

Vergleich verschiedener Beurteilungsverfahren für Schießlärm

Andrea Wolff, Sandra Dantscher, Andreas Flesch

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 53757 Sankt Augustin,
E-Mail: andrea.wolff@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 angenähert. Hieraus kann dann unter Berücksichtigung des eingesetzten Gehörschutzes eine maximale Schusszahl ermittelt werden, die an einem Tag abgegeben 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].

Wir vergleichen die Ergebnisse beider Beurteilungsverfahren. Hierzu wurde ein Messsystem entwickelt, mit dem alle relevanten Parameter parallel aufgezeichnet werden können und Messungen in einer Raumschießanlage durchgeführt.

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 Impulssignal. Aus diesem Signal wird dann die absolute Druckspitze pm extrahiert und die sogenannte 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 aufgenommenen 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:

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

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 der Dämmwerte für die Oktaven 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz dar, ohne Berücksichtigung der zugehörigen Standardabweichungen jeder Oktave (d.h. der Mittelwert aus der Baumusterprüfung).

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 besteht:

$$n = \frac{100000}{S_{(S)}} = \frac{10^{0,1 \cdot L_{EX,8h}} \cdot T \cdot 10^{0,1 \cdot \bar{D}_K}}{10^{0,1 \cdot L_{Zpeak}} \cdot t_w} \quad (4)$$

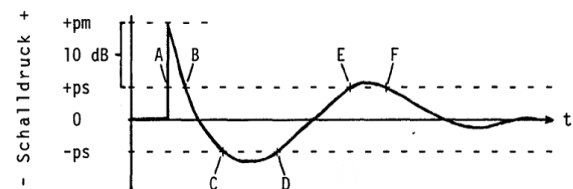


Abbildung 1: Illustration der Definition der Wirkzeit t_w nach Pfander [1]. Die Wirkzeit ist die Summe aller Zeitabschnitte nach der absoluten Schalldruckspitze pm , zu denen der Betrag des Momentanschalldrucks größer als der Wert

$pm-10\text{dB}$ ausfällt, d.h. hier $t_w = \overline{AB} + \overline{CD} + \overline{EF}$.

Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

Nach Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) ist hingegen zu betrachten, ob der Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$ einen der Auslöswerte von 80 bzw. 85 dB oder der Spitzenschalldruckpegel L_{Cpeak} einen der Auslöswerte von 135 dB bzw. 137 dB 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.

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 ge-griffen werden muss.

Bei den hier betrachteten Schusswaffen mit eher kleinen Kalibern handelt es sich ausschließlich um Waffen, bei denen das Spektrum eines Schusses einen Schwerpunkt 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 mittleren Dämmwerten an den getesteten Terzmittenfrequenzen abzüglich der jeweiligen Standardabweichungen zusammen.

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

$$L'_{EX,8h} \leq 85 \text{ dB und } L'_{C_{peak}} \leq 137 \text{ dB,} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

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

Die Überprüfung der Einhaltung des oberen Auslösewertes für den Spitzenschalldruckpegel lässt sich dabei leicht überprüfen. Für die meisten Waffen und Gehörschützer, wird der obere Auslösewert für den Spitzenschalldruckpegel eingehalten.

Messaufbau

Um einen Vergleich dieser beiden doch recht unterschiedlichen Verfahren vorzunehmen, musste zunächst ein Messaufbau realisiert werden. Die korrekte Funktionsweise hinsichtlich der Aufnahme von Werten für das Verfahren nach Pfander konnte anhand von Vergleichsmessungen mit der Bundeswehr geprüft werden. Die Deutsch-Französische Messvorschrift [4] sieht insgesamt fünf Messpositionen vor: Mp1: „Linkes Ohr des Schützen“, Mp2: „Standardmesspunkt“, Mp3: „Aufsicht“, Mp4: „1. Nachbarschütze“ und Mp5: „2. Nachbarschütze“. Diese Positionen wurden um einen zusätzlichen Messpunkt Mp6: „rechtes Ohr des Schützen“ ergänzt. Die genaue Lage der Messpunkte relativ zur Mündung der Waffe ist in Abbildung 2 dargestellt.

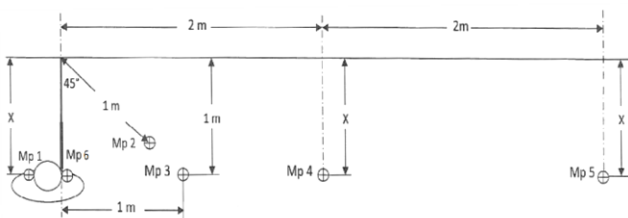


Abbildung 2: Darstellung der sechs verwendeten Messpositionen. Alle Messpositionen sind an der Mündung der Waffe ausgerichtet. Der Abstand „X“ beträgt 1m. Messaufbau nach [4], ergänzt um den Messpunkt Mp6 am rechten Ohr des Schützen.

Die Messkette bestand aus 6 Druckmikrofonen 46BH von GRAS, einem Sinus Soundbook mit 4 kanaligem Eingang, einem Ladungsverstärker Nexus von B&K, einem Audio Analyzer UPV von Rohde&Schwarz, sowie einem Handschallpegelmessgerät B&K 2270. Der Druck-Zeit-Verlauf sowie die relevanten Pegelgrößen wurden an den Messpunkten 2, 3, 4 und 5 mit dem Soundbook aufgezeichnet. An den Ohren des Schützen (Mp1 und Mp6) kam der UPV zur Messung des Druck-Zeit-Verlaufs und parallel ein B&K 2270 zur Messung der bewerteten Pegelgrößen $L_{C_{peak}}$ und L_{AE} zum Einsatz. Abbildung 3 zeigt den schematischen Messaufbau.

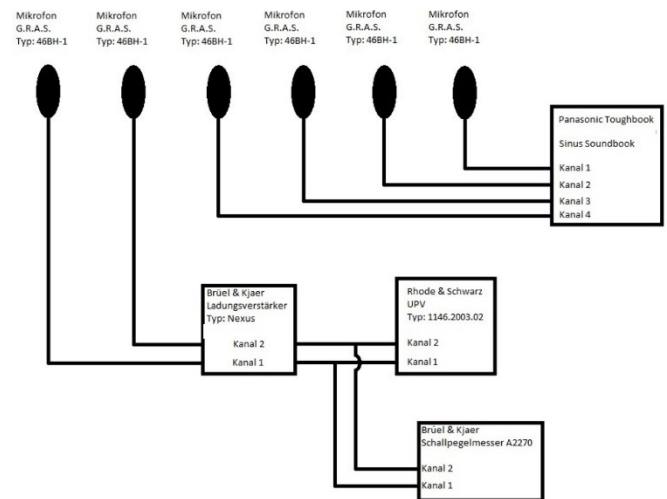


Abbildung 3: Schematische Darstellung der verwendeten Messkette.

Messung

Um nun zu einem Vergleich der beiden Beurteilungsverfahren zu gelangen, wurde die beschriebene Messkette in einer Raumschießanlage in Betrieb genommen. Es standen drei Waffen, davon eine Handfeuerwaffe und zwei Kurzwaffen, mit jeweils zwei Munitionstypen zur Verfügung. Von jeder dieser insgesamt sechs Kombinationen wurden 10 einzelne Schüsse abgefeuert und messtechnisch erfasst. Da die Schützen beim Abfeuern der Waffen Kapselgehörschutz tragen müssen, wurde für die Messpunkte Mp1 und Mp6 eine Halterung entworfen, die zerstörungsfrei am Kapselgehörschutz befestigt werden kann. Die Mikrofone befinden sich dabei in vertikaler Ausrichtung vor dem Zentrum der Kapsel in einem Abstand von ca. 5 cm.

Die korrekte Funktionsweise der Messkette wurde durch einen Vergleich mit der Messkette der Bundeswehr verifiziert.

Ergebnisse

Die aufgezeichneten Rohdaten aller sechs Messpositionen wurden mit einem selbst entwickelten Matlab-Skript gemäß dem Verfahren nach Pfander ausgewertet. Zusätzlich wurde

der Einzelereignispegel L_{AE} an allen Messpunkten ausgelesen.

Im Folgenden soll speziell die Schallbelastung an den Ohren des Schützen analysiert werden, da diese von allen betrachteten Messpunkten naturgemäß am höchsten ausfällt.

Belastung an den Ohren des Schützen

Um repräsentativere Ergebnisse zu erhalten, wurden die Messungen mit Hilfe von zwei verschiedenen Schützen durchgeführt. Obwohl es sich bei beiden Schützen um Rechtsschützen handelt, zeigen die Messdaten an beiden Ohren sehr unterschiedliche Ergebnisse bei der Handfeuerwaffe. Hier war einmal das rechte Ohr und einmal das linke Ohr höher belastet. Bei zwei der drei untersuchten Waffen, war jedoch das linke Ohr deutlich höher belastet als das rechte. Daher wird im Folgenden nur die Belastung des linken Ohres näher betrachtet.

Erlaubte Schusszahlen

Zu jeder Kombination von Waffe und Munition lagen 10 Einzelschussresultate vor. Eine Mittelung über diese 10 Stichproben wurde auf zwei verschiedene Arten durchgeführt. Zunächst wurde eine Mittelung der Wirkzeiten t_w sowie der unbewerteten Spitzenschalldruckpegel L_{Zpeak} vorgenommen und aus diesen gemittelten Werten der S-Wert bzw. die erlaubte Zahl von Schüssen pro Tag bis zum Erreichen des oberen Auslösewerts errechnet („Pfanderverfahren BW“). In einer zweiten Variante wurde für jeden einzelnen Schuss zunächst der S-Wert bestimmt und anschließend die S-Werte der Stichproben gemittelt und daraus die erlaubte Zahl von Schüssen pro Tag errechnet („Pfanderverfahren IFA“). Aus den Messgeräten wurden zusätzlich die Einzelereignispegel L_{AE} ausgelesen und arithmetisch gemittelt. Für alle drei Verfahren wurde neben den Mittelwerten auch die Standardabweichung der Werteverteilung berechnet.

Um einen Vergleich zwischen den Verfahren ziehen zu können, wird in die Berechnung der maximal erlaubten Schusszahl pro Tag ein einheitlicher Gehörschutz einbezogen. Dafür wurde der in der Praxis sehr häufig eingesetzte Kapselgehörschutz 3M Peltor Optime III H540 A ausgewählt. Dieser weist einen M-Wert von 32 dB und einen Knalldämmwert \bar{D}_K von 37,5 dB auf.

Die Beurteilungen der drei verschiedenen Verfahren in Form der Anzahl an pro Tag erlaubten Schüssen ohne Eintritt einer Gehörgefährdung sind für die sechs Waffen-Munitions-Kombinationen in Abbildung 4 dargestellt.

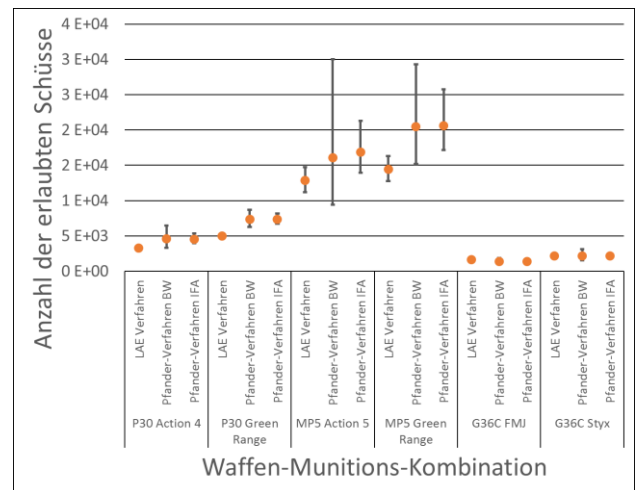


Abbildung 4: Vergleich der Beurteilungsverfahren hinsichtlich der Zahl der pro Tag erlaubten Schüsse. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aus 10 einzelnen Schüssen und die zugehörigen Standardabweichungen. Als Dämmwerte wurden, je nach Verfahren, der Knalldämmwert oder der M-Wert des Gehörschutzes angesetzt.

Es fällt auf, dass insbesondere bei den weniger lauten Waffen die ermittelten Werte stark streuen. Über alle Waffen-Munitions-Kombinationen betrachtet, zeigt das „Pfanderverfahren BW“ die mit Abstand größte Streuung der Beurteilungsergebnisse. Ursächlich hierfür ist die Art der Mittelwertbildung, bei der Wirkzeit und Spitzenschalldruckpegel separat gemittelt werden und nicht als zusammengehöriges Set in die Berechnung des S-Werts eingehen, wie beim „Pfanderverfahren IFA“. Das L_{AE} -Verfahren, bei dem die erlaubte Schusszahl direkt aus den gemessenen Einzelereignispegeln errechnet wird, zeigt sich in diesem Vergleich als das härteste Kriterium, welches die geringste tägliche Schusszahl erlaubt. Gleichzeitig weist es die geringste Streuung auf.

Dieses Bild verändert sich, wenn statt Knalldämmwert und M-Wert nun in allen Beurteilungsverfahren der M-Wert als einheitlicher Dämmwert eingesetzt wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die unterschiedlichen Skalierungen der y-Achse zwischen Abbildung 4 und 5 sind zu beachten. Nun erweist sich das Pfanderverfahren als das strengere Kriterium, welches aber immer noch die größte Streuung aufweist. Wiederum ist die Streuung des „Pfanderverfahren BW“ deutlich größer als die des „Pfanderverfahren IFA“.

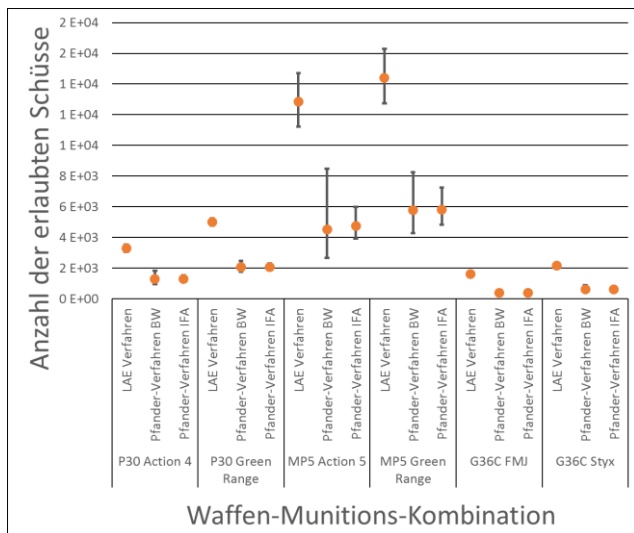


Abbildung 5: Vergleich der Beurteilungsverfahren hinsichtlich der Zahl der pro Tag erlaubten Schüsse. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aus 10 einzelnen Schüssen und die zugehörigen Standardabweichungen. Hier wurde jedoch für alle Bewertungsverfahren ein einheitlicher Dämmwert des Gehörschutzes in Höhe des M-Werts angenommen.

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

In diesem Beitrag werden nur Messwerte für das linke Ohr des Schützen gezeigt und ausgewertet. Bei diesem Messpunkt handelt es sich um den am höchsten belasteten aller sechs untersuchten Messpunkte. In unserer Messreihe stellen wir fest, dass die Verfahren für die verschiedenen gemessenen Waffen-Munitions-Kombinationen jeweils ähnliche Ergebnisse produzierten, die jedoch teilweise um mehr als 25% voneinander abwichen. Das L_{AE} -Verfahren erlaubt dabei die wenigsten Schüsse pro Tag. Das aktuell praktizierte Verfahren nach Pfander weist die mit Abstand größten Streuungen der Einzelmesswerte auf. Diese Streuungen betragen bis zu 100% des Mittelwerts.

Wird der getragene Gehörschutz nun mit einheitlichem Dämmwert in die Beurteilungen einbezogen, kehrt sich dieses Bild um. Das Verfahren nach Pfander ist nun strenger als das L_{AE} -Verfahren, weist jedoch immer noch die größte Streuung der Einzelwerte auf.

Fazit

Ohne eine gleichzeitige Messung aller Parameter ist eine Umrechnung der beiden Verfahren ineinander nicht möglich. Das L_{AE} -Verfahren weist die geringste Streubreite der beitragenden Einzelwerte auf.

Bei Anwendung des Pfanderverfahrens kann die sehr große Streuung der Einzelwerte reduziert werden, indem Wirkzeit und Spitzenschalldruckpegel der einzelnen Stichproben nicht getrennt voneinander gemittelt werden, sondern zunächst als Wertepaare in die S-Wert-Berechnung einfließen. Anschließend werden die S-Werte arithmetisch gemittelt und eine erlaubte tägliche Schusszahl berechnet.

Die hier dargestellten Werte beziehen sich zwar nur auf einzelne Waffen-Munitions-Kombinationen, jedoch sind alle Verfahren auch problemlos auf andere Kombinationen anwendbar. Wie sich die Beurteilungen der verschiedenen Verfahren dabei zueinander verhalten, lässt sich nicht vorhersagen.

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 V v. 18.10.2017 I 3584
- [3] DGUV-Regel 112-194, Benutzung von Gehörschutz, DGUV, 2015
- [4] Vorschriften und Richtlinien zur Registrierung und Auswertung von Waffen- und Detonationsknallen (Deutsch-Französische Messvorschrift), 1995