

Erschütterungsbeurteilung nach ÖNORM S 9012 im Vergleich zur internationalen Normung

Peter Steinhauser und Sigrid Steinhauser, Wien

Zusammenfassung Die ÖNORM S 9012 dient der Beurteilung von Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen des Schienen- und Straßenverkehrs. In der Ausgabe 2010 werden die seit der Erstausgabe 1996 gewonnenen Erkenntnisse über die Erschütterungswahrnehmung sowie die seither erschienenen neuen Ausgaben von Normen und Richtlinien berücksichtigt. Die sich aus der Umstellung von Frequenz- und Zeitbewertung ergebenden Auswirkungen werden diskutiert. Hinsichtlich der Beurteilung der Sekundärschallimmissionen ergeben sich nur geringfügige Änderungen zur alten Ausgabe. Der an Beispielen vorgenommene abschließende Vergleich mit der Erschütterungsbewertung nach DIN 4150-2 zeigt, dass letztere einerseits mit der „Fast“-Bewertung Erschütterungsspitzen überschätzt und andererseits durch die Beschränkung auf linear polarisierte Schwingungen die Wahrnehmung mehrdimensionaler Erschütterungen unterschätzen kann.

Evaluation of vibrations with ÖNORM S 9012 in comparison with international standards

Summary The Austrian standard S 9012 concerns the evaluation of vibration and structure-borne noise immission from railways and road traffic. The edition 2010 implements research results as well as the latest issues of international standards. The changes in frequency and time weighting are discussed. With regard to structure-borne noise immission only marginal changes have been made in relation to the former edition. For typical examples a comparison of vibration evaluation with DIN 4150-2 is presented finally. The latter overestimates peak vibration values due to the "fast" weighting method on one side. Because of the limitation to directional polarized vibrations it underestimates the perception of multidirectional immissions.

Für die Beurteilung von Schienenverkehrserschütterungen ist in Österreich 1996 die ÖNORM S 9012 herausgegeben worden [1]. Da im Zuge des damals bereits voll angelaufenen Ausbaus des Bahnnetzes zahlreiche Tunnelbauvorhaben in Planung waren, aber für die Bewertung der Zumutbarkeit des durch die Erschütterungsübertragung ausgelösten sekundär abgestrahlten Luftschalls bei den Oberliegern keine allgemein anerkannten Beurteilungsrichtlinien verfügbar waren, entstand der Bedarf für diese Norm. Obwohl die Norm DIN 4150-2 in der Ausgabe von 1992 [2] bereits Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Gebäuden in einer sehr umfassenden Weise behandelte, fehlten darin Richtwertangaben für die Erschütterungswirkung von innerstädtischen Schienenverkehrsmitteln und für bestehende Schienenverkehrsstrecken. Die ÖNORM baute auf den bewährten Bewertungsparametern der bewerteten Schwingstärke K_B und des A-bewerteten Sekundärschallpegels auf. Aus heutiger Sicht kann festgestellt werden, dass sich diese Norm im Alltagsgebrauch bewährt hat.

Über den nationalen Bereich hinausgehend hat die Norm Anerkennung erfahren, weil sowohl die Erschütterungen als auch der sekundäre Luftschall von der Norm abgedeckt werden [3]. Hinsichtlich des Sekundärschalls erklärt das damalige BUWAL (nunmehr BAFU) in einem Bericht [4], in dem europäische Normen verglichen werden:

„Als fortschrittlichste und den häufigsten Problemen des Bahnverkehrs angepasste Norm gilt in Fachkreisen die ÖNORM S 9012. Sie bewertet neben dem im Lärmschutz üblichen energieäquivalenten Schalldruckpegel L_{eq} auch den Mittelwert der Spitzenpegel jeder Zuggattung ... mit der ... Zeitkonstanten „slow“.“

In der Folge ist diese Zeitkonstante in der Norm ISO 14837-1 ebenfalls für die Sekundärschallbeurteilung von Zügen aufgenommen worden.

Den Anlass für die Überarbeitung der ÖNORM bildeten neue Ausgaben der ISO 2631-1 und ISO 2631-2 sowie der Richtlinie VDI 2057 Blatt 1. Die ISO-Normen besitzen dabei als deutschsprachige Übersetzung auch den Status einer österreichischen Norm. Am auffälligsten war dabei der Wechsel von der bewerteten Schwingstärke K_B zur frequenzbewerteten Schwingbeschleunigung. In der Zeitbewertung sieht die Norm nunmehr vom Effektivwert als grundlegende Beurteilungsbasis ausgehend, den mit einer Zeitkonstanten arbeitenden exponentiell gleitenden Effektivwert bzw. für stoßhaltige Schwingungen (Scheitelfaktoren größer 9) die Vierte-Potenz-Methode vor. Außerdem sieht sie vor, den vektoriel- len resultierenden Effektivwert zur Beurteilung zu verwenden, wenn Schwingungen nicht nur in einer einzigen Richtung polarisiert sind. Und schließlich wird in der Richtlinie VDI 2057 Blatt 1 die konsequente formale Angleichung der Schwingungsbewertung an den energieäquivalenten Ansatz der Akustik vorgenommen.

Im Folgenden wird zunächst die Implementierung dieser Ansätze in die ÖNORM dargestellt und dann die Auswirkungen auf die Beurteilung im Vergleich zur DIN 4150-2 erörtert.

Frequenzbewertung nach ISO 2631-2

Der Zusammenhang zwischen den objektiv messbaren Schwingungsgrößen (Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit, Schwingweg) und der subjektiven Wahrnehmung wird durch die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung nach ISO 2631-2 beschrieben. Die Schwingungsbelastung des Menschen wird durch die Intensität, das Frequenzspektrum und die Einwirkungsrichtung der Erschütterungen bestimmt, weshalb diese drei Parameter die Größe der Belastung bestimmen. Ziel ist es, Schwingungswahrnehmungen einer bestimmten Stärke unabhängig von der Messgröße, Richtung und Frequenz einerseits und der menschlichen Tätigkeit bzw. Einstellung andererseits durch einen einheitlichen Zahlenwert zu beschreiben. An sich besitzt der menschliche Körper in den drei biodynamischen Koordinatenrichtungen eine unterschiedliche Sensitivität für Erschütterungen. Da aber beim Aufenthalt in

Wohnungen die Freiheit des Menschen, seine Körperhaltung zu wählen (Stehen, Sitzen, Liegen), nicht eingengt werden darf, sieht die ISO 2631-2 für diese im Umweltschutz auftretende Problemstellung ein Bewertungsverfahren vor, bei dem alle drei Komponenten eines orthogonalen Koordinatensystems gleiches Gewicht haben.

Nach ISO 2631-2 ist hierbei für die menschliche Erschütterungswahrnehmung durch den ganzen Körper der Frequenzbereich von 1 bis 80 Hz maßgeblich. Für die Messgrößen Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung gibt die Norm W_m -Frequenzbewertungsfunktion an. Für die Schwinggeschwindigkeitsmessdaten ist in **Bild 1** das W_m -Frequenzbewertungsfunktion wiedergegeben.

Zwar hat die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung die bisher verwendete bewertete Schwingstärke K als Maß der menschlichen Erschütterungswahrnehmung abgelöst; jedoch handelt es sich dabei praktisch nur um eine Änderung der Nomenklatur. Wie aus **Bild 1** ebenfalls ersichtlich, unterscheiden sich die frühere K_B -Frequenzbewertungsfunktion im Rahmen der nach ISO 2631-1 zulässigen Messtoleranzen nicht von der nunmehrigen W_m -Frequenzbewertung (da die „Ecken“ der vormaligen K_B -Filterfunktion mess- und auswertetechnisch durch einen kurvenförmigen Filterverlauf approximiert werden, kann in der Praxis von identischen Bewertungsfunktionen ausgegangen werden). Die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung ist lediglich zahlenmäßig um den Faktor 1/28 von der bisher verwendeten bewerteten Schwingstärke $K_B = 0,1$ entspricht somit eine W_m -bewertete Schwingbeschleunigung $a_w = 3,57 \text{ mm/s}^2$.

Da aber die ÖNORM S 9012 bis Januar 2010 in der alten Ausgabe noch die Bezeichnung „Bewertete Schwingstärke K_B “ verwendet hat, wie dies andere mitteleuropäischen Beurteilungsnormen noch immer tun, wird der Zusammenhang zwischen der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung, der bewerteten Schwingstärke und der subjektiven Wahrnehmung in **Tabelle 1** in einer empirisch bestimmten Abstufung der ÖNORM angegeben.

Die sog. Föhlschwelle wird in der Norm nicht definiert, da die Erschütterungsintensität, die für die beginnende Wahrnehmbarkeit von Erschütterungen erforderlich ist, wesentlich von der Aufmerksamkeit der Betroffenen abhängt. Nur bei gespannter Aufmerksamkeit wird eine Erschütterung der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung $3,57 \text{ mm/s}^2$ tatsächlich wahrgenommen werden können. Jede Ablenkung (Zuhören, Lesen etc.) vermindert die Wahrnehmbarkeit von Erschütterungen bereits beträchtlich und

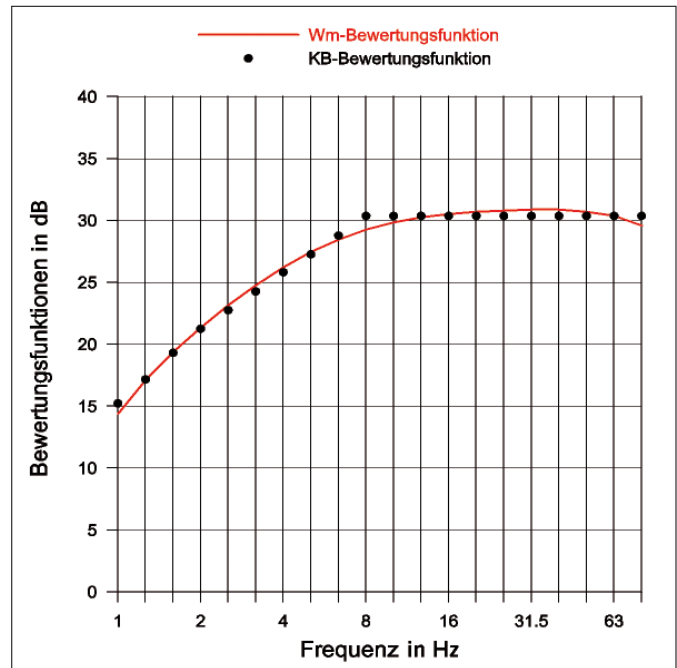


Bild 1 Vergleich der W_m -Bewertungsfunktion nach ISO 2631-2 mit der bisherigen K_B -Bewertungsfunktion für Schwinggeschwindigkeitsmessdaten nach ÖNORM S 9012.

eigene Aktivitäten (Reden, Essen etc.) noch mehr. Dementsprechend kann die Föhlschwelle nicht als Schwellwert, sondern nur als Schwellenband angegeben werden, das von mehreren Faktoren beeinflusst wird: Häufig wird die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung a_w dabei im Bereich von $a_w = 10$ bis 20 mm/s^2 liegen, wie dies auch aus ISO 2631-1, Anhang C ersichtlich ist.

Wie einschlägige Laborversuche [5] zeigen, kann der Mensch verschieden starke Erschütterungsimmissionen erst dann unterscheiden, wenn sich ihre Stärke um 25 % ändert; in Dezibel ausgedrückt ergibt dies ein Auflösungsvermögen des Menschen für unterschiedliche Erschütterungsimmissionen von $\pm 2 \text{ dB}$, das somit demjenigen für Schallimmissionen recht ähnlich ist. Daraus ergibt sich, dass der Mensch erst eine Verdoppelung (Halbierung) der Immission als wesentliche Qualitätsveränderung empfindet, was er durch eine unterschiedliche Wahrnehmungsbeschreibung ausdrückt. Dies kommt auch in der Normabstufung zum Ausdruck (vergl. Tabelle 1).

Da die Resonanzfrequenzen der verschiedenen Körperteile des Menschen im Bereich von etwa 1 bis 70 Hz liegen [6], werden niedrigere Frequenzen stärker wahrgenommen als es einer Proportionalität zur Anregungskraft entspräche. Es ergibt sich im Frequenzbereich von 8 bis 80 Hz vielmehr eine Schwinggeschwindigkeitsproportionale und somit impulsproportionale Wahrnehmung (siehe Bild 1).

Gemäß ÖNORM S 9012 sind zur Ermittlung der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung der menschlichen Wahrnehmung Schwingbeschleunigungs- und Schwinggeschwindigkeitsmesssysteme gleichwertig verwendbar. Die ÖNORM ISO 2631-2 gibt für beide Messgrößen die Frequenzbewertungsfunktion an. Da aber die Schwin-

Tabelle 1 Zusammenhang zwischen W_m -bewerteter Schwingbeschleunigung, bewerteter Schwingstärke K und Wahrnehmung.

W_m -bewertete Schwingbeschleunigung in mm/s^2	Bewertete Schwingstärke K	Beschreibung der Wahrnehmung	
3,57	0,1	„Föhlschwelle“	nicht spürbar
7,14	0,2		gerade spürbar
14,3	0,4		schwach spürbar
28,6	0,8	„Weckschwelle“	spürbar
57,1	1,6		deutlich spürbar
113	3,15		stark spürbar
228	6,3		
446	12,5		
893	25		
1 790	50		sehr stark spürbar
3 570	100		

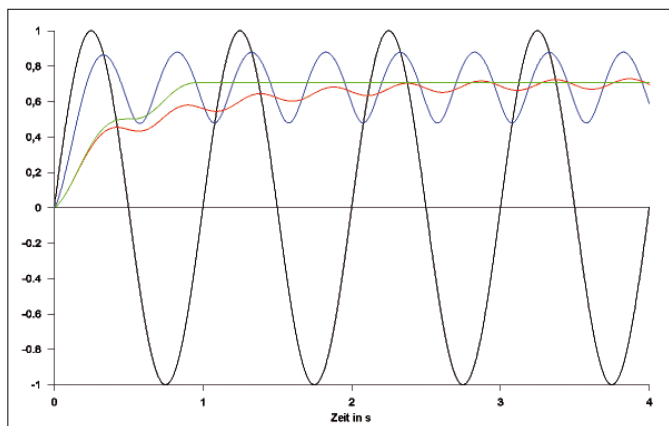


Bild 2 Auswirkung verschiedener Effektivwertberechnungsvarianten bei einer 1-Hz-Schwingung: grün: Integrationszeit $T = 1$ s, rot: Zeitkonstante $\tau = 1$ s, blau: Zeitkonstante $\tau = 0,125$ s.

gungswahrnehmung des Menschen im Frequenzbereich von 8 bis 80 Hz der Schwinggeschwindigkeit folgt, sind bei Schwinggeschwindigkeitsmessungen aufgrund der geringeren Anpassungen durch die Filter auch kleinere Messfehler gegeben, weshalb die Norm Schwinggeschwindigkeitsmessungen empfiehlt.

Zeitbewertung

Da der Mensch keine Einzelschwingungen wahrnehmungsmäßig auflösen kann, sondern lediglich einen mittleren Effektivwert oder Pegel über ein Zeitintervall wahrnimmt, ist eine dieser Wahrnehmung angepasste Mittelwertbildung erforderlich. Die Reaktionszeit des Wahrnehmungsvermögens, die auch als Erinnerungsvermögen bezeichnet wird, hängt nach den grundlegenden Untersuchungen von Dieckmann [7; 8] von der Resonanzüberhöhung des menschlichen Körpers bei Schwingungsanregung ab. Diese Überhöhung erreicht kaum mehr als den Faktor 1,7. Dementsprechend wird der Betrag von 30 % der kritischen Dämpfung erreicht, was bedeutet, dass angeregte Körperschwingungen verhältnismäßig rasch abklingen. Trotzdem ist das Reaktionsverhalten des Menschen auf Erschütterungen deutlich langsamer, als dies bei akustischen Schwingungen im Ohr der Fall ist. Die Untersuchungen [9] haben ein Wahrnehmungs- oder Erinnerungsvermögen von knapp einer Sekunde ergeben, das sich bei ganz niedrigen Frequenzen ($f < 4$ Hz) sogar noch verlängert.

Von der maßgeblichen Untergrenze 1 Hz des spürbaren Frequenzbands ausgehend, wurde in der ÖNORM S 9012 die kürzestmögliche Integrationszeit $T = 1$ s gewählt, die zwar eine korrekte gleitende Effektivwertberechnung gestattet, aber den menschlichen Erinnerungsverlust mit der Zeit nicht erfassen kann. Dazu dient in der ISO die exponentielle Effektivwertermittlung, wofür die Zeitkonstante $\tau = 1$ s entsprechend der „slow“-Bewertung empfohlen wird. Bei einer kürzeren Zeitkonstanten, wie den 0,125 s der „Fast“-Bewertung, erhalten die Spitzen unregelmäßiger Erschütterungen ein sehr großes Gewicht, das der menschlichen Wahrnehmung nicht entspricht, die über das genannte längere Zeitintervall integriert. Erst bei sehr hohen Scheitelfaktoren > 9 , deren Auftreten im Wohnbereich praktisch ausgeschlossen ist, wäre das 4. Potenzbewertungsverfahren der ISO anzuwenden.

Diese Zeitkonstante $\tau = 1$ s ist gleichzeitig die kürzestmögliche, die eine korrekte Effektivwertberechnung für eine 1-Hz-Schwingung ermöglicht, wie **Bild 2** zeigt. Die Anwendung der in der Akustik üblichen „Fast“-Zeitbewertung mit $\tau = 0,125$ s führt zu einem kräftig oszillierenden Pegel. Während bei der tiefsten hör-

baren Frequenz ($f = 16$ Hz) die Zeitkonstante 0,125 s immer noch zwei volle Schwingungsperioden umfasst, sind es bei der tiefsten spürbaren Frequenz von 1 Hz gerade noch ein Achtel einer Schwingungsperiode, weshalb die Effektivwertbildung keine Mittelung mehr bewirkt. Dieser stark schwankende Pegelverlauf entspricht in keiner Weise der menschlichen Wahrnehmung und bewirkt rechnerisch um rund 25 % scheinbar überhöhte Wahrnehmungsmaxima. Dieses Problem tritt insbesondere im Frequenzbereich von 1 bis 8 Hz auf, weshalb die Anwendung von DIN 4150-2, die die „Fast“-Bewertung verwendet, auf dominant niederfrequente Erschütterungen ($f < 12$ Hz) aus signalanalytischen Gründen zu beträchtlichen Fehlern führt und daher zu vermeiden ist. Dieses Verhalten ist besonders störend, weil die Gebäudeeigenfrequenzen durchwegs im Frequenzband von 1 bis 10 Hz liegen und auch die Eigenfrequenzen von alten Holzdecken oder weit spannenden Geschossdecken in dieses Frequenzband fallen, sodass Bewertungsverzerrungen sehr häufig zu erwarten sind.

Bild 2 zeigt die Wirkung der exponentiellen Effektivwertberechnung mit der Zeitkonstanten $\tau = 1$ s und $\tau = 0,125$ s sowie eines gleitenden Effektivwerts mit der Integrationszeit $T = 1$ s. Während letzterer die 1-Hz-Schwingung vollständig glättet, ergibt die exponentielle Berechnung mit $\tau = 0,125$ s den bereits genannten Effekt und mit $\tau = 1$ s einen weitestgehend ausgeglichenen Effektivwertverlauf, der nur wenig um den gleitenden Effektivwert schwankt. Diese Schwankungen sind in Hinblick auf die begrenzte Messgenauigkeit und das menschliche Auflösungsvermögen von Erschütterungen [5] vernachlässigbar klein. Die ÖNORM S 9012 hat aus diesem Grund die von der ISO empfohlene Zeitkonstante $\tau = 1$ s übernommen.

Unter Berücksichtigung des Ziels der Norm, störende Belästigungen auf ein zumutbares Ausmaß zu begrenzen, ist das Argument, die Anwendung einer Konstanten $\tau = 0,125$ s läge im Sinne einer Prävention von Gesundheitsgefährdungen, nicht stichhaltig. Störend werden im Wohnbereich bereits Erschütterungen empfunden, die noch im Bereich des Fühlschwellenbands liegen und somit W_m -bewertete Schwingbeschleunigungsspitzen von $a_{Wmax} = 3,6$ bis 20 mm/s^2 besitzen. Selbst eine Annäherung an die um mehrere Größenordnungen höheren Gesundheitsgrenzwerte der EU-Richtlinie 2002/44/EG kann daher von vornherein ausgeschlossen werden.

Energieäquivalente Immissionsermittlung

Da Untersuchungen von Said et al. [5] ergeben haben, dass der Energiegehalt von Erschütterungsereignissen die menschliche Wahrnehmung am besten beschreibt, wird der energieäquivalente Bewertungsansatz von VDI 2057 Blatt 1 für die Beurteilung verwendet.

Die Einwirkungsdauer T ist dabei jene Zeitspanne, in der der Mensch durch Erschütterungen, die die Fühlschwelle überschreiten, belastet wird. Schwingungsfreie Zeiten sind nicht in die Einwirkungsdauer einzubeziehen, weshalb jedes Ereignis zunächst einzeln zu bewerten ist.

Die Beurteilung erfolgt zweifach, einerseits bezüglich der Maximalimmission während der einzelnen Ereignisse und andererseits hinsichtlich der durchschnittlichen Größe der Immission während des Tag- bzw. Nachtzeitraums.

Aus den gemessenen Zeitverläufen der Schwinggeschwindigkeit $v(t)$, die gemäß ISO 2631-2 auf den Arbeitsfrequenzbereich bandbegrenzt und mit der Bewertungsfunktion W_m frequenzbewertet sind, wird mittels exponentieller Integration der gleitende Effektivwert der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung a_w

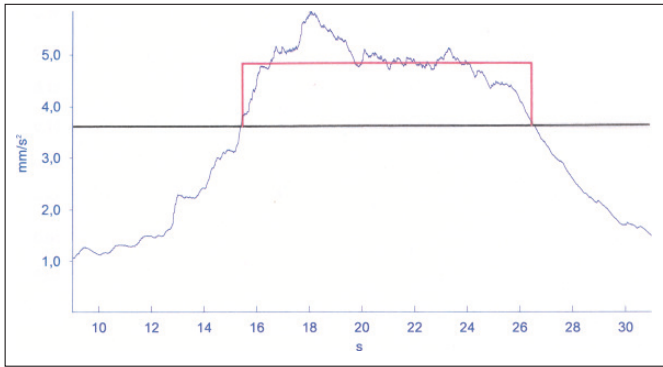


Bild 3 Energieäquivalente Durchschnittsimmission oder Erschütterungsdosis eines Ereignisses. Rote Linien, vertikal: Zeitfenster der energetischen Mittelung, rote Linie, horizontal: energieäquivalenter Mittelwert.

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} [a_w(t)]^2 e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt}$$

berechnet, wobei

- $a_w(t)$ Momentanwert der W_m -bewerteten Beschleunigung
- $\tau = 1 \text{ s}$ Integrationskonstante
- t Zeit (Integrationszeit)
- t_0 Beobachtungszeitpunkt

Das Maximum der resultierenden W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung a_w während eines Ereignisses bildet den Erschütterungsscheitelwert $a_{w,s}$.

Die Beurteilung der durchschnittlichen Immissionen baut auf der energieäquivalenten W_m -bewerteten mittleren Schwingbeschleunigung eines Ereignisses mit der Einwirkungsdauer t_e

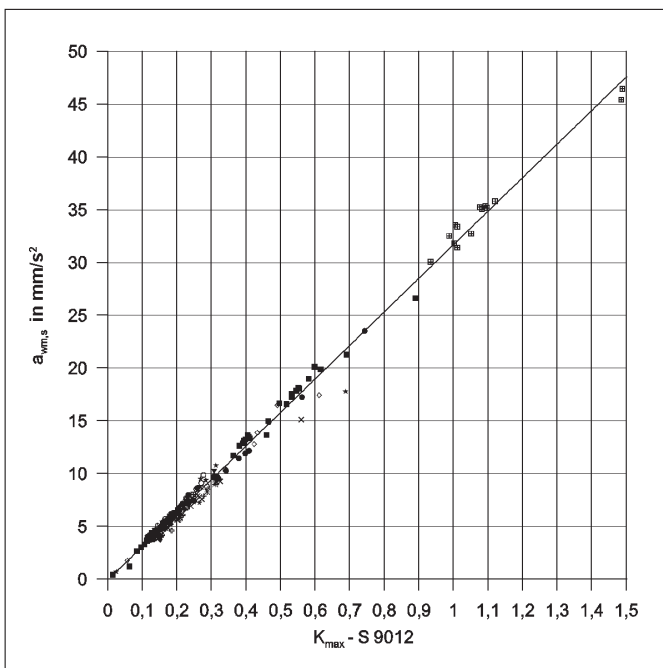


Bild 4 Verhältnis der Scheitelwertmaxima der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung zur bewerteten Schwingstärke.

$$E_v = \sqrt{\frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} a_w^2(t) dt}$$

auf, die als Erschütterungsdosis E_v bezeichnet wird. Die Einwirkungsdauer t_e beschreibt dabei das Zeitintervall, in dem die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung die Untergrenze des Fühlschwellenbands $a_w = 3,57 \text{ mm/s}^2$ überschreitet. **Bild 3** zeigt ein Beispiel der energieäquivalenten Mittelbildung der Erschütterungsdosis.

Aus den $a_{w,s}$ -Werten für die einzelnen Ereignisse, die im Messzeitraum aufgetreten sind, ergibt sich das Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} nach:

$$E_{max} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum a_{w,s}^2}$$

Für die Durchschnittsimmission ergibt sich der energieäquivalente Mittelwert der bewerteten Schwingbeschleunigung $a_{w,eq}$ aus den einzelnen Ereignissen n während des Messzeitraums gemäß

$$a_{w,eq} = \sqrt{\frac{1}{T_E} \sum_{i=1}^n E_{v,i}^2 \cdot t_{e,i}}$$

mit

$$T_E = \sum_{i=1}^n t_{e,i}$$

Die Beurteilungserschütterungsdosis E_r ergibt sich mit dem Beurteilungszeitraum T_r (Tag oder Nacht) gemäß

$$E_r = a_{w,eq} \sqrt{\frac{T_E}{T_r}}$$

Anpassung der Immissionsrichtwerte

Da im Vergleich zur Ausgabe 1996 die Frequenzbewertung marginal, die Zeitbewertung der ÖNORM jedoch systematisch (von $T = 1 \text{ s}$ zu $\tau = 1 \text{ s}$) geändert worden ist, war es im Interesse der Kontinuität der Bewertung erforderlich, Unterschiede genau zu ermitteln. Dazu wurden verschiedene Stichproben, die jeweils mehrere hundert Ereignisse umfassten, parallel nach beiden Auswertemethoden bearbeitet. Unter anderem wurde eine Stichprobe untersucht, bei der systematische Variationen hinsichtlich Erschütterungsquelle (Bahn, U-Bahn, Lkw), Baudynamik (Holz-, Leichtbau- und Massivdecken, nicht unterkellerte Räume), Geodynamik (Fels, steife bzw. weiche Lockersedimente, hoher bzw. tiefer Grundwasserstand) und Distanz (8 bis 100 m) berücksichtigt wurden (**Bild 4**).

Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,994$ ergibt sich zwischen K_{Bmax} und $a_{w,m,s}$ ein Faktor von $1/32$. Dies zeigt, dass die zuvor dargestellten Modifikationen des Bewertungsverfahrens zwar das Ergebnis geringfügig ändern, diese Änderung aber statistisch sehr stabil ausfällt, sodass durch eine entsprechende Abmilderung der Richtwerte ein beurteilungsneutraler Übergang von der alten zur neuen Normausgabe möglich ist. Zur Beurteilung wird in der ÖNORM der quadratische Mittelwert aller Erschütterungsmaxima herangezogen. Es ist dabei nicht zulässig, einzelne Überschreitungen auszublenden

Da die ÖNORM auf der tatsächlichen Einwirkungszeitdauer und nicht auf festen Taktzeitlängen aufbaut, ist auch der sich aus der unterschiedlichen Bewertungsmethodik ergebende Unterschied der Einwirkungszeit von Interesse, der in **Bild 5** wiedergegeben ist.

Obwohl in diesem Fall wegen der unabhängigen Variabilität des Zeitverlaufs der Erschütterungsimmissionen und des Reaktionsverlaufs der beiden Effektivwertfunktionen eine schlechtere Korrelation zu erwarten ist, zeigt Bild 5 ebenfalls einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten von $r=0,97$, wobei die exponentielle Zeitbewertung zu einer systematischen Verlängerung der Einwirkungszeit der Einzelereignisse um ca. 1 s führt.

Sekundärschall

Das Bewertungsverfahren für den Sekundärschall wurde im Wesentlichen von der Ausgabe 1996 – nur redaktionell bearbeitet – in die neue Ausgabe der Norm übernommen. Entsprechend der ISO 14837-1 ist nunmehr auch die Schallpegelberechnung aus Schwingungsmessungen ausdrücklich zugelassen. In diesem Zusammenhang wird auch festgelegt, dass Schallpegelmessungen bei Sekundärschall nur zulässig sind, wenn die direkten Schallimmissionen um mindestens 10 dB(A) unter jenen des sekundären Schalls liegen. Analog zum Erschütterungsteil der Norm wurde auch hier der Anwendungsbereich um die Gebietskategorie Dienstleistungsstätten mit Erschütterungsimmissionen erweitert, da zunehmend der Bedarf entsteht, Immissionsschutzuntersuchungen für in Bahnhöfen eingemietete Büros und Geschäftslokale durchzuführen.

Beurteilungsverfahren

Die ÖNORM S 9012 gibt Richtwerte für zwei Stufen an:

- ausreichender Immissionsschutz für Bereiche mit Vorbelastung,
- guter Immissionsschutz für Neubauvorhaben in Bereichen ohne Vorbelastung.

Die Richtwerte werden nach sechs Gebietskategorien im Sinne der Flächenwidmung gegliedert:

- 1 – Ruhegebiet
- 2 – ländliches Wohngebiet
- 3 – städtisches Wohngebiet
- 4 – Kerngebiet
- 5 – Betriebsgebiet mit geringen Erschütterungsimmissionen
- 6 – Betriebsgebiet mit großen Erschütterungsimmissionen

Für Gebiete mit Wohnnutzung (Kategorien 1 bis 4) erfolgen die Richtwertangaben getrennt für die Tag- und Nachtzeit.

Bei der Festlegung der Erschütterungs- und Sekundärschallrichtwerte war es ein wesentliches Anliegen der Norm, immissionsbedingte Aufwachreaktionen in der Nacht zu vermeiden. Hinsichtlich des Sekundärschalls stützte man sich dabei auf die Untersuchungen von *Griefahn* [10] und hinsichtlich der Erschütterungen auf Erdbebenuntersuchungen [11] über die Weckschwelle bei nächtlichen Erdbeben, die – wie Erfahrungen mit nächtlichen Bauarbeiten zeigen – auch auf technische Erschütterungsquellen übertragbar sind. Demnach ergeben sich erschütterungsbedingte Aufwachreaktionen wie in **Tabelle 2** angegeben.

Da die Schlafentiefe eines Menschen im Lauf der Nacht schwankt, kann dies so interpretiert werden, dass zunächst nur Menschen aus einer Leichtschlafphase geweckt werden, während bei einer W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung von 150 mm/s^2 Menschen auch aus dem tiefsten Schlaf heraus geweckt werden.

Die Norm behandelt jedoch keine

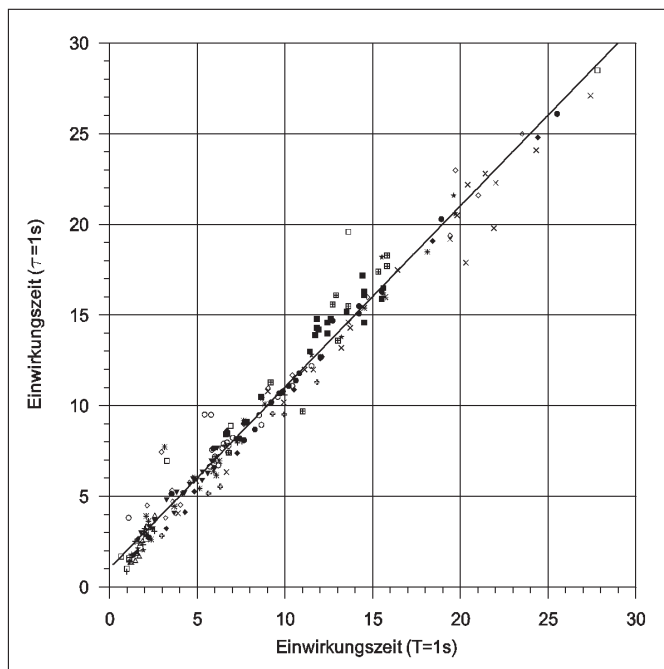


Bild 5 Länge der Einwirkungszeit mit $a_w > 3,57 \text{ mm/s}^2$ in Abhängigkeit von der Zeitbewertung ($T = 1 \text{ s}$ versus $\tau = 1 \text{ s}$).

Sondernutzungen wie erschütterungsempfindliche Arbeitsplätze (Tonstudios, Operationssäle u. dgl.), da für diese nicht das Belästigungsausmaß ausschlaggebend ist, sondern funktionale Kriterien entscheidend sind.

Die Beurteilung erfolgt anhand von vier Parametern:

- Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} : mittlerer Maximalwert der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung der schlechtesten Zuggattung.
- Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r als energieäquivalenter Mittelwert der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung des gesamten Verkehrs im betrachteten Beurteilungszeitraum.
- mittlerer A-bewerteter Maximalpegel $L_{A,\text{max},m}$ des Sekundärschalls der lautesten Zuggattung.
- A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{A,\text{eq}}$ des Sekundärschalls des gesamten Verkehrs.

Nur wenn alle vier Parameter die Richtwerte der jeweils anzuwendenden Immissionsschutzstufe erfüllen, ist die Beurteilung positiv. Für den Straßenverkehr oder andere Erschütterungsquellen gilt sinngemäß dasselbe Beurteilungsverfahren.

Die Erfahrungen mit der alten Normausgabe haben ergeben, dass auf die Beurteilung des Sekundärschalls verzichtet werden kann, wenn der direkte Luftschall dominant ist.

Emissionsprognose

Erschütterungsprognosen für Neubauvorhaben bilden einen wesentlichen Aufgabenbereich für Umweltschutzuntersuchungen. Im Unterschied zur Lärmproblematik bestehen aber aus-

Tabelle 2 Erschütterungsbedingte Aufwachreaktionen.

W_m -bewertete Schwingbeschleunigung in mm/s^2	Auswirkung auf den Menschen
29	einzelne erwachen (ca. 15 %)
90	viele erwachen (ca. 55 %)
150	alle erwachen (100 %)

geprägte Rückkopplungseffekte zwischen der Emissionsquelle, dem dynamischen Untergrundverhalten und den Schwingungseigenschaften des betroffenen Bauwerks, die die Immissionen massiv beeinflussen, aber leicht übersehen werden, da sie oft nur durch umfassende Untersuchungen im Voraus erfasst werden können. Deshalb werden in der S 9012 bezüglich Messtechnik und Vorhersage verschiedene Untersuchungsschritte normativ festgelegt. So sind Emissionsmessungen in einer Mindestentfernung von 10 m vom Gleis entfernt durchzuführen, da sich die für die Ausbreitung maßgeblichen seismischen Wellen erst ab dieser Entfernung ausbilden. Ebenso wird für Ausbreitungsmessungen die unverzichtbare Notwendigkeit möglichst gleichartiger steifer Untergrundbedingungen der einzelnen Messpunkte gefordert, die gegenüber einem starren Entfernungsraster Vorrang besitzen. Bei Tunnelbauprojekten sind die Ausbreitungsbedingungen für die Erschütterungen aus der Tiefe mit Durchschallungsversuchen in Erkundungsbohrungen vor Ort zu ermitteln.

Die Angaben der S 9012 führen zwingend zu dem Schluss, dass Vorhersagen, die nicht durch Messungen vor Ort (Quelle – Untergrund – Bauwerk) abgesichert sind und nur auf allgemeinen Datenbankunterlagen aufbauen, mit hohen Unsicherheiten verbunden sind, da dabei die lokal vorhandenen Rückkopplungseffekte zwischen den Teilsystemen nicht in die Prognose Eingang finden. Es existiert aber eine breite Palette an Verfahren, die für „In-situ“-Untersuchungen eingesetzt werden können [12; 13].

Schließlich werden die für die Wahrnehmung von Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen maßgeblichen baudynamischen Faktoren in einem eigenen Abschnitt diskutiert und für beide Immissionsformen empirische Bauwerksklassifikationen angegeben. Die extrem unterschiedliche Auswirkung der verschiedenen bautechnischen Faktoren hat zur Folge, dass in der Norm ausdrücklich festgestellt wird, dass eine Immissionsvorhersage für unbebaute Bauplätze nicht möglich ist. Es kann lediglich prognostiziert werden, welche Erschütterungen zu diesen Plätzen hin übertragen werden. Welche Immissionen sich daraus ergeben, hängt hingegen infolge der Rückkopplungseffekte auch sehr stark von der Ausführung des nicht vorhandenen unbekanntes Gebäudes ab. Eine Erstabschätzung der Immissionen kann bei Vorliegen von einreichfähigen Bauplänen durchgeführt werden.

Vergleich von ÖNORM S 9012 und DIN 4150-2

Während beide Normen übereinstimmend eine Bandbegrenzung von 1 bis 80 Hz verwenden und die Frequenzbewertungen gemäß Bild 1 de facto identisch sind, kommt in der DIN 4150-2 die Zeitbewertung „fast“ (0,125 s) zur Anwendung [2]. Des Weiteren bewertet sie im Gegensatz zur ÖNORM nur die stärkste Erschütterungskomponente und blendet die beiden anderen Komponenten aus. Dies bedeutet, dass die Erschütterungsimmersionen wie linear polarisierte eindimensionale Schwingungen bewertet werden.

Dementsprechend ist einerseits zu erwarten, dass die Wahrnehmungmaxima nach DIN 4150-2 stärker ausfallen, da die „Fast“-Bewertung den Schwingungsspitzen höheres Gewicht zumisst als die „Slow“-Zeitbewertung. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass Erschütterungen häufig nicht linear polarisiert sind, sondern in wenigstens zwei Raumachsen die gleiche Größenordnung erreichen, sodass stärkere Wahrnehmungmaxima gemäß der Resultierendenbewertung nach ÖNORM wahrscheinlich werden.

Um dies zu überprüfen, werden drei charakteristische Stichproben von Erschütterungsimmersionmessungen nach beiden Normen ausgewertet. Die so erhaltenen Taktmaximalwerte KB_{FTI} nach DIN 4150-2 bzw. Erschütterungsscheitelwerte $a_{W,S}$ nach ÖNORM sind in **Bild 6** gegeneinander aufgetragen dargestellt. Der besseren

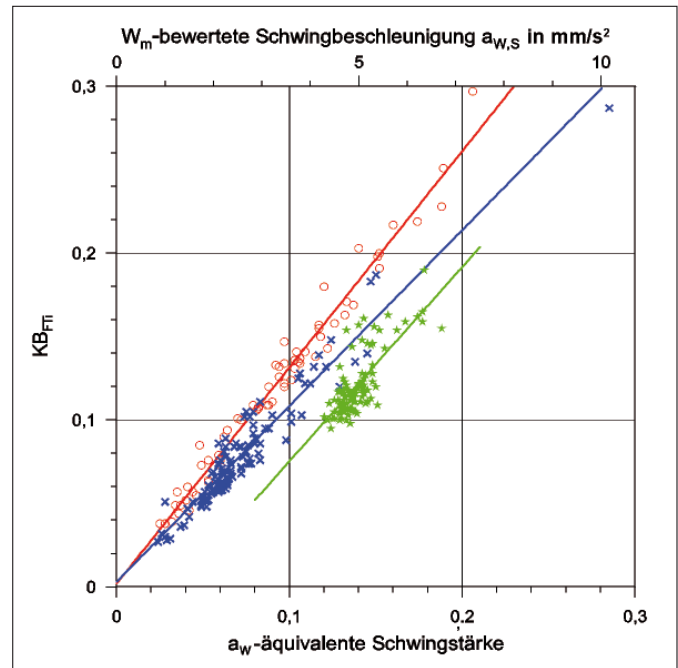


Bild 6 Verhältnis der Taktmaximalwerte KB_{FTI} zu den Erschütterungsscheitelwerten $a_{W,S}$ für Stichproben unterschiedlicher Erschütterungscharakteristik, A rot: niederfrequent, eindimensional, B blau: breitbandig, zweidimensional, C grün: niederfrequent, mehrdimensional.

Übersicht wegen ist für die Erschütterungsscheitelwerte $a_{W,S}$ zusätzlich zur W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung auch die a_w -äquivalent umgerechnete Schwingstärke angegeben, sodass mit beiden Beurteilungen übereinstimmende Werte auf einer 45°-Geraden liegen.

Bild 6 bestätigt die beiden vorhin getroffenen Schlussfolgerungen. Die Stichprobe A, die vertikal polarisierte Zugimmersionen auf einer niederfrequenten Holztraverse erfasst, ergibt eine etwa 30%ige Überschätzung der Wahrnehmung durch die DIN-Bewertung, wobei neben der stärkeren Gewichtung der Erschütterungsspitzen sich auch die unvollständige Glättung der niederen Frequenzen (siehe Bild 2) auswirken dürfte. Bei der zweidimensionalen Stichprobe B, bei der neben der Vertikalkomponente auch die Horizontalkomponente maßgeblich zur Gesamtimmersion beiträgt, ist die Bewertung durch beide Normen im Rahmen der Messgenauigkeit gleich. Die Überbewertung der Erschütterungsspitzen und die Ausblendung der Immissionen in der zweiten Dimension kompensieren einander weitestgehend. Bei der dreidimensionalen Stichprobe C (Erschütterungen eines Industriebetriebs) hingegen unterschätzt die DIN-Bewertung die Immissionen um etwa 25 %, was als Folge der auf eine Einwirkungsrichtung beschränkten Bewertungsmethodik anzusehen ist.

Schlussfolgerungen

Die Ausgabe 2010 der ÖNORM S 9012 entspricht in vollem Umfang dem internationalen Stand der Normung. Sie dient der Beurteilung von Verkehrserschütterungen, kann darüber hinaus auch auf andere Erschütterungsverursacher mit vergleichbarer Immissionscharakteristik (zeitweilige Einwirkung) angewandt werden.

Als besonders auffallend erweist sich bei den Änderungen im Vergleich zur Ausgabe 1996 die formale Umstellung von der bewerteten Schwingstärke K_B auf die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung $a_{W,S}$, obwohl beide Größen identische Aussagen liefern. Um

diese Bewertungsgröße von der physikalisch definierten Schwingbeschleunigung zu unterscheiden, wird es in Zukunft immer erforderlich sein, die W_m -Bewertung ausdrücklich zu nennen, ähnlich wie die Akustiker immer die Bewertungsart (A oder C) des ebenfalls physikalisch definierten Schallpegels angeben. Eine messtechnisch oder bewertungsmäßig relevante Auswirkung besitzt die Umstellung auf die neue Beurteilungsgröße nicht.

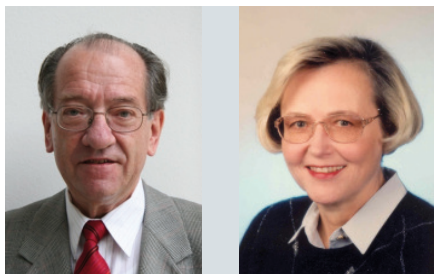
Die ISO-Anforderung der dreidimensionalen Resultierenden als Bewertungsgröße erfordert keine Umstellung, da diese schon bisher in der ÖNORM zur Anwendung kam.

Die Umstellung der Zeitbewertung auf eine Integrationskonstante von $\tau = 1$ s ergibt sich aus der ISO-Empfehlung, die eine der menschlichen Wahrnehmung adäquate Erinnerungsfunktion berücksichtigt. Dadurch wird eine nicht der Empfindung entsprechende Betonung einzelner Erschütterungsspitzen bzw. die oszillierende Übersteuerung, die bei einer kürzeren Zeitkonstanten, wie $\tau = 0,125$ s, auftreten würde, vermieden.

Mehrere parallel durchgeführte vergleichende Untersuchungen nach beiden Bewertungsverfahren ergeben eine in hohem Ausmaß bestehende Korrelation, sodass die Kontinuität der Erschütterungsbewertung auch unter den neuen Normansätzen gegeben ist.

Die Anwendung des Energieäquivalenzprinzips berücksichtigt schließlich, dass der Energieinhalt von Erschütterungen nach den Untersuchungen von *Said* et al. [5] am besten geeignet ist, die menschliche Wahrnehmung zu beschreiben.

Schließlich empfiehlt die Norm aus messtechnischen und wahrnehmungsmäßigen Gründen weiterhin Schwinggeschwindigkeitsmessungen, obwohl die Beurteilungsgröße nunmehr als W_m -bewertete Schwingbeschleunigung bezeichnet wird.



Univ. Prof. Dr. **Peter Steinhäuser**,
Mag. Dr. **Sigrid Steinhäuser**,
Ziv. Ing. Büro, Wien.
office@steinhauser.eu

Literatur

- [1] ÖNORM S 9012: Beurteilung der Einwirkung von Schienenverkehrsimmissionen auf den Menschen in Gebäuden: Schwingungen und sekundärer Luftschall. Wien: Austrian Standard plus 1996.
- [2] DIN 4150-2: Erschütterungen im Bauwesen. Teil 2: Einwirkung auf Menschen in Gebäuden. Berlin: Beuth Verlag 1992.
- [3] *Studer, J. A.; Koller, M. G.*: Bodendynamik. 2. Aufl. Berlin: Springer Verlag 1997.
- [4] Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen. Bericht der Fachgruppe. Hrsg.: BAFU. Bern 2006.
- [5] *Said, A.; Fleischer, D.; Kilcher, H.; Grütz, H. P.*: Zur Bewertung von Erschütterungsimmissionen aus dem Schienenverkehr. Z. Lärmbekämpf. 48 (2001) Nr. 6, S. 191-201.
- [6] *Dupuis, H.; Zerlett, G.*: Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen. Schriftenreihe des Hauptverbands der gewerblichen Berufsgenossenschaften. Bonn 1984.
- [7] *Dieckmann, D.*: Einfluss vertikaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Int. Z. Angew. Physiol. 16 (1957), S. 519-564.
- [8] *Dieckmann, D.*: Einfluss horizontaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Int. Z. Angew. Physiol. 17 (1958), S. 83-100.
- [9] *Weber, G.*: Gedächtnismodelle und Beurteilungsmaßstäbe. VDI-Ber. 284, S. 23-28. Düsseldorf: VDI Verlag 1977.
- [10] *Griefahn, B.*: Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. Z. Lärmbekämpf. 37 (1990) Nr. 1, S. 7-14.
- [11] *Steinhäuser, P.*: Die Untersuchung technischer Erschütterungen – ein Beitrag der Geophysik zum Umweltschutz. In: Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851-2001, S. 741-764. Graz: Leykam Buchverlag 2001.
- [12] *Steinhäuser, P.*: Zur Vorhersage und Reduktion von Erschütterungsemissionen beim Tunnelbau und Betrieb. Felsbau 20 (2002), S. 121-132.
- [13] *Steinhäuser, P.; Steinhäuser, W.*: Experimental forecasting methods of train vibrations with the VibroScan method. Rail Eng. Int. (eingereicht).