

**Wissenschaftlicher Schlussbericht
zum Forschungsvorhaben:**

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

**Teilprojekt A:
Anwendung und Validierung der Verfahren nach ISO 2631-1:1997,
VDI 2057-1:2002, EU-Richtlinie 2002/44/EG „Ganzkörpervibration“ sowie
Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung 2007**

Gert Notbohm, Sieglinde Schwarze, Martin Albers

Inhalt	Seite
Inhaltsverzeichnis	2
1 Ausgangslage und Fragestellung	5
2 Methodisches Vorgehen	8
2.1 Rekonstruktion der Ur-Daten	8
2.2 Berechnung der frequenzbewerteten Beschleunigungen nach ISO 2631-1:1997	9
2.3 Neuberechnung von Tages-Belastungskennwerten	9
2.4 Bewertung der Schwingungsbelastung während des gesamten Arbeitslebens	12
2.4.1 Maximaler und durchschnittlicher Tages-Belastungswert	12
2.4.2 Dosiswerte	13
2.5 Schwellenwerte der Schwingungsbelastung	15
2.6 Zusammenhänge zwischen Schwingungsbelastung und medizinischen Daten	16
2.6.1 Medizinische Zielgrößen	16
2.6.2 Epidemiologische Kennwerte	16
2.6.2.1 Relatives Risiko und Prävalenzratenverhältnis	16
2.6.2.2 Odds Ratio	18
2.6.3 Statistische Analyseverfahren	19
2.6.3.1 Multivariate Regressionsanalysen	19
2.6.3.2 Logistische Regression	19
3 Neue Kennwerte der Schwingungsbelastung des GKV-Kollektivs	22
3.1 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertungen	22
3.1.1 Mittelwertvergleich der alten und neuen frequenzbewerteten Beschleunigungen	22
3.1.2 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertung nach Tätigkeitsgruppen	25
3.2 Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte	27
3.2.1 Häufigkeitsverteilungen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte	27
3.2.2 Interkorrelationen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte	29
3.2.3 Vergleich von <i>Tagesexposition A(8)</i> und Beurteilungs-Beschleunigung $a_{wz(8)}$	29

3.2.4	Korrelationen zwischen den Achsen bei beschleunigungs- und kraftbezogenen Beurteilungsgrößen	32
3.3	Vergleich verschiedener Dosismodelle und Schwellenkriterien	33
3.3.1	Korrelationen zwischen den Dosismodellen	33
3.3.2	Vergleich von Schwellenwerten	34
4	Zusammenhangsanalysen Schwingungsbelastung und Lumbalsyndrom	36
4.1	Analysen mit dem maximalen Tages-Belastungskennwert des Arbeitslebens	36
4.1.1	Zielkriterium „Lumbalsyndrom“	36
4.1.1.1	Analysen mit der <i>Tagesexposition</i> $A(8)$	36
4.1.1.2	Vergleich mit weiteren Belastungsmaßen	38
4.1.2	Bereinigung der Stichprobe	41
4.1.2.1	Auswirkungen bei verschiedenen Belastungsmaßen	41
4.1.2.2	Aussagekraft der kraftbezogenen Belastungskenngrößen	43
4.1.3	Zielkriterium „Lokales Lumbalsyndrom“	45
4.1.4	Zielkriterium „Lumbales Wurzelsyndrom“	46
4.2	Durchschnittliche Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens	47
4.3	Auswirkung verschiedener Schwellenwerte	50
4.3.1	Schwellenwerte für die Kenngrößen <i>Tagesexposition</i> $A(8)$ und <i>Beurteilungsbeschleunigung</i> $a_{wz(8)}$	50
4.3.2	Schwellenwerte für Vektorensummen $a_{wv(8)}$	53
4.4	Analysen mit Dosiswerten	55
4.4.1	Regressionsanalysen mit verschiedenen Schwellen- und Dosiswerten	55
4.4.2	Vergleich von Belastungsgruppen bei verschiedenen Schwellenwerten	60
4.4.3	Vergleich verschiedener Dosisgruppen bei einem Schwellenwert von <i>Tagesexposition</i> $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$	63
4.4.4	Betrachtung der Unterdiagnosen „lokales Lumbalsyndrom“ und „lumbales Wurzelsyndrom“	65
4.5	Zielkriterium: zusammenfassende Beurteilungen	67
5	Zusammenhangsanalysen: Schwingungsbelastung und Röntgenbefunde	70
5.1	Vorbemerkung	70
5.2	Röntgenologische Diagnosen	70
5.2.1	Häufigkeit der Diagnosen	70

5.2.2	Regressionsanalytische Zusammenhänge zwischen GKV und Röntgendiagnosen	71
5.2.3	Prävalenz degenerativer LWS-Schäden bei Hochbelasteten	74
5.3	Auffälligkeiten der Diskushöhen	75
5.4	Anzahl und Lokalisation der betroffenen Wirbelsäulen-Segmente	77
5.5	Zusammenfassende Beurteilung des Röntgenbefundes	81
6	Ergebnisse der Follow-Up-Untersuchung	83
6.1	Kollektiv der Follow-Up-Untersuchung	83
6.2	Schwingungsbelastung des Kollektivs der Follow-Up-Untersuchung	84
6.3	Lumbalsyndrom-Diagnosen in der Follow-Up-Untersuchung	85
6.3.1	Prävalenz in der Follow-Up-Untersuchung	85
6.3.2	Inzidenzraten in der Follow-Up-Untersuchung	86
7	Diskussion und Schlussfolgerungen	89
7.1	Modifizierung der Frequenzbewertung in den einschlägigen Richtlinien	89
7.2	Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte	89
7.3	Zusammenhang der Tages-Belastungskennwerte mit Wirkungsparametern	90
7.4	Beurteilung der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen	91
7.5	Schwellenwerte gesundheitsrelevanter Schwingungsbelastung	92
7.6	Bewertung von Schwingungsdosen	93
7.7	Röntgenologische Diagnosen	94
7.8	Unterdiagnosen „lokales Lumbalsyndrom“ und „lumbales Wurzelsyndrom“	95
7.9	Stellenwert der Ergebnisse	96
8	Zusammenfassung	98
9	Regelwerke und Literatur	100

1 Ausgangslage und Fragestellung

In der Bewertung von Ganzkörpervibrationen (GKV) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Menschen, die in der Bundesrepublik Deutschland noch bis 2002 grundsätzlich auf K-bewerteten Schwingstärken beruhte, haben sich im Zuge der europäischen Harmonisierung grundlegende Veränderungen 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 Schwing-Beschleunigung an der Arbeitsmaschine wurde mit den Neufassungen der Richtlinien ISO 2631-1 [1997] und VDI 2057, Bl. 1 [2002] 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.

3) 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 in der Prävention wie in der BK-Anerkennung die Erfassung von Schwingungsbelastungen in vertikaler Richtung dominierte, wird auch in der EU-Richtlinie 2002/44/EG zu „Ganzkörpervibration“ die höchste der drei Schwingungsrichtungen als Grundlage der Expositionsbeurteilung für die Prävention zu Grunde gelegt. In der neuen deutschen Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) von 2007 ist diese Regelung mittlerweile übernommen worden.

4) Ein spezielles Schwingungsbewertungsverfahren, das auf den unmittelbar in der Wirbelsäule wirkenden Kräften basiert, welche als Ursache für die Entstehung von schwingungsbedingten degenerativen Erkrankungen angesehen werden, wurde von Fritz (2003) entwickelt (siehe auch Teilprojekt B). 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 z. T. neue Grenzwerte eingeführt, deren praktische Relevanz weiter abzuklären ist, z. B. der „Auslösewert“ von $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$ in der genannten EU-Richtlinie und in der LärmVibrationsArbschV oder die „Untergrenze der Zone erhöhter Gesundheitsgefährdung“ von $0,45 \text{ m/s}^2$ in VDI 2057-1:2002. 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 so genannte 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 aktuelle 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 (Bergmann et al. 2007).

In dieser Situation hat sich eine Reanalyse des Datenmaterials der sog. GKV-Studie (Epidemiologische Studie „Ganzkörpervibration“, Schwarze et al. 1999) 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 Befra-

gung sowie klinischer und röntgenologischer Untersuchung der 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. es wurden die Schwingungsexpositionen für diesen Zeitraum erfasst und die gleichen medizinischen Untersuchungen zur Beurteilung der Wirbelsäule durchgeführt. Auch diese Daten standen komplett zur Verfügung, so dass auch eine erneute Analyse der medizinisch beobachtbaren LWS-Veränderungen in diesem Vier-Jahres-Zeitraum möglich ist (- für Kurzdarstellungen der GKV-Studie s. a. Schwarze et al. 1997, 1998 -).

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 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 Lendenwirbelsäule (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 (TABs) 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. Schwarze et al. 1999, Anlage 1). Bei den Exponierten handelte es sich um Fahrer von Gabelstaplern, Lastkraftwagen oder Erdbaumaschinen. Die erhobenen Daten wurden dann weiter verarbeitet, indem Herr Dr.-Ing. Fischer (BGIA) den benannten Arbeitsmaschinen/-fahrzeugen und Einsatzbedingungen repräsentative Bewertete Schwingstärken K_{eq} aus der BIA-Schwingungsdatenbank zuordnete und Herr Dr. 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 unser Institut 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 Herrn Dr. Hartung stellte sich damit für die jetzige Reanalyse der Daten als erstes das Problem, einen Zugriff auf die Original-Erhebungsbögen der TABs zu erhalten, da nur sie alle notwendigen Informationen zur Identifizierung des Arbeitsgerätes enthielten. Durch intensive Recherche aller aktuell Beteiligten konnte ein Großteil der Bögen sicher gestellt 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 TABs und sogar durch telefonische Nachforschung bei einzelnen Teilnehmern der GKV-Studie geklärt, so dass letzten Endes in Übereinstimmung mit Herrn Dr. 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 berücksichtigt werden. Die Bewerteten Schwingstärken wurden in energieäquivalente frequenzbewertete Beschleunigungen a_{we} mit der neuen Frequenzbewertung W_k , W_d nach dieser ISO-Richtlinie umgerechnet, indem die jeweiligen Korrekturfaktoren in allen drei Schwingungsrichtungen für jeden Zeitraum angewendet wurden, die gerätebezogen in einer Liste des BGIA veröffentlicht sind (Christ et al. 2006). Etwaige Unklarheiten über die korrekte Zuordnung der erfragten Arbeitsgeräte zu den Klassifizierungen der Liste wurden direkt mit dem BGIA geklärt. Am Ende ergab sich für die 388 Studienteilnehmer eine neue Schwingungsbelastungsdatei mit Werten aus insgesamt 1.477 getrennt erhobenen Zeiträumen, die im Folgenden als **Tätigkeitszeiträume** bezeichnet werden. Da in der VDI-Richtlinie 2057, Bl. 1:2002 (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 Abschn. 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_r in z-Richtung mit unterschiedlichen Schwellenwerten der Mindestexposition beruhten. In den letzten Jahren haben sich im Zuge der europäischen Harmonisierung und der darauf basierenden Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung 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 Abschn. 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 aner-

kannt (ISO 2631-1:1997, VDI 2057 Bl. 1:2002) und liegt den aktuellen Richtwertkurven zur Gesundheitsgefährdung bei langjähriger Belastung zugrunde. In VDI 2057 Bl. 1:2002 werden z. B. 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 (S. 29).

- 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 8 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 Bl. 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) werden dort 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-RL 2002/44/EG und geht teilweise darüber hinaus, weil in der EU-RL auch für die z-Achse nur ein Expositionsgrenzwert von $1,15 \text{ m/s}^2$ vorgesehen ist.

- Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag):

Der *Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$* (Vektorbetrag) der frequenzbewerteten Beschleunigungen in den drei Richtungen kann nach ISO 2631-1 (S. 13 f.) und VDI 2057 Bl. 1 (S. 30) ebenfalls bei der Beurteilung gesundheitlicher Risiken herangezogen werden, z. B. bei ähnlich hoher Schwingungsintensität in 2 oder 3 Richtungen. Die allgemeine Formel lautet

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

wobei in den genannten ISO- und VDI-Richtlinien Übereinstimmung 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, so dass der *Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$* 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 der ISO-Richtlinie 2631-1:1997 wird als zusätzliche Methode der Schwingungsbewertung der *estimated vibration dose value (eVDV)* angeführt, bei dessen Berechnung die Beschleunigung mit der 4. Potenz einfließt, so dass Beschleunigungsspitzen stärker berücksichtigt werden. Der Wert kann nach ISO-2631-1:1997 (Anhang B.3) wie folgt aus dem a_{we} abgeleitet werden:

$$eVDV = 1,4 \cdot a_{we} \cdot T^{1/4} \quad (\text{in m/s}^{1.75})$$

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

$$\begin{aligned} eVDV &= 1,4 \cdot a_{we} \cdot (3600 \cdot 8)^{0,25} \text{ m/s}^{1.75} = 1,4 \cdot 0,8 \cdot 13,03 \text{ m/s}^{1.75} \\ &= 0,8 \cdot 18,24 \text{ m/s}^{1.75} = 14,59 \text{ m/s}^{1.75} \end{aligned}$$

Als Anhaltswerte für die Unter- und Obergrenze des Bereichs möglicher Gesundheitsgefährdung ergeben sich aus den Richtwertkurven laut Anhang B.3 der ISO-Richtlinie Dosiswerte von 8,5 bzw. 17 $\text{m/s}^{1.75}$ für einen Arbeitstag. Die Größe *eVDV* soll im Folgenden analog zur *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ nur in z-Richtung berechnet werden.

- Vibration dose value (VDV) nach EU-RL:

Der *Vibrationsdosiswert (VDV)* wird in der EU-RL 2002/44/EG eingeführt als eine alternative Berechnung der Tagesdosis $A(8)$ auf Grundlage der 4. Potenz der Beschleunigung. Den Mitgliedsländern ist grundsätzlich die Wahl des Berechnungsmodells freigestellt. Im Prinzip soll der *VDV* lt. 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-RL angegebenen Grenz- bzw. Auslösewerten auf $a_{w(8)}$ -Basis von 1,15 bzw. 0,5 m/s^2 .

- kraftbezogene Beurteilungsgröße a_F :

Schließlich ist noch die eingangs erwähnte kraftbezogene Beurteilung der Ganzkörperschwingungen a_F zu berücksichtigen (Fritz 2003, Fritz et al. 2003), deren Aussagekraft ja im Teil-

projekt B dieses Forschungsvorhabens intensiv untersucht wird. Im vorliegenden Teilprojekt A sollen die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen in z- und y-Achse nur in einigen 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 auch hier in den Berechnungen 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 zu besserer 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 WS-Zustand 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 durchschnittlicher Tages-Belastungswert 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_r -Wertes aus der Schwingungsbelastung während des gesamten Arbeitslebens ein signifikant erhöhtes Risiko einer Diagnose „Lumbalsyndrom“ nachzuweisen war (Schwarze et al. 1999, 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 in den Zusammenhangsanalysen für jeden der oben eingeführten Tages-Schwingungsbelastungskennwerte zum einen der maximale Wert aus der Arbeitsanamnese verwendet (Abschn. 4.1) und zum anderen ein Durchschnittswert des gesamten Arbeitslebens, der in Abschn. 4.2 behandelt wird.

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. VDI 2057, Bl.1:2002, S. 14 f.). Aus den in Abschn. 2.3 dargestellten Tages-Schwingungsbelastungskennwerten ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten der Berechnung einer Gesamtdosis, die auch im Rahmen der früheren GKV-Studie (Schwarze et al. 1999) diskutiert, aber nicht systematisch verglichen wurden. Geht man grundsätzlich von einem 8-stündigen Arbeitstag als Bezugsgröße aus, kommen folgende Dosismodelle in Frage, 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 dt. Verordnung, also höchster $a_{w(8)}$ -Wert aus den 3 Achsen und Korrekturfaktor $k = 1,4$ für k_x und k_y

$$D = \sum_{i=1}^n a_{w(8)i}^2 \cdot T_i \quad \text{mit } a_{w(8)} = \max(k_x \cdot a_{wx}, k_y \cdot a_{wy}, k_z \cdot a_{wz}) \quad \text{mit } k_x = k_y = 1,4 \quad \text{und } k_z = 1.$$

D3) Grundlage: *Schwingungsgesamtwert* $a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag) ohne Korrektur k für die x- und y-Achse

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

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

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 $k_x = k_y = 1,4$ und $k_z = 1$

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

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

mit t_i = Belastungszeit in Sekunden

D6) Dosiswert basierend auf dem VDV mit der stärksten Richtung pro Untersuchungsintervall lt. EU-Richtlinie:

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

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

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

mit $k_x = k_y = 1,4$ und $k_z = 1$

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 (vgl. Schwarze et al. 1999, 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 Schädigungspotential 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 (VDI 2057:2002, Bl. 1, S. 29)
- 0,5 m/s² als Auslösewert nach LärmVibrationsArbSchV bzw. EU-Richtlinie 2002/44/EG
- 0,63 m/s² als Wert etwa in der Mitte der Zone erhöhter Gesundheitsgefährdung nach VDI 2057; im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 wird ab dieser Marke bei langjähriger Exposition ein Gesundheitsrisiko angenommen. Auch die Ergebnisse der früheren GKV-Studie (Schwarze et al. 1999, S. 185 ff.) weisen auf ein erhöhtes Risiko ab dieser Schwelle hin.
- 0,8 m/s² als Schwelle einer deutlichen Gesundheitsgefährdung lt. VDI 2057-1:2002 und als Expositionsgrenzwert $A(8)$ in z-Richtung nach der LärmVibrationsArbSchV

- $1,15 \text{ m/s}^2$ als Expositionsgrenzwert $A(8)$ der EU-Richtlinie 2002/44/EG.

Bzgl. der Dosiswerte, die auf dem VDV beruhen, bieten sich als Schwellenkriterium die Werte aus der EU-Richtlinie an:

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

2.6 Zusammenhänge zwischen Schwingungsbelastung und medizinischen Daten

2.6.1 Medizinische Zielgrößen

Als wesentlichstes Zielkriterium für degenerative Veränderungen der Lendenwirbelsäule (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 auf Grund von Anamnese, klinischer und röntgenologischer Diagnose zusammenfassend getroffen wurde (vgl. Schwarze et al. 1999, S. 40 ff., nach Krämer 1986, s. a. 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 bzgl. 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 (vgl. Rothman 1986, Faus-Kessler et al. 1992, Kreienbrock et al. 2005). 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 größer als 1 spricht für einen schädigenden Einfluss der Exposition im Hinblick auf die Erkrankungswahrscheinlichkeit, ein RR kleiner als 1 gegen einen schädigenden Einfluss. Bei einem RR von genau 1 besteht kein Einfluss der Exposition.

Tab. 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

Im Zahlenbeispiel von Tab. 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.

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.

Einen außerordentlich wichtigen Confounder in Zusammenhangsanalysen zwischen Belastungen und chronischen Erkrankungen stellt das Lebensalter dar. 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 an Hand von separaten Kreuztabellen für die einzelnen Altersschichten eine Gewichtung vornimmt, so dass 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: $Odds(P) = \frac{P}{1-P}$

d. h. Krankheitswahrscheinlichkeit geteilt durch die Gegenwahrscheinlichkeit. Beispiele: Bei $P = 0,5$ ergibt sich ein Odds von 1, das 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 Tab. 1 wäre der Quotient A/B die Chance für Exponierte in Bezug auf die Erkrankung und C/D die Chance für Nichtexponierte. Der Quotient dieser Chancen ist das Odds Ratio:

$$OR = A/B / C/D = AD / BC = 24 \times 16 / 12 \times 8 = 384 / 96 = 4,0.$$

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 Tab. 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 (Pospeschill 1996):

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 sog. 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. Das 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 mit 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 diese 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 Auswahlritten 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 Backhaus et al. 2000, S. 112 ff.). 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; d. h. es ist abzulesen, wie viel Varianz der abhängigen Variablen durch die betrachteten unabhängigen Variablen erklärt wird (vgl. Bühl & Zöfel 2002, S. 354 und Backhaus et al. 2000, S. 133).

In der epidemiologischen Literatur wird heute häufig das **Akaike Information Criterion (AIC)** als Methode zur Auswahl des besten Regressionsmodells empfohlen (Burnham & Anderson 2002, Forster 2000). 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 ablesen 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 wird von den Statistikprogrammen eine Teststatistik berechnet (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 nichtexponierter Personen angeben, welches 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 größer 1 entsprechen einer Erhöhung der Chance, solche unter 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 %-tiger 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.

3 Neue Kennwerte der Schwingungsbelastung des GKV-Kollektivs

3.1 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertungen

3.1.1 Mittelwertvergleich der alten und neuen frequenzbewerteten Beschleunigungen

Abb. 1 gibt einen ersten Eindruck von den Mittelwertunterschieden zwischen den Originaldaten der GKV-Studie und den nach der ISO-Richtlinie korrigierten Messwerten, die sich für die *energieäquivalenten Mittelwerte der frequenzbewerteten Beschleunigung* (a_{we}) bzw. die *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{w(8)}$ in den 3 Achsen ergeben.

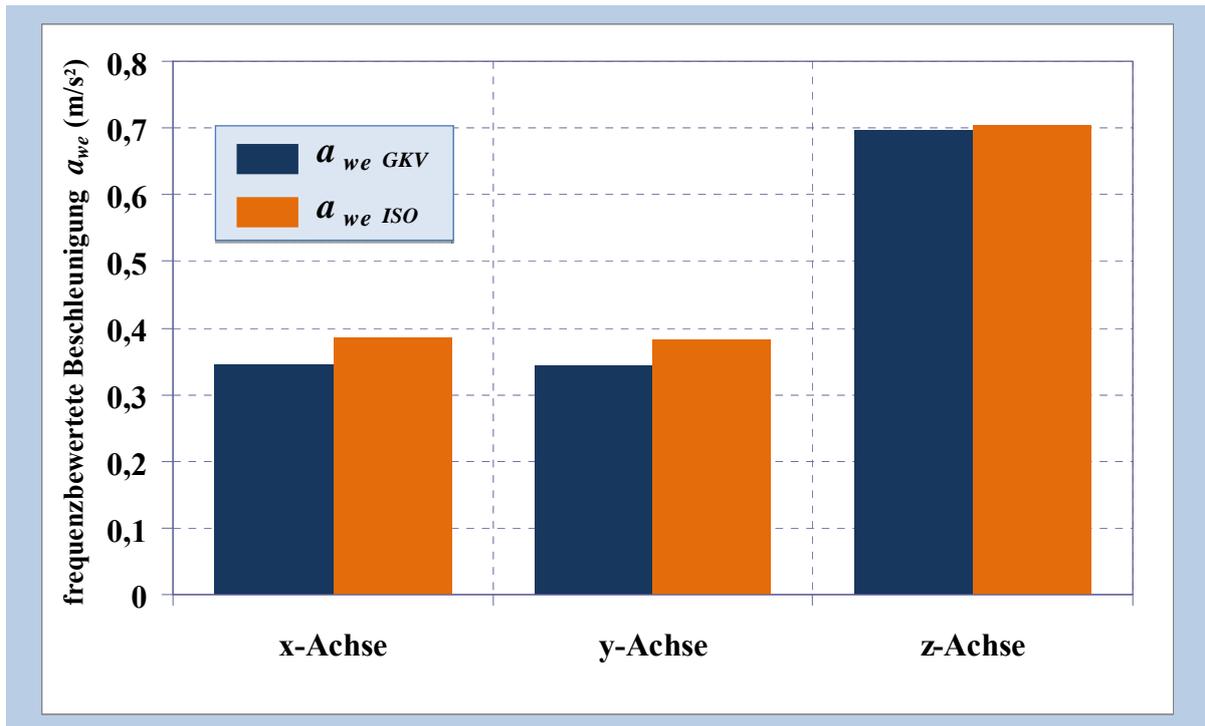
Die folgenden Tabellen 2 und 3 geben die grundlegenden statistischen Kennwerte ausführlicher wieder. In beiden Tabellen wird deutlich, dass die Korrekturfaktoren in dieser Stichprobe bei den Schwingungsbelastungen in x- und y-Richtung zu einem deutlichen Anstieg der Werte führen, während sich in z-Richtung im Mittel kaum etwas bewegt. Begründet sind diese Unterschiede in der vorgenommenen 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- wie in der y-Achse ein Anstieg um 11,6 %, in der z-Achse dagegen nur um 1,0 %.

Allerdings wird in VDI-2057, Bl. 1:2002 auch festgestellt, dass gerade in z-Richtung je nach Frequenzspektrum deutliche Änderungen in *beide* Richtungen erwartet werden können. Zur genaueren Abklärung der Auswirkungen der Korrekturfaktoren ist in Tab. 4 dargestellt, wie sich der Wert der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{w(8)}$ für die 1.477 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*, 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* 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 $0,24 \text{ m/s}^2$.

Energieäquivalente Mittelwerte der frequenzbewerteten Beschleunigung a_{we}



Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$

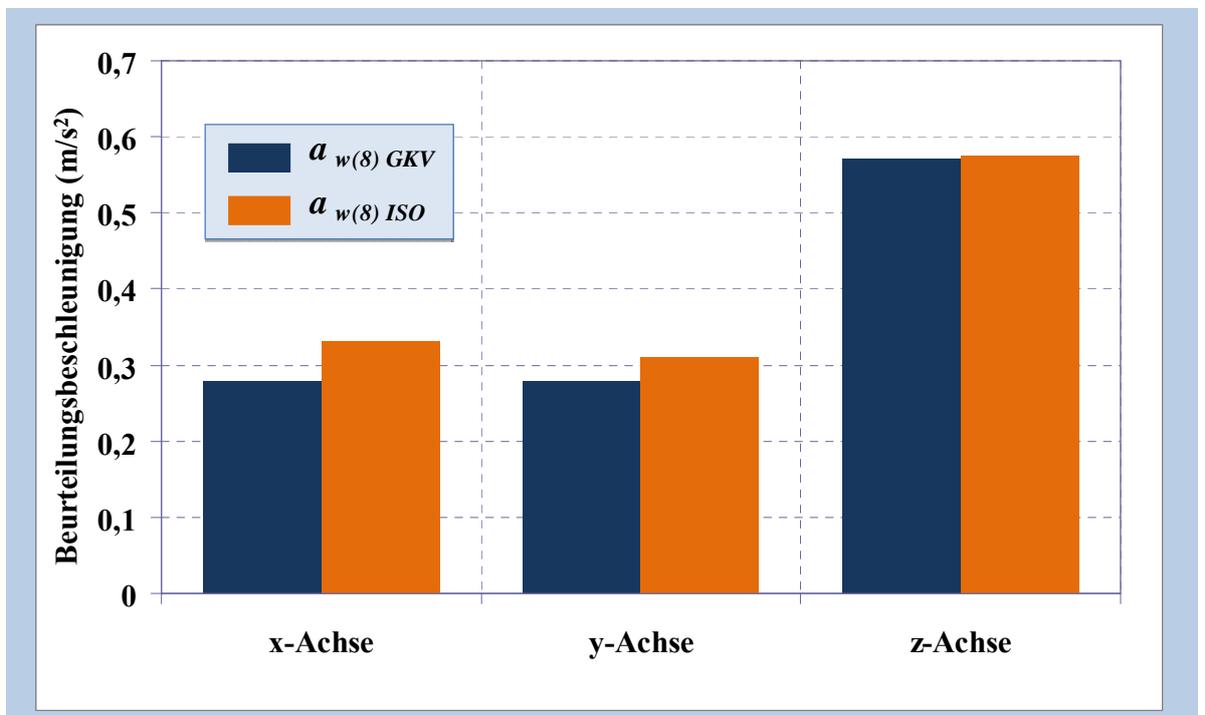


Abb. 1: Mittelwerte der energieäquivalenten frequenzbewerteten Beschleunigung a_{we} (oben) und der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ (unten) in den drei Schwingungsachsen - Originalwerte der früheren GKV-Studie (Schwarze et al. 1999) und die nach ISO 2631-1:1997 korrigierten Werte (n = 1.477 Tätigkeitszeiträume)

Tab. 2: Mittelwerte der energieäquivalenten frequenzbewerteten Beschleunigung (a_{wex} , a_{wey} , a_{wez}) für die Originalwerte der früheren GKV-Studie (Schwarze et al. 1999) und die nach ISO 2631-1:1997 korrigierten Werte (n = 1.477 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

Tab. 3: Mittelwerte der Beurteilungsbeschleunigung $a_{w(8)}$ in den drei Schwingungsrichtungen für die Originalwerte der früheren GKV-Studie (Schwarze et al. 1999) und der nach ISO 2631-1:1997 korrigierten Werte (n = 1.477 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

Tab. 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; Anzahl der jeweiligen Tätigkeitszeiträume absolut und prozentual (n = 1.477)

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 $\geq 0,2$	---	---	3 (0,2 %)

3.1.2 Auswirkungen der neuen Frequenzbewertung nach Tätigkeitsgruppen

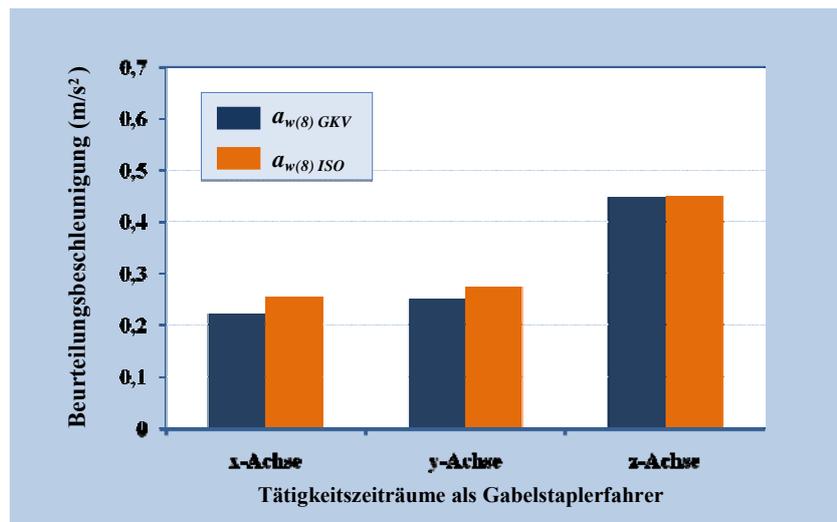
Da die Korrekturfaktoren insbesondere in z-Richtung sehr stark vom konkreten Arbeitsgerät oder Fahrzeug abhängen, soll abschließend betrachtet werden, welche Unterschiede zwischen den alten und den korrigierten *Beurteilungsbeschleunigungen* deutlich werden, wenn die Schwingungszeiträume nach Tätigkeiten 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.)

Tab. 5: Mittelwerte der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{w(8)}$ in den drei Schwingungsrichtungen für die drei Fahrergruppen - Originalwerte der früheren GKV-Studie (Schwarze et al. 1999) und der nach ISO 2631-1:1997 korrigierten Werte (n = 1.477 Tätigkeitszeiträume)

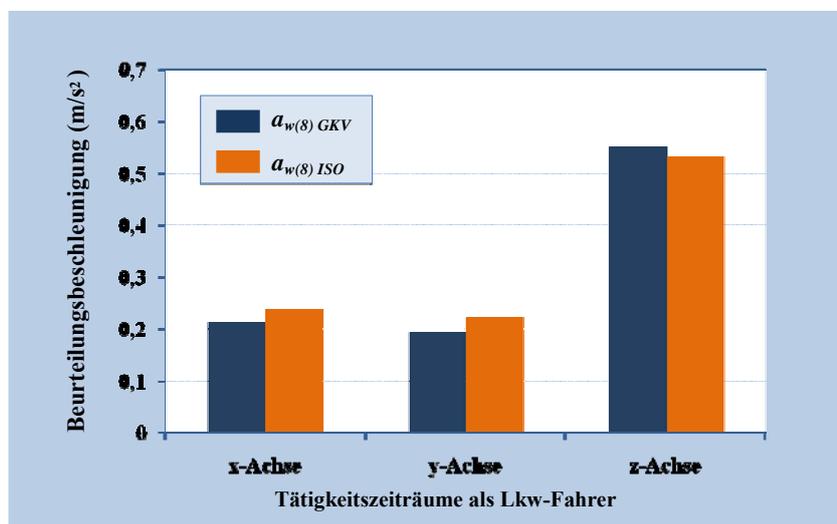
Fahrergruppe	n	x-Achse m/s ²		y-Achse m/s ²		z-Achse m/s ²	
		$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO	$a_{w(8)}$ GKV	$a_{w(8)}$ ISO
Gabelstapler	384	0,222	0,254	0,250	0,274	0,448	0,450
Lastkraftwagen	372	0,213	0,239	0,193	0,223	0,551	0,532
Erdbaumaschinen	721	0,342	0,378	0,337	0,374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

Wie Tab. 5 zeigt, ergeben sich in der x- und y-Richtung bei den Lkw-Fahrern die niedrigsten und bei den Erdbaumaschinenfahrern die höchsten Ausgangswerte. Der Anstieg der Werte durch die Korrekturfaktoren ist für alle drei Gruppen 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*, und die Erdbaumaschinenfahrer zeigen vom höchsten Ausgangswert aus einen weiteren leichten Anstieg. In Abb. 2 sind die Veränderungen für die drei Fahrergruppen noch einmal anschaulich gegenübergestellt.

Gruppe der Gabelstaplerfahrer (n = 384 Tätigkeitszeiträume)



Gruppe der Lkw-Fahrer (n = 372 Tätigkeitszeiträume)



Gruppe der Erdbaumaschinenfahrer (n = 721 Tätigkeitszeiträume)

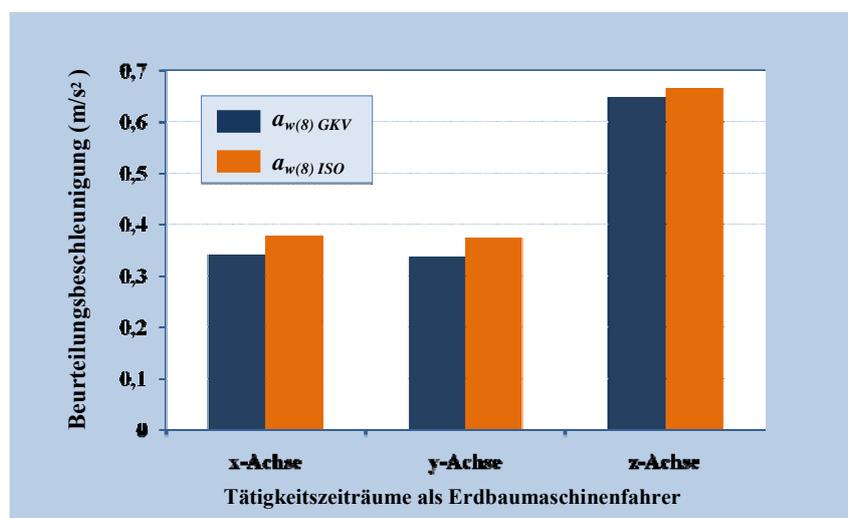


Abb. 2: Mittelwerte der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{w(8)}$ in den drei Schwingungsrichtungen für die drei Tätigkeitsgruppen – Originalwerte der früheren GKV-Studie (Schwarze et al.) und der nach ISO 2631-1:1997 korrigierten Werte (insgesamt n = 1.477 Tätigkeitszeiträume)

3.2 Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte

3.2.1 Häufigkeitsverteilungen der Tages-Schwingungsbelastungskennwerte

Tab. 6 gibt Kennwerte der Häufigkeitsverteilung von verschiedenen Belastungsmaßen für die 1.477 Tätigkeitszeiträume der Studie wieder. Abb. 3 zeigt zur graphischen 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.

Tab. 6: Häufigkeitsverteilung (Minimum, Maximum, Quartile) von sechs verschiedenen Belastungsmaßen für die Gesamtheit der Tätigkeitszeiträume (n = 1477)

Belastungsmaß	Min.	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 lt. LärmVibrations-ArbschV	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 lt. 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 3 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 *Tagesexposition* $A(8)$ führt. An beiden Maßen lässt sich aber auch ablesen, dass mehr als die Hälfte aller erhobenen Zeiträume eine *Tagesexposition* $a_{wz(8)}$ oder $A(8) > 0,5 m/s^2$ 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 m/s^2 .

Bzgl. der Vektorenberechnung zeigt sich in der Grafik, 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.

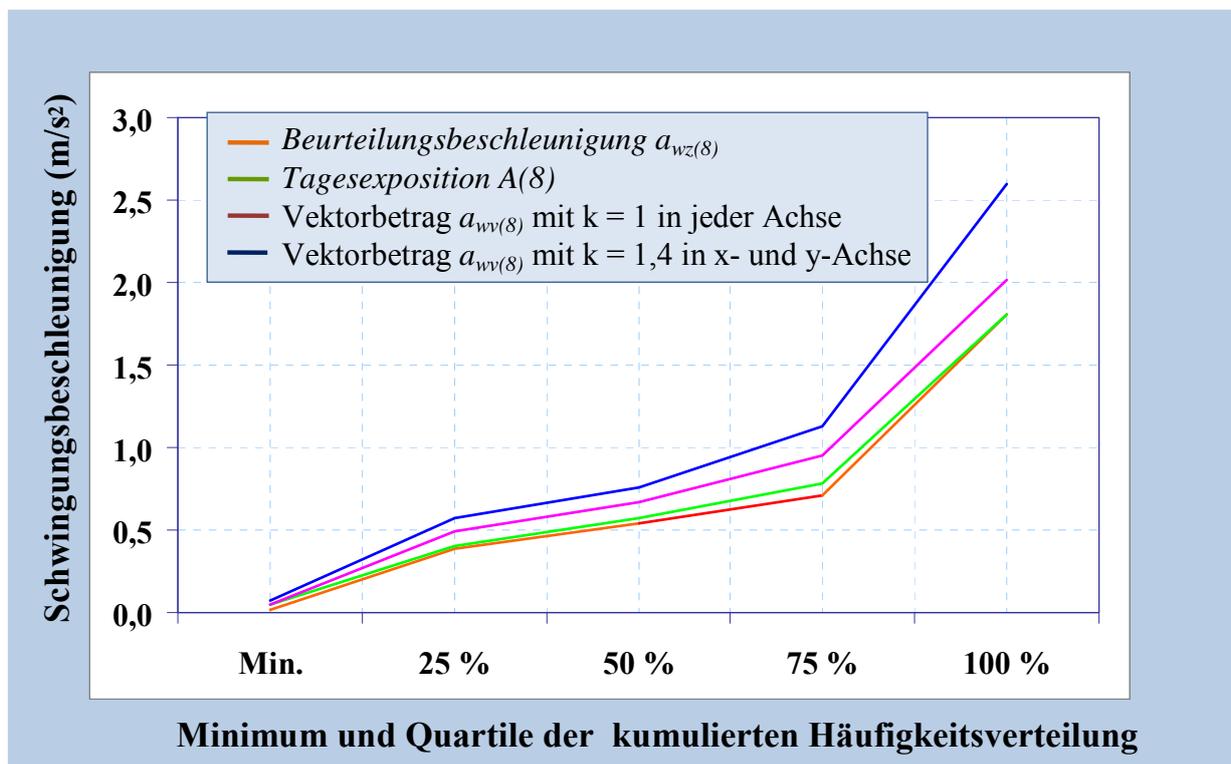


Abb. 3: Kumulative Häufigkeitsverteilung (Minimum und Quartile) verschiedener Belastungsmaße für $n = 1.477$ Tätigkeitszeiträume

Betrachtet man in der Tabelle 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 Tab. 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.

Tab. 7: Interkorrelationen der sechs Belastungsmaße aus Tab. 6
(n = 1477 Tätigkeitszeiträume)

Belastungsmaß	<i>Tagesexposition A(8)</i>	$a_{wv(8)}$ $k_{x,y,z} = 1$	$a_{wv(8)}$ $k_{x,y} = 1,4$	<i>eVDV</i> z-Achse	<i>VDV</i> lt. EU
<i>Beurteilungsbeschleunigung</i> $a_{wz(8)}$	0,954	0,950	0,904	0,982	0,928
<i>Tagesexposition A(8)</i>	---	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
<i>eVDV</i> (z-Achse)				---	0,949

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

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* ($r = 0,900$).

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* lt. EU-RL - 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 1.477 Tätigkeitszeiträume in

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

Tab. 8 zeigt an Hand von kumulierten Häufigkeiten in Prozent, welche Größenordnung diese Zuwächse erreichen, und Abb. 4 gibt dazu eine graphische Verdeutlichung. Dabei ist auf die Skalierung sowohl in der Tabelle wie der Abbildung zu achten – zunächst in Schritten von 0,01, ab 0,5 m/s^2 dann in Schritten von 0.1. Demnach liegen rund 30 % der Fälle in einem relativ niedrigen Bereich unter 0,05 m/s^2 Zuwachs, und kaum 50 % der Fälle überschreiten einen Wert von 0,1 m/s^2 oder höher. Immerhin steigt der Belastungswert für rund 17 % der Zeiträume um mehr als 0,2 m/s^2 bis hin zu einem maximalen Zuwachs von 0,62 m/s^2 .

Tab. 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 <i>Tagesexposition</i> $A(8)$ 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 3 Achsen um mehr als 0,2 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 Tab. 8 einen Zuwachs zu verzeichnen hatten - also einen höheren Wert in x- oder y-Richtung gegenüber der z-Richtung -, auch beim Schwingungsgesamtwert auffallen, oder mit anderen Worten, ob sich diese beiden Maße mehr oder weniger überlappen. In Tab. 9 werden dazu zwei Gruppen gegenüber gestellt:

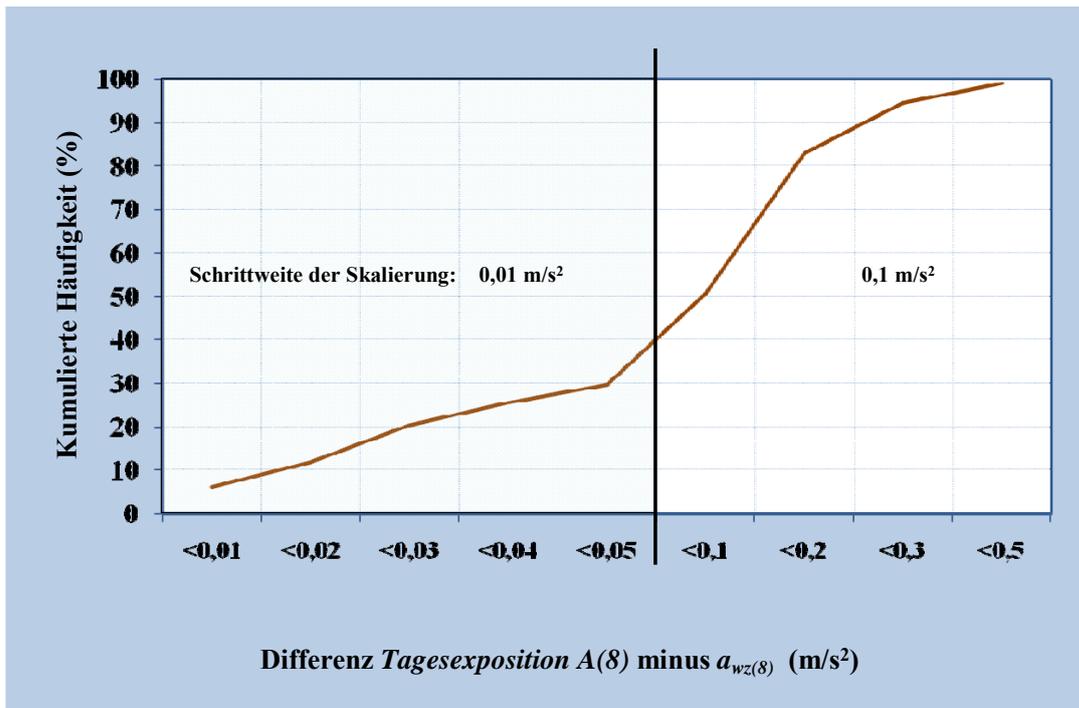


Abb. 4: Kumulierte prozentuale Häufigkeiten für 385 Tätigkeitszeiträume mit Zuwachs der Belastung in x- oder y-Achse bei Betrachtung der Achse mit maximalem Wert, d. h. Differenz *Tagesexposition A(8) minus Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$ (m/s^2)*

- in der ersten Zeile diejenigen, deren höchste Belastung in z-Achse erfolgt (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 erfolgt (also die 385 Zeiträume aus Tab. 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.

Tab. 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	<i>Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ (Vektorbetrag), aufgeteilt in Quartile</i>				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 3. und 4. Quartil des Schwingungsgesamtwertes zu finden. Allerdings sind die Aspekte „Achse mit höchster Belastung“ und „Schwingungsgesamtwert“ nicht deckungsgleich; der $a_{wv(8)}$ kann von jeder der 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 noch ein anderer Aspekt betrachtet werden: Ein Großteil der statistischen Auswertungen in den folgenden Abschnitten beruht ja 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 ja entweder dem $a_{wz(8)}$ oder dem mit 1,4 gewichteten $a_{wz(8)}$ bzw. $a_{wz(8)}$. 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 auch 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. Tab. 10 gibt die Interkorrelationen wieder.

Bzgl. der drei Schwingungsachsen ist festzuhalten, dass die Interkorrelationen zwischen den *Beurteilungsbeschleunigungen* zwar recht hoch sind, aber doch weit von 1 entfernt. Insbesondere zwischen z-Achse einerseits und 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.

Tab. 10: Interkorrelationen zwischen Belastungsmaßen in den 3 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 ($p < .001$)

Innerhalb einer Schwingungsachse zeigen sich wenig Unterschiede zwischen den Belastungsgrößen. Die kraftbezogenen Maße a_{Fz} für die LWS-Segmente L3-L4 und L5-S 1 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 Tab. 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 jeweils die drei Schwingungsachsen 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, aber das wird natürlich an späterer Stelle noch überprüft.

Tab. 11: Interkorrelationen der Dosiswerte nach den Dosismodellen D1 bis D7

Dosis- modelle	Basis a_w -Werte			Basis: Werte in 4. Potenz		
	D2	D3	D4	D5	D6	D7
	<i>Tagesexp.</i> <i>A(8)</i>	$a_{wv(8)}$ mit k_{xyz} = 1	$a_{wv(8)}$ mit k_{xy} = 1,4	eVDV in z- Achse	VDV lt. EU-RL	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 ($p < .001$)

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 Zusammenhangsanalysen mit medizinischen Daten werden die oben aufgelisteten Dosismodelle zusätzlich mit unterschiedlichen Schwellenwerten zur Berücksichtigung von Tätigkeitszeiträumen berechnet. Tab. 12 zeigt exemplarisch die Interkorrelationen, die sich für die Dosis auf Grundlage der *Tagesexposition A(8)* mit steigenden Schwellenwerten ergeben.

Tab. 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)

<i>Tagesexposition A(8)</i> mit Schwellenwert (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 statistisch signifikant ($p < .001$)

Während zwischen den Dosiswerten ohne Schwellenwert und denen mit Schwellenwert 0,45 oder 0,5 m/s² Korrelationen knapp unter 1,0 bestehen, nehmen die Korrelationen etwa ab dem Schwellenwert von 0,63 m/s² 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 Spalte ist angegeben, wie viele Studienteilnehmer bei dem jeweiligen Schwellenwert als „unbelastet“ gelten würden. Bei der Analyse von Dosiseffekten 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 m/s² kaum von einer Schwelle „null“, auf der anderen Seite führen Schwellen von 0,8 oder 1,15 m/s² 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 Kap. 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 (Schwarze et al. 1999, 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 Abschn. 4.2 eingehender behandelt wird.

Exemplarisch ist in Tab. 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 mit 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 Sensitivität), nicht jedoch die Beschwerdefreiheit (niedrige Spezifität).

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 Odds Ratio größer 1, wobei auch die untere Schranke des Konfidenzintervalls über 1,0 liegt.

Tab. 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 2 Prädiktoren							
beobachtete Diagnose		Vorhergesagte Diagnose			% Richtige		
		Lumbalsyndrom		kein Lumbalsyndrom			
Lumbalsyndrom		218		26	89,3		
kein Lumbalsyndrom		110		34	23,6		
Gesamtprozentsatz					64,9		
Variablen in der Regressionsgleichung nach 2 Schritten							
Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald- Test		OR gleich exp(B)	Konfidenzintervall 95%	
	B	s	t	p		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 Tab. 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 4. 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 $0,1 \text{ m/s}^2$ im Belastungsmaß. Tab. 14 zeigt, welche neuen Werte für die Prädiktoren sich nun bei der gleichen Regressionsanalyse wie in Tab. 13 ergeben. Das Odds Ratio beträgt jetzt aufgerundet 1,08, d. h. mit jedem Zuwachs der Schwingungsbelastung um $0,1 \text{ m/s}^2$ wächst das Risiko eines Lumbalsyndroms um 8 %.

Tab. 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 $0,1 \text{ m/s}^2$)

Variablen in der Regressionsgleichung nach 2 Schritten							
Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald- Test		OR gleich exp(B)	Konfidenzintervall 95%	
	B	s	t	p		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 2.3 aufgeführten Belastungsmaße verwendet wurden: die *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$, der *Schwingungsgesamtwert* a_{wv} 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 ja vor allem, welcher Parameter der Schwingungsbelastung am ehesten als Prädiktor für gesundheitliche Auswirkungen taugt. Deshalb werden in Tab. 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 Signi-

fikanz 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).

Bezüglich der Kennwerte auf 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 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 sich für praktische Zwecke annäherungsweise folgende Umrechnung ableiten: $a_w [\text{m/s}^2] = \text{VDV} [\text{m/s}^{1,75}] / 18,25 [\text{s}^{0,25}]$. Entsprechend wurden für die Regressionen alle Belastungswerte auf VDV-Basis durch 18,25 dividiert, so dass sich die Odds Ratios jetzt auf vergleichbare Spannweiten der Messwert-Skala beziehen.

Tab. 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-RL	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 Tab. 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 ORs 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 ja ebenfalls nur die Beschleunigung in z-Richtung erfasst. Alle anderen Konfidenzgrenzen, die in der Tabelle durch Abrundung mit 1,00 wiedergegeben werden, sind größer 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 – 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_{wv} mit 499,72. Die *Tagesexposition* $A(8)$ liegt mit 500,66 im Mittelfeld.

Damit wird noch mal 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, und bei dieser bereinigten Stichprobe von $n = 315$ Personen zeigten sich weitaus deutlichere Zusammenhänge zwischen der Diagnose „Lumbalsyndrom“ und den verschiedenen Kennwerten der Schwingungsbelastung (Schwarze et al. 1999, 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 J., Median 39 J., wobei das Minimum bei 23 und das Maximum bei 60 Jahren lag. Im Body Mass Index als Indikator für den wichtigen potentiellen Confounder „Übergewicht“ verändert sich mit der bereinigten Stichprobe praktisch nichts.

In Tab. 16 werden also die Ergebnisse dargestellt, die sich bei identischen Auswertungen wie für Tab. 15 ergeben bei Ausschluss der 73 Personen mit LWS-Beschwerden vor dem Ende des ersten Expositionsjahres. Zusätzlich aufgenommen sind jetzt auch noch 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 Abschn. 2.3 vorgestellt wurden.

Im Vergleich zu Tab. 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 Tab. 15 mit einer unteren Konfidenzschranke größer 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 „Vorschädigung“ reduziert und den Zusammenhang zwischen GKV-Belastung und Lumbalsyndrom stärker hervortreten lässt.

Tab. 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 m/s²)

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

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

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 in dieser bereinigten Stichprobe das Risiko, die Diagnose „Lumbalsyndrom“ zu erhalten, mit jeder Belastungszunahme von 0,1 m/s² um den Faktor 1,15.

Auch bezüglich des AIC-Kriteriums 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-RL*. 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.

Abb. 5 stellt für eine Reihe von Tageskennwerten der Schwingungsbelastung anschaulich gegenüber, wie sich jeweils die ORs 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.

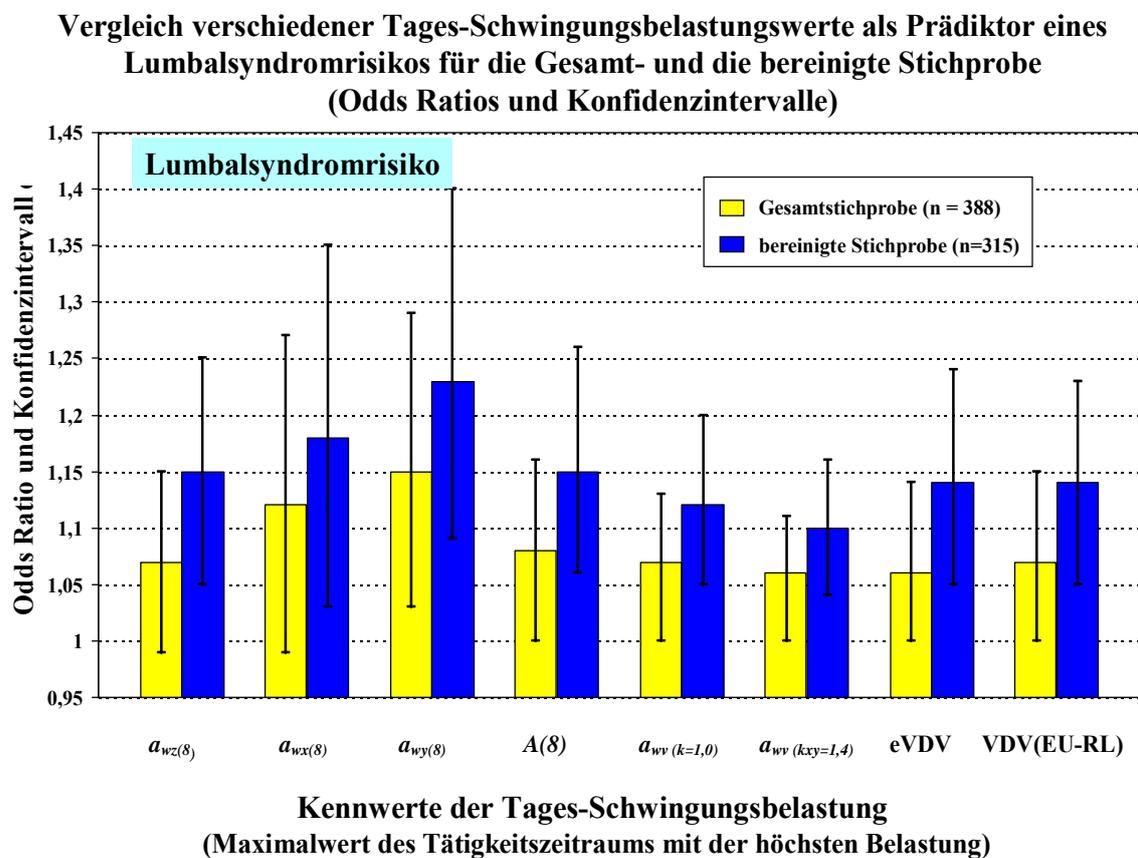


Abb. 5: Risiko eines Lumbalsyndroms durch Schwingungsbelastung im Sitzen. Odds Ratios und Konfidenzintervalle für verschiedene Tageskennwerte der Schwingungsbelastung (Maximalwerte), jeweils für die gesamte ($n = 388$) und die bereinigte Stichprobe ($n = 315$)

4.1.2.2 Aussagekraft der kraftbezogenen Belastungskenngrößen

Betrachtet man die in Tab. 16 neu hinzugekommenen kraftbezogenen Beurteilungsgrößen, 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 Abb. 6 noch einmal die Odds Ratios und Konfidenzintervalle der interessierenden Kenngrößen gegenüber gestellt: 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 die *Beurteilungsbeschleunigung* und die kraftbezogene Kenngröße in y-Achse.

Vergleich von Beschleunigungskennwerten mit Kennwerten der kraftbezogenen Schwingungsbeurteilung (a_w -Werte vs. a_F -Werte) als Prädiktor eines Lumbalsyndromrisikos (Odds Ratios und Konfidenzintervalle, bereinigte Stichprobe n =315)

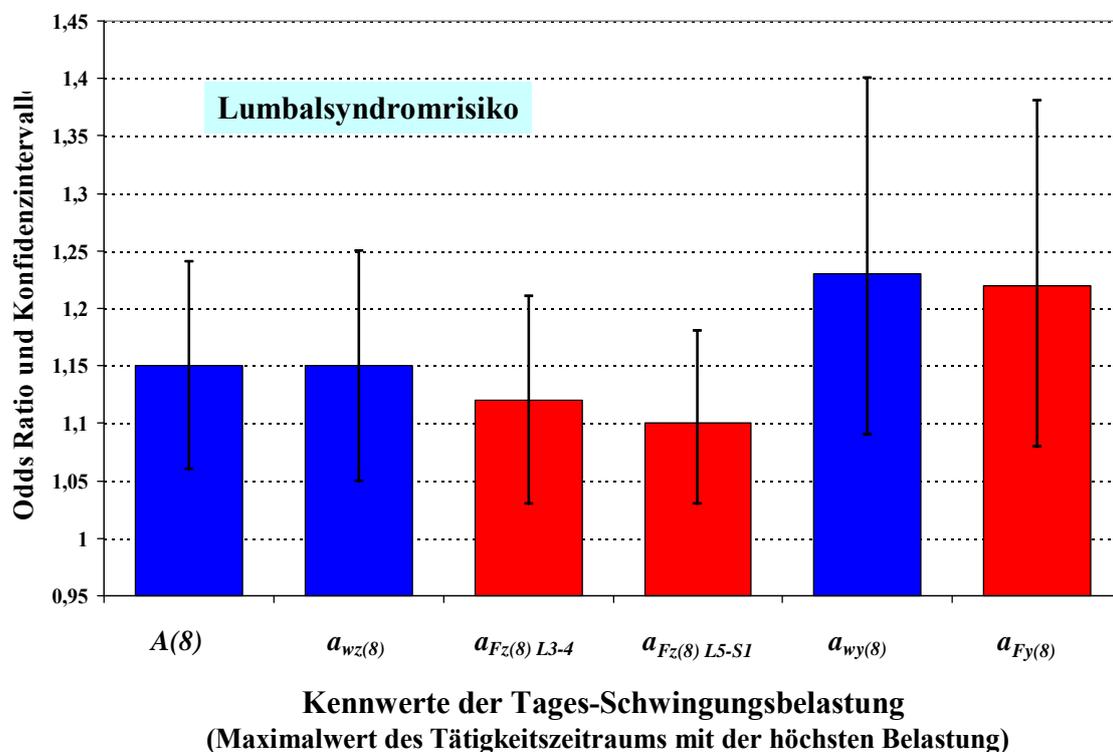


Abb. 6: Risiko eines Lumbalsyndroms durch Schwingungsbelastung im Sitzen - Gegenüberstellung der Odds Ratios und Konfidenzintervalle für verschiedene *Beurteilungsbeschleunigungen* und kraftbezogene Kennwerte der Schwingungsbelastung (Maximalwerte) für die bereinigte Stichprobe (n = 315)

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 kraftbe-

zogenen Größen. Zur weiteren Überprüfung werden die drei kraftbezogenen Belastungsmaße auch in den beiden folgenden Auswertungen (Tab. 17 und 18) mit verwendet.

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, so dass auf der Basis der bereinigten Stichprobe eine Teilstichprobe von $n = 217$ Personen zur Verfügung stand. Tab. 17 zeigt (analog zu Tab. 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).

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

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

Im Vergleich mit Tab. 16 erweisen sich die Ergebnisse für alle Prädiktoren als noch etwas deutlicher. Schon 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 relative 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.

4.1.4 Zielkriterium „Lumbales Wurzelsyndrom“

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

Für fast alle Prädiktoren - mit Ausnahme der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wx(8)}$ und der a_F -Werte in z-Richtung - ergibt der Signifikanztest Werte von $p < .05$, 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. 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. Bzgl. der kraftbezogenen Beurteilungsgrößen sind die Ergebnisse in z-Richtung also wieder etwas schwächer im Vergleich mit 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 (vgl. Schwarze et al. 1999, S. 111 ff.) und es wurde vermutet, dass ein Selektionseffekt (selective survival) vorliegen könnte: Nach Auftreten eines lumbalen Wurzelsyndroms ist es weniger wahrscheinlich, dass der Betreffende langfristig weiter schwingungsexponiert 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.

Tab. 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 Basis der **bereinigten Stichprobe** von n = 315) (OR = Risikoerhöhung für Zunahme um 0,1 m/s²)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}		AIC
	B	s	t	p				
max. $a_{wz(8)}$,113	,051	4,83	,029	1,11	1,01	1,23	299,80
max. $a_{wx(8)}$,094	,076	1,50	,221	1,09	0,94	1,27	303,19
max. $a_{wy(8)}$,153	,071	4,58	,033	1,16	1,01	1,33	300,04
max. Tagesexposition A(8)	,109	,048	5,22	,023	1,11	1,01	1,22	299,36
max. a_{wv} mit $k_{xyz} = 1,0$,089	,040	4,96	,027	1,09	1,01	1,18	299,65
max. a_{wv} mit $k_{xy} = 1,4$,070	,033	4,42	,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	,109	,049	4,95	,027	1,11	1,01	1,22	299,67
max. VDV nach EU-RL	,105	,046	5,35	,022	1,11	1,01	1,21	299,22

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

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 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.

Zur genaueren Betrachtung dieser Frage werden in Tab. 19 die Ergebnisse vorgestellt, die sich bei logistischen Regressionen für das Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ ergeben, wenn man die gleichen Berechnungen wie für Tab. 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 Tab. 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 Basis der Maximalwerte in Tab. 16 als etwas ökonomischere Lösungen.

Offensichtlich hat es in dieser Stichprobe nicht allzu starke Veränderungen der Belastungswerte über das Arbeitsleben gegeben, so dass 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 Tab. 20 statistische Kennwerte für die Verteilung der Zielgrößen „Maximalwert“ und „Durchschnittswert“ der Schwingungsbelastung in dieser Stichprobe gegenübergestellt.

Tab. 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 m/s²)

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

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

Bei der *Tagesexposition A(8)* liegt der Maximalwert im Schnitt 0,12 m/s² über dem Durchschnittswert des Arbeitslebens – sowohl im Mittelwert wie 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 m/s² und im Maximum 0,74 m/s².

Maximal- und Durchschnittswerte der individuellen Schwingungsbelastung weichen also mit zunehmender Belastungshöhe immer weiter voneinander ab. Es stimmt also, wie im vorigen 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.

Tab. 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* $a_{wz(8)}$ und die *Tagesexposition* $A(8)$

Kennwert	$a_{wz(8)}$		$A(8)$	
	Maximalwert	Durchschnitt	Maximalwert	Durchschnitt
Mittelwert	0,71	0,61	0,75	0,63
Standardabw.	0,29	0,22	0,30	0,23
Min.	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
Max.	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 Abschn. 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. Tab. 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.

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 $0,5 \text{ m/s}^2$ belasteten und einer Zunahme der hoch belasteten Personen. Es werden also an Hand dieses Ausschlusskriteriums 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 $0,63 \text{ m/s}^2$) und über 6 % mehr in der höchsten Belastungsklasse ($>0,8 \text{ m/s}^2$). Für die

Diskussion um Schwellenwerte für gesundheitliche Auswirkungen von GKV spielt es also schon eine Rolle, welcher Belastungskennwert zu Grunde gelegt wird.

- Für die Frage, ob vielleicht - wie es im Merkblatt zur BK 2110 (2005) 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 $\geq 1,15$ m/s², wie sie in der EU-Richtlinie vorgesehen ist. Allenfalls wären für eine Teilmenge $\geq 1,0$ m/s² noch genügend Teilnehmer vorhanden.

Tab. 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 $n = 315$)

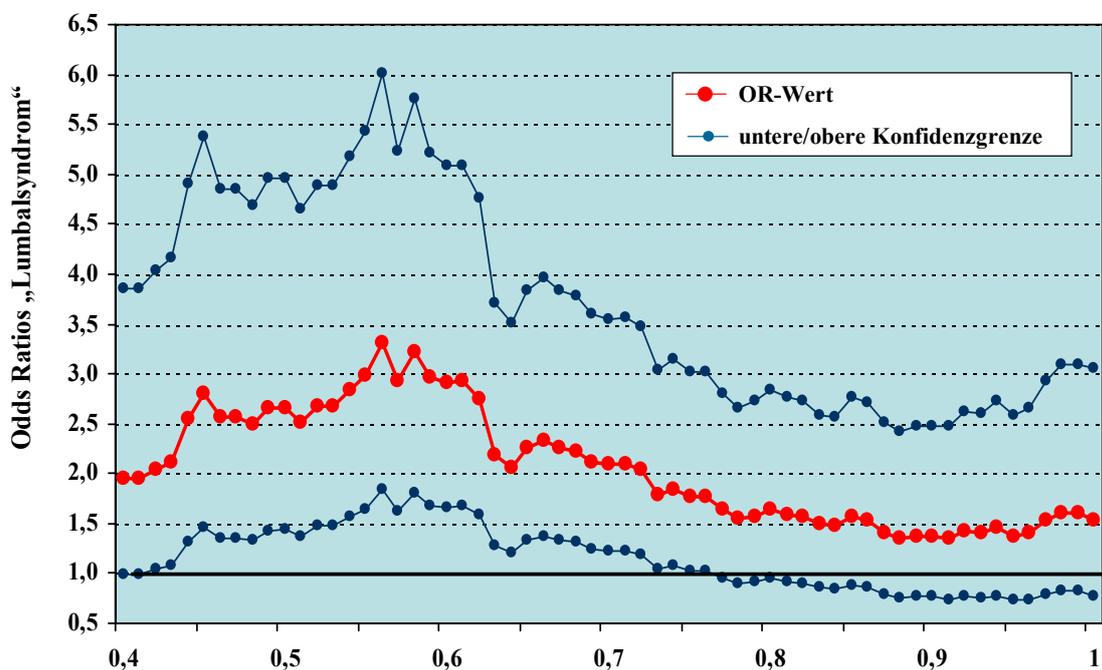
Belastungs- klassen (m/s ²)	max. $a_{wz(8)}$		max. $A(8)$	
	n = 388	n = 315	n = 388	n = 315
< 0,5	116 (29,9 %)	79 (25,1 %)	112 (28,9 %)	76 (24,1 %)
$\geq 0,5 - < 0,63$	65 (16,8 %)	54 (17,1 %)	43 (11,1 %)	37 (11,8 %)
$\geq 0,63 - < 0,8$	79 (20,4 %)	67 (21,3 %)	80 (20,6 %)	67 (21,3 %)
$\geq 0,8$	128 (32,9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

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 0,1 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, in welchem Belastungsbereich bei diesem exponierten Kollektiv ein ursächlicher Zusammenhang mit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ deutlich wird. In Abb. 7 und 8 wird die Veränderung dieses gleitenden OR mit zunehmendem Schwellenwert für beide Belastungsmaße dargestellt. Die rote Kurve gibt jeweils das OR wieder, die beiden blauen Kurven die untere und obere Grenze des Konfidenzintervalls. Die relativ hohen Odds Ratios ergeben sich natürlich dadurch, dass die Regressionen nur mit dem Belastungsmaß ohne Einbeziehung des Alters gerechnet wurden.

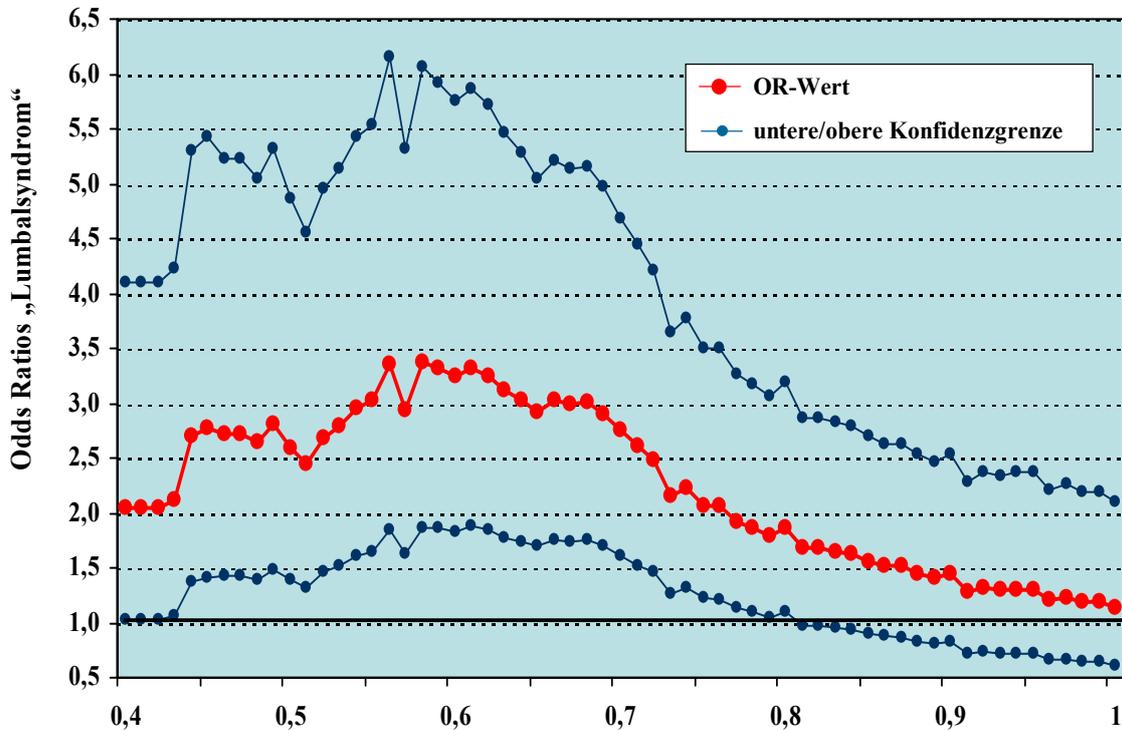


Maximale Beurteilungsbeschleunigung a_{wz8} (m/s²) bei verschiedenen Schwellenwerten

Abb. 7: Veränderung der Odds Ratios (rot) und Grenzen des Konfidenzintervalls (blau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von 0,01 m/s² – Belastungsmaß: *Beurteilungsbeschleunigung a_{wz8}*

Man sieht deutlich, dass die genannten maximalen OR-Werte eher den Beginn eines Wertebereichs darstellen, bei dem sich in unserer Stichprobe an Hand der Schwingungsbelastung eine besonders gute Vorhersage der Erkrankung vorhersagen lässt. 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, so dass 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 deutlich, dass die Kurve an einem bestimmten

Punkt deutlich abfällt – beim Belastungsmaß $a_{wz(8)}$ etwa bei $0,63 \text{ m/s}^2$, für $A(8)$ spätestens bei $0,73 \text{ m/s}^2$, weil bei diesen Schwellenwerten offensichtlich zu viele erkrankte Schwingungsexponierte als „nicht belastet“ gewertet werden.



Maximale Tagesexposition $A(8)$ (m/s^2) bei verschiedenen Schwellenwerten

Abb. 8: Veränderung der Odds Ratios (rot) und Grenzen des Konfidenzintervalls (blau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von $0,01 \text{ m/s}^2$ – Belastungsmaß: *Tagesexposition $A(8)$*

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

Bei der Beurteilung der Wirbelsäulenbelastung stellt sich für die Berufsgenossenschaften häufig das Problem, eine kombinierte LWS-Belastung durch Ganzkörpervibration 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, so dass bei uns angefragt wurde, inwieweit sich auch mit diesen Maßen Schwellenwerte für die LWS-Gefährdung ermitteln lassen. In Abb. 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 $0,01 \text{ m/s}^2$ erhöht wird.

In Abb. 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 . Oberhalb dieses Bereichs trennt der Schwellenwert offensichtlich nicht mehr so klar zwischen erkrankten Exponierten und Nichtexponierten. Ein relativ hoher Anstieg der Odds Ratios auf 3,0 zeichnet sich bereits ab einem Schwellenwert von 0,6 m/s^2 ab, so dass hier bereits eine zunehmende Gefährdung vermutet werden könnte.

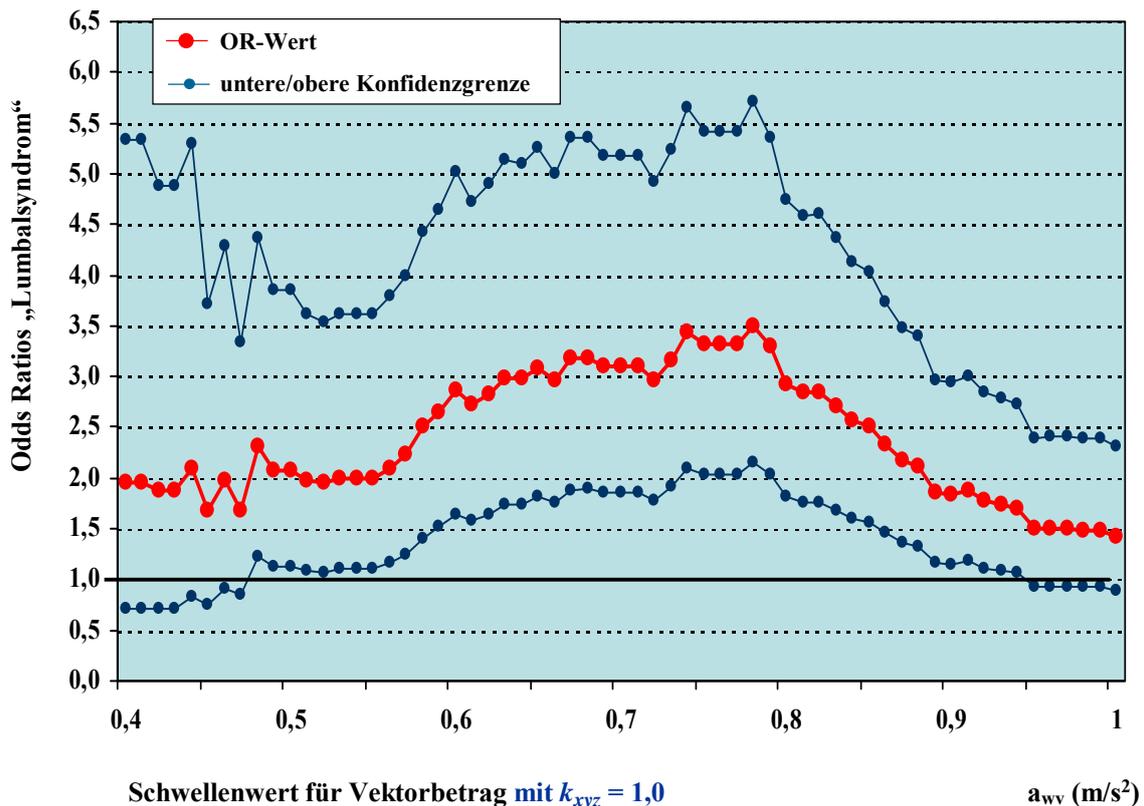


Abb. 9: Veränderung der Odds Ratios (rot) und Grenzen des Konfidenzintervalls (blau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von 0,01 m/s^2 – Belastungsmaß: Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ mit $k_{xyz} = 1$

Bei der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wv(8)}$ mit Korrekturfaktor $k_{xy} = 1,4$ zeigt sich in Abb. 10 ein Odds Ratio über 3,0 ab einem Schwellenwert von etwa 0,78 m/s^2 mit einem Maximum bei 0,87 und 0,88 m/s^2 . Die Kurve verläuft insgesamt etwas wechselhafter als in Abb. 9, aber spätestens ab etwa 0,67 m/s^2 ist ein konstanter Anstieg der OR-Werte bis hin zu den genannten Maximalwerten zu beobachten. Auch unterhalb von 0,67 m/s^2 fallen einzelne Spitzen im Verlauf der OR-Kurve auf, aber man sollte die vorhandene Datenbasis auch nicht überbewerten. Sicher fällt in Abb. 10 der erste Gipfel der Kurve bei 0,56 m/s^2 auf (und entsprechend in Abb. 9 bei 0,48 m/s^2), wobei auch zum ersten Mal die untere Konfidenzgrenze über 1 liegt, aber die

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

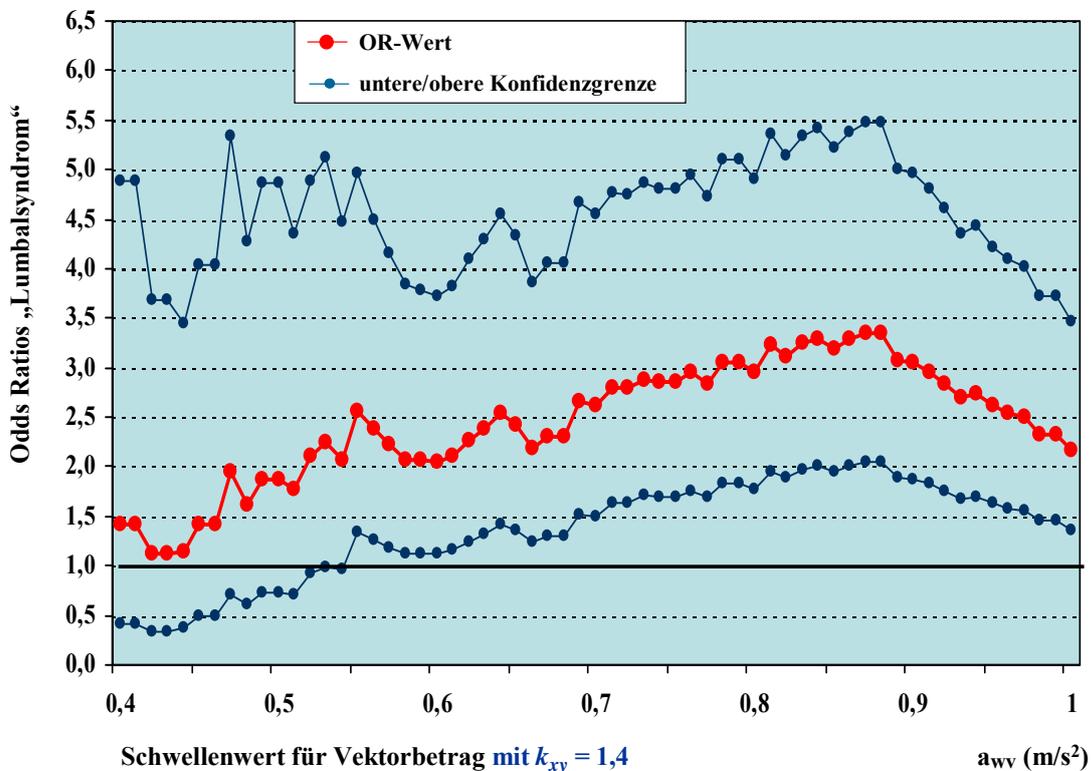


Abb. 10: Veränderung der Odds Ratios (rot) und Grenzen des Konfidenzintervalls (blau) für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ bei Erhöhung des Schwellenwertes für die GKV-Belastung in Schritten von 0,01 m/s² – Belastungsmaß: Schwingungsgesamtwert $a_{wv(8)}$ mit $k_{xyz} = 1,4$

4.4 Analysen mit Dosiswerten

4.4.1 Regressionsanalysen mit verschiedenen Schwellen- und Dosiswerten

Auch wenn in den einschlägigen Richtlinien keine expliziten Dosiswerte genannt werden, bei denen mit der Verursachung einer LWS-Schädigung gerechnet werden muss, besteht doch weitgehende Übereinstimmung, dass in der Regel eine langjährige Exposition von wenigstens 10 Jahren vorliegen muss. In der aktuellen Fassung des Merkblatts zur BK Nr. 2110 von 2005 (darin Tab. 2) spielt die 10-Jahres-Grenze sogar eine ausschlaggebende Rolle für die zu erwartende Gesundheitsbeeinträchtigung bei verschiedenen *Beurteilungsbeschleunigungen*. Für die Beurteilung des Gesundheitsrisikos bei langjähriger Schwingungsexposition ist somit die Betrachtung von Schwingungsdosiswerten, 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 Abschn. 2.4.2 wurden bereits verschiedene Formeln zur Berechnung von GKV-Dosiswerten besprochen. Im Folgenden werden für die dort erwähnten Dosisformeln 1 bis 4 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 5 bis 7 auf 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 Tab. 22 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 (Schwarze et al. 2003) berechnet als:

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

so dass 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 $a_{w(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$:

$$D_V = 0,8^2 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} = 1414,4.$$

Zunächst werden die Dosiswerte hier in einer Skalierung $1 : 10^3$ 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 12 Jahre mit einer *Beurteilungsbeschleunigung* von 0,63 m/s² belastet“.

Tab. 22: Logistische Regressionen für das Zielkriterium „*Lumbalsyndrom*“ mit *Dosiswerten der Schwingungsbelastung* nach den Dosisformeln 1 bis 4 (vgl. Kap. 2.4.2) – mit jeweils unterschiedlichen Schwellenwerten von 0,0 bis 1,15 m/s² und Skalierung der Dosiswerte 1:10³ (bereinigte Stichprobe n = 315)

	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR [CI _{95%}]	AIC
	B	s	t	p		
Schwellenwert	Dosisformel 1: Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$					
0,00 m/s ²	,323	,10	11,08	,001	1,38 [1,14 / 1,67]	403,63
0,45 m/s ²	,315	,09	12,01	,001	1,37 [1,15 / 1,64]	402,64
0,50 m/s ²	,314	,09	12,06	,001	1,37 [1,15 / 1,63]	402,56
0,63 m/s ²	,217	,08	6,87	,009	1,24 [1,06 / 1,46]	408,90
0,80 m/s ²	,177	,09	4,18	,042	1,19 [1,01 / 1,41]	411,98
1,15 m/s ²	,770	,50	2,33	,128	2,16 [0,80 / 5,80]	409,88
Schwellenwert	Dosisformel 2: Tagesexposition A(8)					
0,00 m/s ²	,276	,08	10,77	,001	1,32 [1,12 / 1,55]	404,30
0,45 m/s ²	,271	,08	11,63	,001	1,31 [1,12 / 1,53]	403,38
0,50 m/s ²	,261	,08	11,17	,001	1,30 [1,11 / 1,51]	403,95
0,63 m/s ²	,240	,08	10,06	,002	1,27 [1,10 / 1,47]	405,19
0,80 m/s ²	,149	,07	4,22	,041	1,16 [1,01 / 1,34]	412,12
1,15 m/s ²	,310	,19	2,73	,099	1,36 [0,94 / 1,97]	412,65
Schwellenwert	Dosisformel 3: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k = 1,0$ für alle Achsen					
0,00 m/s ²	,177	,06	10,39	,001	1,20 [1,07 / 1,34]	404,83
0,45 m/s ²	,170	,05	10,30	,001	1,19 [1,07 / 1,33]	405,00
0,50 m/s ²	,175	,05	10,13	,002	1,19 [1,07 / 1,32]	405,30
0,63 m/s ²	,117	,04	11,15	,001	1,19 [1,07 / 1,32]	404,01
0,80 m/s ²	,088	,06	10,39	,001	1,12 [1,05 / 1,21]	404,99
1,15 m/s ²	,177	,06	2,51	,114	1,09 [0,98 / 1,22]	414,08
Schwellenwert	Dosisformel 4: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k = 1,4$ für die x- und y-Achse					
0,00 m/s ²	,124	,04	9,70	,002	1,13 [1,05 / 1,22]	405,75
0,45 m/s ²	,120	,04	9,36	,002	1,13 [1,04 / 1,22]	406,21
0,50 m/s ²	,122	,04	9,81	,002	1,13 [1,05 / 1,22]	405,65
0,63 m/s ²	,112	,04	9,08	,003	1,12 [1,04 / 1,20]	406,64
0,80 m/s ²	,117	,04	10,39	,001	1,12 [1,05 / 1,21]	404,99
1,15 m/s ²	,056	,03	9,70	,002	1,06 [0,99 / 1,13]	413,85

Regressionsanalysen mit den Prädiktoren Lebensalter und Dosis (Methode „Einschluss“) Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 414,89

Als erstes wird in Tab. 22 deutlich, dass sich dieser Prädiktor mit allen Dosisformeln und Schwellenwerten als statistisch signifikant erweist ($p < .05$) mit Ausnahme der vier Regressionen mit Schwellenwert $1,15 \text{ m/s}^2$. Höchstwahrscheinlich kommt die fehlende Signifikanz bei $1,15 \text{ m/s}^2$ 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 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. Die *Tagesexposition A(8)* (Dosisformel 2) steht etwas schlechter da, hebt sich aber immer noch recht deutlich von den Schwingungsgesamtwerten ab. Allerdings ist bzgl. der 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, so dass 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 $0,5 \text{ m/s}^2$: relativ hohe ORs und enge Konfidenzgrenzen bei niedrigen AIC-Werten. Beim Schwellenwert $0,63 \text{ m/s}^2$ sind die Ergebnisse geringfügig schlechter und erst recht bei noch höheren Schwellenwerten. Allerdings handelt es sich ja teilweise um Unterschiede in der 2. 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 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 1000 Einheiten – also von „keine Gefährdung“ zu „hoher Gefährdung“ – zeigt. Je nach zugrunde gelegtem Schwellenwert kann dieser Risikoanstieg deutlich über 30 % liegen. Auf Basis der Schwingungsgesamtwerte zeigen sich Risikoerhöhungen in einem Bereich bis zu 20 %.

Tab. 23: Logistische Regressionen für das Zielkriterium „*Lumbalsyndrom*“ mit *Dosiswerten der Schwingungsbelastung* nach den Dosisformeln 1 bis 4 (vgl. Kap. 2.4.2) – mit jeweils unterschiedlichen Schwellenwerten von 0,0 bis 1,15 m/s² und Skalierung der Dosiswerte 1:500 (bereinigte Stichprobe n = 315)

	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR [CI _{95%}]	AIC
	B	s	t	p		
Schwellenwert	Dosisformel 1: Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$					
0,00 m/s ²	,000	,00	11,08	,001	1,18 [1,07 / 1,29]	403,63
0,45 m/s ²	,000	,00	12,01	,001	1,17 [1,07 / 1,28]	402,64
0,50 m/s ²	,000	,00	12,06	,001	1,17 [1,07 / 1,28]	402,56
0,63 m/s ²	,000	,00	6,87	,009	1,11 [1,03 / 1,21]	408,90
0,80 m/s ²	,000	,00	4,18	,042	1,09 [1,00 / 1,19]	411,98
1,15 m/s ²	,001	,00	2,33	,128	1,47 [0,90 / 2,41]	409,88
Schwellenwert	Dosisformel 2: Tagesexposition A(8)					
0,00 m/s ²	,000	,00	10,77	,001	1,15 [1,06 /; 1,25]	404,30
0,45 m/s ²	,000	,00	11,63	,001	1,14 [1,06 /; 1,24]	403,38
0,50 m/s ²	,000	,00	11,17	,001	1,14 [1,06 / 1,23]	403,95
0,63 m/s ²	,000	,00	10,06	,002	1,13 [1,05 / 1,21]	405,19
0,80 m/s ²	,000	,00	4,22	,041	1,08 [1,00 / 1,16]	412,12
1,15 m/s ²	,000	,00	2,73	,099	1,17 [0,97 / 1,40]	412,65
Schwellenwert	Dosisformel 3: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k = 1,0$ für alle Achsen					
0,00 m/s ²	,000	,00	10,39	,001	1,10 [1,04 / 1,16]	404,83
0,45 m/s ²	,000	,00	10,30	,001	1,09 [1,03 / 1,15]	405,00
0,50 m/s ²	,000	,00	10,13	,002	1,09 [1,03 / 1,15]	405,30
0,63 m/s ²	,000	,00	11,15	,001	1,09 [1,04 / 1,15]	404,01
0,80 m/s ²	,000	,00	10,39	,001	1,06 [1,02 / 1,10]	404,99
1,15 m/s ²	,000	,00	2,51	,114	1,05 [0,99 / 1,10]	414,08
Schwellenwert	Dosisformel 4: Schwingungsgesamtwert a_{wv} mit $k = 1,4$ für x- und y-Achse					
0,00 m/s ²	,000	,00	9,70	,002	1,06 [1,02 / 1,11]	405,75
0,45 m/s ²	,000	,00	9,36	,002	1,06 [1,02 / 1,10]	406,21
0,50 m/s ²	,000	,00	9,81	,002	1,06 [1,02 / 1,10]	405,65
0,63 m/s ²	,000	,00	9,08	,003	1,06 [1,02 / 1,10]	406,64
0,80 m/s ²	,000	,00	10,39	,001	1,06 [1,02 / 1,10]	404,99
1,15 m/s ²	,000	,00	9,70	,002	1,03 [1,00 / 1,06]	413,85

Regressionsanalysen mit den Prädiktoren Lebensalter und Dosis (Methode „Einschluss“) Zum Vergleich: AIC-Wert bei Regressionsanalyse nur mit Lebensalter: 414,89

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 6-jährigen Exposition mit $a_{w(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$ oder 3,5 Jahren mit $a_{w(8)} = 0,8 \text{ m/s}^2$ entsprechen. Tab. 23 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. *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ und *Tagesexposition* $A(8)$ liegen in den Ergebnissen jetzt sehr nahe beieinander und ergeben einen signifikanten Anstieg des Lumbalsyndrom-Risikos pro 500 Einheiten der GKV-Belastungsdosis, der je nach Schwellenwert variiert von 11 % bei Schwellenwert $0,63 \text{ m/s}^2$ und *Tagesexposition* $A(8)$ bis 18 % bei Schwellenwert $0,0 \text{ m/s}^2$ und *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$.

4.4.2 Vergleich von Belastungsgruppen bei verschiedenen Schwellenwerten

Der wesentliche Zweck eines Schwellenwertes besteht ja darin, eine möglichst deutliche Trennung zwischen gering und höher Belasteten im Hinblick auf eine mögliche LWS-Gefährdung vorzunehmen. Angesichts der geringen Unterschiede in den eben vorgestellten statistischen Ergebnissen wird in Abb. 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 10-jährige Exposition oberhalb des jeweiligen Schwellenwertes als hohe Belastung definiert wurde.

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

- I: nie über dem betreffenden Schwellenwert exponiert
- II: über dem Schwellenwert exponiert, aber nicht den Dosiswert von 10 Jahren erreicht
- III: über dem Schwellenwert exponiert und den Dosiswert von 10 Jahren überschritten.

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

für Schwellenwert $0,5 \text{ m/s}^2$: $D_v = 0,5^2 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} = 552,5$

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

für Schwellenwert $0,8 \text{ m/s}^2$: $D_v = 0,8^2 \cdot 221 \text{ Arbeitstage/J} \cdot 10 \text{ Jahre} = 1414,4$.

Wie Abb. 11 zeigt, verteilt sich die bereinigte Stichprobe von 315 Personen je nach gewähltem Schwellenwert in unterschiedlicher Weise auf die dargestellten drei Belastungsgruppen. Mit zunehmendem Schwellenwert verbleiben mehr Personen in der Gruppe 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 der Abbildung ist abzulesen, wie sich die Anhebung des Schwellenwertes von $0,5$ auf $0,63$ und auf $0,8 \text{ m/s}^2$ auf die Gruppengrößen und die jeweilige prozentuale Diagnosehäufigkeit auswirkt.

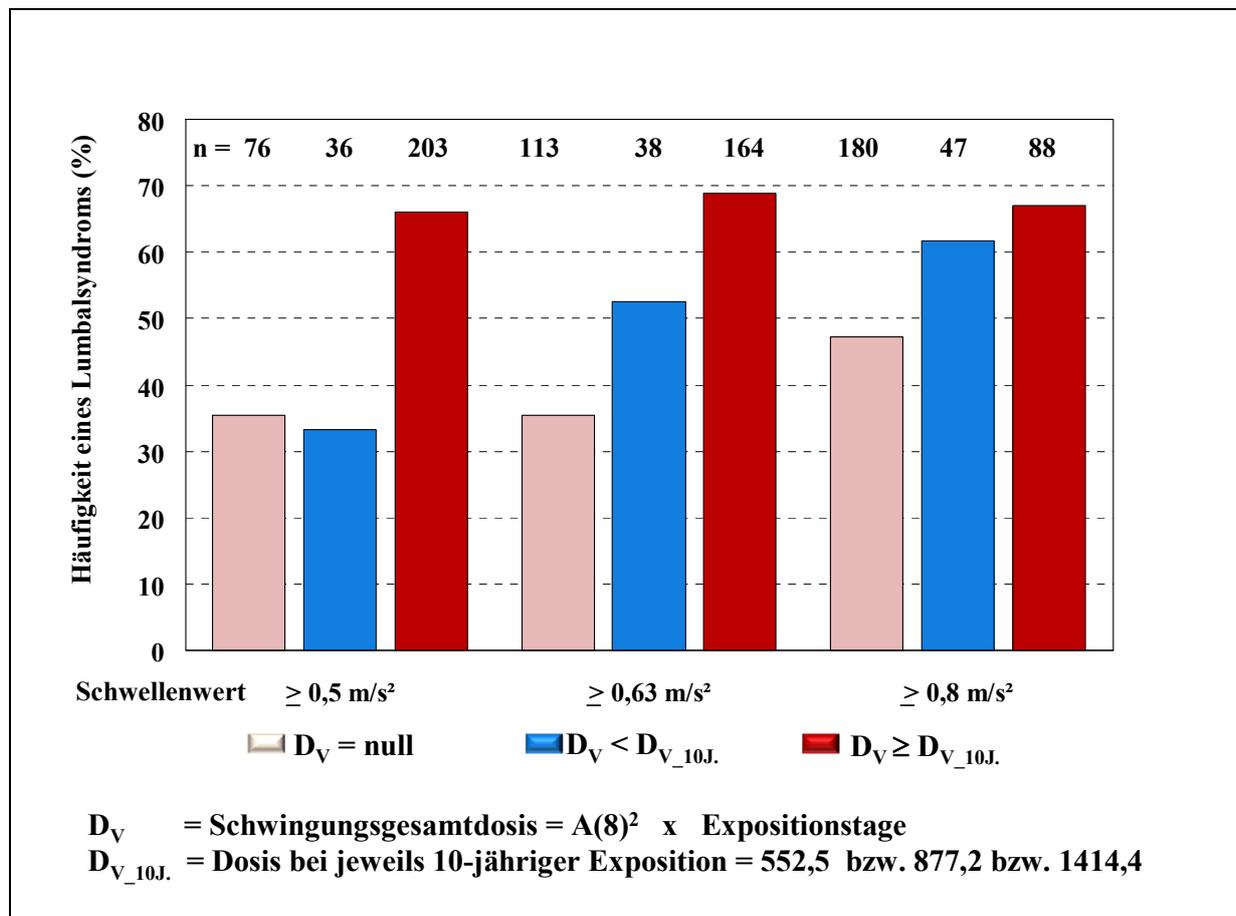


Abb. 11: Relative Häufigkeit der Diagnose „Lumbalsyndrom“ für die Belastungsgruppe I (nie über Schwellenwert belastet), II (über Schwellenwert belastet, aber nicht den betreffenden 10-Jahres-Dosiswert erreicht) und III (den betreffenden 10-Jahres Dosiswert überschritten) auf der Grundlage verschiedener Schwellenwerte der *Tagesexposition* $A(8)$ (bereinigte Stichprobe $n = 315$)

Betrachtet man zunächst die drei Balken links für Gruppe I - Schwellenwert für die *Tagesexposition* $A(8) \geq 0,5 \text{ m/s}^2$ - 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 Belastungsgruppen zeigt sich nur ein geringer Unterschied in der Diagnosehäufigkeit – sogar mit etwas größerer Häufigkeit in der unbelasteten Gruppe –, so dass der Schwellenwert von $0,5 \text{ m/s}^2$ ganz offensichtlich über keine große Trennschärfe verfügt.

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

In der rechten Balkengruppe ergibt sich eine weitere Wanderbewegung, die die Gruppe „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 10-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 Belastungsgruppen 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 wie auch zwischen kürzer und langfristig exponierten Personen zu unterscheiden.

Für die mittlere Balkengruppe in Abb. 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 ($\text{CI}_{95\%}$ 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 10-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 (Schwarze et al. 2003, S. 20). 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* $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Ergebnisse 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 10-jährige Dosiswert von $D_v = 877,2$ Jahren ein optimales Kriterium für die Beurteilung einer gesteigerten Gefährdung für die LWS durch lange Expositionsdauer darstellt. Im Unterschied zu den in Abb. 11 dargestellten Berechnungen müsste 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 Gruppen in ihrer Diagnosehäufigkeit analysiert:

- Gruppe 1: immer unterhalb einer *Tagesexposition* $A(8)$ von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, somit Dosis $D_v = 0$
- Gruppe 2: oberhalb von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, aber weniger als 10 Jahre lang (ergibt als Dosis D_v einen Wert $< 877,2$)
- Gruppe 3: oberhalb von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, und zwar länger als 10 Jahre ($D_v \geq 877,2$), aber kürzer als 16,6 Jahre (d. h. $D_v < 1414,4$)
- Gruppe 4: oberhalb von $0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert, und zwar länger als 16,6 Jahre (entspricht $D_v \geq 1414,4$)

Im Prinzip wird hier also die mittlere Balkengruppe aus der vorigen Abbildung betrachtet und deren rechter Balken noch einmal unterteilt nach einer Expositionsdauer von 10 – 16,6 J. (entspricht D_v 877,2 bis 1414,4 bei $0,63 \text{ m/s}^2$) und einer Expositionsdauer von mehr als 16,6 J (entspricht $D_v > 1414,4$ bei $0,63 \text{ m/s}^2$).

Abb. 12 zeigt den bereits bekannten Anstieg der Diagnosehäufigkeit zwischen Gruppe 1 und 2 und das deutlich höhere Vorkommen eines Lumbalsyndroms in Gruppe 4. Zwischen den Gruppen 2 und 3 steigt die Häufigkeit nur um wenige Prozente an.

In den Balken ist auch für jede Gruppe das durchschnittliche Lebensalter eingetragen. Gruppe 4 zeigt ein rund 5 Jahre höheres Durchschnittsalter als die anderen Gruppen. Zur Adjustierung des Alterseinflusses wurden daher für die Gruppen Prävalenzraten-Verhältnisse berechnet mit Alterskorrektur nach Mantel-Haenszel (PVR_{MH}), die ebenfalls in der Abbildung wiedergegeben sind. Die Werte beziehen sich jeweils auf die Referenzgruppe 1 (Dosis = 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 Schwellen-

wert 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 rund um das 1,5-fache gesteigertes Risiko.

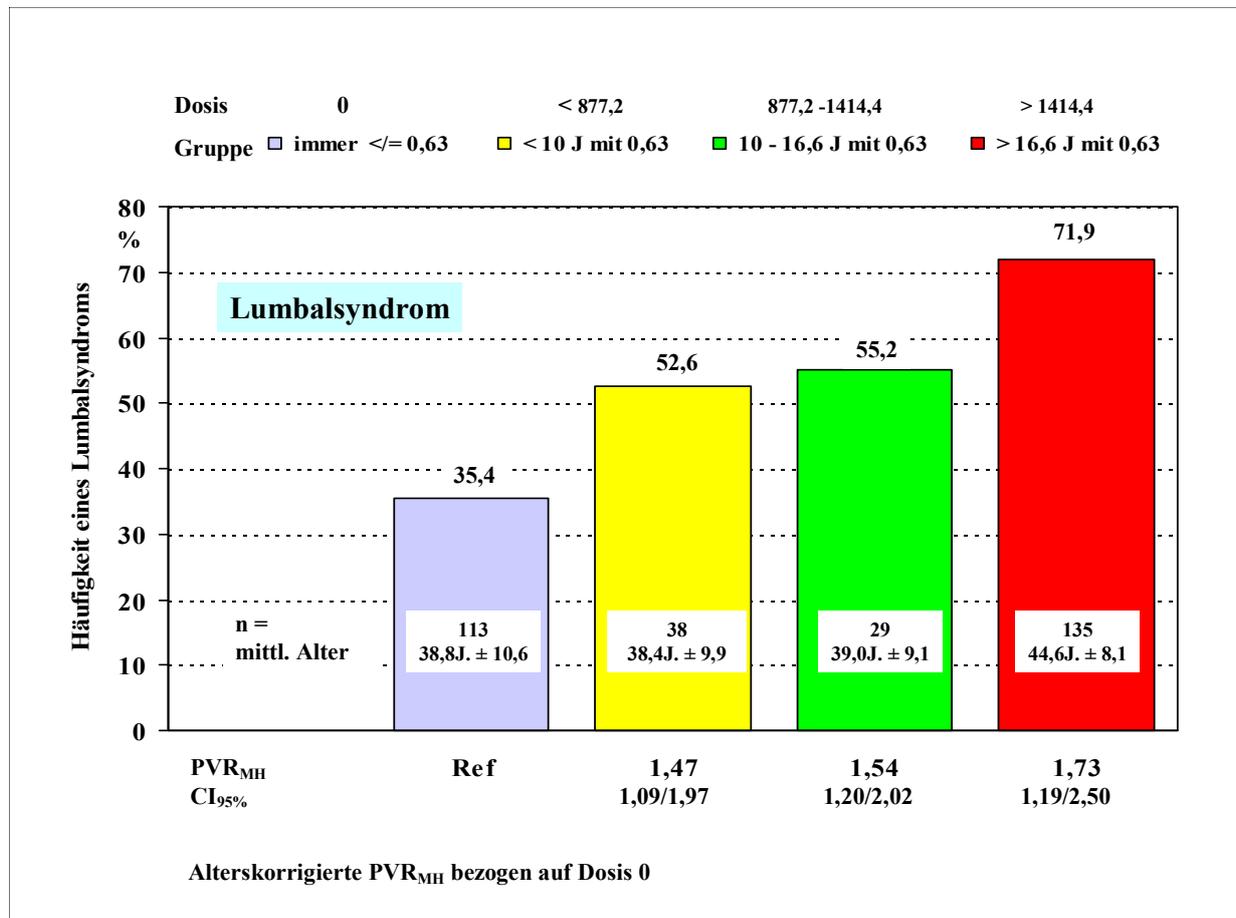


Abb. 12: Prävalenz und alterskorrigiertes Risiko eines Lumbalsyndroms in verschiedenen Dosisgruppen für die *Tagesexposition A(8)* bei Schwellenwert $a_w > 0,63 \text{ m/s}^2$.

Der Unterschied zwischen der zweiten und der dritten Gruppe 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.

Es wurde auch mit weiteren Berechnungsansätzen versucht, den Risikoanstieg nach langjähriger hoher GKV-Exposition genauer zu erfassen. Im Endeffekt lässt sich nur feststellen, dass es in diesem Untersuchungskollektiv in einem Bereich oberhalb von $D_v = 1400$ einen deutlichen Sprung in der altersbereinigten Prävalenz des Lumbalsyndroms gibt.

Als Schlussfolgerungen bzgl. der Einflusses von Schwellenwert und Expositionsdauer ergeben sich damit:

- Ganzkörperschwingungen (gemessen als *Tagesexposition* $A(8)$) führen spätestens bei Überschreitung eines Schwellenwertes von $0,63 \text{ m/s}^2$ zu einem deutlich höheren Risiko eines Lumbalsyndroms.
- Es zeigt sich ein Dosis-Wirkungsverhältnis bei langjähriger Expositionsdauer.
- Es gibt eine klar erkennbare Risikozunahme im Bereich eines Dosis-Wertes oberhalb von $D_v = 1400$. Dieser Wert wird bei hohen Belastungen schon nach relativ wenigen Jahren erreicht (z. B. in 10 Jahren bei *Tagesexposition* $A(8) = 0,8 \text{ m/s}^2$ und in etwa 16,5 Jahren bei *Tagesexposition* $A(8) = 0,63 \text{ m/s}^2$).

4.4.4 Betrachtung der Unterdiagnosen „lokales Lumbalsyndrom“ und „lumbales Wurzelsyndrom“

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

Der Unterschied zwischen den Gruppen I und II – also „unbelastet“ vs. „weniger als 10 Jahre mit $0,63 \text{ m/s}^2$ belastet“ – fällt allerdings deutlicher aus, und insgesamt sind die Prävalenzraten-Verhältnisse mit Werten größer 2,0 eindeutiger als in Abb. 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“.

In Abb. 14 wird die gleiche Auswertung schließlich für die Unterdiagnose „lumbales Wurzelsyndrom“ vorgenommen. Rein optisch zeigen die vier Balken hier deutlicher einen stetigen Anstieg. Allerdings zeigt schon die „unbelastete“ Gruppe I mit 27 % einen relativ hohen Anteil an Diagnosen, so dass das PVR zwischen den beiden ersten Gruppen nicht signifikant ist. Erst ab Gruppe III, also mit einer deutlich höheren Dosis bzw. Expositionsdauer, ergeben sich signifikante Prävalenzraten-Verhältnisse.

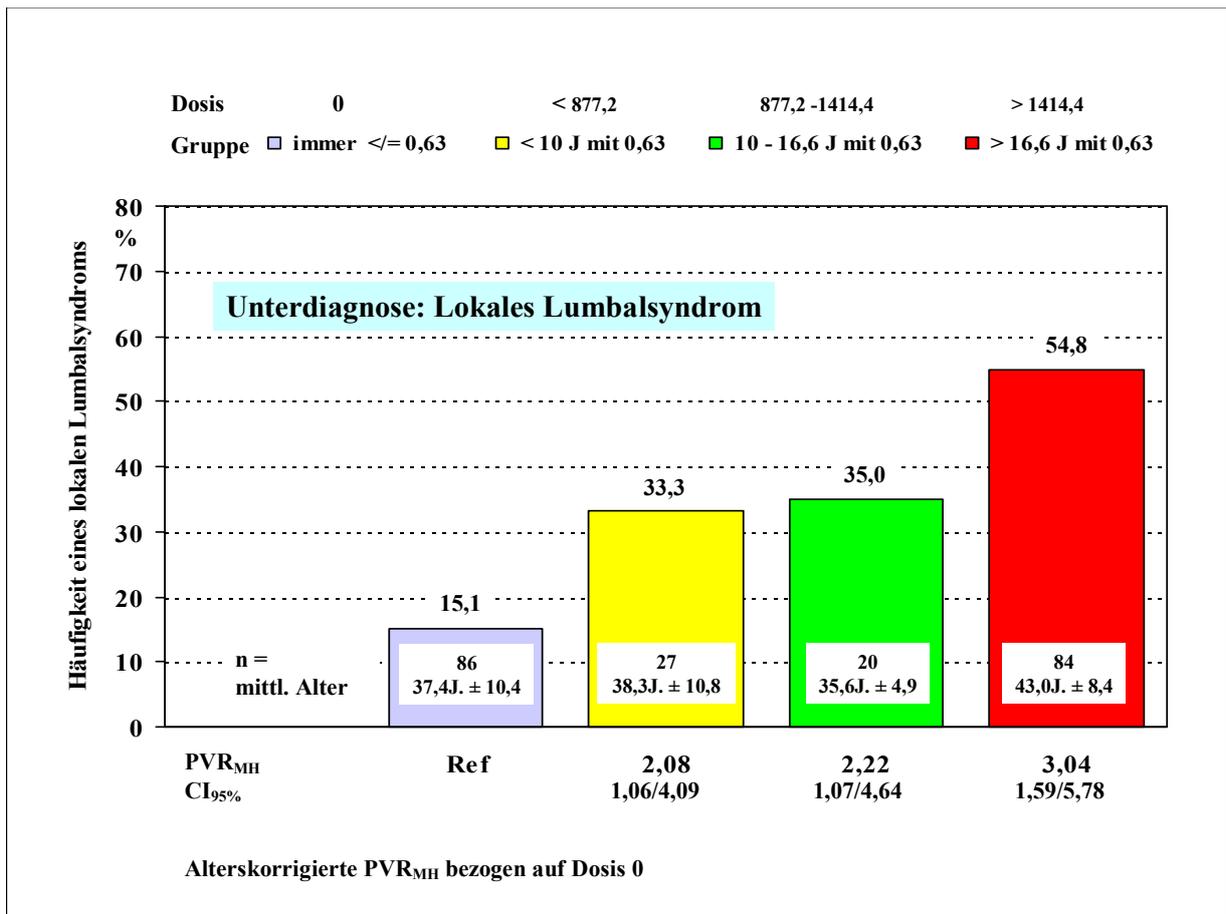


Abb. 13: Prävalenz und alterskorrigiertes Risiko eines lokalen Lumbalsyndroms in verschiedenen Dosisgruppen für die *Tagesexposition A(8)* bei Schwellenwert $a_w > 0,63 \text{ m/s}^2$ ($n=217$ nach Ausschluss der Personen mit der Diagnose „lumbales Wurzelsyndrom“, auf Basis der bereinigten Stichprobe von $n = 315$)

Bereits in Abschn. 4.1.4 wurde vermutet, dass die weniger klaren Ergebnisse für die Unterdiagnose „lumbales Wurzelsyndrom“ mit einem Selektionseffekt zusammenhängen könnten, dergestalt dass Personen mit dieser Diagnose eher nicht in schwingungsexponierten Tätigkeiten verbleiben. Die Unterschiede zwischen den beiden ersten Gruppen würden dazu passen. Da wir jetzt aber in Abb. 14 die Prävalenz bei verschiedenen Expositionsdosen betrachten können, zeigt sich nun in den beiden letzten Gruppen mit längerer bzw. höherer GKV-Exposition eine höhere Prävalenz des lumbalen Wurzelsyndroms als in Abb. 13 bei den gleichen Expositionsguppen für das lokale Lumbalsyndrom festzustellen war. Daraus ließe sich eine zunehmende Gefährdung im Sinne eines Wurzelsyndroms mit zunehmender Schwingungsexposition ablesen. Sind diese sich widersprechenden Schlussfolgerungen - früheres Ausscheiden aus der Tätigkeit bei Wurzelsyndrom, höheres Wurzelsyndrom-Risiko bei längerer oder höherer Exposition – miteinander vereinbar?

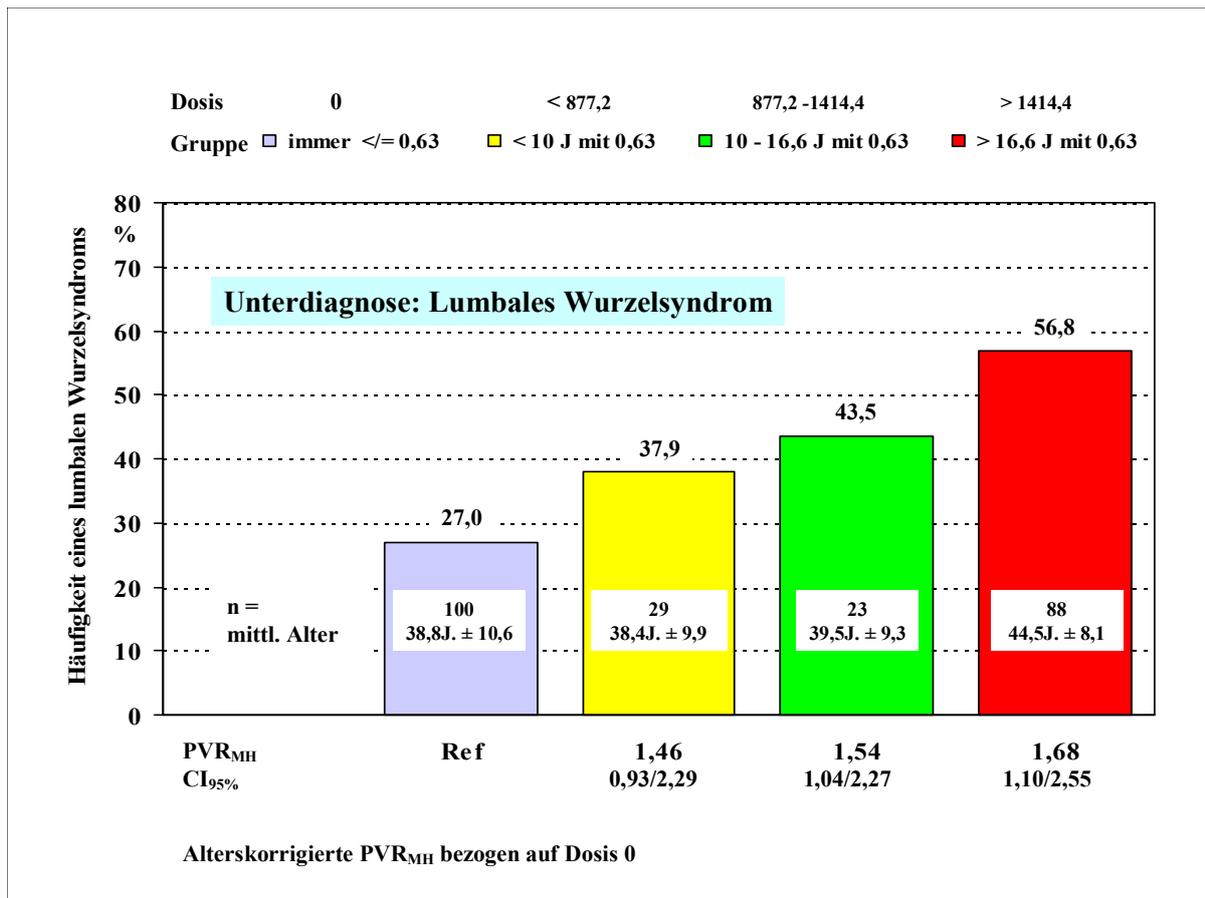


Abb. 14: Prävalenz und alterskorrigiertes Risiko eines lumbalen Wurzelsyndroms in verschiedenen Dosisgruppen für die *Tagesexposition* $A(8)$ bei Schwellenwert $a_w > 0,63 \text{ m/s}^2$ ($n = 240$ nach Ausschluss der Personen mit der Diagnose „lokales Lumbalsyndrom“, auf Basis der bereinigten Stichprobe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

Man kann hypothetisch annehmen, dass es unterschiedliche Entwicklungstendenzen bei dieser Diagnose gibt, sowohl in Abhängigkeit von medizinischen Aspekten des Beschwerdebildes, von individueller Disposition und/oder Aspekten der konkreten Tätigkeiten. In manchen Fällen könnten die konkreten Beschwerden des Wurzelsyndroms zu einer schnellen Aufgabe der Tätigkeit führen, in anderen Fällen dagegen zu einer starken degenerativen LWS-Veränderung im Laufe einer lang dauernden Exposition – wobei u. U. eine Extremlastung schon länger zurück liegt und deswegen in der aktuellen Tätigkeit auch keine Einschränkung mehr vorliegt, die eine Tätigkeitsaufgabe zwingend erfordern würde. Retrospektiv ist das nicht abzuklären, so dass für diese spezielle Fragestellung die Auswertung der Follow-Up-Untersuchung der GKV-Studie von größtem Interesse ist.

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 de-

generativen 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 anamnestischer, klinischer und röntgenologischer Befunde. Tab. 24 zeigt, wie sich die Diagnose Lumbalsyndrom auf die vier Kategorien dieser zusammenfassenden Beurteilung – „altersgerecht“, „leichte Veränderung“, „mittlere Veränderung“, „schwere Veränderung“ - verteilt.

Tab. 24: 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 %)

Regressionsanalytisch bot es sich zunächst an, eine lineare multiple Regression zu rechnen mit dem Zielkriterium „zusammenfassende Beurteilung“ in den 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 Abschn. 2.4.2, also für Dosisberechnungen auf Grundlage des $a_{wz(8)}$ und der *Tagesexposition* $A(8)$.

Tab. 25 gibt die aussagekräftigsten Ergebnisse aus diesen Regressionsanalysen wieder. Für beide Dosisformeln ergeben sich nur mit den niedrigeren Schwellenwerten bis $0,63 \text{ m/s}^2$ sig-

nifikante Ergebnisse, wobei der Schwellenwert $0,63 \text{ m/s}^2$ hier bzgl. Odds Ratio und AIC-Wert am Besten abschneidet. Bei höheren Schwellenwerten dürften auch hier – ähnlich wie bei den Ergebnissen des vorigen Abschnitts – zu viele Erkrankte unter die Unbelasteten fallen.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den entsprechenden Zeilen in Tab. 22, 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.

Tab. 25: Logistische Regressionen mit *Dosiswerten der Schwingungsbelastung* nach den Dosisformeln 1 bis 2 (vgl. Kap. 2.4.2) – jeweils mit unterschiedlichen Schwellenkriterien von 0 bis $0,63 \text{ m/s}^2$: 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	Dosisformel 1: Beurteilungsbeschleunigung $a_{wz(8)}$					
0,00 m/s^2	0,338	0,17	3,89	0,049	1,14 [1,00 / 1,95]	252,14
0,50 m/s^2	0,274	0,15	3,23	0,072	1,31 [0,98 / 1,76]	253,01
0,63 m/s^2	0,326	0,16	3,90	0,048	1,38 [1,02 / 1,89]	251,81
Schwellenwert	Dosisformel 2: Tagesexposition A(8)					
0,00 m/s^2	0,313	0,15	4,38	0,037	1,36 [1,01 / 1,83]	251,60
0,50 m/s^2	0,265	0,13	3,84	0,051	1,30 [1,01 / 1,68]	252,33
0,63 m/s^2	0,289	0,13	4,39	0,036	1,33 [1,03 / 1,72]	251,46

AIC-Richtwert (Regressionsanalyse nur mit Lebensalter): 254,79

5 Zusammenhangsanalysen: Schwingungsbelastung und Röntgenbefunde

5.1 Vorbemerkung

Die Ergebnisse der röntgenologischen Untersuchungen in der GKV-Studie (Schwarze et al. 1999, Tonscheidt 1999) sind von besonderem Interesse, weil sich hier eine Differenzierung der klinischen Diagnose „Lumbalsyndrom“ nach radiologischem Befund, Lokalisation und Schweregrad erhoffen lässt, durch die eventuell klarere Zusammenhänge mit der GKV-Belastung deutlich werden können. Diese Differenzierung bedeutet gleichzeitig eine größere Spielbreite 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 Lendenwirbelsäule 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 Tab. 26 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 $n = 315$.

Tab. 26: 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 %
Chondrosis intervertebralis	42	10,8	34	10,8
Osteochondrosis intervertebralis	64	16,5	52	16,5
Spondylosis deformans	260	67,0	213	67,6
Spondylarthrosis	242	62,4	193	61,3
Zeichen von Diskusprolaps	13	3,4	12	3,8
Pseudospondylolisthese	9	2,3	7	2,2
Retrolisthese	98	25,3	77	24,4
mindestens eine der genannten degenerativen Erkrankungen	335	86,3	273	86,7

Erstens zeigt diese Tabelle sehr deutlich, wie stark degenerative Veränderungen der Lendenwirbelsäule 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 am Anfang 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 Regressionsanalytische Zusammenhänge zwischen GKV und Röntgendiagnosen

Für die Prüfung des Zusammenhangs zwischen röntgenologischen Diagnosen einerseits und Schwingungsbelastung sowie weiteren Faktoren andererseits bieten sich Regressionsanalysen in ähnlicher Form an wie bei den klinischen Diagnosen. Für jede Diagnose aus Tab. 26 und für die zusammenfassende Variable „mindestens eine der genannten degenerativen Erkrankungen“ wurden identische Regressionsanalysen durchgeführt mit schrittweiser Berücksichtigung folgender Variablen: GKV-Belastung, Alter, Alter bei Expositionsbeginn, Body-Mass-Index, Haltungsinsuffizienz und Lumbalsyndrom lt. klinischer Untersuchung. Bzgl. der Diagnose „Lumbalsyndrom“ wurden auch Analysen mit den beiden Unterdiagnosen „lokales Lumbalsyndrom“ und „lumbales Wurzelsyndrom“ durchgeführt. Als Maße der GKV-Belastung wurden alternierend diejenigen Belastungsvariablen eingesetzt, die sich in den Auswertungen des Kap. 4 als besonders aussagekräftig erwiesen haben, also die verschiedenen Maße der maximalen Tagesbelastung und die daraus abgeleiteten Dosismaße mit den verschiedenen Schwellenwerten.

Exemplarisch werden in Tab. 27 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. Wenn kein Prädiktor angegeben wird, wurde in der Analyse nur die Konstante in die Regressionsgleichung aufgenommen. Die Tabelle bezieht sich sowohl auf die Gesamtstichprobe $n = 388$ wie 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.

Tab. 27: Signifikante Prädiktoren in logistischen Regressionen mit den verschiedenen Röntgendiagnosen als Zielkriterien für die Gesamtstichprobe n = 388 wie für die bereinigte Stichprobe n = 315

Röntgendiagnose als Zielkriterium	Prädiktor	n = 388			n = 315		
		p	OR	CI _{95%}	p	OR	CI _{95%}
Chondrosis		-----			-----		
Osteochondrosis	ALTER	.000	1,10	1,07 / 1,14	.000	1,10	1,06 / 1,15
Spondylosis de- formans	ALTER	.000	1,20	1,15 / 1,24	.000	1,20	1,15 / 1,24
	BMI	.029	1,09	1,01 / 1,18	-----		
		.025	0,36	0,15 / 0,88	-----		
Spondylarthrosis	ALTER	.000	1,06	1,04 / 1,09	.000	1,07	1,04 / 1,10
	LUMB	.028	1,74	1,12 / 2,72	.039	1,69	1,03 / 2,76
Zeichen für Dis- kusprolaps	HAL- TUNG	.028	3,57	1,14 / 11,16	-----		
Pseudospondylo- listhese		-----			-----		
Retrolisthese		-----			-----		
mind. eine degen. Erkrankung	ALTER	.000	1,15	1,10 / 1,20	.000	1,15	1,10 / 1,21
	BMI	.044	1,10	1,00 / 1,21	-----		

Abkürzungen der Prädiktoren: 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“

In der Tabelle zeigt sich sehr eindrücklich der starke Einfluss des Lebensalters auf die verschiedenen röntgenologischen Diagnosen. Bei Osteochondrosis, Spondylosis deformans und Spondylarthrosis wie auch bei der zusammenfassenden Variable „degenerative Erkrankungen“ ist das Alter der dominierende Prädiktor mit Odds Ratios 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 Body-Mass-Index bei der häufigsten Diagnose „Spondylosis deformans“ und damit auch bei den degenerativen Erkrankungen insgesamt eine

relativ große Rolle mit einem OR von rund 1,1 – d. h. also ein 10 %-tiger Risikoanstieg mit jedem Punkt in diesem Index. Allerdings fällt dieser Prädiktor in der bereinigten Stichprobe aus der Regressionsgleichung heraus. Das kann natürlich auch als Hinweis darauf interpretiert werden, dass evtl. ein größerer Zusammenhang zwischen Übergewicht und Rückenbeschwerden bei den 73 ausgeschlossenen Personen bestand.

Zwei klinische Diagnosen spielen in Tab. 27 ebenfalls eine Rolle: Die Diagnose „Haltungsin-suffizienz“ ist der einzige Prädiktor für die Variable „Zeichen für Diskusprolaps“, wobei es hier ja nur 13 Fälle gibt und für diese keine gute Vorhersage erreicht wird. Die Diagnose „Lumbalsyndrom“ wird in die Regressionsgleichung für die Spondylarthrose aufgenommen. Das Vorliegen eines Lumbalsyndroms erhöht die Wahrscheinlichkeit der Diagnose „Spondylarthrose“ um 12 %. Ein Zusammenhang zwischen Lumbalsyndrom und röntgenologischen Diagnosen ist ja auch – ohne auf Kausalbeziehungen einzugehen – zwar sehr nahe liegend. Allerdings könnten in Anbetracht der zahlreichen durchgeführten statistischen Tests auch zufällige Konstellationen dafür ausschlaggebend sein, bei welcher der röntgenologischen Diagnosen eine klinische Diagnose zum Prädiktor wird.

Die Schwingungsbelastung spielt in Tab. 27 bemerkenswerterweise keine Rolle außer bei der Spondylosis deformans, wo der Prädiktor „maximale *Tagesexposition A(8)*“ mit einem OR von 0,36 [CI_{95%}: 0,15 / 0,88] geführt wird, also als ein protektiver Faktor! Das kann eigentlich nur als Bestätigung des Healthy-Worker-Effekts in dieser Stichprobe verstanden werden: Wer erhebliche degenerative Veränderungen an der Wirbelsäule aufweist, wird mit geringerer Wahrscheinlichkeit an einem Arbeitsplatz mit hoher Schwingungsbelastung anzutreffen sein. Dieser Zusammenhang tritt bei röntgenologischen Diagnosen ausreichenden Schweregrades offenbar deutlicher hervor als bei den klinischen Diagnosen, die ja ein sehr breites Spektrum an Beschwerden hinsichtlich Intensität und zeitlichen Schwankungen umfassen. Dennoch soll in den nächsten Abschnitten untersucht werden, ob andere röntgenologische Aspekte wie Anzahl oder Lokalisation der betroffenen Segmente vielleicht Zusammenhänge mit der Schwingungsbelastung zeigen.

Methodisch ist bei Regressionsanalysen zu bedenken, dass der Variablenpool, mit dem die statistischen Berechnungen durchgeführt werden, auch dann Auswirkungen auf die Ergebnisse haben kann, wenn die meisten Variablen gar nicht in die Regressionsgleichung aufgenommen werden. Da die Variablen doch meistens interkorreliert sind, ziehen sie u. U. „Erklärungspotential“ von anderen Variablen ab und beeinflussen so die Signifikanz der Prädiktoren. Daher wurden alle Regressionsanalysen auch mit reduziertem Variablenpool ge-

rechnet, z. B. ohne die klinischen Diagnosen. Es sind also im Hinblick auf den Erklärungsbeitrag der Schwingungsbelastung alle Möglichkeiten ausgelotet worden, um evtl. deutlichere Zusammenhänge als hier exemplarisch dargestellt aufzuzeigen.

5.2.3 Prävalenz degenerativer LWS-Schäden bei Hochbelasteten

Bzgl. der Röntgendiagnosen soll noch eine zusätzliche Auswertung dargestellt werden, in der im Hinblick auf BK-relevante Belastungshöhen untersucht wurde, ob bei einer erheblichen langjährigen Belastung – konkret bei einer Gesamtdosis D_V des Arbeitslebens von 1.414,4 auf Basis der *Tagesexposition A(8)* (vgl. Abschn. 4.4.2) – eine höhere Prävalenz von degenerativen LWS-Schäden festzustellen ist, wie es ja im Hinblick auf die BK 2110 gefordert wird. Tab. 28 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 – 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 bzgl. der genannten Röntgendiagnosen feststellen.

Tab. 28: Häufigkeiten der Röntgendiagnosen *Chondrosis intervertebralis*, *Osteochondrosis intervertebralis*, *Spondylosis deformans* und *Spondylarthrosis* getrennt nach Altersdekaden und Expositionshöhe (als dichotome Variable „Gesamtdosis $D_V = 1.414,4$ überschritten / nicht überschritten; $n = 315$). Die Prozentzahlen (blau) beziehen sich auf die jeweilige Altersgruppe.

Gesamtdosis $D_V \geq 1.414,4$ bzw. $D_V < 1.414,4$	Altersgruppen								Gesamt ($n = 315$)	
	≤ 30 J. ($n = 56$)		31 – 40. J. ($n = 93$)		41 – 50 J. ($n = 98$)		> 50 J. ($n = 68$)			
Diagnose:	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
<i>Chondrosis intervertebralis</i>										
$D_V \geq 1.414,4$ %	0 0	6 10,7	3 3,2	36 38,7	8 8,2	47 48,0	6 8,8	29 42,6	17 5,4	118 37,5
$D_V < 1.414,4$ %	3 5,4	47 83,9	5 5,4	49 52,7	3 3,1	40 40,8	6 8,8	27 39,7	17 5,4	163 51,7
<i>Osteochondrosis intervertebralis</i>										
$D_V \geq 1.414,4$ %	0 0	6 10,7	0 0	39 41,9	11 11,2	44 44,9	11 16,2	24 35,3	22 7,0	113 35,9
$D_V < 1.414,4$ %	1 1,8	49 87,5	9 9,7	45 48,4	8 8,2	35 35,7	12 17,6	21 30,9	30 9,5	150 47,6
<i>Spondylosis deformans</i>										
$D_V \geq 1.414,4$ %	1 1,8	5 8,9	14 15,1	25 26,9	48 49,0	7 7,1	34 50,0	1 1,5	97 30,8	38 12,1
$D_V < 1.414,4$ %	11 19,7	39 69,6	36 38,7	18 19,4	36 36,7	7 7,2	33 48,5	0 0	116 36,8	64 20,3
<i>Spondylarthrosis</i>										
$D_V \geq 1.414,4$ %	1 1,8	5 8,9	23 24,7	16 17,2	38 38,8	17 17,3	29 42,7	6 8,8	91 28,9	44 14,0
$D_V < 1.414,4$ %	22 39,3	28 50,0	23 24,7	31 33,3	33 33,7	10 10,2	24 35,3	9 13,2	102 32,4	78 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 (vgl. Schwarze et al. 1999, S. 128, Tonscheidt 1999).

Logistische 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. Im Segment L5/S1 zeigt sich für die bereinigte Stichprobe allerdings ein interessantes Ergebnis hinsichtlich der GKV-Belastung. Tab. 29 zeigt im oberen Teil das Ergebnis, das mit der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ (1. Regressionsanalyse) und im unteren Teil (2. Regressionsanalyse) das Ergebnis, das mit der *Tagesexposition* $A(8)$ als Prädiktor erzielt wurde.

Tab. 29: Logistische Regressionsanalysen mit dem Zielkriterium „auffällige Höhenverminderung im Übergangsegment zu S1“ - Prädiktoren im Einschussverfahren: 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 $n = 315$)

Prädiktor	Regressionskoeffizient B		Wald-Test		OR	CI _{95%}	
	B	s	t	p			
1. Regressionsanalyse							
Lebensalter	,071	,024	8,93	,003	1,07	1,03	1,13
max. <i>Beurteilungsbeschleunigung</i> $a_{wz(8)}$,153	,069	4,90	,027	1,17	1,02	1,34
2. Regressionsanalyse							
Lebensalter	,071	,024	9,07	,003	1,07	1,03	1,13
max. <i>Tagesexposition</i> $A(8)$,113	,065	3,03	,082	1,12	0,99	1,27

Die maximale *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ wird als zweiter Prädiktor in die Regressionsgleichung aufgenommen und der Regressionskoeffizient ist signifikant ($p = .027$). Ebenso kann das OR als signifikant bezeichnet werden, da die untere Schranke des Konfidenzintervalls größer ist als 1. Es lässt sich also folgern, dass mit jeder Zunahme von $a_{wz(8)}$ um $0,1 \text{ m/s}^2$ das Risiko für den Befund „auffällige Diskushöhenminderung im Übergangsegment zu S1“ um 17 % steigt. Das ist ein deutlich stärkerer Zusammenhang mit der Schwingungsbelastung als bei den übrigen untersuchten Röntgendiagnosen.

Interessanterweise sind die Ergebnisse für die *Tagesexposition A(8)* schwächer: Mit einem $p = 0,83$ würde der Prädiktor nicht in die Regressionsgleichung aufgenommen, und auch das errechnete OR ist mit 1,12 [CI_{95%}: 0,99 / 1,27] schwächer. Man könnte darin einen Hinweis sehen, dass gerade dieses unterste Segment der Wirbelsäule besonders stark von Schwingungseinwirkungen in z-Richtung geschädigt wird. Allerdings ist die geringe Zahl von insgesamt nur 29 Personen mit auffälliger Diskushöhe in diesem Segment zu berücksichtigen, die zu einer relativ geringen Varianzaufklärung in dieser Regressionsanalyse führt (Nagelkerkes $R^2 = .012$). Andererseits wird hiermit ein Ergebnis aus der damaligen GKV-Studie bekräftigt, in der mit anderer Auswertungsmethode eine erhöhte altersadjustierte Prävalenzrate für eine auffällige Veränderung der Diskushöhe im Übergangsegment zu S1 bei höherer Schwingungsbelastung festgestellt wurde (Schwarze et al. 1999, S. 128). Eine besondere Gefährdung in diesem Segment bei GKV-Exposition ist demnach nicht auszuschließen.

5.4 Anzahl und Lokalisation der betroffenen Wirbelsäulen-Segmente

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 Wirbelsegment 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 der Tabelle nicht extra 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 oben eingeführten Variable „degenerative Erkrankung der LWS“ gibt Tab. 30 zunächst einen Überblick über die Häufigkeitsverteilungen für die verschiedenen Zielvariablen, die sich aus den deskriptiven Daten dazu bilden lassen. Bzgl. der Ergebnisse ist zunächst wieder festzuhalten, dass die prozentualen Häufigkeiten in Tab. 30 in praktisch keiner Zeile einen auffälligen Unterschied zwischen der Gesamtstichprobe und der bereinigten

Stichprobe zeigen. Die Differenz von 2,3 % in der allerletzten Zeile ist schon die größte in der gesamten Tabelle (beide LWS-Abschnitte betroffen: 53,3 % in der bereinigten vs. 51,0 % in der Gesamtstichprobe).

Tab. 30: Häufigkeiten der Lendenwirbelsäulensegmente, 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 - L 1	101	26,0	85	27,0
L1 - L 2	131	33,8	110	34,9
L2 - L 3	174	44,8	148	47,0
L3 - L 4	258	66,5	214	67,9
L4 - 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
1 Segment	38	9,8	33	10,5
2 Segmente	60	15,5	45	14,3
3 Segmente	84	21,6	68	21,6
4 Segmente	53	13,7	42	13,3
5 Segmente	50	15,5	50	15,9
6 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 Wirbelsäulen-Abschnitt				
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 wg. fehlendem 5. LW

Generell zeigt sich, dass das Segment L4/L5 am stärksten von degenerativen Veränderungen betroffen ist, gefolgt von L3/L4. Nur bei rd. 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 %). Bzgl. der 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 Tab. 31 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 .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 ORs 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 Body-Mass-Index auf jeden Schritt auf der Punkteskala des BMI. Bei den Diagnosen wie „Haltungsinsuffizienz“ oder „Wurzelsyndrom“ gibt es nur die Alternative „ja/nein“, so dass hier mit dem OR nur das Risiko ausgedrückt wird, diese Diagnose tatsächlich zu erhalten.

Anzumerken ist, dass die Varianzaufklärung (R^2 nach Nagelkerke) insgesamt eher mäßig ist. Das Maß kann Werte von Null bis Eins annehmen. So hat man z. B. bei der Variable „Übergang zu S1“ mit einem Wert von $R^2 = 0,14$ oder bei „Th12 / L1“ mit einem Wert von $R^2 = 0,21$ mit der Regression keine nennenswerte Aufklärung der jeweiligen Zielvariable er-

reicht. Offensichtlich muss es noch andere (evtl. individuell stark variierende) Einflussfaktoren geben, die nicht in der Regressionsanalyse enthalten waren.

Tab. 31: Signifikante Prädiktoren in logistischen Regressionen mit verschiedenen Zielkriterien bzgl. der Lokalisation degenerativ veränderter LWS-Segmente für die bereinigte Stichprobe (n = 315)

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

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

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

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

Mit zunehmendem Alter und ansteigendem Body-Mass-Index 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 R^2 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 (vgl. Schwarze et al. 1999, Tonscheidt 1999). Diese zusammenfassende Beurteilung wurde sowohl in vier Abstufungen - altersentsprechend sowie leichte, mittlere und schwere Veränderungen – wie auch in acht Abstufungen – durch Einführung von Zwischenstufen – durchgeführt. Tab. 32 zeigt die Häufigkeitsverteilung für die 8-stufige zusammenfassende Beurteilung der degenerativen LWS-Veränderungen.

Tab. 32: 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 Tab. 26 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“ in Frage, 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 = .323 ($p < .001$)
- BMI am Untersuchungstag mit β -Gewicht = .113 ($p < .05$)

Das adjustierte R^2 als Maß der Varianzaufklärung erreicht nur einen Wert von .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:

- das Lebensalter mit OR = 1,09 [CI_{95%}: 1,06 / 1,13]
- der 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, wobei Teilnehmer, die zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung bereits über 50 Jahre alt waren, ausgeschlossen wurden, da hier die Prävalenz des Lumbalsyndroms schon so hoch war, dass für die Manifestation von neuen Fällen und auch für die Zunahme des Schweregrades klinischer oder röntgenologischer Symptome kein Spielraum mehr gegeben war (Schwarze et al. 1999, S. 141 ff.). Von insgesamt 310 ausgewählten Teilnehmern konnten 281, also 90,6 %, nochmals mit dem gleichen Instrumentarium untersucht werden. Die restlichen Personen konnten nicht mehr erreicht werden, waren mittlerweile verstorben oder waren 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. Tab. 33 zeigt, wie sich die Situation beim Follow-Up darstellt: Ein Großteil dieser 73 Personen nimmt auch an der Follow-Up-Untersuchung teil, so dass 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.

Tab. 33: 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 1. 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)

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.

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 1990 – 1995 zeigte (vgl. Schwarze et al. 1990, 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 Tab. 34 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.

Tab. 34: 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		Standardabw.		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)* $\geq 0,63 \text{ m/s}^2$ 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 $0,63 \text{ m/s}^2$) 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 $\text{OR} = 1,04$ 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 $\text{OR} = 1,08$ ($\text{CI}_{95}: 1,04 / 1,13$). Für die Untardiagnosen des Lumbalsyndroms lauten die Ergebnisse sehr ähnlich.

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

Betrachtet man die vier verschiedenen Dosisgruppen, wie sie in Abschn. 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 Gruppen verglichen werden können, kann man zum einen jede Belastungsgruppe mit der unbelasteten Gruppe vergleichen und zum anderen Gruppen zu größeren Einheiten zusammenfassen. Aus diesen verschiedenen Vergleichen soll nur ein Beispiel angeführt werden: Den deutlichsten Beleg für eine höhere Gefährdung der LWS mit zunehmender Dosis der Schwingungsbelastung (auf Grundlage von *Tagesexposition A(8)* und Schwellenwert $0,63 \text{ m/s}^2$) erhält man, wenn man die folgenden beiden Gruppen analog zu Abschn. 4.4.3 gegenüberstellt:

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

Hier resultiert ein alterskorrigiertes $\text{PVR}_{\text{MH}} = 1,08$ ($\text{CI}_{95}: 0,83 / 1,39$). Die Ergebnisse aus den anderen möglichen Gruppenvergleichen liegen in einem ähnlichen Bereich. Es gibt also im-

mer noch deutliche Hinweise auf eine Zunahme der Lumbalsyndrom-Häufigkeit mit wachsender Dosis, aber die methodischen Einschränkungen sind beim Follow-Up doch insofern größer, als einerseits die Stichprobe kleiner ist und andererseits die Zahl der Fälle weiter zugenommen hat, so dass 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 (CI₉₅: 0,90 / 1,15)
- Prädiktor „Lebensalter“ in Jahren: OR = 1,03 (CI₉₅: 0,99 / 1,08)

Als Tendenz zeigen sich hier also im 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 Belastungsgruppen, wie sie in 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 Gruppe II (GKV-Gesamtdosis > null und < 877,2) gegenüber der unbelasteten Gruppe, und zwar: RR_{MH} = 1,08 (CI₉₅: 0,75 / 1,57).

Für die Inzidenz im Follow-Up-Zeitraum kann evtl. die Belastung in genau diesem 4-jährigen Zeitabschnitt von besonderer Bedeutung sein. Deshalb wurde die Stichprobe auch in folgende vier Gruppen unterteilt:

I: nie mit *Tagesexposition* $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert

II: nur bis zur Erstuntersuchung mit *Tagesexposition* $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert

III: nur im Follow-Up-Zeitraum mit *Tagesexposition* $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert

IV: immer (also vor und nach der Erstuntersuchung mit *Tagesexposition* $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert.

Tab. 35 gibt für die 111 Teilnehmer ohne Lumbalsyndrom-Diagnose in der Erstuntersuchung wieder, welche Diagnose für sie bei der Follow-Up-Untersuchung vergeben wurde.

Tab. 35: 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

Expositions- schwelle $A(8) =$ $0,63 \text{ m/s}^2$	n	kein Lumbal- syndrom	lokales Lumbal- syndrom	lumbales Wurzel- syndrom	Lumbal- syndrom insgesamt	RR (CI _{95%}) für Lumbalsyndrom in Bezug auf Gruppe 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 Gruppen III und IV, die im Zeitraum nach der Erstuntersuchung *Tagesexpositionen* von $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$ ausgesetzt waren, ergeben sich (wegen der geringen Gruppengrößen nicht alterskorrigierte) relative Risiken über 1, wobei die Gruppe III natürlich sehr schwach besetzt ist. Fasst man die beiden Gruppen 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 Gruppe III ein deutlicheres Ergebnis im Vergleich mit der unbelasteten Gruppe I:

RR Gruppe II vs. I: 0,47 (CI_{95%}: 0,12 / 1,83)

RR Gruppe III vs. I: 1,85 (CI_{95%}: 0,79 / 4,29)

RR Gruppe 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 Grundlage der Belastung in der z-Achse (Schwarze et al. 1999, S. 178) beschrieben. Deshalb sollen in Tab. 36 auch noch die relativen Risiken auf Grundlage der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ betrachtet werden.

Die Zusammensetzung der Gruppen verändert sich etwas gegenüber Tab. 35, was bei den geringen Fallzahlen schon Auswirkungen haben kann. Jetzt gilt für die Gruppen III und IV, dass sich jeweils mehr als 50 % der Personen bis zur Follow-Up-Untersuchung ein Lumbalsyndrom zuziehen, und in den beiden anderen Gruppen ist diese Diagnose prozentual seltener. Entsprechend liegen die relativen Risiken für diese beiden Gruppen in Bezug auf Gruppe I deutlich über 1, allerdings mit sehr breitem Konfidenzintervall. Insbesondere die Gruppe III – erst seit der EU über $\geq 0,63 \text{ m/s}^2$ exponiert – ist mit 5 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.

Tab. 36: 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

Expositionsschwelle $a_{wz(8)} = 0,63 \text{ m/s}^2$	n	kein Lumbalsyndrom	lokales Lumbalsyndrom	lumbales Wurzelsyndrom	Lumbalsyndrom insgesamt	RR (CI _{95%}) für Lumbalsyndrom in Bezug auf Gruppe 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	

Unter diesem Gesichtspunkt ist es interessant, dass es sich bei den neuen Lumbalsyndrom-Fällen in den Gruppen III und IV noch deutlicher als in Tab. 35 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 Gruppe I:

RR Gruppe III vs. I: 1,89 (CI_{95%}: 0,82 / 4,35)

RR Gruppe 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 4 – 5 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 (Schwarze et al. 1999), die in ihren Auswirkungen zu betrachten war, bestand in der Modifizierung der Frequenzbewertungen nach ISO 2631-1:1997 und VDI 2057, Bl. 1 (2002). An Hand der vom BGIA zur Verfügung gestellten Korrekturfaktoren wurde in Abschn. 3.1 für insgesamt 1.477 Tätigkeitszeiträume der 388 Studienteilnehmer die korrigierte *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{w(8)}$ in den drei Achsen berechnet (Christ et al. 2006). 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 rd. 23 % der Zeiträume Zunahmen bis zu einem Maximum von $0,24 \text{ m/s}^2$ ergeben, nimmt der Wert für 37,5 % der Zeiträume 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* auf Grund der modifizierten Bewertung.

7.2 Vergleich verschiedener Tages-Belastungskennwerte

Während in den neunziger 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 Abschn. 3.2 grundsätzlich relativ hohe Übereinstimmungen zwischen den verschiedenen Tages-Belastungskennwerten in Bezug auf die 1.477 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 – d. h., 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 Vektorbetrag $a_{wv(8)}$ 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. Abb. 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 ja auch im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 als wesentliche bandscheibenbedingte Erkrankungen durch die Einwirkung von GKS im Sitzen beschrieben werden. Andere anamnestische und klinische Befunde aus den ärztlichen Untersuchungen der Probanden und die in Abschn. 4.5 behandelte zusammenfassende Beurteilung des LWS-Zustandes wurden zwar auch hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit den Belastungskennwerten analysiert, aber sie erwiesen sich allesamt als weniger aussagekräftig als die genannten Diagnosen. Auf röntgenologische Befunde und Diagnosen wird später noch 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, der 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 1-3 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 rd. 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. Tab. 15) fast alle alternativ eingesetzten Tageskennwerte der Schwingungsbelastung als aussagekräftige Prädiktoren mit Konfidenzgrenzen über 1 und Odds Ratios zwischen 1,06 und 1,15 – d.h. 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 Rahmen des Teilprojekts B ermittelten kraftbezogenen Beurteilungsgrößen kommt eine besondere Bedeutung zu, weil sie im Rahmen dieses Projektes in ihrer Aussagekraft mit den *Beurteilungsbeschleunigungen* verglichen werden sollten. Im Abschn. 3.2 hatten sich bereits sehr hohe Korrelationen zwischen den jeweiligen Vergleichswerten gezeigt, d.h. zwi-

schen $a_{wz(8)}$ und $a_{Fz(8)}$ wie auch d.h. zwischen $a_{wy(8)}$ und $a_{Fy(8)}$. Auch in den logistischen Regressionsanalysen mit dem Zielkriterium „Lumbalsyndrom“ bzw. mit den beiden Unterdiagnosen in Abschn. 4.1 wurden die kraftbezogenen Beurteilungsgrößen alternativ als Prädiktoren eingesetzt. In den entsprechenden Ergebnisdarstellungen (z. B. Abb. 6 und Tab. 16 – 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 wie 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 darstellt 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 Tab. 2 im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 (2005): 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 10-jähriger 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 neunziger Jahren.

In Abschn. 4.3 wurde die Auswirkung verschiedener Schwellenwerte auf Basis der *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ und der *Tagesexposition* $A(8)$ ausführlich untersucht, indem die bestmögliche Vorhersage der Diagnose „Lumbalsyndrom“ auf Grund 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 denen ein erhöhtes Lumbalsyndrom-Risiko auf Grund 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. Abb. 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 präzisere Abschätzung der Gesundheitsgefährdung lässt sich aus diesen Daten nicht gewinnen, da die Zieldiagnose auch zu sehr mit dem Lebensalter verwoben ist und der Schwingungseinfluss nur retrospektiv abgeschätzt werden kann. Eine genauere Risikoabschätzung wäre im Prinzip nur mit einer aufwändigen Kohortenstudie zu realisieren. Letzten Endes hat der Schwellenwert aber auch nur praktische Bedeutung im Zusammenhang mit einer ausreichenden Expositionsdauer, so dass dieses Thema im Rahmen der folgenden Dosisbetrachtung weiter verfolgt wird.

7.6 Bewertung von Schwingungsdosen

Zunächst lässt sich mit Hilfe von logistischen Regressionen (z. B. in Tab. 22) zeigen, dass sich die Schwingungsdosis des Arbeitslebens neben dem Lebensalter als signifikanter Prädiktor der Diagnose „Lumbalsyndrom“ bewährt. Dies gilt für Dosisberechnungen auf 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 bezüglich der Schwellenwerte 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, so dass hieraus keine klaren Empfehlungen für ein bestimmtes Bewertungsmodell abzuleiten sind. Aus den Analysen ergibt sich lediglich, dass pro Belastungszuwachs von 500 Doseinheiten deutliche Risikoerhöhungen für die Diagnose „Lumbalsyndrom“ festzustellen sind, die z. B. auf der Grundlage der *Tagesexposition A(8)* im Bereich von ca. 13 - 15 % liegen.

Hinsichtlich der Anforderungen, die sich in der Praxis der Schwingungsbewertung stellen, sind jedoch klare Empfehlungen sowohl hinsichtlich Schwellenwerten wie Schwingungsdosen erforderlich. Deshalb wurde in Abschn. 4.4 versucht, auf eher pragmatische Weise zu Entscheidungen im bisher betrachteten Wertebereich zu kommen. Es konnte bei Unterteilung der Stichprobe in unbelastete, kurzzeitig belastete und über 10 Jahre belastete Gruppen gezeigt werden, dass ein Schwellenwert von $0,63 \text{ m/s}^2$ zu einer plausibleren Risikoabschätzung der Gruppen 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 auf Grund der Expositionsdauer nicht nach 10 Jahren, sondern erst bei einer Gesamtdosis über 1.400 Einheiten deutlich abzeichnet, also nach 16,5 Jahren Exposition mit $0,63 \text{ m/s}^2$ (oder rd. 10 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 Lendenwirbelsäule anzusehen seien. Sowohl in der früheren GKV-Studie wie 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. Gelegentlich kommt dem Body-Mass-Index noch ein Erklärungswert zu, aber Indices 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 maximalen *Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$ beeinflusst wird (und in etwas geringerem Maße auch von der *Tagesexposition* $A(8)$). Allerdings enthält die Stichprobe nur insgesamt 29 Personen mit auffälliger Diskushöhe in diesem Bereich, so dass 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 auf Grund 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 dieser Reanalyse zeigten sich klare Zusammenhänge aber 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 Hinzunahme der Gruppe mit „lumbalem Wurzelsyndrom“ eher abgeschwächt. Die naheliegendste Erklärung dafür dürfte, wie schon angesprochen, in einem Selektionseffekt liegen, dergestalt dass die Symptomatik eines „lumbalen Wurzelsyndroms“ den Betroffenen mit größerer Wahrscheinlichkeit zu einer Aufgabe der schwingungsbelasteten Tätigkeit führt als ein „lokales Lumbalsyndrom“. Eigentlich gibt es im vorliegenden Bericht nur zwei Stellen, an denen das „lumbale Wurzelsyndrom“ eine besondere Stellung einnimmt:

- Anhand der Abb. 14 wurde erörtert, dass ein linearer Anstieg der Häufigkeit mit Expositionsdauer bzw. Gesamtdosis bei Betrachtung des „lumbalen Wurzelsyndroms“ etwas deutlicher abzulesen ist – d. h., der nächste Sprung in der Prävalenz erfolgt also nicht erst mit Erreichen einer Gesamtdosis über 1.400 Einheiten.
- Bzgl. der Lumbalsyndrom-Inzidenz bei der Follow-Up-Untersuchung ergab sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen einer GKV-Belastung von $A(8) \geq 0,63 \text{ m/s}^2$ 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, so dass die Folgen der Schwingungsexposition damit eher unterschätzt werden. Eine Aufklärung und Berücksichtigung dieser Selektion wäre aber nur im Rahmen einer aufwändigen Kohortenstudie möglich.

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 Modell-Untersuchungen, wie sie z. B. von Seidel et al. (2000) und Hinz et al. (2007) durchgeführt wurden. Die pathophysiologischen Erkenntnisse werden gestützt durch Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen, in denen festgestellt wurde, dass Berufsgruppen mit langjähriger Einwirkung intensiver Ganzkörpervibrationen im Sitzen eine signifikant höhere Prävalenz bandscheibenbedingter Erkrankungen im Vergleich zu nicht belasteten Kontrollgruppen aufweisen (Andersson 1991, Bovenzi & Hulshof 1998, Müsch 1987). In diesen Studien wurden bandscheibenbedingte Erkrankungen als Outcome-Variable definiert, so dass 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 (Mense 2008), so dass ein möglicher Zusammenhang zu Vibrationsbelastungen überdeckt wird. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass in den verschiedenen epidemiologischen Studien des aktuellen EU-Forschungsprojekts VIBRISKS (2007, S. 71 - 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 7 Tage und 12 Monate, wie sie im Rahmen von VIBRISKS 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, so dass 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 offensichtlich 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 Ganzkörpervibrationen (GKV) im Sitzen hat durch die Überarbeitung von einschlägigen Regelwerken wie der VDI-Norm 2057-1:2002 und durch neue Richtlinien wie der LärmVibrationsArbSchV von 2007 deutliche Änderungen erfahren. In einer von der DGUV geförderten Reanalyse der „Epidemiologischen Studie Ganzkörpervibration“ (GKV-Studie) aus den 90-er Jahren sollten diese neuen Bewertungsansätze auf die damals erhobenen Daten angewendet werden.

In der damaligen GKV-Studie 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 Arbeitsmaschinen bzw. -fahrzeuge 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 zeigen 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; CI₉₅: 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; CI₉₅: 1,09 / 1,40). Auch die Bedeutung von Schwellenwert und Expositionsdauer im Hinblick auf die gesundheitliche Gefährdung wurden 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 m/s², so ergeben sich die besten Ergebnisse, wenn man nur *Tagesexpositionen* ab $A(8) = 0,58$ m/s² berücksichtigt (OR = 3,4; CI₉₅: 1,9 / 6,1). Berechnet man Gesamtdosen der Schwingungsbelastung während des Arbeitslebens und vergleicht die Lumbalsyndrom-Prävalenz zwischen Gruppen unterschiedlich hoher Dosis, so hat die Wahl des Schwellenkriteriums großen Einfluss auf die Höhe des Risikos: Bei einem Schwellenwert von $A(8) = 0,63$ m/s² zeigt sich z. B. ein signifikanter Anstieg des alterskorrigierten Prävalenzratenverhältnisses zwischen den unbelasteten Personen und denen, die bis zur 10-Jahres-Dosis dieses Tageswertes belastet waren (PVR_{MH} = 1,5; CI₉₅: 1,1 / 2,0). Ein noch deutlicherer Anstieg (PVR_{MH} = 1,7; CI₉₅: 1,2 / 2,5) zeigt sich zwischen den Unbelasteten und denen mit einer sehr hohen Belastung (mehr als 1400 Dosis-Einheiten - entspricht einer Exposition von 10 Jahren bei $A(8) = 0,8$ m/s² bzw. von 16,5 Jahren bei $A(8) = 0,63$ m/s²).

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 überzeugender Zusammenhang mit den Röntgendiagnosen. Als wichtigstes Einzelergebnis fiel auf, dass im Segment L5/S1 das OR mit 1,17 (CI_{95%}: 1,02 / 1,34) auf einen Einfluss der Schwingungsbelastung (*Beurteilungsbeschleunigung* $a_{wz(8)}$) auf die Diskushöhe hindeutete.

Insgesamt 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 ab einem Schwellenwert von ca. 0,63 m/s² täglicher Belastung zunehmen, werden bestätigt, und 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.

Regelwerke:

ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. Genf, International Organisation for Standardization, 1997

VDI 2057, Blatt 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen. Beuth Verlag, Berlin 2002

Richtlinie 2002/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates v. 25. Juni 2002. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 177/13, 6.7.2002

Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2110 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung (BKV). Bek. des BMGS vom 1. Juni 2005 – 414-45222-2110. Bundesarbeitsblatt 7-2005, S. 43ff. Berichtigt in Bundesarbeitsblatt 8/9-2005, S. 46.

Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV). Bundesgesetzblatt Jg. 2007 Teil I Nr. 8, Bonn 8.3.2007

Literatur:

Andersson, G.B.J.: The epidemiology of spinal disorders. In: Frymoyer, J.W. et al. (eds): The Adult Spine, Principles and Practice. New York: Raven 1991, 107-146

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.; Petereit-Haack, G.; Haerting, J.: Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition durch Ganzkörpervibration und bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule – Auswertungen innerhalb der Deutschen Wirbelsäulenstudie. Zbl Arbeitsmed 57 (2007) 317 - 327

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 and Vibration (1998) 595-611

Burnham, K.; Anderson, D.: Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information Theoretic Approach. New York: Springer 2002

Christ, E.; Fischer, S.; Kaulbars, U.; Sayn, D.: Vibrationseinwirkungen an Arbeitsplätzen – Kennwerte der Hand-Arm- und Ganzkörper-Schwingungsbelastungen. BGIA-Report 6/2006

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, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1992

Forster, M.R.: Key concepts in model selection: performance and generalizability. J. Math. Psychol. 44 (2000) 205 - 231

Fritz, M.: Modelle zur Nachbildung der mechanischen Eigenschaften des menschlichen Körpers bei Belastungen durch Ganz-Körper-Schwingungen. Zbl Arbeitsmed 53 (2003) 524 - 535

Fritz, M.; Bröde, P.; Fischer, S.: Vergleich der Schwingungsbewertung nach VDI 2057 mit einer kraftbezogenen Bewertung zur Abschätzung des Risikos von Wirbelsäulenveränderungen. Zbl. Arbeitsmed. 53 (2003) 354 - 363

Hinz, B.; Seidel, H.; Hofmann, J.; Menzel, G.: Modelle europäischer Fahrer – neue Wege zur Beurteilung von Gesundheitsgefährdungen durch langzeitige Einwirkung von Ganzkörper-

- schwingungen. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg): Humanschwingungen. Tagung Dresden 8.-9.10.2007. VDI-Berichte Nr. 2002. Düsseldorf: VDI 2007
- Krämer, J.; Schleberger, R.; Hedtmann, A.: Bandscheibenbedingte Erkrankungen - Ursachen, Diagnose, Behandlung, Vorbeugung, Begutachtung. 3. überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Thieme 1994
- Kreienbrock, L.; Schach, S.: Epidemiologische Methoden. 4. Aufl. München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag 2005
- Mense, S.: Muskelschmerz – Mechanismen und klinische Bedeutung. Dtsch. Arztebl. 105, 12, (2008) A214–219
- Müsch, F.H.: Lumbale Bandscheibendegeneration bei Erdbaumaschinenfahrern mit langjähriger Ganzkörper-Vibrationsexposition. Med. Diss., Mainz 1987
- Pospeschill, M.: Praktische Statistik. Eine Einführung mit Anwendungsbeispielen. Weinheim: Psychologie Verlags Union 1996
- Rothman, K. J.: Modern epidemiology. Boston: Little, Brown and Company 1986
- Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.: Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch Ganzkörperschwingungen – Epidemiologische Studie - Zusammenhang zwischen Schwingungsbelastung und medizinischen Untersuchungsbefunden. VDI-Berichte Nr. 1345, S. 77 – 84. Düsseldorf: VDI-Verlag (1997)
- Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.: Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen auf die Lendenwirbelsäule – Eine Follow-Up-Studie an 388 Fahrern verschiedener Fahrzeuge. Arbeitsmedizin – Sozialmedizin – Umweltmedizin 33 (1998) 429 - 442
- Schwarze, S.; Notbohm, G.; Hartung, E.; Dupuis, H.: Epidemiologische Studie „Ganzkörper-vibration“. Sankt Augustin: HVBG 1999
- Schwarze, S.; Notbohm, G.; Dupuis, H.; Hartung, E.: Dosiskonzept für Belastung und Beanspruchung durch Ganzkörperschwingungen. Zbl Arbeitsmed 53 (2003) 15 - 23
- Seidel, H.; Blüthner, R.; Hinz, B.: Ermittlung vibrationsbedingter Belastungsverläufe in der Lendenwirbelsäule mit Hilfe dynamischer Vielkörpermodellierung. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Fb 889. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 2000
- 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) 290 – 303
- Tonscheidt, H.: Röntgenologische Veränderungen der Lendenwirbelsäule bei Ganzkörperschwingungsbelastung – Ergebnisse einer Follow-Up-Studie. Dissertation Univ. Düsseldorf 1999
- VIBRISKS – Risks of Occupational Vibration Exposures. European Commission – FP5 Project No. QLK4-2002-02650. Final Technical Report, 2007