As to a possible causal relationship between vibration exposure and damage to the lumbar spine, consideration should be given to these two factors, i.e. the magnitude of the daily exposure during working life and the total dose of vibration exposure. In Part B, a method for calculating force-related vibration parameters based on a biomechanical model is investigated. The health risk can be estimated equally well with the assessment acceleration based on the perceived vibration as with the force-related assessment variable: the respective odds ratios show only minimal differences.

Résumé

Validation des nouvelles méthodes d'évaluation des vibrations du corps entier à l'aide des données collectées lors de l'étude épidémiologique « Vibration du corps entier »

Parmi les facteurs professionnels qui peuvent contribuer à l'apparition de pathologies lombaires dues aux disques intervertébraux, l'exposition à des vibrations du corps entier en position assise pendant de nombreuses années constitue une source de risque particulière. Comme de nouvelles valeurs caractéristiques permettant de décrire cette exposition ont été introduites par des normes, des dispositions réglementaires nationales et des travaux de recherche, une étude épidémiologique relative aux vibrations du corps entier, qui a été réalisée dans les années 1990, a été réévaluée. Dans la partie A, il est démontré que les contraintes vibratoires journalières maximales subies au cours de la vie active sont de bons signes prédictifs pour le diagnostic « syndrome lombaire », l'âge étant le signe prédictif le plus important. Des résultats de l'ancienne étude relative aux vibrations du corps entier selon lesquels les lésions de la colonne lombaire sont plus fréquentes à partir d'une valeur seuil d'environ $0,63 \text{ m/s}^2$ pour la contrainte journalière sont confirmés – par exemple pour la valeur d'exposition journalière à des vibrations A(8).

Une autre augmentation notable du risque intervient, dans le cas d'une dose cumulée au cours de la vie active, dans une plage qui commence, pour environ 16 années d'exposition à des vibrations, au-dessus de cette valeur seuil. C'est pourquoi ces deux aspects devraient être pris en considération lors de la détermination d'un possible rapport de causalité entre contrainte vibratoire et lésions de la colonne lombaire : la valeur des expositions journalières au cours de la vie active et la dose cumulée de contraintes vibratoires. La partie B est consacrée à l'analyse d'une méthode de calcul de grandeurs caractéristiques de vibration faisant intervenir les forces, qui est basée sur un modèle biomécanique. L'estimation du risque pour la santé est aussi bonne avec le critère de l'accélération, qui correspond à la sensation provoquée par les vibrations, qu'avec le critère de la force. En effet, les écarts entre les rapports des chances (odds ratios) respectifs sont minimaux.

Resumen

Validación del nuevo método de evaluación de la exposición a las vibraciones en todo el cuerpo a partir de los datos del estudio epidemiológico „Vibración de cuerpo entero“

De entre los factores laborales que pueden provocar enfermedades en los cartílagos intervertebrales de la columna vertebral lumbar, el impacto a lo largo de los años de las vibraciones en todo el cuerpo en posición sentada constituye una fuente especialmente peligrosa. Como la normativa, las regulaciones y la investigación estatales han introducido nuevos valores característicos para describir la exposición, se ha evaluado de nuevo un estudio epidemiológico sobre las vibraciones en todo el cuerpo realizado en los años noventa. En la parte A, los coeficientes de la carga diaria máxima a causa de la vibración durante la vida laboral se revelaron buenos predictores para diagnosticar el „síndrome lumbar“, siendo la edad el mejor predictor. Los resultados del estudio anterior sobre las vibraciones en todo el cuerpo, según los cuales las lesiones en la columna vertebral lumbar aumentan a partir de un índice de perceptibilidad de unos $0,63 \text{ m/s}^2$ de carga diaria, se confirmaron – aproximadamente para el valor de exposición diaria a las vibraciones A(8).

Otro claro aumento del riesgo se manifiesta en una dosis total de la vida laboral que empieza aproximadamente a partir de una exposición de unos 16 años por encima de este índice de perceptibilidad. A respecto de una posible cadena de causas entre la carga a causa de la vibración y los daños a la columna vertebral lumbar, deben tenerse en cuenta ambos aspectos: la magnitud de las exposiciones diarias alcanzadas a lo largo de la vida laboral y la dosis total de la carga causada por la vibración. En la parte B se examina un método para calcular los parámetros de vibración referidos a la fuerza basado en un modelo biomecánico. Se puede calcular igual de bien el riesgo para la salud con la aceleración de la evaluación basada en la sensación de vibración que con el parámetro de evaluación referido a la fuerza: Los ratios de probabilidades respectivos solo muestran diferencias mínimas.

Inhaltsverzeichnis

Teilprojekt A	11
1 Ausgangslage und Fragestellung	13
2 Methodisches Vorgehen	17
2.1 Rekonstruktion der Ur-Daten	17
2.2 Berechnung der frequenzbewerteten Beschleunigungen nach ISO 2631-1:1997	17
2.3 Neuberechnung von Tages-Belastungskennwerten	18
2.4 Bewertung der Schwingungsbelastung während des gesamten Arbeitslebens	20
2.4.1 Maximaler und durchschnittlicher Tages-Belastungswert	20
2.4.2 Dosiswerte	21
2.5 Schwellenwerte der Schwingungsbelastung	22
2.6 Zusammenhänge zwischen Schwingungsbelastung und medizinischen Daten	23
2.6.1 Medizinische Zielgrößen	23
2.6.2 Epidemiologische Kennwerte	24
2.6.3 Statistische Analyseverfahren	25
3 Neue Kennwerte der Schwingungsbelastung des GKV-Kollektivs	29
3.1 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertungen	29
3.1.1 Mittelwertvergleich der alten und neuen frequenzbewerteten Beschleunigungen	29
3.1.2 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertung nach Tätigkeitsgruppen	31
3.2 Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte	34
3.2.1 Häufigkeitsverteilungen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte	34
3.2.2 Interkorrelationen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte	36
3.2.3 Vergleich von Tagesexposition $A(8)$ und Beurteilungs- Beschleunigung $a_{wz}(8)$	36
3.2.4 Korrelationen zwischen den Achsen bei beschleunigungs- und kraftbezogenen Beurteilungsgrößen	39
3.3 Vergleich verschiedener Dosismodelle und Schwellenkriterien	40
3.3.1 Korrelationen zwischen den Dosismodellen	40
3.3.2 Vergleich von Schwellenwerten	41

4	Zusammenhangsanalysen Schwingungsbelastung und Lumbalsyndrom	43
4.1	Analysen mit dem maximalen Tages-Belastungskennwert des Arbeitslebens	43
4.1.1	Zielkriterium „Lumbalsyndrom“	43
4.1.2	Bereinigung der Stichprobe	47
4.1.3	Zielkriterium „Lokales Lumbalsyndrom“	51
4.1.4	Zielkriterium „Lumbales Wurzelsyndrom“	53
4.2	Durchschnittliche Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens	54
4.3	Auswirkung verschiedener Schwellenwerte	57
4.3.1	Schwellenwerte für die Kenngrößen Tagesexposition A(8) und Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$	57
4.3.2	Schwellenwerte für Vektorensummen $a_{wv(8)}$	59
4.3.3	Berechnung des populationsattributablen Risikos (PAR)	61
4.4	Analysen mit Dosiswerten	63
4.4.1	Regressionsanalysen mit verschiedenen Schwellen- und Dosiswerten	63
4.4.2	Vergleich von Dosisgruppen bei verschiedenen Schwellenwerten	68
4.4.3	Vergleich verschiedener Dosisgruppen bei einem Schwellenwert von Tagesexposition $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$	70
4.4.4	Betrachtung der Unterdiagnose „Lokales Lumbalsyndrom“	73
4.4.5	Betrachtung der Unterdiagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“	74
4.5	Zielkriterium: zusammenfassende Beurteilungen	76
5	Zusammenhangsanalysen: Schwingungsbelastung und Röntgenbefunde	79
5.1	Vorbemerkung	79
5.2	Röntgenologische Diagnosen	79
5.2.1	Häufigkeit der Diagnosen	79
5.2.2	Statistische Zusammenhangsanalysen zwischen GKV und Röntgendiagnosen	80
5.2.3	Prävalenz degenerativer LWS-Schäden bei Hochbelasteten	83
5.3	Auffälligkeiten der Diskushöhen	84
5.4	Anzahl und Lokalisation der betroffenen Wirbelsäulensegmente	85
5.5	Zusammenfassende Beurteilung des Röntgenbefundes	88
6	Ergebnisse der Follow-Up-Untersuchung	91
6.1	Kollektiv der Follow-Up-Untersuchung	91
6.2	Schwingungsbelastung des Kollektivs der Follow-Up-Untersuchung	92
6.3	Lumbalsyndrom-Diagnosen in der Follow-Up-Untersuchung	92
6.3.1	Prävalenz in der Follow-Up-Untersuchung	92
6.3.2	Inzidenzraten in der Follow-Up-Untersuchung	93

7	Diskussion und Schlussfolgerungen	97
7.1	Modifizierung der Frequenzbewertung in den einschlägigen Richtlinien	97
7.2	Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte	97
7.3	Zusammenhang der Tages-Belastungskennwerte mit Wirkungsparametern	98
7.4	Beurteilung der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen	99
7.5	Schwellenwerte gesundheitsrelevanter Schwingungsbelastung	99
7.6	Bewertung von Schwingungsdosen	100
7.7	Röntgenologische Diagnosen	101
7.8	Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“	102
7.9	Stellenwert der Ergebnisse	103
8	Zusammenfassung	105
Literatur		107
Teilprojekt B		111
1	Einleitung	113
2	Ergebnisse des Untersuchungszeitraumes Juli 2006 bis Juni 2007	117
3	Methodik	123
3.1	Aufbau des biomechanischen Modells des Menschen	123
3.2	Übertragungsfunktion und Bewertungsfaktoren.....	125
3.3	Reanalyse der Daten der GKV-Studie.....	125
4	Ergebnisse	129
4.1	Berechnung von kraftbezogenen Schwingungskennwerten	129
4.1.1	z-Richtung, Bewegungssegment L5-S1	129
4.1.2	Horizontale Schwingungsbelastung, y-Richtung.....	132
4.2	Kraftbezogene Schwingungskennwerte in den Tätigkeitsabschnitten	134
4.3	Kraftbezogene Schwellenwerte.....	136
4.4	Vergleich der Kennwerte zur Schwingungsbelastung	138
4.5	Altersabhängigkeit der kraftbezogenen Schwellenwerte	141
4.6	Dosiswerte in vertikaler Schwingungsrichtung und Diagnose im Vergleich	145

5	Diskussion	155
5.1	Zusammenhang zwischen den kraftbezogenen Schwingungs- kenngrößen und den Kenngrößen in Normen und Verordnungen.....	155
5.2	Zusammenhang zwischen den kraftbezogenen Schwingungs- kenngrößen und dem Gesundheitsrisiko	157
5.3	Zusammenhang zwischen der Schwingungsdosis und dem Gesundheitsrisiko	163
6	Ausblick.....	165
7	Zusammenfassung/Summary	167
7.1	Zusammenfassung.....	167
7.2	Summary	169
	Literatur	173
	Anhang: Formelzeichen	177

Teilprojekt A:

Anwendung und Validierung der Verfahren nach
ISO 2631-1:1997, VDI 2057-1:2002,
EU-Richtlinie 2002/447EG „Ganzkörpervibration“ sowie
Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung 2007

1 Ausgangslage und Fragestellung

Die Bewertung von Ganzkörpervibrationen (GKV) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Menschen beruhte in der Bundesrepublik Deutschland noch bis 2002 grundsätzlich auf K-bewerteten Schwingstärken. Im Zuge der europäischen Harmonisierung haben sich jedoch grundlegende Veränderungen in diesem Bereich vollzogen. Die im Folgenden dargestellten Modifikationen der bisher angewandten Verfahren zur Messung und Bewertung von Ganzkörperschwingungen bringen zahlreiche Änderungen für die Praxis der Schwingungsbeurteilung mit sich:

- 1) Bei der Messung der Schwingbeschleunigung an der Arbeitsmaschine wurde mit den Neufassungen der Richtlinien ISO 2631-1:1997 [1] und VDI 2057-1:2002 [2] eine modifizierte Frequenzbewertung festgelegt mit der Konsequenz, dass die Einschätzung der Schwingungsbelastung im Vergleich zu früheren Messungen unterschiedlich ausfallen kann.

Beispiel: Durch die veränderte Frequenzbewertung in der vertikalen z-Richtung kann sich bei Raupenfahrzeugen eine Erhöhung der bewerteten Beschleunigung bis zu 20 % ergeben, während bei Radladern der Wert bis zu 20 % geringer sein kann als nach der bisherigen Bewertung. Dies scheint allerdings der hohen Prävalenz von degenerativen Veränderungen im Bereich der Lendenwirbelsäule bei Fahrern von Radladern zu widersprechen.

- 2) In ISO 2631-1:1997 wird hinsichtlich der Schwingungsbewertung die Einwirkungsrichtung betrachtet, die den höchsten Beschleunigungswert aufweist. Bei der Ermittlung des höchsten Wertes muss hinsichtlich der Gesundheitsgefährdung noch ein Korrekturfaktor von $k = 1,4$ für die horizontalen Schwingungsrichtungen berücksichtigt werden. Für die Beurteilung des Komforts dagegen beträgt der Faktor $k = 1,0$ für alle drei Achsen. Eine epidemiologische Prüfung, ob diese Gewichtung bei der Abschätzung des Gesundheitsrisikos gerechtfertigt ist, steht u. E. noch aus.
- 3) Während in Deutschland bisher sowohl in der Prävention als auch in der BK-Anerkennung die Erfassung von Schwingungsbelastungen in vertikaler Richtung dominierte, wird auch in der EU-Richtlinie 2002/44/EG zu Ganzkörpervibration [3] die höchste der drei Schwingungsrichtungen als Grundlage der Expositionsbeurteilung für die Prävention zugrunde gelegt. In der neuen deutschen Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) [4] von 2007 ist diese Regelung mittlerweile übernommen worden.
- 4) Ein spezielles Schwingungsbewertungsverfahren, das auf den unmittelbar in der Wirbelsäule wirkenden Kräften basiert, die als Ursache für die Entstehung von schwingungsbedingten degenerativen Erkrankungen angesehen werden, entwickelte *Fritz* [5] (siehe auch Teilprojekt B

in diesem Report). Mit dieser Bewertung und den dazu anhand von biomechanischen Prinzipien hergeleiteten Schwellenwerten könnte das Gesundheitsrisiko in Abhängigkeit vom Lebensalter der Exponierten ermittelt werden.

- 5) In den genannten Regelwerken werden zum Teil neue Grenzwerte eingeführt, deren praktische Relevanz weiter abzuklären ist, z. B. der „Auslösewert“ von $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$ in der EU-Richtlinie [3] und in der LärmVibrationsArbSchV [4] oder die „Untergrenze der Zone erhöhter Gesundheitsgefährdung“ von $0,45 \text{ m/s}^2$ in VDI 2057-1:2002 [2]. Empirische Belege fehlen auch für den neuen „Expositionsgrenzwert“, der in der EU-Richtlinie mit einheitlich $A(8) = 1,15 \text{ m/s}^2$ für jede Schwingungsrichtung festgelegt wird, während die LärmVibrationsArbSchV diesen Wert für die z-Richtung unterschreitet und auf $A(8) = 0,8 \text{ m/s}^2$ festsetzt.
- 6) Unklarheit besteht international auch darüber, welcher Ansatz zur Quantifizierung langjähriger Schwingungsbelastung (Dosismodell) die Wahrscheinlichkeit zur Entwicklung von bandscheibenbedingten Erkrankungen am besten abbildet. Bisher konkurrieren das sogenannte Dupuis-Modell (Quadrat der Beurteilungsschwingstärke bzw. Beurteilungsbeschleunigung) und das Griffin-Modell (vierte Potenz der Beurteilungsschwingstärke bzw. Beurteilungsbeschleunigung).
- 7) Insbesondere in der BK-Begutachtungspraxis besteht nach wie vor Unsicherheit, in welcher Weise die in der BK 2110 geforderte langjährige GKV-Exposition

zu operationalisieren ist und wo ggf. ein Schwellenwert für die Berücksichtigung von Expositionen in der Beurteilung der individuellen Belastung anzusetzen wäre.

Grundlage der aufgeführten Bewertungsverfahren sind in erster Linie experimentelle Untersuchungen. Inwieweit diese Verfahren auch bei langjährigen Expositionen gültig sind, konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Dieser Aspekt spielt jedoch bei der Rechtssicherheit und den damit für Prävention und BK-Begutachtungspraxis verbundenen Konsequenzen eine große Rolle. Auch die Deutsche Wirbelsäulenstudie (DWS) bringt als populationsbasierte Fall-Kontroll-Studie in dieser Hinsicht keine neuen Erkenntnisse, da nur relativ wenige Teilnehmer nennenswerte berufliche GKV-Belastungen aufweisen [6].

In dieser Situation hat sich eine Reanalyse des Datenmaterials der sog. GKV-Studie (Epidemiologische Studie „Ganzkörper-vibration“ [7]) als eine Erfolg versprechende Möglichkeit angeboten, Erkenntnisse zu den angesprochenen Problemen zu gewinnen. In jener Studie wurden an einem schwingungsexponierten Kollektiv von 388 Arbeitnehmern detaillierte Angaben zur Schwingungsexposition während des Arbeitslebens mit Angabe der jeweiligen Arbeitsfahrzeuge erhoben. Weiterhin wurde für jeden Teilnehmer eine medizinische Beurteilung seines Wirbelsäulenzustandes anhand eingehender anamnestischer Befragung sowie klinischer und röntgenologischer Untersuchung der Lendenwirbelsäule (LWS) vorgenommen. Zusätzlich wurde im Rahmen der GKV-Studie an einer Teilstichprobe von $n = 281$ Teilnehmern eine komplette Nachuntersuchung in

einem mittleren Zeitabstand von 4,37 Jahren durchgeführt, d. h. die Schwingungsexpositionen für diesen Zeitraum wurden erfasst und die gleichen medizinischen Untersuchungen zur Beurteilung der Wirbelsäule durchgeführt. Auch diese Daten standen komplett zur Verfügung, sodass auch eine erneute Analyse der medizinisch beobachtbaren LWS-Veränderungen in diesem Vier-Jahres-Zeitraum möglich ist (für Kurzdarstellungen der GKV-Studie s. a. [8 bis 10]).

In der im Folgenden vorgestellten Reanalyse waren folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Ermittlung der Korrekturfaktoren für die Bewerteten Schwingstärken K_{eq} bzw. Beurteilungsbeschleunigungen a_{we} je nach Arbeitsgerät und Einsatzbedingung für alle in der GKV-Studie ermittelten Schwingungsbelastungen
- Neuberechnung der damals erhobenen individuellen Belastungsdaten und Bildung von verschiedenen Kennwerten der Schwingungsbelastung auf der Grundlage der aktuell gültigen Regelwerke einschließlich Dosiswerten zur Erfassung der kumulierten Schwingungsbelastung im Laufe des Arbeitslebens
- Zusammenhangsanalysen zwischen diesen Belastungskennwerten und den vorhandenen medizinischen Daten der GKV-Studie zur Beurteilung des Zustandes der LWS
- Formulierung von Empfehlungen zur praktischen Umsetzung der Ergebnisse

Im Folgenden wird zunächst das methodische Vorgehen zur Lösung dieser Fragen beschrieben, gefolgt von einer eingehenden Darstellung der Ergebnisse zu den genannten Themenkomplexen.

2 Methodisches Vorgehen

2.1 Rekonstruktion der Ur-Daten

Im Rahmen der GKV-Studie hatten die Technischen Aufsichtsbeamten (TAB) der beteiligten Berufsgenossenschaften mit großem Aufwand und Einsatz eine standardisierte Erfassung der lebenslangen Schwingungsbelastung jedes Teilnehmers durchgeführt, indem sie alle Zeiträume mit betrieblicher Schwingungsbelastung unter genauer Angabe des Arbeitsgerätes, der Einsatzbedingungen und der durchschnittlichen Belastungsdauer in einem Erhebungsbogen protokollierten (vgl. [7], Anlage 1). Bei den Exponierten handelte es sich um Fahrer von Gabelstaplern, Lastkraftwagen oder Erdbaumaschinen. Die erhobenen Daten wurden dann weiter verarbeitet, indem *Siegfried Fischer* (IFA, damals BIA) den benannten Arbeitsmaschinen/-fahrzeugen und Einsatzbedingungen repräsentative Bewertete Schwingstärken K_{eq} aus der BIA-Schwingungsdatenbank zuordnete, und *Emil Hartung* (damals Süddeutsche Metall-BG) dann aus den Informationen über Schwingungsintensität und Belastungsdauer Dosiswerte pro Beschäftigungszeitraum nach verschiedenen Verfahren errechnete. In anonymisierter Form wurden diese Belastungsdaten an das Institut für Arbeitsmedizin und Sozialmedizin übermittelt zwecks Zusammenführung mit den Daten der medizinischen Untersuchungen. Im Rahmen der Datenschutzvorkehrungen wurde auch eine Möglichkeit offen gehalten, im Notfall an neutraler Stelle Untersuchungsdaten wieder mit Personalien zusammenführen zu können.

Angesichts des unerwarteten Todes von *Emil Hartung* stellte sich damit für die jetzige Reanalyse der Daten als erstes das Problem, einen Zugriff auf die Original-Erhebungsbögen der TAB zu erhalten, da nur sie alle notwendigen Informationen zur Identifizierung des Arbeitsgerätes enthielten. Durch intensive Recherche aller aktuell Beteiligten konnte ein Großteil der Bögen sichergestellt werden. Verbliebene Lücken konnten größtenteils durch Analogieschluss gefüllt werden, da bei gleichem Arbeitgeber und gleichen Bewerteten Schwingstärken auch gleiche Arbeitsgeräte vorliegen mussten. Weitere Fälle wurden durch Kontaktaufnahme mit den damals beteiligten, z. T. bereits pensionierten TAB und sogar durch telefonische Nachforschung bei einzelnen Teilnehmern der GKV-Studie geklärt, sodass letzten Endes in Übereinstimmung mit *S. Fischer* festgestellt werden konnte, dass die jeweilige Arbeitsmaschine für sämtliche erhobenen Schwingungsbelastungszeiträume der GKV-Teilnehmer mit sehr hoher Sicherheit und Genauigkeit identifiziert worden war.

2.2 Berechnung der frequenzbewerteten Beschleunigungen nach ISO 2631-1:1997

Auf dieser Grundlage konnten im nächsten Schritt die Änderungen der Frequenzbewertung nach ISO 2631-1:1997 [1] berücksichtigt werden. Die Bewerteten Schwingstärken wurden in energieäquivalente frequenzbewertete Beschleunigungen a_{ve} mit der neuen Frequenzbewertung W_k, W_d nach dieser Norm

umgerechnet, indem die jeweiligen Korrekturfaktoren in allen drei Schwingungsrichtungen für jeden Zeitraum angewendet wurden, die gerätebezogen in einer Liste des IFA veröffentlicht sind [11]. Etwaige Unklarheiten über die korrekte Zuordnung der erfragten Arbeitsgeräte zu den Klassifizierungen der Liste wurden direkt mit dem IFA geklärt. Am Ende ergab sich für die 388 Studienteilnehmer eine neue Schwingungsbelastungsdatei mit Werten aus insgesamt 1477 getrennt erhobenen Zeiträumen, die im Folgenden als Tätigkeitszeiträume bezeichnet werden. Da in der VDI-Richtlinie 2057-1:2002 [2] (S. 35) erwähnt wird, dass noch nicht viele Messwerte nach ISO 2631-1:1997 vorliegen, sind die Auswirkungen dieser Korrekturen auf die Messwerte der GKV-Studie sicher von Interesse. In Abschnitt 3.1 werden entsprechende Ergebnisse vorgestellt.

2.3 Neuberechnung von Tages-Belastungskennwerten

In der GKV-Studie, die u. a. auch die Erprobung eines Dosisverfahrens verfolgte, hatte man zu Beginn eine größere Auswahl an Dosisberechnungsmodellen verglichen und sich relativ früh dafür entschieden, nur eine geringe Zahl an Verfahren zu betrachten, die alle auf Beurteilungs-Schwingstärken K_f in z-Richtung mit unterschiedlichen Schwellenwerten der Mindestexposition beruhen. In den letzten Jahren haben sich im Zuge der europäischen Harmonisierung und der darauf basierenden Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [4] jedoch die eingangs erwähnten Veränderungen vollzogen, die eine erneute Bestandsaufnahme von Belastungskennwerten erfordern, welche für die Beurteilung von gesundheitlichen Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen

bedeutsam sein könnten. Konkret sind folgende Kennwerte zu beachten, die in Abschnitt 3.2 eingehender miteinander verglichen werden:

- **Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$**

Die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ kennzeichnet die Gesamtbelastung eines 8-stündigen Arbeitstages. Sie wird errechnet aus dem für die Einwirkungsdauer T_8 ermittelten energieäquivalenten Mittelwert der frequenzbewerteten Beschleunigung. Sie ist international als wesentliche Kenngröße für die Abschätzung eines gesundheitlichen Risikos durch GKV anerkannt [1; 2] und liegt den aktuellen Richtwertkurven zur Gesundheitsgefährdung bei langjähriger Belastung zugrunde. In VDI 2057-1:2002 werden z. B. auf S. 29 Richtwerte von $a_{wz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$ und $a_{wz(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$ für den Beginn einer möglichen bzw. deutlichen Gefährdung genannt.

- **Tagesexposition A(8) nach der deutschen Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutz-Verordnung (LärmVibrationsArbSchV) vom 6. März 2007**

Die Tagesexposition A(8) entspricht der äquivalenten Dauerbeschleunigung für einen Zeitraum von acht Stunden und wird gebildet durch den höchsten Wert $a_{w(8)}$ aus den Effektivwerten der frequenzbewerteten Beschleunigungen in den drei orthogonalen Richtungen, wobei $a_{wx(8)}$ und $a_{wy(8)}$ mit dem Korrekturfaktor $k = 1,4$ multipliziert werden (s. Pkt. 2.1. im Anhang der Verordnung). Grundsätzlich wird diese Vorgehensweise in den Regelwerken empfohlen, wenn das Risiko gesundheitlicher Schädigungen bewertet werden soll (ISO 2631-1:1997,

S. 13 f., VDI 2057-1:2002, S. 29 f.). Im Folgenden bezieht sich der Begriff Tagesexposition $A(8)$ immer auf diese Definition in der neuen LärmVibrationsArbSchV. Im Text der Verordnung, § 9 sind auch einerseits ein Auslösewert von $0,5 \text{ m/s}^2$ für alle Schwingungsrichtungen sowie andererseits Expositionsgrenzwerte $A(8)$ für die z-Richtung von $0,8 \text{ m/s}^2$ und für die x- bzw. y-Richtung von jeweils $1,15 \text{ m/s}^2$ festgelegt. Damit übernimmt die deutsche Verordnung Vorgaben der EU-Richtlinie 2002/44/EG und geht teilweise darüber hinaus, weil in der EU-Richtlinie auch für die z-Achse nur ein Expositionsgrenzwert von $1,15 \text{ m/s}^2$ vorgesehen ist.

- **Schwingungsgesamtwert $a_{\text{wv}(8)}$ (Vektorbetrag)**

Der Schwingungsgesamtwert $a_{\text{wv}(8)}$ (Vektorbetrag) der frequenzbewerteten Beschleunigungen in den drei Richtungen kann nach ISO 2631-1:1997 (S. 13 f.) und VDI 2057-1:2002 (S. 30) ebenfalls bei der Beurteilung gesundheitlicher Risiken herangezogen werden, z. B. bei ähnlich hoher Schwingungsintensität in zwei oder drei Richtungen. Die allgemeine Formel lautet

$$a_w = \sqrt{k_x^2 a_{\text{wx}}^2 + k_y^2 a_{\text{wy}}^2 + k_z^2 a_{\text{wz}}^2}$$

wobei in den genannten Regelwerken Übereinstimmung darin besteht, dass der Korrekturfaktor k bei der Beurteilung des Komforts für alle Achsen gleich 1,0 zu setzen ist, während hinsichtlich gesundheitlicher Gefährdung für die x- und y-Achse jeweils $k = 1,4$ gelten sollte. Letztere Festlegung soll im Rahmen dieser Studie auch überprüft werden, sodass der Schwingungsgesamtwert $a_{\text{wv}(8)}$ sowohl ohne Korrektur (also $k = 1,0$ für

alle Achsen) als auch mit Korrektur (d. h. $k = 1,4$ für x- und y-Achse) verwendet wird.

- **Estimated vibration dose value (eVDV) nach ISO 2631-1:1997**

In ISO 2631-1:1997 ist als zusätzliche Methode der Schwingungsbewertung der estimated vibration dose value (eVDV) angeführt, bei dessen Berechnung die Beschleunigung mit der 4. Potenz einfließt, sodass Beschleunigungsspitzen stärker berücksichtigt werden. Der Wert kann nach ISO 2631-1:1997, Anhang B.30, wie folgt aus dem a_{we} abgeleitet werden:

$$\text{eVDV} = 1,4 \cdot a_{\text{we}} \cdot T^{1/4} \text{ in m/s}^{1,75}$$

wobei T für die Expositionsdauer in Sekunden pro Arbeitstag steht. Für eine achtstündige Schwingungsbelastung mit $a_{\text{wz}} = 0,8 \text{ m/s}^2$ ergäbe sich damit:

$$\begin{aligned} \text{eVDV} &= 1,4 \cdot a_{\text{we}} \cdot (3\,600 \cdot 8)^{0,25} \text{ m/s}^{1,75} \\ &= 1,4 \cdot 0,8 \cdot 13,03 \text{ m/s}^{1,75} \\ &= 0,8 \cdot 18,24 \text{ m/s}^{1,75} = 14,59 \text{ m/s}^{1,75} \end{aligned}$$

Als Anhaltswerte für die Unter- und Obergrenze des Bereichs möglicher Gesundheitsgefährdung ergeben sich aus den Richtwertkurven laut Anhang B.3 der Norm Dosiswerte von $8,5$ bzw. $17 \text{ m/s}^{1,75}$ für einen Arbeitstag. Die Größe eVDV soll im Folgenden analog zur Beurteilungsbeschleunigung $a_{\text{wz}(8)}$ nur in z-Richtung berechnet werden.

• **Vibration dose value (VDV) nach EU-Richtlinie**

Der Vibrationsdosiswert (VDV) wird in der EU-Richtlinie 2002/44/EG [3] eingeführt als eine alternative Berechnung der Tagesexposition A(8) auf der Grundlage der 4. Potenz der Beschleunigung. Den Mitgliedstaaten ist grundsätzlich die Wahl des Berechnungsmodells freigestellt. Im Prinzip soll der VDV nach ISO 2631-1:1997 direkt messtechnisch erfasst werden. Da für unsere Stichprobe nur a_w -Werte vorliegen, wird der VDV näherungsweise ermittelt, indem der eVDV pro Arbeitstag in allen drei orthogonalen Schwingungsrichtungen berechnet und der maximale Wert ausgewählt wird. Der tatsächliche VDV wird damit bei Expositionen mit starken Beschleunigungen oder Stößen unterschätzt. Als täglicher Expositionsgrenzwert für den VDV wird in der EU-Richtlinie $21 \text{ m/s}^{1,75}$ und als täglicher Auslösewert $9,1 \text{ m/s}^{1,75}$ angesetzt; dies entspricht nach o. g. Umrechnungsformel den ebenfalls in der EU-Richtlinie angegebenen Grenz- bzw. Auslösewerten auf $a_{w(8)}$ -Basis von 1,15 bzw. $0,5 \text{ m/s}^2$.

• **Kraftbezogene Beurteilungsgröße a_z**

Schließlich ist noch die eingangs erwähnte kraftbezogene Beurteilung der Ganzkörperschwingungen a_z zu berücksichtigen [5; 12], deren Aussagekraft im Teilprojekt B dieses Forschungsvorhabens intensiv untersucht wurde. Im vorliegenden Teilprojekt A sollen die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen in z- und y-Achse nur in einige Zusammenhangsanalysen einbezogen werden, in denen Vergleiche zwischen allen oben genannten GKV-Beurteilungskennwerten hinsichtlich ihrer Aussagekraft für medizinische Zielgrößen angestellt werden. Im Teilprojekt B

wird bzgl. der kraftbezogenen Beurteilungsgröße in z-Richtung nach dem LWS-Segment unterschieden, für das die Kraftübertragung ermittelt wurde. Entsprechend werden in den Berechnungen auch hier die übermittelten a_{Fz} -Werte für die Segmente L3-L4 sowie L5-S1 verwendet.

2.4 **Bewertung der Schwingungsbelastung während des gesamten Arbeitslebens**

2.4.1 **Maximaler und durchschnittlicher Tages-Belastungswert**

Da zur Abschätzung einer möglichen gesundheitlichen Gefährdung durch GKV die einschlägigen Regelwerke Belastungswerte angeben, die zur besseren Vergleichbarkeit auf die Belastung eines 8-stündigen Arbeitstages normiert wurden, sollen zunächst Zusammenhänge zwischen den im vorigen Abschnitt genannten Tages-Belastungskennwerten und den Diagnosen zum Wirbelsäulenzustand betrachtet werden. Die Tages-Belastungswerte sind somit als Werte zu verstehen, die einen Tätigkeitszeitraum längerer Dauer charakterisieren, in dem die gleichen oder gleichartigen Arbeitsgeräte gefahren wurden bzw. in denen die Belastungshöhe gleich hoch war. Diese für einen Tätigkeitszeitraum ermittelten Tages-Belastungswerte haben den Vorteil, dass sie im Unterschied zu Dosiswerten prinzipiell unabhängig vom Lebensalter sind.

Bei Betrachtung der verschiedenen Tätigkeitszeiträume eines Probanden kann man einerseits den maximalen Tages-Schwingungsbelastungskennwert ermitteln oder andererseits den Durchschnittswert aus allen Expositionszeiträumen berechnen,

indem der jeweilige Kennwert mit der Dauer des betreffenden Tätigkeitszeitraums in Jahren gewichtet und daraus ein Mittelwert gebildet wird. Je nach Verlauf der Exposition können sich dadurch deutliche Verschiebungen zwischen den Belastungswerten der Teilnehmer ergeben. Folglich könnte sich dieser durchschnittliche Belastungswert von GKV als geeigneter Maßstab für gesundheitliche Auswirkungen erweisen, da auf der einen Seite die Expositionsdauer als plausibler Verstärker der Schwingungswirkungen mit einfließt, auf der anderen Seite aber im Unterschied zu Dosiswerten prinzipiell keine Korrelation mit dem Lebensalter oder den Berufsjahren besteht. Aber auch ein solcher Durchschnittswert garantiert keine wirkliche Vergleichbarkeit der Belastung zwischen verschiedenen Personen. Wenn beispielsweise ein Erdbaumaschinenfahrer seine Tätigkeit aufgibt und anschließend ohne Schwingungsbelastung im Lager arbeitet, behält er den hohen Durchschnittswert aus der vorherigen Tätigkeit. Wechselt jedoch ein anderer Fahrer mit der gleichen Schwingungsbelastung zu einer anderen Fahrtätigkeit, z. B. als Lkw-Fahrer bei einer Spedition, kommt ein weiterer Belastungszeitraum mit geringeren Schwingungsintensitäten hinzu, und der Durchschnittswert verringert sich.

Aufgrund der Erfahrungen aus der ursprünglichen GKV-Studie ist die Verwendung des maximalen und des durchschnittlichen Tages-Schwingungsbelastungswertes ausgesprochen interessant. In dieser Studie hatte sich gezeigt, dass bei einer Zweiteilung der Stichprobe in „belastet“ vs. „unbelastet“ anhand des maximalen oder des durchschnittlichen KZ-Wertes aus der Schwingungsbelastung während des gesamten Arbeitslebens ein signifikant erhöhtes Risiko

einer Diagnose „Lumbalsyndrom“ nachzuweisen war ([7], S. 130 ff.). Als deutlichste Trennkriterien wurden

- $a_{wz(s)} = 0,65 \text{ m/s}^2$ (bei maximalem Wert) bzw.
- $a_{wz(s)} = 0,56 \text{ m/s}^2$ (bei durchschnittlichem Wert)

ermittelt. Entsprechend wurde auch jetzt in den Zusammenhangsanalysen für jeden der oben eingeführten Tages-Schwingungsbelastungskennwerte zum einen der maximale Wert aus der Arbeitsanamnese (Abschnitt 4.1) und zum anderen ein Durchschnittswert des gesamten Arbeitslebens (Abschnitt 4.2) verwendet.

2.4.2 Dosiswerte

Die Zusammenhangsanalyse von Schwingungsbelastungsdaten und gesundheitlichen Schädigungen nach jahre- oder jahrzehntelanger Arbeitstätigkeit ist natürlich am sinnvollsten, wenn Kennwerte der kumulierten Schwingungsbelastung in Form einer Gesamtdosis zugrunde gelegt werden (vgl. [2], S. 14 f.). Aus den in Abschnitt 2.3 dargestellten Tages-Schwingungsbelastungskennwerten ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten der Berechnung einer Gesamtdosis, die auch im Rahmen der früheren GKV-Studie [7] diskutiert, aber nicht systematisch verglichen wurden. Geht man grundsätzlich von einem 8-stündigen Arbeitstag als Bezugsgröße aus, kommen folgende Dosismodelle infrage, wobei T_i jeweils für die Expositionsdauer in Tagen steht:

D1) Grundlage: Beurteilungsbeschleunigung

$a_{wz(8)}$

$$D = \sum_{i=1}^n a_{wz(8)i}^2 \cdot T_i$$

D2) Grundlage: Tagesexposition A(8)

nach deutscher Verordnung, also höchster $a_{w(8)}$ -Wert aus den drei Achsen und Korrekturfaktor $k = 1,4$ für k_x und k_y

$$D = \sum_{i=1}^n a_{w(8)i}^2 \cdot T_i \quad \text{mit } a_{w(8)} = \\ = \max(k_x \cdot a_{wx}, k_y \cdot a_{wy}, k_z \cdot a_{wz})$$

mit

$$k_x = k_y = 1,4$$

$$k_z = 1$$

D3) Grundlage: Schwingungsgesamtwert

$a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag) ohne Korrektur k für die x- und y-Achse

$$D = \sum_{i=1}^n a_{w(8)v}^2 \cdot T_i \quad \text{mit}$$

$$a_{w(8)v} = \sqrt{k_x^2 \cdot a_{wx(8)}^2 + k_y^2 \cdot a_{wy(8)}^2 + k_z^2 \cdot a_{wz(8)}^2}$$

$$\text{mit } k_x = k_y = k_z = 1$$

D4) Grundlage: Schwingungsgesamtwert

$a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag) mit Korrektur für die x- und y-Achse

$$D = \sum_{i=1}^n a_{wv(8)}^2 \cdot T_i \quad \text{mit}$$

$$a_{w(8)v} = \sqrt{k_x^2 \cdot a_{wx(8)}^2 + k_y^2 \cdot a_{wy(8)}^2 + k_z^2 \cdot a_{wz(8)}^2}$$

mit

$$k_x = k_y = 1,4$$

$$k_z = 1$$

D5) Dosiswerte basierend auf dem eVDV (estimated vibration dose value) pro Arbeitstag in z-Achse:

$$D = 4 \sqrt{\sum_{i=1}^n 1,4^4 \cdot a_{wze,i}^4} \cdot t_i$$

mit t_i = Belastungszeit in Sekunden

D6) Dosiswert basierend auf dem VDV mit der stärksten Richtung pro Tätigkeitszeitraum nach EU-Richtlinie

$$D = 4 \sqrt{\sum_{i=1}^n 1,4^4 \cdot \max_{j \in \{x,y,z\}} (a_{wje,i}^4)} \cdot t_i$$

D7) Dosiswert basierend auf dem VDV unter Verwendung des Vektorbetrags:

$$D = 4 \sqrt{\sum_{i=1}^n 1,4^4 \cdot \sqrt{(k_x \cdot a_{wxi})^2 + (k_y \cdot a_{wyi})^2 + (k_z \cdot a_{wzi})^2}} \cdot t_i$$

mit

$$k_x = k_y = 1,4$$

$$k_z = 1$$

Für den überenergetischen Ansatz zur Berechnung der Schwingungsbelastung sind auch andere Modellformulierungen denkbar als in D5 bis D7 vorgeschlagen. An gegebener Stelle wird die Frage der Dosiswerte für den überenergetischen Ansatz weiter diskutiert.

2.5 Schwellenwerte der Schwingungsbelastung

In der GKV-Studie hatte sich gezeigt, dass es zur Berechnung einer Gesamtdosis der Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens sinnvoll ist, ein plausibles Schwellenkriterium anzusetzen, bei dessen Unterschreitung die entsprechende Tätigkeit

als nicht gesundheitsgefährdend angesehen und die Belastung nicht berücksichtigt wird ([7], S. 38 ff. und 58 ff.). Gerade bei einer so stark in der Allgemeinbevölkerung verbreiteten und auch altersabhängigen Zieldiagnose wie „degenerative Schädigung der Lendenwirbelsäule (LWS)“ werden die statistischen Zusammenhänge mit der Schwingungsbelastung unklarer, wenn die zugrunde gelegte Definition von Belastung nicht einigermaßen korrekt das tatsächliche Schädigungspotenzial beschreibt – bei zu niedriger Schwelle ist praktisch jeder belastet, bei zu hoher Schwelle nur diejenigen, die extremste Belastung und/oder hohes Alter vorzuweisen haben.

Die Bestimmung von Schwellen als Beginn einer möglichen oder wahrscheinlichen Gesundheitsgefährdung durch Ganzkörperschwingungen ist aber selbst noch Forschungsgegenstand und soll auch in diesem Projekt weiter geklärt werden. Wie schon in der GKV-Studie werden deshalb auch hier in den Dosisberechnungen verschiedene Schwellenwerte einer gesundheitlichen Gefährdung der LWS bei langjähriger Exposition variiert. Berücksichtigt werden folgende Schwellenkriterien für den $a_{w(8)}$ aus der aktuellen Diskussion:

- 0,45 m/s² als unterste Schwelle einer möglichen Gefährdung ([2], S. 29)
- 0,5 m/s² als Auslösewert nach Lärm-VibrationsArbSchV [4] bzw. EU-Richtlinie 2002/44/EG [3]
- 0,63 m/s² als Wert etwa in der Mitte der Zone erhöhter Gesundheitsgefährdung nach VDI 2057-1:2002. Im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 [13] wird ab dieser

Marke bei langjähriger Exposition ein Gesundheitsrisiko angenommen. Auch die Ergebnisse der früheren GKV-Studie ([7], S. 185 ff.) weisen auf ein erhöhtes Risiko ab dieser Schwelle hin.

- 0,8 m/s² als Schwelle einer deutlichen Gesundheitsgefährdung laut VDI 2057-1:2002 [2] und als Expositionsgrenzwert A(8) in z-Richtung nach [4]
- 1,15 m/s² als Expositionsgrenzwert A(8) der EU-Richtlinie 2002/44/EG [3].

Zu den Dosiswerten, die auf dem VDV beruhen, bieten sich als Schwellenkriterium die Werte aus der EU-Richtlinie an:

- 9,1 m/s^{1,75} als Auslösewert
- 21 m/s^{1,75} als Expositionsgrenzwert.

2.6 Zusammenhänge zwischen Schwingungsbelastung und medizinischen Daten

2.6.1 Medizinische Zielgrößen

Als wesentlichstes Zielkriterium für degenerative Veränderungen der LWS wurden in der GKV-Studie die medizinische Diagnose „Lumbalsyndrom“ – auch unterteilt in „lokales Lumbalsyndrom“ und „lumbales Wurzelsyndrom“ – gewertet, wie sie von den untersuchenden Ärztinnen aufgrund von Anamnese, klinischer und röntgenologischer Diagnose zusammenfassend getroffen wurde (vgl. [7], S. 40 ff., nach [14], siehe auch Merkblatt zur BK 2110).

Zusätzlich wurden auch andere Zielkriterien verwendet, vor allem die verschiedenen

röntgenologischen Diagnosen und die zusammenfassenden Beurteilungen, wie sie ärztlicherseits vergeben wurden, um neben der Diagnose auch den Schweregrad der Erkrankung zu dokumentieren. Auf diese zusätzlichen Zielkriterien wird jeweils an entsprechender Stelle näher eingegangen.

2.6.2 Epidemiologische Kennwerte

2.6.2.1 Relatives Risiko und Prävalenzratenverhältnis

Eine Kernfrage epidemiologischer Studien zielt darauf ab, ob sich in der Häufigkeit von Neuerkrankungen (Inzidenz) bzw. der relativen Häufigkeit einer Krankheit zu einem gegebenen Zeitpunkt (Prävalenz) Unterschiede zwischen Gruppen von Exponierten und Nicht-Exponierten nachweisen lassen [15 bis 17]. Die Erkrankungsrate unter den Nicht-Exponierten stellt das Basisrisiko dar, das ohne Exposition besteht. Das Relative Risiko (RR) ist das Verhältnis der Risiken zwischen den Exponierten und Nicht-Exponierten. Es ist definiert als Quotient der Risiken (Erkrankungswahrscheinlichkeiten):

$$RR = \frac{P(K = 1 | E = 1)}{P(K = 1 | E = 0)}$$

Das Relative Risiko dient als Maßzahl für den Einfluss der Exposition auf die Erkrankung mit einem Wertebereich von 0 bis ∞ . Ein $RR > 1$ spricht für einen schädigenden Einfluss der Exposition im Hinblick auf die Erkrankungswahrscheinlichkeit, ein $RR < 1$ gegen einen schädigenden Einfluss. Bei einem RR von genau 1 besteht kein Einfluss der Exposition.

Im Zahlenbeispiel von Tabelle 1 ergeben sich folgende Erkrankungsraten:

- für die Exponierten $A/(A + C) = 24/32 = 0,75$
- für die Nicht-Exponierten $B/(B + D) = 12/28 = 0,43$.

Daraus folgt: $RR = 0,75/0,43 = 1,74$.

In der Exponiertengruppe besteht also die 1,7-fache Wahrscheinlichkeit, die entsprechende Erkrankung zu bekommen.

Tabelle 1:
Zahlenbeispiel für die Berechnung des Relativen Risikos (RR)

	Exponiert	Nicht exponiert	Σ
Erkrankt	A = 24	B = 12	A + B = 36
Nicht erkrankt	C = 8	D = 16	C + D = 24
Σ	A + C = 32	B + D = 28	60

Beim Untersuchungsdesign der GKV-Studie handelte es sich ja nicht um die Feststellung der Inzidenz einer Erkrankung, sondern um die Prävalenz von Bandscheibenschäden zum Untersuchungszeitpunkt. Es werden

also – analog zum Relativen Risiko – für die verschiedenen Expositionsgruppen die Prävalenzraten berechnet und als Prävalenzratenverhältnis PVR zueinander in Beziehung gesetzt:

$$P_{\text{exp}} / P_{\text{nicht exp}}$$

Rechnerisch ist dieser Vorgang identisch mit der Berechnung des Relativen Risikos.

Ein außerordentlich wichtiger Confounder in Zusammenhangsanalysen zwischen Belastungen und chronischen Erkrankungen ist das Lebensalter. Erstens steigt die Wahrscheinlichkeit einer solchen Erkrankung mit zunehmendem Alter bei Exponierten wie Nicht-Exponierten, zweitens ist bei Dosisbetrachtungen der Erwerb einer bestimmten Dosis zwangsläufig mit einer gewissen Expositionsdauer und damit höherem Lebensalter verbunden. Ein Verfahren zur Korrektur dieser Vermengung von Exposition und Alter bietet der Mantel-Haenszel-Schätzer, der anhand von separaten Kreuztabellen für die einzelnen Altersschichten eine Gewichtung vornimmt, sodass schließlich das alterskorrigierte PVR_{MH} den Einfluss des Risikofaktors unter Kontrolle des Alters wiedergibt.

2.6.2.2 Odds Ratio

Ein anderes häufig verwendetes Maß für den Einfluss der Exposition auf die Krankheit ist das Odds Ratio (OR). Während das RR ein Quotient der Risiken ist, stellt das OR einen Quotient der Chancen (engl.: odds) dar.

Odds sind definiert als:

$$\text{Odds}(P) = \frac{P}{1 - P}$$

d. h. Krankheitswahrscheinlichkeit geteilt durch die Gegenwahrscheinlichkeit. Beispiele: Bei $P = 0,5$ ergibt sich ein Odds von 1, dass heißt die Chance ist „1 : 1“. Für $P = 0,6$

ergibt sich ein Odds von 1,5, d. h. die Chance beträgt 1,5 : 1.

Bezogen auf Tabelle 1 wäre der Quotient A/B die Chance für Exponierte in Bezug auf die Erkrankung und C/D die Chance für Nicht-exponierte. Der Quotient dieser Chancen ist das Odds Ratio:

$$\text{OR} = A/B / C/D = AD / BC = 24 \cdot 16 / 12 \cdot 8 = 384 / 96 = 4,0$$

Die Interpretation des OR erfolgt analog zum Relativen Risiko. Im Unterschied zum RR enthält es aber keinen Bezug zur Größe der zugrunde liegenden Stichprobe. Deshalb ist es nur bei seltenen Erkrankungen ein guter Schätzer des Relativen Risikos, während es bei häufigen Erkrankungen wie im Beispiel von Tabelle 1 deutlich abweicht. Dennoch wird es in der Epidemiologie häufig verwendet – vor allem aus zwei Gründen:

1. Das OR lässt sich rückwärts interpretieren als das Chancenverhältnis, exponiert zu sein, wenn man erkrankt ist.
2. Es ist für komplexe statistische Modelle (z. B. logistische Regression) anwendbar und aufgrund seiner mathematischen Eigenschaften gut interpretierbar. Im folgenden Abschnitt wird dies für die logistische Regression näher erläutert.

2.6.3 Statistische Analyseverfahren

2.6.3.1 Multivariate Regressionsanalysen

An statistischen Verfahren werden im Folgenden überwiegend multivariate Regressionsanalysen durchgeführt. Multiple lineare Regressionen zielen darauf ab, die

Ausprägungsvariation eines Kriteriumsmerkmals in Abhängigkeit von den Ausprägungen verschiedener unabhängiger Variablen zu „erklären“ und in Form einer Regressionsgleichung auszudrücken. Durch dieses Verfahren lässt sich der Einfluss der interessierenden Variable bestimmen bei gleichzeitiger Adjustierung des Einflusses anderer Variablen. Einige zentrale Kennwerte, die sich aus diesen Berechnungen ergeben, sollen kurz erläutert werden [18]:

Die Gewichtung durch Regressionskoeffizienten, die die berücksichtigten Variablen in dieser Gleichung erhalten, gibt Auskunft über die Stärke des Zusammenhangs mit der „Outcome“-Variablen. Durch Standardisierung (z-Transformation) der Regressionskoeffizienten erhält man die Beta-Koeffizienten, die besser miteinander zu vergleichen sind, da Unterschiede in der Maßeinheit ausgeglichen werden.

Der multiple Korrelationskoeffizient R gibt die Korrelation zwischen den beobachteten und geschätzten Werten der beteiligten abhängigen Variablen an. R^2 gibt den Anteil der Variation der abhängigen Variablen an, der durch das Regressionsmodell erklärt wird, und ist damit ein Maß für die Güte der Anpassung eines linearen Modells. Schließlich wird im Rahmen der SPSS-Prozedur ein korrigiertes R^2 errechnet, das eine Überschätzung des Stichproben- R^2 ausgleicht, indem der Stichprobenumfang und die Anzahl der unabhängigen Variablen einbezogen werden.

2.6.3.2 Logistische Regression

Eine Sonderform der Regressionsanalyse ist die logistische Regression, die darauf

abzielt, die Ausprägungen eines dichotomen Kriteriums – z. B. das Vorliegen einer Diagnose – in Abhängigkeit von den Ausprägungen verschiedener unabhängiger Variablen oder Prädiktoren zu „erklären“ und in Form einer Regressionsgleichung auszudrücken. Durch dieses Verfahren lässt sich der Einfluss der interessierenden Variable bei gleichzeitiger Adjustierung des Einflusses anderer Variablen bestimmen.

Die logistische Regression ist die Methode der Wahl, wenn es sich um eine binäre Zielvariable handelt, die das Eintreten bzw. Nichteintreten eines Ereignisses, z. B. einer Krankheit, misst. Die Regressionsgleichung schätzt die Auftretenswahrscheinlichkeit dieses Ereignisses in Abhängigkeit von den Werten der unabhängigen Variablen oder Prädiktoren, die u. U. in mehreren Auswahlschritten als signifikant ausgewählt werden.

Die Güte des resultierenden Gesamtmodells kann bei jedem Schritt durch verschiedene Methoden wie z. B. durch den Likelihood-Ratio-Test (LRT) geprüft werden (ausführliche Diskussion dieser Methoden z. B. in [19]). In der SPSS-Prozedur „binäre logistische Regression“ werden diese Maße unter den Rubriken „Omnibus-Tests der Modellkoeffizienten“ und „Modellzusammenfassung“ verwendet. Besonders interessant ist die R-Quadrat-Berechnung nach *Nagelkerke*, die aufgrund ihrer mathematischen Besonderheiten wie das Bestimmtheitsmaß bei der multiplen Regression zu deuten ist. Das heißt, es ist abzulesen, wie viel Varianz der abhängigen Variablen durch die betrachteten unabhängigen Variablen erklärt wird [19; 20].

In der epidemiologischen Literatur wird heute häufig das Akaike Information

Criterion (AIC) als Methode zur Auswahl des besten Regressionsmodells empfohlen [21; 22]. Sehr verkürzt gesagt berechnet das AIC für jedes Regressionsmodell aus der Anzahl der Parameter und der Likelihood-Funktion des Modells einen Wert, an dem sich die Anpassungsgüte des Modells ableiten lässt: Das Modell mit dem kleinsten AIC bietet die beste Erklärung im Sinne von größter Vorhersage bei möglichst geringer Anzahl von Parametern. Die AIC-Berechnung wird u. a. vom Statistikprogramm SAS angeboten.

Die Bewertung eines einzelnen Prädiktors aus der Regressionsanalyse geht von seinem errechneten Regressionskoeffizienten B aus. Zunächst berechnen Statistikprogramme eine Teststatistik (Wald-Statistik oder Likelihood Ratio (LR)), mit der geprüft wird, ob sich durch Hinzunahme des betreffenden Prädiktors die Modellanpassung signifikant verbessert. Vor allem aber lässt sich aus dem Regressionskoeffizienten B direkt das Odds Ratio (OR) berechnen: $OR = \exp(B)$. Für jede Variable, die in der Regressionsgleichung enthalten ist, lässt sich das OR als „Chancenverhältnis“ exponierter und nicht exponierter Personen angeben, das für den gleichzeitigen Einfluss aller anderen Variablen, die auch im Modell sind, adjustiert ist. Zum Beispiel ließe sich in dieser Auswertung angeben, um wie viel größer die „Chance“ eines LWS-Schadens bei Überschreitung eines gewissen Expositionsmaßes ist im Vergleich mit der geringeren Expositionsstufe. OR-Werte > 1 entsprechen einer Erhöhung der Chance, solche < 1 einer Erniedrigung.

Zusätzlich zum OR wird das Konfidenzintervall ($CI_{95\%}$) berechnet. Dieses gibt an, dass bei einer Wiederholung der Studie unter gleichen Bedingungen der Effektschätzer

wieder mit 95-%-iger Wahrscheinlichkeit in dem angegebenen Intervall liegen würde. Die Signifikanz eines OR hängt davon ab, ob im Intervall der Wert 1 eingeschlossen ist oder nicht. Beispiel: Falls $OR = 1,25$ und $CI_{95\%}: 1,05/2,0$, dann spricht man von einem signifikanten Ergebnis.

2.6.3.3 Weitere Auswerteverfahren

In einem späteren Auswertungsschritt werden einzelne wichtige Ergebnisse noch mit alternativen Auswertemethoden überprüft und differenzierter betrachtet. So wird das schwingungsbedingte Risiko der Diagnose „Lumbalsyndrom“ in Abhängigkeit von Lebensalter und Schwellenwert der Belastung zusätzlich durch Berechnung des populationsattributablen Risikos (PAR) dargestellt. Die möglichen Einflussfaktoren für die klinische Diagnose „Lumbalsyndrom“ und die Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“ werden zusätzlich untersucht, indem über Poissonregressionen [23] Relative Risiken (Incident Rate Ratios IRR) errechnet werden.

3 Neue Kennwerte der Schwingungsbelastung des GKV-Kollektivs

3.1 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertungen

3.1.1 Mittelwertvergleich der alten und neuen frequenzbewerteten Beschleunigungen

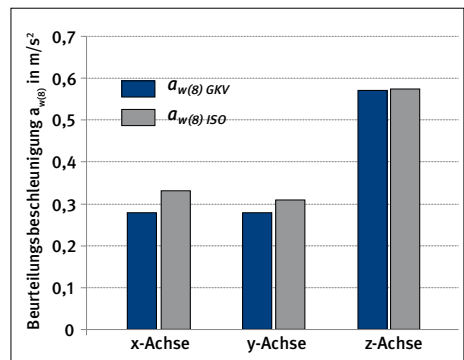
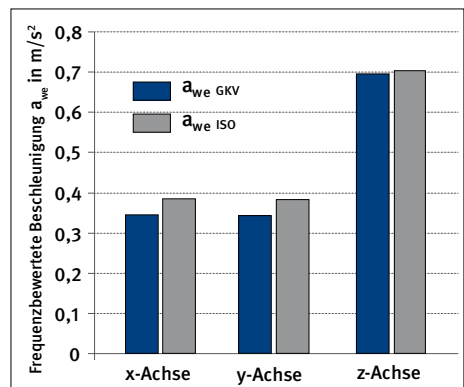
Abbildung 1 gibt einen ersten Eindruck von den Mittelwertunterschieden zwischen den Originaldaten der GKV-Studie [7] und den nach der ISO-Norm [1] korrigierten Messwerten, die sich für die energieäquivalenten Mittelwerte der frequenzbewerteten Beschleunigung a_{we} bzw. die Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in den drei Achsen ergeben.

Die Tabellen 2 und 3 geben die grundlegenden statistischen Kennwerte ausführlicher wieder. Beide Tabellen verdeutlichen, dass die Korrekturfaktoren in dieser Stichprobe bei den Schwingungsbelastungen in x- und y-Richtung zu einem deutlichen Anstieg der Werte führen, während sich in z-Richtung im Mittel kaum etwas bewegt. Begründet sind diese Unterschiede in der Ausweitung des Frequenzbereiches bei der Messung in x- und y-Richtung. Für den energieäquivalenten Mittelwert der frequenzbewerteten Beschleunigung ergibt sich durch die Korrekturfaktoren sowohl in der x- als auch in der y-Achse ein Anstieg um 11,6 %, in der z-Achse dagegen nur um 1,0 %.

Allerdings wird in VDI-2057-1:2002 [2] auch festgestellt, dass gerade in z-Richtung je nach Frequenzspektrum deutliche

Änderungen in beide Richtungen erwartet werden können.

Abbildung 1:
Mittelwerte der energieäquivalenten frequenzbewerteten Beschleunigung a_{we} (oben) und der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ (unten) in den drei Schwingungsachsen; Originalwerte der früheren GKV-Studie [7] und die nach ISO 2631-1:1997 [1] korrigierten Werte ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)



Zur genaueren Abklärung der Auswirkungen der Korrekturfaktoren ist in Tabelle 4 dargestellt, wie sich der Wert der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ für die 1477 Tätigkeitszeiträume in allen drei Schwingungsrichtungen durch die Anwendung der Korrekturfaktoren ändert.

Für die x- und y-Achse zeigen sich fast identische Tendenzen: Nur für 2 bzw. 3 % der Auswertungen ergibt sich keine Veränderung. In allen anderen Fällen zeigt sich eine Zunahme der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$, die

sich für fast 80 % im Bereich bis $0,05 \text{ m/s}^2$ bewegt. Nur in ganz wenigen Fällen beträgt die Zunahme mehr als $0,1 \text{ m/s}^2$.

Ganz anders stellt sich die Veränderung für die z-Achse dar: In mehr als einem Drittel der Fälle ergibt sich eine Abnahme der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ mit Werten bis zu $-0,1 \text{ m/s}^2$, für fast 40 % dagegen keine Veränderung. Die restlichen 25 % zeigen eine Zunahme in einem breit gestreuten Bereich bis zu einem Maximum von $0,24 \text{ m/s}^2$.

Tabelle 2:

Mittelwerte der energieäquivalenten frequenzbewerteten Beschleunigung (a_{wex} , a_{wey} , a_{wez}) für die Originalwerte der früheren GKV-Studie [7] und die nach ISO 2631-1:1997 [1] (korrigierte Werte ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)

Statistische Kennwerte in m/s^2	x-Achse		y-Achse		z-Achse	
	a_{wex} GKV	a_{wex} ISO	a_{wey} GKV	a_{wey} ISO	a_{wez} GKV	a_{wez} ISO
Mittelwert	0,345	0,385	0,344	0,384	0,697	0,704
Standardabweichung	0,17	0,19	0,19	0,21	0,29	0,28
Median	0,314	0,338	0,286	0,300	0,650	0,651
Minimum	0,07	0,08	0,07	0,08	0,05	0,05
Maximum	1,14	1,31	1,04	1,16	2,13	2,02

Tabelle 3:

Mittelwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in den drei Schwingungsrichtungen für die Originalwerte der früheren GKV-Studie [7] und der nach ISO 2631-1:1997 [1] korrigierten Werte ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)

Statistische Kennwerte in m/s^2	x-Achse		y-Achse		z-Achse	
	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO
Mittelwert	0,279	0,311	0,278	0,310	0,571	0,575
Standardabweichung	0,14	0,15	0,15	0,17	0,26	0,24
Median	0,248	0,263	0,221	0,246	0,526	0,542
Minimum	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Maximum	1,08	1,25	0,98	1,10	1,90	1,81

Tabelle 4:

Ausmaß der Veränderung der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in m/s^2 in den drei Schwingungsrichtungen durch Anwendung der Korrekturfaktoren nach ISO 2631-1:1997 [1]; Anzahl der jeweiligen Tätigkeitszeiträume absolut und prozentual ($n = 1477$)

Ausmaß der Veränderung des $a_{w(8)}$	x-Achse	y-Achse	z-Achse
Abnahme des Wertes von 0,05 bis 0,1	---	---	103 (7,0 %)
Abnahme des Wertes bis zu 0,05	---	---	451 (30,5 %)
keine Veränderung	33 (2,2 %)	49 (3,3 %)	581 (39,3 %)
Zunahme bis $< 0,05$	1165 (78,9 %)	1139 (77,1 %)	69 (4,7 %)
Zunahme von 0,05 bis $< 0,1$	262 (17,7 %)	273 (18,5 %)	195 (13,2 %)
Zunahme von 0,1 bis $< 0,2$	17 (1,2 %)	16 (1,1 %)	75 (5,1 %)
Zunahme $> 0,2$	---	---	3 (0,2 %)

3.1.2 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertung nach Tätigkeitsgruppen

Da die Korrekturfaktoren insbesondere in z-Richtung sehr stark vom konkreten Arbeitsgerät oder Fahrzeug abhängen, soll abschließend betrachtet werden, welche Unterschiede zwischen den alten und den korrigierten Beurteilungsbeschleunigungen deutlich werden, wenn die Schwingungszeiträume nach Tätigkeiten gruppiert werden, d. h. nach der Einordnung des Teilnehmers

als Gabelstapler-, Lkw- oder Erdbaumaschinenfahrer. (Es war also die aktuelle Fahrtätigkeit ausschlaggebend, und die vereinzelt Fälle, in denen in der Arbeitsanamnese auch andersartige Fahrtätigkeiten erscheinen, wurden nicht korrigiert.)

Wie Tabelle 5 zeigt, ergeben sich in der x- und y-Richtung bei den Lkw-Fahrern die niedrigsten und bei den Erdbaumaschinenfahrern die höchsten Ausgangswerte.

Tabelle 5:

Mittelwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in den drei Schwingungsrichtungen für die drei Fahrergruppen — Originalwerte der früheren GKV-Studie [7] und der nach ISO 2631-1:1997 [1] korrigierten Werte ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)

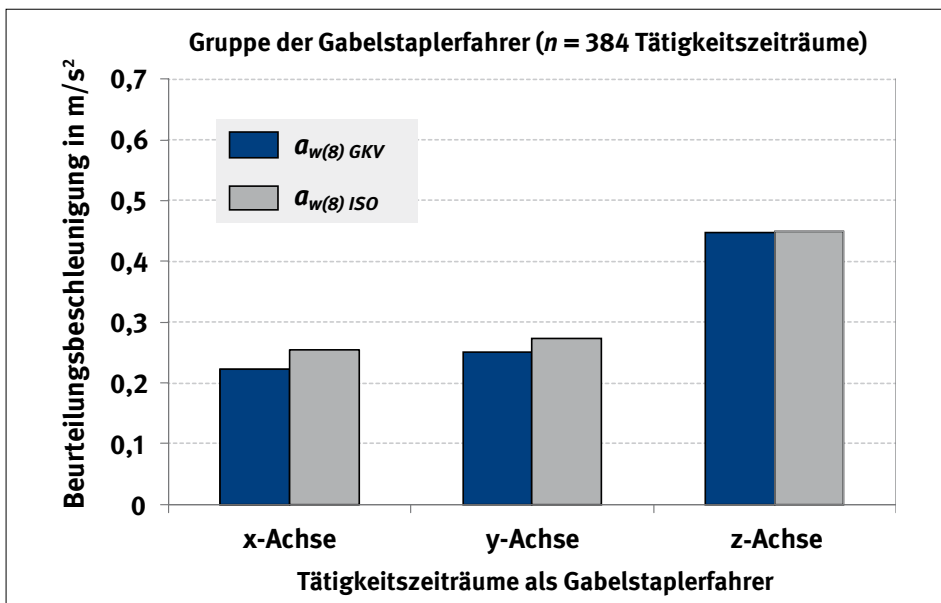
Fahrergruppe	n	x-Achse m/s^2		y-Achse m/s^2		z-Achse m/s^2	
		$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO
Gabelstapler	384	0,222	0,254	0,250	0,274	0,448	0,450
Lastkraftwagen	372	0,213	0,239	0,193	0,223	0,551	0,532
Erdbaumaschinen	721	0,342	0,378	0,337	0,374	0,646	0,664

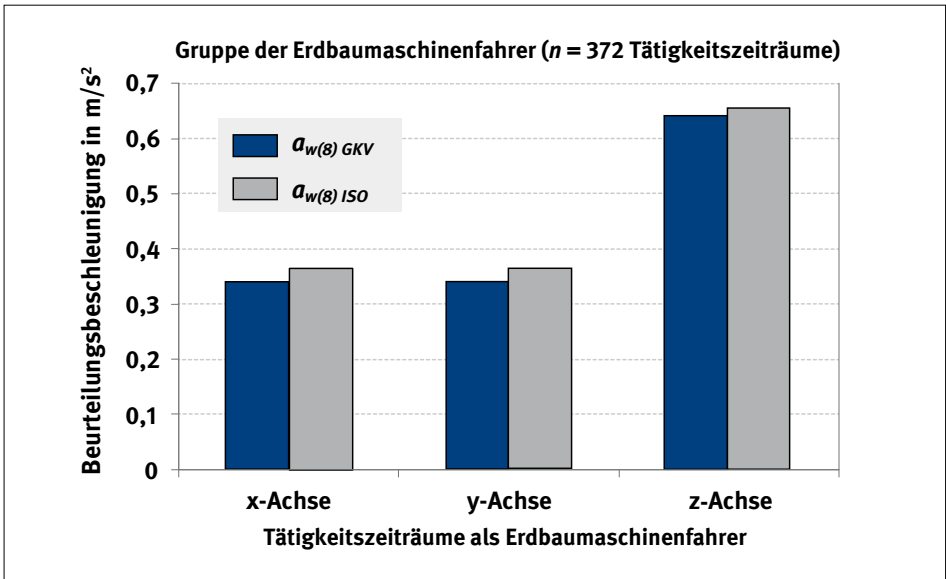
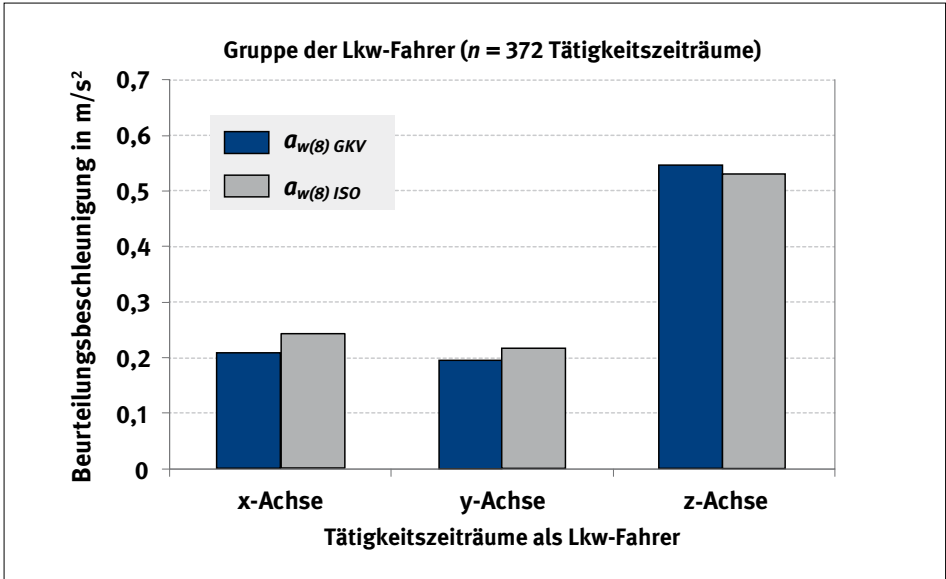
Der Anstieg der Werte durch die Korrekturfaktoren ist für alle drei Tätigkeitsgruppen relativ ähnlich. In z-Richtung ergibt sich für die Gabelstaplerfahrer bei niedrigen Ausgangswerten keine Veränderung, die Lkw-Fahrer verzeichnen einen leichten Rückgang der

mittleren Beurteilungsbeschleunigung, $a_{w(8)}$ und die Erdbaumaschinenfahrer zeigen vom höchsten Ausgangswert aus einen weiteren leichten Anstieg. In Abbildung 2 sind die Veränderungen für die drei Fahrergruppen noch einmal gegenübergestellt.

Abbildung 2:

Mittelwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in den drei Schwingungsrichtungen für die drei Tätigkeitsgruppen; Originalwerte der früheren GKV-Studie [7] und der nach ISO 2631-1:1997 [1] korrigierten Werte ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)





3.2 Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte

3.2.1 Häufigkeitsverteilungen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte

Tabelle 6 gibt Kennwerte der Häufigkeitsverteilung von verschiedenen Belastungsmaßen für die 1477 Tätigkeitszeiträume der Studie

Tabelle 6:

Häufigkeitsverteilung (Minimum, Maximum, Quartile) von sechs verschiedenen Belastungsmaßen für die Gesamtheit der Tätigkeitszeiträume ($n = 1477$)

Belastungsmaß	Minimum	25 %	50 %	75 %	100 %
Messgrößen in m/s^2					
Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$	0,02	0,39	0,54	0,71	1,81
Tagesexposition A(8) als a_w nach Lärm-VibrationsArbSchV	0,05	0,40	0,57	0,78	1,81
Vektorbetrag $a_{wv(8)}$ mit $k = 1$ in jeder Achse	0,05	0,49	0,67	0,95	2,02
Vektorbetrag $a_{wv(8)}$ mit $k = 1,4$ in x- und y-Achse	0,07	0,57	0,76	1,13	2,60
Messgrößen in $m/s^{1,75}$					
estimated VDV z-Achse	0,54	7,85	10,92	14,03	34,82
VDV nach EU-Richtlinie	1,36	8,24	11,41	15,60	34,82

Zwischen der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ in z-Richtung und der Tagesexposition A(8), also dem höchsten Effektivwert aller drei Achsen (unter Gewichtung der x- und y-Achse mit dem Faktor 1,4), wird über alle Quartile hinweg eine ganz leichte Verschiebung zu höheren Belastungswerten deutlich: Es gibt also wohl nur wenige Fälle, in denen ein Wert aus der x- oder y-Richtung den z-Wert übertrifft und damit zu einer höheren

wieder. Abbildung 3 zeigt zur grafischen Verdeutlichung die kumulierte Häufigkeitsverteilung für jedes Maß. Der Übersichtlichkeit halber wird hier nur die Bewertung der Schwingungsbeschleunigung in z-Richtung verglichen mit denjenigen Belastungsmaßen, die zusätzlich die x- bzw. z-Achse berücksichtigen.

Tagesexposition A(8) führt. An beiden Maßen lässt sich aber auch ablesen, dass mehr als die Hälfte aller erhobenen Tätigkeitszeiträume eine Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ oder eine Tagesexposition A(8) von mehr als $0,5 m/s^2$ aufweist. Beim 3. Quartil wird sowohl bei $a_{wz(8)}$ als auch bei A(8) ein Belastungswert von $0,71$ bzw. $0,78 m/s^2$ erreicht. Das letzte Viertel der Stichprobe zeigt für $a_{wz(8)}$ und auch für A(8) eine sehr

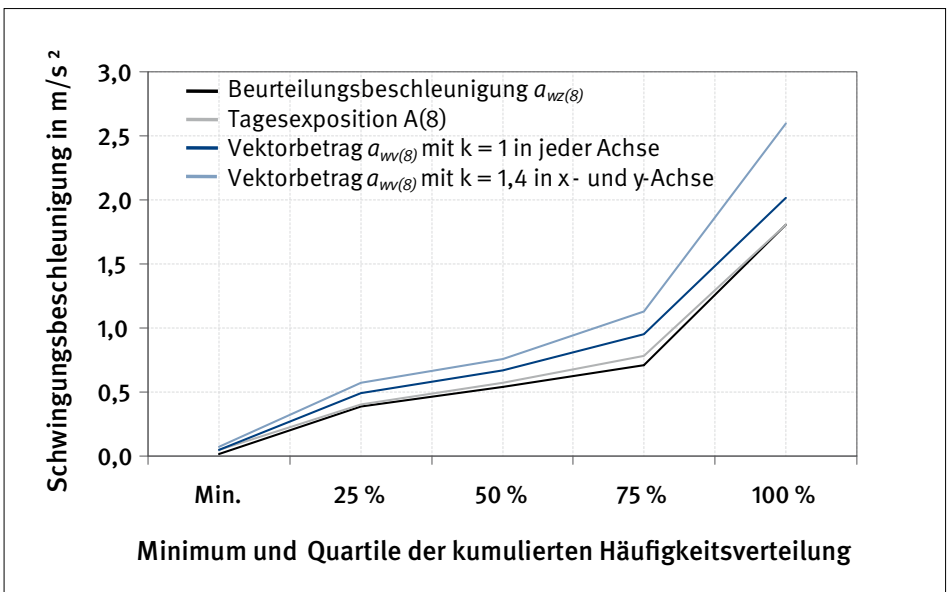
breite Streuung der Werte in einem hohen Belastungsbereich bis zu einem Maximalwert von $1,81 \text{ m/s}^2$.

Bei der Vektorenberechnung zeigt sich in Abbildung 3, dass unter Berücksichtigung der höheren Korrekturfaktoren in x- und y-Achse natürlich höhere Werte als ohne Korrekturfaktoren auftreten. Leider lassen

sich diese Vektorbeträge nicht zu bekannten Richt- oder Grenzwerten in Beziehung setzen, damit ihre Bedeutung besser abgeschätzt werden könnte. Es fällt nur auf, dass die Werte im letzten Quartil besonders stark ansteigen – an einigen Arbeitsplätzen muss demnach eine erhebliche Belastung in zwei oder allen drei Achsen vorliegen.

Abbildung 3:

Kumulative Häufigkeitsverteilung (Minimum und Quartile) verschiedener Belastungsmaße für $n = 1477$ Tätigkeitszeiträume



Betrachtet man in Tabelle 6 die beiden Kennwerte des „vibration dose value“, zeigen sich beim VDV nach EU-Richtlinie natürlich auch etwas höhere Werte als beim eVDV aufgrund der Berücksichtigung des Maximums aus den drei Schwingungsrichtungen. Interessant sind die leichten Unterschiede zwischen den Häufigkeitsverteilungen für die beiden Belastungskennwerte, die nach der EU-Richtlinie

angewendet werden dürfen: Ermittelt man die Tagesexposition $A(8)$ auf der Grundlage des a_w -Wertes, dann liegt der Auslösewert von $0,5 \text{ m/s}^2$ im 40. Perzentil und der Expositionsgrenzwert von $1,15 \text{ m/s}^2$ im 97. Perzentil. Betrachtet man alternativ den VDV, liegt der Auslösewert von $9,1 \text{ m/s}^{1,75}$ im 33. und der Expositionsgrenzwert von $21 \text{ m/s}^{1,75}$ im 93. Perzentil. In der vorliegenden Stichprobe

führt das VDV-Verfahren also dazu, dass etwa 7 % mehr Tätigkeitszeiträume den Auslösewert und etwa 4 % mehr den Grenzwert überschreiten.

3.2.2 Interkorrelationen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte

Betrachtet man in Tabelle 7 die Korrelationen zwischen den sechs bisher behandelten Belastungsmaßen, so wird nochmals

deutlich, dass die Übereinstimmung zwischen allen Maßen sehr hoch ist — offensichtlich dominiert der Wert in z-Richtung.

Die geringste Korrelation zeigt sich zwischen dem Vektorbetrag $a_{wv(8)}$ mit den Korrekturfaktoren $k = 1,4$ in x- und y-Richtung einerseits und den nur auf die z-Richtung bezogenen Maßen andererseits: der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ mit $r = 0,904$ sowie dem eVDV ($r = 0,900$).

Tabelle 7:

Interkorrelationen der sechs Belastungsmaße aus Tabelle 6 ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)

Belastungsmaß	Tagesexposition A(8)	$a_{wv(8)}$ $k_{x,y,z} = 1$	$a_{wv(8)}$ $k_{x,y} = 1,4$	eVDV z-Achse	VDV lt. EU
Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$	0,954	0,950	0,904	0,982	0,928
Tagesexposition A(8)	---	0,985	0,969	0,939	0,982
$a_{wv(8)}$ ($k_{x,y,z} = 1$)		---	0,992	0,942	0,973
$a_{wv(8)}$ ($k_{x,y} = 1,4$)			---	0,900	0,962
eVDV (z-Achse)				---	0,949

Pearson-Korrelationskoeffizienten; alle Korrelationen statistisch signifikant ($p < 0,001$)

Zwischen korrespondierenden Maßen auf a_w - bzw. VDV-Basis — d. h. zwischen $a_{wz(8)}$ und eVDV sowie zwischen Tagesexposition A(8) und dem VDV nach [3] — ergeben sich die höchsten Korrelationen von jeweils $r = 0,982$. Trotz der hohen Korrelationen ist grundsätzlich nicht auszuschließen, dass sich je nach Belastungsbedingungen größere Verschiebungen zwischen den Maßen in der Bewertung einer individuellen Belastung ergeben könnten.

3.2.3 Vergleich von Tagesexposition A(8) und Beurteilungsbeschleunigung

$a_{wz(8)}$

Um beurteilen zu können, inwieweit sich die Abweichungen zwischen diesen Belastungsmaßen auf die Zusammenhangsanalysen mit gesundheitlichen Parametern auswirken können, sind die Verschiebungen näher zu betrachten, die sich durch die Wahl des einen oder anderen Maßes ergeben. Im Vergleich zur Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ können sich bei der Tagesexposition A(8) nur Zuwächse in den Belastungswerten ergeben. Bildet man die Differenz „Tagesexposition A(8) minus $a_{wz(8)}$ “, so ergibt sich für

385 der 1477 Tätigkeitszeiträume in der Tat ein Zuwachs, d. h. die Belastung in x- oder y-Richtung übertrifft diejenige in z-Richtung.

Tabelle 8 zeigt anhand von kumulierten Häufigkeiten in Prozent, welche Größenordnung diese Zuwächse erreichen, und Abbildung 4 verdeutlicht dies. Dabei ist auf die Skalierung sowohl in der Tabelle als auch auf der Abbildung zu achten – nämlich bis zu einer

Differenz von $0,05 \text{ m/s}^2$ in Schritten von $0,01$, ab dann in Schritten von $0,1$. Demnach liegen rund 30% der Fälle in einem relativ niedrigen Bereich unter $0,05 \text{ m/s}^2$ Zuwachs, und kaum 50% der Fälle überschreiten einen Wert von $0,1 \text{ m/s}^2$ oder höher. Immerhin steigt der Belastungswert für rund 17% der Zeiträume um mehr als $0,2 \text{ m/s}^2$ bis hin zu einem maximalen Zuwachs von $0,62 \text{ m/s}^2$.

Tabelle 8:

Zuwachs der Belastung in m/s^2 bei Betrachtung der Achse mit maximalem Wert, d. h. Differenz Tagesexposition $A(8)$ minus Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ – kumulierte Häufigkeit der Werte in Prozent ($n = 385$ Tätigkeitszeiträume)

Differenz Tagesexposition $A(8)$ minus $a_{wz(8)}$	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,04	< 0,05	< 0,1	< 0,2	< 0,3	< 0,5
Kumulierte Häufigkeit in %	6,0	11,7	20,3	25,5	29,6	50,6	82,9	94,5	99,0

Die 385 Tätigkeitszeiträume verteilen sich auf 216 Personen, von denen über die Hälfte der Tätigkeitsgruppe der Erdbaumaschinenfahrer zuzurechnen ist. In allen Fällen, in denen die Belastungshöhe infolge Berücksichtigung des höchsten $a_{w(8)}$ -Wertes aus den drei Achsen um mehr als $0,2 \text{ m/s}^2$ steigt, handelt es sich bei den Arbeitsgeräten um Erdbaumaschinen (hauptsächlich Radlader).

Die horizontalen Schwingungsexpositionen werden auch im Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag) erfasst, insbesondere bei Gewichtung der x- und y-Achsen mit $k = 1,4$. Deshalb soll im Folgenden betrachtet werden, ob diejenigen Fälle, die laut Tabelle 8 einen Zuwachs zu verzeichnen hatten – also einen höheren Wert in x- oder y-Richtung gegenüber der z-Richtung aufweisen –, auch beim Schwingungsgesamtwert auffallen, oder mit anderen Worten, ob sich

diese beiden Maße mehr oder weniger überlappen. In Tabelle 9 werden dazu zwei Gruppen gegenüber gestellt:

- in der ersten Zeile diejenigen, deren höchste Belastung in z-Achse liegt (für die sich also bei Berechnung der Tagesexposition $A(8)$ „kein Zuwachs“ ergibt),
- in der zweiten Zeile diejenigen, deren höchste Belastung in x- oder y-Achse liegt (also die 385 Zeiträume aus Tabelle 8 mit einem „Zuwachs der Belastung“ bei Tagesexposition $A(8)$).

In den Spalten wird für jede der beiden Gruppen angegeben, wie sie sich prozentual auf die vier Quartile der Variablen Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ verteilen.

Abbildung 4:

Kumulierte prozentuale Häufigkeiten für 385 Tätigkeitszeiträume mit Zuwachs der Belastung in x- oder y-Achse bei Betrachtung der Achse mit maximalem Wert, d. h. Differenz Tagesexposition $A(8)$ minus Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ (m/s^2)

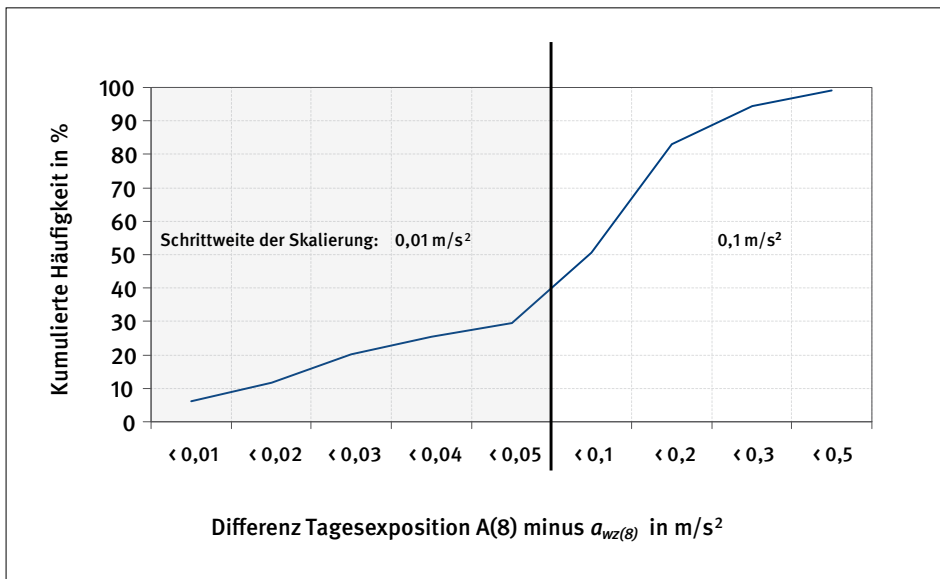


Tabelle 9:

Zusammenhang zwischen der Höhe des Schwingungsgesamtwertes $a_{wv(8)}$ in Quartilen und der Lokalisation der höchsten Belastung in z-Achse vs. x- oder y-Achse

Achse mit der höchsten Belastung	Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag) aufgeteilt in Quartile				Gesamt
	25 %	50 %	75 %	100 %	
z-Achse	320/86,5 %	309/83,3 %	257/69,1 %	206/56,6 %	1092/73,9 %
x-/y-Achse	50/13,5 %	62/16,7 %	115/30,9 %	158/43,4 %	385/26,1 %
Gesamt	370/100,0 %	371/100,0 %	372/100,0 %	364/100,0 %	1477/100,0 %

Tätigkeitszeiträume, bei denen in der x- oder y-Achse höhere Werte als in der z-Achse gemessen wurden, haben auch häufiger einen hohen bis sehr hohen Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$: Fast 75 % dieser Tätigkeitszeiträume (273 von 385) sind auch im dritten und vierten Quartil des

Schwingungsgesamtwertes $a_{wv(8)}$ zu finden. Allerdings sind die Aspekte „Achse mit höchster Belastung“ und „Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ “ nicht deckungsgleich; der $a_{wv(8)}$ kann von jeder der drei Achsen dominiert werden. Für die weiteren Analysen empfiehlt es sich also, weiterhin alle genannten

Belastungsmaße nebeneinander einzusetzen, um weitere Erkenntnisse über ihre prognostische Aussagekraft zu erhalten.

Abschließend soll zum Verhältnis von Tagesexposition $A(8)$ und den drei Schwingungsachsen ein weiterer Aspekt betrachtet werden: Ein Großteil der statistischen Auswertungen in den folgenden Abschnitten beruht auf dem maximalen Wert der Tagesexposition $A(8)$ aus den verschiedenen Tätigkeitszeiträumen des Studienteilnehmers. Diese höchste Tagesexposition $A(8)$ des Arbeitslebens für die 388 Personen entspricht entweder dem $a_{wz(8)}$ oder dem mit 1,4 gewichteten $a_{wx(8)}$ bzw. $a_{wy(8)}$. Der Wert für $A(8)$ ergibt sich:

- in 269 Fällen (69,3 %) aus der z-Achse
- in 75 Fällen (19,3 %) aus der y-Achse
- in 44 Fällen (11,3 %) aus der x-Achse.

3.2.4 Korrelationen zwischen den Achsen bei beschleunigungs- und kraftbezogenen Beurteilungsgrößen

Im Folgenden sollen die Korrelationen zwischen den drei Beurteilungsbeschleunigungen

a_w in z-, x- und y-Achse untereinander betrachtet werden, die noch einmal einen anderen Aspekt des Verhältnisses zwischen den drei Achsen beschreiben. Es bietet sich an, dabei auch die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen einzubeziehen, die ja auch für die z- und y-Achse vorliegen. Tabelle 10 gibt die Interkorrelationen wieder.

Zu den drei Schwingungsachsen ist festzuhalten, dass die Interkorrelationen zwischen den Beurteilungsbeschleunigungen zwar recht hoch sind, aber doch weit von 1 entfernt. Insbesondere zwischen der z-Achse einerseits und der x- und y-Achse andererseits liegt der Wert nur bei 0,67, während a_{wx} und a_{wy} immerhin einen Wert von $r = 0,82$ erreichen. Bei den kraftbezogenen Werten zeigt sich mit 0,73 ein etwas stärkerer Zusammenhang zwischen z- und y-Achse.

Innerhalb einer Schwingungsachse zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Belastungsgrößen. Die kraftbezogenen Maße a_{Fz} für die LWS-Segmente L3-L4 und L5-S1 korrelieren praktisch zu 1 miteinander und mit der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ zu 0,92 bzw. 0,93. In der y-Achse liegt die Korrelation zwischen $a_{wy(8)}$ und $a_{Fy(8)}$ ebenfalls bei 0,93.

Tabelle 10:
Interkorrelationen zwischen Belastungsmaßen in den drei Achsen ($n = 1477$ Tätigkeitszeiträume)

Belastungsmaß	$a_{wz(8)}$	$a_{Fz(8)}$ L3-L4	$a_{Fz(8)}$ L5-S1	$a_{wy(8)}$	$a_{Fy(8)}$	$a_{wx(8)}$
$a_{wz(8)}$	---	0,929	0,923	0,713	0,673	0,675
$a_{Fz(8)}$ L3-L4		---	0,999	0,713	0,735	0,630
$a_{Fz(8)}$ L5-S1			---	0,709	0,730	0,621
$a_{wy(8)}$				---	0,932	0,817
$a_{Fy(8)}$					---	0,749

Pearson-Korrelationskoeffizienten; alle Korrelationen sind statistisch signifikant ($p < 0,001$)

Innerhalb einer Schwingungsachse zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Belastungsgrößen. Die kraftbezogenen Maße a_{Fz} für die LWS-Segmente L3-L4 und L5-S1 korrelieren praktisch zu 1 miteinander und mit der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ zu 0,92 bzw. 0,93. In der y-Achse liegt die Korrelation zwischen $a_{wy(8)}$ und $a_{Fy(8)}$ ebenfalls bei 0,93.

Für die weiteren Analysen ist also festzuhalten, dass die Belastungen in den einzelnen Schwingungsrichtungen im Untersuchungskollektiv recht hoch korrelieren. In der Regel wird eine hohe Belastung in einer Achse also auch mit relativ hohen Belastungen in den anderen Achsen verbunden sein, aber im Einzelfall mit unterschiedlicher Ausprägung. In Bezug auf die verschiedenen Berechnungsansätze – Beschleunigung vs. Kraftübertragung – ist dagegen eine äußerst hohe Übereinstimmung festzustellen.

3.3 Vergleich verschiedener Dosismodelle und Schwellenkriterien

3.3.1 Korrelationen zwischen den Dosismodellen

Zu einer ersten Abschätzung der ausgewählten sieben Dosismodelle werden in Tabelle 11 die Interkorrelationen dargestellt, wie sie sich für die 388 Studienteilnehmer ergeben. Die Modelle D1 bis D4, die alle auf $a_{w(8)}$ -Werten beruhen, korrelieren ausnahmslos sehr deutlich miteinander mit Werten zwischen $r = 0,938$ (D1 mit D4) und $r = 0,994$ (D3 mit D4). Die leichten Unterschiede in den Korrelationskoeffizienten spiegeln sehr plausibel wider, in welchem Maße die drei Schwingungsachsen jeweils in die Dosiswerte einfließen. Bei so hohen Korrelationen sind keine großen Unterschiede zu erwarten, wenn man die verschiedenen Dosismodelle zu den medizinischen Daten in Beziehung setzt. Dies wird an späterer Stelle überprüft.

Tabelle 11: Interkorrelationen der Dosiswerte nach den Dosismodellen D1 bis D7

Dosismodelle	Basis: a_w -Werte			Basis: Werte in 4. Potenz		
	D2 Tagesexposition A(8)	D3 $a_{wv(8)}$ mit $k_{xyz} = 1$	D4 $a_{wv(8)}$ mit $k_{xy} = 1,4$	D5 eVDV in z-Achse	D6 VDV lt. EU-Richtlinie	D7 Vektorbetrag mit VDV
D1($a_{wz(8)}$)	0,9788	0,9694	0,9374	0,9016	0,8697	0,8363
D2	---	0,9903	0,9763	0,8906	0,8977	0,8753
D3		---	0,9942	0,8907	0,8950	0,8933
D4			---	0,8688	0,8889	0,9011
D5				---	0,9652	0,9330
D6					---	0,9820

Pearson-Korrelationskoeffizienten; alle Korrelationen sind statistisch signifikant ($p < 0,001$)

Bei den Dosismodellen, die auf VDV-Werten beruhen, sind die Interkorrelationen ähnlich hoch — im Maximum mit $r = 0,982$ zwischen D6 und D7. Die höchsten Korrelationen zwischen Modellen auf a_w - und VDV-Basis bestehen plausiblerweise zum einen zwischen den auf der z-Achse basierenden Dosiswerten D1 und D5 ($r = 0,902$) und zum anderen zwischen den Vektorbeträgen in D4 und D7 mit $r = 0,901$. Ebenso nachvollziehbar ist die niedrigste Korrelation, die sich zwischen D1 und D7 mit $r = 0,836$ ergibt.

3.3.2 Vergleich von Schwellenwerten

In den späteren statistischen Zusammenhanganalysen mit medizinischen Daten werden die Dosismodelle zusätzlich mit unterschiedlichen Schwellenwerten zur Berücksichtigung von Tätigkeitszeiträumen berechnet. Tabelle 12 zeigt die Interkorrelationen, die sich für die Dosis auf der Grundlage der Tagesexposition $A(8)$ mit steigenden Schwellenwerten ergeben.

Tabelle 12:

Interkorrelationen zwischen den Werten für die Tagesexposition $A(8)$ bei Anwendung der angegebenen Schwellenwerte von 0 bis $1,15 \text{ m/s}^2$ ($n = 388$ Studienteilnehmer)

Tagesexposition $A(8)$ mit Schwellenwert in m/s^2	0,45	0,5	0,63	0,8	1,15
0	0,9955	0,9929	0,9755	0,9086	0,5949
0,45	---	0,9966	0,9782	0,9060	0,5878
0,5		---	0,9818	0,9073	0,5896
0,63			---	0,9240	0,6009
0,8				---	0,6434
Anzahl Personen unter Schwellenwert belastet	96	112	155	260	361

Pearson-Korrelationskoeffizienten; alle Korrelationen sind statistisch signifikant ($p < 0,001$)

Während zwischen den Dosiswerten ohne Schwellenwert und denen mit Schwellenwert $0,45$ oder $0,5 \text{ m/s}^2$ Korrelationen knapp unter $1,0$ bestehen, nehmen die Korrelationen etwa ab dem Schwellenwert von $0,63 \text{ m/s}^2$ etwas ab und werden mit den weiteren Schwellenerhöhungen immer geringer.

Erstens fallen bei belasteten Personen Tätigkeitszeiträume heraus, in denen sie

evtl. geringer belastet waren, und zweitens liegt natürlich eine zunehmende Anzahl von Personen während des ganzen Arbeitslebens unterhalb des Schwellenwerts und weist damit eine Dosis von Null auf. In der untersten Zeile ist angegeben, wie viele Studienteilnehmer bei dem jeweiligen Schwellenwert als „unbelastet“ gelten würden. Bei der Analyse von Dosiswirkungen ist also auch zu betrachten, welcher Schwellenwert inhaltlich wie methodisch die größte Plausibilität

besitzt. Auf der einen Seite unterscheidet sich in der gegebenen Stichprobe eine Schwelle von $0,45 \text{ m/s}^2$ kaum von einer Schwelle „null“, auf der anderen Seite führen Schwellen von $0,8$ oder $1,15 \text{ m/s}^2$ dazu, dass zwei Drittel oder mehr der Teilnehmer

als unbelastet eingestuft werden. Die Möglichkeit, etwas über bestimmte Schwellenhöhen aussagen zu können, wird also auch bestimmt durch die real gegebene Verteilung der Belastungen in der Kohorte.

4 Zusammenhangsanalysen: Schwingungsbelastung und Lumbalsyndrom

4.1 Analysen mit dem maximalen Tages-Belastungskennwert des Arbeitslebens

4.1.1 Zielkriterium „Lumbalsyndrom“

4.1.1.1 Analysen mit der Tagesexposition A(8)

Da die einschlägigen Regelwerke Tages-Belastungswerte zur Abschätzung einer möglichen gesundheitlichen Gefährdung durch GKV angeben, sollen zunächst Zusammenhänge zwischen den im vorigen Abschnitt genannten Belastungskennwerten und den Diagnosen zum WS-Zustand betrachtet werden. Außerdem haben die tagesbezogenen Kennwerte den Vorteil, dass sie im Unterschied zu Dosiswerten prinzipiell unabhängig vom Lebensalter sind.

Wie schon in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, hatten sich der maximale und der durchschnittliche a_{wz} -(KZ_r-)Wert in der GKV-Studie bereits als signifikante Prädiktoren der Diagnose „Lumbalsyndrom“ erwiesen ([7], S. 130 ff.). Als deutlichste Trennkriterien wurden $a_{wz(8)} = 0,65 \text{ m/s}^2$ (bei maximalem Wert) bzw. $a_{wz(8)} = 0,56 \text{ m/s}^2$ (bei durchschnittlichem Wert) ermittelt. Entsprechend wurde auch jetzt für jeden der oben eingeführten Tages-Schwingungsbelastungskennwerte zum einen der maximale Wert aus den verschiedenen Tätigkeitszeiträumen eines jeden Probanden und zum anderen ein Durchschnittswert des gesamten Arbeitslebens

verwendet, der in Abschnitt 4.2 eingehender behandelt wird.

Exemplarisch ist in Tabelle 13 ausführlich das Ergebnis der logistischen Regression dargestellt, das sich für den maximalen Wert der Tagesexposition A(8) und das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ ergibt. Als wichtigster zusätzlicher Prädiktor wird das Alter am Untersuchungstag einbezogen. In der gesamten Stichprobe von 388 Personen haben 244 Personen (62,9 %) nach Anamnese und klinischer/röntgenologischer Untersuchung die Diagnose „Lumbalsyndrom“ erhalten, 144 nicht. Wie die Tabelle der beobachteten und vorhergesagten Fälle zeigt, ist die Vorhersage von nicht betroffenen Personen bei einer so großen Zahl von Lumbalsyndromen schwierig. Bei einem solchen Größenverhältnis sagt diese Regression ein tatsächlich vorliegendes Lumbalsyndrom mit 89 % gut voraus (hohe positive Korrektheit), nicht jedoch die Beschwerdefreiheit (geringe negative Korrektheit).

Interessanter sind die statistischen Kennwerte zu den beiden Prädiktoren: Zunächst besagen die p-Werte $< 0,05$ für die Wald-Teststatistik, dass sich die ermittelten Werte der Teststatistik signifikant von Null unterscheiden und die jeweiligen Regressionskoeffizienten damit tatsächlich signifikant zur Regressionsgleichung beitragen. Für beide Prädiktoren ergibt sich ein OR > 1 , wobei auch die untere Schranke des Konfidenzintervalls über 1,0 liegt.

Tabelle 13:

Logistische Regression für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit der maximalen Tagesexposition A(8) als Prädiktor (Gesamtstichprobe n = 388) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um 1,0 m/s²)

Diagnose „Lumbalsyndrom“: Klassifizierungstabelle mit zwei Prädiktoren							
Beobachtete Diagnose	Vorhergesagte Diagnose						
	Lumbalsyndrom		Kein Lumbalsyndrom			% Richtige	
Lumbalsyndrom	218		26			89,3	
kein Lumbalsyndrom	110		34			23,6	
Gesamtprozentsatz						64,9	
Variablen in der Regressionsgleichung nach zwei Schritten							
Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	Konfidenzintervall 95 %	
	B	s	T	p	gleich exp(B)	Untere Schranke	Obere Schranke
Konstante	-1,474	0,50					
Alter in Jahren	0,037	0,11	11,04	0,001**	1,038	1,015	1,060
max. A(8)	0,729	0,36	4,03	0,045*	2,072	1,017	4,220
Varianzaufklärung: Nagelkerkes R-Quadrat = 0,059							

Beide Prädiktoren tragen also mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % zu einer Vorhersage des Ereignisses „Lumbalsyndrom“ bei. Da sich das Odds Ratio auf jeweils einen Schritt oder eine Stufe auf der Skala des jeweiligen Prädiktors bezieht, bedeuten die Ergebnisse, dass

- mit jedem Lebensjahr die Chance, die Diagnose „Lumbalsyndrom“ zu erhalten, um das 1,04-Fache steigt,
- mit einem Anstieg des Belastungswertes um 1,0 m/s² die Chance, die Diagnose „Lumbalsyndrom“ zu erhalten, um den Faktor 2,07 steigt.

In Tabelle 6 wurde gezeigt, dass z. B. die Tagesexposition A(8) in unserer Stichprobe Werte von 0,05 bis 1,81 m/s² annimmt und ein Wert von 1,0 schon eine sehr hohe Belastung im vierten Quartil der Belastungswerte darstellt. Ein Belastungsunterschied von 1,0 m/s² ist damit eine Steigerung von Null auf „extrem belastet“. Unter diesem Blickwinkel bekommen die zahlenmäßigen Odds Ratios natürlich ein anderes Gewicht: Das Lebensalter ist eindeutig der stärkste Prädiktor. Aber es bestätigt sich, dass GKV ab einer gewissen Intensität auch unabhängig vom Lebensalter einen signifikanten Risikofaktor für eine degenerative LWS-Veränderung im Sinne der damaligen Diagnose darstellen.

Um dem ermittelten OR-Wert für die tägliche Schwingungsbelastung größere Aussagekraft für praktische Fragestellungen zu verleihen, empfiehlt sich eine lineare Transformation der Belastungswerte mit dem Faktor 10. Danach bezieht sich das OR auf Abstufungen von 0,1 m/s² im Belastungsmaß. Tabelle 14

zeigt, welche neuen Werte für die Prädiktoren sich nun bei der gleichen Regressionsanalyse wie in Tabelle 13 ergeben. Das Odds Ratio beträgt jetzt aufgerundet 1,08; das heißt, mit jedem Zuwachs der Schwingungsbelastung um 0,1 m/s² wächst das Risiko eines Lumbalsyndroms um 8 %.

Tabelle 14:

Logistische Regression für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit der maximalen Tagesexposition A(8) als Prädiktor nach linearer Transformation der Belastungswerte (Gesamtstichprobe $n = 388$) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um 0,1 m/s²)

Prädiktor	Variablen in der Regressionsgleichung nach zwei Schritten						
	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	Konfidenzintervall 95 %	
	B	s	t	p	gleich exp(B)	Untere Schranke	Obere Schranke
Konstante	-1,474	0,50					
Alter in Jahren	0,037	0,11	11,04	0,001**	1,038	1,015	1,060
max. A(8)	0,073	0,36	4,03	0,045*	1,076	1,002	1,155
Varianzaufklärung: Nagelkerkes R-Quadrat = 0,059							

4.1.1.2 Vergleiche mit weiteren Belastungsmaßen

Weitere logistische Regressionen mit der Zielvariable „Lumbalsyndrom“ wurden durchgeführt, in denen statt der Tagesexposition A(8) alternierend die anderen in Abschnitt 2.3 aufgeführten Belastungsmaße verwendet wurden: die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$, der Schwingungsgesamtwert a_{ww} mit $k = 1,0$ für alle Schwingungsachsen und mit $k = 1,4$ für die x- und y-Achse, eVDV in z-Achse und VDV nach EU-Richtlinie. Die Vorgehensweise war jeweils die gleiche: Der maximale Wert aus der Arbeitsanamnese jedes Teilnehmers wurde ermittelt und als zweiter Prädiktor neben

dem Lebensalter (zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung) verwendet.

Das Alter erweist sich in allen Fällen als mit Abstand stärkster Prädiktor, aber hier interessiert vor allem, welcher Parameter der Schwingungsbelastung am ehesten als Prädiktor für gesundheitliche Auswirkungen taugt. Deshalb werden in Tabelle 15 in verkürzter Form die Ergebnisse verglichen, die sich für die verschiedenen Prädiktoren in der jeweiligen Regressionsanalyse ergeben: Angegeben sind jeweils der Regressionskoeffizient B, der p-Wert für die Signifikanz der Teststatistik nach *Wald*, das Odds Ratio mit 95%igem Konfidenzintervall und das Akaike-Kriterium, das sich für das jeweilige

Modell ergibt (im Vergleich zum Alter als alleinigem Prädiktor).

sich für praktische Zwecke annäherungsweise folgende Umrechnung ableiten:

Bezüglich der Kennwerte auf der Basis des VDV stellt sich noch ein weiteres Skalierungsproblem, da die Skala hier deutlich weiter gespreizt ist: Der tägliche Auslösewert in der EU-Richtlinie 2002/44/EG [3] wird mit $0,5 \text{ m/s}^2$ oder $9,1 \text{ m/s}^{1,75}$ angegeben, der tägliche Expositionsgrenzwert mit $1,15 \text{ m/s}^2$ oder $21,0 \text{ m/s}^{1,75}$. Daraus lässt

$$a_w [\text{m/s}^2] = \text{VDV} [\text{m/s}^{1,75}] / 18,25 [\text{s}^{0,25}].$$

Entsprechend wurden für die Regressionen alle Belastungswerte auf VDV-Basis durch 18,25 dividiert, sodass sich die Odds Ratios jetzt auf vergleichbare Spannweiten der Messwert-Skala beziehen.

Tabelle 15:

Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit unterschiedlichen Tages-Schwingungsbelastungskennwerten (Maximalwerte) als Prädiktor (Gesamtstichprobe $n = 388$) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}		AIC
	B	s	t	p				
max. $a_{wz(8)}$	0,068	0,068	0,38	0,076	1,07	0,99	1,15	501,57
max. $a_{wx(8)}$	0,118	0,062	3,58	0,062	1,12	0,99	1,27	501,05
max. $a_{wy(8)}$	0,148	0,057	6,75	0,009	1,15	1,03	1,29	497,84
max. Tagesexposition A(8)	0,073	0,036	4,03	0,045	1,08	1,00	1,16	500,66
max. a_{wv}								
mit $k_{xyz} = 1,0$	0,068	0,031	4,95	0,026	1,07	1,00	1,13	499,72
max. a_{wv}								
mit $k_{xy} = 1,4$	0,060	0,026	5,42	0,020	1,06	1,00	1,11	499,22
max. eVDV	0,067	0,037	3,35	0,068	1,06	0,99	1,14	501,36
max. VDV								
nach EU-Richtlinie	0,073	0,035	4,36	0,037	1,07	1,00	1,15	500,31

Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 502,77

Fett hervorgehoben sind die Ergebnisse mit dem Prädiktor Tagesexposition A(8), der in Tabelle 14 schon dargestellt wurde und hier zum Vergleich wieder erscheint. Betrachtet man die Odds Ratios bei den anderen Belastungswerten, so erreichen fast alle einen ähnlichen Wert von 1,07 oder 1,06. Auffällig

sind vor allem die Beurteilungsbeschleunigungen in x- und y-Achse, die als einzige Prädiktoren höhere OR von 1,12 bzw. 1,15 erreichen. Allerdings liegt die untere Grenze des Konfidenzintervalls für die Beurteilungsbeschleunigung in x-Achse knapp unter 1,0 – wie übrigens auch für die Maße in z-Achse

und für den eVDV, der ebenfalls nur die Beschleunigung in z-Richtung erfasst. Alle anderen Konfidenzgrenzen, die in Tabelle 15 durch Abrundung mit 1,00 wiedergegeben werden, sind > 1 und können daher statistisch als verlässlichere Prädiktoren angesehen werden.

Generell ist also festzuhalten:

- Es zeigen sich keine großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Belastungsmaßen in ihrer Aussagekraft als Prädiktoren für die Diagnose „Lumbalsyndrom“.
- Tendenziell zeigt die Beurteilungsbeschleunigung in y-Richtung $a_{wy(8)}$ etwas bessere Ergebnisse als die anderen Belastungsmaße und die Beurteilungsbeschleunigung in z-Richtung vergleichsweise schwächere Werte.
- Bei fast allen Maßen ergibt sich für diese Stichprobe relativ übereinstimmend mit jedem Belastungszuwachs von $0,1 \text{ m/s}^2$ ein zusätzliches Risiko von 6 bis 7 %, die Diagnose „Lumbalsyndrom“ zu erhalten – natürlich neben dem bereits festgestellten Alterseinfluss.

Schließlich ist noch die letzte Spalte der Tabelle anzusprechen, das Akaike Information Criterion als ein Maß der Güte des jeweiligen Regressionsmodells. Angegeben sind die Werte, die sich für das AIC errechnen lassen mit dem betreffenden Belastungsmaß als Prädiktor neben dem Lebensalter. Dieser Wert ist mit dem AIC-Wert einer Regressionsanalyse, die nur das Lebensalter als Prädiktor enthält, zu vergleichen, d. h. konkret mit 502,8. Die Ergebnisse lassen sich so interpretieren, dass mit jedem einzelnen

dieser Prädiktoren eine bessere Vorhersage getroffen wird als mit dem Lebensalter allein; die deutlich niedrigsten Werte, also die besten Modelle im Sinne des AIC, ergeben sich für die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ mit 497,84 und den Schwingungsgesamtwert a_{ww} mit 499,72. Die Tagesexposition A(8) liegt mit 500,66 im Mittelfeld.

Damit wird nochmals bekräftigt, dass sich die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ als besonders aussagekräftig in Bezug auf die Diagnose „Lumbalsyndrom“ erweist, die Tagesexposition A(8) in dieser Hinsicht einen mittleren Platz einnimmt und die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ schlechter abschneidet. Die Kennwerte auf VDV-Basis führen nach der beschriebenen Anpassung der Skalierung zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie die Kennwerte auf a_w -Basis, wobei auch hier die alleinige Berücksichtigung der z-Achse beim eVDV ein schlechteres Ergebnis liefert.

4.1.2 Bereinigung der Stichprobe

4.1.2.1 Auswirkungen bei verschiedenen Belastungsmaßen

Aus der medizinischen Anamnese in der GKV-Studie ergab sich, dass ein Teil der Personen mit Diagnose „Lumbalsyndrom“ bereits bei Aufnahme der schwingungsexponierten Tätigkeit LWS-Beschwerden aufwies. Zwar ist auch eine Verschlimmerung von bestehenden Beschwerden durch GKV von Belang, aber wenn die Diagnose „Lumbalsyndrom“ als Zielkriterium für die Wirkung von Schwingungseinwirkung dienen soll, sind bei Expositionsbeginn bestehende Vorschädigungen ein möglicher Confounder. In der GKV-Studie wurden diejenigen Personen,

die LWS-Beschwerden bereits bei Expositionsbeginn bzw. im ersten Expositionsjahr angaben, aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen: Als Konsequenz zeigten sich bei dieser bereinigten Stichprobe von $n = 315$ Personen weitaus deutlichere Zusammenhänge zwischen der Diagnose „Lumbalsyndrom“ und den verschiedenen Kennwerten der Schwingungsbelastung ([7], S. 106 ff.).

In dieser bereinigten Stichprobe gibt es 173 Personen mit der Diagnose „Lumbalsyndrom“, also 54,9 gegenüber 62,9 % in der Gesamtstichprobe. Das Durchschnittsalter der Stichprobe ändert sich in Folge der Bereinigung nur geringfügig – im Mittelwert von 40,75 auf 41,24 Jahre; der Median bleibt unverändert bei 41 Jahren. Die ausgeschlossenen Personen waren also im Schnitt relativ jung: im Mittel 38,6 Jahre, Median 39 Jahre, wobei das Minimum bei 23 und das Maximum bei 60 Jahren lag. Im Body Mass Index als Indikator für den wichtigen potenziellen Confounder „Übergewicht“ verändert sich mit der bereinigten Stichprobe praktisch nichts.

In Tabelle 16 werden die Ergebnisse dargestellt, die sich bei identischen Auswertungen wie für Tabelle 15 ergeben, wenn die 73 Personen mit LWS-Beschwerden vor dem Ende des ersten Expositionsjahres ausgeschlossen werden. Zusätzlich aufgenommen sind die Ergebnisse der Regressionsanalysen für die drei kraftbezogenen Beurteilungsgrößen $a_{Fz(8)}$ L3-L4, $a_{Fz(8)}$ L5-S1 und $a_{Fy(8)}$, die bereits in Abschnitt 2.3 vorgestellt wurden.

Im Vergleich zu Tabelle 15 zeigen sich deutlichere Werte für die Bedeutung jedes einzelnen GKV-Prädiktors bei der Vorhersage

der Diagnose „Lumbalsyndrom“. Für fast alle Prädiktoren ergibt sich im Wald-Test eine höhere Signifikanz in ihrem Beitrag zur Regressionsgleichung, und alle führen zu einem höheren OR als in Tabelle 15 mit einer unteren Konfidenzschranke $> 1,0$. Es bestätigt sich also sehr eindrucksvoll, dass der Ausschluss aller Personen mit LWS-Beschwerden vor dem Ende des ersten Expositionsjahres die Störwirkung des Confounders „Vorscheidung“ reduziert und den Zusammenhang zwischen GKV-Belastung und Lumbalsyndrom stärker hervortreten lässt.

Im Vergleich der Prädiktoren untereinander zeigen sich kleine Verschiebungen. Die Beurteilungsbeschleunigung in z-Richtung $a_{wz(8)}$ schneidet jetzt etwas besser ab, während die Beurteilungsbeschleunigung in y-Richtung $a_{wy(8)}$ immer noch die deutlichsten Ergebnisse liefert. Die Tagesexposition A(8) zeigt wiederum leicht bessere Werte als die Kennwerte auf Vektoren- und VDV-Basis. Nimmt man diese Größe als Bezugspunkt, steigt das Risiko, die Diagnose „Lumbalsyndrom“ zu erhalten, in dieser bereinigten Stichprobe mit jeder Belastungszunahme von $0,1 \text{ m/s}^2$ um den Faktor 1,15.

Auch im AIC-Kriterium ergeben sich leichte Verschiebungen: Die niedrigsten Werte < 405 finden sich jetzt bei denjenigen Belastungsmaßen, die alle drei Schwingungsrichtungen berücksichtigen, also bei der Tagesexposition A(8) und den Schwingungsgesamtwerten a_{wv} sowie dem VDV nach EU-Richtlinie. Durch die Bereinigung tritt hier also eine klarere Tendenz hervor.

Recht deutlich sprechen alle bisherigen Ergebnisse dafür, dass die beste Prognose des Lumbalsyndroms bei Berücksichtigung aller drei Schwingungsachsen erreicht wird, wobei die Beschränkung auf den höchsten Wert wie in der Tagesexposition A(8) offenbar eine gute Lösung darstellt.

Abbildung 5 stellt für eine Reihe von Tageskennwerten der Schwingungsbelastung gegenüber, wie sich jeweils die OR und die Konfidenzintervalle für den Prädiktor „Schwingungsbelastung“ verbessern, wenn die Regressionsanalysen mit der bereinigten Stichprobe von $n = 315$ statt der Gesamtstichprobe von $n = 388$ durchgeführt werden.

Tabelle 16:

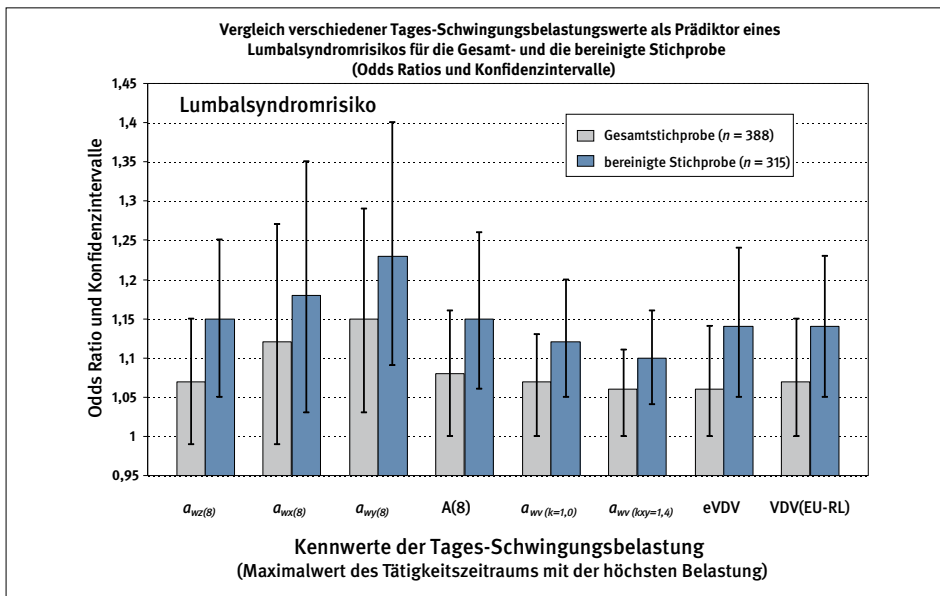
Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit unterschiedlichen Tages-Schwingungsbelastungskennwerten (Maximalwerte) als Prädiktor (bereinigte Stichprobe $n = 315$) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}		AIC
	B	s	t	p				
max. $a_{wz(8)}$	0,144	0,044	10,87	0,001	1,15	1,05	1,25	405,45
max. $a_{wx(8)}$	0,166	0,069	5,85	0,016	1,18	1,03	1,35	410,74
max. $a_{wy(8)}$	0,214	0,064	11,32	0,001	1,23	1,09	1,40	405,11
max. Tagesexposition A(8)	0,140	0,041	11,48	0,001	1,15	1,06	1,24	404,77
max. a_{wv} mit $k_{xyz} = 1,0$	0,120	0,035	11,93	0,001	1,12	1,05	1,20	404,38
max. a_{wv} mit $k_{xy} = 1,4$	0,098	0,029	11,43	0,001	1,10	1,04	1,16	404,92
max. $a_{Fz(8)L3-L4}$	0,11	0,04	8,02	0,000	1,12	1,03	1,21	408,54
max. $a_{Fz(8)L5-S1}$	0,10	0,04	8,64	0,000	1,10	1,03	1,18	407,92
max. $a_{Fy(8)}$	0,20	0,06	10,59	0,000	1,22	1,08	1,38	405,87
max. eVDV	0,137	0,042	10,76	0,001	1,14	1,05	1,24	405,56
max. VDV nach EU- Richtlinie	0,134	0,040	11,45	0,001	1,14	1,05	1,23	404,80

Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 414,89

Abbildung 5:

Risiko eines Lumbalsyndroms durch Schwingungsbelastung im Sitzen. Odds Ratios und Konfidenzintervalle für verschiedene Tageskennwerte der Schwingungsbelastung (Maximalwerte), jeweils für die gesamte ($n = 388$) und die bereinigte Stichprobe ($n = 315$)



4.1.2.2 Aussagekraft der kraftbezogenen Belastungskenngrößen

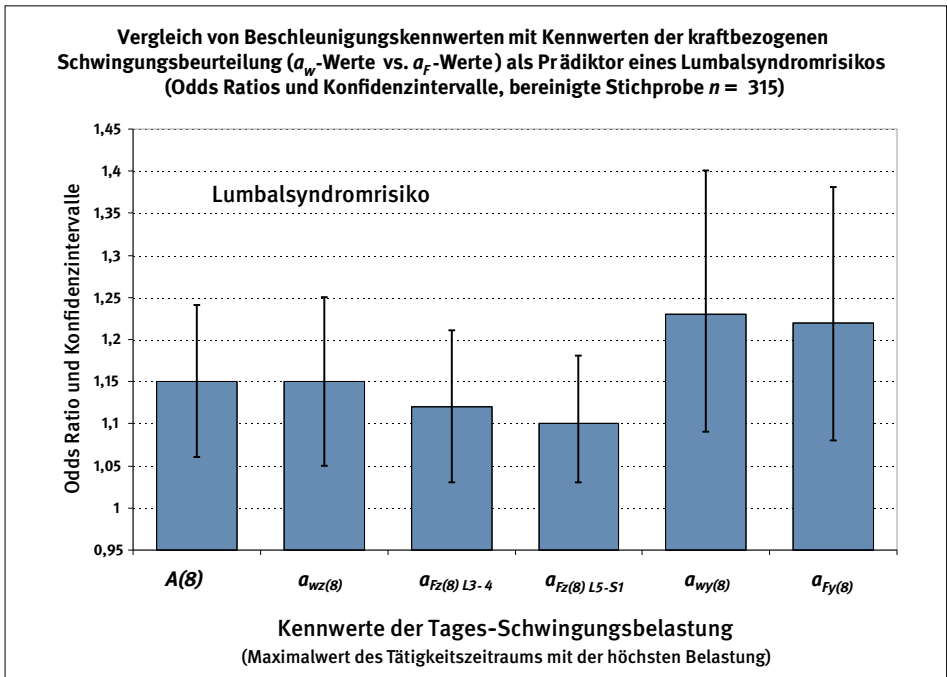
Betrachtet man die in Tabelle 16 neu hinzugekommenen kraftbezogenen Beurteilungskenngrößen, so stimmen die Werte insgesamt relativ gut mit den Ergebnissen für die entsprechenden a_w -Kenngrößen überein. Die Odds Ratios und Konfidenzgrenzen sind nur minimal geringer als bei a_w -Werten in der jeweiligen Schwingungsrichtung. Lediglich die AIC-Werte sind etwas höher, d. h. die Varianzaufklärung ist nicht ganz so effektiv. Zur besseren Übersicht sind in Abbildung 6 noch einmal die Odds Ratios und Konfidenzintervalle der interessierenden Kenngrößen gegenübergestellt: zunächst für die Tagesexposition A(8), dann für die

Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ und die korrespondierenden kraftbezogenen Belastungsgrößen in z-Richtung für die Wirbelsäulenabschnitte L3-4 und L5-S1 sowie abschließend in y-Richtung die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ und die kraftbezogene Kenngröße $a_{Fy(8)}$.

Es wird deutlich, dass sich die jeweiligen beschleunigungs- und kraftbezogenen Kennwerte relativ wenig unterscheiden. Für beide Schwingungsachsen gilt, dass die Beurteilungsbeschleunigungen ein geringfügig höheres Odds Ratio ergeben als die entsprechenden kraftbezogenen Größen. Zur weiteren Überprüfung werden die drei kraftbezogenen Belastungsmaße auch in die beiden folgenden Auswertungen einbezogen.

Abbildung 6:

Risiko eines Lumbalsyndroms durch Schwingungsbelastung im Sitzen – Gegenüberstellung der Odds Ratios und Konfidenzintervalle für verschiedene Beurteilungsbeschleunigungen und kraftbezogene Kennwerte der Schwingungsbelastung (Maximalwerte) für die bereinigte Stichprobe ($n = 315$)



4.1.3 Zielkriterium „Lokales Lumbalsyndrom“

Im nächsten Schritt wurden logistische Regressionsanalysen in gleicher Weise wie in den vorhergehenden Abschnitten durchgeführt, aber jetzt mit dem Zielkriterium „Lokales Lumbalsyndrom“, also mit einer Teilgruppe der bisher betrachteten übergeordneten Diagnose „Lumbalsyndrom“. Personen mit der konkurrierenden Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“ wurden bei dieser Analyse ausgeschlossen, sodass auf der Basis der bereinigten Stichprobe eine Teilstichprobe von $n = 217$ Personen zur Verfügung stand. Tabelle 17 zeigt – analog

zu Tabelle 16 für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ – die Ergebnisse der Berechnungen für dieses Zielkriterium unter Verwendung der verschiedenen Belastungsparameter (jeweils der maximale Tages-Belastungskennwert aus der Arbeitsanamnese). Im Vergleich zu Tabelle 16 erweisen sich die Ergebnisse für alle Prädiktoren als noch etwas deutlicher: Die Signifikanztests für die Werte der Teststatistik fallen für alle Prädiktoren noch eindeutiger aus, und die Odds Ratios sowie die Grenzen der Konfidenzintervalle liegen jetzt für alle Prädiktoren höher. Die Einschränkung der Analyse auf die Unterdiagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ führt also zu klareren Ergebnissen.

Bemerkenswert ist hier das relativ gute Abschneiden der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$, die sogar leicht bessere Werte als die Tagesexposition $A(8)$ erreicht, wobei die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ nach wie

vor den besten Prädiktor darstellt. Die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen erreichen sowohl in y- als auch in z-Achse nicht ganz so gute Werte hinsichtlich Odds Ratio und AIC wie die entsprechenden a_w -Kenngrößen.

Tabelle 17:

Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lokales Lumbalsyndrom“ mit unterschiedlichen Tages-Schwingungsbelastungskennwerten (Maximalwerte) als Prädiktor ($n = 217$ nach Ausschluss der Personen mit der Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“, für die bereinigte Stichprobe von $n = 315$) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}		AIC
	B	s	t	p				
max. $a_{wz(8)}$	0,187	0,053	12,39	0,001	1,20	1,08	1,33	266,86
max. $a_{wx(8)}$	0,246	0,083	8,82	0,003	1,27	1,08	1,50	270,96
max. $a_{wy(8)}$	0,266	0,077	11,86	0,001	1,30	1,12	1,51	267,72
max. Tagesexposition A(8)	0,177	0,050	12,34	0,001	1,19	1,08	1,31	266,92
max. a_w mit $k_{xyz} = 1,0$	0,157	0,043	13,49	0,000	1,16	1,07	1,27	265,73
max. a_w mit $k_{xy} = 1,4$	0,129	0,035	13,20	0,000	1,13	1,06	1,21	266,10
max. $a_{Fz(8)L3-L4}$	0,14	0,05	8,53	0,000	1,14	1,04	1,25	271,35
max. $a_{Fz(8)L5-S1}$	0,13	0,04	9,37	0,000	1,13	1,04	1,23	270,45
max. $a_{Fv(8)}$	0,25	0,08	10,62	0,000	1,27	1,10	1,48	269,16
max. eVDV	0,289	0,087	11,66	0,001	1,18	1,07	1,31	267,71
max. VDV nach EU-Richtlinie	0,197	0,064	11,73	0,001	1,17	1,07	1,29	267,63

Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 278,20

4.1.4 Zielkriterium „Lumbales Wurzelsyndrom“

Wird die gleiche Vorgehensweise wie im vorherigen Abschnitt für die Unterdiagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“ verwendet — jetzt unter Ausschluss aller Teilnehmer mit der Diagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ —, so erhält man die Resultate in Tabelle 18.

Für fast alle Prädiktoren — mit Ausnahme der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wx(8)}$ und der a_F -Werte in z-Richtung — ergibt der

Signifikanztest Werte von $p < 0,05$, also signifikante Beiträge zur Regressionsgleichung, aber in einem deutlich schwächeren Grad als bei der Diagnose „Lokales Lumbalsyndrom“. Auch die Odds Ratios sind etwas niedriger. Sie liegen in einem Bereich von 1,07 bis 1,16 eng beieinander und zeigen weitgehend die gleiche Rangfolge wie beim „Lokalen Lumbalsyndrom“. Der niedrigste OR-Wert ergibt sich für den Vektorbetrag a_{wv} mit $k_{xy} = 1,4$. Die höchsten OR-Werte werden für die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ und die kraftbezogene Beurteilung a_{Fy} erreicht.

Tabelle 18:

Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lumbales Wurzelsyndrom“ mit unterschiedlichen Tages-Schwingungsbelastungskennwerten (Maximalwerte) als Prädiktor ($n = 240$ nach Ausschluss der Personen mit der Diagnose „lokales Lumbalsyndrom“, auf der Basis der bereinigten Stichprobe von $n = 315$) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}		AIC
	B	s	t	p				
max. $a_{wz(8)}$	0,113	0,051	4,83	0,029	1,11	1,01	1,23	299,80
max. $a_{wx(8)}$	0,094	0,076	1,50	0,221	1,09	0,94	1,27	303,19
max. $a_{wy(8)}$	0,153	0,071	4,58	0,033	1,16	1,01	1,33	300,04
max. Tagesexposition A(8)	0,109	0,048	5,22	0,023	1,11	1,01	1,22	299,36
max. a_{wv} mit $k_{xyz} = 1,0$	0,089	0,040	4,96	0,027	1,09	1,01	1,18	299,65
max. a_{wv} mit $k_{xy} = 1,4$	0,070	0,033	4,42	0,037	1,07	1,00	1,14	300,19
max. $a_{Fz(8)L3-L4}$	0,09	0,05	3,48	0,06	1,09	0,99	1,19	301,24
max. $a_{Fz(8)L5-S1}$	0,08	0,04	3,82	0,05	1,08	0,99	1,76	300,87
max. $a_{Fy(8)}$	0,16	0,07	5,45	0,02	1,17	1,02	1,34	299,10
max. eVDV	0,109	0,049	4,95	0,027	1,11	1,01	1,22	299,67
max. VDV nach EU-Richtlinie	0,105	0,046	5,35	0,022	1,11	1,01	1,21	299,22

Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 302,71

Die untere Grenze des Konfidenzintervalls liegt für alle Prädiktoren mit Ausnahme der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wx(8)}$ über 1,0 bzw. bei $a_{Fz(8)L3-L4}$ und $a_{Fz(8)L5-S1}$ mit 0,99 knapp darunter. Bezüglich der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen sind die Ergebnisse in z-Richtung also wieder etwas schwächer im Vergleich zu den entsprechenden Beurteilungsbeschleunigungen, aber in der y-Achse erweist sich der Maximalwert $a_{Fy(8)}$ im Odds Ratio und im AIC-Kriterium sogar als geringfügig besser gegenüber dem Wert für $a_{wy(8)}$.

Zwischen den Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“ zeigen sich also dahingehend Unterschiede, dass sich für die letztere Diagnose grundsätzlich etwas schwächere Zusammenhänge mit den verschiedenen Tages-Belastungskennwerten ergeben. Auch in der früheren GKV-Studie wurden mit anderen Auswertestrategien bereits Unterschiede im Zusammenhang zwischen diesen beiden Diagnosen hinsichtlich des Schwingungseinflusses konstatiert ([7], S. 111 ff.).

Es wurde vermutet, dass ein Selektionseffekt (selective survival) vorliegen könnte: Nach Auftreten eines lumbalen Wurzelsyndroms ist es weniger wahrscheinlich, dass der Betreffende langfristig weiter schwingungs-exponiert tätig ist; in unserer retrospektiven Querschnittsstudie ist er also unterrepräsentiert. Dieser Gesichtspunkt ist im Weiteren zu bedenken. Konkret stellt damit die Unterdiagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ in den hier vorgestellten Berechnungen die verlässlichere, weil weniger selektierte Wirkungsvariable dar.

4.2 Durchschnittliche Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens

Wie schon erwähnt, bietet sich als Alternative zu den maximalen Tages-Schwingungsbelastungskennwerten die Berechnung eines Durchschnittswertes aus allen Expositionszeiträumen an, indem der jeweilige Kennwert mit der Dauer des betreffenden Tätigkeitsabschnitts in Jahren gewichtet und dann über alle Tätigkeitsabschnitte einer Person der Mittelwert gebildet wird. Je nach Verlauf der Exposition können sich dadurch deutliche Verschiebungen zwischen den Belastungswerten der Teilnehmer ergeben. Dieser durchschnittliche Belastungswert könnte sich für gesundheitliche Auswirkungen von GKV als geeigneter Maßstab erweisen, da auf der einen Seite die Expositionsdauer als plausibler Verstärker der Schwingungswirkungen einfließt, auf der anderen Seite aber im Unterschied zu Dosiswerten prinzipiell keine Korrelation mit dem Lebensalter oder den Berufsjahren besteht.

Aber auch ein solcher Durchschnittswert garantiert keine wirkliche Vergleichbarkeit der Belastung zwischen verschiedenen Personen. Gibt beispielsweise ein Erdbaumaschinenfahrer seine Tätigkeit auf und arbeitet anschließend ohne Schwingungsbelastung im Lager, behält er den hohen Durchschnittswert aus der vorherigen Tätigkeit. Wechselt jedoch ein anderer Fahrer mit der gleichen Schwingungsbelastung zu einer anderen Fahrtätigkeit, z. B. als Lkw-Fahrer bei einer Spedition, kommt ein weiterer Belastungszeitraum mit geringeren Schwingungsin-tensitäten hinzu und der Durchschnittswert verringert sich.

Zur genaueren Betrachtung dieser Frage werden in Tabelle 19 die Ergebnisse vorgestellt, die sich bei logistischen Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ ergeben, wenn man die gleichen Berechnungen wie für Tabelle 16 mit dem jeweiligen Durchschnittswert der Schwingungsbelastung während des gesamten Arbeitslebens durchführt.

Vergleicht man die Ergebnisse in den Tabellen 16 und 19, so zeigen sich nur marginale Unterschiede. Bei den Maximalwerten in

Tabelle 16 sind die p-Werte für die Signifikanz der Prädiktoren noch etwas niedriger. Einige Odds Ratios sind bei den Durchschnittswerten geringfügig höher (stärkster Anstieg bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wx(8)}$ von 1,18 auf 1,22), und die unteren Konfidenzschranken sind fast gleich. Auch die AIC-Werte darf man vergleichen, da es sich ja um die gleiche Datenbasis handelt. Insgesamt erweisen sich die Regressionen auf der Basis der Maximalwerte in Tabelle 16 als etwas ökonomischere Lösungen.

Tabelle 19:

Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit unterschiedlichen Tages-Schwingungsbelastungskennwerten (Durchschnittswerte mit Gewichtung nach Expositionsjahren) als Prädiktor (bereinigte Stichprobe $n = 315$) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}		AIC
	B	s	t	p				
durchschn. $a_{wz(8)}$	0,1469	0,0551	7,09	0,008	1,15	1,03	1,29	409,54
durchschn. $a_{wx(8)}$	0,2055	0,0908	5,12	0,024	1,22	1,02	1,46	411,60
durchschn. $a_{wy(8)}$	0,2389	0,0775	9,51	0,002	1,26	1,09	1,47	407,02
durchschn. Tagesexposition A(8)	0,1566	0,0531	8,71	0,003	1,16	1,05	1,29	407,83
durchschn. a_{wv} mit $k_{xyz} = 1,0$	0,1242	0,0429	8,40	0,004	1,13	1,04	1,23	408,21
durchschn. a_{wv} mit $k_{xy} = 1,4$	0,1053	0,0359	8,61	0,003	1,11	1,03	1,19	407,99
durchschn. eVDV	0,1357	0,0532	6,51	0,011	1,14	1,03	1,27	410,15
durchschn. VDV nach EU-Richtlinie	0,1455	0,0510	8,13	0,005	1,15	1,04	1,27	408,44

Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 414,89

Offensichtlich hat es in dieser Stichprobe nicht allzu starke Veränderungen der Belastungswerte über das Arbeitsleben gegeben, sodass die Entscheidung für die eine oder andere Variable keine nennenswerten Auswirkungen auf die Höhe des Risikos der Diagnose „Lumbalsyndrom“ hat. Um diese Annahme empirisch zu überprüfen, werden in Tabelle 20 statistische Kennwerte für die Verteilung der Zielgrößen „Maximalwert“ und „Durchschnittswert“ der Schwingungsbelastung in dieser Stichprobe gegenübergestellt.

Bei der Tagesexposition A(8) liegt der Maximalwert im Schnitt $0,12 \text{ m/s}^2$ über dem Durchschnittswert des Arbeitslebens – sowohl im Mittelwert als auch im Median. Bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ ist der Unterschied etwas geringer. Mit steigenden individuellen Belastungswerten wird der Unterschied zwischen Maximal- und Durchschnittswert immer größer: Bei

der Tagesexposition A(8) beträgt er im 75%-Quartil bereits $0,17 \text{ m/s}^2$ und im Maximum $0,44 \text{ m/s}^2$.

Maximal- und Durchschnittswerte der individuellen Schwingungsbelastung weichen also mit zunehmender Belastungshöhe immer weiter voneinander ab. Es stimmt also, wie im vorhergehenden Abschnitt vermutet, dass für einen recht großen Teil der Stichprobe die Schwingungsbelastung im Arbeitsleben relativ gut durch den Durchschnittswert ihrer Arbeitstätigkeiten abgedeckt wird.

Da die epidemiologischen Auswertungen mit den Maximalwerten aber zu etwas deutlicheren Ergebnissen führen, liegt der Schluss nahe, dass die stärkere Berücksichtigung von Belastungsspitzen bei den Maximalwerten bei der Beurteilung des Gesundheitsrisikos durchaus sinnvoll und der Maximalwert daher vorzuziehen ist.

Tabelle 20:

Statistische Kennwerte für den Maximalwert und den Durchschnittswert der Schwingungsbelastung in der bereinigten Stichprobe ($n = 315$) während des gesamten Arbeitslebens – sowohl für die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ als auch für die Tagesexposition A(8)

Kennwert	Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$		Tagesexposition A(8)	
	Maximalwert	Durchschnitt	Maximalwert	Durchschnitt
Mittelwert	0,71	0,61	0,75	0,63
Standardabweichung	0,29	0,22	0,30	0,23
Minimum	0,12	0,12	0,14	0,14
25%-Quartil	0,50	0,43	0,51	0,44
Median	0,68	0,61	0,74	0,62
75%-Quartil	0,91	0,75	0,96	0,79
Maximum	1,81	1,37	1,81	1,37

4.3 Auswirkung verschiedener Schwellenwerte

4.3.1 Schwellenwerte für die Kenngrößen Tagesexposition A(8) und Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$

In Abschnitt 2.5 wurden bereits die Werte angegeben, die in der Fachwelt als Schwellenwerte einer möglichen oder

wahrscheinlichen gesundheitlichen Gefährdung der LWS durch Schwingungen diskutiert werden. Tabelle 21 gibt zunächst einen Überblick, wie viele Personen unserer Stichprobe auf die verschiedenen Belastungskategorien entfallen, die sich aus diesen Schwellenwerten bilden lassen. Grundlage der Berechnungen sind wieder die Maximalwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ während des Arbeitslebens.

Tabelle 21:

Verteilung der Personen auf die verschiedenen Belastungsklassen für die Maximalwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ bzw. Tagesexposition A(8) sowie zusätzliche Teilmengen der untersten und obersten Belastungsklasse (Gesamtstichprobe $n = 388$ bzw. bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Belastungs- klassen in m/s^2	Maximalwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$		Maximalwerte der Tagesexposition A(8)	
	$n = 388$	$n = 315$	$n = 388$	$n = 315$
< 0,5	116 (29,9 %)	79 (25,1 %)	112 (28,9 %)	76 (24,1 %)
≥ 0,5 bis < 0,63	65 (16,8 %)	54 (17,1 %)	43 (11,1 %)	37 (11,8 %)
≥ 0,63 bis < 0,8	79 (20,4 %)	67 (21,3 %)	80 (20,6 %)	67 (21,3 %)
≥ 0,8	128 (32,9 %)	115 (36,5 %)	153 (39,4 %)	135 (42,8 %)
zusätzliche interessante Teilmengen				
≥ 0,45 bis < 0,5	12	9	16	11
≥ 0,8 bis < 1,0	67	58	74	63
≥ 1,0	61	57	79	72
≥ 1,15	16	14	27	23

Verschiedene interessante Aspekte lassen sich an diesen Zahlen ablesen:

- Die Bereinigung der Stichprobe durch Ausschluss aller Personen mit LWS-Beschwerden vor dem Ende des ersten Expositionsjahres (also $n = 315$ vs. 388) führt zu einer relativen Abnahme der unter $0,5 m/s^2$ belasteten und einer Zunahme der hoch belasteten Personen. Anhand dieses Ausschlusskriteriums werden also
- mehr Personen mit geringer Belastung ausgeschlossen, was noch einmal die Richtigkeit dieser Bereinigungsmaßnahme unterstreicht.
- Bei Betrachtung der Tagesexposition A(8) ergibt sich gegenüber der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ ein deutlicher Unterschied in der Besetzung der Klassen: Der Maximalwert für A(8) hat über 5 % weniger Personen in der zweiten Belastungsklasse

(von 0,5 bis 0,63 m/s²) und über 6 % mehr in der höchsten Belastungsklasse (> 0,8 m/s²). Für die Diskussion um Schwellenwerte für gesundheitliche Auswirkungen von GKV spielt es also schon eine Rolle, welcher Belastungskennwert zugrunde gelegt wird.

- Für die Frage, ob vielleicht — wie es im Merkblatt zur BK 2110 (2005) [13] angesprochen wird — schon bei 0,45 statt 0,5 m/s² eine gesundheitliche Gefährdung auftreten könnte, gibt es leider nur eine kleine Teilmenge, die in diesen Belastungsbereich fällt. Gleiches gilt für die Größe einer Belastungsklasse > 1,15 m/s², wie sie in der EU-Richtlinie vorgesehen ist. Allenfalls wären für eine Teilmenge > 1,0 m/s² noch genügend Teilnehmer vorhanden.

Eine relativ einfache Möglichkeit, für das vorhandene Untersuchungskollektiv denjenigen Schwellenwert zu finden, der die beste Unterscheidung hinsichtlich der Zielvariable „Lumbalsyndrom“ vornimmt, besteht darin, in Schritten von 0,01 für wachsende Schwellenwerte jeweils Regressionsrechnungen vorzunehmen und das β -Gewicht bzw. das OR zu bestimmen. Als beste Vorhersage erweist sich rechnerisch für die bereinigte Stichprobe:

- auf der Grundlage der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ ein Schwellenwert von 0,56 m/s² mit OR = 3,32 [CI_{95%} 1,83/6,00]
- und auf der Grundlage der Tagesbeschleunigung A(8) ein Schwellenwert von 0,58 m/s² mit OR = 3,36 [CI_{95%} 1,87/6,05].

Diese Ergebnisse sollten nicht als Begründung eines Schwellenwertes aufgefasst werden, sondern als ein wichtiger Anhaltspunkt dafür, in welchem Belastungsbereich bei diesem exponierten Kollektiv ein ursächlicher Zusammenhang mit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ deutlich wird. In den Abbildungen 7 und 8 wird die Veränderung dieses gleitenden OR mit zunehmendem Schwellenwert für beide Belastungsmaße dargestellt.

Die graue Kurve gibt jeweils das OR wieder, die beiden schwarzen Kurven die untere und obere Grenze des Konfidenzintervalls. Die relativ hohen Odds Ratios ergeben sich natürlich dadurch, dass die Regressionen ohne Einbeziehung des Alters gerechnet wurden.

Man sieht deutlich, dass die genannten maximalen OR-Werte eher den Beginn eines Wertebereichs darstellen, bei dem sich in unserer Stichprobe anhand der Schwingungsbelastung eine besonders gute Vorhersage der Erkrankung ergibt. Insbesondere bei der Tagesexposition A(8) zeigen sich bei Schwellenwerten deutlich über 0,6 m/s² hinaus noch sehr hohe Odds Ratios über 3,0, sodass man eigentlich ein deutlich erhöhtes Lumbalsyndrom-Risiko in einem Belastungsbereich oberhalb von 0,55 bis etwa 0,65 m/s² feststellen kann. In beiden Abbildungen zeigt sich aber auch genauso klar, dass die Kurve an einem bestimmten Punkt deutlich abfällt — bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ etwa bei 0,63 m/s², bei der Tagesexposition A(8) spätestens bei 0,73 m/s², weil bei diesen Schwellenwerten offensichtlich zu viele erkrankte Schwingungsexponierte als „nicht belastet“ gewertet werden.

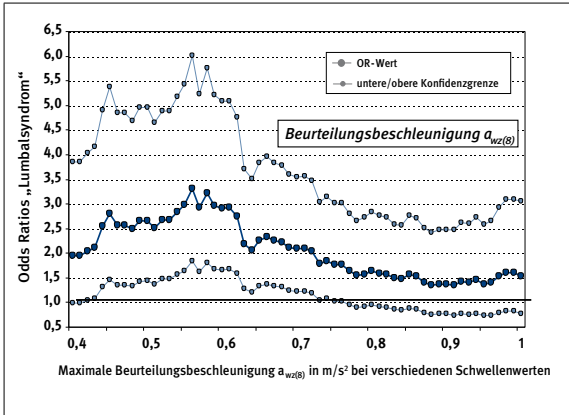


Abbildung 7:
Veränderung der Odds Ratios (dunkelblau) und Grenzen des Konfidenzintervalls (hellblau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von $0,01 m/s^2$; bereinigte Stichprobe $n = 315$ – Belastungsmaß: Beurteilungsbeschleunigung $a_{wv(8)}$

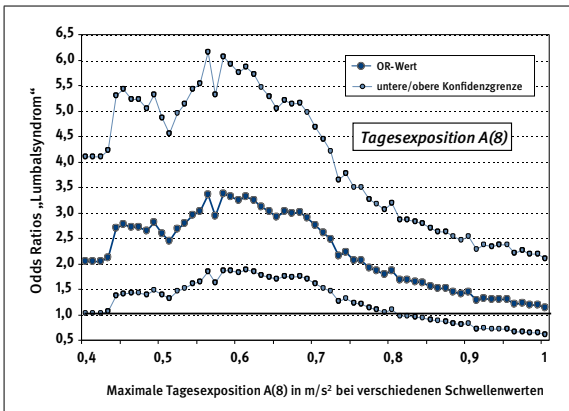


Abbildung 8:
Veränderung der Odds Ratios (dunkelblau) und Grenzen des Konfidenzintervalls (hellblau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von $0,01 m/s^2$; bereinigte Stichprobe $n = 315$ – Belastungsmaß: Tagesexposition $A(8)$

4.3.2 Schwellenwerte für Vektorensummen $a_{wv(8)}$

Bei der Beurteilung der Wirbelsäulenbelastung stellt sich für die Unfallversicherungsträger häufig das Problem, eine kombinierte LWS-Belastung durch GKV und Heben und Tragen schwerer Lasten quantitativ zu bewerten. Zu diesem Zweck wird offensichtlich häufig auf die Vektorbeträge der Schwingungsbelastung in allen drei Achsen zurückgegriffen, sodass sich die Frage stellte, inwieweit sich auch mit diesen Maßen Schwellenwerte für die LWS-Gefährdung

ermitteln lassen. In den Abbildungen 9 und 10 wird entsprechend für die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wv(8)}$ – zunächst mit Korrekturfaktor $k_{xyz} = 1,0$ und dann mit $k_{xz} = 1,4$ – dargestellt, wie sich das Odds Ratio für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ verändert, wenn der Schwellenwert schrittweise um jeweils $0,01 m/s^2$ erhöht wird. In Abbildung 9 zeigen sich bei gleicher Gewichtung aller drei Achsen die höchsten OR-Werte von rund 3,5 in einem Bereich des Schwellenwertes von etwa $0,74$ bis $0,79 m/s^2$.

Abbildung 9: Veränderung der Odds Ratios (dunkelblau) und Grenzen des Konfidenzintervalls (hellblau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von $0,01 \text{ m/s}^2$; bereinigte Stichprobe $n = 315$ – Belastungsmaß: Schwingungsgesamtwert $a_{\text{wv}(\text{S})}$ mit $k_{\text{xyz}} = 1$

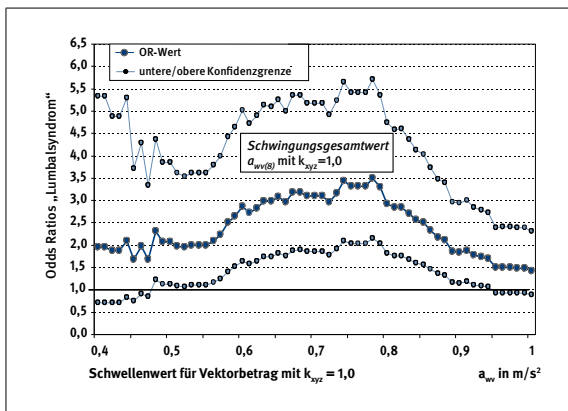
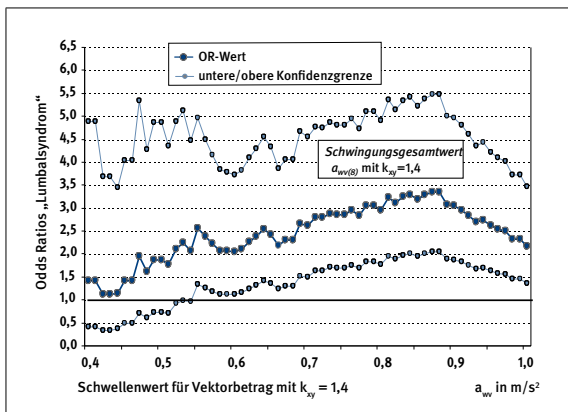


Abbildung 10: Veränderung der Odds Ratios (dunkelblau) und Grenzen des Konfidenzintervalls (hellblau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von $0,01 \text{ m/s}^2$; bereinigte Stichprobe $n = 315$ – Belastungsmaß: Schwingungsgesamtwert $a_{\text{wv}(\text{S})}$ mit $k_{\text{xyz}} = 1,4$



Oberhalb dieses Bereichs trennt der Schwellenwert offensichtlich nicht mehr so klar zwischen erkrankten Exponierten und Nicht-exponierten. Ein relativ hoher Anstieg der Odds Ratios auf $3,0$ zeichnet sich bereits ab einem Schwellenwert von $0,6 \text{ m/s}^2$ ab, sodass hier bereits eine zunehmende Gefährdung vermutet werden könnte.

Beim Schwingungsgesamtwert $a_{\text{wv}(\text{S})}$ mit Korrekturfaktor $k_{\text{xy}} = 1,4$ zeigt sich in Abbildung 10 ein Odds Ratio über $3,0$ ab einem Schwellenwert von etwa $0,78 \text{ m/s}^2$ mit einem Maximum bei $0,87$ und $0,88 \text{ m/s}^2$. Die Kurve

verläuft insgesamt etwas wechselhafter als in Abbildung 9, aber spätestens ab etwa $0,67 \text{ m/s}^2$ ist ein konstanter Anstieg der OR-Werte bis hin zu den genannten Maximalwerten zu beobachten.

Auch unterhalb von $0,67 \text{ m/s}^2$ fallen einzelne Spitzen im Verlauf der OR-Kurve auf, aber man sollte die vorhandene Datenbasis nicht überbewerten. Sicher fällt in Abbildung 10 der erste Gipfel der Kurve bei $0,56 \text{ m/s}^2$ auf (und entsprechend in Abbildung 9 bei $0,48 \text{ m/s}^2$), wobei auch zum ersten Mal die untere Grenze des Konfidenzintervalls über

1 liegt. Die Annahme einer ersten Gefährdungsschwelle bei diesen Werten hat aber nur hypothetischen Charakter, solange nicht weitere Befunde dafür sprechen.

4.3.3 Berechnung des populationsattributablen Risikos (PAR)

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die in den Abbildungen 7 bis 10 betrachteten Schwellenwerte den Einfluss des Faktors „Alter“ nicht berücksichtigen. Exemplarisch wird daher im Folgenden für die Diagnose

„Lumbalsyndrom“ das populationsattributable Risiko (PAR) errechnet, um das Zusammenwirken von Alter und Exposition im Hinblick auf die Verteilung dieser Diagnose in der Studienpopulation zu beschreiben.

Tabelle 22 gibt die entsprechenden Ergebnisse wieder: In den Spalten werden die PAR-Werte für sechs Altersklassen von < 30 Jahre bis > 50 Jahre angegeben bei schrittweiser Erhöhung der Tagesexposition A(8) von 0,45 bis 1,0 m/s².

Tabelle 22:

PAR-Werte für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ pro Altersklasse und für die gesamte Stichprobe bei unterschiedlichen Schwellenwerten der Tagesexposition A(8)

Schwellenwerte für A(8) m/s ²	Altersklassen in Jahren						Gesamt
	< 30	31 bis 35	36 bis 40	41 bis 45	46 bis 50	> 50	
n	56	40	53	47	51	68	315
0,45	0,07500	-0,02823	-0,01515	0,10938	-0,09487	0,23988	0,12210
0,46	0,10484	-0,06452	0,03099	0,05000	0,00466	0,23988	0,12697
0,47	0,10484	-0,06452	0,03099	0,00250	0,00466	0,23988	0,12001
0,48	0,10484	-0,00538	-0,01515	-0,03636	0,00466	0,23988	0,11491
0,49	0,10484	-0,00538	0,12987	-0,03636	0,00466	0,23988	0,13130
0,50	0,10484	-0,00538	0,12987	-0,11964	0,00466	0,21552	0,10553
0,51	0,06055	-0,03905	0,12987	-0,11964	0,00466	0,21552	0,09333
0,52	0,10069	0,01290	0,12987	-0,11964	0,08761	0,19310	0,11950
0,53	0,10069	0,01290	0,12987	-0,04500	0,08761	0,19310	0,12671
0,54	0,10069	0,01290	0,19385	-0,04500	0,03748	0,19310	0,12920
0,55	0,12500	0,01290	0,19385	-0,04500	0,03748	0,19310	0,13605
0,56	0,19063	-0,01843	0,19385	-0,04500	0,03748	0,20307	0,15112
0,57	0,19063	-0,04692	0,15404	-0,06875	0,03748	0,20307	0,13476
0,58	0,19063	-0,04692	0,19856	0,05000	0,10623	0,20307	0,15948
0,59	0,19063	-0,00140	0,16250	0,10000	0,10623	0,18350	0,16075
0,60	0,19063	-0,00140	0,16250	0,10000	0,16581	0,14828	0,15624

Schwellen- werte für A(8) m/s ²	Altersklassen in Jahren						Gesamt
	< 30	31 bis 35	36 bis 40	41 bis 45	46 bis 50	> 50	
	n	56	40	53	47	51	
0,61	0,21037	-0,00140	0,16250	0,10000	0,17195	0,14828	0,16251
0,62	0,22917	-0,00140	0,16942	0,10000	0,13105	0,14828	0,16362
0,63	0,19331	-0,00140	0,16942	0,10000	0,13105	0,14828	0,15875
0,64	0,19331	-0,00140	0,16942	0,10000	0,09447	0,14828	0,15395
0,65	0,16356	0,04032	0,16942	0,05000	0,07576	0,16937	0,14879
0,66	0,18099	0,07871	0,17519	0,05000	0,11594	0,14080	0,15551
0,67	0,18099	0,07871	0,17519	0,02841	0,11594	0,15064	0,15191
0,68	0,18099	0,05087	0,17519	0,02841	0,12410	0,15064	0,14844
0,69	0,18099	0,08602	0,14727	0,00870	0,12410	0,15064	0,14507
0,70	0,18099	0,05991	0,12150	0,00870	0,09763	0,13793	0,12959
0,71	0,18099	0,05991	0,12150	-0,02600	0,09763	0,13793	0,12210
0,72	0,15051	0,05991	0,09764	-0,02600	0,13105	0,11438	0,11209
0,73	0,15051	0,05991	0,10737	-0,05556	0,10623	0,09302	0,09579
0,74	0,15051	0,05991	0,10737	-0,01786	0,10623	0,09302	0,10020
0,75	0,15051	0,05991	0,08636	-0,03190	0,10623	0,08307	0,09024
0,76	0,06611	0,05991	0,11584	-0,03190	0,10623	0,08307	0,08491
0,77	0,06611	0,01290	0,09588	-0,01129	0,08311	0,08307	0,07362
0,78	0,06611	0,01290	0,12328	-0,02422	0,08311	0,06447	0,06882
0,79	0,05787	0,02319	0,11174	-0,04779	0,04136	0,05576	0,05542
0,80	0,05787	0,02319	0,11174	-0,04779	0,07131	0,05576	0,05943
0,81	0,03295	0,00293	0,10198	-0,01250	0,05206	0,04741	0,04978
0,82	0,03295	0,00293	0,10198	-0,01250	0,05206	0,04741	0,04978
0,83	0,03295	0,00293	0,08636	-0,01250	0,05206	0,03941	0,04462
0,84	0,03295	-0,01613	0,10865	-0,02308	0,07994	0,01041	0,03721
0,85	0,00893	-0,01613	0,10865	-0,02308	0,07994	0,01041	0,03476
0,86	0,00893	-0,01613	0,10865	-0,04268	0,10623	0,00383	0,03128
0,87	0,00893	-0,03410	0,09361	-0,01786	0,08761	0,00383	0,02790
0,88	-0,01425	-0,03410	0,06560	-0,02733	0,06154	0,01539	0,01699
0,89	-0,01425	-0,05108	0,05253	-0,02733	0,06154	0,01539	0,01261
0,90	-0,03664	-0,05108	0,05253	-0,02733	0,06899	0,01539	0,01183
0,91	-0,04063	-0,02823	0,05253	-0,03636	0,06899	-0,00862	0,00546

Schwellen- werte für A(8) m/s ²	Altersklassen in Jahren						Gesamt
	< 30	31 bis 35	36 bis 40	41 bis 45	46 bis 50	> 50	
	n	56	40	53	47	51	
0,92	-0,04063	-0,00315	0,05253	-0,03636	0,06899	-0,00862	0,00887
0,93	-0,04063	-0,00315	0,06044	-0,03636	0,05426	-0,01413	0,00615
0,94	-0,04063	-0,00315	0,06044	-0,04500	0,04021	0,00222	0,00548
0,95	-0,04063	-0,00315	0,06044	-0,04500	0,04021	0,00222	0,00548
0,96	-0,06148	-0,01843	0,04830	-0,04500	0,04021	0,00222	-0,00043
0,97	-0,06148	-0,01843	0,03664	-0,02228	0,04021	0,00222	0,00092
0,98	-0,06148	-0,01843	0,02545	-0,02228	0,04021	0,00222	-0,00102
0,99	-0,06148	-0,01843	0,02545	-0,02228	0,04021	0,00222	-0,00102
1,00	-0,06148	-0,01843	0,03365	-0,03085	0,04021	-0,00328	-0,00350

Diese Werte geben an, um wie viel Prozent das Risiko in der jeweiligen Altersklasse sinken würde, wenn die Schwingungsexposition auf den in der ersten Spalte angegebenen Schwellenwert begrenzt wäre. Konkret besagt also die erste Zahl (PAR = 0,07500) in der Spalte < 30 Jahre, dass eine Senkung der Tagesexposition A(8) auf 0,45 m/s² die Anzahl der Lumbalsyndrom-Diagnosen in der Altersklasse bis 30 Jahre um 7,5 % senken würde.

In der Spalte „Gesamt“ ist der Rückgang für die gesamte Stichprobe ohne Berücksichtigung des Alters angegeben. Negative PAR bedeuten im Prinzip einen Anstieg des Risikos mit der Beschränkung der Exposition. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Werte an den Rändern, d. h. bei sehr niedrigen oder sehr hohen A(8)-Schwellenwerten, nicht mehr aussagekräftig werden, weil es nur noch wenige belastete bzw. unbelastete Personen gibt.

In jeder Spalte sind der Übersichtlichkeit halber die Spitzenwerte der jeweiligen Altersklasse fett gedruckt. Es zeigen sich sehr unterschiedliche Kurvenverläufe in den einzelnen Altersgruppen, wobei insbesondere die deutliche Spitze bei 0,61 bis 0,62 m/s² für die jüngste Gruppe bemerkenswert ist sowie die sehr lang gestreckte, zweigipflige Kurve bei den 36 bis 40jährigen und der frühe Gipfel bei der ältesten Gruppe. Insgesamt liegen die höchsten PAR-Werte knapp über 0,6 m/s². Sie bestätigen und präzisieren damit die Schätzungen in Abschnitt 4.3.1.

4.4 Analysen mit Dosiswerten

4.4.1 Regressionsanalysen mit verschiedenen Schwellen- und Dosiswerten

Auch wenn einschlägige Richtlinien keine expliziten Dosiswerte nennen, bei denen mit der Verursachung einer LWS-Schädigung gerechnet werden muss, besteht doch weitgehende Übereinstimmung, dass in der Regel eine langjährige Exposition von

wenigstens zehn Jahren vorliegen muss. In der aktuellen Fassung des Merkblatts zur BK 2110 von 2005 [13] (s. dort Tabelle 2) spielt die Zehn-Jahres-Grenze sogar eine ausschlaggebende Rolle für die zu erwartende Gesundheitsbeeinträchtigung bei verschiedenen Beurteilungsbeschleunigungen. Für die Beurteilung des Gesundheitsrisikos bei langjähriger Schwingungsexposition ist die Betrachtung von Dosiswerten, die die gesamte Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens abdecken, ein wichtiger Aspekt, auch wenn Dosiswerte natürlich sehr stark mit dem Lebensalter als wichtigstem Confounder bzgl. degenerativer LWS-Veränderungen korrelieren. In Abschnitt 2.4.2 wurden bereits verschiedene Formeln zur Berechnung von GKV-Dosiswerten besprochen. Im Folgenden werden für die dort erwähnten Dosisformeln D1 bis D4 Ergebnisse von logistischen Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ vorgestellt, in denen der Prädiktor „Dosiswert“ alternierend mit unterschiedlichen Schwellenwerten der Tages-Schwingungsbelastung von 0,0 bis 1,15 m/s² berechnet wurde. Die Dosisformeln D5 bis D7 auf der Grundlage des überenergetischen Ansatzes werden hier nicht behandelt, da die entsprechenden Belastungsgrößen in den bisher vorgestellten Auswertungen keine zusätzlichen Erkenntnisse erbracht haben und für die Festlegung von Schwellenwerten und Dosisrichtwerten keine ausreichenden Hinweise vorliegen.

Auch hier gilt für jede der Regressionsanalysen, dass das Lebensalter als weiterer Prädiktor eingeschlossen wurde und sich auch jeweils als stärkster Einfluss darstellte. Im Hinblick auf die Fragestellung stehen aber die Ergebnisse für die Variationen des GKV-Belastungsmaßes im Vordergrund, wie sie

in Tabelle 23 wiedergegeben werden. In der Tabelle dargestellt werden die statistischen Ergebnisse für den Prädiktor „Dosiswert“, wie er in insgesamt 24 logistischen Regressionsanalysen alternierend aus einer der vier aufgeführten Dosisformeln und einem der sechs Schwellenwerte gebildet wurde. Die Dosiswerte wurden hier wie in der GKV-Studie [10] berechnet als:

$$D_v = a_{w(8)}^2 \cdot \text{Exposition in Tagen}$$

sodass sich z. B. bei zehnjähriger Exposition mit $a_{w(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$ ergeben würde:

$$D_v = 0,63^2 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} \\ = 877,15$$

oder bei zehnjähriger Exposition mit $a_{w(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$:

$$D_v = 0,82 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} \\ = 1414,4.$$

Zunächst werden die Dosiswerte hier in einer Skalierung 1 : 103 verwendet; das Odds Ratio bezieht sich also darauf, wie sich das Risiko einer Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei einem Dosiszuwachs um 1000 Einheiten verändert, also praktisch von „null Belastung“ auf „fast zwölf Jahre mit einer Beurteilungsbeschleunigung von 0,63 m/s² belastet“. Als erstes wird in Tabelle 23 deutlich, dass sich dieser Prädiktor mit allen Dosisformeln und Schwellenwerten als statistisch signifikant erweist ($p < 0,05$) mit Ausnahme der vier Regressionen mit Schwellenwert 1,15 m/s². Höchstwahrscheinlich kommt die fehlende Signifikanz bei 1,15 m/s² durch die geringe Zahl von Personen zustande, die bei diesem Schwellenwert überhaupt noch eine Schwingungsdosis aufweisen.

Vergleicht man die Ergebnisse für die verschiedenen Dosisformeln, so zeigt sich eine leichte Überlegenheit der Dosisformel 1 auf der Grundlage des $a_{wz(8)}$: Für jeden Schwellenwert zeigt sich hier ein etwas höheres OR

als bei den anderen Dosisformeln und die untere Grenze des Konfidenzintervalls liegt etwas höher, während der AIC-Wert etwas niedriger ist, d. h. die Anpassungsgüte dieses Prädiktors ist etwas besser.

Tabelle 23:

Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit Dosisformeln 1 bis 4 mit unterschiedlichen Schwellenwerten von 0,0 bis 1,15 m/s^2 , (vgl. Abschnitt 2.4.2, Skalierung der Dosiswerte 1: 103, bereinigte Stichprobe $n = 315$); Regressionsanalysen mit den Prädiktoren Lebensalter und Dosis (Methode „Einschluss“). Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 414,89

Zielkriterium „Lumbalsyndrom“	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR [CI _{95%}]	AIC
	B	S	T	P		
Schwellenwert in m/s^2	Dosisformel 1: Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$					
0,00	0,323	0,10	11,08	0,001	1,38 [1,14/1,67]	403,63
0,45	0,315	0,09	12,01	0,001	1,37 [1,15/1,64]	402,64
0,50	0,314	0,09	12,06	0,001	1,37 [1,15/1,63]	402,56
0,63	0,217	0,08	6,87	0,009	1,24 [1,06/1,46]	408,90
0,80	0,177	0,09	4,18	0,042	1,19 [1,01 / 1,41]	411,98
1,15	0,770	0,50	2,33	0,128	2,16 [0,80/5,80]	409,88
Schwellenwert in m/s^2	Dosisformel 2: Tagesexposition A(8)					
0,00	0,276	0,08	10,77	0,001	1,32 [1,12/1,55]	404,30
0,45	0,271	0,08	11,63	0,001	1,31 [1,12/1,53]	403,38
0,50	0,261	0,08	11,17	0,001	1,30 [1,11/1,51]	403,95
0,63	0,240	0,08	10,06	0,002	1,27 [1,10/1,47]	405,19
0,80	0,149	0,07	4,22	0,041	1,16 [1,01/1,34]	412,12
1,15	0,310	0,19	2,73	0,099	1,36 [0,94/1,97]	412,65
Schwellenwert in m/s^2	Dosisformel 3: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k_{xyz} = 1,0$					
0,00	0,177	0,06	10,39	0,001	1,20 [1,07/1,34]	404,83
0,45	0,170	0,05	10,30	0,001	1,19 [1,07/1,33]	405,00
0,50	0,175	0,05	10,13	0,002	1,19 [1,07/1,32]	405,30
0,63	0,117	0,04	11,15	0,001	1,19 [1,07/1,32]	404,01
0,80	0,088	0,06	10,39	0,001	1,12 [1,05/1,21]	404,99
1,15	0,177	0,06	2,51	0,114	1,09 [0,98/1,22]	414,08

Zielkriterium „Lumbalsyndrom“	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR [CI _{95%}]	AIC
	B	S	T	P		
Schwellenwert in m/s²	Dosisformel 4: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k_{xy} = 1,4$					
0,00	0,124	0,04	9,70	0,002	1,13 [1,05/1,22]	405,75
0,45	0,120	0,04	9,36	0,002	1,13 [1,04/1,22]	406,21
0,50	0,122	0,04	9,81	0,002	1,13 [1,05/1,22]	405,65
0,63	0,112	0,04	9,08	0,003	1,12 [1,04/1,20]	406,64
0,80	0,117	0,04	10,39	0,001	1,12 [1,05/1,21]	404,99
1,15	0,056	0,03	9,70	0,002	1,06 [0,99/1,13]	413,85

Die Tagesexposition A(8) (Dosisformel 2) steht etwas schlechter da, hebt sich aber immer noch recht deutlich von den Schwingungsgesamtwerten ab. Allerdings ist bei den Dosisformeln 3 und 4 auch zu berücksichtigen, dass die Vektorsummen zu etwas höheren absoluten Beträgen führen als die Dosisformeln 1 und 2. Da sich die Odds Ratios auf 1000 Einheiten der Belastungskenngröße beziehen, ist diese Grenze bei Vektorbeträgen schneller erreicht. Selbst bei der Tagesexposition A(8) ist schon zu bedenken, dass sie über die gesamte Stichprobe hinweg etwas höhere Beträge erreicht als die Beurteilungsbeschleunigung in z-Richtung, sodass diese beiden Kennwerte einen unterschiedlichen Skalenumfang haben. Betrachtet man nun die verschiedenen Schwellenwerte, so zeigen sich sowohl bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ als auch bei der Tagesexposition A(8) sehr ähnliche und günstige Resultate für die ersten drei Schwellenwerte von 0,0 bis 0,5 m/s²: relativ hohe OR und enge Konfidenzgrenzen bei niedrigen AIC-Werten. Beim Schwellenwert 0,63 m/s² sind die Ergebnisse geringfügig schlechter – und dies gilt erst recht bei noch höheren Schwellenwerten. Allerdings handelt es sich teilweise um Unterschiede in

der zweiten Nachkommastelle, die man zwar deskriptiv erfassen kann, aber nicht überbewerten sollte. Bei den Schwingungsgesamtwerten a_{wv} (Dosisformeln 3 und 4) zeigen sich kaum noch Unterschiede zwischen den Schwellenwerten.

Grundsätzlich kann man festhalten, dass sich sowohl auf der Grundlage der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ als auch der Tagesexposition A(8) ein deutlich erhöhtes Risiko der Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei einem Anstieg der Schwingungsgesamtdosis um 1 000 Einheiten – also von „keine Gefährdung“ zu „hoher Gefährdung“ – zeigt. Je nach zugrunde gelegtem Schwellenwert kann dieser Risikoanstieg deutlich über 30 % liegen. Auf der Basis der Schwingungsgesamtwerte zeigen sich Risikoerhöhungen in einem Bereich bis zu 20 %. Praktisch relevanter als die bisher betrachteten Odds Ratios wäre jedoch eine Aussage zu einem geringeren Anstieg der Belastungsdosis, z. B. um jeweils 500 Einheiten. Dies würde einer fast sechsjährigen Exposition mit $a_{w(8)} = 0,63$ m/s² oder 3,5 Jahren mit $a_{w(8)} = 0,8$ m/s² entsprechen. Tabelle 24 gibt die Ergebnisse der gleichen Regressionsanalysen wieder, wenn der Prädiktor entsprechend mit 1 : 500

skaliert wird. Die vorher beschriebenen Tendenzen zeigen sich auch hier, aber die Odds Ratios liegen jetzt insgesamt enger beieinander – sowohl in Bezug auf die verschiedenen Dosisformeln als auch auf die Schwellenwerte. Insbesondere sind die Ergebnisse für

die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ und für die Tagesexposition A(8) sehr ähnlich und ergeben einen signifikanten Anstieg des Lumbalsyndrom-Risikos pro 500 Einheiten der GKV-Belastungsdosis, der je nach Schwellenwert variiert.

Tabelle 24:

Logistische Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ mit Dosisformeln 1 bis 4 mit unterschiedlichen Schwellenwerten von 0,0 bis 1,15 m/s², (vgl. Abschnitt 2.4.2, Skalierung der Dosiswerte 1 : 500, bereinigte Stichprobe n = 315); Regressionsanalysen mit den Prädiktoren Lebensalter und Dosis (Methode „Einschluss“) Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 414,89

Zielkriterium „Lumbalsyndrom“	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR [CI _{95%}]	AIC
	B	S	t	P		
Schwellenwert in m/s²	Dosisformel 1: Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$					
0,00	0,000	0,00	11,08	0,001	1,18 [1,07/1,29]	403,63
0,45	0,000	0,00	12,01	0,001	1,17 [1,07/1,28]	402,64
0,50	0,000	0,00	12,06	0,001	1,17 [1,07/1,28]	402,56
0,63	0,000	0,00	6,87	0,009	1,11 [1,03/1,21]	408,90
0,80	0,000	0,00	4,18	0,042	1,09 [1,00/1,19]	411,98
1,15	0,001	0,00	2,33	0,128	1,47 [0,90/2,41]	409,88
Schwellenwert in m/s²	Dosisformel 2: Tagesexposition A(8)					
0,00	0,000	0,00	10,77	0,001	1,15 [1,06/1,25]	404,30
0,45	0,000	0,00	11,63	0,001	1,14 [1,06/1,24]	403,38
0,50	0,000	0,00	11,17	0,001	1,14 [1,06/1,23]	403,95
0,63	0,000	0,00	10,06	0,002	1,13 [1,05/1,21]	405,19
0,80	0,000	0,00	4,22	0,041	1,08 [1,00/1,16]	412,12
1,15	0,000	0,00	2,73	0,099	1,17 [0,97/1,40]	412,65
Schwellenwert in m/s²	Dosisformel 3: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k_{xyz} = 1,0$					
0,00	0,000	0,00	10,39	0,001	1,10 [1,04/1,16]	404,83
0,45	0,000	0,00	10,30	0,001	1,09 [1,03/1,15]	405,00
0,50	0,000	0,00	10,13	0,002	1,09 [1,03/1,15]	405,30
0,63	0,000	0,00	11,15	0,001	1,09 [1,04/1,15]	404,01
0,80	0,000	0,00	10,39	0,001	1,06 [1,02/1,10]	404,99
1,15	0,000	0,00	2,51	0,114	1,05 [0,99/1,10]	414,08

Zielkriterium „Lumbalsyndrom“	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR [CI _{95%}]	AIC
	B	S	t	P		
Schwellenwert in m/s ²	Dosisformel 4: Schwingungsgesamtwert a_{ww} mit $k_{xy} = 1,4$					
0,00	0,000	0,00	9,70	0,002	1,06 [1,02/1,11]	405,75
0,45	0,000	0,00	9,36	0,002	1,06 [1,02/1,10]	406,21
0,50	0,000	0,00	9,81	0,002	1,06 [1,02/1,10]	405,65
0,63	0,000	0,00	9,08	0,003	1,06 [1,02/1,10]	406,64
0,80	0,000	0,00	10,39	0,001	1,06 [1,02/1,10]	404,99
1,15	0,000	0,00	9,70	0,002	1,03 [1,00/1,06]	413,85

4.4.2 Vergleich von Dosisgruppen bei verschiedenen Schwellenwerten

Der wesentliche Zweck eines Schwellenwertes besteht darin, möglichst deutlich zwischen gering und höher Belasteten im Hinblick auf eine mögliche LWS-Gefährdung zu trennen. Angesichts der geringen Unterschiede in den eben vorgestellten statistischen Ergebnissen wird in Abbildung 11 exemplarisch gezeigt, wie sich drei konkrete Schwellenwerte der GKV-Belastung auf den Gruppenvergleich von unbelasteten vs. höher belasteten Teilnehmern auswirken. Die höher Belasteten werden nochmals unterteilt nach der Höhe ihrer Schwingungsgesamtdosis, wobei eine zehnjährige Exposition oberhalb des jeweiligen Schwellenwertes als hohe Belastung definiert wurde.

Im Folgenden wird also die prozentuale Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ in folgenden drei Dosisgruppen betrachtet:

- Dosisgruppe I – nie über dem betreffenden Schwellenwert exponiert

- Dosisgruppe II – über dem Schwellenwert exponiert, aber nicht den Dosiswert von zehn Jahren erreicht
- Dosisgruppe III – über dem Schwellenwert exponiert und den Dosiswert von zehn Jahren überschritten.

Da sich der Dosiswert auf den jeweiligen Schwellenwert bezieht, ergeben sich folgende drei Grenzwerte:

- für Schwellenwert 0,5 m/s²:

$$D_v = 0,52 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} = 552,5$$
- für Schwellenwert 0,63 m/s²:

$$D_v = 0,632 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} = 877,15$$
- für Schwellenwert 0,8 m/s²:

$$D_v = 0,82 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} = 1414,4.$$

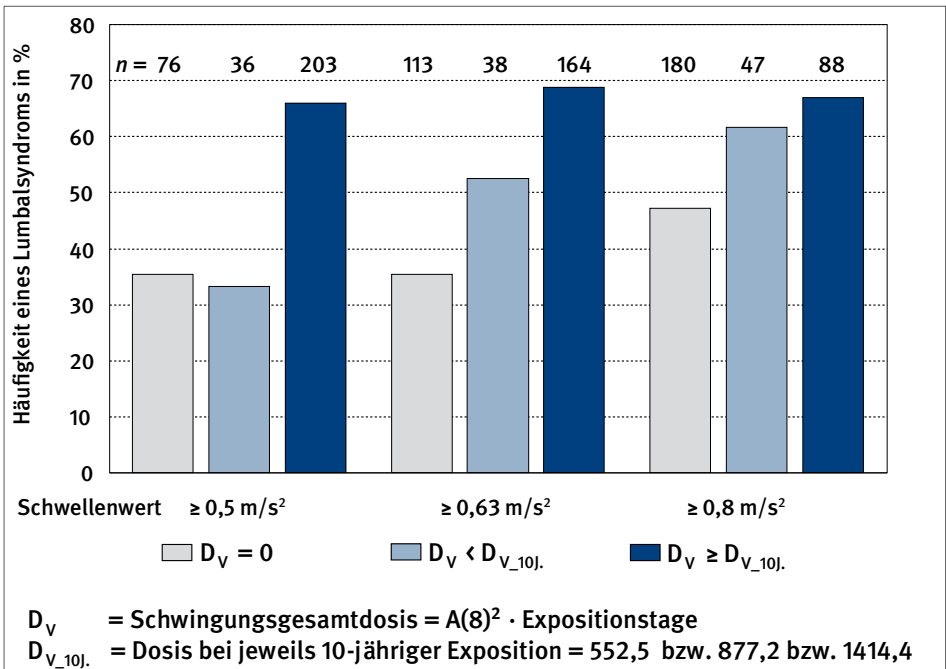
Wie Abbildung 11 zeigt, verteilt sich die bereinigte Stichprobe von 315 Personen je nach gewähltem Schwellenwert in unterschiedlicher Weise auf die dargestellten drei Dosisgruppen. Mit zunehmendem

Schwellenwert verbleiben mehr Personen in der Dosisgruppe I („nie über Schwellenwert exponiert“), und auch bei den höher belasteten kann sich die Gesamtdosis ändern, weil Zeiträume niedrigerer Belastung aus der Dosisberechnung herausfallen. In Abbildung 11 ist gut erkennbar, wie sich die Anhebung des Schwellenwertes von 0,5 auf 0,63 und auf 0,8 m/s² auf die Gruppengrößen und die jeweilige prozentuale Diagnosehäufigkeit auswirkt.

die Tagesexposition $A(8) > 0,5 \text{ m/s}^2$ – so fällt die große Anzahl von Personen auf ($n = 203$), die den $D_{V_{10j}}$ überschritten haben und mit etwa 65 % einen hohen Prozentsatz von Lumbalsyndrom-Diagnosen aufweisen. Zwischen den beiden anderen Dosisgruppen zeigt sich nur ein geringer Unterschied in der Diagnosehäufigkeit – sogar mit etwas größerer Häufigkeit in der unbelasteten Dosisgruppe –, sodass der Schwellenwert von 0,5 m/s² ganz offensichtlich über keine große Trennschärfe verfügt.

Betrachtet man zunächst die drei Balken links für Dosisgruppe I – Schwellenwert für

Abbildung 11: Relative Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ für die Dosisgruppe I (nie über Schwellenwert belastet), II (über Schwellenwert belastet, aber nicht den betreffenden Zehn-Jahres-Dosiswert erreicht) und III (den betreffenden Zehn-Jahres Dosiswert überschritten) auf der Grundlage verschiedener Schwellenwerte der Tagesexposition A(8) (bereinigte Stichprobe $n = 315$)



In der mittleren Balkengruppe vollzieht sich eine Wanderbewegung: Insgesamt 37 Personen (also fast 12 % der Stichprobe) wechseln in die linke Dosisgruppe „nie über Schwellenwert belastet“. Als Folge dieser Verschiebung ergibt sich jetzt in der mittleren Dosisgruppe II eine deutlich höhere Diagnosehäufigkeit als in der unbelasteten Dosisgruppe I. Insgesamt zeigt sich eine deutliche Stufung der Beschwerdehäufigkeit in Abhängigkeit von der Dosisgruppe, die sich plausibel als Auswirkung der Schwellenwertüberschreitung und zusätzlich der Expositionszeit interpretieren lässt.

In der rechten Balkengruppe ergibt sich eine weitere Wanderbewegung, die die Dosisgruppe „nie über Schwellenwert belastet“ auf 180 Personen anwachsen lässt: Die Häufigkeit von Lumbalsyndrom-Diagnosen steigt hier deutlich auf fast 50 %, während sich zwischen den beiden Gruppen, die die Zehn-Jahres-Dosis erreicht bzw. nicht erreicht haben, kaum noch ein Häufigkeitsunterschied in den Diagnosen zeigt. Dieser Schwellenwert von $0,8 \text{ m/s}^2$ liegt offensichtlich so hoch, dass er zu einer Nivellierung der drei Dosisgruppen führt. Diese Ergebnisse legen nahe, dass zumindest in dieser Stichprobe ein Schwellenwert von $0,63 \text{ m/s}^2$ am ehesten geeignet ist, um sowohl zwischen nicht gefährdet belasteten und belasteten als auch zwischen kürzer und langfristig exponierten Personen zu unterscheiden.

Für die mittlere Balkengruppe in Abbildung 11 wurde daher nochmals eine logistische Regression mit der Zielvariable „Lumbalsyndrom“ gerechnet, in der neben dem Lebensalter die beschriebene Belastungsklasse als Prädiktor verwandt wurde. Neben einem Odds Ratio von 1,05 für das Lebensalter in

Jahren ergibt sich für den Prädiktor „Belastungsklasse“ ein OR von 1,80 ($CI_{95\%} 1,36/2,39$). Mit jedem Wechsel der Belastungsklasse – also von unter zu über $0,63 \text{ m/s}^2$ belastet sowie von unter zu über der Zehn-Jahres-Dosis belastet – erhöht sich das Risiko eines „Lumbalsyndroms“ jeweils um 80 %. Mit ähnlichen Argumenten wurde bereits in der GKV-Studie begründet, dass eine Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ von $0,63 \text{ m/s}^2$ als Schwellenwert einer gesundheitlichen Gefährdung als plausibel anzusehen ist [10]. Auch für die neu berechneten Expositionswerte dieser Reanalyse und für den Kennwert Tagesexposition $A(8)$ behalten diese Ergebnisse also ihre Gültigkeit.

4.4.3 Vergleich verschiedener Dosisgruppen bei einem Schwellenwert von Tagesexposition $A(8) > 0,63 \text{ m/s}^2$

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse für die Tagesexposition $A(8)$ sprechen zwar deutlich für einen Schwellenwert der GKV-Belastung von $A(8) > 0,63 \text{ m/s}^2$. Aber daraus folgt nicht zwangsläufig, dass der zehnjährige Dosiswert von $D_v = 877,2$ Jahren ein optimales Kriterium für die Beurteilung einer gesteigerten Gefährdung für die LWS durch lange Expositionsdauer ist. Im Unterschied zu den in Abbildung 11 dargestellten Berechnungen müssten zur Klärung dieser Frage unterschiedliche Dosiswerte verglichen werden, die alle auf einem Schwellenwert von $A(8) > 0,63 \text{ m/s}^2$ beruhen. Daher wurden in einem nächsten Schritt folgende vier Dosisgruppen in ihrer Diagnosehäufigkeit analysiert:

- Dosisgruppe I: immer unterhalb einer Tagesexposition $A(8)$ von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, somit Dosis $D_v = 0$

- Dosisgruppe II: oberhalb von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, aber weniger als zehn Jahre lang (ergibt als Dosis D_v einen Wert $< 877,2$)
- Dosisgruppe III: oberhalb von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, und zwar länger als zehn Jahre ($D_v > 877,2$), aber kürzer als 16,6 Jahre (d. h. $D_v < 1\,414,4$)
- Dosisgruppe IV: oberhalb von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, und zwar länger als 16,6 Jahre (entspricht $D_v > 1\,414,4$)

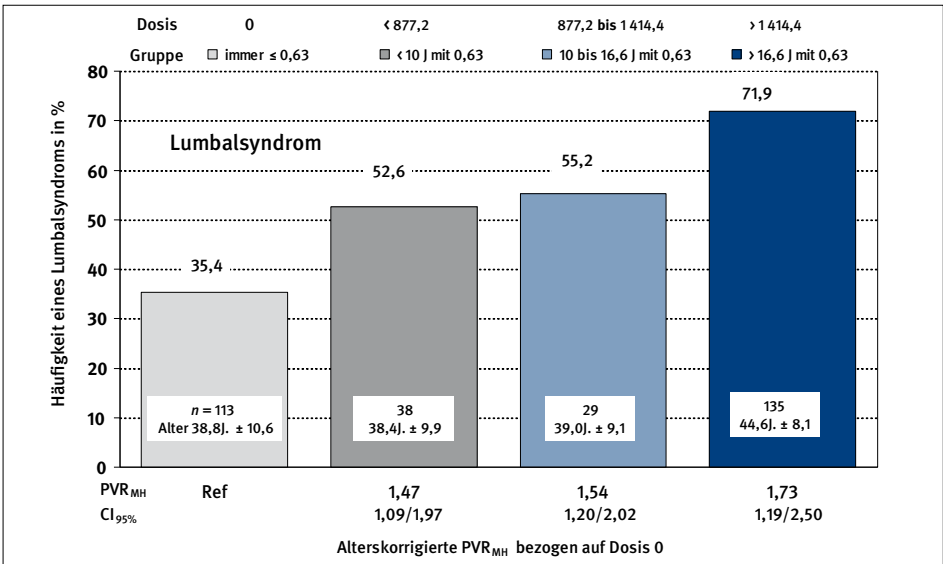
deren rechter Balken noch einmal unterteilt nach einer Expositionsdauer von zehn bis 16,6 Jahren (entspricht D_v 877,2 bis 1 414,4 bei $0,63 \text{ m/s}^2$) und einer Expositionsdauer von mehr als 16,6 J (entspricht $D_v > 1\,414,4$ bei $0,63 \text{ m/s}^2$).

Abbildung 12 zeigt den bereits bekannten Anstieg der Diagnosehäufigkeit zwischen Dosisgruppe I und II und das deutlich höhere Vorkommen eines Lumbalsyndroms in Dosisgruppe IV. Zwischen den Dosisgruppen II und III steigt die Häufigkeit nur um wenige Prozente an.

Im Prinzip wird hier also die mittlere Balkengruppe aus Abbildung 11 betrachtet und

Abbildung 12:

Prävalenz und alterskorrigiertes Risiko eines Lumbalsyndroms in verschiedenen Dosisgruppen für die Tagesexposition $A(8)$ bei Schwellenwert $a_w > 0,63 \text{ m/s}^2$



In den Balken ist auch für jede Dosisgruppe das durchschnittliche Lebensalter eingetragen. Dosisgruppe IV zeigt ein rund fünf Jahre höheres Durchschnittsalter als die anderen

Dosisgruppen. Zur Adjustierung des Altersinflusses wurden daher Prävalenzraten-Verhältnisse berechnet mit Alterskorrektur nach *Mantel-Haenszel* (PVR_{MH}), die ebenfalls in der

Abbildung wiedergegeben sind. Die Werte beziehen sich jeweils auf die Dosisgruppe I (Dosis $D_v = 0$).

Die Risiken steigen erwartungsgemäß an und erweisen sich alle als signifikant erhöht, wie die untere Grenze des Konfidenzintervalls anzeigt. Es bestätigt sich wieder, dass der Schwellenwert von $0,63 \text{ m/s}^2$ den Beginn des Lumbalsyndrom-Risikos gut abbildet. Wer über $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert ist, hat ein um das 1,5-Fache gesteigertes Risiko.

Der Unterschied zwischen der zweiten und der dritten Dosisgruppe ist nicht sehr groß (PVR_{MH} 1,47 im Vergleich zu PVR_{MH} 1,54). Bis zu einer Dosis von 1414,4 ist zwar ein

erhöhtes Risiko im Vergleich mit den Unbelasteten vorhanden, aber es steigt offenbar nicht kontinuierlich an. Oberhalb von $D_v = 1414,4$ gibt es dagegen einen deutlichen Sprung und das PVR_{MH} steigt auf 1,73.

In einem weiteren Auswertungsschritt wurden Adjustierungen für weitere Einflussfaktoren vorgenommen, indem Poissonregressionen mit robustem Schätzer gerechnet wurden. Zusätzlich zum Alter bei der Untersuchung und zur Schwingungsdosis wurden die Diagnose „Haltungsinsuffizienz“ und der Body-Mass-Index (BMI) als Prädiktoren aufgenommen. Tabelle 25 gibt das Ergebnis der statistischen Auswertung aus dem Statistikprogramm STATA wieder.

Tabelle 25:

Ergebnis der Poissonregression für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ mit Haltungsinsuffizienz und BMI als zusätzlichen Größen Poisson-Regressionskoeffizienten (Auswertungsoption `vce(robust)`):

Prädiktor	Incident rate ratios IRR	Standardfehler	z-Wert	p >	95% CI für Koeffizienten
Alter	1,021	0,006	3,29	0,001	1,008/1,033
Haltungsinsuffizienz	1,054	0,115	0,48	0,629	0,851/1,307
BMI-Schwellenwert	0,979	0,014	- 1,48	0,139	0,953/1,007
Dosisgruppe II	1,510	0,296	2,10	0,036	1,028/2,217
Dosisgruppe III	1,610	0,324	2,37	0,018	1,085/2,387
Dosisgruppe IV	1,845	0,257	4,40	0,000	1,405/2,423

$n = 315$ / Wald $\chi^2 = 43,53$ / $p(\chi^2) = 0,000$ / pseudo- $R^2 = 0,039$

Bezugsgröße für das jeweilige IRR ist die Dosisgruppe I mit Dosis $D_v = 0$ gemäß Abbildung 12. Danach haben das Alter pro Lebensjahr und alle drei Dosisstufen eine signifikante Risikoerhöhung zur Folge, das Vorliegen der Diagnose „Haltungsinsuffizienz“ und der BMI dagegen nicht.

Als Schlussfolgerungen zum Einfluss von Schwellenwert und Expositionsdauer ergeben sich damit aus den dargestellten Analysen:

- Ganzkörperschwingungen — gemessen als Tagesexposition $A(8)$ — führen spätestens bei Überschreitung eines Schwellenwertes von $0,63 \text{ m/s}^2$, d. h. bei Dosisgruppe II und

III, zu einem deutlich höheren Risiko eines Lumbalsyndroms.

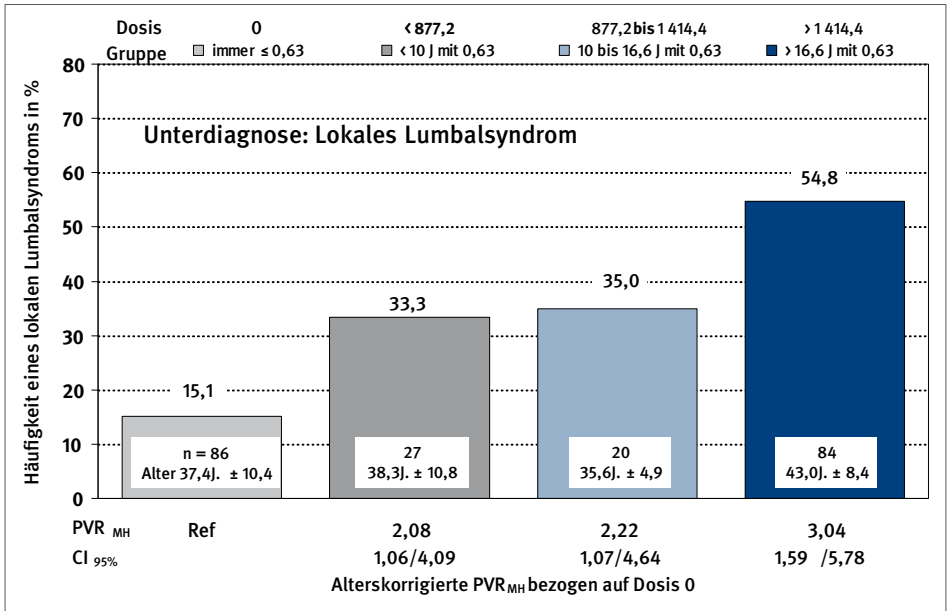
4.4.4 Betrachtung der Unterdiagnose „Lokales Lumbalsyndrom“

- Eine besonders deutliche Risikozunahme zeigt sich im Bereich eines Dosiswertes oberhalb von $D_v = 1414$. Dieser Wert wird bei hohen Belastungen schon nach relativ wenigen Jahren erreicht (z. B. in zehn Jahren bei Tagesexposition $A(8) = 0,8 \text{ m/s}^2$ und in etwa 16,5 Jahren bei Tagesexposition $A(8) = 0,63 \text{ m/s}^2$).

In Abbildung 13 wird die gleiche Analyse wie in Abbildung 12 für die Unterdiagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ vorgestellt. Tendenziell entsprechen die Relationen zwischen den vier dargestellten Dosisgruppen den Ergebnissen für die Diagnose „Lumbalsyndrom“.

Abbildung 13:

Prävalenz und alterskorrigiertes Risiko eines lokalen Lumbalsyndroms in verschiedenen Dosisgruppen für die Tagesexposition $A(8)$ bei Schwellenwert $a_w > 0,63 \text{ m/s}^2$ ($n = 217$ nach Ausschluss der Personen mit der Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“, auf der Basis der bereinigten Stichprobe von $n = 315$)



Der Unterschied zwischen den Dosisgruppen I und II – also „unbelastet“ vs. „weniger als zehn Jahre mit $0,63 \text{ m/s}^2$ belastet“ – fällt allerdings deutlicher aus. Insgesamt sind die Prävalenzraten-Verhältnisse mit Werten größer 2,0 eindeutiger als in Abbildung 12. Es

bestätigt sich damit die Beobachtung aus Abschnitt 4.1.3, dass sich der Einfluss der GKV-Belastung bei der Diagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ deutlicher abzeichnet als bei der übergeordneten Diagnose „Lumbalsyndrom“.

Auch für die Diagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ wurde eine Poissonregression wie im vorhergehenden Abschnitt durchgeführt, um den Einfluss der verschiedenen Parameter besser abschätzen zu können (Tabelle 26). Für die Dosisstufen II bis IV ergibt sich wieder eine signifikante Risikosteigerung gegenüber der Dosisgruppe I – am deutlichsten für die Dosisgruppe IV. Der Faktor „Lebensalter“

weist erstaunlicherweise ein Konfidenzintervall auf, das die Eins einschließt und damit keine Signifikanz ergibt. Dafür zeigt sich beim BMI ganz knapp eine Signifikanz mit einem Intervall von 0,903 bis 0,995, also eine negative Beziehung: Mit höherem BMI liegt ein protektiver Faktor für die Diagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ vor.

Tabelle 26:

Ergebnis der Poissonregression für die Diagnose „Lokales Lumbalsyndrom“ mit Haltungsinsuffizienz und BMI als zusätzlichen Größen Poisson-Regressionskoeffizienten (Auswertungsoption vce(robust))

Prädiktor	Incident rate ratios IRR	Standardfehler	z-Wert	p >	95% CI für Koeffizienten
Alter	1,015	0,012	1,35	0,178	0,993/1,038
Haltungsinsuffizienz	1,082	0,255	0,33	0,739	0,682/1,717
BMI-Schwellenwert	0,948	0,235	- 2,16	0,031	0,903/0,995
Dosisgruppe II	2,253	0,825	2,22	0,027	1,099/4,617
Dosisgruppe III	2,550	0,998	2,39	0,017	1,184/5,492
Dosisgruppe IV	3,556	0,980	4,60	0,000	2,071/6,104

$n = 217$ / Wald $\chi^2 = 31.92$ / $p(\chi^2) = 0,000$ / pseudo- $R^2 = 0,076$

4.4.5 Betrachtung der Unterdiagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“

In Abbildung 14 wird die gleiche Auswertung schließlich für die Unterdiagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“ vorgenommen. Rein optisch zeigen die vier Balken hier deutlicher einen stetigen Anstieg. Allerdings umfasst schon die nie über dem Schwellenwert von $0,63 \text{ m/s}^2$ belastete Dosisgruppe I mit 27 % einen relativ hohen Anteil an Diagnosen, sodass das PVR zwischen den beiden ersten Dosisgruppen nicht signifikant ist. Erst bei Dosisgruppe III, also mit einer deutlich höheren Dosis bzw. längeren

Expositionsdauer, ergeben sich signifikante Prävalenzraten-Verhältnisse.

Tabelle 27 zeigt die Ergebnisse der Poissonregression für die Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“. Auch mit diesem Ansatz zeigen sich gleiche Ergebnisse wie bei den PVR-Berechnungen: Nur die Regressionskoeffizienten „Alter“ und „höchste Dosisgruppen“ erbringen einen signifikanten Beitrag für die Vorhersage der Diagnose.

Bereits in Abschnitt 4.1.4 wurde vermutet, dass die relativ schwächeren Zusammenhänge zwischen maximaler Tagesexposition und Unterdiagnose „Lumbales

Wurzelsyndrom“ mit einem Selektionseffekt zusammenhängen könnten, dergestalt, dass Personen mit dieser Diagnose eher nicht in schwingungsexponierten Tätigkeiten verbleiben.

Referenzgruppe nicht signifikant und für Dosisgruppe III nur in der PVR-Berechnung. Das mag durch diesen hypothetischen Selektionseffekt bedingt sein. In der hoch belasteten Dosisgruppe IV zeigt sich jedoch, dass die Schwingungsexposition auch bei dieser Diagnose zu einem deutlich erhöhten Krankheitsrisiko führt.

In Abbildung 14 und Tabelle 27 ist der festgestellte Risikoanstieg für diese Diagnose in der Dosisgruppe II gegenüber der

Abbildung 14: Prävalenz und alterskorrigiertes Risiko eines lumbalen Wurzelsyndroms in verschiedenen Dosisgruppen für die Tagesexposition A(8) bei Schwellenwert $a_w > 0,63 \text{ m/s}^2$ ($n = 240$ nach Ausschluss der Personen mit der Diagnose „lokales Lumbalsyndrom“, auf der Basis der bereinigten Stichprobe von $n = 315$)

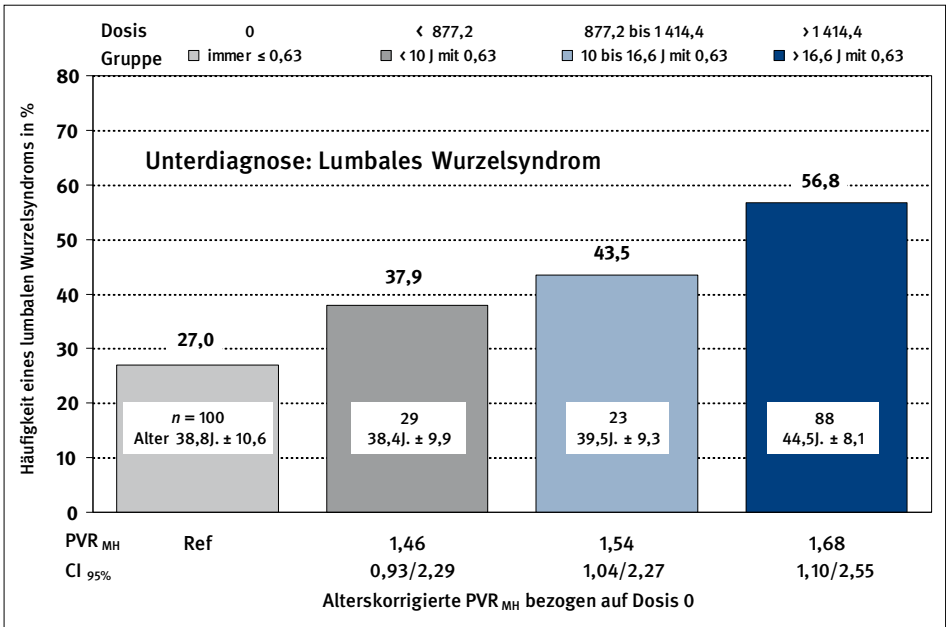


Tabelle 27:

Ergebnis der Poissonregression für die Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“ mit Haltungsinsuffizienz und BMI als zusätzlichen Größen Poisson-Regressionskoeffizienten (Auswertungsoption vce (robust))

Prädiktor	Incident rate ratios IRR	Standardfehler	z-Wert	p >	95% CI für Koeffizienten
Alter	1,034	0,009	3,80	0,000	1,016/1,052
Haltungsinsuffizienz	1,121	0,181	0,70	0,481	0,816/1,539
BMI-Schwellenwert	0,989	0,195	- 0,56	0,573	0,951/1,028
Dosisgruppe II	1,493	0,434	1,38	0,169	0,891/2,619
Dosisgruppe III	1,527	0,420	1,54	0,124	0,890/2,619
Dosisgruppe IV	1,724	0,325	2,89	0,004	1,191/2,495

$n = 240$ / Wald $\chi^2 = 35.22$ / $p(\chi^2) = 0,000$ / pseudo- $R^2 = 0,056$

4.5 Zielkriterium: zusammenfassende Beurteilungen

Wie schon eingangs erwähnt wurde die „zusammenfassende Beurteilung“ nach jedem Untersuchungsabschnitt vorgenommen, um zusätzlich zur Diagnose auch den Schweregrad der degenerativen WS-Veränderung aus fachlicher Sicht zu dokumentieren.

Zum Abschluss der Zusammenhangsanalysen soll an dieser Stelle die zusammenfassende Beurteilung „Gesamt“ behandelt werden, also die abschließende Beurteilung unter Einbeziehung aller anamnestischen, klinischen und röntgenologischen Befunde. Tabelle 28 zeigt, wie sich die Diagnose „Lumbalsyndrom“ auf die vier Kategorien

- altersgerecht
- leichte Veränderung
- mittlere Veränderung
- schwere Veränderung

dieser zusammenfassenden Beurteilung verteilt.

Regressionsanalytisch bot es sich zunächst an, eine lineare multiple Regression zu rechnen mit dem Zielkriterium „zusammenfassende Beurteilung“ in diesen vier Abstufungen. Dabei ergab sich aber keine signifikante Rolle des Prädiktors „GKV-Belastung“ neben dem Lebensalter. Deshalb wurden im Anschluss logistische Regressionen mit den Prädiktoren Alter und Schwingungsbelastung durchgeführt für eine Zielvariable „LWS-Beurteilung“ mit den Ausprägungen „altersgemäß“ und „degenerative Veränderungen“.

Auch hier ergaben sich zwischen Tages-Belastungskennwerten (Maximalwerte oder Durchschnittswerte) und Zielvariable keine signifikanten Zusammenhänge. Für einige wenige Dosisberechnungen zeigte sich jedoch neben dem Prädiktor „Alter“ auch ein Effekt der Schwingungsbelastung, und zwar für die Dosisformeln 1 und 2 nach Abschnitt 2.4.2, also für Dosisberechnungen auf der Grundlage des $a_{wz(8)}$ und der Tagesexposition A(8).

Tabelle 29 gibt die aussagekräftigsten Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen

wieder. Für beide Dosisformeln ergeben sich nur mit den niedrigeren Schwellenwerten bis 0,63 m/s² signifikante Ergebnisse, wobei der Schwellenwert 0,63 m/s² bei Odds Ratio und AIC-Wert am besten abschneidet. Bei

höheren Schwellenwerten dürften auch hier – ähnlich wie bei den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts – zu viele Erkrankte unter die Unbelasteten fallen.

Tabelle 28:

Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ in den vier Kategorien der zusammenfassenden Beurteilung „Gesamt“ (bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Zusammenfassende Beurteilung	Lumbalsyndrom liegt nicht vor	Lumbalsyndrom liegt vor	Σ
Altersgerecht	43 (97,8 %)	6 (1,2 %)	49 (34,0 %)
Leichte Veränderung	76 (64,4 %)	42 (35,6 %)	118 (30,8 %)
Mittlere Veränderung	21 (20,0 %)	84 (80,0 %)	105 (20,0 %)
Schwere Veränderung	2 (4,7 %)	41 (95,3 %)	43 (15,2 %)
Σ	142 (45,1 %)	173 (54,9 %)	315 (100 %)

Tabelle 29:

Logistische Regressionen mit Dosiswerten der Schwingungsbelastung nach den Dosisformeln 1 bis 2 (vgl. Abschnitt 2.4.2) – jeweils mit unterschiedlichen Schwellenkriterien von 0 bis 0,63 m/s²: alternierende Verwendung als Prädiktor in logistischen Regressionen für die Variable „zusammenfassende Beurteilung Gesamt“ („altersgemäß“ vs. „deg. Veränderung“) (bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR (CI _{95%})	AIC
	B	s	t	P		
Schwellenwert in m/s²	Dosisformel 1: Beurteilungsbeschleunigung a_{wz(8)}					
0,00	0,338	0,17	3,89	0,049	1,14 (1,00/1,95)	252,14
0,50	0,274	0,15	3,23	0,072	1,31 (0,98/1,76)	253,01
0,63	0,326	0,16	3,90	0,048	1,38 (1,02/1,89)	251,81
Schwellenwert in m/s²	Dosisformel 2: Tagesexposition A(8)					
0,00	0,313	0,15	4,38	0,037	1,36 (1,01/1,83)	251,60
0,50	0,265	0,13	3,84	0,051	1,30 (1,01/1,68)	252,33
0,63	0,289	0,13	4,39	0,036	1,33 (1,03/1,72)	251,46

Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 254,79

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den entsprechenden Zeilen in Tabelle 24, also den Regressionen mit dem Zielkriterium „Lumbalsyndrom“, dann sind die Odds Ratios dort mindestens genauso stark wie in dieser Tabelle.

Die mit den zusammenfassenden Beurteilungen verbundene Erwartung, die Auswirkungen der GKV-Belastung durch eine differenziertere Zielvariable besser abbilden zu können, hat sich damit im Grunde nicht erfüllt.

5 Zusammenhangsanalysen: Schwingungsbelastung und Röntgenbefunde

5.1 Vorbemerkung

Die Ergebnisse der röntgenologischen Untersuchungen in der GKV-Studie [7; 24] sind von besonderem Interesse, weil sich hier eine Differenzierung der klinischen Diagnose „Lumbalsyndrom“ nach radiologischem Befund, Lokalisation und Schweregrad erhoffen lässt, wodurch eventuell klarere Zusammenhänge mit der GKV-Belastung deutlich werden können. Diese Differenzierung bedeutet gleichzeitig eine größere Bandbreite von möglichen Zielkriterien, deren Relevanz als Leitsymptom für schwingungsbedingte LWS-Schäden noch diskutiert wird und daher zu überprüfen ist – z. B. die Frage, welche Segmente der LWS vorzugsweise von

Schwingungen betroffen sind. Im Folgenden sind daher verschiedene röntgenologische Zielkriterien für die Zusammenhangsanalyse mit Schwingungsbelastung zu betrachten.

5.2 Röntgenologische Diagnosen

5.2.1 Häufigkeit der Diagnosen

Zunächst sind in Tabelle 30 die absoluten und prozentualen Häufigkeiten angegeben, mit denen die diagnostizierten degenerativen LWS-Veränderungen in den beiden bisher betrachteten Stichproben auftreten – der Gesamtstichprobe von $n = 388$ und der bereinigten Stichprobe von $n = 315$.

Tabelle 30:
Absolute und prozentuale Häufigkeit diagnostizierter degenerativer Erkrankungen in der Gesamtstichprobe ($n = 388$) und der bereinigten Stichprobe ($n = 315$)

Diagnose	$n = 388$		$n = 315$	
	Anzahl	in %	Anzahl	in %
<i>Chondrosis intervertebralis</i>	42	10,8	34	10,8
<i>Osteochondrosis intervertebralis</i>	64	16,5	52	16,5
<i>Spondylosis deformans</i>	260	67,0	213	67,6
<i>Spondylarthrosis</i>	242	62,4	193	61,3
<i>Zeichen von Diskusprolaps</i>	13	3,4	12	3,8
<i>Pseudospondylolisthese</i>	9	2,3	7	2,2
<i>Retrolisthese</i>	98	25,3	77	24,4
Mindestens eine der genannten degenerativen Erkrankungen	335	86,3	273	86,7

Erstens zeigt die Tabelle sehr deutlich, wie stark degenerative Veränderungen der LWS in dieser Stichprobe verbreitet sind: Über 86 % der Teilnehmer zeigen an wenigstens einem LWS-Segment eine der aufgeführten degenerativen Erkrankungen. Zweitens unterscheiden sich die gesamte und die bereinigte Stichprobe kaum in den prozentualen Häufigkeiten der verschiedenen Diagnosen. Bei den 73 von den weiteren Zusammenhangsanalysen ausgeschlossenen Personen mit LWS-Beschwerden vor oder im ersten Jahr der GKV-Exposition handelt es sich also nicht um besonders stark oder spezifisch von degenerativen Veränderungen betroffene Fälle. Angesichts der Multikausalität von LWS-Veränderungen war für diese Personen eher eine nicht schwingungsbedingte Verursachung ihrer Beschwerden anzunehmen, und dieser methodische Confounder war in der Auswertung durch die Bereinigung der Stichprobe zu berücksichtigen.

5.2.2 Statistische Zusammenhangsanalysen zwischen GKV und Röntgendiagnosen

Zunächst wurden logistische Regressionsanalysen berechnet, um den Zusammenhang zwischen röntgenologischen Diagnosen einerseits und Schwingungsbelastung sowie weiteren Faktoren andererseits zu beschreiben. Für jede Diagnose aus Tabelle 31 und für die zusammenfassende Variable „Mindestens eine der genannten degenerativen Erkrankungen“ wurden identische Regressionsanalysen durchgeführt mit Berücksichtigung folgender Variablen: GKV-Belastung als maximale Tagesexposition A(8), Alter, Haltungsinsuffizienz und Lumbalsyndrom laut klinischer Untersuchung. Exemplarisch werden in Tabelle 31 einige Ergebnisse mit

dem Belastungsmaß „Maximaler Wert der Tagesexposition A(8)“ dargestellt. Aufgeführt sind die Prädiktoren und ihre Kennwerte, die sich jeweils in einer Regressionsanalyse mit einer der oben aufgeführten Diagnosen als Zielvariable als signifikant erwiesen hatten. Ist kein Prädiktor angegeben, wurde in der Analyse nur die Konstante in die Regressionsgleichung aufgenommen. Die Tabelle bezieht sich sowohl auf die Gesamtstichprobe $n = 388$ als auch auf die bereinigte Stichprobe $n = 315$, da die geringere Fallzahl in der letzteren teilweise zu anderen Ergebnissen führt, nämlich eher zu einer geringeren Anzahl von Prädiktoren in der Regressionsgleichung.

Die Tabelle zeigt sehr klar den starken Einfluss des Lebensalters auf die verschiedenen röntgenologischen Diagnosen. Bei *Osteochondrosis*, *Spondylosis deformans* und *Spondylarthrosis* sowie bei der zusammenfassenden Variable „Degenerative Erkrankungen“ ist das Alter der dominierende Prädiktor mit OR zwischen 1,06 und 1,20. Mit **jedem Lebensjahr** steigt also das Risiko, die betreffende Diagnose zu erhalten, entsprechend um 6 bis 20 %. Des Weiteren spielt der BMI bei der häufigsten Diagnose „*Spondylosis deformans*“ und damit auch bei den degenerativen Erkrankungen insgesamt eine Rolle mit einem OR von rund 1,1 – d. h. also ein 10%iger Risikoanstieg mit jedem Indexpunkt. Allerdings fällt der BMI in der bereinigten Stichprobe aus der Regressionsgleichung heraus. Das kann auch als Hinweis darauf interpretiert werden, dass evtl. ein größerer Zusammenhang zwischen Übergewicht und Rückenbeschwerden bei den 73 ausgeschlossenen Personen bestand.

Tabelle 31:

Signifikante Prädiktoren in logistischen Regressionen mit den verschiedenen Röntgendiagnosen als Zielkriterien für die Gesamtstichprobe $n = 388$ und die bereinigte Stichprobe $n = 315$

Röntgendiagnose als Zielkriterium	Prädiktor	$n = 388$			$n = 315$		
		p	OR	CI _{95%}	p	OR	CI _{95%}
<i>Chondrosis</i>		-----			----		
<i>Osteochondrosis</i>	ALTER	0,000	1,10	1,07/1,14	0,000	1,10	1,06/1,15
<i>Spondylosis deformans</i>	ALTER	0,000	1,20	1,15/1,24	0,000	1,20	1,15/1,24
	BMI	0,029	1,09	1,01/1,18	-----		
	max A(8)	0,025	0,36	0,15/0,88	-----		
<i>Spondylarthrosis</i>	ALTER	0,000	1,06	1,04/1,09	0,000	1,07	1,04/1,10
	LUMB	0,028	1,74	1,12/2,72	0,039	1,69	1,03/2,76
Zeichen für <i>Diskus- prolaps</i>	HALTUNG	0,028	3,57	1,14/11,16	-----		
<i>Pseudospondylo- listhese</i>		-----			-----		
<i>Retrolisthese</i>		-----			-----		
Mindestens eine degenerative Erkrankung	ALTER	0,000	1,15	1,10/1,20	0,000	1,15	1,10/1,21
	BMI	0,044	1,10	1,00/1,21	-----		

ALTER = Lebensalter am Untersuchungstag, BMI = Body Mass Index, max A(8) = maximale Tagesexposition A(8) des Tätigkeitszeitraums mit der höchsten Belastung, LUMB = klinische Diagnose „Lumbalsyndrom“, HALTUNG = klinische Diagnose „Haltungsinsuffizienz“

Odds Ratios ermöglichen eine sehr anschauliche Darstellung des Zusammenwirkens von Einflussfaktoren und Zielvariable, da sie die Risikosteigerung bezogen auf die Maßeinheit des jeweiligen Prädiktors angeben (z. B. Risikosteigerung pro Lebensjahr). Streng genommen beziffern sie jedoch nicht das exakte statistische Risiko einer Erkrankung. Die Methode der Wahl dafür ist die Berechnung von Relativen Risiken wie schon bei den klinischen Diagnosen. Daher wurden mit den gleichen Prädiktoren auch Incident Rate Ratios mittels Poissonregressionen für alle erhobenen Röntgendiagnosen berechnet

(Tabelle 32). Die Ergebnisse sind für alle Diagnosen relativ ähnlich und sehr eindeutig: Soweit es überhaupt einen signifikanten Zusammenhang mit einer Röntgendiagnose gibt, handelt es sich immer um den Prädiktor „Lebensalter“, und in einigen Fällen wird zusätzlich die klinische Diagnose „Lumbalsyndrom“ signifikant. Weder das Vorliegen einer Haltungsinsuffizienz noch der BMI oder die Schwingungsbelastung (jeweils maximale Tagesexposition A(8) des Arbeitslebens) erweisen sich hier als signifikante Prädiktoren.

Tabelle 32:

Poissonregressionen zur Berechnung des IRR für die Röntgendiagnosen unter Einschluss von Lebensalter, Haltungsinsuffizienz, BMI, Diagnose „Lumbalsyndrom“ und Tagesexposition A(8)

Zielvariable	Prädiktor	n = 388				n = 315			
		p	IRR	CI _{95%}		p	IRR	CI _{95%}	
<i>Chondrosis intervertebralis</i>	ALTER	0,132	1,022	0,993	1,051	0,219	1,022	0,987	1,058
	HALT	0,761	1,102	0,588	2,063	0,679	1,164	0,565	2,399
	BMI	0,407	0,407	1,029	0,961	0,136	1,059	0,982	1,142
	LUMBAL	0,826	1,071	0,580	1,975	0,892	1,047	0,539	2,032
	A(8)	0,726	1,178	0,470	2,952	0,873	0,916	0,317	2,647
<i>Osteochondrosis intervertebralis</i>	ALTER	0,000	1,082	1,055	1,108	0,000	1,081	1,052	1,111
	HALT	0,250	0,771	0,495	1,201	0,378	0,802	0,491	1,309
	BMI	0,224	1,035	0,978	1,095	0,219	1,037	0,978	1,099
	LUMBAL	0,410	1,232	0,749	2,025	0,588	1,156	0,683	1,957
	A(8)	0,664	1,184	0,552	2,537	0,675	1,209	0,496	2,947
<i>Spondylosis deformans</i>	ALTER	0,000	1,041	1,033	1,049	0,000	1,043	1,034	1,052
	HALT	0,837	0,988	0,883	1,105	0,734	0,979	0,866	1,106
	BMI	0,059	1,017	0,999	1,036	0,235	1,011	0,992	1,031
	LUMBAL	0,263	1,078	0,945	1,229	0,547	1,043	0,908	1,198
	A(8)	0,170	0,869	0,712	1,061	0,332	0,894	0,713	1,120
<i>Spondylarthrose</i>	ALTER	0,000	1,020	1,011	1,028	0,000	1,022	1,011	1,033
	HALT	0,473	1,059	0,904	1,240	0,813	1,022	0,853	1,224
	BMI	0,076	1,020	0,997	1,043	0,123	1,019	0,994	1,045
	LUMBAL	0,011	1,251	1,052	1,487	0,029	1,231	1,021	1,484
	A(8)	0,407	0,906	0,718	1,143	0,895	1,017	0,782	1,324
<i>Diskusprolaps</i>	ALTER	0,251	1,033	0,976	1,094	0,670	1,013	0,952	1,078
	HALT	0,194	2,369	0,644	8,719	0,247	2,363	0,551	10,135
	BMI	0,575	1,042	0,900	1,206	0,689	1,033	0,880	1,212
	LUMBAL	0,774	1,185	0,370	3,796	0,459	1,608	0,457	5,658
	A(8)	0,378	0,339	0,030	3,748	0,327	0,286	0,023	3,487
<i>Pseudo-spondylo-listhese</i>	ALTER	0,386	1,044	0,946	1,153	0,088	1,093	0,986	1,211
	HALT	0,374	0,488	0,100	2,376	0,253	0,373	0,068	2,023
	BMI	0,147	1,191	0,940	1,511	0,768	1,044	0,780	1,399
	LUMBAL	0,347	2,085	0,450	9,656	0,551	1,627	0,328	8,066
	A(8)	0,700	0,624	0,056	6,872	0,975	0,959	0,075	12,265

Zielvariable	Prädiktor	n = 388				n = 315			
		p	IRR	CI _{95%}		p	IRR	CI _{95%}	
Retro- listhese	ALTER	0,678	0,995	0,976	1,015	0,527	0,993	0,972	1,014
	HALT	0,798	0,946	0,623	1,437	0,414	0,813	0,496	1,334
	BMI	0,715	0,991	0,945	1,039	0,556	0,984	0,934	1,037
	LUMBAL	0,948	0,988	0,692	1,409	0,625	0,904	0,605	1,351
	A(8)	0,747	1,100	0,615	1,966	0,295	1,418	0,736	2,732
Mindestens eine dieser Diagnosen	ALTER	0,000	1,013	1,009	1,018	0,000	1,013	1,008	1,018
	HALT	0,296	1,029	0,974	1,087	0,658	1,014	0,952	1,079
	BMI	0,078	1,010	0,998	1,021	0,234	1,007	0,995	1,019
	LUMBAL	0,046	1,090	1,001	1,186	0,024	1,104	1,013	1,204
	A(8)	0,376	0,945	0,834	1,070	0,806	0,983	0,860	1,123

ALTER = Lebensalter am Untersuchungstag, BMI = Body Mass Index, max A(8) = maximale Tagesexposition A(8) des Tätigkeitszeitraums mit der höchsten Belastung, LUMB = klinische Diagnose „Lumbalsyndrom“, HALT = klinische Diagnose „Haltungsinuffizienz“

5.2.3 Prävalenz degenerativer LWS-Schäden bei Hochbelasteten

Für die Röntgendiagnosen wurde zusätzlich geprüft, ob im Hinblick auf BK-relevante Belastungshöhen bei einer erheblichen langjährigen Belastung – konkret bei einer Gesamtdosis DV von 1414,4 auf der Basis der Tagesexposition A(8) (vgl. Abschnitt 4.4.2) – eine höhere Prävalenz von degenerativen LWS-Schäden besteht. Tabelle 33 gibt getrennt nach Altersgruppen an, wie häufig die einzelnen Diagnosen bei den Personen auftreten, die über bzw. unter dieser Gesamtdosis D_v von 1 414,4 belastet sind. Im Wesentlichen lässt sich aus der Tabelle für alle vier Röntgendiagnosen ablesen, dass die Prävalenz mit zunehmendem Alter deutlich steigt. Eine deutlich höhere Prävalenz für die Hochbelasteten zeichnet sich nur selten ab, z. B. in der Altersgruppe 41 bis 50 Jahre für die Diagnose „*Spondylosis deformans*“

und in der Altersgruppe über 50 Jahre für die Diagnose „*Spondylarthrosis*“.

Berechnet man aus diesen Daten alterskorrigierte Prävalenzratenverhältnisse für die vier Röntgendiagnosen (wobei die Nullen in den oben stehenden Vier-Felder-Tafeln aus statistischen Gründen jeweils durch 1 ersetzt werden mussten), so lauten die Ergebnisse wie folgt:

- *Chondrosis intervertebralis*
 $PVR_{MH} = 1,25 [CI_{95\%}: 0,66/2,38]$
- *Osteochondrosis intervertebralis*
 $PVR_{MH} = 0,79 [CI_{95\%}: 0,49/1,28]$
- *Spondylosis deformans*
 $PVR_{MH} = 0,88 [CI_{95\%}: 0,77/1,08]$
- *Spondylarthrosis*
 $PVR_{MH} = 1,05 [CI_{95\%}: 0,88/1,25]$

Demnach lässt sich auch im Vergleich Hochbelastete vs. geringer Belastete

epidemiologisch kein höheres Risiko für die genannten Röntgendiagnosen feststellen.

Tabelle 33:

Röntgendiagnosen *Chondrosis intervertebralis*, *Osteochondrosis intervertebralis*, *Spondylitis deformans* und *Spondylarthrosis* getrennt nach Altersdekaden und Expositionshöhe (als dichotome Variable „Gesamtdosis $D_v = 1\ 414,4$ überschritten / nicht überschritten; $n = 315$). Die Prozentzahlen beziehen sich auf die jeweilige Altersgruppe.

Gesamtdosis $D_v > 1\ 414,4$ bzw. $D_v < 1\ 414,4$ Diagnose:	Altersgruppen									
	≤ 30 Jahre ($n = 56$)		31 bis 40 Jahre ($n = 93$)		41 bis 50 Jahre ($n = 98$)		> 50 Jahre ($n = 68$)		Gesamt ($n = 315$)	
	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
Chondrosis intervertebralis										
$D_v \geq 1\ 414,4\ %$	0	6	3	36	8	47	6	29	17	118
	0	10,7	3,2	38,7	8,2	48,0	8,8	42,6	37,5	37,5
$D_v < 1\ 414,4\ %$	3	47	5	49	3	40	6	27	17	163
	5,4	83,9	5,4	52,7	3,1	40,8	8,8	39,7	5,4	51,7
Osteochondrosis intervertebralis										
$D_v \geq 1\ 414,4\ %$	0	6	0	39	11	44	11	24	22	113
	0	10,7	0	41,9	11,2	44,9	16,2	35,3	7,0	35,9
$D_v < 1\ 414,4\ %$	1	49	9	45	8	35	12	21	30	150
	1,8	87,5	9,74	48,4	8,2	35,7	17,6	30,9	9,5	47,6
Spondylitis deformans										
$D_v \geq 1\ 414,4\ %$	1	5	14	25	48	7	34	1	97	38
	1,8	8,9	15,1	26,9	49,0	7,1	50,0	1,5	30,8	12,1
$D_v < 1\ 414,4\ %$	11	39	36	18	36	7	33	0	116	64
	19,7	69,6	38,7	19,4	36,7	7,2	48,5	0	36,8	20,3
Spondylarthrosis										
$D_v \geq 1\ 414,4\ %$	1	5	23	16	38	17	29	6	91	44
	1,8	8,9	24,7	17,2	38,8	17,3	42,7	8,8	28,9	14,0
$D_v < 1\ 414,4\ %$	22	28	23	31	33	10	24	9	102	78
	39,3	50,0	24,7	33,3	33,7	10,2	35,3	13,2	32,4	24,8

5.3 Auffälligkeiten der Diskushöhen

Im Rahmen der röntgenologischen Befundung wurden auch die Diskushöhen im LWS-Bereich vermessen, die im Normalfall eine kontinuierliche harmonische Höhenzunahme von Th12/L1 bis L4/L5 zeigen mit

nachfolgender diskreter Höhenminderung zu L5/S1. Wurde diese physiologische Diskushöhensequenz nicht eingehalten, sondern trat stattdessen nach Expertenurteil eine sprunghafte diskontinuierliche Höhenveränderung innerhalb eines Diskusraumes auf, dann wurde das entsprechende Segment als

„auffällig“ bewertet [7; 24]. Regressionsanalysen zur Auffälligkeit von Höhenveränderungen der LWS-Segmente bis einschließlich L4/L5 ergaben in der Regel das Lebensalter als einzigen aussagekräftigen Prädiktor und keinen Zusammenhang mit Parametern der Schwingungsbelastung.

Umso interessanter ist ein einzelnes Ergebnis, das einen deutlichen GKV-Einfluss auf einen röntgenologischen Befund enthält: Wie in Tabelle 34 an den fett gedruckten Relativen Risiken abzulesen ist, erweist sich neben

dem Einfluss des Lebensalters auch die Höhe der Tagesexposition A(8) als signifikanter Prädiktor für eine auffällige Minderung der Höhe im Übergang zum ersten Sakralwirbel. Die Signifikanz der Tagesexposition A(8) ergibt sich erst in der „bereinigten“ Stichprobe von $n = 315$, also nach Ausschluss von Vorschädigungen, und sie ist vom Pathomechanismus her gut nachvollziehbar, weil dieser Wirbelsäulenabschnitt am nächsten zur Einwirkstelle in z-Richtung liegt.

Tabelle 34:

Poissonregressionen mit dem Zielkriterium „Auffällige Höhenverminderung im Übergangsegment zu S1“ – Prädiktoren im Einschlussverfahren: Lebensalter in Jahren und maximale Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ bzw. Tagesexposition A(8). OR = Risikoerhöhung für Belastungszunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$ (bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Zielvariable	Prädiktor	$n = 388$			$n = 315$				
		p	IRR	CI95%	p	IRR	CI95%		
Auffällige Minderung der Diskushöhe im Übergang zu S1	Alter	0,001	1,056	1,022	1,090	0,003	1,065	1,022	1,109
	A(8)	0,145	1,975	0,790	4,939	0,015	3,733	1,296	10,752

5.4 Anzahl und Lokalisation der betroffenen Wirbelsäulensegmente

Die o. g. Röntgendiagnosen sind im Vergleich zu den klinischen Diagnosen schwieriger in einer epidemiologischen Analyse zu erfassen, da sie jeweils in Bezug auf einen einzelnen Wirbelkörper bzw. ein Wirbelsegment getroffen werden und daher im Verlauf der LWS in vielfachen Kombinationen auftreten können. Eine Möglichkeit des systematischen Zugangs – auch im Hinblick auf Ausmaß bzw. Schweregrad der degenerativen Veränderung – besteht darin, Anzahl und

Lokalisation der betroffenen Wirbelsäulensegmente zu betrachten. Ein Wirbelsäulensegment wird dabei als „betroffen“ gewertet, wenn eine der o. g. Röntgendiagnosen für dieses Segment vorlag. Da sich die Diagnose „Spondylosis deformans“ auf Einzelwirbel bezieht, wurde der betreffende Wirbel dem folgenden Segment zugeordnet, also L1 zu L1/L2, L2 zu L2/L3 usw. Das Segment L5/L6, das in einigen wenigen Fällen vorkam, wird in Tabelle 35 nicht gesondert aufgeführt, ebenso nicht die seltenen Fälle von S1/S2. Unter „Übergang zu S1“ ist in jedem Fall der Übergang vom letzten Lendenwirbel erfasst, also in der Regel L5/S1, aber auch L4/S1 oder

L6/S1. Auf der Grundlage der Variable „Degenerative Erkrankung der LWS“ gibt Tabelle 35 zunächst einen Überblick über die

Häufigkeitsverteilungen für die verschiedenen Zielvariablen, die sich aus den deskriptiven Daten dazu bilden lassen.

Tabelle 35:

Häufigkeiten der LWS-Segmente, die von einer degenerativen Erkrankung betroffen sind, für die Gesamtstichprobe ($n = 388$) und die bereinigte Stichprobe ($n = 315$)

LWS-Segment	$n = 388$		$n = 315$	
	Anzahl	in %	Anzahl	in %
Häufigkeit degenerativer Veränderungen in den einzelnen Segmenten				
Th 12 bis L 1	101	26,0	85	27,0
L 1 bis L 2	131	33,8	110	34,9
L 2 bis L 3	174	44,8	148	47,0
L 3 bis L 4	258	66,5	214	67,9
L 4 bis L 5	288	76,6*	232	76,1*
Übergang zu S 1	200	51,5	158	50,2
Anzahl betroffener Segmente insgesamt				
Kein Segment	53	13,7	42	13,3
Ein Segment	38	9,8	33	10,5
Zwei Segmente	60	15,5	45	14,3
Drei Segmente	84	21,6	68	21,6
Vier Segmente	53	13,7	42	13,3
Fünf Segmente	50	15,5	50	15,9
Sechs Segmente	40	10,3	35	11,1*
Mono- vs. mehrsegmental betroffen				
Nicht betroffen	53	13,7	42	13,3
Monosegmental	38	9,8	33	10,5
Mehrsegmental	297	76,5	240	76,2
Betroffener Wirbelsäulenabschnitt				
Keiner	53	13,7	42	13,3
Nur oberer Abschnitt	6	1,6	5	1,6
Nur unterer Abschnitt	131	33,7	100	31,8
Beide Abschnitte	198	51,0	168	53,3

* Prozente beziehen sich auf Stichproben von $n = 376$ bzw. 305 wegen fehlendem 5. LW

Die Ergebnisse zeigen zunächst wieder, dass die prozentualen Häufigkeiten in Tabelle 35 praktisch keinen auffälligen Unterschied zwischen der Gesamtstichprobe und der bereinigten Stichprobe erkennen lassen. Die Differenz von 2,3 % in der letzten Zeile ist schon die größte in der gesamten Tabelle (beide LWS-Abschnitte betroffen: 53,3 % in der bereinigten vs. 51,0 % in der Gesamtstichprobe).

Generell zeigt sich, dass das Segment L4/L5 am stärksten von degenerativen Veränderungen betroffen ist, gefolgt von L3/L4. Nur bei ca. 13 % aller Personen ist noch kein LWS-Segment betroffen, während bei etwa 40 % bereits drei und mehr Segmente zu verzeichnen sind. Ein mehrsegmentales Geschehen ist eindeutig die Regel (76,2 %). Für die Lokalisation innerhalb der LWS ist nur in Einzelfällen eine Beschränkung degenerativer Erkrankungen auf den oberen WS-Abschnitt festzustellen. Über die Hälfte der Teilnehmer zeigt in beiden Abschnitten Veränderungen und ein Drittel der Teilnehmer nur im unteren Abschnitt.

Zur regressionsanalytischen Betrachtung der Zusammenhänge zwischen diesen Beobachtungen und möglichen Einflussfaktoren bietet es sich an, erstens jedes einzelne Segment separat als Zielkriterium einer logistischen Regression zu untersuchen und zweitens zusammenfassende Kriterien wie „Mehrsegmental ja/nein“ oder „Unterer Abschnitt ja/nein“ bzw. „Beide Abschnitte ja/nein“ zu betrachten.

Exemplarisch sind in Tabelle 36 diejenigen Prädiktoren aufgeführt, die in logistischen Regressionen mit den eben genannten Zielkriterien und dem Belastungsmaß „maximale

Tagesexposition A(8)“ als signifikant in die jeweilige Regressionsgleichung aufgenommen wurden. Es werden nur die Ergebnisse für die bereinigte Stichprobe von $n = 315$ dargestellt; die Tendenzen sind für die Gesamtstichprobe aber weitgehend gleich. In der letzten Spalte wird zusätzlich das R^2 nach *Nagelkerke* angegeben als ein Maß für die Varianzaufklärung der Zielvariablen, wie sie durch die Regressionsgleichung erreicht wird. Ein R^2 von 0,30 bedeutet z. B. eine Varianzaufklärung von 30 %.

Wie bereits erwähnt, lassen sich die Odds Ratios als prozentualer Risikozuwachs mit jedem Schritt auf der Skala der entsprechenden Variablen interpretieren. Für das Lebensalter am Untersuchungstag finden wir OR zwischen 1,06 und 1,18, d. h. mit jedem Lebensjahr steigt das Risiko, das entsprechende Zielkriterium aufzuweisen, um 6 bzw. 18 %. Ebenso bezieht sich das OR beim BMI auf jeden Schritt auf dessen Punkteskala. Bei den Diagnosen wie „Haltungsinsuffizienz“ oder „Wurzelsyndrom“ gibt es nur die Alternative „ja/nein“, sodass hier mit dem OR nur das Risiko ausgedrückt wird, diese Diagnose tatsächlich zu erhalten.

Zur Betrachtung der Einflussfaktoren für die Variable „Anzahl betroffener Segmente“ kommt eine lineare Regressionsanalyse infrage. Hier werden drei Prädiktoren ausgewählt:

- Alter zum Untersuchungstag:
Beta-Gewicht $\beta = 0,58$, $p < 0,001$
- BMI: $\beta = 0,13$, $p < 0,01$
- klinische Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“: $\beta = 0,10$, $p < 0,05$

Tabelle 36:

Signifikante Prädiktoren in logistischen Regressionen mit verschiedenen Zielkriterien der Lokalisation degenerativ veränderter LWS-Segmente (bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Zielkriterium „Von degenerativer Erkrankung betroffen“	Prädiktor	p	n = 315		R ²
			OR	CI _{95%}	
Segment					
Th12 / L1	ALTER	0,000	1,08	1,05/1,12	0,208
	BMI	0,043	1,08	100/1,17	
	WURZEL	0,051	1,75	1,00/3,05	
L1/L2	ALTER	0,000	1,12	1,08/1,16	0,339
	BMI	0,017	1,10	1,02/1,19	
	WURZEL	0,037	1,82	1,04/3,19	
L2/L3	ALTER	0,000	1,13	1,10/1,17	0,309
L3/L4	ALTER	0,000	1,12	1,08/1,17	0,364
	HALTUNG	0,028	3,41	1,46/7,94	
L4/L5	ALTER	0,000	1,14	1,10/1,18	0,338
	BMI	0,006	1,14	1,04/1,25	
Übergang zu S1	ALTER	0,000	1,06	1,04/1,09	0,137
	WURZEL	0,034	1,75	1,04/2,94	
Mehrsegmental vs. mono-segmental	ALTER	0,000	1,16	1,10/1,23	0,330
	BMI	0,028	1,16	1,02/1,33	
Mehrsegmental ja/nein	ALTER	0,000	1,18	1,13/1,23	0,421
	BMI	0,012	1,13	1,03/1,24	
Unterer Abschnitt betroffen ja/nein	ALTER	0,000	1,15	1,10/1,20	0,261
Oberer Abschnitt betroffen ja/nein	ALTER	0,000	1,16	1,12/1,20	0,400

Abkürzungen Prädiktoren: ALTER = Lebensalter am Untersuchungstag, BMI = Body Mass Index, WURZEL = klinische Diagnose „lumbales Wurzelsyndrom“, HALTUNG = klinische Diagnose „Haltunginsuffizienz“

Mit zunehmendem Alter und ansteigendem BMI steigt also die Anzahl der betroffenen LWS-Segmente. Zusätzlich erhöht das Vorliegen der klinischen Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“ die Wahrscheinlichkeit einer höheren Anzahl betroffener Segmente. Die Varianzaufklärung liegt mit einem adjustierten R² von 0,43 in einem mittleren Bereich.

5.5 Zusammenfassende Beurteilung des Röntgenbefundes

Die röntgenologische Befundung liefert mit den verschiedenen Diagnosen unterschiedlichen Schweregrades und verschiedenster Lokalisation und Kombination ein sehr komplexes Bild degenerativer Veränderungen der LWS-Segmente. Daher wurde versucht,

mittels einer zusammenfassenden Beurteilung des Zustandes der Lendenwirbelsäule aus fachärztlicher Sicht eine einfache und eindeutige Variable zur quantifizierenden Bewertung des röntgenologischen Befundes zu bilden [7; 24]. Diese zusammenfassende Beurteilung wurde sowohl in vier

Abstufungen – altersentsprechend sowie leichte, mittlere und schwere Veränderungen – als auch in acht Abstufungen – durch Einführung von Zwischenstufen – durchgeführt. Tabelle 37 zeigt die Häufigkeitsverteilung für die achtstufige zusammenfassende Beurteilung der degenerativen LWS-Veränderungen.

Tabelle 37:

Absolute und prozentuale Häufigkeiten der zusammenfassenden Beurteilung des röntgenologischen Befundes in acht Stufen (Gesamtstichprobe $n = 388$ und bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Variable „Zusammenfassende Beurteilung der Veränderungen im Röntgenbild“	$n = 388$		$n = 315$	
	Anzahl	in %	Anzahl	in %
Altersgemäß	172	44,3	147	46,7
Altersgemäß bis leicht	65	16,8	52	16,5
Leicht	49	12,6	37	11,7
Leicht bis mittel	19	4,9	16	5,1
Mittel	47	12,1	38	12,1
Mittel bis schwer	20	5,2	12	3,8
Schwer	14	3,6	12	3,8
Sehr schwer	2	0,5	1	0,3

Auch hier zeigt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen der gesamten und der bereinigten Stichprobe – die Teilnehmer mit Lumbalbeschwerden vor oder am Anfang der Schwingungsexposition zeigen also röntgenologisch keine nennenswerten Häufigkeitsunterschiede gegenüber der Stichprobe von 315 Personen. Gegenüber den bisherigen Röntgendaten, die eine starke Verbreitung degenerativer Veränderungen im Untersuchungskollektiv zeigten, fällt jetzt der hohe Anteil von LWS-Beurteilungen als „altersgemäß“ bis „leichte Veränderung“ auf. Wie in Tabelle 30 gezeigt, weisen zwar über 86 % der Stichprobe mindestens eine Röntgendiagnose degenerativer Art auf. In der fachärztlichen Beurteilung dieses

Zustandes im Hinblick auf den altersgemäß zu erwartenden Befund wird dieses eindrucksvolle Ergebnis jedoch dahingehend relativiert, dass der jeweilige röntgenologische Befund für fast die Hälfte der Personen dem Zustand entspricht, wie er innerhalb unserer Gesellschaft biologisch zu erwarten wäre. Ein weiteres Viertel der Teilnehmer weist höchstens leichte Veränderungen auf, und nur für das letzte Viertel werden die degenerativen Befunde mit einem höheren Schweregrad eingestuft.

Damit bietet diese Variable offensichtlich eine ganz andere Sicht auf die Röntgenbefunde als die bisher untersuchten Kriterien. Statistisch kommt eine lineare Regression

auf die numerische Variable „Zusammenfassende Beurteilung der Veränderungen im Röntgenbild“ infrage, aber auch eine logistische Regression auf die dichotome Variable „Veränderungen im Röntgenbild altersgemäß bis leicht“ vs. „Mehr als leichte Veränderungen“ könnte aufschlussreich sein.

Für die bereinigte Stichprobe $n = 315$ ergeben sich in der logistischen Regression wieder ähnliche Ergebnisse wie bisher berichtet: Zwei Prädiktoren werden ausgewählt, und zwar

- Lebensalter am Untersuchungstag mit β -Gewicht = 0,323 ($p < 0,001$)
- BMI am Untersuchungstag mit β -Gewicht = 0,113 ($p < 0,05$)

Das adjustierte R^2 als Maß der Varianzaufklärung erreicht nur einen Wert von 0,136. Die bereits angesprochene logistische Regression mit den Ausprägungen „Veränderungen im Röntgenbild altersgemäß bis leicht“ ($n = 286$) vs. „Mehr als leichte Veränderungen“ ($n = 102$) führt zu einem ähnlichen Ergebnis – es werden dieselben Prädiktoren in die Regressionsgleichung aufgenommen:

- Lebensalter mit OR = 1,09
[CI_{95%}: 1,06/1,13]
- BMI mit OR = 1,08
[CI_{95%}: 0,97/1,17]

Damit spielt die Schwingungsbelastung auch bei dieser anderen Perspektive auf die Röntgenbefunde keine nennenswerte Rolle.

6 Ergebnisse der Follow-Up-Untersuchung

6.1 Kollektiv der Follow-Up-Untersuchung

In der damaligen GKV-Studie war in einem Zeitabstand von mindestens vier Jahren eine Follow-Up-Untersuchung vorgesehen. Dabei wurden Teilnehmer, die zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung bereits über 50 Jahre alt waren, ausgeschlossen. Bei ihnen war die Prävalenz des Lumbalsyndroms schon so hoch, dass für die Manifestation von neuen Fällen und auch für die Zunahme des Schweregrades klinischer oder röntgenologischer Symptome kein Spielraum mehr gegeben war ([7], S. 141 ff). Von insgesamt 310 ausgewählten Teilnehmern konnten 281, also 90,6 %, nochmals mit dem gleichen Instrumentarium untersucht werden. Die restlichen Personen waren nicht mehr zu erreichen, mittlerweile verstorben oder nicht zu einer erneuten Untersuchung bereit. Insgesamt ist eine Beteiligungsquote von 90,6 % als außerordentlich hoch zu bezeichnen. Das Alter der verbleibenden 281 Teilnehmer zum

Zeitpunkt der Follow-Up-Untersuchung lag im Mittel bei $42,2 \pm 8,0$ Jahren.

Wie anfangs erläutert, wiesen 73 der 388 Teilnehmer an der Erstuntersuchung nach eigenen Angaben bereits vor oder im ersten Jahr der Schwingungsexposition LWS-Beschwerden auf. Tabelle 38 zeigt, wie sich die Situation beim Follow-Up darstellt: Ein Großteil dieser 73 Personen nimmt auch an der Follow-Up-Untersuchung teil, sodass von den 281 nur 222 ohne Beschwerden bis zum Ende des ersten Expositionsjahres waren. Für Vergleiche der Prävalenz bei Erst- und Follow-Up-Untersuchung ist also zu beachten, ob man die gesamte oder die bereinigte Stichprobe betrachtet.

Von den 281 Follow-Up-Teilnehmern hatten 170 bereits zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung ein Lumbalsyndrom. Für die verbleibenden 111 Personen lässt sich die Lumbalsyndrom-Inzidenz im Follow-Up-Zeitraum berechnen.

Tabelle 38:

Häufigkeitsverteilung der Personen mit LWS-Beschwerden bereits vor Ende des ersten Expositionsjahres für die gesamte Stichprobe und für die Teilnehmer am Follow-Up in Klammern jeweils die Personenzahl mit Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei der Erstuntersuchung

Beschwerden vor oder im ersten Expositionsjahr	Teilnahme am Follow-Up		Gesamt
	Nein	Ja	
Ja	14 (14)	59 (57)	73 (71)
Nein	93 (60)	222 (113)	315 (173)
Gesamt	107 (74)	281 (170)	388 (244)

6.2 Schwingungsbelastung des Kollektivs der Follow-Up-Untersuchung

In der GKV-Studie wurde bereits beschrieben, dass die durchschnittliche Schwingungsexposition nach den Erhebungen der Technischen Aufsichtsbeamten einen sprunghaften Rückgang im Zeitraum von 1990 bis 1995 zeigte ([7], S. 156 f.). Als mögliche Ursachen wurde zum einen der Bauboom in den neuen Bundesländern in Betracht gezogen, der zur Anschaffung neuer und besserer

Arbeitsmaschinen führte, zum anderen aber auch arbeitstechnische Verbesserungen, die in den beteiligten Betrieben aufgrund von Erkenntnissen aus der Erstuntersuchung vorgenommen wurden. In Tabelle 39 sind zur Illustration für die Teilnehmer der Follow-Up-Untersuchung maximale Tages-Belastungskennwerte aus Erst- und Follow-Up-Untersuchung gegenübergestellt. Drei der 281 Personen waren im Follow-Up-Zeitraum nicht mehr schwingungsexponiert und fehlen daher in dieser Übersicht.

Tabelle 39:

Statistische Kennwerte der maximalen Tages-Schwingungsbelastung (Beurteilungsbeschleunigungen in x-, y- und z-Achse sowie Tagesexposition A(8)) bis zur Erstuntersuchung (EU) und im Follow-Up-Zeitraum (FU) für 278 schwingungsexponierte Teilnehmer

Kenngröße	Mittelwert		Standardabweichung		Minimum		Maximum	
	EU	FU	EU	FU	EU	FU	EU	FU
$a_{wx(8)}$	0,38	0,31	0,18	0,13	0,10	0,03	1,25	0,87
$a_{wy(8)}$	0,39	0,32	0,19	0,17	0,10	0,03	1,10	0,84
$a_{wz(8)}$	0,68	0,53	0,28	0,22	0,13	0,02	1,45	1,38
A(8)	0,71	0,58	0,29	0,23	0,14	0,05	1,75	1,38

Die Tabelle zeigt recht eindrucksvoll, dass die Belastung der Stichprobe in allen drei Achsen zurückgegangen ist – in den Mittelwerten um rund 20 % und auch sehr deutlich in den Maximalwerten.

Dennoch sind in Einzelfällen auch Anstiege der individuellen Tages-Schwingungsbelastung zu verzeichnen. Beispielsweise gibt es neun Teilnehmer, die im Follow-Up-Zeitraum erstmals mit einer Tagesexposition A(8) > 0,63 m/s² belastet wurden.

6.3 Lumbalsyndrom-Diagnosen in der Follow-Up-Untersuchung

6.3.1 Prävalenz in der Follow-Up-Untersuchung

Führt man wie in der Analyse der Erstuntersuchung logistische Regressionsanalysen mit der Zielvariable „Lumbalsyndrom“ durch, so ergeben sich hinsichtlich des Einflusses der GKV-Belastung keine signifikanten Ergebnisse. Wenn man die bis zum Follow-Up-Zeitpunkt erworbene „GKV-Gesamtdosis“ (basierend auf der Tagesexposition A(8) und dem Schwellenwert 0,63 m/s²) berechnet

und als zweiten Prädiktor das Lebensalter in eine logistische Regressionsanalyse für die gesamte Stichprobe von 281 Personen aufnimmt, ergibt sich für die Schwingungsbelastung zwar ein $OR = 1,04$ für jeden Dosiszuwachs von 500 Einheiten, aber mit einer Untergrenze des Konfidenzintervalls von 0,93. Das Lebensalter in Jahren ist dagegen auch hier der wesentliche Prädiktor mit einem $OR = 1,08$ ($CI_{95}: 1,04/1,13$). Für die Unterdiagnosen des Lumbalsyndroms lauten die Ergebnisse sehr ähnlich.

Bei Einschränkung der Stichprobe auf die 222 der 281 Personen, die laut Erstuntersuchung bei Expositionsbeginn keine LWS-Beschwerden aufwiesen, ergeben sich geringfügig deutlichere Zahlen für den Effekt der Schwingungsbelastung. Das Lebensalter in Jahren erreicht nun ein $OR = 1,04$ ($CI_{95}: 1,00/1,08$), die Tagesexposition A(8) dagegen ein $OR = 1,07$ ($CI_{95}: 0,98/1,17$).

Betrachtet man die vier verschiedenen Dosisgruppen, wie sie in Abschnitt 4.4.3 vorgestellt wurden, und berechnet die alterskorrigierten Prävalenzratenverhältnisse, so ergeben sich für die Stichprobe von 222 Personen ohne LWS-Beschwerden bei Expositionsbeginn keine signifikanten Ergebnisse. Da nur jeweils zwei Dosisgruppen verglichen werden können, kann man zum einen jede belastete Dosisgruppe mit der unbelasteten Dosisgruppe vergleichen und zum anderen Dosisgruppen zu größeren Einheiten zusammenfassen. Aus diesen verschiedenen Vergleichen soll ein Beispiel angeführt werden: Den deutlichsten Beleg für eine höhere Gefährdung der LWS mit zunehmender Dosis der Schwingungsbelastung (auf der Grundlage von Tagesexposition A(8) und Schwellenwert $0,63 \text{ m/s}^2$) erhält man, wenn man die

folgenden beiden Dosisgruppen analog zu Abschnitt 4.4.3 gegenüberstellt:

- Dosisgruppe I + II: Dosis bis zum Zeitpunkt des Follow-Up: null bis $877,2 \text{ m/s}^2$
- Dosisgruppe III + IV: Dosis bis zum Zeitpunkt des Follow-Up: $> 877,2 \text{ m/s}^2$

Hier resultiert ein alterskorrigiertes $PVR_{MH} = 1,08$ ($CI_{95}: 0,83/1,39$). Die Ergebnisse aus den anderen möglichen Gruppenvergleichen liegen in einem ähnlichen Bereich. Es gibt also immer noch deutliche Hinweise auf eine Zunahme der Lumbalsyndrom-Häufigkeit mit wachsender Dosis, aber die methodischen Einschränkungen sind beim Follow-Up insofern größer, als einerseits die Stichprobe kleiner ist und andererseits die Zahl der Fälle weiter zugenommen hat, sodass in statistischer Hinsicht relativ wenige Gesunde übrig bleiben.

6.3.2 Inzidenzraten in der Follow-Up-Untersuchung

Bei den 111 Personen der Follow-Up-Untersuchung, die zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung noch keine Lumbalsyndrom-Diagnose aufwiesen, treten im Zeitraum seit der Erstuntersuchung 54 neue Fälle mit dieser Diagnose auf. Führt man die gleiche logistische Regression wie im vorherigen Abschnitt für diese Teilstichprobe von 111 Teilnehmern durch, ergeben sich ähnliche Resultate, aber mit größeren Konfidenzintervallen:

- Prädiktor „GKV-Gesamtdosis“ in Schritten von 500 Einheiten: $OR = 1,02$ ($CI_{95}: 0,90/1,15$)

- Prädiktor „Lebensalter“ in Jahren:
OR = 1,03 (CI_{95%}: 0,99/1,08)

Als Tendenz zeigen sich hier also in dem recht kurzen Follow-Up-Zeitraum für die Inzidenz die gleichen Effekte von Alter und Dosis, die im Laufe dieser Auswertungen immer wieder aufgetreten sind. Aber allein schon wegen der stark geschrumpften Stichprobe nimmt die Signifikanz der Ergebnisse weiter ab. Auch die Vergleiche zwischen den verschiedenen Dosisgruppen, wie sie in Abschnitt 6.3.1 für die Prävalenz durchgeführt wurden, führen zu keinem signifikanten Ergebnis. Ein gewisser Hinweis auf ein erhöhtes relatives Risiko für das erstmalige Auftreten eines Lumbalsyndroms im Follow-Up-Zeitraum ergibt sich nur im Vergleich der Dosisgruppe II (GKV-Gesamtdosis > null und < 877,2) gegenüber der unbelasteten Dosisgruppe I, und zwar: RR_{MH} = 1,08 (CI_{95%}: 0,75/1,57).

Für die Inzidenz im Follow-Up-Zeitraum kann evtl. die Belastung in genau diesem vierjährigen Zeitabschnitt von besonderer Bedeutung

sein. Deshalb wurde die Stichprobe auch in folgende vier Expositionsgruppen unterteilt:

- Expositionsgruppe I: nie mit Tagesexposition A(8) > 0,63 m/s² exponiert
- Expositionsgruppe II: nur bis zur Erstuntersuchung mit Tagesexposition A(8) > 0,63 m/s² exponiert
- Expositionsgruppe III: nur im Follow-Up-Zeitraum mit Tagesexposition A(8) > 0,63 m/s² exponiert
- Expositionsgruppe IV: immer — also vor und nach der Erstuntersuchung — mit Tagesexposition A(8) > 0,63 m/s² exponiert.

Tabelle 40 gibt für die 111 Teilnehmer ohne Lumbalsyndrom-Diagnose in der Erstuntersuchung wieder, welche Diagnose für sie bei der Follow-Up-Untersuchung vergeben wurde.

Tabelle 40:

Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ und der Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“ bei den 111 Teilnehmern der Follow-Up-Untersuchung, die zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung (EU) noch kein Lumbalsyndrom aufwiesen – aufgeteilt nach der Höhe ihrer Tagesexposition A(8) vor und nach der EU

Tagesexposition A(8) mit Schwellenwert 0,63 m/s ²	n	Kein Lumbalsyndrom	Lokales Lumbalsyndrom	Lumbales Wurzelsyndrom	Lumbalsyndrom insgesamt	RR (CI _{95%}) für Lumbalsyndrom in Bezug auf Expositionsgruppe I
I nie erreicht	52	27	12	13	25	----
II nur bis EU	20	11	7	2	9	0,94 (0,53/1,64)
III nur nach EU	6	2	1	3	4	1,39 (0,74/2,61)
IV vor / nach EU	33	17	7	9	16	1,01 (0,64/1,58)
Σ	111	57	27	27	54	

In den beiden Expositionsgruppen III und IV, die im Zeitraum nach der Erstuntersuchung Tagesexpositionen von $A(8) > 0,63 \text{ m/s}^2$ ausgesetzt waren, ergeben sich (wegen der geringen Gruppengrößen nicht alterskorrigierte) relative Risiken über 1, wobei die Expositionsgruppe III natürlich sehr schwach besetzt ist. Fasst man die beiden Expositionsgruppen III und IV zusammen, ergibt sich ein $RR = 1,07$ ($CI_{95\%}: 0,70/1,62$). Berechnet man relative Risiken nur in Bezug auf das lumbale Wurzelsyndrom (unter Ausschluss des lokalen Lumbalsyndroms), ergibt sich besonders für die Expositionsgruppe III ein deutlicheres Ergebnis im Vergleich mit der unbelasteten Expositionsgruppe I:

- RR Expositionsgruppe II vs. I: 0,47 ($CI_{95\%}: 0,12/1,83$)
- RR Expositionsgruppe III vs. I: 1,85 ($CI_{95\%}: 0,79/4,29$)

- RR Expositionsgruppe IV vs. I: 1,07 ($CI_{95\%}: 0,53/2,13$)

Ein solcher Hinweis auf eine erhöhte Inzidenz des lumbalen Wurzelsyndroms und eine besondere Rolle der akuten GKV-Belastung im Follow-Up-Zeitraum wurde auch schon in der GKV-Studie auf der Grundlage der Belastung in der z-Achse ([7], S. 178) beschrieben. Deshalb sollen in Tabelle 41 auch die relativen Risiken auf Grundlage der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ betrachtet werden.

Die Zusammensetzung der Expositionsgruppen verändert sich etwas gegenüber Tabelle 40, was bei den geringen Fallzahlen schon Auswirkungen haben kann. Jetzt gilt für die Expositionsgruppen III und IV, dass sich jeweils mehr als 50 % der Personen bis zur Follow-Up-Untersuchung ein Lumbalsyndrom zuziehen, und in den beiden anderen Expositionsgruppen ist diese Diagnose prozentual seltener.

Tabelle 41:

Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ und der Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“ bei den 111 Teilnehmern der Follow-Up-Untersuchung, die zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung (EU) noch kein Lumbalsyndrom aufwiesen – aufgeteilt nach der Höhe der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ vor und nach der EU

Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ mit Schwellenwert $0,63 \text{ m/s}^2$	<i>n</i>	Kein Lumbalsyndrom	Lokales Lumbalsyndrom	Lumbales Wurzelsyndrom	Lumbalsyndrom insgesamt	RR ($CI_{95\%}$) für Lumbalsyndrom in Bezug auf Expositionsgruppe I
I nie erreicht	57	30	13	14	27	----
II nur bis EU	26	16	8	2	10	0,81 (0,46/1,42)
III nur nach EU	5	2	0	3	3	1,27 (0,59/2,73)
IV immer	23	9	6	8	14	1,29 (0,84/1,97)
Σ	111	57	27	27	54	

Entsprechend liegen die relativen Risiken für diese beiden Expositionsgruppen in Bezug auf Expositionsgruppe I deutlich über 1, allerdings mit sehr breitem Konfidenzintervall. Insbesondere die Expositionsgruppe III – erst seit der Erstuntersuchung über $> 0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert – ist mit fünf Personen so schwach besetzt, dass man keine statistisch aussagekräftigen Resultate erwarten kann. Insofern ist diese Auswertung nur eine Momentaufnahme, die vielleicht ein Stück des Prozesses aufzeigt, in dem sich in einer Stichprobe bei Fortbestand einer ausreichend starken Exposition – und modifiziert durch individuelle Dispositionen – zunehmend LWS-Beschwerden ausbreiten.

Unter diesem Gesichtspunkt ist es interessant, dass es sich bei den neuen Lumbalsyndrom-Fällen in den Expositionsgruppen III und IV noch deutlicher als in Tabelle 40 überwiegend um lumbale Wurzelsyndrome handelt. Berechnet man relative Risiken nur in Bezug auf das lumbale Wurzelsyndrom (unter Ausschluss des lokalen Lumbalsyndroms), ergeben sich daher noch deutlichere Ergebnisse im Vergleich mit der unbelasteten Expositionsgruppe I:

- RR Expositionsgruppe III vs. I: 1,89
(CI_{95%}: 0,82/4,35)
- RR Expositionsgruppe IV vs. I: 1,48
(CI_{95%}: 0,76/2,87)

Angesichts der breiten Konfidenzintervalle lassen sich diese RRs natürlich nur als Tendenzen interpretieren. Aber sie passen zu der bereits früher geäußerten Vermutung, dass sich bei der Erstuntersuchung u. U. weniger klare Zusammenhänge zwischen GKV-Belastung und lumbalem Wurzelsyndrom im Vergleich mit dem lokalen Lumbalsyndrom finden, weil eine Aufgabe der belastenden Tätigkeit bei einem Wurzelsyndrom unausweichlicher sein könnte. In dem relativ kurzen Zeitfenster von vier bis fünf Jahren, das mit der Follow-Up-Untersuchung erfasst wurde, könnte sich möglicherweise ein engerer Zusammenhang zwischen Belastung und lumbalem Wurzelsyndrom manifestieren, bevor die Probanden dann eventuell aus der Belastung ausscheiden.

7 Diskussion und Schlussfolgerungen

7.1 Modifizierung der Frequenzbewertung in den einschlägigen Richtlinien

Die erste Veränderung gegenüber den Daten der früheren GKV-Studie [7], die in ihren Auswirkungen zu betrachten war, bestand in der Modifizierung der Frequenzbewertungen nach ISO 2631-1:1997 [1] und VDI 2057-1:2002 [2]. Anhand der vom BGIA zur Verfügung gestellten Korrekturfaktoren wurde in Abschnitt 3.1 für insgesamt 1477 Tätigkeitszeiträume der 388 Studienteilnehmer die korrigierte Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in den drei Achsen berechnet [11]. Daraus ergaben sich im Mittel Anstiege um 18,6 % in der x-Achse, 11,5 % in der y-Achse und 0,7 % in der z-Achse. In der z-Achse resultiert dieser Mittelwert aber aus teilweise hohen individuellen Veränderungen in beide Richtungen: Während sich für etwa 23 % der Zeiträume Zunahmen bis zu einem Maximum von $0,24 \text{ m/s}^2$ ergeben, nimmt der Wert für 37,5 % der Zeiträume um bis zu $0,1 \text{ m/s}^2$ ab. Insgesamt kann die modifizierte Frequenzbewertung damit im Einzelfall zu einer recht deutlichen Veränderung der Belastungswerte führen. In Bezug auf die Tätigkeitsgruppen zeigte sich gerade bei den Erdbaumaschinenfahrern, die bereits in den Daten der GKV-Studie die höchsten Belastungswerte aufwiesen, im Mittel in allen drei Achsen ein Anstieg der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ aufgrund der modifizierten Bewertung.

7.2 Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte

Während in den 1990er Jahren — auch im Rahmen der früheren GKV-Studie — die Schwingungsbelastung in z-Richtung im Mittelpunkt der Untersuchung von vibrationsbedingten LWS-Schäden standen, sollte in dieser Reanalyse eine vergleichende Betrachtung verschiedener Belastungskennwerte erfolgen, von der neu eingeführten Tagesexposition $A(8)$ und den Beurteilungsbeschleunigungen in den drei Schwingungsachsen bis zu den Vektorbeträgen, den überenergetischen vibration dose values und den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen, wie sie im Teilprojekt B dieses Forschungsvorhabens zu entwickeln waren. Korrelationsanalysen zeigten in Abschnitt 3.2 grundsätzlich relativ hohe Übereinstimmungen zwischen den verschiedenen Tages-Belastungskennwerten in Bezug auf die 1477 ausgewerteten Tätigkeitszeiträume der vorliegenden Stichprobe. Nur für einen kleineren Teil dieser Zeiträume ergaben sich höhere Werte der Schwingungsbelastung, wenn nicht nur die z-Richtung betrachtet wurde. Für 385 Zeiträume von 216 Personen lag z. B. die Tagesexposition $A(8)$ über der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ — wobei der Unterschied in der Hälfte der Fälle recht deutliche Ausmaße im Bereich von $0,1$ bis $0,5 \text{ m/s}^2$ annimmt. Bezeichnenderweise ergeben sich die höchsten Differenzen zwischen den Kennwerten $A(8)$ und $a_{wz(8)}$ bei auch schon in z-Richtung stark belasteten Arbeitstätigkeiten, vorwiegend auf Erdbaumaschinen. Das heißt, bei hoher GKV-Belastung in der z-Achse kommt es zusätzlich zu

besonders hohen Schwingungseinwirkungen in horizontaler Ebene. Die Tagesexposition $A(8)$ ist daher besonders bei Fahrtätigkeiten mit sehr hoher und unregelmäßiger Schwingungseinwirkung ein wichtiger Schritt zur angemessenen Erfassung der Belastung. Zusätzlich sollte an solchen Arbeitsplätzen auch der Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ betrachtet werden, der vor allem Spitzenbelastungen noch deutlicher hervortreten lässt, als es die Tagesexposition $A(8)$ mit der Beschränkung auf den stärksten Achsenwert vermag (vgl. Abbildung 3).

7.3 Zusammenhang der Tages-Belastungskennwerte mit Wirkungsparametern

Wie schon in der GKV-Studie wurde auch jetzt als wichtigste medizinische Outcome-Variable die Diagnose „Lumbalsyndrom“ mit ihren Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“ betrachtet, die auch im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 [13] als wesentliche bandscheibenbedingte Erkrankungen durch die Einwirkung von GKV im Sitzen beschrieben werden. Andere anamnestische und klinische Befunde aus den ärztlichen Untersuchungen der Probanden und die in Abschnitt 4.5 behandelte zusammenfassende Beurteilung des LWS-Zustandes wurden zwar auch auf ihren Zusammenhang mit den Belastungskennwerten analysiert, aber sie erwiesen sich allesamt als weniger aussagekräftig als die genannten Diagnosen. Auf röntgenologische Befunde und Diagnosen wird später eingegangen.

In einem ersten Analyseschritt sollte die Schwingungsbelastung operationalisiert werden, ohne auf Dosismodelle und darin

möglicherweise implizierte Annahmen über die zeitliche Akkumulation von Schwingungswirkungen zurückzugreifen. Daher wurde für jeden Teilnehmer aus den für ihn erhobenen Tätigkeitszeiträumen derjenige Zeitraum ermittelt, der mit der höchsten Schwingungsbelastung verbunden war. Der maximale Tages-Belastungskennwert entspricht also dem Tätigkeitszeitraum mit der höchsten Schwingungsbelastung eines jeden Fahrers (rund 50 % der Teilnehmer hatten ein bis drei Tätigkeitszeiträume). Dieser Maximalwert bewährte sich in den Wirkungsanalysen als aussagekräftiger Prädiktor einer LWS-bezogenen Diagnose und ergab etwas deutlichere Zusammenhänge als der alternativ berechnete durchschnittliche zeitlich gewichtete Tages-Belastungskennwert aus allen Tätigkeitsabschnitten einer Person.

Grundsätzlich erwies sich das Lebensalter in sämtlichen durchgeführten Analysen als dominierender Prädiktor für das Auftreten der Diagnose „Lumbalsyndrom“. Aus einem Odds Ratio von rund 1,04 in den einschlägigen logistischen Regressionen folgt mit jedem Lebensjahr eine 4%ige Steigerung des Risikos, die Diagnose „Lumbalsyndrom“ zu erhalten. Ebenso erweisen sich in einer bereinigten Stichprobe (vgl. Tabelle 16) fast alle alternativ eingesetzten Tageskennwerte der Schwingungsbelastung als aussagekräftige Prädiktoren mit Konfidenzgrenzen über 1 und Odds Ratios zwischen 1,06 und 1,15. Das heißt, der Risikozuwachs für ein Lumbalsyndrom beträgt zwischen 6 bis 15 % mit jedem Anstieg der jeweiligen Belastungsgröße um $0,1 \text{ m/s}^2$. Die Tagesexposition $A(8)$ liegt dabei im Mittelfeld der verschiedenen Belastungskennwerte und zeigt eindeutig einen stärkeren Zusammenhang mit der Zielvariable als die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ oder

als die Vektorbeträge und die auf dem VDV basierenden Werte. Überraschenderweise erweist sich aber die Beurteilungsbeschleunigung in y-Achse in allen durchgeführten logistischen Regressionen als vergleichsweise bester Prädiktor von allen alternativ eingesetzten Belastungskennwerten.

Diese starke Bedeutung der Schwingungsbelastung in der y-Richtung ist sicher als ein zentrales Ergebnis dieser Reanalyse der GKV-Studie zu sehen. Auch wenn es evtl. durch die Zusammensetzung der Stichprobe mit vielen stark belasteten Erdbaumaschinenfahrern zu erklären ist und sich evtl. auch zeitlich weit zurückliegende Belastungssituationen darin niederschlagen, unterstreicht es doch die Notwendigkeit, stärkeres Augenmerk auf die horizontale Schwingungseinwirkung und dadurch hervorgerufene Scherbewegungen in den WS-Segmenten zu legen. Die Tagesexposition A(8) erhält auch unter diesem Gesichtspunkt eine Bestätigung als sinnvolle Alternative zur früheren Dominanz der Schwingungsbewertung in z-Richtung. Grundsätzlich ist aber auch festzuhalten, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Belastungsmaßen in ihrer Aussagekraft als Prädiktoren der Diagnose „Lumbalsyndrom“ geringer sind als erwartet. Für Fragestellungen aus der Praxis sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Belastungsmaßen nicht sehr groß.

7.4 Beurteilung der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen

Den im Teilprojekt B ermittelten kraftbezogenen Beurteilungsgrößen kommt besondere Bedeutung zu, weil sie im Rahmen dieses Projektes in ihrer Aussagekraft mit den Beurteilungsbeschleunigungen verglichen

werden sollten. Im Abschnitt 3.2 hatten sich bereits sehr hohe Korrelationen zwischen den jeweiligen Vergleichswerten gezeigt, d. h. zwischen $a_{wz(8)}$ und $a_{Fz(8)}$ sowie zwischen $a_{wy(8)}$ und $a_{Fy(8)}$. Auch in den logistischen Regressionsanalysen mit dem Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ bzw. mit den beiden Unterdiagnosen in Abschnitt 4.1 wurden die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen alternativ als Prädiktoren eingesetzt. In den entsprechenden Ergebnisdarstellungen (z. B. Abbildung 6 und Tabellen 16 bis 18) wird deutlich, dass die kraftbezogenen Werte jeweils sehr ähnliche Ergebnisse erreichen wie die entsprechenden Beurteilungsbeschleunigungen, allerdings immer mit leicht geringeren Werten sowohl im Odds Ratio und seinen Konfidenzintervallen als auch im Akaike-Kriterium (AIC) als Maß der Anpassungsgüte eines Modells. Für die hier betrachtete Stichprobe ist damit auszuschließen, dass mit den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen aus dem Teilprojekt B anders geartete oder deutlichere Wirkungszusammenhänge als mit den Beurteilungsbeschleunigungen ermittelt werden können.

7.5 Schwellenwerte gesundheitsrelevanter Schwingungsbelastung

Die Frage, ab welchem Schwellenwert GKV-Einwirkungen als gesundheitsgefährdend anzusehen sind, war bereits ein zentrales Thema der früheren GKV-Studie. Während damals vor allem zu klären war, ob ein Schwellenwert von $KZ_r = 16,2$ (ungefähr $a_{wz(8)} = 0,81 \text{ m/s}^2$) einen ausreichenden Schutz bietet oder ein Wert von $KZ_r = 12,5$ (ungefähr $a_{wz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$) zu befürworten sei, wird heute ein noch breiteres Spektrum von möglichen Grenzwerten diskutiert, u. a.

in Tabelle 2 im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 [13]: Am unteren Ende des Risikobereichs wird mit Verweis auf VDI 2057-1:2002 (dort S. 29) bei $a_{w(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$ eine „Untergrenze der Zone möglicher Gesundheitsgefährdung“ gesehen und daneben der Auslösewert der EU-Richtlinie mit $a_{w(8)} = 0,5 \text{ m/s}^2$ zitiert. Eine Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$ wird mit Bezug auf die VDI-Richtlinie als Mitte der Zone erhöhter Gesundheitsgefährdung eingestuft, bei der nach zehnjähriger Exposition in der Regel ein Gesundheitsrisiko anzunehmen ist, und $a_{w(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$ wird als Obergrenze dieser Zone bezeichnet. Inwiefern sich eine epidemiologische Begründung für die aufgeführten Werte ableiten lässt, ist damit heute vielleicht eine noch dringendere Frage als in den 1990er-Jahren.

In Abschnitt 4.3 wurde die Auswirkung verschiedener Schwellenwerte auf der Basis der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ und der Tagesexposition $A(8)$ ausführlich untersucht, indem die bestmögliche Vorhersage der Diagnose „Lumbalsyndrom“ aufgrund der Schwingungsbelastung gesucht wurde oder — konkret gesagt — das höchste Odds Ratio bei schrittweiser Erhöhung des Schwellenwerts für $A(8)$. Es ergab sich mit beiden Kennwerten ein Bereich oberhalb von etwa $0,55 \text{ m/s}^2$, in dem ein erhöhtes Lumbalsyndrom-Risiko im Zusammenhang mit der Belastung deutlich wurde. Bei $a_{w(8)}$ wurde das Maximum bei $0,56 \text{ m/s}^2$ erreicht mit einem raschen Abfall ab etwa $0,63 \text{ m/s}^2$, während bei $A(8)$ das Maximum bei $0,58 \text{ m/s}^2$ erreicht wurde und sehr viel langsamer wieder abfiel (vgl. Abbildungen 7 und 8). Daraus ist zumindest für diese Stichprobe und dieses Zielkriterium zu folgern, dass sich kein Argument für $0,5 \text{ m/s}^2$ als Schwelle

einer Gesundheitsgefährdung ergibt. Der deutliche Abfall der OR-Kurven bei Werten jenseits von $0,63 \text{ m/s}^2$ (oder etwa $0,7 \text{ m/s}^2$ bei der Tagesexposition $A(8)$) dagegen zeigt, dass hier bereits zu viele Exponierte als „gesund“ eingestuft werden und das Risiko dadurch zunehmend unterschätzt wird.

Eine etwas präzisere Abschätzung des Zusammenwirkens von Lebensalter und Schwingungsdosis hinsichtlich der Ziel-diagnose ergab sich aus der Berechnung des populationsattributablen Risikos (Abschnitt 4.3.3): Für die meisten Altersgruppen zeigte sich übereinstimmend in einem Belastungsbereich \geq Tagesexposition $A(8) = 0,6 \text{ m/s}^2$ ein erhöhtes Lumbalsyndrom-Risiko durch die Schwingungsbelastung. Eine fundiertere Risikoabschätzung wäre im Prinzip nur mit einer aufwendigen Kohortenstudie zu realisieren. Letzten Endes hat der Schwellenwert aber auch nur praktische Bedeutung im Zusammenhang mit einer ausreichenden Expositionsdauer, sodass dieses Thema in der folgenden Dosisbetrachtung weiter verfolgt wird.

7.6 Bewertung von Schwingungsdosen

Zunächst lässt sich mithilfe von logistischen Regressionen (z. B. in Tabelle 23) zeigen, dass sich die Schwingungsdosis des Arbeitslebens neben dem Lebensalter als signifikanter Prädiktor der Diagnose „Lumbalsyndrom“ bewährt. Dies gilt für Dosisberechnungen auf der Grundlage der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$, der Tagesexposition $A(8)$ und des Schwingungsgesamtwertes a_{wv} und für verschiedene Schwellenwerte von null bis $0,8 \text{ m/s}^2$. Die beiden erstgenannten Belastungsgrößen

liefern etwas stärkere Odds Ratios und auch bessere AIC-Werte, und bei den Schwellenwerten zeigt sich bei $0,8 \text{ m/s}^2$ bereits eine Abschwächung in der Güte des Prädiktors. Grundsätzlich sind die Vorhersagen mit verschiedenen Dosisformeln und Schwellenwerten aber sehr ähnlich, sodass hieraus keine klaren Empfehlungen für ein bestimmtes Bewertungsmodell abzuleiten sind. Aus den Analysen ergibt sich lediglich, dass pro Belastungszuwachs von 500 Dosisseinheiten deutliche Risikoerhöhungen für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ festzustellen sind, die z. B. auf der Grundlage der Tagesexposition A(8) im Bereich von ca. 13 bis 15 % liegen.

Hinsichtlich der Anforderungen, die sich in der Praxis der Schwingungsbewertung stellen, sind jedoch klare Empfehlungen sowohl für Schwellenwerte als auch für Schwingungsdosen erforderlich. Deshalb wurde in Abschnitt 4.4 versucht, auf eher pragmatische Weise zu Entscheidungen im bisher betrachteten Wertebereich zu kommen. Bei Unterteilung der Stichprobe in unbelastete, kurzzeitig belastete und über zehn Jahre belastete Dosisgruppen konnte gezeigt werden, dass ein Schwellenwert von $0,63 \text{ m/s}^2$ zu einer plausibleren Risikoabschätzung der Dosisgruppen führt als ein kleinerer oder größerer Schwellenwert. Ebenso konnte auf der Grundlage des Schwellenwertes $A(8) = 0,63 \text{ m/s}^2$ gezeigt werden, dass sich ein weiterer Risikoanstieg aufgrund der Expositionsdauer bereits nach zehn Jahren bei einer Gesamtdosis von rund 870 Einheiten abzeichnet und ein deutlich stärkerer bei einer Gesamtdosis über 1400 Einheiten, also nach 16,5 Jahren Exposition mit $0,63 \text{ m/s}^2$ (oder rund zehn Jahren mit $A(8) = 0,8 \text{ m/s}^2$). Dies dürften die

Schlussfolgerungen mit der größten praktischen Relevanz sein, die sich aus dieser Reanalyse gewinnen lassen.

7.7 Röntgenologische Diagnosen

Spätestens seit Einführung der BK 2108 wird in Fachkreisen ausgiebig diskutiert, ob und welche röntgenologische Veränderungen als typische Zeichen einer schwingungsbedingten Degeneration der LWS anzusehen seien. Sowohl in der früheren GKV-Studie als auch in der vorliegenden Reanalyse zeigt sich jedoch sehr konsistent in praktisch allen untersuchten Zielgrößen – röntgenologische Diagnosen, Anzahl und Lokalisation der betroffenen WS-Segmente, zusammenfassende Beurteilung des Röntgenbefundes – ein eindeutig dominierender Einfluss des Lebensalters. Weiterhin kommt dem BMI ein Erklärungswert zu, aber Indizes der Schwingungsbelastung spielen praktisch keine Rolle. Eine auffällige Ausnahme macht lediglich die Verringerung der Diskushöhe im Übergangsegment zu S1, die neben dem Lebensalter auch stark von der Tagesexposition A(8) beeinflusst wird. Allerdings enthält die Stichprobe nur insgesamt 29 Personen mit auffälliger Diskushöhe in diesem Bereich, sodass dieser Einzelbefund auch nicht überbewertet werden darf.

Angesichts dieser schwachen Befundlage zum Zusammenhang von röntgenologisch nachweisbarer LWS-Degeneration und Schwingungsbelastung kann natürlich als Erklärung herangezogen werden, dass die Stichprobe bereits relativ alt ist und in der retrospektiven Betrachtung alters- und schwingungsbedingte Degeneration nicht mehr zu trennen sind. Allerdings werden in der zusammenfassenden Beurteilung

des Röntgenbefundes aus fachärztlicher Sicht fast zwei Drittel der Veränderungen im Röntgenbild als „altersgemäß“ oder „altersgemäß bis leicht“ eingestuft. Auch wenn dieser Maßstab subjektiven Charakter hat, ist das Ergebnis erstaunlich für eine schwingungsexponierte Population. Es wäre also auch zu diskutieren, ob die röntgenologisch beobachtbaren Veränderungen aufgrund der Schwingungsbelastung gar nicht so stark sind, dass sie die anamnestischen und klinischen Auffälligkeiten ursächlich erklären. Bei altersgemäßer Degeneration könnte die GKV-Exposition auch vorwiegend zu vermehrter Wahrnehmung von Schmerzen und Einschränkungen führen, wie sie sich in dem deutlichen Zusammenhang mit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ zeigt.

7.8 Unterdiagnosen „Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“

„Lokales Lumbalsyndrom“ und „Lumbales Wurzelsyndrom“ sind die beiden klinischen Diagnosen, die als Erscheinungsformen des Lumbalsyndroms infolge von Schwingungseinwirkung am häufigsten zu erwarten sind. Im Rahmen der früheren GKV-Studie und auch in der hier vorliegenden Reanalyse zeigten sich klare Zusammenhänge, vorwiegend mit dem „Lokalen Lumbalsyndrom“. Im Prinzip beruhen die Resultate für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ meistens auf den noch deutlicheren Ergebnissen für das „Lokale Lumbalsyndrom“ und werden durch die Zunahme der Gruppe mit „Lumbalem Wurzelsyndrom“ eher abgeschwächt. Die nächstliegende Erklärung dafür könnte, wie schon angesprochen, in einem Selektionseffekt liegen — dergestalt, dass die Symptomatik eines „Lumbalen Wurzelsyndroms“ den

Betroffenen mit größerer Wahrscheinlichkeit zu einer frühen Aufgabe der schwingungsbelasteten Tätigkeit führt als ein „Lokales Lumbalsyndrom“. An zwei Stellen in diesem Bericht nimmt das „Lumbale Wurzelsyndrom“ jedoch eine besondere Stellung ein:

- Abbildung 14 und Tabelle 27 ist zu entnehmen, dass sich auch beim „Lumbalen Wurzelsyndrom“ ein linearer Anstieg der Häufigkeit mit Expositionsdauer bzw. Gesamtdosis zeigt und ein Selektionseffekt spätestens mit Erreichen einer Gesamtdosis > 1400 Einheiten nicht mehr deutlich wird.
- Für die Lumbalsyndrom-Inzidenz bei der Follow-Up-Untersuchung ergab sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen einer GKV-Belastung von $A(8) > 0,63 \text{ m/s}^2$ im Follow-Up-Zeitraum und der Inzidenz eines „Lumbalen Wurzelsyndroms“, aber nicht der eines „Lokalen Lumbalsyndroms“.

Beide Beobachtungen kann man als Indizien dafür werten, dass die Diagnose „Lumbales Wurzelsyndrom“ enger mit GKV-Belastung zusammenhängt als in dieser retrospektiven Studie nachgewiesen werden konnte. Man darf annehmen, dass in der untersuchten Stichprobe bereits eine „Selection of the fittest“ stattgefunden hat, sodass die Folgen der Schwingungsexposition damit eher unterschätzt werden. Eine Aufklärung und Berücksichtigung dieser Selektion wäre aber nur im Rahmen einer aufwendigen Kohortenstudie möglich. In der Deutschen Wirbelsäulenstudie wird bei der männlichen Stichprobe ein ähnlicher Healthy-Worker-Effekt für den Zusammenhang zwischen Lastenhandhabung und Prolapsrisiko

beschrieben, allerdings erst in der höchsten Expositions-kategorie [25].

7.9 Stellenwert der Ergebnisse

Insgesamt zeigen die in dieser Auswertung verwendeten medizinischen Diagnosen, wie sie auch im Ärztlichen Merkblatt zur BK 2110 aufgeführt werden, deutliche statistische Zusammenhänge mit verschiedenen Maßen der GKV-Belastung während des Arbeitslebens. Dieser Zusammenhang zwischen GKV-Belastung und Schäden des knöchernen Skeletts im LWS-Bereich wird auch belegt durch pathogenetische Modelluntersuchungen, wie sie z. B. *Seidel* et al. [26] und *Hinz* et al. [27] durchgeführt haben.

Die pathophysiologischen Erkenntnisse werden gestützt durch Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen, in denen festgestellt wurde, dass Berufsgruppen mit langjähriger Einwirkung intensiver GKV im Sitzen eine signifikant höhere Prävalenz bandscheibenbedingter Erkrankungen im Vergleich zu nicht belasteten Kontrollgruppen aufweisen [28 bis 30]. In diesen Studien wurden bandscheibenbedingte Erkrankungen als Outcome-Variable definiert, sodass ihre Validität als höher einzuschätzen ist als z. B. die Erfassung eines Symptoms wie „low back pain“. Die Ursachen von Schmerzen im Bereich der LWS können nämlich zu einem hohen Prozentsatz muskulären Ursprungs sein [31], sodass ein möglicher Zusammenhang zu Vibrationsbelastungen überdeckt wird. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass in den verschiedenen epidemiologischen Studien des aktuellen EU-Forschungsprojekts VIBRISKS ([32], S. 71 bis 119) nur einige wenige signifikante Zusammenhänge zwischen erfragten LWS-Beschwerden und

einigen Kenngrößen der GKV-Belastung berichtet werden. Offensichtlich erfassen die ärztlichen Diagnosen, die aufgrund von Anamnese, klinischer Untersuchung und röntgenologischer Absicherung getroffen werden, vibrationsbedingte Beschwerden und Störungen besser als die Fragebögen zu WS-Beschwerden während der letzten sieben Tage und zwölf Monate, wie sie im Rahmen von VIBRISKS [32] verwendet werden. An den Daten der GKV-Studie konnte ja gezeigt werden, dass schon der Ausschluss aller Fälle, die bereits bei Expositionsbeginn Beschwerden angeben, zu deutlich klareren Zusammenhängen zwischen Belastung und Diagnosen führen. Wird dagegen nur nach Beschwerden in der letzten Zeit gefragt — sei es eine Woche oder ein Jahr —, besteht keinerlei Möglichkeit, Fälle mit möglicherweise anderen Ursachen der Beschwerden zu identifizieren und auszuschließen.

Aber auch an der Stichprobe der GKV-Studie lässt sich nur ein Risikoanstieg feststellen und keine auf pathomorphologischer Ebene begründbare Beziehung zwischen Schwingungsbelastung und spezifischen Befunden, etwa auf röntgenologischer Ebene. Zum Zeitpunkt der Untersuchung zeigen sich weit verbreitet degenerative Bandscheibenveränderungen in unterschiedlichem Ausmaß, sodass objektivierbare Schäden zur Unterstützung der Diagnose gegeben sind. Es lassen sich jedoch weder von der Art noch der Lokalisation oder Anzahl dieser Schäden eindeutige Rückschlüsse auf spezifische Auswirkungen der GKV-Belastung ziehen. Nach der Befundlage dieser Studie kommt Ganzkörperschwingungen in erster Linie die Rolle eines Mitverursachers von LWS-Schäden zu im Sinne einer stärkeren bzw. früheren Manifestation von Beschwerden,

wie sie auch bei altersbedingten degenerativen Prozessen zu erwarten sind. Ausschlaggebend dabei sind offensichtlich zum einen die Höhe der Schwingungsbelastung, die in einem längeren Tätigkeitszeitraum eingewirkt hat, und zum anderen die im Laufe des Arbeitslebens erworbene Gesamtdosis der Schwingungsbelastung.

8 Zusammenfassung

Die Bewertung der Einwirkung von GKV im Sitzen hat durch die Überarbeitung von einschlägigen Regelwerken wie der Richtlinie VDI 2057-1:2002 [2] und durch neue Verordnungen wie die LärmVibrationsArbSchV [4] von 2007 deutliche Änderungen erfahren. In einer von der DGUV geförderten Reanalyse der „Epidemiologischen Studie Ganzkörpervibration“ (GKV-Studie) aus den 1990er-Jahren sollten diese neuen Bewertungsansätze auf die damals erhobenen Daten angewendet werden.

In der damaligen GKV-Studie [7] wurden an 388 schwingungsexponierten Arbeitnehmern detaillierte Angaben zur Schwingungsexposition während des gesamten Arbeitslebens mit Angabe der jeweiligen Arbeitsfahrzeuge erhoben. Weiterhin wurde für jeden Teilnehmer eine ausführliche Anamnese erhoben und eine klinische sowie röntgenologische Untersuchung seiner Wirbelsäule durchgeführt. In der Reanalyse dieser Daten wurden zunächst die damals erhobenen individuellen Belastungswerte dem heute gültigen Stand der Schwingungsbewertung angepasst. Das bedeutete zum einen eine gegenüber den damaligen Berechnungen modifizierte Frequenzbewertung der Schwingbeschleunigung für verschiedene Arbeitsfahrzeuge und zum anderen die Beachtung neuer Bewertungskriterien, z. B. aus der LärmVibrationsArbSchV, in der die Tagesexposition $A(8)$ als Messgröße sowie definierte Auslöse- und Expositionsgrenzwerte für präventive Maßnahmen verbindlich festgelegt sind.

Die verschiedenen Tages-Belastungskennwerte der schwingungsexponierten Teilnehmer wie Tagesexposition $A(8)$, Beurteilungsbeschleunigungen in den drei Schwingungsachsen, Vektorbeträge usw. wurden miteinander verglichen und alternierend auf ihren Zusammenhang mit den ärztlichen Diagnosen aus der Studie untersucht. Insbesondere für die 315 schwingungsexponierten Teilnehmer der GKV-Studie, die bei Expositionsbeginn keine LWS-Beschwerden aufwiesen, ergaben sich deutliche statistische Zusammenhänge zwischen der maximalen Belastung während des Arbeitslebens (ermittelt aus dem Tätigkeitszeitraum mit der höchsten Belastung) und der Diagnose „Lumbalsyndrom“. Gleiche Ergebnisse zeigten sich für die Unterdiagnose „Lokales Lumbalsyndrom“, jedoch nicht für das „Lumbale Wurzelsyndrom“.

Regressionsanalytisch erweist sich das Lebensalter als stärkster Prädiktor des Lumbalsyndroms, aber auch die maximale Tagesexposition $A(8)$ leistet einen signifikanten Beitrag. Bezogen auf eine Zunahme um $0,1 \text{ m/s}^2$ beträgt die Risikoerhöhung 15 % ($OR = 1,15$; $CI_{95} : 1,06/1,24$). Das gleiche Regressionsmodell mit der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ als Belastungskennwert ergibt zudem eine überraschend gute Vorhersage eines Lumbalsyndroms durch die Belastung in der y-Achse ($OR = 1,23$; $CI_{95} : 1,09/1,40$).

Auch die Bedeutung von Schwellenwert und Expositionsdauer im Hinblick auf die gesundheitliche Gefährdung wurde

regressionsanalytisch untersucht. Führt man logistische Regressionen mit der maximalen Tagesexposition $A(8)$ jedes Teilnehmers als einzigem Prädiktor und der Zielvariable „Lumbalsyndrom“ durch und erhöht den Schwellenwert für die Belastung schrittweise um je $0,01 \text{ m/s}^2$, so ergeben sich die besten Ergebnisse, wenn man nur Tagesexpositionen ab $A(8) = 0,58 \text{ m/s}^2$ berücksichtigt (OR = 3,4; CI_{95} : 1,9/6,1). Berechnet man Gesamtdosen der Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens und vergleicht die Lumbalsyndrom-Prävalenz zwischen Dosisgruppen unterschiedlich hoher Dosis, so hat die Wahl des Schwellenkriteriums großen Einfluss auf die Höhe des Risikos: Bei einem Schwellenwert von $A(8) = 0,63 \text{ m/s}^2$ zeigt sich z. B. ein signifikanter Anstieg des alterskorrigierten Prävalenzratenverhältnisses zwischen den unbelasteten Personen und denen, die bis zur Zehn-Jahres-Dosis dieses Tageswertes belastet waren ($PVR_{MH} = 1,5$; CI_{95} : 1,1/2,0). Ein noch deutlicherer Anstieg ($PVR_{MH} = 1,7$; CI_{95} : 1,2/2,5) zeigt sich zwischen den Unbelasteten und denen mit sehr hoher Belastung (mehr als 1400 Dosis-Einheiten — entspricht einer Exposition von zehn Jahren bei $A(8) = 0,8 \text{ m/s}^2$ bzw. von 16,5 Jahren bei $A(8) = 0,63 \text{ m/s}^2$). Mit unterschiedlichen statistischen Ansätzen konnten diese Schlussfolgerungen bestätigt werden.

Die Auswertung der röntgenologischen Befunde zeigte in erster Linie einen sehr starken Einfluss des Lebensalters auf die in großer Zahl vorhandenen degenerativen LWS-Veränderungen. Für die verschiedenen Parameter der Schwingungsbelastung ergab sich dagegen kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit den Röntgendiagnosen. Als wichtigstes Einzelergebnis fiel auf, dass im Übergangsegment zu S1 das Relative

Risiko einer auffälligen Minderung der Diskushöhe neben dem Alter auch signifikant von der Tagesexposition $A(8)$ abhängt. Für die beiden Schwingungsachsen ist festzuhalten, dass der Einfluss von Schwingungen in y-Achse auf die LWS offensichtlich bedeutsamer ist als bisher angenommen. Die Tagesexposition $A(8)$ ist demnach ein sinnvolles Maß.

Grundsätzlich erweisen sich in dieser relativ langjährig belasteten Stichprobe Kennwerte der maximalen Tagesbelastung während des Arbeitslebens als gute Prädiktoren der Diagnose „Lumbalsyndrom“. Ergebnisse der früheren GKV-Studie, dass LWS-Schädigungen spätestens ab einem Schwellenwert von ca. $0,63 \text{ m/s}^2$ täglicher Belastung zunehmen, werden bestätigt, und eine weitere deutliche Risikoerhöhung zeigt sich bei einer Gesamtdosis des Arbeitslebens in einem Bereich, der spätestens bei etwa 16-jähriger Exposition oberhalb dieses Schwellenwertes anzusetzen ist. Im Hinblick auf einen möglichen Kausalzusammenhang zwischen Schwingungsbelastung und LWS-Schäden sind daher beide Aspekte zu berücksichtigen: die Höhe der während des Arbeitslebens erreichten Tagesexpositionen und die Gesamtdosis der Schwingungsbelastung.

Literatur

- [1] ISO 2631-1:1997: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. International Organisation for Standardization, Genf 1997
- [2] VDI 2057-1:2002: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen. Beuth, Berlin 2002
- [3] Richtlinie 2002/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Vibrationen). ABl. EG (2002) Nr. L 177, S. 13-19
- [4] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrations-ArbSchV). BGBl. I (2007) Nr. 8, S. 261 ff.
- [5] *Fritz, M.*: Modelle zur Nachbildung der mechanischen Eigenschaften des menschlichen Körpers bei Belastungen durch Ganz-Körper-Schwingungen. Zbl. Arbeitsmed. 53 (2003), S. 524-535
- [6] *Bergmann, A.; Seidler, A.; Schumann, B.; Fischer, S.; Bolm-Audorff, U.; Ditchen, D.; Ellegast, R.; Elsner, G.; Grifka, J.; Hinz, B.; Hofmann, F.; Jäger, M.; Linhardt, O.; Luttmann, A.; Michaelis, M.; Peterit-Haack, G.*; *Haerting, J.*: Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition durch Ganzkörpervibration und bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule – Auswertungen innerhalb der Deutschen Wirbelsäulenstudie. Zbl. Arbeitsmed. 57 (2007), S. 317-327
- [7] *Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.*: Epidemiologische Studie „Ganzkörpervibration“. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1999
- [8] *Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.*: Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch Ganzkörperschwingungen – Epidemiologische Studie – Zusammenhang zwischen Schwingungsbelastung und medizinischen Untersuchungsbeunden. VDI-Berichte Nr. 1345, S. 77-84. VDI, Düsseldorf 1997
- [9] *Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.*: Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen auf die Lendenwirbelsäule – Eine Follow-Up-Studie an 388 Fahrern verschiedener Fahrzeuge. Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed. 33 (1998), S. 429-442
- [10] *Schwarze, S.; Notbohm, G.; Dupuis, H.; Hartung, E.*: Dosiskonzept für Belastung und Beanspruchung durch Ganzkörperschwingungen. Zbl. Arbeitsmed. 53 (2003), S. 15-23

- [11] *Christ, E.; Fischer, S.; Kaulbars, U.; Sayn, D.*: Vibrationseinwirkungen an Arbeitsplätzen – Kennwerte der Hand-Arm- und Ganzkörper-Schwingungsbelastungen. BGI-A-Report 6/2006. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2006
- [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), S. 354-363
- [13] Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung (BKV). Bek. des BMGS vom 1. Juni 2005 – 414-45222-2110. BArbBl. (2005) Nr. 7, S. 43ff.; zul. geänd. BArbBl. (2005) Nr. 8/9, S. 46
- [14] *Krämer, J.; Schleberger, R.; Hedtmann, A.*: Bandscheibenbedingte Erkrankungen – Ursachen, Diagnose, Behandlung, Vorbeugung, Begutachtung. 3. Aufl. Thieme, Stuttgart 1994
- [15] *Rothman, K. J.*: Modern epidemiology. Little, Brown and Company, Boston 1986
- [16] *Faus-Keßler, Th.; Brüske-Hohlfeld, I.; Scherb, H.; Tritschler, J.; Weigelt, E.*: Einführung in die arbeitsmedizinische Epidemiologie. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Sonderschrift S 29. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1992
- [17] *Kreienbrock, L.; Schach, S.*: Epidemiologische Methoden. 4. Aufl. Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München 2005
- [18] *Pospeschill, M.*: Praktische Statistik. Eine Einführung mit Anwendungsbeispielen. Psychologie Verlags Union, Weinheim 1996
- [19] *Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.*: Multivariate Analysemethoden – eine anwendungsorientierte Einführung. 9. Aufl. Springer, Berlin 2000
- [20] *Bohl, A.; Zöfel, P.*: Erweiterte Datenanalyse mit SPSS. Westdeutscher Verlag, Wiesbaden 2002
- [21] *Burnham, K.; Anderson, D.*: Model selection and multimodel inference: A practical information theoretic approach. Springer, New York 2002
- [22] *Forster, M. R.*: Key concepts in model selection: performance and generalizability. J. Math. Psychol. 44 (2000), S.205-231
- [23] UCLA (University of California Los Angeles), Statistical Group: Statistical Computing. <http://www.ats.ucla.edu/stat/stata/dae/poissonreg.htm> (27. September 2011)
- [24] *Tonscheidt, H.*: Röntgenologische Veränderungen der Lendenwirbelsäule bei Ganzkörperschwingungsbelastung – Ergebnisse einer Follow-Up-Studie. Dissertation, Universität Düsseldorf 1999

- [25] *Seidler, A.; Bergmann, A.; Ditchen, D.; Ellegast, R.; Elsner, G.; Grifka, J.; Haerting, J.; Hofmann, F.; Jäger, M.; Linhardt, O.; Luttmann, A.; Michaelis, M.; Petereit-Haack, G.; Bolm-Audorff, U.*: Zusammenhang zwischen der kumulativen Wirbelsäulenbelastung durch Lastenhandhabung und lumbalen Prolapserkrankungen – Ergebnisse der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl. Arbeitsmed.* 57 (2007), S.290-303
- [26] *Seidel, H.; Blüthner, R.; Hinz, B.*: Ermittlung vibrationsbedingter Belastungsverläufe in der Lendenwirbelsäule mit Hilfe dynamischer Vielkörpermodellierung. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund. Fb 889. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2000
- [27] *Hinz, B.; Seidel, H.; Hofmann, J.; Menzel, G.*: Modelle europäischer Fahrer – neue Wege zur Beurteilung von Gesundheitsgefährdungen durch langzeitige Einwirkung von Ganzkörperschwingungen. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.): *Humanschwingungen*. Tagung Dresden 8.-9.10.2007. VDI-Berichte Nr. 2002. VDI, Düsseldorf 2007
- [28] *Andersson, G. B. J.*: The epidemiology of spinal disorders. In: *Frymoyer, J. W.* et al. (Hrsg.): *The Adult Spine, Principles and Practice*. S. 107-146. Raven, New York 1991
- [29] *Bovenzi, M.; Hulshof, C. T. J.*: An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibrations and low back pain. *J. Sound Vib.* (1998), S. 595-611
- [30] *Müsch, F. H.*: Lumbale Bandscheibendegeneration bei Erdbaumaschinenfahrern mit langjähriger Ganzkörper-Vibrationsexposition. Dissertation, Universität Mainz 1987
- [31] *Mense, S.*: Muskelschmerz – Mechanismen und klinische Bedeutung. *Dtsch. Ärztebl.* 105 (2008) Nr. 12, S. A214-219
- [32] *VIBRISKS – Risks of Occupational Vibration Exposures*. European Commission – FP5 Project No. QLK4-2002-02650. Final Technical Report, 2007

Teilprojekt B:

**Validierung einer kraftbezogenen Beurteilung
von Ganzkörper-Schwingungen mittels einer
Reanalyse des Datenmaterials der GKV-Studie**

1 Einleitung

In dem geförderten Forschungsprojekt wurde ein von den in der Wirbelsäule wirkenden Kräften abgeleiteter Zusammenhang zwischen der Belastung des Menschen durch mechanische Ganzkörper-Schwingungen und den gesundheitlichen Reaktionen des Menschen untersucht.

Im täglichen Leben, insbesondere aber während beruflicher Tätigkeiten, sind Ganzkörper-Schwingungen ein weit verbreiteter Belastungsfaktor. So sind die Insassen von Land-, Wasser- und Luftfahrzeugen während der Beförderung Ganzkörper-Schwingungen ausgesetzt. Von sich arbeitsbedingt häufig wiederholenden Ganzkörper-Schwingungen sind die Fahrer verschiedener selbstfahrender Arbeitsmaschinen, wie z. B. Lastkraftwagen, Gabelstapler, Erdbaumaschinen sowie land- oder forstwirtschaftlichen Schlepper, betroffen.

Die Belastung durch Ganzkörper-Schwingungen bleibt in der Regel nicht ohne Auswirkungen auf den menschlichen Körper. So können schon während der Belastung akute Reaktionen wie Unbehagen oder Verringerung der Leistungsfähigkeit auftreten. Andererseits konnte in zahlreichen Studien gezeigt werden, dass kurzzeitige Schwingungsbelastungen zu einer Verbesserung der konditionellen und koordinativen Fähigkeiten führen können. Einen kritischen Überblick über die Studien und die erzielten Effekte erstellte *Fritz* [1]. Bei Langzeitexpositionen konnte ein erhöhtes Risiko für chronische Gesundheitsbeeinträchtigungen festgestellt werden, z. B. [2 bis 6]. Hauptsächlich betroffen sind

die Lendenwirbelsäule und das mit ihr verbundene Nervensystem, sodass sogenannte Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule entstehen können.

Sowohl die akuten Reaktionen 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 der Schwingungsbelastung zu verringern. Erprobte Maßnahmen zur Verringerung der Schwingungsbelastung werden in der Richtlinie VDI 3831 [7] beschrieben sowie auch in der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV) [8]. Um den Erfolg der durchgeführten Maßnahmen erfassen zu können, wird ein einheitliches Maß für die Schwingungsbelastung benötigt.

Zur Erfassung der Schwingungsbelastung wird die Schwingbeschleunigung an der Kontaktstelle zwischen Mensch und Maschine/Sitz gemessen. Werden die Schwingbeschleunigungen unter Arbeitsbedingungen gemessen, so haben sie in der Regel einen stochastischen Zeitverlauf. Um die Schwingungsbelastung durch verschiedene Maschinen oder bei unterschiedlichen Arbeitsbedingungen miteinander vergleichen zu können, wird in der Richtlinie VDI 2057, Blatt 1, [9] und in ISO 2631-1 [10] ein Verfahren zur Ermittlung des Schwingungskennwertes beschrieben. Zunächst wird der gemessene Beschleunigungsverlauf elektronisch oder

rechnerisch in einzelne Frequenzanteile zerlegt. Die Amplituden der Frequenzanteile werden mit Bewertungsfaktoren multipliziert. Danach wird aus den partiellen frequenzbewerteten Beschleunigungen durch energieäquivalente Mittelwertbildung der Kennwert für die gemessene Schwingungsbelastung berechnet. Da die Belastungsdauern zwischen den verschiedenen Tätigkeiten sehr stark variieren können, wird durch weitere energieäquivalente Mittelwertbildung ein Kennwert für die einheitliche Belastungsdauer von 8 h berechnet.

Durch die Bewertungsfaktoren sollen die Auswirkungen der Schwingungsbelastung auf den Menschen berücksichtigt werden. Die Bewertungsfaktoren sind unterschiedlich für die drei Schwingungsrichtungen (x, y, z) und die während der Schwingungsbelastung eingenommene Körperhaltung. Die Bewertungsfaktoren wurden hergeleitet anhand der Schwingungsempfindung des Menschen, z. B. [11; 12]. 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 bestehen kann. Weniger wahrscheinlich ist dagegen ein Zusammenhang zwischen der Schwingungsempfindung und den bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule, da der Gallertkern und die innere Schicht des Faserrings der Bandscheiben sowie auch die Wirbel der Lendenwirbelsäule nicht vom Nervensystem innerviert werden.

Die bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule sind keine schwingungsspezifischen Erkrankungen.

Die gleichen Veränderungen können auch altersbedingt auftreten. Allerdings treten die Erkrankungen bei langjährig schwingungsbelasteten Personen vorzeitig und verstärkt auf [13]. Auch *Müsch* [14] konnte anhand seiner Untersuchungen zeigen, dass langjährige Belastungen durch intensive Ganzkörper-Schwingungen zu einer erheblichen Vorverlagerung der bandscheibenbedingten Erkrankungen in jüngere Altersgruppen führt. Statistisch gesehen entspricht dies einer deutlichen Linksverschiebung in der Beziehung zwischen Erkrankungshäufigkeit und -alter gegenüber den nicht belasteten Kontrollgruppen.

Für Tätigkeiten, bei denen häufig und regelmäßig Lasten gehoben und getragen werden oder die in gebeugter Körperhaltung durchgeführt werden, konnte gezeigt werden, dass die häufig diagnostizierten bandscheibenbedingten Erkrankungen primär durch die in der Lendenwirbelsäule übertragenen Druckkräfte ausgelöst werden, z. B. [15 bis 17]. Diese Erkrankungen betreffen das gleiche Zielorgan wie die chronischen Erkrankungen 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* [18], dass der wahrscheinliche Schadensmechanismus bei Exposition gegenüber Ganzkörper-Schwingungen in Längsrichtung des Oberkörpers in einer Deckplattenschädigung durch Ermüdungsfraktur mit nachfolgenden degenerativen Veränderungen der Bandscheibe und anderer Strukturen besteht. Diese Annahme gründet sich allerdings auf In-vitro-Experimente und nicht auf nachgewiesene Frühsymptome. Das

Schadenspotenzial 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 [9] oder ISO 2631-1 [10] eine Schwingungskenngröße zu benutzen, die auf der Schwingungsempfindung basiert, scheint es erfolversprechender zu sein, die in der Lendenwirbelsäule wirkenden Kräfte zu berücksichtigen. Im internationalen Standard ISO 2631-5 [19], der zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos bei stoßhaltigen Ganzkörper-Schwingungen erarbeitet wurde, wird das Risiko anhand der Druckkräfte in der Wirbelsäule ermittelt. Das gleiche Ziel verfolgt die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) mit der Erarbeitung des Normentwurfes „Abschätzung des Risikos einer Gesundheitsgefährdung durch die Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen anhand eines Modells für die innere Beanspruchung“.

Auch mit dem von *Fritz* am Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der Technischen Universität Dortmund (IfADo) entwickelten biomechanischen Modell können die inneren Belastungen bzw. die Kräfte in der Wirbelsäule abgeschätzt werden. Anhand der Übertragungsfunktionen zwischen den simulierten Kräften in der Lendenwirbelsäule und der Schwingbeschleunigung [20 bis 22] konnten sogenannte kraftbezogene Bewertungsfaktoren berechnet werden [23; 24]. Im Hinblick auf die Berufskrankheit BK 2110, die gemäß dem zugehörigen Merkblatt vorwiegend durch vertikale Einwirkung

von Ganzkörper-Schwingungen verursacht wird, haben *Fritz* et al. [23; 24] ihre Bewertungsfaktoren nur für diese Schwingungsrichtung ermittelt. Die Faktoren sind abhängig von der Schwingfrequenz. Sie erreichen für Schwingfrequenzen im Bereich der Resonanzfrequenz des menschlichen Körpers ihre höchsten Werte. Mithilfe der in VDI 2057, Blatt 1 [9] beschriebenen Rechenverfahren und unter Nutzung der kraftbezogenen Bewertungsfaktoren ist es möglich, einen Schwingungskennwert zu ermitteln, der auf den in der Lendenwirbelsäule wirkenden Kräfte und nicht mehr auf der Schwingungsempfindung beruht.

Für eine verbesserte Abschätzung des Gesundheitsrisikos reicht es nicht aus, nur einen neuen Schwingungskennwert rechnerisch herzuleiten. Ermitteln lassen muss sich auch ein Zusammenhang zwischen diesem Schwingungskennwert und den durch Ganzkörper-Schwingungen hervorgerufenen Erkrankungen. Sodann muss ein neuer Schwellenwert hergeleitet werden, der anzeigt, dass bei Überschreitung des Wertes durch die Schwingungsbelastung ein deutliches Gesundheitsrisiko besteht. Unter Berücksichtigung von speziellen Festigkeitshypothesen aus der Mechanik haben *Fritz* et al. [23; 24] einen kraftbezogenen Schwellenwert abgeleitet. Neben dieser theoretischen Begründung des Schwellenwertes ist es aber notwendig, anhand von epidemiologischen Daten die Validität des Schwellenwertes zur Vorhersage eines schwingungsinduzierten Gesundheitsrisikos zu überprüfen.

Die Ziele des Forschungsvorhabens, zu dem in diesem Report ein Abschlussbericht vorgelegt wird, waren:

- Für gegebene reale Schwingungsbelastungen, die in der in den 1990-er Jahren vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG; heute: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) geförder-ten Längsschnittstudie zur Auswirkung von Ganzkörper-Schwingungen (GKV-Studie, durchgeführt in den Jahren von 1990 bis 1996) erhoben wurden, die entsprechen- den kraftbezogenen Schwingungskenn- werte zu berechnen.
 - Anhand der kraftbezogenen Kennwerte soll eine Zusammenhangsanalyse mit den in der GKV-Studie dokumentierten medizi- nischen Befunden zur Wirbelsäulensymp- tomatik durchgeführt werden.
 - Die Zusammenhangsanalyse soll zur Abschätzung eines epidemiologisch begründeten kraftbezogenen Schwellen- wertes führen.
 - Anhand der Schwingungskennwerte der 54 Fahrer, die im Zeitraum zwischen der Erstuntersuchung und der Nachunter- suchung erkrankten, soll eine mögliche Altersabhängigkeit des kraftbezogenen Schwellenwertes überprüft werden.
- Während der Projektdurchführung bestand eine enge Kooperation mit den Partnern des Teilprojektes A „Anwendung und Validie- rung der Verfahren nach ISO 2631-1:1997, VDI 2057-1:2002, Blatt 1, EU-Richtlinie 2002/44/EG „Ganzkörpervibration“ sowie Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzver- ordnung 2007 von der Heinrich-Heine- Universität Düsseldorf. Die Analysen der Projektpartner führten dazu, dass bei der Kraftbewertung auch die Kräfte zwischen dem fünften Lendenwirbel und dem Sakrum sowie die horizontalen Schwingungsbelas- tungen in transversaler y-Richtung berück- sichtigt wurden. Erste Ergebnisse deuten dar- auf hin, dass mit der Schwingungsbelastung in y-Richtung ein höheres Gesundheitsrisiko verbunden ist als mit der Schwingungsbelas- tung in horizontaler x-Richtung.

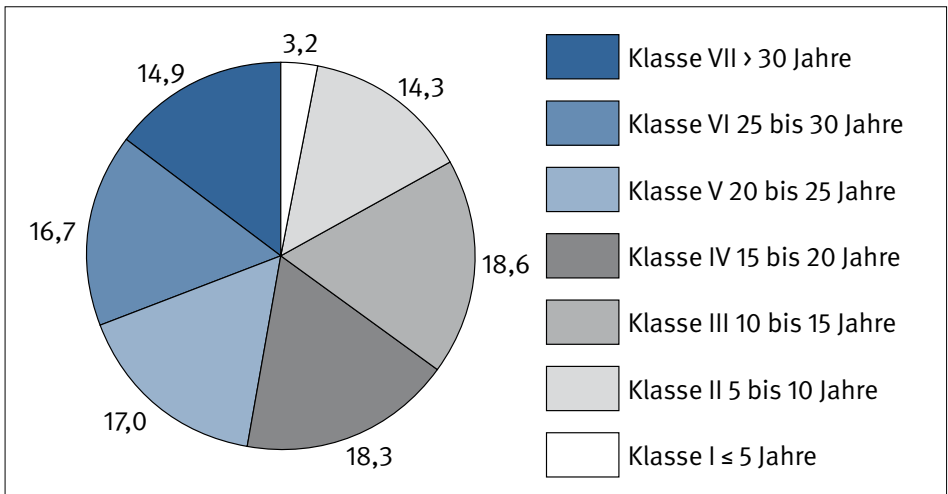
2 Ergebnisse des Untersuchungszeitraumes Juli 2006 bis Juni 2007

Das Teilprojekt B basiert auf den Belastungsdaten der GKV-Studie. Die im Untersuchungszeitraum von Juli 2006 bis Juni 2007 ermittelten Ergebnisse wurden zunächst in einem nicht veröffentlichten wissenschaftlichen Zwischenbericht sowie in *Fritz et al.* [25] sowie *Fritz und Gieß* [26] dargestellt. Um ein besseres Verständnis der Ergebnisse des Teilprojektes B zu erreichen, werden in diesem Abschnitt einige Ergebnisse aus dem genannten Untersuchungszeitraum zusammengefasst.

Zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung betrug das Alter der 388 in der GKV-Studie

untersuchten Fahrer 41 Jahre (Medianwert). Die Gesamtdauer der beruflichen Schwingungsbelastung reichte von wenigen Monaten bis zu 42 Jahren. In Abbildung 1 ist die prozentuale Häufigkeitsverteilung der berufsbedingten Belastungsdauer, aufgeteilt in die Klassen I bis VII, dargestellt. Der geringste Anteil (3,2 %) fällt auf die Klasse I (\leq fünf Jahre Berufstätigkeit). In den sechs anderen Klassen zeigte sich in der Dauer der Berufstätigkeit eine annähernd gleich hohe Verteilung (14,3 bis 18,6 %). Der Median lag bei 19,3 schwingungsexponierten Jahren.

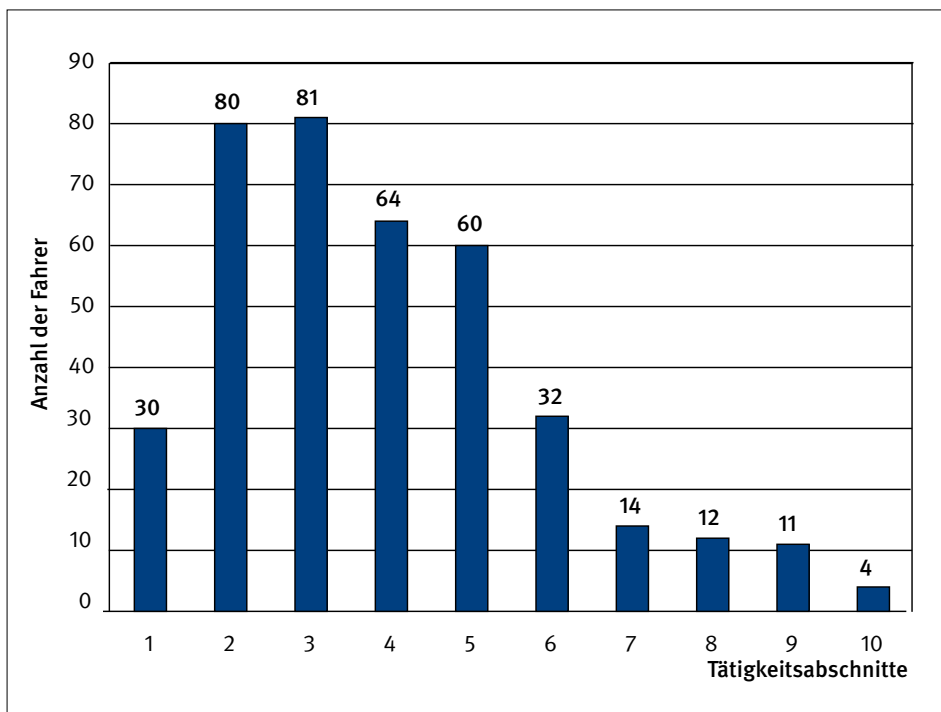
Abbildung 1:
Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Gesamtdauer der beruflichen Schwingungsexposition der 388 untersuchten Fahrer, aufgeteilt in die Klassen I bis VII



Bei den meisten untersuchten Fahrern (358 von 388) teilte sich die gesamte berufliche Schwingungsbelastung auf mehrere Tätigkeitsabschnitte mit gleichbleibend intensiver Schwingungsbelastung auf (Abbildung 2). Gemäß den erhobenen Expositionsdaten konnte ein neuer Tätigkeitsabschnitt z. B. verbunden sein mit dem Wechsel der schwingungsbelastenden Tätigkeit oder dem Wechsel des Fahrzeugs, dessen schwingungsbelastende Fahreigenschaften aufgrund von Modernisierung geringer ausfallen als diejenigen vom Vorgängerfahrzeug.

Abbildung 2 zeigt, dass sich bei einem überwiegenden Anteil der Fahrer, nämlich 161 von 388, die gesamte erfasste Berufsdauer auf zwei oder drei Tätigkeitsabschnitte erstreckt. Nur ein geringer Anteil der Fahrer hat zwischen sieben und zehn Tätigkeitsabschnitten vorzuweisen. Für insgesamt 30 Fahrer ergab sich kein beruflicher Tätigkeitswechsel. Hieraus folgt, dass die Mehrheit der Fahrer in bis zu sechs verschiedenen Tätigkeitsabschnitten schwingungsbelastet war. Schließlich fehlten bei 34 Fahrern für jeweils ein Zeitintervall jegliche Angaben zur Tätigkeit oder zu eventuellen Schwingungsbelastungen.

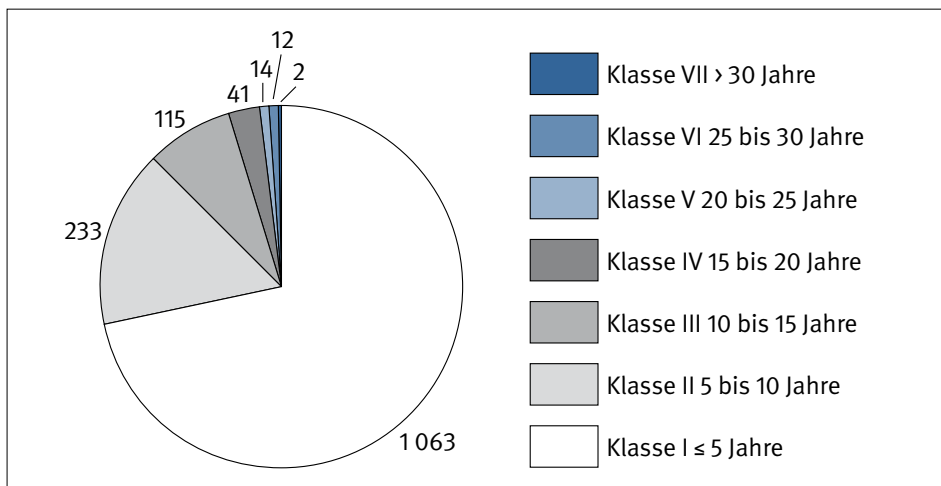
Abbildung 2:
Häufigkeitsverteilung der Anzahl von Tätigkeitsabschnitten mit gleichbleibender Schwingungsbelastung bei den 388 untersuchten Fahrern



Insgesamt wurden 1480 Tätigkeitsabschnitte mit gleichbleibender Schwingungsbelastung ermittelt. Die Dauer dieser Tätigkeitsabschnitte war aus naheliegenden Gründen nicht für alle Abschnitte gleich lang. Abbildung 3 zeigt, dass die überwiegende Anzahl der Tätigkeitsabschnitte fünf Jahre oder

weniger andauerte, also zur Klasse I gehörte. In den höheren Klassen finden sich immer weniger Fahrer, die eine lange Tätigkeit innerhalb eines Tätigkeitsabschnittes ausübten. Lediglich zwei Fahrer überschritten eine 30-jährige Tätigkeitsdauer ohne Veränderung der Schwingungsbelastung.

Abbildung 3:
Häufigkeitsverteilung der Dauer der insgesamt 1480 Tätigkeitsabschnitte, aufgeteilt in die Klassen I bis VII



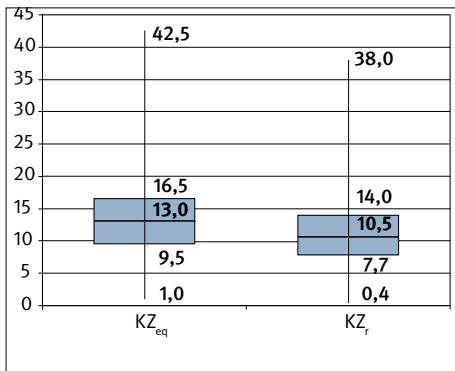
Zur Abschätzung der Belastungshöhe wurde in der GKV-Studie die Bewertete Schwingstärke KZ_{eq} ermittelt. In Abbildung 4 ist die Verteilung der Bewerteten Schwingstärke für die Abschnitte dargestellt, in denen nur ein Fahrzeug während des gesamten Abschnittes genutzt wurde. Für die 58 Tätigkeitsabschnitte, in denen alternierend zwei oder drei Fahrzeuge genutzt wurden, enthielten die Originaldaten nur einen Summenwert für die Bewertete Schwingstärke, sodass kein direkter Bezug zu den in diesen Abschnitten eingesetzten Fahrzeugen möglich war. In drei

Tätigkeitsabschnitten war die angegebene Höhe der Schwingungsbelastung gleich null. Somit bleiben 1419 Tätigkeitsabschnitte, in denen die ermittelten Schwingungswerte eindeutig einem Fahrzeug zugeordnet werden können.

Die untersuchten Fahrer waren in der Regel pro Arbeitstag weniger als acht Stunden schwingungsbelastet. Deshalb wurde aus der Bewerteten Schwingstärke KZ_{eq} die Beurteilungs-Schwingstärke KZ_r berechnet. Die Verteilung der Beurteilungs-Schwingstärke ist ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4:

Boxplot der Bewerteten Schwingstärke KZ_{eq} und der Beurteilungs-Schwingstärke KZ_r bei den 1 419 Tätigkeitsabschnitten, in denen nur ein Fahrzeug genutzt wurde. Eingetragen ist jeweils der Medianwert, der Wert des ersten und dritten Quartils sowie der Minimal- und Maximalwert



Die Spannweite der Beurteilungs-Schwingstärke reichte von 0,4 (Autokran) bis 38,0 (Muldenkipper) mit einem Medianwert von 10,5. Für 50 % der Fahrzeuge lagen die Werte zwischen 7,7 und 14,0.

Mithilfe der von Fritz et al. [24] hergeleiteten Regressionsfunktion wurden unter Berücksichtigung der eingesetzten Fahrzeuge die Beurteilungs-Schwingstärken KZ_r in kraftbezogene Beurteilungsgrößen $a_{Fz(8)}$ umgerechnet. Grundlage dieser Umrechnung sind die Wirbelsäulenkräfte im Bewegungssegment L3-L4.

Für die insgesamt 1477 Tätigkeitsabschnitte mit Schwingungsbelastung durch ein oder auch mehrere Fahrzeuge ergab sich zwischen der Beurteilungs-Schwingstärke und

der kraftbezogenen Beurteilungsgröße $a_{Fz(8)}$ ein annähernd linearer Zusammenhang, wobei die kraftbezogene Schwingungskenngröße etwas stärker anstieg als die Beurteilungs-Schwingstärke (Abbildung 5). Die Werte der kraftbezogenen Beurteilungsgröße reichten von $a_{Fz(8)} = 0,01$ bis $1,88 \text{ m/s}^2$ mit einem Median von $0,47 \text{ m/s}^2$.

In 250 der 1 477 Tätigkeitsabschnitte wurde der Wert von 16,2 für die Beurteilungs-Schwingstärke überschritten; das heißt: Es war eine gesundheitliche Gefährdung gegeben. Soll sich nun anhand der kraftbezogenen Beurteilungsgröße $a_{Fz(8)}$ ein ähnliches Gefährdungspotenzial ergeben, so müsste der kraftbezogene Schwellenwert gleich $0,77 \text{ m/s}^2$ sein [25]. Allerdings zeigte sich, dass nur in 233 Tätigkeitsabschnitten die Schwellenwerte von beiden Beurteilungsgrößen überschritten wurden (Abbildung 6). Die Unterschiede lassen sich damit erklären, dass die Umrechnung nicht mittels eines konstanten Faktors vorgenommen wurde, sondern in Abhängigkeit von der Medianfrequenz der benutzten Fahrzeuge. Es gibt somit 17 Tätigkeitsabschnitte, bei denen die Schwingungsbelastung nur die Schwelle der Beurteilungs-Schwingstärke überschreitet, sowie 16 Abschnitte, bei denen nur der kraftbezogene Schwellenwert überschritten wird.

Abbildung 5:
Zusammenhang zwischen der Beurteilungs-Schwingstärke und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment L3-L4

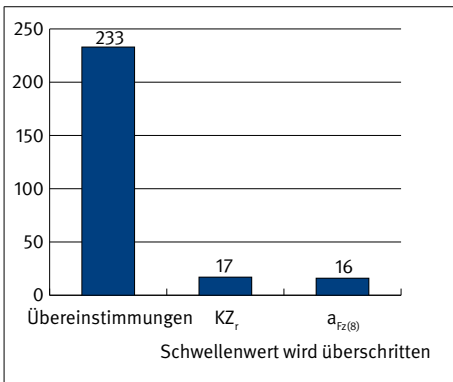
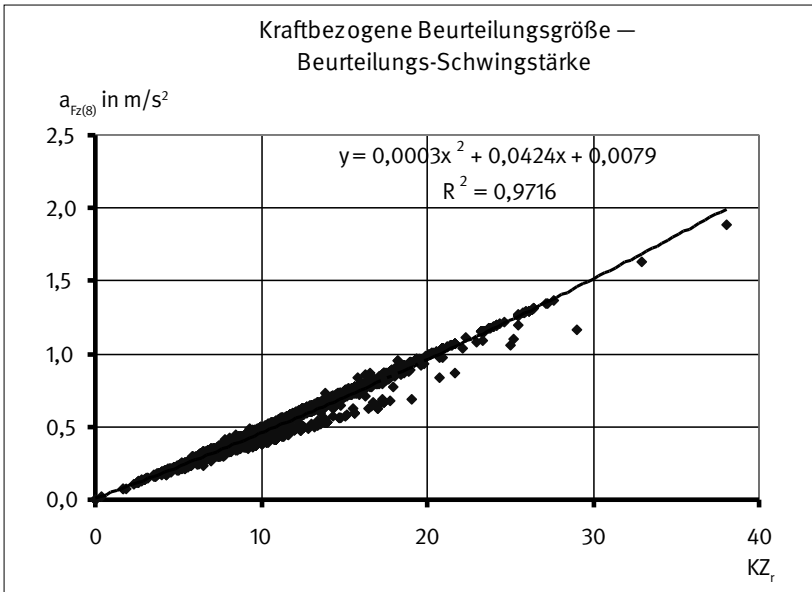


Abbildung 6:
Anzahl der Tätigkeitsabschnitte, in denen Schwellenwerte der Beurteilungs-Schwingstärke und der kraftbezogenen Schwingungsgröße überschritten werden bzw. nur ein Schwellenwert überschritten wird

3 Methodik

Die in der GKV-Studie erhobenen Kennwerte zur Schwingungsbelastung wurden in kraftbezogene Kennwerte umgerechnet. Die kraftbezogenen Bewertungsfaktoren wurden zunächst aus den Übertragungsfunktionen zwischen der Sitzbeschleunigung und den Kräften im Bewegungssegment L3-L4 abgeleitet. Zum Vergleich wurden auch die Übertragungsfunktionen für das caudale Bewegungssegment L5-S1 ermittelt. Die Übertragungsfunktionen wurden mithilfe des am IfAdo entwickelten biomechanischen Modells berechnet. Um ein besseres Verständnis dieser Berechnungen zu erreichen, ist es sinnvoll, zunächst den Zusammenhang zwischen den Simulationsrechnungen mit dem biomechanischen Modell und der Herleitung der neuen Bewertungsfaktoren zu beschreiben. Danach werden die Methoden beschrieben, die bei der Reanalyse der in der GKV-Studie erfassten Schwingungs- und Erkrankungsdaten angewandt wurden.

3.1 Aufbau des biomechanischen Modells des Menschen

Das biomechanische Modell (Abbildung 7), mit dem die Kräfte in Gelenken des menschlichen Bewegungsapparates bei Schwingungsbelastung simuliert werden können, wurde am IfAdo entwickelt und von *Fritz* [20; 22; 27] ausführlich beschrieben.

Für die Herleitung der kraftbezogenen Bewertungsfaktoren wurde mit dem Modell für eine breitbandige Testschwingung zunächst die schwingungsinduzierte Druckkraft im Bewegungssegment L3-L4 simuliert. Dieses

Bewegungssegment wurde ausgewählt, da die Deckplatten des dritten und vierten Lendenwirbels nahezu parallel zu der Ebene sind, die durch die x- und y-Achse des Koordinatensystems gemäß VDI 2057, Blatt 1 [9] aufgespannt wird. Somit verläuft auch die Wirkungslinie der Druckkraft in diesem Bewegungssegment fast parallel zur vertikalen Schwingungsrichtung. Hierdurch ergibt sich ein enger Zusammenhang zwischen der Druckkraft und der vertikalen Sitzbeschleunigung, und die ebenfalls schwingungsinduzierten Scherkräfte in x- oder y-Richtung sind gering bei dieser vertikalen Schwingungsbelastung.

Wie beim berufsbedingten lang andauernden Sitzen oder beim Heben und Tragen von Lasten treten auch bei Schwingungsbelastung die degenerativen Veränderungen überwiegend im Bewegungssegment, das durch den fünften Lendenwirbel und das Sakrum gebildet wird, auf. Mithilfe des Modells wurde auch für dieses Bewegungssegment die Kraftkomponente, die parallel zur vertikalen Sitzbeschleunigung verläuft, simuliert. Diese Kraftkomponente ist nicht gleich der Druckkraft in diesem Bewegungssegment, da hier die Deckplatten bis zu 30° gegen die horizontale Ebene geneigt sind. Aus den Zeitverläufen der vertikalen Kraft und der Sitzbeschleunigung wurde die Übertragungsfunktion berechnet.

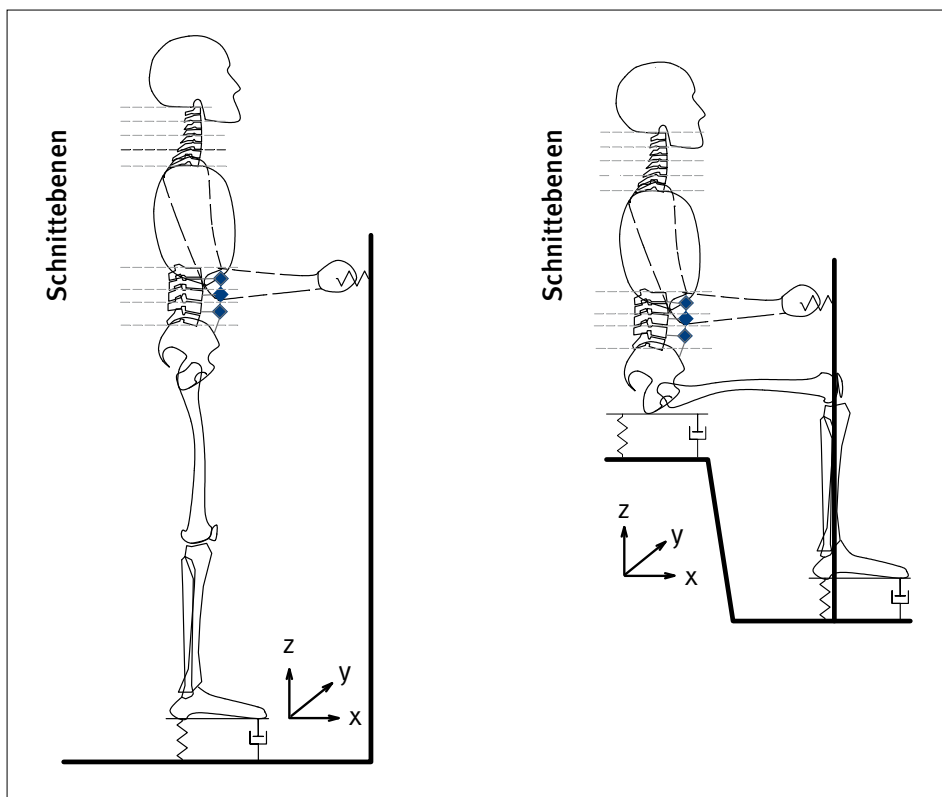
Werden Schwingungen in y-Richtung (quer zum Körper) vom Fahrzeugsitz auf den Rumpf übertragen, so ist es kaum möglich, durch veränderte Aktivierung der Rumpfmuskulatur

die Schwingungseigenschaften des Körpers an die Schwingungsbelastung anzupassen. Auf die Schwingungsbelastungen in y-Richtung reagiert der Körper mit deutlicher Beugung des Rumpfes zur Seite. Die Seitwärtsbeugungen sind mit schwingungsinduzierten

Scherkräften in den Bewegungssegmenten verbunden. Auch diese Scherkräfte wurden mit dem biomechanischen Modell für das Bewegungssegment L3-L4 simuliert.

Abbildung 7:

Biomechanisches Modell in stehender und sitzender Körperhaltung, schematische Darstellung des Skeletts von Rumpf, Hals, Kopf und Beinen sowie der Arme und der Baueingeweide (blaue Rauten), die gestrichelten Linien deuten die neun Schnittebenen zwischen den starren Körpern der Wirbelsäule an [27]



3.2 Übertragungsfunktion und Bewertungsfaktoren

Mit einer Übertragungsfunktion wird das Verhältnis zwischen dem Eingangssignal eines Systems und seinem Ausgangssignal bzw. seiner Reaktion beschrieben. Obwohl Ein- und Ausgangssignal im Zeitbereich gemessen oder mit dem Modell simuliert werden, wird die Übertragungsfunktion wegen der besseren Übersichtlichkeit im Frequenzbereich dargestellt. Übertragungsfunktionen sind komplexe Funktionen und werden in Diagrammen durch den von der Frequenz abhängigen Betrag und die Phasenverschiebung dargestellt. Bei den z. B. auch in VDI 2057, Blatt 1 [9] beschriebenen Verfahren zur Ermittlung der Schwingungskennwerte wird mit Effektivwerten und energieäquivalenten Mittelwerten gerechnet. Dies hat den Vorteil, dass dann die Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Frequenzanteilen bei den Berechnungen nicht berücksichtigt werden müssen.

Zur Herleitung der kraftbezogenen Bewertungsfaktoren wurden die Übertragungsfunktionen zwischen den oben beschriebenen Kräften und den zugehörigen Sitzbeschleunigungen ermittelt. Wie beim Menschen ist auch im Modell die Höhe der Kräfte abhängig von der Masse der Körpersegmente, auf die über die Wirbelsäule die Schwingungen übertragen werden. Um von den mitschwingenden Massen unabhängig zu sein, ist es sinnvoll, die simulierten Kräfte durch eine Bezugsmasse zu dividieren und damit zu normieren. Die Bezugsmasse ist die Summe der Massen von Rumpf, Hals, Kopf und Armen und entspricht somit der Masse, die vom Sitz abgestützt wird. Durch die Division erhält man eine dimensionslose Größe, die

nur noch von der Schwingfrequenz abhängig ist. Die Frequenzabhängigkeit der Größe kann durch eine entsprechende Bewertungsfunktion beschrieben werden. Diese sogenannte kraftbezogene Bewertungsfunktion kann analog zu den Bewertungsfunktionen in VDI 2057, Blatt 1 [9] zur Bewertung der Schwingungsbelastung herangezogen werden und ergibt eine kraftbezogene Schwingungskenngröße für die aufrecht sitzende Körperhaltung.

In der GKV-Studie wurde zur Beschreibung der Schwingungsbelastung die Bewertete Schwingstärke in den drei Schwingungsrichtungen ermittelt. Um eine kraftbezogene Bewertung dieser Schwingungen zu ermöglichen, muss zunächst ein Zusammenhang zwischen beiden Bewertungen hergeleitet werden, wie dies auch von *Fritz et al.* [28] beschrieben wurde. Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA; vormals: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BGIA) stellte für die Herleitung des Zusammenhangs 200 Frequenzspektren in y-Richtung und 224 Spektren in z-Richtung zur Verfügung. Für diese Spektren wurden sowohl die Bewerteten Schwingstärken gemäß VDI 2057 [29; 30] als auch die kraftbezogenen Schwingungskenngrößen berechnet. Die Verhältnisse zwischen beiden Kenngrößen wurden in Abhängigkeit von der Medianfrequenz der vermessenen Fahrzeuge durch Regressionsfunktionen angenähert.

3.3 Reanalyse der Daten der GKV-Studie

Die im Rahmen der GKV-Studie, die als Längsschnittstudie zur Auswirkung von Ganzkörper-Schwingungen angelegt war,

ermittelten Daten wurden einer Reanalyse unterzogen. Im Zeitraum von 1990 bis 1996 wurden für insgesamt 388 schwingungsbelastete Personen unter anderem folgende Daten erhoben:

- energieäquivalente Mittelwerte der Bewerteten Schwingstärke in horizontaler und vertikaler Richtung für jedes genutzte Fahrzeug
- Dauer des Berufslebens für jede exponierte Person
- Anzahl und Dauer der Tätigkeitsabschnitte mit gleichbleibender Schwingungsbelastung
- Tätigkeitsabschnitte mit alternierender Nutzung mehrerer Fahrzeuge
- tägliche Dauer der Schwingungsbelastung
- klinische und röntgenologische Daten mit dem Schwerpunkt „Lumbalsyndrom“, aufgliedert nach „lokalem Lumbalsyndrom“ und „lumbalen Wurzelsyndrom“.

Für die Umrechnung der in der GKV-Studie erhobenen Werte der Bewerteten Schwingstärke in die kraftbezogenen Kenngrößen war es notwendig, für jeden in den Tätigkeitsabschnitten genutzten Gerätetyp eine typische Medianfrequenz zu ermitteln. In der Voruntersuchung haben *Fritz et al.* [28] die Frequenzspektren der unbewerteten spektralen Leistungsdichte von 224 Fahrzeugen und Maschinen ausgewertet und die Medianfrequenzen berechnet. Diese Fahrzeuge und Maschinen gehörten jedoch nur zu 18 verschiedenen Gerätetypen. Bei der GKV-Studie wurden dagegen

Schwingungsdaten von Fahrzeugen aus 27 Gerätetypen ermittelt.

Die ursprünglichen Daten zur Schwingungsbelastung in der GKV-Studie wurden in der Zwischenzeit ergänzt durch Daten der frequenzbewerteten Beschleunigung. Die Umrechnungen erfolgten anhand von Vergleichsmessungen, die das IFA durchführte. Aus dem Verhältnis zwischen der Bewerteten Schwingstärke und der frequenzbewerteten Beschleunigung ließ sich mithilfe der von *Fritz et al.* [28] berechneten exponentiellen Regressionsfunktionen für jedes Fahrzeug eine Medianfrequenz herleiten.

Wurden nun alle ermittelten Medianfrequenzen miteinander und mit Angaben in der Literatur, z. B. [31], verglichen, so konnte nahezu für jeden vorkommenden Gerätetyp eine typische Medianfrequenz festgelegt werden. Mit diesen Medianfrequenzen und der entsprechenden Regressionsfunktion von *Fritz et al.* [28] wurden dann die Bewerteten Schwingstärken für die z-Richtung in kraftbezogene Schwingungskenngrößen umgerechnet.

Für einige Fahrzeuge, so z. B. für Muldenkipper oder Radlader, wurden in der GKV-Studie mehrere unterschiedliche Werte der Bewerteten Beschleunigung ermittelt. Da sich auch unter erschwerten Einsatzbedingungen die Frequenzcharakteristik der Schwingungsbelastung kaum verändert, wurde jedem Fahrzeug nur eine Medianfrequenz zugeordnet. Somit gab es für jedes Fahrzeug auch nur einen Umrechnungsfaktor, mit dem die gemessene Bewertete Schwingstärke in einen kraftbezogenen Wert umgerechnet wurde. Wurden während eines Berufsabschnittes alternierend mehrere Fahrzeuge

genutzt, so wurde aus den Umrechnungsfaktoren der jeweiligen Fahrzeuge unter Berücksichtigung der anteiligen täglichen Expositionszeiten ein Gesamtumrechnungsfaktor berechnet.

Schwieriger gestaltete sich die Umrechnung der Belastungswerte für die horizontale y-Richtung. Wie in Kapitel 4 gezeigt wird, scheinen in dieser Schwingungsrichtung die Verhältnisse zwischen der Bewerteten Schwingstärke und der kraftbezogenen Kenngröße nicht von der Medianfrequenz der Fahrzeuge abhängig zu sein. In der Zwischenzeit waren, wie schon erwähnt, die Bewerteten Schwingstärken in frequenzbewertete Beschleunigungen gemäß [9] umgerechnet worden. Unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen diesen beiden Größen konnte auch die kraftbezogene Schwingungskenngröße für die einzelnen Tätigkeitsabschnitte durch einen Vergleich der beiden Verhältnisse

- frequenzbewertete Beschleunigung/
Bewertete Schwingstärke
- kraftbezogene Schwingungskenngröße/
frequenzbewertete Beschleunigung,

berechnet für die 200 Frequenzspektren in y-Richtung, ermittelt werden.

Zur einheitlichen Beurteilung der Schwingungsbelastungen werden gemäß [9] individuelle Expositionszeiten energieäquivalent auf eine tägliche Belastungsdauer von 8 h umgerechnet.

In gleicher Weise wurden unter Anwendung der Gleichung 4 in VDI 2057, Blatt 1 aus den kraftbezogenen Schwingungskenngrößen

a_{Fz} kraftbezogene Beurteilungsgrößen $a_{Fz(8)}$ berechnet:

$$a_{Fz(8)} = a_{Fz(8)} \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} \quad (1)$$

Die 388 Fahrer waren bis auf wenige Ausnahmen jeweils in mehreren Tätigkeitsabschnitten unterschiedlich intensiven Schwingungsbelastungen ausgesetzt. Soll nun für jeden Fahrer ein typischer Wert für die Höhe der Schwingungsbelastung angegeben werden, so kann dies durch Ermittlung der durchschnittlichen Schwingungsbelastung oder der maximalen Schwingungsbelastung geschehen. Die Ermittlung der durchschnittlichen Schwingungsbelastung hat jedoch den Nachteil, dass sich der Durchschnittswert – zum Beispiel durch den Wechsel von einem Fahrzeug mit hoher Schwingungsbelastung zu einem Fahrzeug mit geringerer Belastung – in Abhängigkeit vom zeitlichen Verhältnis der Tätigkeitsabschnitte verringert. Deshalb wurde bei der Auswertung zunächst für jeden Fahrer nur der Tätigkeitsabschnitt mit der maximalen Schwingungsbelastung berücksichtigt. Die Ermittlung der maximalen Schwingungsbelastung wurde getrennt für die Tätigkeitsabschnitte vor der Erstuntersuchung sowie für die Abschnitte zwischen den beiden Untersuchungen, also für einen Zwischenzeitraum von vier bis fünf Jahren, durchgeführt.

Treten Ganzkörper-Schwingungen berufsbedingt auf, so geschieht dies in der Regel nicht nur an einem Tag, sondern an mehreren Tagen und über mehrere Berufsjahre. Die einwirkende Schwingungsbelastung kann dann durch die Gesamtdosis ausgedrückt werden. In Anlehnung an *Dupuis*

sowie *Dupuis* und *Hartung* [32; 33] kann der kraftbezogene Dosiswert nach Gleichung (2) berechnet werden:

$$D_V = \sum_{i=1}^n a_{Fz(8)}^2 \cdot d_i \quad (2)$$

Hierbei ist $a_{Fz(8)}$ die kraftbezogene Beurteilungsgröße und d_i die Anzahl der Expositionstage in den einzelnen Tätigkeitsabschnitten. Eine Variation bei der Berechnung der Gesamtdosis ist gegeben, indem nur die Tage berücksichtigt werden, an denen die Beurteilungsgröße einen vorgegebenen Schwellenwert überschritten hat.

4 Ergebnisse

Für die GKV-Studie wurden Daten zur Höhe und zur Dauer der individuellen Schwingungsbelastungen sowie klinische und röntgenologische Daten zum Gesundheitsstatus von 388 Fahrer erhoben. Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden die Bewerteten Schwingstärken in kraftbezogene Schwingungskenngrößen umgerechnet. Hierbei wurde zunächst nur die vertikale Kraft im Bewegungssegment L3-L4 berücksichtigt.

4.1 Berechnung von kraftbezogenen Schwingungskennwerten

Die Berechnung kraftbezogener Schwingungskennwerte wurde in der vertikalen Schwingungsrichtung auf das Bewegungssegment L5-S1 sowie auf Schwingungsbelastungen in der horizontalen y-Richtung erweitert. Für beide Schwingungskenngrößen wurden auch Regressionsfunktionen zur Berechnung der Kennwerte aus der Bewerteten Schwingstärke hergeleitet.

4.1.1 z-Richtung, Bewegungssegment L5-S1

Abbildung 8 zeigt die Bewertungsfunktion für das Bewegungssegment L5-S1 bei vertikaler Schwingungsbelastung. Zum Vergleich ist auch die von Fritz et al. [23; 24] ermittelte Funktion für das Bewegungssegment L3-L4 eingezeichnet. Die Bewertungsfaktoren für das Bewegungssegment L5-S1 sind im gesamten betrachteten Frequenzbereich größer als die Faktoren für das Bewegungssegment L3-L4. Der maximale Faktor beträgt 1,3 und wird bei der Resonanzfrequenz des

menschlichen Körpers von 4 Hz erreicht. Dies führt zu einer Verstärkung der entsprechenden Schwingungsanteile. Im Bereich zwischen 5,5 und 7,5 Hz ist annähernd ein Plateau angedeutet, was auf eine weitere Resonanzfrequenz hinweist. Für höhere Frequenzen sind die Faktoren für beide Bewegungssegmente nahezu gleich und $< 0,1$.

Die 224 Frequenzspektren für die vertikale Schwingungsrichtung wurden sowohl gemäß VDI 2057, Blatt 1 [9] als auch gemäß VDI 2057, Blatt 2 [29] und mit den obigen Faktoren bewertet [28]. In der GKV-Studie war die Belastungshöhe durch die Bewertete Schwingstärke bzw. die Beurteilungsschwingstärke gegeben. Deshalb sind in Abbildung 9 die Verhältnisse zwischen der Bewerteten Schwingstärke und der kraftbezogenen Kenngröße für das Bewegungssegment L5-S1 in Abhängigkeit von der Medianfrequenz dargestellt. Mit der Medianfrequenz werden die Schwingungseigenschaften bezüglich der Schwingfrequenzen der vermessenen Fahrzeuge charakterisiert. Anhand der Regressionsfunktion ist zu erkennen, dass mit zunehmender Medianfrequenz im Bereich niedriger Frequenzen die Verhältnisse schneller kleiner werden als bei hohen Frequenzwerten. Mit zunehmender Frequenz nähert sich die Regressionsfunktion dem Wert 0,8. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Medianfrequenz die Schwingungen durch die kraftbezogene Kenngröße weniger hoch bewertet werden als durch die Bewertete Schwingstärke. Fahrzeuge mit tiefen Schwingfrequenzen erhalten dagegen hohe kraftbezogene Schwingungskennwerte.

Abbildung 8:
Kraftbezogene
Bewertungsfaktoren
in Abhängigkeit von
der Schwingfrequenz,
abgeleitet aus der
schwingungsinduzierten
vertikalen Kraft im
Bewegungssegment
L5-S1 (durchgezogene
schwarze Linie),
Bewegungssegment
L3-L4 (gestrichelte
Linie), zum Vergleich:
Bewertungsfaktoren
nach VDI 2057, Blatt 1
(2002) (blaue Linie)

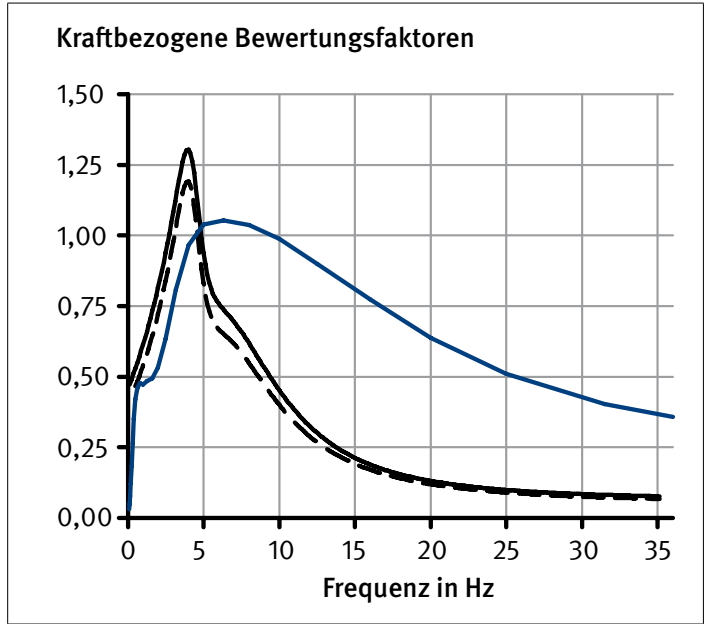
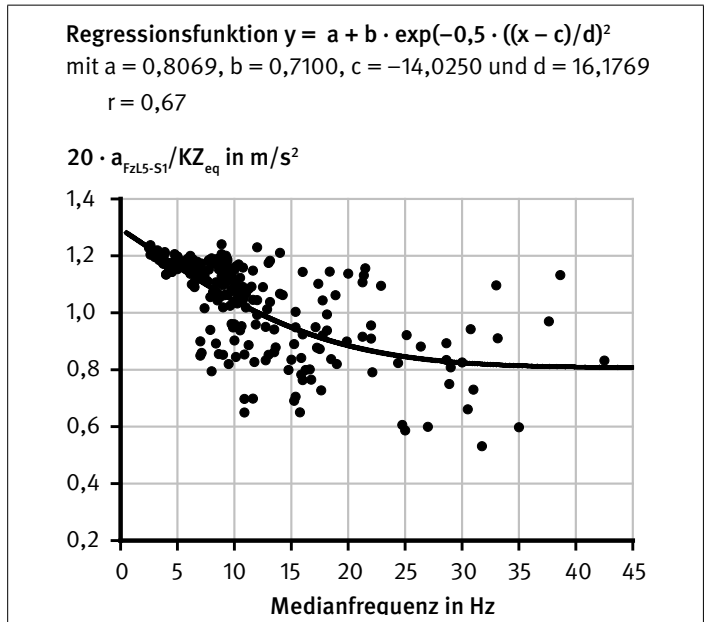


Abbildung 9:
Verhältnisse zwischen
den kraftbezogenen
Schwingungskennwerten
für das Bewegungs-
segment L5-S1 und der
Bewerteten Schwing-
stärke (normiert mittels
Division durch 20) sowie
die Regressionsfunktion

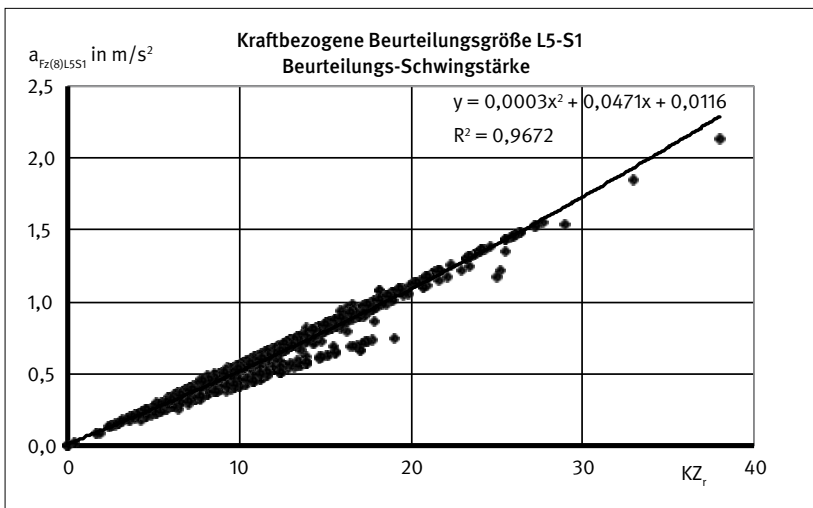
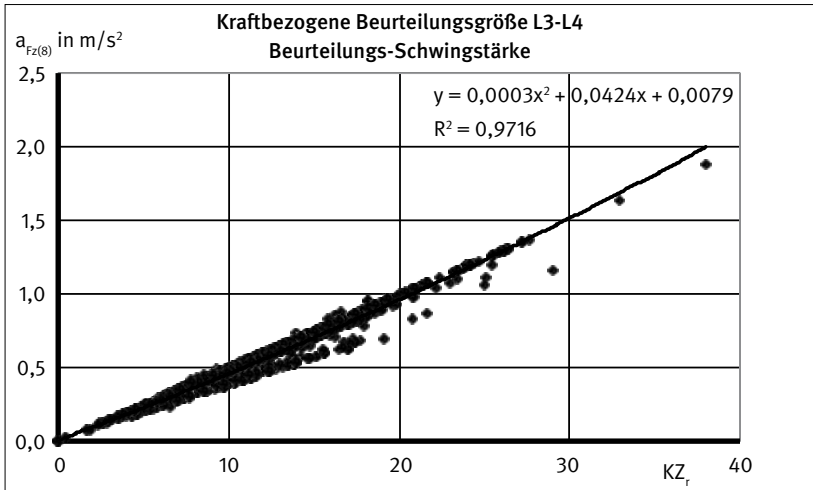


In Abbildung 10 sind die für die 1477 Tätigkeitsabschnitte berechneten kraftbezogenen Beurteilungskennwerte über die Beurteilungsschwingstärke aufgetragen. Für die

Mehrzahl der Tätigkeitsabschnitte ergibt sich ein Verhältnis zwischen den beiden Beurteilungswerten, das größer ist als 1 : 20.

Abbildung 10:

Zusammenhang zwischen der Beurteilungsschwingstärke in den 1477 Tätigkeitsabschnitten und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment L3-L4 (oben) und das Bewegungssegment L5-S1 (unten)



Werden die Werte der Schwingstärke durch den Faktor 20 in Beschleunigungswerte umgerechnet (siehe Seite 3 in VDI 2057, Blatt 2 von 1987), so sind die Verhältnisse größer als 1 : 1. Verglichen mit Abbildung 9 deuten die Verhältnisse sowie die Regressionsfunktion für das Bewegungssegment L5-S1 darauf hin, dass die Medianfrequenz der in den Tätigkeitsabschnitten überwiegend eingesetzten Fahrzeuge unterhalb von 12 Hz lag.

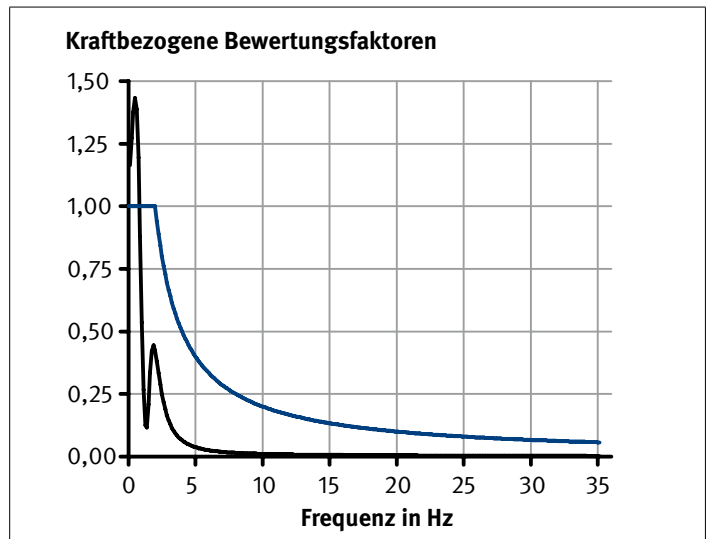
4.1.2 Horizontale Schwingungsbelastung, y-Richtung

In Abbildung 11 ist die Funktion der kraftbezogenen Bewertungsfaktoren für das Bewegungssegment L3-L4 bei horizontaler Schwingungsbelastung in y-Richtung dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Bewertungsfunktion gemäß VDI 2057, Blatt 2 [29] eingezeichnet. Die Bewertungsfaktoren erreichen zwei relative Spitzenwerte im Bereich tiefer Frequenzen. Oberhalb von

6 Hz sind die Faktoren nahezu gleich null. In diesem Frequenzbereich treten kaum noch schwingungsinduzierte Scherkräfte in der Wirbelsäule auf. Wie an der blauen Linie zu erkennen ist, werden Schwingungen fast im gesamten Frequenzbereich durch die Bewertungsfaktoren gemäß der VDI-Richtlinie höher bewertet als durch die kraftbezogenen Faktoren.

Auch für die y-Richtung wurden 200 Frequenzspektren nach VDI 2057, Blatt 2 [29] und mit den obigen Faktoren bewertet. Abbildung 12 zeigt die Verhältnisse zwischen den beiden Kenngrößen in Abhängigkeit von der Medianfrequenz. Mit der Medianfrequenz werden die Schwingungseigenschaften in y-Richtung der Fahrzeuge charakterisiert. Anhand der eingezeichneten Regressionsfunktion ist zu erkennen, dass mit zunehmender Medianfrequenz keine Abhängigkeit der Verhältnisse der beiden Kenngrößen von der Frequenz besteht.

Abbildung 11: Kraftbezogene Bewertungsfaktoren in Abhängigkeit von der Schwingfrequenz, abgeleitet aus der schwingungsinduzierten horizontalen Kraft (y-Richtung) im Bewegungssegment L3-L4 (schwarze Kurve) und zum Vergleich: Bewertungsfaktoren nach VDI 2057, Blatt 2 [29] (blaue Kurve)



Die Umrechnung der Bewerteten Schwingstärken in kraftbezogene Schwingungskennwerte erfolgte für alle 1477 Tätigkeitsabschnitte. Wegen der geringen Frequenzabhängigkeit der Kenngrößenverhältnisse (Abbildung 12) erfolgte die Umrechnung anhand der zuvor ermittelten frequenzbewerteten Beschleunigungen. Abbildung 13

zeigt, dass ein gering nicht linearer Zusammenhang zwischen den beiden Kenngrößen in y-Richtung besteht. Tendenziell steigt mit zunehmender Bewerteter Schwingstärke der kraftbezogene Schwingungskennwert etwas stärker an. Die Streuung der Wertepaare aus beiden Kenngrößen ist wesentlich größer als für die vertikale z-Richtung.

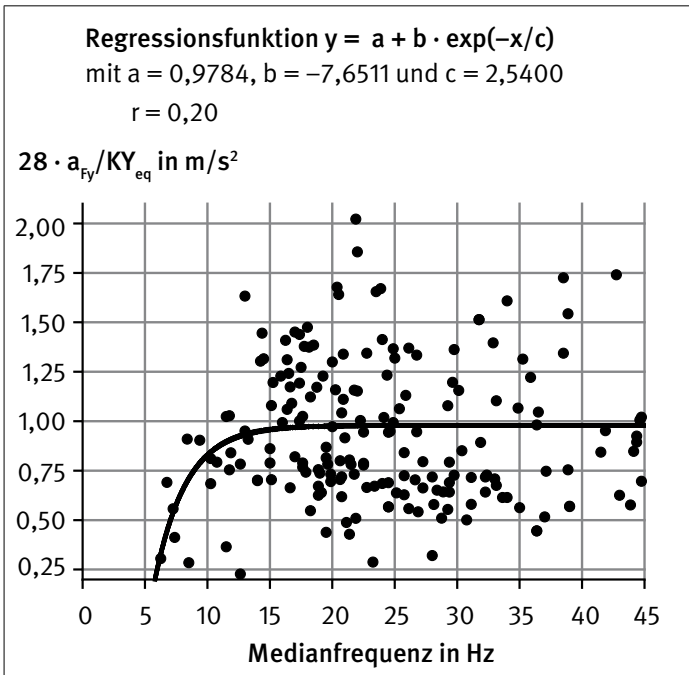
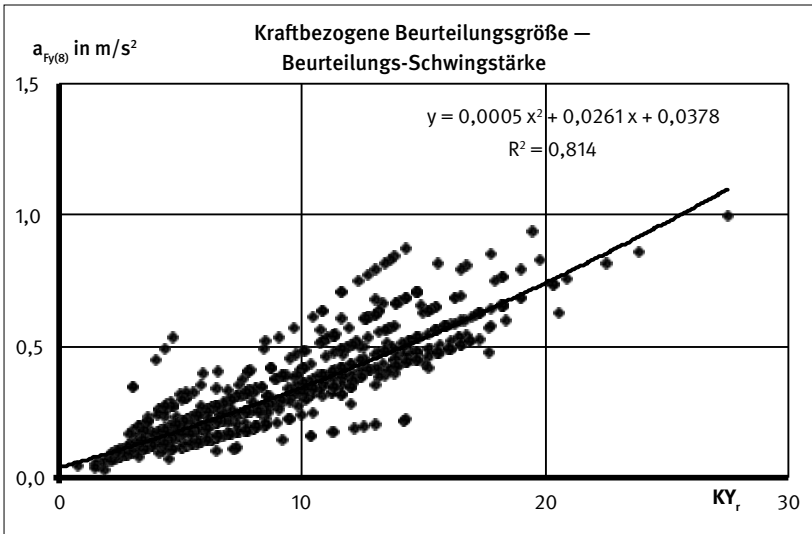


Abbildung 12: Verhältnisse zwischen den kraftbezogenen Schwingungskennwerten für das Bewegungssegment L3-L4 und der Bewerteten Schwingstärke (normiert durch Multiplikation mit 28 für die y-Richtung) sowie die Regressionsfunktion

Abbildung 13:

Zusammenhang zwischen der Beurteilungs-Schwingstärke in den 1477 Tätigkeitsabschnitten und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment L3-L4 in y-Richtung



4.2 Kraftbezogene Schwingungskennwerte in den Tätigkeitsabschnitten

In Abbildung 14 ist die Verteilung der kraftbezogenen Beurteilungsgröße des Bewegungssegmentes L5-S1 für die 1477 Tätigkeitsabschnitte in Quartilen dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Verteilung der Beurteilungs-Schwingstärke dargestellt. Während bei der Beurteilungs-Schwingstärke die ermittelten Werte zwischen 0,4 und 38,0 betragen, lagen sie bei der kraftbezogenen Beurteilungsgröße zwischen 0,02 und 2,13 m/s^2 .

Berücksichtigt man einen Umrechnungsfaktor von 20, so ist der Wertebereich der kraftbezogenen Beurteilungsgröße größer als der Bereich der Beurteilungs-Schwingstärke, wie

es auch in Abbildung 10 (unten) bei Berücksichtigung des Multiplikationsfaktors von 20 zu erkennen ist.

Der Vergleich zwischen den Werten der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen der Bewegungssegmente L3-L4 und L5-S1 zeigt einen geringen Unterschied zwischen einander entsprechenden Werten (Abbildung 15). Die Werte für das Bewegungssegment L5-S1 sind ungefähr 10 % größer als die Werte für das Bewegungssegment L3-L4. Der Medianwert liegt für beide Bewegungssegmente im unteren Viertel des ermittelten Wertebereiches.

In Abbildung 16 ist die Verteilung der maximalen kraftbezogenen Beurteilungsgrößen dargestellt, die für jeden der 388 Fahrer jeweils als maximale Schwingungsbelastung ermittelt wurden.

Die Werte betragen zwischen 0,12 und 1,88 m/s^2 für das Bewegungssegment L3-L4 bzw. 0,13 und 2,13 m/s^2 für das Bewegungssegment L5-S1.

Die Werte der Beurteilungs-Schwingstärke für die horizontale y-Richtung sind deutlich niedriger als die Werte in vertikaler z-Richtung (Abbildung 14 und 17). Das gleiche Verhältnis gilt auch für die kraftbezogene Beurteilungsgröße.

Abbildung 14:
Boxplot der Beurteilungs-Schwingstärke (links) und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße des Bewegungssegmentes L5-S1 (rechts) für die 1 477 Tätigkeitsabschnitte

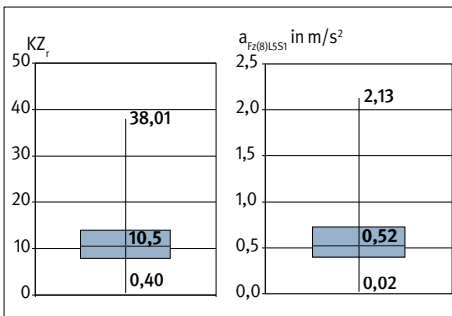
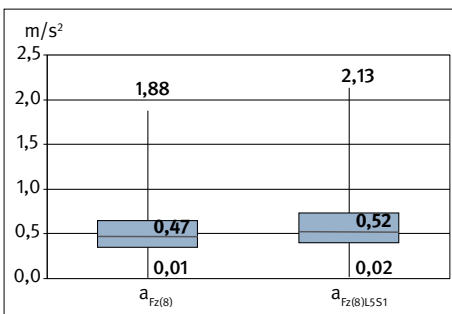


Abbildung 15:
Boxplot der kraftbezogenen Beurteilungsgröße der Bewegungssegmente L3-L4 (links) und L5-S1 (rechts) für die 1477 Tätigkeitsabschnitte



Vergleicht man die beiden Beurteilungsgrößen für die horizontale y-Richtung miteinander, so zeigt sich, dass unter Berücksichtigung eines Umrechnungsfaktors von 28, wie er in VDI 2057, Blatt 2 [29] enthalten ist, die Wertebereiche beider Beurteilungsgrößen annähernd die gleiche Ausprägung haben (Abbildung 17).

Abbildung 16:
Boxplot der Maximalwerte der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen für die 388 Fahrer, Bewegungssegment L3-L4 (links) und Bewegungssegment L5-S1 (rechts)

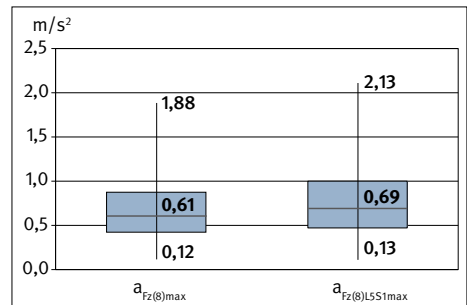
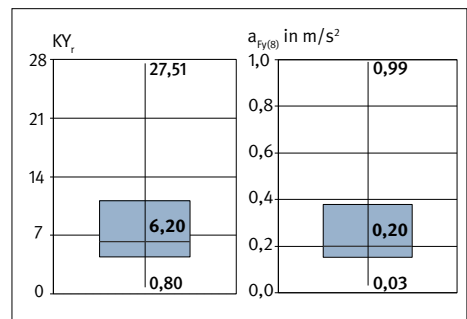
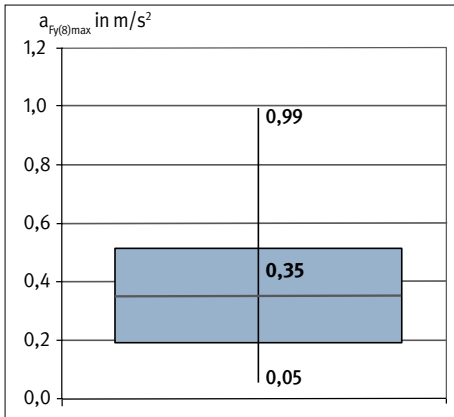


Abbildung 17:
Boxplot der Beurteilungs-Schwingstärke (links) und der kraftbezogenen Beurteilungsgröße in der horizontalen y-Richtung (rechts) für die 1477 Tätigkeitsabschnitte



Bei der Verteilung der Werte der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen für die Tätigkeitsabschnitte mit maximaler horizontaler Schwingungsbelastung liegen 50 % der Werte unterhalb von ca. $0,35 \text{ m/s}^2$ (Abbildung 18). Die entsprechenden Medianwerte für die vertikale Schwingungsbelastung liegen bei $0,61$ und $0,69 \text{ m/s}^2$ (Abbildung 16). Diese Werte sind damit 1,75- bzw. 1,97-mal so groß wie der Medianwert für die y-Richtung. Auch bei Berücksichtigung des in VDI 2057, Blatt 1 [9] erwähnten Korrekturfaktors von $k = 1,4$ sind die Medianwerte für die vertikale Schwingungsrichtung größer als die Werte für die horizontale Richtung.

Abbildung 18: Boxplot der Maximalwerte der kraftbezogenen Beurteilungsgröße in horizontaler y-Richtung für die 388 Fahrer

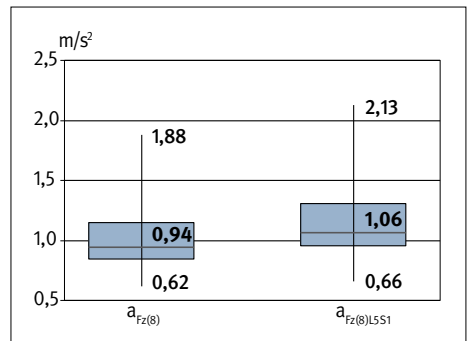


4.3 Kraftbezogene Schwellenwerte

Werden aus den 1477 Tätigkeitsabschnitten alle Abschnitte ausgewählt, in denen die Beurteilungs-Schwingstärke den Wert $KZ_r = 16,2$ überschreitet, also nach VDI 2057 [29; 30] ein Gesundheitsrisiko besteht, so

ergeben sich für die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen der beiden betrachteten Bewegungssegmente die in Abbildung 19 dargestellten Verteilungen der Kennwerte. Sollen nun mindestens all die Tätigkeitsabschnitte mit einer gefährdenden Schwingungsbelastung auch mittels der kraftbezogenen Beurteilungsgröße erkannt werden, so müssten die entsprechenden Kennwerte $a_{Fz(8)} = 0,62 \text{ m/s}^2$ bzw. $a_{Fz(8)L5-S1} = 0,66 \text{ m/s}^2$ sein.

Abbildung 19: Boxplot der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen für die 250 Tätigkeitsabschnitte mit $KZ_r > 16,2$



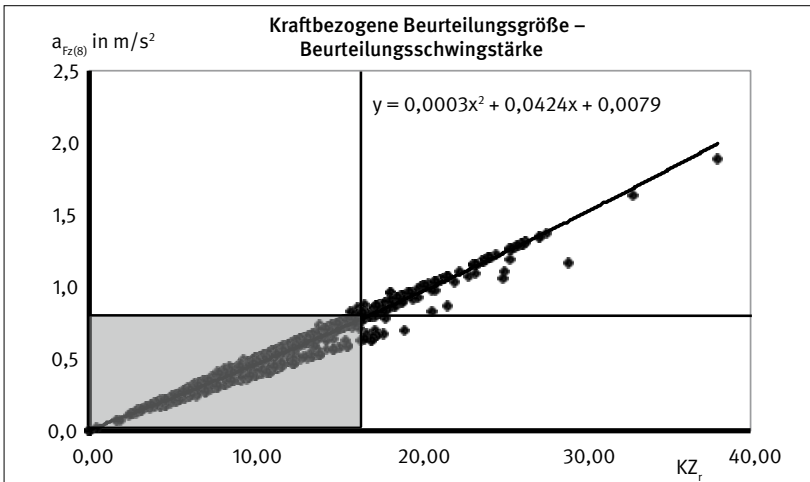
Wird andererseits angenommen, dass mittels des Schwellenwertes der Beurteilungs-Schwingstärke nur eine Abschätzung des relativen Risikos und damit der Anzahl der Tätigkeitsabschnitte mit einem Gesundheitsrisiko möglich ist, so müssten auch durch die kraftbezogene Beurteilungsgröße 250 Tätigkeitsabschnitte als gesundheitsgefährdend eingestuft werden. Wie schon in Kapitel 2 erwähnt, müsste dann der Schwellenwert für das Bewegungssegment L3-L4 $a_{Fz(8)} = 0,77 \text{ m/s}^2$ betragen. Dieser kraftbezogene Schwellenwert wird dann auch in 16 von 250 Tätigkeitsabschnitten überschritten, in denen der Schwellenwert

der Beurteilungs-Schwingstärke noch nicht überschritten wird (Abbildung 6). Diese Tätigkeitsabschnitte entfallen primär auf die Fahrer von Erdbaumaschinen.

Anhand der Tätigkeitsabschnitte, in denen entweder nur der Schwellenwert der Beurteilungs-Schwingstärke oder nur der obige Schwellenwert der kraftbezogenen Beurteilungsgröße überschritten ist, wird deutlich,

dass zwischen beiden Größen nicht ein einfacher linearer Zusammenhang besteht. Vielmehr ist das Verhältnis zwischen beiden Größen abhängig von den Schwingungseigenschaften des Fahrzeuges. Dies wird auch deutlich in Abbildung 20. Durch die mit den Fahrzeugen verbundene Varianz der Verhältnisse werden nicht in jedem der 50 Tätigkeitsabschnitte die Schwellenwerte von beiden Beurteilungsgrößen überschritten.

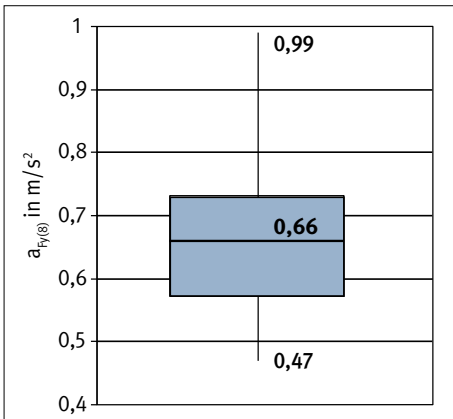
Abbildung 20:
Zusammenhang zwischen der Beurteilungs-Schwingstärke und der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen; grau dargestellt ist der Bereich, in dem $KZ_r < 16,2$ und $a_{Fz(8)} < 0,77 \text{ m/s}^2$ ist



Soll auch durch die kraftbezogene Beurteilungsgröße des Bewegungssegmentes L5-S1 für 250 Tätigkeitsabschnitte eine mögliche Gesundheitsgefährdung angezeigt werden, so müsste der entsprechende Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,87 \text{ m/s}^2$ betragen. Wie bei der vertikalen Schwingungsbelastung können auch für die horizontale Schwingungsbelastung in y-Richtung die Tätigkeitsabschnitte ermittelt werden, in denen die Beurteilungsschwingstärke von $KY_r = 16,2$ überschritten

wird. Dies ist in 53 Tätigkeitsabschnitten der Fall. Für diese Tätigkeitsabschnitte ist die Verteilung der Werte der kraftbezogenen Beurteilungsgröße in Abbildung 21 dargestellt. Wird durch die beiden Beurteilungsgrößen wiederum nur die gleiche Anzahl an Tätigkeitsabschnitten als risikobehaftet eingestuft, so muss der kraftbezogene Schwellenwert $a_{Fy(8)} > 0,66 \text{ m/s}^2$ betragen.

Abbildung 21:
Boxplot der kraftbezogenen Beurteilungsgröße für die Tätigkeitsabschnitte mit $KY_r > 16,2$ bei horizontaler Schwingungsbelastung in y-Richtung



4.4 Vergleich der Kennwerte zur Schwingungsbelastung

Die im Rahmen der GKV-Studie erhobenen Werte der Bewerteten Schwingstärke rechnete der Projektpartner des Teilprojektes A unter anderem in die folgenden in den Richtlinien und Verordnungen gegebenen Belastungskennwerte um:

- $a_{wx(8)}$ Beurteilungsbeschleunigung in x-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 [9]
- $a_{wy(8)}$ Beurteilungsbeschleunigung in y-Richtung
- $a_{wz(8)}$ Beurteilungsbeschleunigung in z-Richtung
- A(8) Tagesexposition nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [8]

In Abbildung 22 sind exemplarisch für die z-Richtung die berechneten Beurteilungsbeschleunigungen über die Beurteilungs-Schwingstärke aufgetragen. Es ist die Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmenden Werten der Beurteilungs-Schwingstärke das Verhältnis zwischen einander entsprechenden Schwingungswerten kleiner als 1 : 20 ist. Dies ist gegenläufig zu der Tendenz, die in Abbildung 10 zu erkennen ist. Geht man nun davon aus, dass Fahrzeuge mit hohen Schwingungsbelastungen überwiegend Schwingungen mit tiefen Frequenzen erzeugen, so wird anhand dieser beiden entgegengesetzten Tendenzen die unterschiedliche Bewertung von tiefen und hohen Frequenzen durch die kraftbezogenen Faktoren sowie die Bewertungsfaktoren gemäß [9] deutlich (siehe auch Abbildung 8).

Die vom Projektpartner durchgeführten logistischen Regressionsanalysen zeigen, dass – abgesehen vom Alter der Fahrer – von den ausgewerteten Tages-Schwingungsbelastungskennwerten jeweils der maximale Wert aus der lebenslangen Arbeitsanamnese der aussagekräftigste Prädiktor für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ ist. Die Maximalwerte der Schwingungskenngrößen wurden für diejenigen Fahrer weiter ausgewertet, die frühestens nach Ablauf ihres ersten Expositionsjahres erstmals Rückenbeschwerden hatten. Von den zuvor genannten 388 Fahrern erfüllten 315 dieses Kriterium [5]. Berechnet wurden die Korrelationen zwischen diesen Maximalwerten und den Maximalwerten der kraftbezogenen Schwingungskenngrößen.

In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass die beste Übereinstimmung zwischen den obigen Schwingungskenngrößen mit 0,0961 bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ und der

Tagesexposition $A(8)$ gegeben ist. Dieser enge Zusammenhang ist nicht verwunderlich, da die Tagesexposition gebildet wird durch den höchsten Wert der

frequenzbewerteten Beschleunigungen in den drei orthogonalen Richtungen, wobei die horizontalen Richtungen mit dem Faktor 1,4 korrigiert werden.

Abbildung 22:

Zusammenhang zwischen der Beurteilungs-Schwingstärke in den 1477 Tätigkeitsabschnitten und der Beurteilungsbeschleunigung für die vertikale z-Richtung

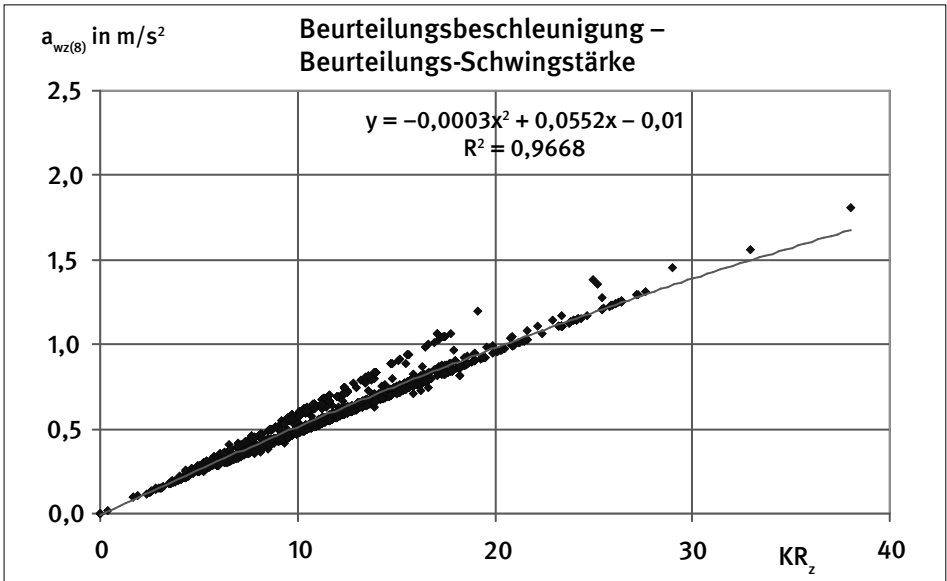


Tabelle 1:

Korrelation zwischen den maximalen Werten der Beurteilungsgrößen ($n = 315$ Fahrer)

¹⁾ normgemäße Größen, ²⁾ kraftbezogene Größen, Korrelationen $> 0,9$ sind fett gedruckt

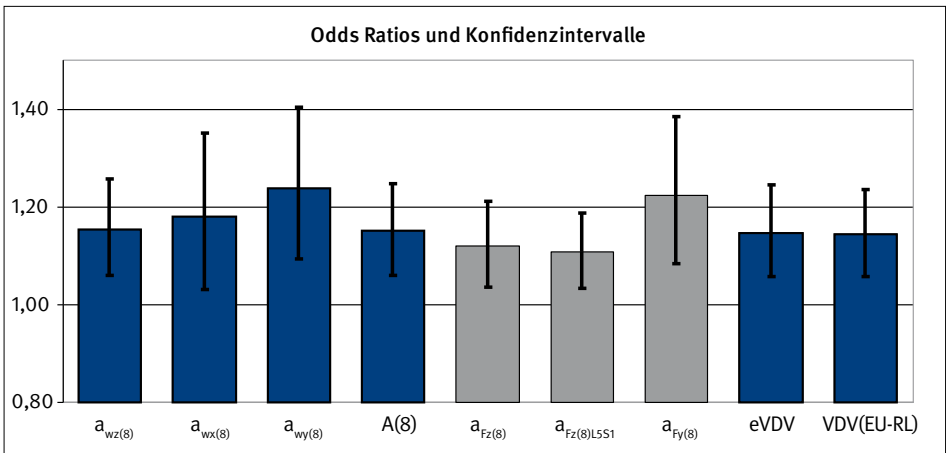
Maximale Schwingungskennwerte							
	$a_{wx(8)}^{1)}$	$a_{wy(8)}^{1)}$	$a_{wz(8)}^{1)}$	$A(8)^{1)}$	$a_{Fz(8)}^{2)}$	$a_{Fz(8)l5-51}^{2)}$	$a_{Fy(8)}^{2)}$
$a_{wx(8)}^{1)}$	1,0	0,846	0,746	0,843	0,745	0,739	0,800
$a_{wy(8)}^{1)}$		1,0	0,749	0,853	0,759	0,756	0,937
$a_{wz(8)}^{1)}$			1,0	0,961	0,956	0,955	0,755
$A(8)^{1)}$				1,0	0,933	0,931	0,833
$a_{Fz(8)}^{2)}$					1,0	0,998	0,791
$a_{Fz(8)l5-51}^{2)}$						1,0	0,785
$a_{Fy(8)}^{2)}$							1,0

Dennoch ist bei Messungen im Feld die Schwingungsbelastung in vertikaler z-Richtung häufig die höchste Belastung.

Bei den kraftbezogenen Schwingungskenngrößen besteht ein enger Zusammenhang zwischen den beiden Größen für die vertikale Schwingungsrichtung. Geht man von den beiden Bewertungsfunktionen in Abbildung 8 aus, so war dieser Zusammenhang zu erwarten. Es ist aber ein geringer Unterschied zwischen beiden Kenngrößen vorhanden, und es stellte sich die Frage, welche Größe eine bessere Abschätzung des Gesundheitsrisikos ermöglichen wird. Deutlich geringer ist die Übereinstimmung zwischen den beiden Schwingungskenngrößen in vertikaler Schwingungsrichtung und der in horizontaler y-Richtung. Sie entspricht annähernd der Übereinstimmung zwischen den entsprechenden Beurteilungsbeschleunigungen sowie der Tagesdosis.

Aufgrund der guten Korrelation zwischen den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen und den Beurteilungsgrößen gemäß der Richtlinie oder der Verordnung stellt sich die Frage, welche der Beurteilungsgrößen der aussagekräftigste Prädiktor für die Vorhersage der Chance zur Entstehung eines „Lumbalsyndroms“ ist. In Abbildung 23 sind die Odds Ratios der sieben Beurteilungsgrößen und die Konfidenzintervalle dargestellt. Die Odds Ratios wurden für einen Anstieg des Prädiktors um $0,1 \text{ m/s}^2$ berechnet. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass der beste Prädiktor die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ in y-Richtung ist, gefolgt von der Tagesdosis A(8) gemäß der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung [8]. Der Unterschied zwischen den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen und den Beurteilungsbeschleunigungen als Prädiktor ist gering, sodass für beide Arten der Beurteilungsgrößen eine gleich gute Vorhersage des Gesundheitsrisikos angenommen werden kann.

Abbildung 23: Vergleich verschiedener Beurteilungsgrößen als Prädiktor für die Erkrankung „Lumbalsyndrom“ anhand der Odds Ratios und Konfidenzintervalle



4.5 Altersabhängigkeit der kraftbezogenen Schwellenwerte

In Abbildung 24a ist zu erkennen, dass von den 54 neu erkrankten Personen die Hälfte, also 27 Personen, während der Tätigkeitsabschnitte vor der Erstuntersuchung einer maximalen Schwingungsbelastung bis zu $a_{Fz(8)} = 0,59 \text{ m/s}^2$ unterlagen. Zwischen den beiden Untersuchungen lag der Medianwert dann bei $a_{Fz(8)} = 0,55 \text{ m/s}^2$. Es ist also eine tendenzielle Abnahme der maximalen Schwingungsbelastung nach der Erstuntersuchung erfolgt. Der Grund für diese Abnahme dürfte weniger im Gesundheitsschutz als vielmehr in der verbesserten Technik der neueren Fahrzeuge zu suchen sein. Der Trend der verringerten Schwingungsbelastung nach der Erstuntersuchung lässt sich ebenfalls in Abbildung 24b bezogen auf das Bewegungssegment L5-S1 (geringfügig höhere Werte als für L3-L4) beobachten.

Bei der Nachuntersuchung wurden 57 Fahrer ermittelt, bei denen noch keine Symptome eines „Lumbalsyndroms“ zu erkennen waren. In Abbildung 25a sind für diese Fahrer, bezogen auf das Bewegungssegment L3-L4, die maximale Schwingungsbelastung für die Zeit vor der Erstuntersuchung und für die Zeit zwischen den Untersuchungen dargestellt. Ein Vergleich mit den Boxplots in Abbildung 24a zeigt, dass insbesondere der Medianwert der maximalen Schwingungsbelastung zwischen den Untersuchungen bei den nicht erkrankten Fahrern mit $a_{Fz(8)\text{max}} = 0,43 \text{ m/s}^2$ deutlich niedriger ist als bei den in dieser Zeit erkrankten Fahrern. Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich für das Bewegungssegment L5-S1 (Abbildung 24b und 25b).

Abbildung 24a:
Maximale Schwingungsbelastung im Bewegungssegment L3-L4 vor und nach der Erstuntersuchung bei 54 zwischen Erst- und Nachuntersuchung neu erkrankten Fahrern

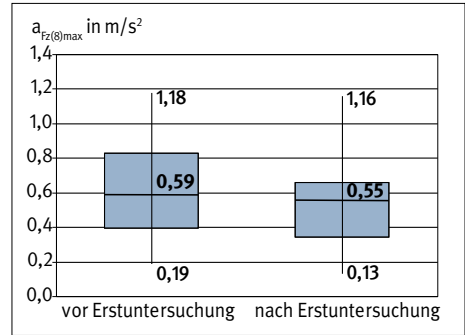


Abbildung 24b:
Maximale Schwingungsbelastung im Bewegungssegment L5-S1 vor und nach der Erstuntersuchung bei 54 neu erkrankten Fahrern

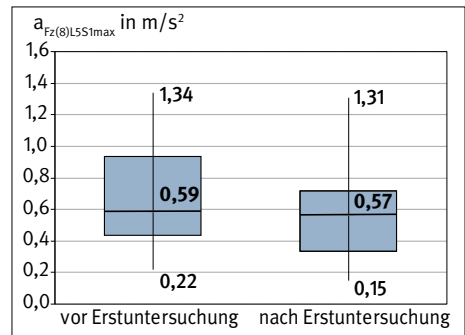


Abbildung 25a:

Maximale Schwingungsbelastung im Bewegungssegment L3-L4 vor und nach der Erstuntersuchung bei 57 Fahrern, die auch bei der Nachuntersuchung keine Symptome eines „Lumbalsyndroms“ zeigten

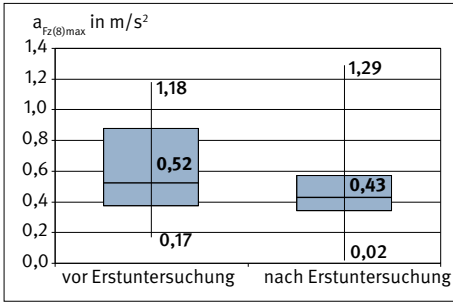
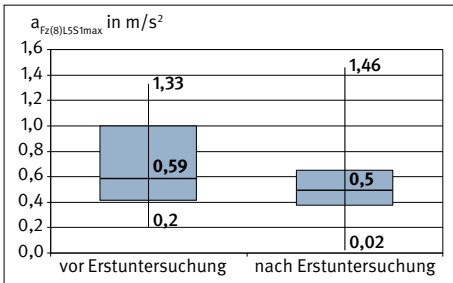


Abbildung 25b:

Maximale Schwingungsbelastung im Bewegungssegment L5-S1 vor und nach der Erstuntersuchung bei 57 Fahrern, die auch bei der Nachuntersuchung keine Symptome eines „Lumbalsyndroms“ zeigten



Auch bei der Schwingungsbelastung in horizontaler y-Richtung (Abbildung 26) ergibt sich für die neu erkrankten Fahrer nach der Erstuntersuchung eine Verringerung des Medianwertes der kraftbezogenen Beurteilungsgröße. Eine entgegengesetzte Tendenz zeigt die Spannweite zwischen den Extremwerten der maximalen Schwingungsbelastung. Diese ist nach der Erstuntersuchung größer als vor der Erstuntersuchung.

Der Medianwert der kraftbezogenen Beurteilungsgröße in y-Richtung ist bei den 57 Fahrern, die auch bei der Nachuntersuchung keine Symptome eines „Lumbalsyndroms“ zeigten, etwas höher als bei den neu erkrankten Fahrern (Abbildungen 26 und 27). Die Tendenz einer Verringerung der Schwingungsbelastung von der Erst- zur Nachuntersuchung ist aber auch bei den nicht erkrankten Fahrern gegeben.

Abbildung 26:

Maximale Schwingungsbelastung im Bewegungssegment L3-L4 in y-Richtung vor und nach der Erstuntersuchung bei 54 neu erkrankten Fahrern

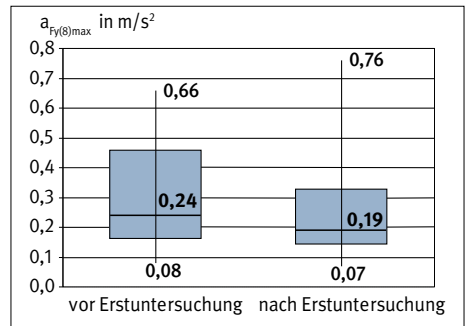
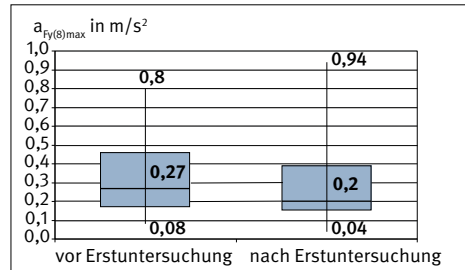


Abbildung 27:

Maximale Schwingungsbelastung im Bewegungssegment L4-L3 in y-Richtung vor und nach der Erstuntersuchung bei 57 Fahrern, die auch bei der Nachuntersuchung keine Symptome eines „Lumbalsyndroms“ zeigten



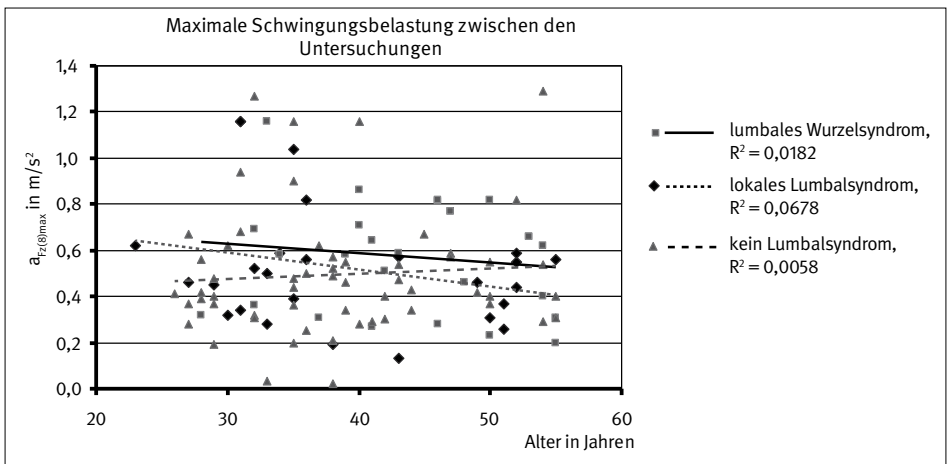
Zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung betrug das Alter der 54 neu erkrankten Fahrer zwischen 18 und 50 Jahren. Bei der Nachuntersuchung betrug die Altersspanne zwischen 23 und 55 Jahre. Es ist somit möglich, für diese 54 Fahrer, die nach der Erstuntersuchung erkrankt sind, das Erkrankungsalter annähernd festzulegen. Neben dem Alter kann eine Aufteilung der Fahrer auch nach der Diagnose erfolgen. Bei 27 Fahrern wurde die Diagnose eines „lumbalen Wurzelsyndroms“ gestellt, und bei den anderen 27 Fahrern lautete die Diagnose „lokales Lumbalsyndrom“. Es ergab sich somit bei der Aufteilung nach Diagnose ein Verhältnis von 1 : 1. In Abbildung 28a ist in Abhängigkeit vom Alter bei der Nachuntersuchung der neu erkrankten Fahrer sowie von der Diagnose die für die Zeit zwischen den Untersuchungen ermittelte maximale Schwingungsbelastung in Form der kraftbezogenen Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment

L3-L4 dargestellt. Der Verlauf der Regressionsgeraden könnte als leichte Tendenz interpretiert werden, dass mit zunehmendem Alter die Schwingungsbelastung geringer wurde, und dass zum anderen die Werte der maximalen kraftbezogenen Beurteilungsgröße im Durchschnitt bei der Diagnose „lumbales Wurzelsyndrom“ über denen des „lokalen Lumbalsyndroms“ liegen. Die Gruppe der über 50-jährigen Personen erreicht nur noch in einem Fall Schwingungsbelastungen mit einem Wert über 0,8 m/s².

In Abbildung 28a sind auch die maximalen Schwingungsbelastungen von den 57 Fahrern eingetragen, die bei der Nachuntersuchung noch keine Symptome eines „Lumbalsyndroms“ zeigten. Die Spanne der Maximalwerte reicht von 0,02 bis 1,29 m/s² (Abbildung 25a) und ist damit größer als bei den erkrankten Fahrern im gleichen Zeitraum.

Abbildung 28a:

Zusammenhang zwischen der maximalen Schwingungsbelastung in z-Richtung und dem Alter bei der Nachuntersuchung bei den Diagnosen „lumbales Wurzelsyndrom“ und „lokales Lumbalsyndrom“ sowie bei den nicht erkrankten Fahrern (Bewegungssegment L3-L4)



Bei dem Zusammenhang zwischen Alter und maximaler Schwingungsbelastung könnte der Eindruck entstehen, dass mit zunehmendem Alter die Belastung höher wird. Allerdings ist das Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,0058$ äußerst niedrig, sodass der durch die Regressionsgerade angedeutete Alterszusammenhang nicht relevant ist.

In Abbildung 28b sind die gleichen Auswertungen für das Bewegungssegment L5-S1 dargestellt. Die Belastungswerte sind hier offenbar etwas höher als für das weiter proximal gelegene Bewegungssegment L3-L4. Allerdings bestehen auch hier keine Zusammenhänge zwischen der Schwingungsbelastung und dem Erkrankungsalter sowie der Diagnose. Die drei Bestimmtheitsmaße

betragen zwischen 0,0022 und 0,0688, was einer Varianzaufklärung von nur 0,2 bis 7,0 % entspricht.

In Abbildung 29 sind die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen in y-Richtung in Abhängigkeit vom Alter und der Diagnose dargestellt. Auch hier gibt es keinen Zusammenhang zwischen dem Alter der Fahrer und der Abnahme der maximalen Schwingungsbelastung in dieser horizontalen Schwingungsrichtung. Die Varianzaufklärung liegt hier zwischen 0,05 % und 0,5 %. Zu erkennen ist in Abbildung 29, dass ein großer Anteil der maximalen Belastungswerte sowohl der erkrankten als auch der nicht erkrankten Fahrer kleiner als $a_{Fy(8)max} = 0,2 \text{ m/s}^2$ ist.

Abbildung 28b:

Zusammenhang zwischen der maximalen Schwingungsbelastung in z-Richtung und dem Alter bei der Nachuntersuchung bei den Diagnosen „lumbales Wurzelsyndrom“ und „lokales Lumbalsyndrom“ sowie bei den nicht erkrankten Fahrern (Bewegungssegment L5-S1)

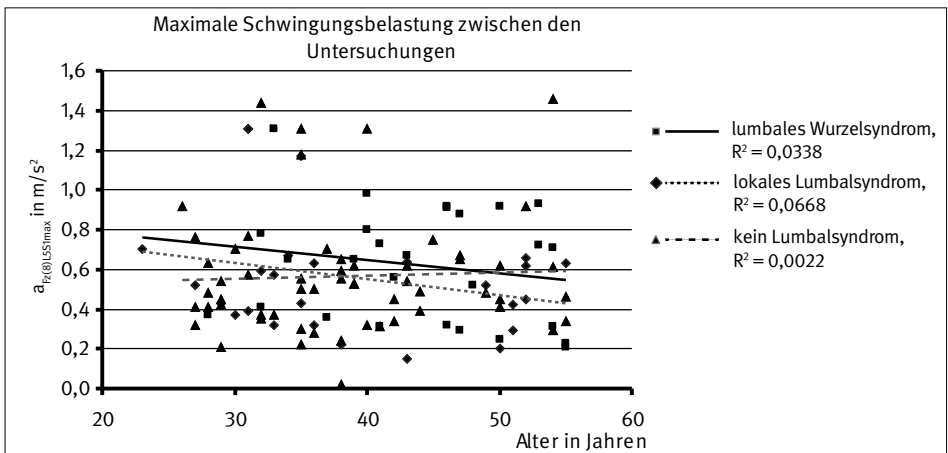
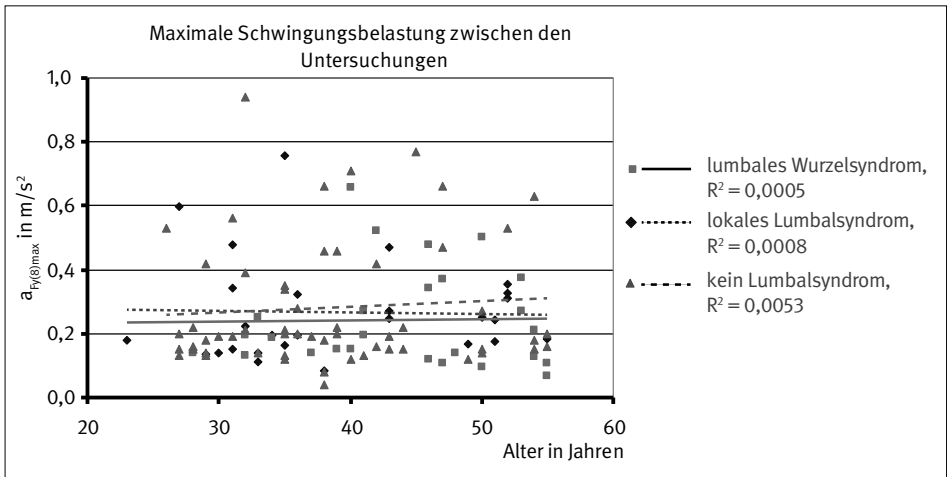


Abbildung 29:

Zusammenhang zwischen der maximalen Schwingungsbelastung in y-Richtung und dem Alter bei der Nachuntersuchung bei den Diagnosen „lumbales Wurzelsyndrom“ und „lokales Lumbalsyndrom“ sowie bei den nicht erkrankten Fahrern



4.6 Dosiswerte für die vertikale Schwingungsrichtung und Diagnose im Vergleich

In diesem Abschnitt soll exemplarisch für das Bewegungssegment L3-L4 und vertikale Schwingungsbelastungen der Zusammenhang zwischen der kumulierten Schwingungsbelastung, auch als Gesamtdosis bezeichnet, und der jeweiligen Diagnose dargestellt werden. In Anlehnung an die Untersuchungen von Dupuis [32] sowie Dupuis und Hartung [33] wurden die Dosiswerte für die vertikale Schwingungsrichtung berechnet. Aufgrund der großen Ähnlichkeit zwischen den Kraftbewertungen (Abbildung 8) sowie den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen für die Bewegungssegmente L3-L4 und L5-S1 (Abbildung 10 und 15) wurden die Berechnungen nur für das craniale Bewegungssegment L3-L4 durchgeführt.

Die Dosisberechnungen erfolgten nur für die Fahrer, die auch an der Nachuntersuchung teilnahmen. Von den 388 Fahrern der GKV-Studie konnten 281 Fahrer ein zweites Mal untersucht werden. Von diesen Fahrern hatten allerdings schon 59 Fahrer im ersten Jahr mit Schwingungsbelastung erstmals über Rückenbeschwerden geklagt. In Anlehnung an Schwarze et al. [5] wurden diese Fahrer bei den Berechnungen nicht mehr berücksichtigt. Somit blieben 222 Fahrer für die Dosisberechnungen. Von diesen waren wiederum 57 Fahrer auch bei der Nachuntersuchung noch beschwerdefrei und bei 80 Fahrern wurde ein „lokales Lumbalsyndrom“ bzw. bei 85 Fahrern ein „lumbales Wurzelsyndrom“ diagnostiziert (Tabelle 2).

Für jeden Tätigkeitsabschnitt der 222 Fahrer wurde ein Dosiswert berechnet. Die Dosiswerte wurden in Abhängigkeit von der individuellen Anzahl der Tätigkeitsabschnitte

zu einem Gesamtdosiswert aufsummiert. In Abbildung 30 ist die Verteilung der berechneten Gesamtdosiswerte auf die Quartile für die drei Diagnosegruppen dargestellt.

einem Medianwert von $709 \text{ m}^2/\text{s}^4$. Die höchsten Dosiswerte mit einem Medianwert von $1422 \text{ m}^2/\text{s}^4$ erreichten die Fahrer mit „lokalem Lumbalsyndrom“. Etwas niedriger lagen die Werte der Fahrer mit „lumbalem Wurzelsyndrom“ mit einem Medianwert von $1283 \text{ m}^2/\text{s}^4$.

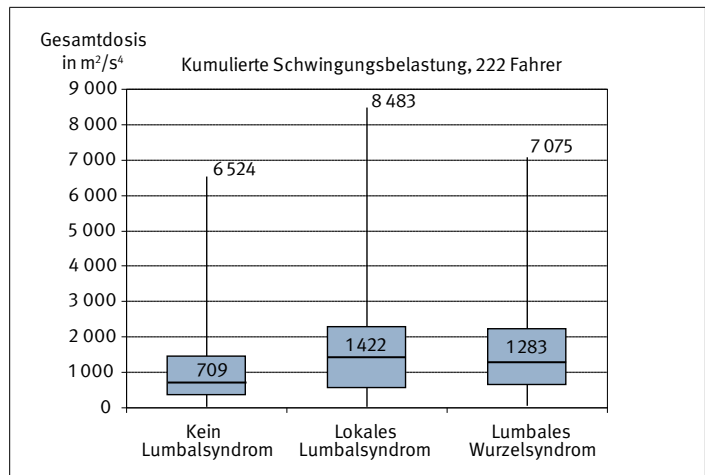
Die niedrigsten Dosiswerte ergaben sich für die Fahrer ohne „Lumbalsyndrom“ mit

Tabelle 2:

Anzahl der Fahrer in den drei Diagnosegruppen bei unterschiedlicher Berechnung der individuellen Gesamtdosis

	Anzahl der Fahrer			Summe
	Kein Lumbalsyndrom	Lokales Lumbalsyndrom	Lumbales Wurzelsyndrom	
Fahrer der Nachuntersuchung ohne Beschwerden im ersten Expositionsjahr	57	80	85	222
Fahrer mit Überschreitung des Schwellenwertes $a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$	37	60	64	161
Fahrer mit Überschreitung des Schwellenwertes $a_{Fz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$	22	40	45	107

Abbildung 30: Vergleich der Gesamtdosiswerte über alle Tätigkeitsjahre bis zur Nachuntersuchung für die 222 Fahrer, die im ersten Expositionsjahr keine Beschwerden hatten



Da bei 111 Fahrern das „Lumbalsyndrom“ schon bei der Erstuntersuchung diagnostiziert wurde, wurden in einem zweiten Schritt nur die Tätigkeitsabschnitte aufsummiert, die zeitlich vor der Untersuchung lagen, die im Rahmen der GKV-Studie erstmals zu der Erkrankungsdiagnose führte. Bei diesem Ansatz wird die Diskrepanz in Kauf genommen, dass bei den 54 neu erkrankten Fahrern der Zeitraum zwischen Erkrankung und Untersuchung maximal fünf Jahre betragen kann, bei den 111 erkrankten Fahrer der Erstuntersuchung dieser Zeitraum aber nicht näher bestimmt werden kann. Die Verteilung der unter diesen Kriterien berechneten Gesamtdosiswerte auf die Quartile ist in Abbildung 31 dargestellt. Bei den Fahrern, die auch zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung noch kein „Lumbalsyndrom“ aufwiesen, änderten sich die Gesamtdosiswerte erwartungsgemäß nicht. Durch den Wegfall

der Tätigkeitsabschnitte, die nach der Erkrankungsdiagnose lagen, verringerten sich nicht nur die Medianwerte für die beiden Erkrankungsgruppen (jetzt 1 190 bzw. 1 110 m^2/s^4), auch die maximalen Gesamtdosiswerte sind niedriger. Dies bedeutet, dass einige Fahrer auch nach ihrer Erkrankung noch hohen Schwingungsbelastungen ausgesetzt waren. Dies gilt insbesondere für die Fahrer mit „Lumbalen Wurzelsyndrom“.

Bei den folgenden Berechnungen des Gesamtdosiswertes wurden unterschiedliche Schwellenwerte für die kraftbezogene Beurteilungsgröße $a_{Fz(8)}$ berücksichtigt. Um den Gesamtdosiswert zu ermitteln, wurden nur die Tätigkeitsabschnitte eines Fahrers aufsummiert, in denen der jeweils vorgegebene Schwellenwert für die kraftbezogene Beurteilungsgröße überschritten wurde.

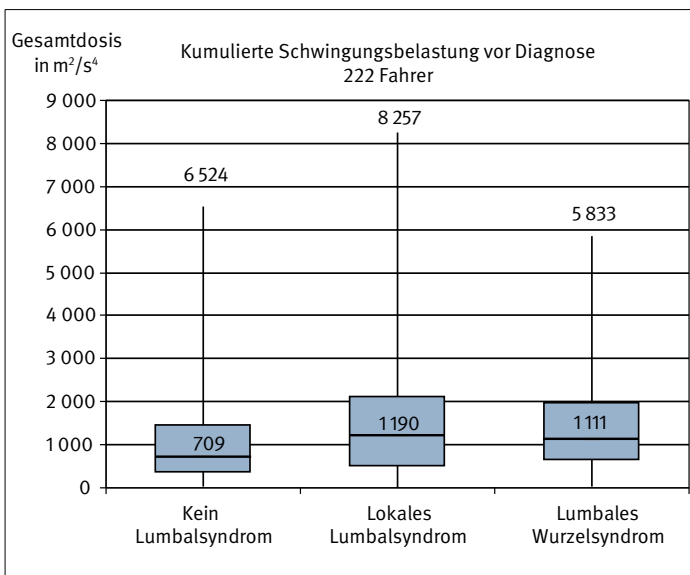


Abbildung 31: Vergleich der Gesamtdosiswerte über die Tätigkeitsabschnitte, die zeitlich vor der Untersuchung lagen, die zu der Diagnose führte, also vor der Erst- bzw. Nachuntersuchung

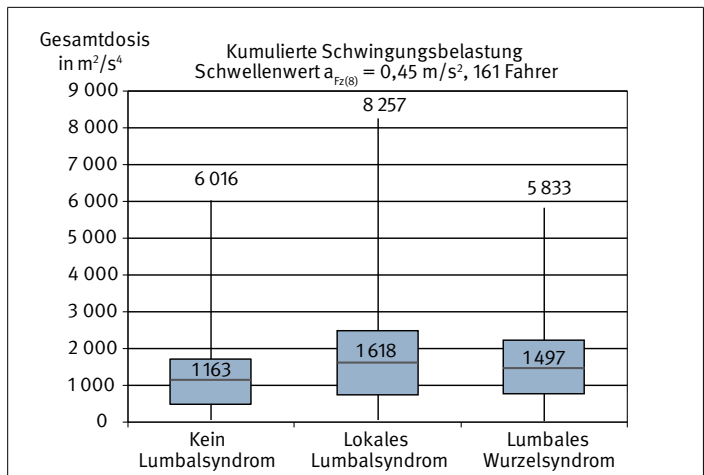
Da bei einigen Fahrern in keinem Tätigkeitsabschnitt der Schwellenwert überschritten wurde, reduzierte sich hierdurch die Anzahl der bei der Dosisberechnung berücksichtigten Fahrer. In Tabelle 2 ist diese Verringerung der Anzahl der Fahrer zu erkennen. Die Verringerung ist bei den nicht erkrankten Fahrern stärker ausgeprägt als bei den erkrankten Fahrern, denn der Anteil der nicht erkrankten an der Gesamtzahl der verbliebenen Fahrer sinkt von 26 auf 23 bzw. 21 %.

Durch die Berücksichtigung eines Schwellenwertes für die kraftbezogene Beurteilungsgröße reduziert sich nicht nur die Anzahl der weiterhin berücksichtigten Fahrer, sondern bei den verbliebenen Fahrern kann sich auch die Gesamtdosis verringern. Dies ist der Fall, wenn bei einem Fahrer nur in einzelnen Tätigkeitsabschnitten der Schwellenwert nicht überschritten wird. Anhand der nahezu gleichbleibend hohen Maximalwerte kann jedoch angenommen werden, dass die Gesamtdosis nur bei wenigen Fahrern durch die Schwellenwerte reduziert wird.

Verallgemeinert kann gesagt werden, dass durch die Einführung der Schwellenwerte mit $a_{Fz(8)} > 0,0 \text{ m/s}^2$ die Fahrer mit einer geringen Gesamtdosis aus der weiteren Betrachtung herausfallen. Es bleiben dann nur die Fahrer mit hohen Dosiswerten übrig, wie bei einem Vergleich der Abbildungen 32 und 33 mit Abbildung 31 anhand der Medianwerte deutlich wird.

Primär werden die Dosiswerte mit der Anhebung der Schwellenwerten höher, da das Quadrat der Schwingungskenngröße in die Berechnung eingeht. Doch auch die Anzahl der Tätigkeitsjahre mit Schwingungsbelastung kann zu höheren Dosiswerten führen. So sind bei den höheren Schwellenwerten die Medianwerte der Tätigkeitsjahre größer als bei dem Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,0 \text{ m/s}^2$ (Tabelle 3). Die größten Unterschiede zwischen den Medianwerten der Tätigkeitsjahre ergaben sich bei den Fahrern mit „lumbalem Wurzelsyndrom“, nämlich von 22,8 auf 25,8 Jahre.

Abbildung 32: Vergleich der Gesamtdosiswerte für die drei Diagnosegruppen bei Berücksichtigung der Tätigkeitsabschnitte, in denen der Schwellenwert von $a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$ überschritten wurde



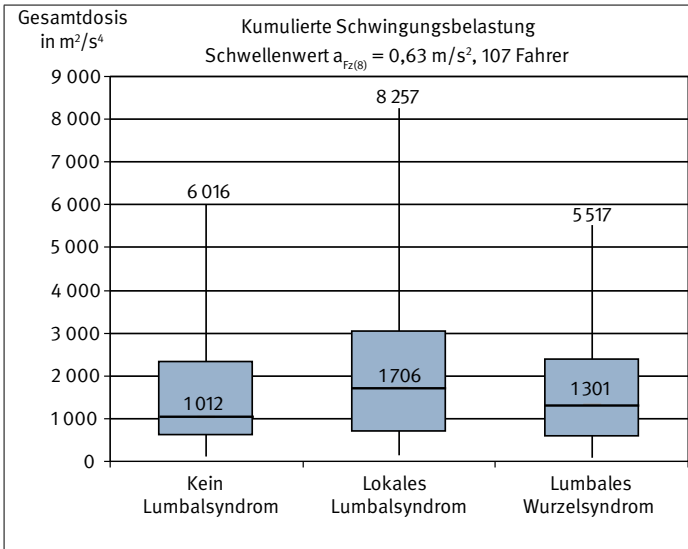


Abbildung 33: Vergleich der Gesamtdosiswerte für die drei Diagnosegruppen bei Berücksichtigung der Tätigkeitsabschnitte, in denen der Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$ überschritten wurde

Tabelle 3:

Medianwerte der Tätigkeitsjahre mit Schwingungsbelastung sowie Alter bei der Erst- bzw. Nachuntersuchung der Fahrer in Abhängigkeit vom Schwellenwert

Gruppe	<i>n</i>	Tätigkeitsjahre	Alter in Jahren
Schwellenwert = 0,0 m/s²			
Kein Lumbalsyndrom	57	14,4	33,0
Lokales Lumbalsyndrom	80	20,5	37,5
Lumbales Wurzelsyndrom	85	22,8	42,0
Schwellenwert = 0,45 m/s²			
Kein Lumbalsyndrom	37	14,1	33,0
Lokales Lumbalsyndrom	60	21,3	38,0
Lumbales Wurzelsyndrom	64	24,1	41,5
Schwellenwert = 0,63 m/s²			
Kein Lumbalsyndrom	22	10,9	33,0
Lokales Lumbalsyndrom	40	22,4	40,0
Lumbales Wurzelsyndrom	45	25,8	43,0

Da sich auch bei Berücksichtigung des Schwellenwertes $a_{Fz(8)} > 0,0 \text{ m/s}^2$ die Wertebereiche der Gesamtdosis bei den drei

Diagnosegruppen deutlich überschneiden, wurde mithilfe der univariaten Varianzanalyse getestet, ob bei Berücksichtigung der

drei Schwellenwerte anhand der Gesamtdosiswerte signifikante Unterschiede zwischen den Diagnosegruppen bestehen. Bei Vorliegen einer Irrtumswahrscheinlichkeit unterhalb des Signifikanzniveaus von 10 % wurde zur weiteren Absicherung des Ergebnisses dann der Z-Test zum Vergleich von jeweils zwei Gruppen untereinander verwendet.

Die Verteilung der Dosiswerte in den drei Gruppen entsprach nicht einer Normalverteilung. Dies zeigt sich anhand des Quotienten aus Schiefe und Standardabweichung, der bei einer Normalverteilung $\leq 2,0$ ist, bei der Verteilung der Dosiswerte aber $> 9,0$ war. Deshalb wurde die univariate Varianzanalyse zur Ermittlung von Zwischengruppeneffekten mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests (H-Test) durchgeführt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

Signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen ergaben sich nur für den Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,0 \text{ m/s}^2$. Bei diesem Schwellenwert wurden zur Berechnung der Gesamtdosiswerte der 222 Fahrer alle in der GKV-Studie erfassten Tätigkeitsabschnitte, die in Abhängigkeit von der Diagnosestellung zeitlich vor der Erst- oder Nachuntersuchung lagen, berücksichtigt. Wurde dagegen ein höherer Schwellenwert von $a_{Fz(8)} = 0,45$ oder $0,63 \text{ m/s}^2$ vorgegeben, so entfielen bei der Berechnung zahlreiche Tätigkeitsabschnitte mit geringerer Schwingungsbelastung. Die Zahlen in der zweiten Spalte von Tabelle 4 als auch in Tabelle 2 lassen erkennen, dass bei erhöhten Schwellenwerten mehrere Fahrer bei der Auswertung nicht mehr erfasst wurden, obwohl bei ihnen die Diagnose „lokales Lumbalsyndrom“ oder „lumbales Wurzelsyndrom“ vorlag.

Tabelle 4:
Ergebnisse des Kruskal-Wallis H-Tests der Gesamtdosiswerte für die Tätigkeitsabschnitte vor Erkrankung bei Berücksichtigung von Schwellenwerten der kraftbezogenen Beurteilungsgröße $a_{Fz(8)}$ (n = Anzahl betroffener Fahrer)

Gruppe	n	Mittelwert	Standardabweichung	Prüfgröße T	p-Wert
Schwellenwert = 0,0 m/s²					
Kein Lumbalsyndrom	57	1 099	1 170	5,91	0,0521
Lokales Lumbalsyndrom	80	1 612	1 523		
Lumbales Wurzelsyndrom	85	1 497	1 197		
Schwellenwert = 0,45 m/s²					
Kein Lumbalsyndrom	37	1 351	1 258	4,35	0,1136
Lokales Lumbalsyndrom	60	1 923	1 598		
Lumbales Wurzelsyndrom	64	1 703	1 239		
Schwellenwert = 0,63 m/s²					
Kein Lumbalsyndrom	22	1 598	1 464	2,46	0,2929
Lokales Lumbalsyndrom	40	2 151	1 759		
Lumbales Wurzelsyndrom	45	2 693	1 339		

Das Fehlen signifikanter Unterschiede zwischen den Gruppen lässt sich dadurch erklären, dass zum einen die Power der drei Gruppen durch die sinkende Anzahl an Fahrern geringer wird und zum anderen der Unterschied im Bereich der Mittelwerte innerhalb der drei unterschiedlichen Gruppen durch die Schwellenwerte ebenfalls geringer wird (wie auch in Abbildung 32 und 33 für beide Schwellenwerte zu erkennen ist).

Da sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen nur für den Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,0 \text{ m/s}^2$ ergaben, erfolgte auch nur hier eine Überprüfung der Unterschiede in den drei möglichen Kombinationen aus jeweils zwei Gruppen mithilfe des Z-Tests. Demnach unterscheidet sich die Gruppe „kein Lumbalsyndrom“ von der Gruppe mit „lokalem Lumbalsyndrom“, sie unterscheidet sich aber nicht von der Gruppe mit

„lumbalem Wurzelsyndrom“. Auch die beiden Diagnosegruppen weichen nicht voneinander ab (vergleiche Tabelle 5).

Die 165 Fahrer, bei denen ein „lokales Lumbalsyndrom“ bzw. ein „lumbales Wurzelsyndrom“ bei Erst- oder Nachuntersuchung diagnostiziert wurde, unterscheiden sich in der Gesamtschwingungsdosis nicht (Tabelle 5). Auch bei der Anzahl der Tätigkeitsjahre mit Schwingungsbelastung unterscheiden sich beide Gruppen nicht signifikant (Tabelle 3, Schwellenwert $0,0 \text{ m/s}^2$). Signifikante Unterschiede ergeben sich nur für das Alter, in dem bei der Erst- oder Nachuntersuchung die Erkrankung diagnostiziert wurde. Der Altersmedianwert ist bei der Gruppe „lokales Lumbalsyndrom“ mit 37,5 Jahren signifikant niedriger als bei der Gruppe „lumbales Wurzelsyndrom“ mit 42,0 Jahren.

Tabelle 5:

Ergebnisse des Z-Tests für die drei Kombinationen aus jeweils zwei Gruppen (kritischer Z-Wert = 2,39 für Signifikanzniveau = 0,05, kritischer Z-Wert = 2,13 für Signifikanzniveau = 0,1)

Gruppe	n	Z-Wert	Signifikanz
1 Kein Lumbalsyndrom	57	2,22	0,1
1 Lokales Lumbalsyndrom	80		
2 Kein Lumbalsyndrom	57	2,11	Kein Unterschied
2 Lumbales Wurzelsyndrom	85		
3 Lokales Lumbalsyndrom	80	0,15	Kein Unterschied
3 Lumbales Wurzelsyndrom	85		

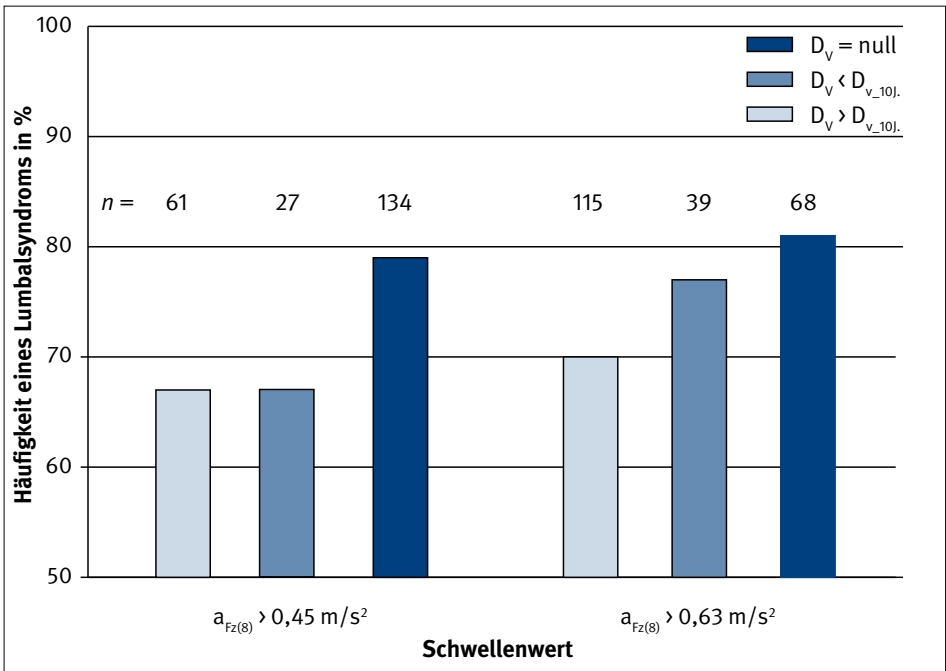
Soll anhand des Gesamtdosiswertes eine Aussage über das Erkrankungsrisiko oder gar über die Erkrankungsart möglich sein, so lassen sich anhand der vorherigen Analysen nur schwer Kriterien hierfür finden. Signifikante Unterschiede zwischen gesunden

und erkrankten Fahrern ergaben sich nur für den Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,0 \text{ m/s}^2$. Unter diesen Bedingungen ist es auch schwierig, einen Schwellenwert für die Gesamtdosis festzulegen, mit dem eine möglichst deutliche Trennung zwischen gering und höher

Schwingungsbelasteten im Hinblick auf eine Gesundheitsgefährdung erreicht werden kann. Wird zum Beispiel für die Abschätzung des Erkrankungsrisikos der Schwellenwert für die Gesamtdosis bei $491 \text{ m}^2/\text{s}^4$ festgelegt, so liegen zwar 75 % der 165 berücksichtigten Fahrer mit „Lumbalsyndrom“ mit ihrer Gesamtdosis oberhalb dieser Schwelle, aber auch fast 60 % der nicht erkrankten Fahrer überschreiten dann mit ihrer Gesamtdosis diesen Schwellenwert (Abbildung 31).

Ähnlich den Auswertungen im Teilprojekt A wird in Abbildung 34 gezeigt, wie sich die beiden Schwellenwerte der kraftbezogenen Beurteilungsgröße auf den Gruppenvergleich von gering belasteten gegenüber höher belasteten Fahrern auswirken. Die höheren Belastungen werden nochmals unterteilt nach der Höhe der Gesamtdosis, wobei eine zehnjährige Schwingungsbelastung oberhalb des Schwellenwertes der Beurteilungsgröße als hohe Belastung definiert wird.

Abbildung 34: Relative Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ für die drei beschriebenen Belastungsgruppen auf der Grundlage von zwei Schwellenwerten für die kraftbezogene Beurteilungsgröße $a_{Fz(8)}$ (bereinigte Stichprobe $n = 222$)



Die prozentuale Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ wird in den folgenden drei Belastungsgruppen betrachtet:

- I: nie über dem betreffenden Schwellenwert der Beurteilungsgröße exponiert ($D_v = 0$)
- II: über dem Schwellenwert exponiert, aber nicht den Dosiswert von zehn Jahren erreicht ($D_v < D_{v,10}$.)
- III: über dem Schwellenwert exponiert und der Dosiswert von zehn Jahren überschritten ($D_v > D_{v,10}$.)

Mit den beiden Schwellenwerten der kraftbezogenen Beurteilungsgröße ergeben sich folgende Grenzwerte:

$$\text{Schwellenwert } a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2:$$

$$D_{v,10} = 447,5 \text{ m}^2/\text{s}^4$$

$$\text{Schwellenwert } a_{Fz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2:$$

$$D_{v,10} = 877,2 \text{ m}^2/\text{s}^4$$

Abbildung 34 zeigt, dass sich die bereinigte Stichprobe von 222 Fahrern je nach gewähltem Schwellenwert in unterschiedlicher Weise auf die drei beschriebenen Belastungsgruppen verteilt. Mit zunehmendem Schwellenwert verbleiben mehr Fahrer in der Gruppe I für geringe Schwingungsbelastungen, und auch bei den höher belasteten Fahrern kann sich, wie zuvor schon beschrieben, die Gesamtdosis ändern, da Zeiträume mit niedrigerer Belastung bei der Dosisberechnung entfallen. Weiterhin ist in Abbildung 34 abzulesen, wie sich die Anhebung des Schwellenwertes der Beurteilungsgröße auf die Gruppengröße und die prozentuale Diagnosehäufigkeit auswirkt.

Betrachtet man in Abbildung 34 die kraftbezogene Beurteilungsgröße $a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$, so fällt die hohe Anzahl von Fahrern auf, die den Grenzwert $D_{v,10}$ überschritten haben und mit fast 80 % einen großen Anteil von Fahrern mit Lumbalsyndrom aufweisen. Zwischen den beiden anderen Belastungsgruppen besteht nur ein geringer Unterschied in der Diagnosehäufigkeit, sodass der Schwellenwert von $a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$ augenscheinlich nicht über die gewünschte Trennschärfe verfügt.

Für den Schwellenwert $a_{Fz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$ vollzieht sich eine Wanderbewegung: Insgesamt 54 Fahrer wechseln in die Gruppe I mit geringer Belastung. Hierdurch ergibt sich jetzt in der Belastungsgruppe II eine höhere Diagnosehäufigkeit als in der Gruppe I. Eine noch deutlich höhere Diagnosehäufigkeit mit 81 % ergibt sich für die Belastungsgruppe, bei der die Gesamtdosis oberhalb von $877,2 \text{ m}^2/\text{s}^4$ liegt. Insgesamt zeigt sich eine deutliche Stufung der Häufigkeit des „Lumbalsyndroms“ in Abhängigkeit von der Belastungsgruppe, die sich plausibel als Auswirkung der Überschreitung des Schwellenwertes der kraftbezogenen Beurteilungsgröße und zusätzlich als Auswirkung der Expositionszeit interpretieren lässt.

Die weitere Erhöhung des Schwellenwertes der kraftbezogenen Beurteilungsgröße auf $a_{Fz(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$ ist wenig sinnvoll, da dann nur noch wenige Fahrer in den Belastungsgruppen II und III vorhanden sind, und somit eine zufriedenstellende Aussage über das Gesundheitsrisiko nicht möglich ist.

5 Diskussion

Ziel dieses von der DGUV geförderten Forschungsvorhabens war es, zunächst für gegebene reale Schwingungsbelastungen die entsprechenden kraftbezogenen Schwingungskennwerte zu berechnen. Anhand der Kennwerte sollten dann in einem zweiten Schritt Zusammenhangsanalysen mit dokumentierten medizinischen Befunden zur Wirbelsäulensymptomatik durchgeführt werden. Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Zusammenhang zwischen den hier hergeleiteten kraftbezogenen Schwingungskenngrößen und den Kenngrößen aus den Richtlinien VDI 2057 von 1987 und 2002 bzw. der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung [8; 9; 29; 30] diskutiert. Danach wird in einem weiteren Abschnitt diskutiert, ob anhand der kraftbezogenen Schwingungskenngrößen eine Abschätzung des Gesundheitsrisikos möglich ist, und ob das Alter der betroffenen Personen bei der Herleitung von Schwellenwerten berücksichtigt werden sollte.

5.1 Zusammenhang zwischen den kraftbezogenen Schwingungskenngrößen und den Kenngrößen in Normen und Verordnungen

Zwischen den in der GKV-Studie [34] für die vertikale Schwingungsbelastung ermittelten K-Werten der Beurteilungs-Schwingstärke und den Werten der in der vorliegenden Studie hergeleiteten kraftbezogenen Beurteilungsgrößen besteht nahezu ein linearer Zusammenhang (Abbildung 10, Seite 21). Dabei besteht die Tendenz, dass bei hohen

Werten für die Beurteilungs-Schwingstärke das Verhältnis zwischen der Schwingstärke und der kraftbezogenen Größe größer als 1 : 20 oder entsprechend durch den Faktor 20 in Beschleunigungswerte umgerechnet größer als 1 : 1 ist. Dieses Verhalten steht nicht im Widerspruch zu den in Abbildung 9 (Seite 20) durch die jeweiligen Wertepaare gegebenen Verhältnisse zwischen den beiden Kenngrößen. In Abbildung 9 variieren gemäß der Regressionsfunktion die Verhältnisse in Abhängigkeit von der Medianfrequenz zwischen 0,81 und 1,28. Die relativ geringe Abweichung der Verhältnisse in Abbildung 10 von einer Geraden mit der Steigung 0,05 kann damit erklärt werden, dass die in den 1 477 Tätigkeitsabschnitten eingesetzten Fahrzeuge nicht den ganzen Frequenzbereich abdeckten, der durch die für Abbildung 9 ausgewerteten Frequenzspektren gegeben war. Aufgrund der Verteilung der Verhältnisse kann angenommen werden, dass die in den Tätigkeitsabschnitten überwiegend genutzten Fahrzeuge mit ihrer Medianfrequenz unterhalb von 12 Hz lagen.

Die vom Projektpartner des Teilprojektes A unter anderem mit den Schwingungsbelastungskennwerten

- $a_{wx(\xi)}$ Beurteilungsbeschleunigung in x-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 [9]
- $a_{wy(\xi)}$ Beurteilungsbeschleunigung in y-Richtung
- $a_{wz(\xi)}$ Beurteilungsbeschleunigung in z-Richtung

- A(8) Tagesexposition nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [8]

durchgeführten logistischen Regressionsanalysen zeigen, dass – neben dem Alter der Fahrer – die maximalen Werte der Kennwerte aus der lebenslangen Arbeitsanamnese einen sehr aussagekräftigen Prädiktor für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ darstellen. Diese gemäß der Richtlinie und der Verordnung ermittelten Werte wurden mit den entsprechenden Maximalwerten der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen

- $a_{Fz(8)}$ Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment L3-L4
- $a_{Fz(8)L5-S1}$ Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment L5-S1
- und $a_{Fy(8)}$ Beurteilungsgröße in y-Richtung für das Bewegungssegment L3-L4

verglichen (Tabelle 1, Seite 29).

Zwischen den Schwingungskenngrößen aus der Richtlinie und der Verordnung und den entsprechenden kraftbezogenen Kenngrößen bestehen enge Zusammenhänge (Korrelationskoeffizienten $> 0,931$). Die beste Übereinstimmung besteht einerseits zwischen $a_{wz(8)}$ und $a_{Fz(8)}$ sowie andererseits zwischen $a_{wy(8)}$ und $a_{Fy(8)}$. Diese gute Übereinstimmung verwundert nicht, wenn man die Zusammenhänge zwischen den kraftbezogenen Kenngrößen und den Beurteilungs-Schwingstärken in Abbildung 10 und 13 (Seite 21 und 24) berücksichtigt. Sowohl die kraftbezogenen Kenngrößen als auch die Beurteilungsbeschleunigungen wurden anhand der in der GKV-Studie [34] ermittelten Beurteilungs-Schwingstärken berechnet.

Andererseits ist das Verhältnis zwischen den Kenngrößen nicht konstant über den erfassten Wertebereich. Das Verhältnis variiert in Abhängigkeit vom Wert der Kenngrößen, was anhand der Regressionsgleichungen exemplarisch in Abbildung 22 (Seite 29) für das Verhältnis zwischen Beurteilungsbeschleunigung und kraftbezogener Beurteilungsgröße in z-Richtung abzulesen ist. Hier macht sich der Einfluss der Schwingungseigenschaften der eingesetzten Fahrzeuge bemerkbar.

Zur Ermittlung der Schwingungskenngrößen gemäß der Richtlinie VDI 2057, Blatt 1 [9] und der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [8] werden die Frequenzanteile der Sitzbeschleunigungen mit Faktoren bewertet, die aus der Schwingungsempfindung des Menschen abgeleitet sind. Dagegen basieren die kraftbezogenen Schwingungskennwerte auf den schwingungsinduzierten Kräften in der Wirbelsäule des Menschen. Berücksichtigt man nun die Ergebnisse von *Fritz et al.* [24; 28], so müssten bei Ausschöpfung des gesamten untersuchten Frequenzbereiches auch große Unterschiede zwischen den mit den beiden Bewertungsverfahren ermittelten Schwingungskenngrößen möglich sein.

Dies ist in der vorliegenden Studie nicht der Fall und kann damit erklärt werden, dass die frequenzbezogenen Unterschiede zwischen den eingesetzten Fahrzeugen gering waren. So haben *Schwarze et al.* [5] die 388 Fahrer der GKV-Studie aus drei spezifischen Tätigkeitsgruppen rekrutiert, nämlich nach der aktuellen Tätigkeit als Gabelstapler-, Lkw- und Erdbaumaschinen-Fahrer. In der Erfassung der Schwingungsbelastung wurde jeder jemals benutzte Fahrzeugtyp berücksichtigt.

Fritz et al. [24; 28] konnten weiterhin zeigen, dass im Vergleich zur Frequenzbewertung gemäß VDI 2057, Blatt 1 [9] bei der kraftbezogenen Bewertung tieffrequente Schwingungsanteile stärker und Anteile mit höheren Frequenzen schwächer bewertet werden als bei der frequenzbewerteten Beschleunigung. Ob nun diese unterschiedlichen Tendenzen in der Frequenzbewertung auch zu Unterschieden in der Abschätzung des Gesundheitsrisikos führen, wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

5.2 Zusammenhang zwischen den kraftbezogenen Schwingungskenngrößen und dem Gesundheitsrisiko

Soll mittels einer Schwingungskenngröße, welche die im Zeitverlauf gemessenen Sitzschwingungen in nur einem Wert zusammenfasst, eine möglichst zuverlässige Aussage über die Gesundheitsrisiken der untersuchten Schwingungsbelastung erreicht werden, so stellen sich folgende Fragen:

- Welche Kenngröße ermöglicht eine zuverlässige Aussage?
- Gibt es einen Schwellenwert für die Kenngröße, bei dessen Überschreitung durch die Schwingungsbelastung erst das Auftreten gesundheitlicher Schädigungen wahrscheinlich ist?
- Ist dieser Schwellenwert abhängig vom Alter der exponierten Person?

Um eine einheitliche Beurteilung der Schwingungsbelastung zu erreichen, wurden die verschiedenen Schwingungskenngrößen unter Berücksichtigung der täglichen

Belastungsdauer zunächst in Beurteilungsgrößen umgerechnet. Die Beurteilungsgrößen werden jeweils für eine einheitliche tägliche Belastungsdauer von acht Stunden angegeben. Abgesehen von dieser täglichen Belastungsdauer wird die durch das Berufsleben bedingte Gesamtdauer der Schwingungsbelastung bei der Risikoabschätzung häufig nur in einer groben Abschätzung berücksichtigt. So enthält das Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 den Hinweis, dass für die Annahme eines arbeitsbedingten Kausalzusammenhanges eine langjährige (in der Regel fünf- bis zehnjährig oder länger dauernd) wiederholte Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen Voraussetzung ist. Auch zeigen die Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen, die im Teilprojekt A ermittelt wurden, dass im Vergleich zu den Beurteilungsgrößen anhand von Gesamtdosiswerten nicht unbedingt eine zuverlässigere Abschätzung des Gesundheitsrisikos möglich ist.

Hieraus sollte nicht gefolgert werden, dass die Anzahl der Jahre mit Schwingungsbelastung keine Rolle bei der Entstehung der degenerativen Wirbelsäulenveränderungen spielt. Sie ist nur stark mit dem Confounder „Alter“ als wesentlichem Risikofaktor verbunden, sodass ihr Effekt statistisch schwer darzustellen ist. Weiterhin muss angemerkt werden, dass die ermittelten Werte der Beurteilungsgrößen nicht die Schwingungsbelastung eines Tages repräsentieren, sondern für einen Tätigkeitsabschnitt stehen, der verglichen mit den anderen Tätigkeitsabschnitten eines Fahrers die höchste Schwingungsbelastung hatte. Die Tätigkeitsabschnitte dauern in der Regel mehrere Jahre, und somit ist immanent eine Dosisakkumulation gegeben.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge wird verständlich, dass – wie im Teilprojekt A mittels logistischen Regressionsanalysen gezeigt werden konnte – neben dem Alter die maximalen Schwingungskennwerte aus der lebenslangen Schwingungsbelastung der untersuchten Fahrer aussagekräftige Prädiktoren für die Vorhersage des Entstehens eines „Lumbalsyndroms“ sein können. Betrachtet man nun den Zusammenhang zwischen den Maximalwerten der einzelnen Schwingungskenngrößen und der Diagnose „Lumbalsyndrom“, so ist der beste Prädiktor die Beurteilungsbeschleunigung in y-Richtung $a_{wy(8)}$, gefolgt von der Tagesdosis $A(8)$ nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [8]. Der maximale Wert der Beurteilungsbeschleunigung in z-Richtung $a_{wz(8)}$ während des Arbeitslebens erreicht zwar eine Odds Ratio von 1,15 mit einem Konfidenzintervall zwischen 1,06 und 1,26 (Abbildung 23), verglichen mit den Odds Ratios der anderen Kennwerte ist dies aber der niedrigste Wert aus den drei Schwingungsrichtungen.

Die genannten Beurteilungsgrößen basieren auf der empfindungsbezogenen Bewertung der Schwingungsbelastungen. Es stellt sich die Frage, wie gut die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen die Chance zur Entstehung eines „Lumbalsyndroms“ vorhersagen können. Bei den Odds Ratios ist in vertikaler z-Richtung die kraftbezogene Beurteilungsgröße für das Bewegungssegment L3-L4 gegenüber der Größe für das Bewegungssegment L5-S1 der minimal aussagekräftigere Prädiktor (Abbildung 23, Seite 30). Ebenso ist in Abbildung 23 zu erkennen, dass die Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ und die Tagesdosis $A(8)$ ein ähnlich großes Odds Ratio anzeigen wie die kraftbezogenen

Beurteilungsgrößen für die vertikale Schwingungsrichtung. Also wird auch hier wiederum deutlich, wie schon im vorherigen Abschnitt beschrieben, dass mit der Schwingungsempfindung eine gute Abschätzung der wahrscheinlichen Ursache für das Entstehen des „Lumbalsyndroms“, nämlich der Wirbelsäulenkräfte, gegeben ist.

Der geringe Unterschied zwischen den Odds Ratios der verschiedenen Kenngrößen lässt sich anhand der Untersuchungen von *Griffin* und *Whitham* [35] oder *Matsumoto* und *Griffin* [36] erklären. Diese Autoren konnten zeigen, dass bei vertikalen Schwingungsbelastungen mit harmonischem Zeitverlauf und Frequenzen zwischen 3,15 und 16 Hz die subjektiven Reaktionen sehr eng korrelieren mit der Schwingungsübertragung vom Sitz zum Kopf oder mit der Größe der scheinbaren Masse [37]. Besonders die scheinbare Masse ist hier interessant, da zu ihrer Ermittlung die schwingungsinduzierten Kräfte zwischen Sitz und Gesäß gemessen werden müssen. Diese Kräfte werden über die Wirbelsäule bis zum Kopf übertragen und dabei von Bewegungssegment zu Bewegungssegment durch die Beschleunigung der anliegenden Körpersegmente kleiner. Also besteht durch die Ergebnisse in den beiden genannten Untersuchungen und durch die oben aufgelisteten Korrelationen Grund zu der Annahme, dass auch ein enger Zusammenhang zwischen den Wirbelsäulenkräften und den subjektiven Reaktionen besteht. Es bleibt allerdings die Frage, wie diese gute Übereinstimmung physiologisch möglich ist. So können die schwingungsinduzierten zeitlichen Veränderungen der Kräfte zwischen Sitz und Gesäß durch die Mechanorezeptoren in der Gesäßhaut erfasst und diese Information an entsprechende Verarbeitungszentren im

Gehirn weitergeleitet werden. Im Bereich der Wirbelsäule sind nicht nur die Kapseln der Zwischenwirbelgelenke oder das hintere Längsband mit Mechanorezeptoren versehen, sondern auch die äußeren Lamellen des Faserrings der Bandscheiben sind durch somatische und viszerale afferente Nervenfasern innerviert [38]. Somit kann angenommen werden, dass der Mensch die durch die Ganzkörper-Schwingungen veränderte Belastung des Muskel-Skelett-Systems wahrnimmt und auch bewerten kann.

Subashi et al. [39] haben die subjektive Reaktion ihrer Probanden und die scheinbare Masse bei horizontalen Schwingungsbelastungen im Frequenzbereich zwischen 1,6 und 10 Hz und mit unterschiedlichen Schwingungsintensitäten gemessen. Auch diese Autoren konnten zeigen, dass eine signifikante Korrelation zwischen dem individuell empfundenen Diskomfort und der normierten scheinbaren Masse besteht. Beide Parameter zeigen ein nicht lineares Verhalten und ihr Zusammenhang ist in dem Frequenzbereich besonders ausgeprägt, in dem die Bewegungen des Rumpfes vom Gesäß bis zum Kopf besonders groß sind. Es lässt sich also die obige Aussage auch auf die horizontale Schwingungsrichtung und somit auf die Ähnlichkeit zwischen $a_{wy(8)}$ und $a_{Fy(8)}$ übertragen.

Wie die Beurteilungsbeschleunigung in y-Richtung führt auch die kraftbezogene Beurteilungsgröße zu der besten Abschätzung des relativen Gesundheitsrisikos (Abbildung 23, Seite 30). Die hohe Aussagekraft dieser beiden Beurteilungsgrößen zur Entstehung des „Lumbalsyndroms“ mag dadurch begründet sein, dass der menschliche Körper empfindlich auf Schwingungen

in Seitwärtsrichtung reagiert. Durch die Seitwärtsschwingungen werden Beugungen des Rumpfes zu den Seiten hervorgerufen. Die Bewegungsausschläge können kaum durch Aktivierung der Rumpfmuskulatur verringert werden. Es gibt keinen Muskel im menschlichen Rumpf, der in einem größeren seitlichen Abstand als der *M. erector spinae* parallel zur Wirbelsäule verläuft. Die alternde Seitwärtsbeugung führt zu einer Kompression der Bandscheiben auf der ipsilateralen Seite. Verbunden mit der zyklischen Kompression bei gleichzeitiger vertikaler Schwingungsbelastung kann dies nach mehreren Jahren zu einem „Lumbalsyndrom“ führen. Dass die Seitwärtsbeugung mit einem erhöhten Gesundheitsrisiko verbunden ist, wird auch daran erkenntlich, dass *Dupuis* [40] empfahl, bei seitgeneigter Rumpfhaltung den Schwellenwert der Beurteilungsschwingstärke auf $KZ_r = 12,5$ abzusenken.

Anhand der Ergebnisse der logistischen Regressionsanalysen wird erkennbar, dass sowohl die Beurteilungsgrößen nach VDI 2057, Blatt 1 [9] und die Tagesexposition A(8) gemäß der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung [8] als auch die hier vorgestellten kraftbezogenen Beurteilungsgrößen eine Abschätzung des relativen Risikos der Entstehung eines „Lumbalsyndroms“ ermöglichen. Die Chance zu erkranken steigt mit Zunahme der für die verschiedenen Beurteilungsgrößen ermittelten Werte. So bedeutet ein Anstieg des Wertes um $0,1 \text{ m/s}^2$

- bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ eine Zunahme der Chance um 15,0 %
- bei der Beurteilungsbeschleunigung $a_{wy(8)}$ eine Zunahme der Chance sogar um 23,0 % (siehe auch Abbildung 23).

Es stellt sich daher die Frage nach der Höhe des Schwellenwertes, bei dessen Überschreitung die Schwingungsbelastung mit einer nicht mehr tolerablen Chance, oder anders ausgedrückt, mit einem nicht mehr tolerablen Risiko, an einem „Lumbalsyndrom“ zu erkranken, verbunden ist.

Richtwerte sind für die Beurteilungsbeschleunigungen in den drei Schwingungsrichtungen in VDI 2057, Blatt 1 [9] und für die Tagesexposition (8) in der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [8] gegeben. Zwischen diesen Beurteilungsgrößen und den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen besteht ein enger Zusammenhang, wie zuvor gezeigt wurde. Auch die Annahme, dass einerseits anhand der Beurteilungsschwingstärke sowie andererseits anhand der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen die annähernd gleiche Anzahl von Tätigkeitsabschnitten mit gefährdender Schwingungsbelastung erkannt wird, führte unter Berücksichtigung des Multiplikationsfaktors von 20 für beide Bewertungsmethoden zu ganz ähnlichen Richtwerten (Abbildung 20). Ausgehend von den Belastungsdaten der GKV-Studie [34] sollten die kraftbezogenen Grenzwerte unter der Annahme einer deutlichen Gefährdung durch langjährige, regelmäßig wiederholte Schwingungsbelastungen

- für die Beurteilungsgrößen $a_{Fz(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$ und auch $a_{Fz(8)15-51} = 0,8 \text{ m/s}^2$ betragen
- bei Berücksichtigung der Vorgaben in VDI 2057, Blatt 1 [9] die Beurteilungsgröße $a_{Fy(8)} = 0,57 \text{ m/s}^2$ betragen.

In [9] wird gefordert, dass bei horizontalen Schwingungen die Beurteilungsbeschleunigung mit dem Korrekturfaktor $k = 1,4$

multipliziert werden muss, um bei gleichem Richtwert wie in vertikaler Richtung eine ähnliche gesundheitliche Gefährdung anzuzeigen. Übertragen auf die kraftbezogenen Werte bedeutet dies, dass rein rechnerisch $a_{Fy(8)} = 0,57 \text{ m/s}^2$ und $a_{Fz(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$ einander entsprechen. Auch in der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [8] wird zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdung durch horizontale Schwingungen eine Multiplikation der Beschleunigungswerte mit dem Faktor $k = 1,4$ vorgenommen. Gleichzeitig wird der Expositionsgrenzwert für die x- und y-Achse auf 1,15 gesetzt. Dies ist eine sehr deutliche Minderung der Einschätzung der Gesundheitsgefährdung, die mit den Daten der vorliegenden Untersuchung nicht gestützt werden kann.

Die obigen Werte für die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen sind als Expositionsgrenzwerte für eine tägliche ganzschichtige Belastung durch Ganzkörper-Schwingungen anzusehen. Bei Überschreiten dieser Werte durch die Schwingungsbelastung müssen umfangreiche Maßnahmen zur Schwingungsreduzierung durchgeführt werden. Die Schwellenwerte für die Vorhersage einer möglichen Gesundheitsgefährdung sollten entsprechend niedriger sein.

Werden die Wirbelsäulenkräfte als Ursache für die Entstehung des „Lumbalsyndroms“ angenommen, so ist auch anzunehmen, dass eine Wirbelsäule mit hoher mechanischer Festigkeit weniger gefährdet ist als eine minder feste. *Jäger und Luttmann* [41] konnten durch statistische Auswertung von Festigkeitsdaten aus der Fachliteratur zeigen, dass die Druckfestigkeit der Lendenwirbelsäule mit zunehmendem Alter geringer wird. Eine Altersabhängigkeit kann auch

für die Festigkeit gegenüber Scherkräften angenommen werden. Sie wurde bisher in der Fachliteratur aber noch nicht beschrieben. Aufgrund der Festigkeitsabnahme und mechanischer Zusammenhänge kann gefolgert werden, dass schwingungsinduzierte Wirbelsäulenkräfte, die bei jungen Fahrern noch nicht zu Schädigungen der Lendenwirbelsäule führen, bei älteren Fahrern der Auslöser für die Entstehung von Schädigungen sein können.

Diese Annahme konnte mit den vorliegenden Daten bisher nicht bestätigt werden. Unter präventiven Gesichtspunkten sind abgesenkte Richtwerte für ältere Arbeitnehmer begrüßenswert. Allerdings ist Vorsicht geboten bei Empfehlungen, für die zurzeit noch keine wirkliche Datenbasis bzw. Evidenz hinsichtlich Schädlichkeit vorhanden ist. Richtwerte, mit denen vorsorglich ältere Arbeitnehmer geschont werden sollen, können erhebliche Probleme für kleinere und mittlere Betriebe bedeuten und im Einzelfall den unerwünschten Verlust des Arbeitsplatzes nach sich ziehen, sodass die nachfolgenden Ausführungen derzeit nur hypothetischen Charakter haben können.

Von den 388 in der GKV-Studie erfassten Fahrer wurde im Rahmen der Erstuntersuchung bei 244 (63 %) ein „Lumbalsyndrom“ diagnostiziert. Anhand der Symptome konnte nicht mehr festgestellt werden, wann die degenerativen Veränderungen im zurückliegenden schwingungsbelasteten Berufsleben, dessen Dauer wenige Monate bis hin zu 42 Jahren betragen konnte, entstanden sind. Bei 54 Fahrern, die zwischen der Erst- und der Nachuntersuchung erkrankten, scheint dagegen eine ungefähre Abschätzung des Alters, in dem die ersten Veränderungen

aufgetreten sind, möglich zu sein. Bei diesen 54 Fahrern waren zur Erstuntersuchung entweder noch keine Symptome vorhanden oder sie waren so gering, dass sie noch nicht erkannt wurden. Somit kann als frühest mögliches Alter für die Entstehung des „Lumbalsyndroms“ das Alter zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung angenommen werden. Aussagen zur Altersabhängigkeit anhand der Daten der Nachuntersuchung sind allerdings stark eingeschränkt, da die Fahrer, die zum Zeitpunkt der ersten Untersuchung schon 50 Jahre und älter waren, nicht mehr zur Nachuntersuchung für die Follow-Up-Studie einbezogen wurden, da aufgrund der schon gegebenen Lumbalsyndrom-Prävalenz der Spielraum für die schwingungsinduzierte Manifestation eines Lumbalsyndroms reduziert war. Die Schlussfolgerungen zum Erkrankungsalter sind deshalb vor dem Hintergrund dieser Einschränkungen zu sehen.

In den Abbildungen 28a und 28b (Seite 33 und 34) sind die angenommenen Erkrankungsalter der 54 neu erkrankten Fahrer den durch die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen gekennzeichneten maximalen Belastungen im Follow-Up-Zeitraum gegenübergestellt. Aufgrund der großen Streuung zwischen den Datenpunkten ist das Bestimmtheitsmaß R^2 sehr gering und liegt maximal bei 0,0678, also einer Varianzaufklärung von annähernd 7 %. Die eingezeichneten Geraden legen den Eindruck nahe, dass mit zunehmendem Lebensalter weniger intensive Schwingungsbelastungen zur Entstehung des „Lumbalsyndroms“, hier getrennt dargestellt durch die beiden Unterdiagnosen „lumbales Wurzelsyndrom“ und „lokales Lumbalsyndrom“, führen können. Angesichts der geringen R^2 -Werte wird die Neigung der Geraden primär durch die

deutlich sichtbaren Ausreißer bestimmt. Gleiches gilt für die ebenfalls in den Abbildungen 28a und 28b dargestellten kraftbezogenen Beurteilungsgrößen der bis zur Nachuntersuchung nicht erkrankten 57 Fahrer. Die Spannweite dieser Größen ist größer als die Spannweite der Beurteilungsgrößen der neu erkrankten Fahrer. Somit ist auch hier eine mögliche Alterabhängigkeit nicht feststellbar.

In Abbildung 29 (Seite 35) sind die ermittelten Schwingungsbelastungen in horizontaler y-Richtung dem angenommenen Erkrankungsalter gegenübergestellt. Aufgrund der hier ebenfalls sehr großen Streuung der Werte ist keine Altersabhängigkeit zu erkennen. Für die eingezeichneten Regressionsgeraden sind die Korrelationskoeffizienten nahezu gleich null. Die fehlende Altersabhängigkeit kann bedeuten, dass auch schon bei jungen Fahrern geringe horizontale Schwingungsbelastungen zu Erkrankungen führen können. Bei der geringen Anzahl von neu erkrankten Fahrern ist dann die Altersabhängigkeit nicht mehr nachzuweisen. Es ist aber auch möglich, dass gerade die jungen Fahrer während der schwingungsbelastenden Tätigkeit Körperhaltungen eingenommen haben, die den schädigenden Effekt der horizontalen Schwingungen noch verstärken, während die erfahrenen Fahrer eher eine schonende aufrechte Haltung einnahmen.

Es bleiben also die Fragen, ob die Schwingungsbelastungen bei älteren Fahrern zur Vermeidung von gesundheitlichen Schädigungen reduziert werden müssen, und für welches Lebensalter die zuvor hergeleiteten Schwellenwerte einen gesundheitlichen Schutz bieten. Aufgrund der großen Streuung der Belastungswerte bei den 54 neu

erkrankten Fahrer lässt sich keine konkrete Antwort auf diese Fragen geben. Der Expositionsgrenzwert von $a_{wz(8)}$ bzw. $a_{Fz(8)}$ wird durch die Reanalyse der GKV-Daten bestätigt. Inwieweit es aber eine sinnvolle Forderung ist, dass zur Vermeidung eines deutlichen Gesundheitsrisikos die kraftbezogene Beurteilungsgröße für die vertikale Schwingungsbelastung $a_{Fz(8)}$ bei älteren Fahrern niedriger als bei jüngeren sein sollte, müssen zukünftige Studien klären. Bei Fahrern über 50 Jahre kann sich gemäß *Jäger* und *Luttmann* [41] die Druckfestigkeit der Wirbelsäule um annähernd 40 % gegenüber Fahrern im Alter von 30 Jahren verringern. Auch wenn anhand der vorliegenden Daten keine solche erhöhte Vulnerabilität mit steigendem Alter nachgewiesen werden konnte, könnte im Hinblick auf die eventuelle Verminderung der Wirbelsäulenfestigkeit versucht werden, das Erkrankungsrisiko auf gleicher Höhe wie bei den jüngeren Fahrern zu halten. So dürfte bei Berücksichtigung des entsprechenden Odds Ratio für die kraftbezogene Beurteilungsgröße, die unabhängig von der Wirbelsäulenfestigkeit berechnet wurde und eine ungefähre

Risikoerhöhung von 12 % pro
Beschleunigungsanstieg von $0,1 \text{ m/s}^2$

vorhersagt (Abbildung 23, Seite 30), unter präventiven Gesichtspunkten die vertikale Schwingungsbelastung den Wert von $a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$ möglichst nicht überschreiten. Die Einhaltung dieses Richtwertes würde unter den erwähnten Voraussetzungen bedeuten, dass die älteren Fahrer mit ihrer verminderten Wirbelsäulenfestigkeit ein annähernd gleich großes Erkrankungsrisiko haben wie die jüngeren Fahrer. Bei dieser Vorgabe spielt die eventuell schon zuvor

vorhandene Schwingungsbelastung eine untergeordnete Rolle, wenn sie unterhalb der Grenzwerte geblieben ist. Ausschlaggebend für eine durch Schwingungsbelastung induzierte Entstehung der Erkrankung sollte dann das Verhältnis zwischen der maximalen vertikalen Schwingungsbelastung und dem altersabhängigen Schwellenwert sein.

Für die horizontale Schwingung in y-Richtung konnte keine Abhängigkeit des Grenzwertes vom Alter ermittelt werden (Abbildung 29). Der Medianwert der ausgewerteten 1 477 Tätigkeitsabschnitte liegt bei $a_{Fy(8)} = 0,20 \text{ m/s}^2$ und der Wert des 3. Quartils bei $a_{Fy(8)} = 0,38 \text{ m/s}^2$ (Abbildung 17, Seite 25). Somit wird der zuvor genannte Expositionsgrenzwert für die horizontale Schwingung in weniger als einem Viertel der ausgewerteten 1 477 Tätigkeitsschnitte überschritten. Bei der Festlegung eines unteren kraftbezogenen Schwellenwertes zeigen die Ergebnisse der statistischen Analyse (Abbildung 26, Seite 32), dass nahezu die Hälfte der neu erkrankten Fahrer bei einer kraftbezogenen Beurteilungsgröße $a_{Fy(8)} < 0,20 \text{ m/s}^2$ erkrankten. Bei dieser geringen Schwingungsbelastung in horizontaler y-Richtung kann angenommen werden, dass möglicherweise nicht nur das Alter des Fahrers, sondern die gleichzeitig vorhandenen vertikalen Schwingungsbelastungen mit zur Entstehung der Erkrankungen beigetragen haben. Von den Fahrern mit der geringen horizontalen Schwingungsbelastung war wiederum die Hälfte einer maximalen vertikalen Schwingungsbelastung ausgesetzt, die oberhalb von $a_{Fz(8)} = 0,45 \text{ m/s}^2$ lag. Somit war insgesamt ein Viertel der 54 neu erkrankten Fahrer geringen Schwingungsbelastungen sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung ausgesetzt. Hieraus folgt, dass es bei gleichzeitiger

Schwingungsbelastung in mehreren Richtungen mit geringer Intensität nicht sinnvoll ist, das mögliche Gesundheitsrisiko für jede Schwingungsrichtung getrennt zu ermitteln. Vielmehr sollte nur eine gemeinsame Beurteilungsgröße in Form eines Schwingungsgesamtwertes für die kombinierte Schwingungsbelastung ermittelt werden und diese ist dann zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos mit einem entsprechenden Schwellenwert zu vergleichen.

5.3 Zusammenhang zwischen der Schwingungsdosis und dem Gesundheitsrisiko

Die Annahme, dass die Wirbelsäulenkräfte eine Teilursache für das Entstehen eines „Lumbalsyndroms“ sind, und die Annahme, dass die Überschreitung eines Gesamtdosiswertes zu der Erkrankung führt, lassen sich nicht einfach in Einklang bringen. Die Haltbarkeit technischer Bauteile wird bei einmaliger Belastung anhand der Bruchfestigkeit des Materials abgeschätzt, und bei schwingender Belastung wird sowohl die Ausschöpfung der Festigkeit als auch die Anzahl der Lastwechsel berücksichtigt. Bei Ganzkörper-Schwingungen ist die Anzahl der Lastwechsel schwer zu ermitteln. Es besteht aber sicherlich ein enger Zusammenhang zwischen der Anzahl der Lastwechsel und der gesamten Belastungsdauer, dass nämlich mit Zunahme der Dauer auch die Anzahl der Lastwechsel zunimmt.

Wird nun als Maß für die Ausschöpfung der Materialfestigkeit die kraftbezogene Beurteilungsgröße und für die Anzahl der Lastwechsel die Expositionsdauer herangezogen, so kann analog zur Abschätzung der Haltbarkeit von technischen Materialien sicherlich die

Gesamtschwingungsdosis zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos genutzt werden.

Um in der Praxis eine zufriedenstellende Risikoabschätzung für Ganzkörper-Schwingungen durchführen zu können, sind klare Empfehlungen sowohl für die Schwellenwerte der Beurteilungsgrößen als auch der Gesamtdosis erforderlich. In Abschnitt 4.6 wurde versucht, auf pragmatische Weise zu Entscheidungen im bisher in den Normen, Richtlinien, Verordnungen und Merkblättern betrachteten Wertebereich der Größen zu kommen.

Anhand der Unterteilung der bereinigten Stichprobe von 222 Fahrern in gering belastete, wenige Jahre belastete und über zehn Jahre belastete Gruppen konnte gezeigt werden, dass ein Schwellenwert von $a_{Fz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$ in Verbindung mit einem Dosiswert von $877,2 \text{ m}^2/\text{s}^4$ zu einer plausiblen Risikoabschätzung führt als ein kleinerer Schwellenwert.

6 Ausblick

Die beschriebene Reanalyse der in der GKV-Studie erhobenen Belastungsdaten und Gesundheitsdaten zeigt, dass sowohl mit der Beurteilungsbeschleunigung und den von ihr abgeleiteten Größen als auch mit den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen die durch Schwingungsbelastungen mögliche Gesundheitsgefährdung adäquat abgeschätzt werden kann. Zwischen beiden Arten von Beurteilungsgrößen besteht eine hohe Korrelation.

Gemäß der Studie von *Schäfer und Hartung* [42] gibt es zum Beispiel in der Landwirtschaft, im Tief- und Straßenbau oder im Transportwesen Tätigkeiten, bei denen Belastungen durch manuelles Heben und Tragen von Lasten oder in extremer Rumpfbeugehaltung sowie durch Ganzkörper-Schwingungen täglich oder auch hintereinander an verschiedenen Tagen vorkommen können. Für diese Tätigkeiten ist eine zusammenfassende Beurteilung beider Belastungsarten notwendig. Hierbei ergibt sich jedoch die Diskrepanz, dass bisher die Beurteilung der Tätigkeit Heben und Tragen aufgrund der Wirbelsäulenkräfte durchgeführt wird, und dass bei Ganzkörper-Schwingungen durch die Beurteilungsbeschleunigung die Schwingungsempfindung berücksichtigt wird.

Die hohe Korrelation zwischen den Beurteilungsbeschleunigungen und den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen weist darauf hin, dass beide Bewertungsverfahren zur gleichen Schwingungsbeurteilung führen. Somit wird man auch keinen Fehler begehen, wenn bei den kombinierten Belastungen die

Beurteilung einerseits auf der Schwingungsempfindung und für das Heben und Tragen sowie für Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung auf den Wirbelsäulenkräften basiert. Um nun die Gesundheitsgefährdung durch die kombinierten Belastungen adäquat beurteilen zu können, ist es notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die beiden unterschiedlichen Bewertungsmethoden sinnvoll zusammengefügt werden und eine Gesamtbeurteilungsgröße ermittelt werden kann.

In der Definition der Berufskrankheit Nr. 2110 wird betont, dass die bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule vorwiegend durch Einwirkung vertikaler Ganzkörper-Schwingungen auf den sitzenden Menschen hervorgerufen werden. Nun hat aber die Reanalyse der Daten der GKV-Studie gezeigt, dass ein besonders enger Zusammenhang zwischen den Erkrankungen und den Schwingungsbelastungen in horizontaler y-Richtung besteht. Auch werden auf den verschiedenen Fahrzeugen und Arbeitsmaschinen sehr unterschiedliche Körperhaltungen eingenommen. So nehmen die Fahrer von Portalkränen häufig eine stark nach vorne gebeugte Körperhaltung oder die Fahrer von Gabelstaplern eine zur Seite gedrehte Haltung ein. Da folglich die Arbeitsbedingungen im Feld von den im Merkblatt beschriebenen Bedingungen in zahlreichen Fällen abweichen, sollte neben dem Vektor der Sitzbeschleunigungen auch der aus den Wirbelsäulenkräften resultierende Vektor bei der Beurteilung der möglichen Auswirkungen von Ganzkörper-Schwingungen

berücksichtigt werden. Es muss also eine Beurteilungsgröße hergeleitet werden, die sowohl abhängig ist von der Schwingungsintensität als auch von der Differenz zwischen der Richtung des Beschleunigungsvektors und der Richtung des Kraftvektors.

7 Zusammenfassung/Summary

7.1 Zusammenfassung

Muskel- und Skelett-Erkrankungen verursachten im Jahre 2005 fast jeden vierten krankheitsbedingten Ausfalltag von Arbeitnehmern. Sie gehören zu den häufigsten arbeitsbedingten Gesundheitsproblemen in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union. Unter den arbeitsbedingten Faktoren, die bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule mitverursachen und verschlimmern können, stellt die langjährige Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen im Sitzen eine besondere Gefahrenquelle dar.

Zur Ermittlung der Belastungshöhe werden die Schwingbeschleunigungen zwischen Sitz und Gesäß gemessen. Die Schwingbeschleunigungen werden mit frequenzabhängigen Funktionen bewertet und gemäß der VDI-Richtlinie 2057, Blatt 1 zu einer Schwingungskenngröße zusammengefasst. Die Bewertungsfunktionen wurden anhand der frequenzabhängigen Schwingungsempfindungen des Menschen hergeleitet. Der Vergleich mit den durch langjähriges Heben und Tragen von Lasten hervorgerufenen Erkrankungen legt nahe, dass auch bei Ganzkörper-Schwingungen die in der Lendenwirbelsäule wirkenden Kräfte eine wichtige Teilursache für die Entstehung der degenerativen Erkrankungen sind.

Am Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo) wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem für gemessene Schwingungsverläufe sogenannte

kraftbezogene Schwingungskenngrößen berechnet werden können. Die einzelnen Rechenschritte entsprechen dem in VDI 2057, Blatt 1 beschriebenen Verfahren. Die neuen Bewertungsfunktionen wurden anhand der mit einem biomechanischen Modell simulierten Wirbelsäulenkräften hergeleitet. Um nun überprüfen zu können, ob die kraftbezogenen Schwingungskenngrößen eine adäquate Abbildung des Erkrankungsrisikos ermöglichen, wurden die im Rahmen der GKV-Studie, die zwischen 1990 und 1995 von der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf durchgeführt wurde, erhobenen Daten einer Reanalyse unterzogen.

In der GKV-Studie wurden bei der Erstuntersuchung 388 Fahrer von Gabelstaplern, Lastkraftwagen, Erdbaumaschinen und einigen anderen mobilen Arbeitmaschinen erfasst. Nach vier bis fünf Jahren konnte bei 281 dieser Fahrer eine Nachuntersuchung durchgeführt werden. Durch Wechsel der Tätigkeit oder des Fahrzeuges ergaben sich insgesamt 1 477 Tätigkeitsabschnitte, in denen die Fahrer durch gleichbleibend intensive Ganzkörper-Schwingungen belastet waren. Für alle Tätigkeitsabschnitte wurden in der GKV-Studie die Beurteilungs-Schwingstärken ermittelt. So betrug für die Schwingungsrichtung mit der höchsten Belastung, hier die vertikale Richtung, der Medianwert der Beurteilungs-Schwingstärken $KZ_v = 10,5$. In Abhängigkeit von den Schwingungseigenschaften der Fahrzeuge wurden die Beurteilungs-Schwingstärken gemäß VDI 2057, Blatt 1 von 2002 in Beurteilungsbeschleunigungen umgerechnet.

Mit den kraftbezogenen Bewertungsfunktionen leitete das IfADo auch Regressionsfunktionen her, die eine Umrechnung der gemäß den Normen und Richtlinien ermittelten Schwingungskenngrößen in kraftbezogene Kenngrößen ermöglichen. Bei diesen Umrechnungen werden die Medianfrequenzen als Merkmal für die Schwingungseigenschaften der Fahrzeuge berücksichtigt. Trotz des Einflusses der Medianfrequenz ergab sich eine hohe Korrelation sowohl zwischen den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen und den Beurteilungs-Schwingstärken als auch zwischen den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen und den Beurteilungsbeschleunigungen. Das Verhältnis zwischen den jeweiligen Beurteilungsgrößen war jedoch nicht konstant. Mit ansteigenden Werten nahmen die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen stärker zu als die Beurteilungs-Schwingstärke. Dieser Zusammenhang ist das Ergebnis der kraftbezogenen Bewertungsfunktionen. Durch diese Bewertungsfunktionen werden tieffrequente Schwingungsanteile höher bewertet als mit den Bewertungsfunktionen in VDI 2057 von 1987 oder 2002.

Bei 244 der 388 Fahrern hatte sich bis zur Erstuntersuchung ein „Lumbalsyndrom“ entwickelt. Aufgrund von LWS-Beschwerden, die schon vor der Aufnahme der schwingungsbelastenden Tätigkeit aufgetreten waren, wurden 73 Fahrer von der weiteren Analyse des Gesundheitsrisikos ausgeschlossen. Für die verbleibenden 315 Fahrer ergab die logistische Regression, dass das Alter der stärkste Prädiktor für ein „Lumbalsyndrom“ ist. Aber auch die Schwingungsbelastung kann das Risiko erhöhen. Die aussagekräftigsten Ergebnisse ergaben sich anhand der maximalen Schwingungsbelastungen aus den Tätigkeiten während des gesamten

Arbeitslebens. Im Vergleich der drei Schwingungsrichtungen sind die Schwingungsbelastungen in der y-Richtung mit dem höchsten Gesundheitsrisiko verbunden. Von den 281 Teilnehmern an der Nachuntersuchung hatten 111 Fahrer zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung kein „Lumbalsyndrom“; 54 von ihnen erkrankten dann in der Zeit bis zur Nachuntersuchung.

Werden die für die Beurteilungsbeschleunigungen sowie die kraftbezogene Beurteilungsgröße ermittelten Odds Ratios miteinander verglichen, so ergeben sich nur minimale Unterschiede. Das Gesundheitsrisiko kann folglich mit den auf der Schwingungsempfindung basierenden Beurteilungsbeschleunigungen gleich gut abgeschätzt werden wie mit den kraftbezogenen Beurteilungsgrößen. Dies legt die Vermutung nahe, dass der Mensch ein Gefühl für die Belastung seiner Wirbelsäule und somit für die Gefährdung durch Ganzkörper-Schwingungen hat.

Mit dem Alter nimmt die mechanische Festigkeit der Wirbelsäule ab. Aus mechanischer Sicht bedeutet dies, dass bei gleichbleibender Schwingungsbelastung das Gesundheitsrisiko mit dem Alter zunimmt. Diese Hypothese konnte anhand des hierzu ausgewerteten Datenmaterials der Nachuntersuchung nicht bestätigt werden. Fahrer, die zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung schon 50 Jahre alt waren, wurden nicht in die Follow-Up-Studie aufgenommen. Von den verbliebenen 111 Fahrer ohne „Lumbalsyndrom“ erkrankten im Zeitraum zwischen Erst- und Nachuntersuchung noch 54 Fahrer. Nur bei 57 wurde kein „Lumbalsyndrom“ diagnostiziert. Bedingt durch diese beiden relativ kleinen Gruppen ließen sich die

erwarteten Zusammenhänge nicht aufzeigen, sodass eventuell andere Studienansätze zu prüfen sind.

Für die insgesamt 222 Fahrer, die nach annähernd fünf Jahren ein zweites Mal untersucht werden konnten, wurden exemplarisch für die vertikale Schwingungsrichtung die Gesamtdosiswerte berechnet. Hierbei wurden jeweils die Tätigkeitsabschnitte berücksichtigt, die zeitlich vor der Untersuchung lagen, bei der ein „Lumbalsyndrom“ diagnostiziert wurde. Signifikante Unterschiede zwischen den nicht erkrankten Fahrern und den Fahrern mit „Lumbalsyndrom“ ergaben sich nur, wenn alle Tätigkeitsabschnitte ohne Berücksichtigung eines Schwellenwertes für die tägliche Schwingungsbelastung aufsummiert wurden. Aufgrund der großen Überschneidungen der Dosiswerte für die Fahrer ohne und mit „Lumbalsyndrom“ ist die Festlegung eines Dosiswellenwertes schwierig.

Bei einer nicht geringen Anzahl von Tätigkeiten treten neben der Schwingungsbelastung auch Belastungen durch manuelles Heben und Tragen von Lasten oder durch extreme Rumpfbeugehaltung auf. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen der normgemäßen, also empfindungsbezogenen, und der kraftbezogenen Schwingungsbeurteilung ist anzunehmen, dass bei den kombinierten Tätigkeiten ein Zusammenfügen der auf den Wirbelsäulenkräften beruhenden Beurteilung der Lastenmanipulation mit der normgemäßen Schwingungsbeurteilung zur sinnvollen Abschätzung des Gesundheitsrisikos führen kann.

In VDI 2057 wird von einer aufrechten Sitzhaltung ausgegangen. Bei Fahrtätigkeiten auf Portalkränen oder Gabelstaplern werden häufig nach vorne oder zur Seite gebeugte Haltungen eingenommen. Zur Beurteilung des hiermit verbundenen Gesundheitsrisikos wird es notwendig sein, den Zusammenhang zwischen dem Kraftvektor aus den Wirbelsäulenkräften und dem Beschleunigungsvektor zu ermitteln.

7.2 Summary

In the year 2005 muscular and skeletal disorders cause nearly every fourth day of the employee's working absence due to illness. These disorders belong to the most frequent occupational health problems in the member states of the European Union. Concerning the work-related stress factors which can induce or aggravate lumbar spine disorders long-term exposure to whole-body vibration (wbv) in the seated posture is a special cause of health risk.

In order to assess the vibration stress the accelerations are measured at the driving point between seat and buttocks. The vibration accelerations are weighted by frequency-dependent functions and are summarized in characteristic values according to the guideline VDI 2057, Part 1. The weighting functions were derived by means of the frequency-dependent sensation of the vibration stress. The comparison with the diseases induced by long-term handling of heavy loads leads to the assumption that also under whole-body vibration the forces transmitted in the lumbar spine are an important cause for the development of the degenerative diseases of the lumbar spine.

At the Leibniz Research Centre for Working Environment and Human Factors (IfADo) a method was developed which enables the computation of so-called force-related values in order to weight the measured vibrations stress. The different steps of the calculation correspond to the method described in VDI 2057, Part 1. The new weighting functions were derived on the basis of spine forces which were simulated by means of the biomechanical model. In order to examine if the force-related characteristic vibration values enable a sufficient statement about the health risk the exposure data measured during the previous wbv-study were reanalysed. The wbv-study was carried out by the 'Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf' in the years between 1990 and 1995.

During the wbv-study the data of 388 operators of fork-lifters, trucks, earth-moving machinery or other mobile machines were captured. In a follow-up investigation four to five years later 281 drivers could be examined. As a result of changes of the occupation or the machine 1,477 occupation phases must be analysed. During each phase the intensity of the vibration stress of the driver was nearly constant. For the wbv-study the vibration stress was assessed in terms of the 'Beurteilungs-Schwingstärke' according to VDI 2057 (1987). The vibration direction with the highest stresses on average was the vertical direction and the median value of the 'Beurteilungs-Schwingstärke' amounted to $KZ_v = 10.5$. In dependency on the vibration properties of the machines the values of the 'Beurteilungs-Schwingstärke' were converted into the assessment accelerations according to VDI 2057, Part 1 (2002).

Simultaneously to the force-related weighting functions regression functions were derived at the IfADo which enable a conversion of the characteristic vibration values conforming to the standards into force-related values. By the conversion the median frequencies were regarded as features of the vibration properties of the different machines. In spite of the influence of the median frequency good correlations were given between the force-related assessment values and the 'Beurteilungs-Schwingstärke' and between the force-related assessment values and the assessment accelerations. However, the ratio between respective values was not constant. With increasing values the increase of the force-related values was stronger than that of the two assessment values conforming to the standards. This relationship is given by the force-related weighting functions. By these functions low-frequency vibration parts are weighted with higher values than by the weighting functions in VDI 2057 of the year 1987 or 2002.

During the first examination a lumbar syndrome was diagnosed in 244 of the 388 drivers. Because 73 drivers fell ill in the first year of vibration exposure they were excluded from the analysis of the health risk. For the remaining 315 drivers it could be shown that age is the dominant predictor of the relative health risk. However, the health risk can also be increased by vibration stress. The most significant results were given by the individual maximal vibration stress during the lifelong vibration exposure. A comparison of the effects of the vibrations in the three directions showed that the highest health risk is given by the vibrations in the horizontal y-direction. In the follow-up-study 281 drivers could be examined. 111 of these

drivers showed no symptoms of a lumbar syndrome during the first examination; 54 drivers fell ill in the period between the first and the follow-up examination.

In order to analyse the relationship between the different vibration values and the relative health risk the odds ratios were computed for the predictors assessment acceleration and force-related assessment value. Only minimal differences existed between the both types of predictors. Thus, the health risk can be equally well assessed by means of the sensation-related assessment accelerations and by the force-related assessment values. Regarding this it can be assumed that humans have a good feeling of the spinal stress and, thus, of the whole-body vibration induced risk.

The mechanical strength of the spine decreases with increasing age. From a mechanical point of view this means that under steady vibration stress the health risk simultaneously increases with the age of the driver. However, this hypothesis could not be confirmed by means of the data collected during the follow-up-examination. Drivers older than 50 were not included in the follow-up-study. From the remaining 111 drivers without 'lumbar syndrome' 54 drivers fell ill between the initial and the follow-up examination. No 'lumbar syndrome' was finally diagnosed for 57 drivers. Conditioned by these relatively small groups the expected relationship could not be shown by the selected evaluation methods.

As an example the total dose values were computed for the vertical vibration stress of the remaining 222 drivers participating in the follow-up examination. The computation

based on the individual occupation phases before the examination resulting in the diagnose 'lumbar syndrome'. Significant differences between the driver without and the drivers with 'lumbar syndrome' only existed under the condition that all occupation phases were summed up without regarding a threshold of the daily vibration stress. The great overlapping of the dose values of the drivers without and with lumbar syndrome complicates the determination of an adequate dose threshold for a risk prediction.

During several occupational activities the workers are stressed by whole-body vibration as well as by lifting or carrying objects or work with the trunk highly inclined. Because of the close relationship between the sensation-related assessment acceleration and the force-related assessment vibration values it can be assumed that the health risk of the combined activities can be sufficiently assessed if the spinal force-related assessment of material handling is conducted with the assessment of the whole-body vibration described in the standards.

In VDI 2057 it is assumed that the operators sit in upright postures. During driving activities in container bridge cranes or fork-lift trucks the drivers often take postures with forward bending or lateral inclination of the trunk. For the assessment of the health risk induced by these activities it seems to be necessary to analyse the relationship between the vector of the forces transmitted in the spine and the vector of the seat accelerations.

Literatur

- [1] *Fritz, M.:* Wirkung von Ganzkörper-Schwingungen – die Dosis macht es. Zbl. Arbeitsmed. 58 (2008), S. 290-301
- [2] *Andersson, G. B. J.:* The epidemiology of spinal disorders. In: *Frymover, J. W.* et al. (Hrsg.): The Adult Spine, Principles and Practice. S. 107-146. Raven Press, New York 1991
- [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), S. 351-365
- [4] *Dupuis, H.; Zerlett, G.:* Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen, Kenntnisstand zur Wirkung von Ganzkörper-Schwingungen. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1984
- [5] *Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.:* Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen auf die Lendenwirbelsäule – Eine Follow-up-Studie an 388 Fahrern verschiedener Fahrzeuge. Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed. 33 (1998), S. 429-442
- [6] *Seidel, H.; Heide, R.:* Long-term effect of whole-body vibration – A critical survey of literature. Int. Arch. Occup. Environ. Health 58 (1986), S. 1-26
- [7] VDI 3831: Schutzmaßnahmen gegen die Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Beuth, Berlin 2006
- [8] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV). BGBl. I (2007), S. 261-269; zul. geändert. BGBl. I (2010), S. 960
- [9] VDI 2057, Blatt 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen. Berlin, Beuth 2002
- [10] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. International Organisation for Standardization, Genf, Schweiz 1997
- [11] *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 5 (1967), S. 183-205
- [12] *Splittgerber, H.:* Untersuchungen über die Wahrnehmungsschwelle des Menschen bei einwirkenden mechanischen Schwingungen. Gesundheits-Ingenieur 93 (1972), Nr. 4, S. 113-118

- [13] *Dupuis, H.; Zerlett, G.*: Ganz-Körper-Schwingungen und Wirbelsäule – Stellungnahme I. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed. 21 (1986), S. 186-187
- [14] *Müsch, F. H.*: Lumbalsyndrom durch Ganzkörper-Vibrationsbelastung. In: *Kreutz, R.; Piekarski, C.* (Hrsg.): Arbeitsmedizinische Aspekte der Arbeits(-zeit)organisation, Skeletterkrankungen und Beruf. Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin, 32. Jahrestagung. S. 730-734. Gentner, Stuttgart 1992.
- [15] *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. Clin. Biomech. 13 (1998), Suppl. 2, S1-S36
- [16] *Hofmann, F.; Bolm-Audorff, U.; Dupuis, H.; Rehder, U.*: Berufsbedingte Wirbelsäulenerkrankungen – Biomechanik, Epidemiologie, Exposition, Klinik und Begutachtung. Zbl. Arbeitsmed. 52 (2002), S. 78-103
- [17] *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), S. 101-111
- [18] *Seidel, H.*: Begründung und Erläuterungen zur BK-Nummer 2110. In: Erkrankungen der Wirbelsäule bei körperlicher Schwerarbeit und Ganzkörperschwingungen. Erläuterungen zu den neuen BK-Nummern 2108, 2109, 2110 und zur EG-Richtlinie 90/269/EWG (Heben und Tragen von Lasten). S. 45-61. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Berlin (1993)
- [19] 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. International Organisation for Standardization, Genf, Schweiz, 2004
- [20] *Fritz, M.*: Simulating the response of a standing operator to vibration stress by means of a biomechanical model. J. Biomech. 33 (2000), S. 795-802
- [21] *Fritz, M.*: Description of the relation between the forces acting in the lumbar spine and whole-body vibrations by means of transfer functions. Clin. Biomech. 15 (2000), S. 234-240
- [22] *Fritz, M.*: Dynamic properties of the biomechanical model of the human body – Influence of posture and direction of vibration stress. J. Low Freq. Noise Vib. Active Contr. 24 (2005), S. 233-249

- [23] *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), S. 354-363
- [24] *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. *Appl. Ergon.* 36 (2005), S. 481-488
- [25] *Fritz, M., Geiß, O.; Fischer, S.:* Vergleich der Schwingungsbewertung von Ganzkörper-Schwingungen gemäß VDI 2057 von 1987 mit einer kraftbezogenen Bewertung anhand der Expositionsdaten einer epidemiologischen Studie. In: *Humanschwingungen, VDI-Berichte* 2002. S. 307-322. VDI, Düsseldorf 2007
- [26] *Fritz, M.; Geiß, O.:* Berücksichtigung von Wirbelsäulenkräften bei der Bewertung von Ganzkörper-Schwingungen und bei der Risikoabschätzung. Abstract: *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 43 (2008), S. 69. Manuskript in: *Bauer, X.; Glensk, E.* (Hrsg.): *Ethische Fragen der Arbeitsmedizin. Dokumentation der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. in Verbindung mit ICOH Mid-term Meeting 2008.* S. 763-764. DGAUM, Aachen 2008
- [27] *Fritz, M.:* Modelle zur Nachbildung der mechanischen Eigenschaften des menschlichen Körpers bei Belastung durch Ganz-Körper-Schwingungen. *Zbl. Arbeitsmed.* 53 (2003), S. 524-535
- [28] *Fritz, M.; Geiß, O.; Fischer, S.:* Vergleich der Schwingungsbewertung von Ganzkörper-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), S. 553-556. GfA-Press, Dortmund 2007
- [29] VDI 2057, Blatt 2: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Bewertung. Beuth, Berlin 1987
- [30] VDI 2057, Blatt 3: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Beurteilung. Beuth, Berlin 1987
- [31] *Donati, P.; Boulanger, P.:* Technical preventive measures against whole-body vibration. In: *Vibration am Arbeitsplatz – Schlussbericht zum 3. Internationalen Kolloquium der Internationalen Sektion der IVSS zur Forschung über die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten* Wien 1989, S. 143-147
- [32] *Dupuis, H.:* Ein Dosis-Verfahren zur Bestimmung der Schwingungsbelastung als berufliche Voraussetzung bandscheibenbedingter Erkrankungen der Lendenwirbelsäule. In: *Triebner, G.; Stelzer, O.* (Hrsg.): *Dokumentation über die Verhandlung der DGAUM, 33. Jahrestagung.* S. 307-311. Gentner, Stuttgart 1993

- [33] Dupuis, H.; Hartung, E.: Arbeitstechnische Voraussetzungen der Berufskrankheit Nr. 2110. Die BG (1994) Nr. 5, S. 346-349
- [34] Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.: Epidemiologische Studie „Ganzkörpervibration“. Verbundforschungsvorhaben im Auftrag des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften – Abschlußbericht. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1999
- [35] Griffin, M. J.; Whitham, E. M.: Individual variability and its effect on subjective and biodynamic responses to whole-body vibration. J. Sound Vib. 58 (1978), S. 239-250
- [36] Matsumoto, Y.; Griffin, M. J.: Nonlinear subjective and biodynamic responses to continuous and transient whole-body vibration in the vertical direction. J. Sound Vib. 287 (2005), S. 919-937
- [37] DIN 45 676: Mechanische Eingangsimpedanzen und Übertragungsfunktionen des menschlichen Körpers. Beuth, Berlin 2003
- [38] Filler, T. J.; Peuker, E. T.: Aspekte der klinischen Anatomie der Wirbelsäule unter besonderer Berücksichtigung der Lendenwirbelsäule und sportlicher Belastungen. Sportorthop. Sporttraumatol. 20 (2004), S. 13-18
- [39] Subashi, G. H. M. J.; Nawayseh, N.; Matsumoto, Y.; Griffin, M. J.: Nonlinear subjective and dynamic responses of seated subjects exposed to horizontal whole-body vibration. J. Sound Vib. 321 (2009), S. 416-434
- [40] Dupuis, H.: Arbeitsplatzbezogene Konzepte zu Ganzkörper-Vibrationen. In: Wirbelsäule und Beruf – eine interdisziplinäre Aufgabe. Kongressbericht zum Forum der gewerblichen Berufsgenossenschaften im Rahmen der REHA (1994) 93, S. 40-49
- [41] Jäger, M.; Luttmann, A.: Biomechanisch begründete Richtwerte zur Begrenzung des Überlastungsrisikos der Lendenwirbelsäule beim Handhaben von Lasten unter besonderer Wertung des NIOSH-Kriteriums. In: Münzberger, E. (Hrsg.): Dokumentationsband über die Verhandlungen der DGAUM, 36. Jahrestagung. S. 125-128. Rindt, Fulda 1996
- [42] Schäfer, K.; Hartung, E.: 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 3: Vorschlag zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren bei kombinierter Belastung mit Ganzkörper-Schwingungen. Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed. 34 (1999), S. 143-147

Anhang: Formelzeichen

Abkürzung	Erläuterung
$a_{wy(8)}$	Beurteilungsbeschleunigung in horizontaler y-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 (2002)
$a_{wz(8)}$	Beurteilungsbeschleunigung in vertikaler z-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 (2002)
A(8)	Tagesexposition gemäß der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007
a_{Fy}	kraftbezogene Schwingungskenngröße in horizontaler y-Richtung für das Bewegungssegment L3-L4
$a_{Fy(8)}$	kraftbezogene Beurteilungsgröße in horizontaler y-Richtung für das Bewegungssegment L3-L4
a_{Fz}	kraftbezogene Schwingungskenngröße in vertikaler z-Richtung für das Bewegungssegment L3-L4
$a_{Fz(8)}$	kraftbezogene Beurteilungsgröße in vertikaler z-Richtung für das Bewegungssegment L3-L4
$a_{FzL5-S1}$	kraftbezogene Schwingungskenngröße in vertikaler z-Richtung für das Bewegungssegment L5-S1
$a_{Fz(8)L5-S1}$	kraftbezogene Beurteilungsgröße in vertikaler z-Richtung für das Bewegungssegment L5-S1
eVDV	estimated vibration dose value (ISO 2631-1, 1997)
KY_{eq}	Energieäquivalenter Mittelwert der Bewerteten Schwingstärke in horizontaler y-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 und 2 (1987)
KY_r	Beurteilungs-Schwingstärke in horizontaler y-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 und 2 (1987)
KZ_{eq}	Energieäquivalenter Mittelwert der Bewerteten Schwingstärke in vertikaler z-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 und 2 (1987)
KZ_r	Beurteilungs-Schwingstärke in vertikaler z-Richtung nach VDI 2057, Blatt 1 und 2 (1987)
VDV(EUR_RL)	VDV für die Schwingungsrichtung mit der höchsten Belastung pro Untersuchungsintervall laut EU-Richtlinie 2002/44/EG

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Mittelstraße 51

10117 Berlin

Telefon: +49 30 288763800

Fax: +49 30 2887663808

E-Mail: info@dguv.de

Internet: www.dguv.de