

Beurteilung der Gehörgefährdung durch Schießlärm: Pfander- oder L_{AE} -Verfahren?

Sandra Dantscher, Andrea Wolff

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 53757 Sankt Augustin,
E-Mail: sandra.dantscher@dguv.de

Einleitung

In Deutschland finden derzeit verschiedene Kriterien zur Beurteilung der Gehörgefährdung durch Schießlärmexposition Anwendung. Während im Bereich von Militär und Polizei traditionell das Verfahren nach Pfander angewendet wird, muss im zivilen Bereich die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung eingehalten werden. Auch der eingesetzte Gehörschutz wird in beiden Bereichen unterschiedlich in die Berechnung der Lärmexposition am Ohr des Schützen einbezogen.

Beim Verfahren nach Pfander [1] wird die Energie eines Schusses anhand des unbewerteten Spitzenschalldruckpegels und der sogenannten Wirkzeit beschrieben. Hieraus kann dann unter Berücksichtigung des eingesetzten Gehörschutzes eine maximale Schusszahl ermittelt werden, die pro Arbeitsschicht nicht überschritten werden darf.

Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung hingegen bezieht sich einerseits auf den C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel sowie andererseits auf den (A-bewerteten) Lärmexpositionspegel am Ohr des Schützen unter dem Gehörschutz [2].

Der vorliegende Beitrag vergleicht die Ergebnisse der beiden Beurteilungsverfahren.

Das S-Wert-Verfahren nach Pfander

Das Verfahren nach Pfander [1] zur Beurteilung von Impulslärm erfordert eine Erfassung des Druck-Zeit-Verlaufs für das zu messende Impulsignal. Aus diesem Signal wird dann die absolute Druckspitze pm extrahiert und die Wirkzeit t_w berechnet. Aus der absoluten Druckspitze wird der Z-bewertete Spitzenschalldruckpegel L_{Zpeak} berechnet:

$$L_{Zpeak} = 10 \lg \left(\frac{pm}{p_0} \right) \text{ dB}, \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

wobei $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Die Wirkzeit t_w ist die Summe aller Zeitabschnitte des gemessenen Impulses, bei denen der Betrag des Momentanschalldrucks den Wert von $pm-10\text{dB}$ übersteigt. Abbildung 1 illustriert diese Definition.

Aus diesen beiden Parametern wird nun der sogenannte S-Wert eines Schusses berechnet:

$$S_{(S)} = \frac{t_w * 10^3 * 10^{0,1 * (L_{Zpeak} - \bar{D}_k) / \text{dB}}}{0,01 * T * 10^{0,1 * L_{EX,8h}}} \quad [] \quad (2)$$

Dabei ist \bar{D}_k der sogenannte Knalldämmwert des verwendeten Gehörschutzes:

$$\bar{D}_k = -10 \lg \left(\frac{1}{3} \cdot (10^{-0,1 \cdot D_{500\text{Hz}}} + 10^{-0,1 \cdot D_{1000\text{Hz}}} + 10^{-0,1 \cdot D_{2000\text{Hz}}}) \right) \text{ dB} \quad (3)$$

und T der Beurteilungszeitraum. Der Knalldämmwert stellt das energetische Mittel aus den Mittelwerten der Schalldämmung für die Oktaven 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz dar, ohne Berücksichtigung der zugehörigen Standardabweichungen.

Für mehrere Schüsse, auch von verschiedenen Waffen, können die einzelnen S-Werte zu einem Gesamtwert S aufaddiert werden. Nach Pfander entspricht ein S-Wert von 100.000 einem mittleren L_{Aeq} von 85 dB über 8 Stunden [1]. Somit kann für eine Waffen-Munitions-Kombination die maximale Zahl von Schüssen berechnet werden, die an einem Tag abgegeben werden darf, ohne dass eine Gehörgefährdung entsteht:

$$n = \frac{100000}{S_{(S)}} = \frac{10^{0,1 \cdot L_{EX,sh}} \cdot T \cdot 10^{0,1 \cdot \bar{D}_k}}{10^{0,1 \cdot L_{Zpeak}} \cdot t_w} \quad [] \quad (4)$$

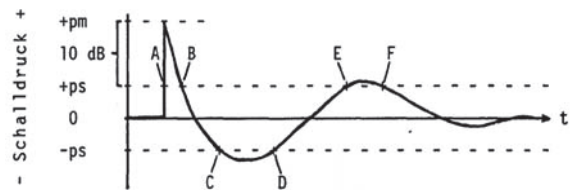


Abbildung 1: Illustration der Definition der Wirkzeit t_w nach Pfander [1]. Die Wirkzeit ist die Summe aller Zeitabschnitte nach der absoluten Schalldruckspitze pm , zu denen der Betrag des Momentanschalldrucks größer als der Wert $pm-10\text{dB}$ ausfällt, d.h. $t_w = \overline{AB} + \overline{CD} + \overline{EF}$.

Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

Nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) ist hingegen zu betrachten, ob der Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ einen der Auslösewerte von 80 bzw. 85 dB oder der Spitzenschalldruckpegel L_{Cpeak} einen der Auslösewerte von 135 dB bzw. 137 dB erreicht oder überschreitet [2]. Dabei kann der $L_{EX,8h}$ bei Vorliegen von Einzelereignissen auch aus dem Einzelereignispegel und der Anzahl der Ereignisse berechnet werden:

$$L_{EX,8h} = L_{AE} + 10 \lg(N/T_e) \text{ dB}, \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

Dabei ist N die Anzahl der auftretenden Ereignisse mit Einzelereignispegel L_{AE} und $T_e = 8 \cdot 3600 \text{ s} = 28800 \text{ s}$ die Expositionszeit in Sekunden. Der Einzelereignispegel (SEL Sound Exposure Level) ist definiert als äquivalenter Dauerschallpegel (L_{Aeq}), der in 1 s die gleiche Energie enthält wie das ursprüngliche Schallereignis (hier: ein Schuss).

Wird einer der oberen Auslösewerte überschritten, so sind Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Im Falle von Schießlärm sind die Möglichkeiten zur technischen Lärminderung (Schalldämpfer) jedoch beschränkt und können je nach Anwendung auch nicht immer eingesetzt werden. Da ein Einzelschuss ausreicht, um den Auslösewert für den Spitzenschalldruckpegel zu überschreiten, greifen organisatorische Maßnahmen zumindest für den Schützen nicht, so dass hier zu Gehörschutz gegriffen werden muss.

Bei den hier betrachteten Schusswaffen mit eher kleinen Kalibern handelt es sich ausschließlich um Waffen, bei denen das Spektrum eines Schusses einen Intensitätsschwerpunkt bei mittleren und hohen Frequenzen aufweist. Gemäß DGUV Regel 112-194 [3] ist bei Anwendung des empfohlenen HML-Checks der passende Gehörschutz somit anhand des M-Dämmwerts auszuwählen. Der M-Wert spiegelt vor allem die Dämmeigenschaften eines Gehörschützers im Bereich 1 kHz bis 2 kHz wider und setzt sich aus den Mittelwerten der Schalldämmung an den getesteten Terzmittenfrequenzen abzüglich der jeweiligen Standardabweichungen (d. h. den sog. APV-Werten) zusammen.

Unter Berücksichtigung des Dämmwerts dürfen am Ohr der zur beurteilenden Person (z.B. des Schützen) die oberen Auslösewerte der LärmVibrationsArbSchV nicht überschritten werden, d.h.

$$L'_{EX,8h} \leq 85 \text{ dB und } L'_{Cpeak} \leq 137 \text{ dB,} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

wobei der Strich die Werte am Ohr unter dem Gehörschutz indiziert.

Messaufbau

In einem vorangegangenen Abschnitt des Projekts wurde ein Messaufbau entwickelt und getestet [4], der die simultane Ermittlung der Messgrößen für das Pfander- und das L_{AE} -Verfahren für sechs Messpunkte erlaubt. Basis für die Anordnung der Messpunkte ist die Deutsch-Französische Messvorschrift [5], die fünf Messpunkte definiert. Im Aufbau des IFA ist zusätzlich auch die Messung am rechten Ohr des Schützen möglich, siehe Abbildung 2.

Die im Folgenden vorgestellten Messungen fanden im Rahmen einer Messkampagne statt, die die Wehrtechnische Dienststelle (WTD) 91 der Bundeswehr auf Initiative der Unfallversicherung Bund und Bahn (UVB) durchgeführt hat. Für einzelne Waffen-Munitions-Kombinationen (WMK) konnten dabei Vergleichsmessungen zwischen IFA und WTD 91 für dieselben Schüsse durchgeführt werden. Dabei beschränkte sich die Datenaufnahme des IFA auf den Standardmesspunkt (Mp2) und den 1. Nachbarschützen (Mp4). Die Mikrofone wurden im Abstand von ca. 10 cm zu den Mikrofonen der WTD 91 platziert.

Insgesamt wurden 14 WMK mit jeweils zehn Einzelschüssen vermessen: acht am offenen Schießstand (OSS), sechs in einer Raumschießanlage (RSA). Dabei kam sowohl scharfe Munition als auch Farbmarkierungspatronen für Übungszwecke zum Einsatz.

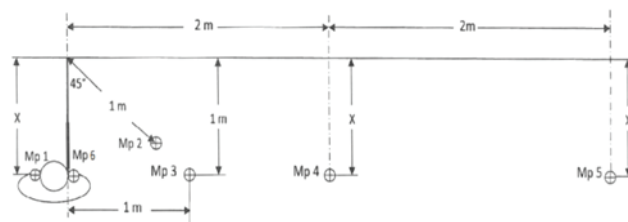


Abbildung 2: Darstellung der sechs verwendeten Messpositionen. Alle Messpositionen sind an der Mündung der Waffe ausgerichtet. Der Abstand „X“ beträgt 1 m. Messaufbau nach [4], ergänzt um den Messpunkt Mp6 am rechten Ohr des Schützen.

Beurteilungsverfahren

Es kamen drei verschiedene Beurteilungsverfahren zum Einsatz. Zielgröße war jeweils die zulässige Schusszahl pro Arbeitsschicht.

1. „Originales“ Pfander-Verfahren (im Folgenden „Pfander BW“): Hierbei wird aus den zehn Einzelschüssen jeweils für den Spitzenschalldruckpegel und die Wirkzeit der arithmetische Mittelwert berechnet. Diese Werte gehen in die Formel (2) zur Berechnung des mittleren S-Werts ein, woraus dann mit der Formel (4) die Schusszahl berechnet wird.
2. Modifiziertes Pfander-Verfahren (im Folgenden „Pfander IFA“): Für jeden Schuss wird der S-Wert berechnet und daraus der arithmetische Mittelwert und wiederum über Formel (4) die Schusszahl.
3. L_{AE} -Verfahren: Durch Umstellen der Formel (5) und mit dem maximal zulässigen Wert des Tages-Lärmexpositionspegels von 85 dB(A) erhält man die erlaubte Schusszahl.

Für alle drei Verfahren wurde aus den Standardabweichungen der zehn Einzelschüsse mittels Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit der resultierenden Schusszahlen berechnet.

Ergebnisse

Messgrößen Spitzenschalldruckpegel und Wirkzeit

Der Vergleich der gemessenen Spitzenschalldruckpegel von IFA und WTD 91 ergibt geringfügig höhere Werte (1 bis 2 dB) für das IFA. Generell weisen die Werte der WTD 91 eine geringere Streuung über die zehn Einzelschüsse auf. Für drei WMK ergibt sich im Rahmen einer Standardabweichung keine Übereinstimmung der beiden Messreihen.

Die Wirkzeit wird leicht von Umgebungsfaktoren beeinflusst, so dass ihre Streuung von Schuss zu Schuss, vor allem in RSA, relativ groß ist. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des IFA für zwölf WMK. Die Streuung ist auch vom Waffentyp abhängig. Im Vergleich mit der WTD 91 sind die Mittelwerte des IFA abhängig von der WMK zwischen 10 und 40% kleiner. Für vier WMK ergibt sich unter Berücksichtigung jeweils einer Standardabweichung keine Übereinstimmung zwischen IFA und WTD 91.

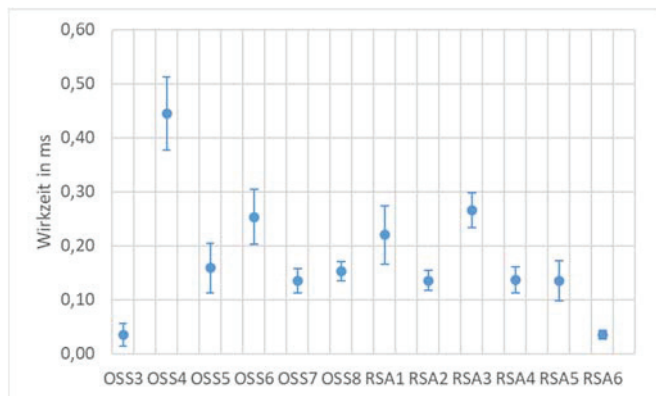


Abbildung 3: Messwerte des IFA für die Wirkzeit nach Pfander am Mp2 (Standardmesspunkt). Gezeigt sind Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils zehn Einzelschüssen.

Ein Unterschied zwischen IFA und WTD 91 ist die Verwendung eines 22 kHz Tiefpassfilters, wie er in der Deutsch-Französischen Messvorschrift [5] genannt wird. Die Daten des IFA wurden mit der vollen zur Verfügung stehenden Abtastrate (100 bis 192 kHz) aufgenommen und verarbeitet.

Zulässige Schusszahlen

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für zehn WMK mit scharfer Munition. In die Berechnung wurde ein typischer hochdämmender Kapselgehörschützer einbezogen (M-Wert 32 dB, Knalldämmwert 37,5 dB). Für die Übungspatronen ergeben sich bei diesem Gehörschutz Schusszahlen pro Arbeitsschicht von einigen 10^6 .

Da die Unterschiede zwischen IFA und WTD 91 für Spitzenschalldruckpegel und Wirkzeit gegenläufig sind, ergibt sich für die zulässigen Schusszahlen eine recht gute Übereinstimmung.

Abbildung 4 zeigt für die Messwerte des IFA am Mp2 einen Vergleich zwischen dem L_{AE} -Verfahren und dem Pfander-Verfahren, wie es bei der Bundeswehr zum Einsatz kommt. Die Fehlerbalken entsprechen einer Standardabweichung. Es wird deutlich, dass in den meisten Fällen das L_{AE} -Verfahren geringere Schusszahlen zulässt als das Pfander-Verfahren. Dies ist in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Gehörschutz-Schalldämmung begründet. Der Knalldämmwert weist nur einen Umfang der Schutzwirkung (Vertrauensniveau) von 50% auf (d.h. 50% der Nutzer erreichen mindestens diesen Dämmwert), während der M-Wert einen Umfang der Schutzwirkung von 84% besitzt, die sich aus der Berechnung über die APV-Werte ergibt. Dies kann für einen typischen Kapselgehörschützer im Bereich von 3 bis 5 dB liegen, so dass Unterschiede in den zulässigen Schusszahlen von einem Faktor 2 nicht ungewöhnlich sind.

Verwendet man in den Berechnungen für beide Verfahren nominell denselben Dämmwert, ergeben sich – wie schon in [4] gezeigt – für das L_{AE} -Verfahren höhere zulässige Schusszahlen.

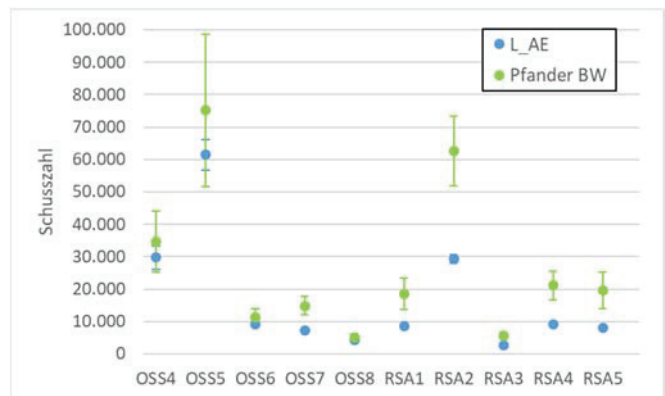


Abbildung 4: Vergleich der Beurteilungsverfahren mit L_{AE} und Pfander BW für die Ergebnisse des IFA am Mp2 (Mittelwert und Standardabweichung).

Die Standardabweichungen der Schusszahlen sind für das L_{AE} -Verfahren für alle WMK (deutlich) kleiner als für das Pfander-Verfahren. Dies ergibt sich aus der geringeren Streuung des Einzelereignispegels als über die Zeit gemittelte Pegelgröße im Gegensatz zum Spitzenschalldruckpegel und vor allem der empfindlich reagierenden Wirkzeit.

In Abbildung 5 sind die beiden Varianten des Pfander-Verfahrens gegenübergestellt. Die Modifikation des IFA weist für fast alle WMK niedrigere Unsicherheiten auf als die Original-Version. Dies deutet darauf hin, dass für einen einzelnen Schuss die Messgrößen Spitzenschalldruckpegel und Wirkzeit miteinander korreliert sind. Die Berechnung des S-Werts für jeden Einzelschuss nutzt diese Korrelationen aus, so dass die Streuung über die zehn S-Werte geringer ist als über Spitzenschalldruckpegel und Wirkzeit.

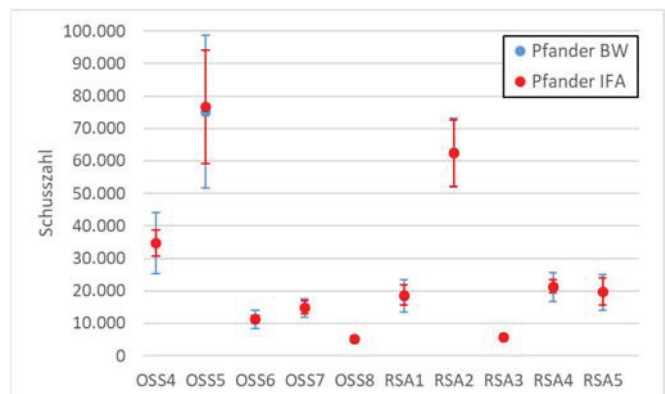


Abbildung 5: Vergleich der beiden Varianten des Pfander-Verfahrens (BW und IFA) für die Ergebnisse des IFA am Mp2 (Mittelwert und Standardabweichung).

Zusammenfassung

Die Beurteilungsverfahren für Schießlärm nach Pfander [1] und nach Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [2] sind sehr unterschiedlich und nicht ineinander umrechenbar. Während im Verfahren nach Pfander die Energie eines Knallereignisses durch Spitzenschalldruckpegel und Wirkzeit abgeschätzt wird, muss für eine Beurteilung nach Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung ein äquivalenter Dauerschalldruckpegel als L_{Aeq} oder L_{AE} und der C-bewertete Spitzenschalldruckpegel vorliegen. Zudem geht die Dämmwirkung von Gehörschutz auf verschiedene Arten in die Beurteilung des Schießlärms ein (M-Wert bzw.

Knalldämmwert). Der Knalldämmwert entspricht mit seinem Umfang der Schutzwirkung von 50% nicht den üblicherweise im Arbeitsschutz verwendeten Größen.

Zusätzlich zum bisher praktizierten Verfahren nach Pfander wird ein modifiziertes Pfanderverfahren vorgeschlagen, um zusammengehörige Paare von Wirkzeit und Spitzenschalldruckpegel auch gemeinsam in die S-Wert-Berechnung einzubringen.

Direkte Vergleichsmessungen zwischen IFA und WTD 91 haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, die Messgrößen für das Pfander-Verfahren zu reproduzieren. Allerdings ist insbesondere die Wirkzeit mit signifikanten Unsicherheiten behaftet.

Ein Vergleich der zulässigen Schusszahlen pro Arbeitsschicht ergibt für das L_{AE} -Verfahren die geringsten Unsicherheiten, da hier die Messgröße zwischen den zehn Einzelschüssen am wenigsten variiert. Die vorgeschlagene Modifikation des Pfander-Verfahrens weist für die meisten WMK deutlich niedrigere Unsicherheiten auf als das Original-Verfahren.

Durch die Verwendung des Knalldämmwerts, der größer ist als der M-Wert ergeben sich für das Pfander-Verfahren höhere zulässige Schusszahlen als für das L_{AE} -Verfahren. Wird für beide Beurteilungsverfahren derselbe Dämmwert in die Berechnung eingesetzt, kehrt sich dieses Bild um. Das Verfahren nach Pfander ist nun strenger als das L_{AE} -Verfahren.

Danksagung

- an die UVB für die Organisation der Messtermine vor Ort;
- an die WTD 91 für die Bereitschaft zum Erfahrungsaustausch und die Überlassung ihrer Messwerte.

Literatur

- [1] Pfander, F.: Das Schalltrauma, Bonn: Bundesministerium der Verteidigung, 1994.
- [2] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 5 der Verordnung vom 18.10.2017 I 3584
- [3] DGUV-R 112-194, Benutzung von Gehörschutz, DGUV, 2015
- [4] Wolff, A.; Dantscher, S.; Flesch, A.: Vergleich verschiedener Beurteilungsverfahren für Schießlärm. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2018: 44. Jahrestagung für Akustik, 19.-22. März 2018 in München. Hrsg.: Seeber, B.; Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin 2018. S. 247-250
- [5] Vorschriften und Richtlinien zur Registrierung und Auswertung von Waffen- und Detonationsknallen (Deutsch-Französische Messvorschrift), 1995