

Zur Kombinationswirkung von Schall und Erschütterungen

Von

Peter Steinhauser

(Vorgelegt in der Sitzung der math.-nat. Klasse am 13. Dezember 2007
durch das k. M. I. Peter Steinhauser)

Zusammenfassung

Den aktuellen Diskussionen im Bereich des Lärmschutzes folgend wird der Stand der Forschung zur Kombinationswirkung von Lärm und Erschütterungen auf den Menschen zusammenfassend dargestellt. Insbesondere die unterschiedlichen Wahrnehmungsformen – Erschütterungen über den Körper, Schall durch das Ohr – erschweren experimentelle Untersuchungen. Gesicherte Ergebnisse sind, dass der Mensch bei energetisch schwachen Immissionen (Verkehr) zwischen Hören und Spüren nicht unterscheiden kann. Eine Kombinationswirkung ist erst ab W_m -bewerteten Schwingbeschleunigungen von 30 mm/s^2 und A-bewerteten Schallpegeln von 45 dB nachgewiesen. Ab etwa 100 mm/s^2 bzw. 65 dB werden Verdeckungseffekte für die jeweils andere Wahrnehmungsform wirksam. Untersuchungen zur Quantifizierung der Kombinationswirkung im betroffenen Immissionsband stehen noch aus. Im Vergleich zur Immissionswirkung von Schall und Erschütterungen alleine dürfte die Kombinationswirkung aber nur untergeordnete Bedeutung besitzen.

1. Einleitung

Schwingungen, die sich durch feste Körper zum Aufenthaltsbereich von Menschen hin ausbreiten, können von diesen einerseits direkt als Erschütterungen und andererseits als von der Oberfläche einer Bauwerksstruktur (i. a. von einer Decke oder Wand) abgestrahlter sekundärer Luftschall wahrgenommen werden. Dabei werden die Erschütterungen, da es ein eigenständiges Erschütterungsorgan nicht gibt, taktil durch

Tabelle 1. Menschliche Wahrnehmung und Empfindung von direktem Luftschall, Erschütterungen und Sekundärschall

Immissionsform	Wahrnehmung	Empfindung
direkter Luftschall (Lärm)	auditiv durch das Ohr	Fernreiz, Ortung, Flucht möglich
Erschütterung	taktile durch den ganzen Körper	Nahreiz, Abwehrreaktion unmöglich
Sekundärschall	auditiv durch das Ohr	Nahreiz, Abwehrreaktion unmöglich

den ganzen Körper und der Sekundärschall – ebenso wie der direkte Luftschall – auditiv durch das Ohr aufgenommen. Diese beiden Wahrnehmungsformen bilden somit zwei Aspekte der gesamtheitlichen Erschütterungseinwirkung und somit eine kombinierte Exposition.

Über die Wahrnehmung hinaus ist auch die Empfindung des Menschen für diese Immissionsformen zu berücksichtigen. Dabei ergeben sich Empfindungsunterschiede bezüglich des direkten Luftschalls einerseits und der Erschütterungen sowie des Sekundärschalls andererseits.

Beim direkten Luftschall, der seiner großen Reichweite wegen als Fernreiz bezeichnet werden kann, sind im Freien die Ortung der Schallquelle und in Gebäuden Schutzmaßnahmen wie Fensterschließen möglich: Es wird dabei der Urinstinkt der Fluchtmöglichkeit angesprochen. Erschütterungen und der Sekundärschall stellen hingegen Nahreize dar, denen gegenüber man das Gefühl des Ausgeliefertseins erleben kann. Klassische Lärmschutzmaßnahmen wie Lärmschutzfenster sind zwecklos. Bei den Erschütterungen kommt noch hinzu, dass das biometrische Schwingungsverhalten einzelner Körperteile (Resonanzphänomene) Wahrnehmung und Empfindung unter Umständen beeinflussen können.

In Tab. 1 werden diese unterschiedlichen Wahrnehmungs- und Empfindungsformen schematisch dargestellt [1].

Dass es sich dabei um die Empfindungskategorien Lästigkeit und Störung handelt, kommt sprachlich bereits in den Bezeichnungen Lärm und Erschütterungen zum Ausdruck, die für positive Empfindungen wie „Musik hören“ oder „in den Schlaf wiegen“ nicht verwendet werden.

2. Hörbarkeit und Fühlbarkeit

Um diese Kombinationswirkung objektiv beurteilen zu können, ist es wie bei allen Immissionsformen zuerst erforderlich, sie quantitativ zu

erfassen, d. h. operational durch Messverfahren, Zu- oder Abschläge und/oder Bewertungsfaktoren zu bestimmen. Dies wird durch die oben dargestellte unterschiedliche Form der Wahrnehmung erschwert, weshalb derzeit erst Aussagen zu Teilaspekten möglich sind. Die allgemeine Interaktion von Lärm und Erschütterungen wird für die Wahrnehmungsempfindung von verschiedenen Autoren unterschiedlich beantwortet, wie aus verschiedenen Übersichtsartikeln übereinstimmend hervorgeht [1–3].

Da die verschiedenen Untersuchungen naturgemäß unterschiedliche Teilaspekte betreffen, ergibt sich außerdem ein lückenhaftes Bild der Kombinationswirkung. Bezüglich der Erschütterungswahrnehmung ergibt sich durch Schallpegel $L_A \geq 64$ dB nach MELONI [4] ein Verdeckungseffekt. STAHL et al. [5] untersuchen die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen der Kombinationswahrnehmung von Schall und Erschütterungen, der daraus abgeleiteten Distanzwahrnehmung und der erlebten Lästigkeit besteht. Nach SCHUST et al. [6] ergibt sich bei der Kombinationswirkung ein zunehmender Einfluss der Tonhaltigkeit auf die Beurteilung von Lautheit und Belästigung.

Zumindest bei energetisch schwachen Immissionen (z. B. Verkehr) können in der Praxis belastete Personen oft nicht unterscheiden, ob sie etwas gehört oder am Körper gespürt haben. Die Begriffe „Hören“ und „Spüren“ werden von den Betroffenen oft unterscheidungslos verwendet. Dazu kommt, dass die Wahrnehmbarkeit von Erschütterungen sehr stark situationsabhängig ist. Nur bei gespannter Aufmerksamkeit wird eine Erschütterung der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung von $3,6 \text{ mm/s}^2$ nach ON-ISO 2631-1 tatsächlich wahrgenommen werden können. Jede Ablenkung (Zuhören, Lesen etc.) vermindert die Wahrnehmbarkeit bereits beträchtlich und eigene Aktivitäten (Reden etc.) noch mehr. Dementsprechend kann die Fühlschwelle nicht als Schwellwert, sondern nur als Schwellenband angegeben werden. Die obere Bandbegrenzung liegt etwa bei einer bewerteten Schwingbeschleunigung von 15 mm/s^2 [7], wie dies bei verschiedenen Untersuchungen immer wieder erkennbar ist [8].

3. Schienenverkehrsmissionen

Hinsichtlich der Schienenverkehrsmissionen liegt eine umfassende Studie von SAID et al. [9] vor, in deren Rahmen neben dem Auflösungsvermögen der menschlichen Wahrnehmung für die Stärke von Erschütterungen auch die Kombinationswirkung von Lärm und Erschütterungen auf den Menschen untersucht worden ist. Der Versuchsablauf wurde dabei nach den Methoden der Psychophysik so

angelegt, dass neben der Sinnesempfindlichkeit der Probanden auch ihre Reaktionsbereitschaft erfasst werden konnte, da bei Diskriminationsaufgaben „entdeckungsfreudige“ Personen mögliche Differenzen schneller melden als „zurückhaltende“ Personen, die sich ihrer Sache zuerst sicher sein wollen.

Es wurde die Unterscheidung von insgesamt vier Erschütterungsintensitätsstufen ($K_{B,\max} = 0,2/0,4/0,8/1,6$ entsprechend $a_{W_{m,\max}} = 7,1 \text{ mm/s}^2, 14 \text{ mm/s}^2, 29 \text{ mm/s}^2$ und 57 mm/s^2 bei drei A-bewerteten Vorbeifahrtspegeln (30, 45 und 55 dB) geprüft. Die Bandbreite der Stärke beider Immissionsformen umfasst somit einen Bereich, der im Umweltschutz häufig zu nachdrücklichen Klagen führt. Die Versuche ergaben

- A-bewertete Vorbeifahrtspegel von 30 dB sind ohne Einfluss auf die Unterscheidung der Erschütterungsintensität.
- A-bewertete Vorbeifahrtspegel von 45 dB beeinflussen die Unterscheidung ab einer W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung von 29 mm/s^2 aufwärts.
- A-Bewertete Vorbeifahrtspegel von 55 dB reduzieren die Unterscheidungsfähigkeit um mehr als 20 %.
- Trotz verhältnismäßig hoher Intensitäten beider Immissionsformen sind die Kombinationseffekte eher tendenziell als signifikant nachweisbar gewesen.

In einer Untersuchung über die Lärm-Erschütterungs-Kombinationswirkung von Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszügen von YOKOSHIMA und TAMURA [10] wird ebenfalls berichtet, dass die Shinkansen-Züge negativer zu bewerten sind als der sonstige Schienenverkehr, wo die Immissionen geringere Stärke besitzen. Da in dieser Studie einerseits unbewertete Schwingbeschleunigungsdaten für die Erschütterungsmissionen verwendet wurden und andererseits die zugrunde liegende Bausubstanz der japanischen Studie (87 % Holzhäuser) für europäische Verhältnisse untypisch ist, sind die sonstigen Ergebnisse der Untersuchung nicht mit den europäischen Arbeiten vergleichbar.

Eine weitere Untersuchung zur Kombinationswirkung von Schall und Erschütterungen des Schienenverkehrs haben HOWARTH und GRIFFIN [11] mit dem Ziel durchgeführt festzustellen, welche der beiden Immissionsformen stärker belästigend wirkt und deshalb vorrangig zu bekämpfen ist. Es wurden Zugvorbeifahrten von 24 Sekunden Dauer mit jeweils 6 verschiedenen Vorbeifahrtspegeln des Schalls bzw. 6 unterschiedlichen Erschütterungsintensitäten hinsichtlich der Belastungseinstufung durch die Probanden untersucht. Die

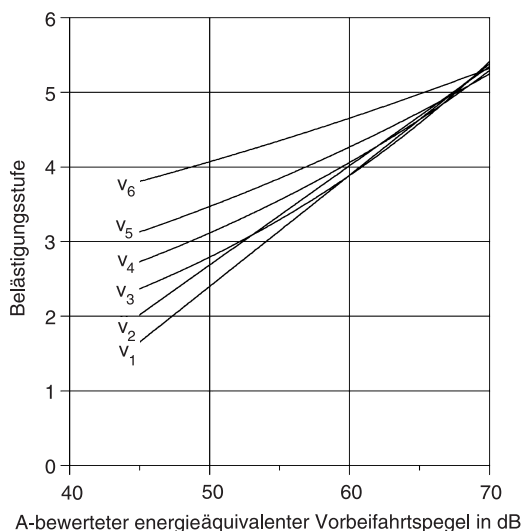


Abb. 1. Einfluss der Erschütterungsintensität auf die Gesamtbelästigung kombinierter Schall- und Erschütterungsimmissionen für W_m -bewertete Schwingbeschleunigungen (nach [11]) (v_1 : 23 mm/s²; v_2 : 32 mm/s²; v_3 : 45 mm/s²; v_4 : 65 mm/s²; v_5 : 90 mm/s²; v_6 : 130 mm/s²)

untersuchte Bandbreite sowohl der Erschütterungsintensität als auch des Schallpegels liegt oberhalb jener der Studie von SAID. Da dabei die Erschütterungsintensität in der gemäß ON-ISO 2631-1 nicht anzuwendenden Kenngröße VDV (Vibration Dose Value) angegeben ist, muss diese zur besseren Vergleichbarkeit in die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung transformiert werden. Dies kann, da die beiden Einheiten in keinem formelmäßigen Zusammenhang stehen, nur näherungsweise nach einer Schätzformel [3] erfolgen. Das Ergebnis ist in den Abb. 1 und 2 wiedergegeben.

Nach Abb. 1 ergibt sich für A-bewertete Vorbeifahrtspegel von 45 dB eine deutliche Erhöhung der Belästigung durch gleichzeitige Erschütterungsimmissionen von 65 mm/s² aufwärts. Diese zusätzliche Belästigung nimmt mit anwachsendem Schallpegel ab, und spätestens ab 65 dB beeinflussen die Erschütterungsimmissionen den Grad der Belästigung nicht mehr (Verdeckungseffekt). Bei niedrigen Erschütterungsintensitäten bis etwa 45 mm/s² ist kein statistisch signifikanter Einfluss auf die Belästigung durch die Schallimmissionen erkennbar, wie die sich mehrfach schneidenden Regressionskurven erkennen lassen.

Analog ergibt sich nach Abb. 2 für die W_m -bewertete Schwingbeschleunigung bei etwa 25 mm/s² eine deutliche Erhöhung der Belästi-

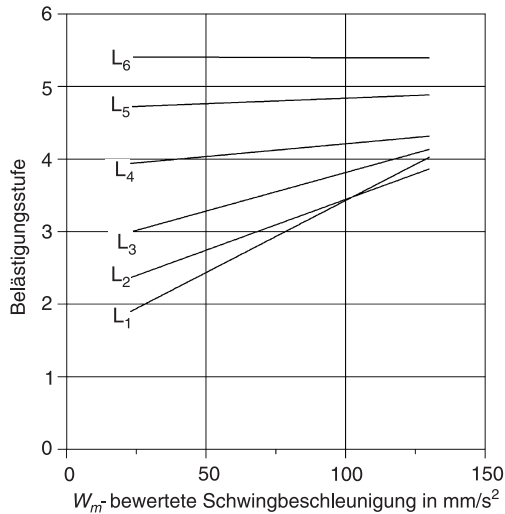


Abb. 2. Einfluss des Schallpegels auf die Gesamtbelästigung kombinierter Schall- und Erschütterungsimmissionen für A-bewertete Vorbeifahrtspegel (nach [11]) (L_1 : 45 dB; L_2 : 50 dB; L_3 : 55 dB; L_4 : 60 dB; L_5 : 65 dB; L_6 : 70 dB)

gung durch gleichzeitige Schallimmissionen. Auch hier verringert sich die zusätzliche Belästigung mit anwachsender Erschütterungsintensität, wobei die Erschütterungen ab einem A-bewerteten Schallpegel von etwa 60–65 dB für Belästigung insignifikant werden und somit den in Abb. 1 erkennbaren Verdeckungseffekt bestätigen. Auch im Fall der Erschütterungsimmissionen ergeben niedrige Vorbeifahrtsschallpegel (45–50 dB) keinen signifikanten Einfluss auf die Belästigung, wie die sich schneidenden, eng beieinander liegenden Regressionskurven belegen.

Aus diesen Untersuchungen zusammen ergibt sich somit ein komplexes Bild der Kombinationswirkung. Im Bereich von Erschütterungsintensitäten unterhalb des Schwellenbands der Fühlbarkeit kann es definitionsgemäß keine Kombinationswirkung geben. Erschütterungen geringer, jedoch spürbarer Intensität können von Schallimmissionen praktisch nicht unterschieden werden, sodass keine Wechselwirkung beobachtet werden kann [1]. Erst bei mittleren Erschütterungsintensitäten (ca. $a_{W_m} = 30 \text{ mm/s}^2$) bzw. Schallpegeln (ca. $L_{A_{eq}} = 45 \text{ dB}$) fächert die Belästigungswirkung in Abhängigkeit von beiden Immissionsgrößen auf, bis ab A-bewerteten Schallpegeln von etwa 60–65 dB ein Verdeckungseffekt des Schalls wirksam wird.

Das interessante Ergebnis dieser Untersuchung ist es, dass die Versuchspersonen der Erschütterungsreduktion bei eher schwachen

Erschütterungsimmissionen und der Lärmreduktion bei hohen Lärmimmissionen den Vorzug geben.

4. Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der Kombinationswirkung von Erschütterungen und Sekundärschall können die Ergebnisse der hier diskutierten Untersuchungen folgendermaßen zusammengefasst werden.

1. Bei schwachen Immissionen (z. B. Verkehr) kann der Mensch zwischen hörbaren Schall- und fühlbaren Erschütterungsimmissionen nicht unterscheiden, weshalb eine spezielle Kombinationswirkung nicht fassbar ist.
2. Eine Wechselwirkung zwischen Erschütterungs- und Schallimmissionen ist erst ab W_m -bewerteten Schwingbeschleunigungen von 30 mm/s^2 aufwärts zu erwarten, wenn die A-bewerteten Vorbeifahrtsschallpegel auf 45 dB und darüber anwachsen.
3. Wenn eine der beiden Immissionsgrößen auf niedrigem Niveau bleibt, wie dies beim Sekundärschall praktisch immer zutrifft, dann ergibt sich keine signifikante Kombinationswirkung.
4. Die Immissionsschutzkriterien von ÖNORM S 9012 für Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen des Schienenverkehrs liegen unter den oben angegebenen Werten. Es ist daher nicht erforderlich, eine Kombinationswirkung beider Immissionsformen zusätzlich zu berücksichtigen.

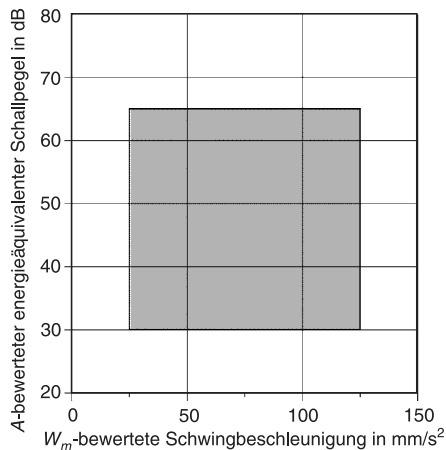


Abb. 3. Bereich der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung und der A-bewerteten Schallpegel, für den weitere qualitative und quantitative Untersuchungen der Kombinationswirkung erforderlich sind

5. Hohe Schallpegel (ab etwa 60–65 dB) bewirken einen Verdeckungseffekt für Erschütterungen.
6. Die Quantifizierung der Kombinationswirkung innerhalb des in Abb. 3 angegebenen Immissionsbereichs ist noch durchzuführen.

Insgesamt gilt immer noch die Feststellung von GRIFFIN [11], die sinngemäß lautet: „Die potenziellen Wechselwirkungen der Reaktion auf Lärm und Erschütterungen sind komplex. Der Nachweis solcher Effekte ist schwach und teilweise widersprüchlich.“ Beispielsweise sind weitere Untersuchungen zur Kombinationswirkung für niedrige und mittlere Immissionsstärken (siehe Abb. 3) von Schall und Erschütterungen erforderlich.

Literatur

- [1] MELONI, T. (2006) Bericht der Fachgruppe zur Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Lärmbekämpfung, Bern
- [2] HAIDER, M., KOLLER, M., STIDL, H. G. (1992) Qualitätskriterien für Schienenverkehrslärm und Erschütterungen bei Vollbahnen – Kombinationswirkungen von Lärm und Erschütterungen. Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Band 36/1, Wien
- [3] GRIFFIN, M. J. (1990) Handbook of Human Vibrations. Academic Press, San Diego
- [4] MELONI, T. (1991) Wahrnehmung und Empfindung von komplexen, kombinierten Belastungen durch Vibrationen und Schall. Dissertation, ETH Zürich
- [5] STAHL, E., MELONI, T., KRUEGER, H. (1997) Distanzwahrnehmung von Umweltsituationen. Zs. f. Lärmbekämpfung 44/1
- [6] SCHUST, M., SEIDEL, H., BLÜTHNER, R. (1998) Wirkung von Lärm unterschiedlicher Tonhaltigkeit nach DIN 45681 in Kombination mit Schwingungen. Zs. f. Lärmbekämpfung 45/4
- [7] ON-ISO 2631-1 (2007) Mechanische Schwingungen und Stöße – Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen, Teil 1, Anhang C
- [8] BERGER, P., LANG, J., ÖSTERREICHER, M., STEINHAUSER, P. (2005) Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen gegen U-Bahn-Immissionen für den Wiener Musikverein. Zement und Beton 2/05
- [9] SAID, A., FLEISCHER, D., KILCHER, H., GRÜTZ, H. P. (2001) Zur Bewertung von Erschütterungsimmisionen aus dem Schienenverkehr. Zs. f. Lärmbekämpfung 48/6
- [10] YOKOSHIMA, S., TAMURA, A. (2005) Combined annoyance due to the Shinkansen railway noise and vibration. Internoise Congress, Rio de Janeiro.
- [11] HOWARTH, H. V. C., GRIFFIN, M. J. (1990) The relative importance of noise and vibration from railways. Applied Ergonomics 21/2

Anschrift des Verfassers: Univ.-Prof. Dr. Peter Steinhauser, Delugstraße 8, 1190 Wien, Österreich. E-Mail: Peter.Steinhauser@univie.ac.at.