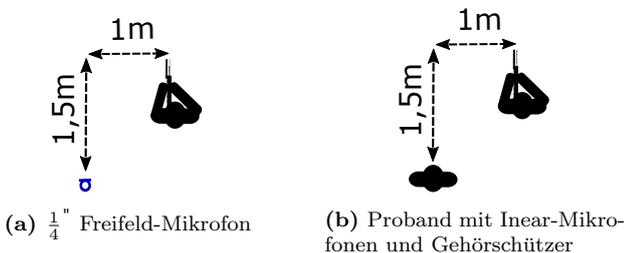


### Einleitung

Ein allgemein verbreitetes Mittel zur Reduktion der Gehörbelastung durch Schießlärm sind Gehörschützer. Eine Maßzahl zur Kennzeichnung der verbleibenden Gehörbelastung unter einem Gehörschützer kann mit Gehörgefährdungsprognoseverfahren bestimmt werden. Auf Grundlage dieser Prognosen resultiert eine Anzahl unbedenklicher Schüsse als Qualitätskenngröße für den Gehörschützer. Dementsprechend ist die Zuverlässigkeit des eingesetzten Prognoseverfahrens von entscheidender Bedeutung. Die prognostizierte Gehörgefährdung hängt wiederum signifikant von den verwendeten Gehörschützern und deren Modellierung ab. Somit ist eine realitätsnahe Berücksichtigung der Schutzwirkung von hoher Relevanz und wird in diesem Beitrag behandelt. Zur Bewertung der Gehörschützer-Modellierung werden unter einem Kapselgehörschützer am Ohrkanaleingang eines Probanden in-situ gemessene Schussignale als Referenz verwendet. Anhand dieser Referenzsignale und weiterer, in mündungsnähe aufgezeichneter Waffenknalle können unterschiedliche Gehörschützer-Rechenmodelle sachgerecht untersucht und bewertet werden.

### Messaufbau

Die Schießlärmmessungen fanden in einer Raumschießanlage auf der mittleren Schießbahn in einer Entfernung von 12,5 m zum Anlagenbezugspunkt statt. An dieser Position gab ein Schütze mit jeder Waffe nach Tabelle 1 nacheinander jeweils 10 Schüsse ab. Der Schalldruckzeitverlauf der daraus resultierenden Waffenknalle wurde 1 m seitlich und 1,5 m hinter der Mündung mit einem  $\frac{1}{4}$ " Freifeld-Mikrofon aufgezeichnet. Anschließend wurde, wie in Abbildung 1 skizziert, das Freifeld-Mikrofon durch einen Probanden ausgetauscht.



**Abbildung 1:** Messpunkte: Freifeld- und Referenzmessung  
Dieser Proband trug unter dem Kapselgehörschützer Inear-Mikrofone. Mit diesem Messszenario gab der Schütze erneut 10 Schüsse mit jeder Waffe ab, deren Waffenknalle diesmal am Ohrkanaleingang des Probanden aufgezeichnet wurden. Als Inear-Mikrofone wurden „Roland CS-10EM“ verwendet, für die mit einer Entzerrungskurve ein glatter Frequenzgang generiert wurde. Da bis auf den Austausch des Freifeld-Mikrofons gegen den Probanden mit Inear-Mikrofonen keine Änderungen an dem Messaufbau vorgenommen wurden, kann folgende

Annahme getroffen werden.

**Annahme:** Die Differenzen zwischen den gemessenen Schalldruckzeitverläufen - mittels Freifeld und Inear-Mikrofon bei der selben Waffe - resultieren ausschließlich aus dem Kapselgehörschützer und der Außenohrübertragungsfunktion des Probanden<sup>1</sup>. Folglich kann mit diesen Differenzen die Qualität eines Gehörschützer-Rechenmodells für diesen Probanden bewertet werden.

### Gehörschädigungsprognoseverfahren

In diesem Abschnitt werden die betrachteten DRC (Damage Risk Criteria) und die dazugehörigen Rechenmodelle für den Gehörschutz vorgestellt.

#### • Schallwert-100 000-Verfahren

Die möglichen Schusszahlen  $N_P$  dieses Verfahrens basieren auf dem maximalen Schalldruck  $p_{Max}$ , der Wirkzeit  $t_W$  und dem Knalldämmwert  $\bar{D}_k$  und können nach Gleichung (1) berechnet werden [1]. Hierbei wird der Gehörschützer durch den Knalldämmwert repräsentiert, welcher durch energetische Mittelung der Oktavdämmwerte der Mittenfrequenzen von 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz nach Gleichung (2) bestimmt wird.

$$N_P = \frac{3646 \text{ Pa}^2 \text{ s} \cdot 10^{\frac{\bar{D}_k}{10}}}{p_{Max}^2 \cdot t_W} \quad (1)$$

$$\bar{D}_k = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{3} \cdot \left[ 10^{\frac{-D_{500\text{Hz}}}{10}} + 10^{\frac{-D_{1\text{kHz}}}{10}} + 10^{\frac{-D_{2\text{kHz}}}{10}} \right] \right) \quad (2)$$

#### • $L_{A,E}$ -Verfahren

Das  $L_{AE}$ -Verfahren ist nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [2] definiert. Für mündungsnahen Schießlärm müssen die beiden oberen Auslösewerte für den Tages-Lärmexpositionspiegel  $L_{EX,8h} \leq 85 \text{ dB}$  und den C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel  $L_{p,C,peak} \leq 137 \text{ dB}$  unter Berücksichtigung des Gehörschützers eingehalten werden. Die maximale tägliche Schusszahl  $N_L$  wird mittels Gleichung (3), dem A-bewerteten Einzelereignispegel  $L_{A,E}$  des Knallsignals und der Dauer eines Arbeitstages  $T_e = 28800 \text{ s}$  berechnet.

$$N_L \leq \frac{T_e}{s} \cdot 10^{\frac{L_{EX,8h} - L_{A,E} + \bar{D}_M}{10}} \quad (3)$$

Als Gehörschützer-Rechenmodell wird für dieses Verfahren der M-Wert  $\bar{D}_M$  empfohlen [3].

#### • AHAH-Modell

Die Gehörschädigungsprognosen des AHAH-Modells<sup>2</sup> (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans)

<sup>1</sup>Weitere Einflüsse wie beispielsweise geringfügige Abweichungen in der Positionierung des Schützen oder minimal unterschiedliche Treibladungen werden vernachlässigt.

<sup>2</sup>Alle Berechnungen wurden unwarnd durchgeführt.

basieren auf einer komplexen elektrischen Ersatzschaltung [4]. Das Gehörschützer-Rechenmodell dieses Prognoseverfahrens wird hier nicht betrachtet, da für den untersuchten Gehörschützer keine Daten vorliegen.

## Verwendete Parameter

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Testsignale sowie der betrachtete Gehörschützer vorgestellt.

### • Testsignale

Als Testsignale werden fünf in Mündungsnähe gemessene Schussignale einer Pistole (P30), einer Maschinenpistole (MP7) und dreier Gewehre (G36, G36K und G28) verwendet.

Tabelle 1: Kenndaten der Testsignale

Waffe	Munition	Freifeld-Spitzenpegel $L_{p,z,peak}$ [dB]	Mittelfrequenz (Oktave)
P30	9 mm × 19 mm	151	1 kHz
MP7	4,6 mm × 30 mm	150	1 kHz
G36K	5,56 mm × 45 mm	154	500 Hz
G36	5,56 mm × 45 mm	152	500 Hz
G28	7,62 mm × 51 mm	155	250 Hz

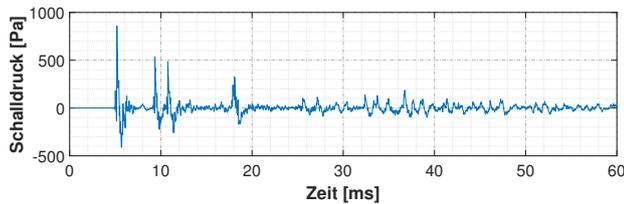


Abbildung 2: Exemplarischer Schalldruckzeitverlauf eines Pistolenschusses

Die Kenndaten dieser Signale sind in Tabelle 1 aufgeführt und in Abbildung 2 ist ein exemplarischer Schalldruckzeitverlauf dargestellt.

### • Der betrachtete Gehörschützer

Alle Untersuchungen wurden anhand des passiven Kapselgehörschützers „Peltor X5A“ von 3M [5] durchgeführt. Dessen M-Wert wird vom Hersteller mit  $\bar{D}_M = 35$  dB angegeben. Der Knalldämmwert berechnet sich mittels Datenblatt und Gleichung (2) zu  $\bar{D}_k = 40,8$  dB.

Zusätzlich zu diesen Einzahl-Dämmwerten wurden zwei frequenzabhängige Gehörschützer-Rechenmodelle untersucht. Zum einen wurde die individuelle Gehörschützerübertragungsfunktion (Hearing Protector Transferfunction, HpTF) des Probanden in-situ gemessen. Das zweite Modell wurde durch Interpolation der Oktavdämmwerte des Datenblattes generiert.

Die Pegeldämpfungen der Gehörschützer-Rechenmodelle sind in Abbildung 4 über der Frequenz dargestellt.

3M™ Peltor™ X5A

Frequenz (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Mittelwert Dämpfung (dB)	23,0	22,3	28,8	39,7	44,2	39,8	43,0	40,2
Standardabweichung (dB)	3,1	2,4	2,4	2,7	3,4	4,6	2,8	2,9
Vorausgesetzter Schutz (dB)	19,8	19,9	26,4	37,0	40,9	35,2	40,2	37,3

SNR=37 dB H=37 dB M=35 dB L=27 dB



Abbildung 3: Datenblattauszug: „Peltor X5A“ [5]

## Bewertungsmethode

In diesem Abschnitt wird die Bewertungsgröße - die relative Abweichung - hergeleitet.

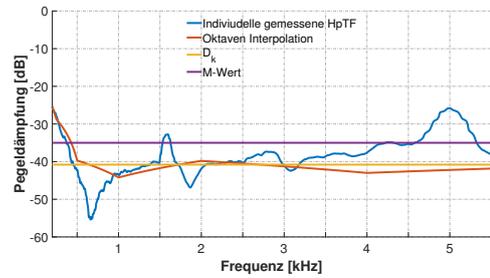


Abbildung 4: Frequenzabhängige Pegeldämpfung der betrachteten Gehörschützer-Rechenmodelle des „Peltor X5A“

### • Schusszahlen der Rechenmodelle

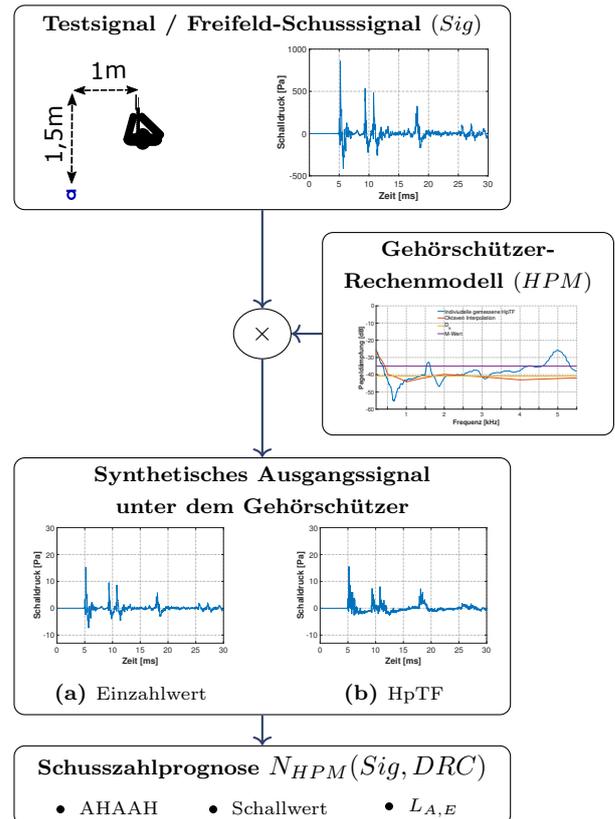


Abbildung 5: Verlaufsdiagramm: Schusszahlbestimmung der Gehörschützer-Rechenmodelle

Die Synthese der Schussignale am Ohrkanaleingang in Abhängigkeit des Rechenmodells (Hearing Protector Modell, HPM) und der Waffe (Sig) ist im Verlaufsdiagramm nach Abbildung 5 skizziert. Zunächst wird auf das mittels Freifeld-Mikrofon gemessene Schussignal das jeweilige Gehörschützer-Rechenmodell angewendet. Bei den Einzahl-Rechenmodellen entspricht dies der Multiplikation<sup>3</sup> der einzelnen Samples mit dem Dämmfaktor bzw. einer Skalierung der Amplitude, wie in Abbildung 5a exemplarisch dargestellt.

Für die frequenzabhängigen Rechenmodelle - die HpTF - muss dagegen die Faltung des Schussignales mit der jeweiligen Übertragungsfunktion berechnet werden. In Abbildung 5b ist dies beispielhaft für die individuelle HpTF abgebildet und es sind zusätzlich zur Amplitudenreduk-

<sup>3</sup>Es macht keinen Unterschied, ob die Dämmwerte direkt auf den Schalldruckzeitverlauf angewendet oder in Gleichung (1) bzw. Gleichung (3) berücksichtigt werden.

tion spektrale Veränderungen ersichtlich.

Für diese synthetischen Schussignale wird im nächsten Schritt das Gehörschädigungsrisiko bzw. die Gehörbelastung nach dem jeweiligen Prognoseverfahren (*DRC*) berechnet. Zur Vereinheitlichung dieser Prognosen werden sie in die entsprechende unbedenkliche tägliche Schusszahl  $N_{HPM}(Sig, DRC)$  umgerechnet.

#### • Referenzschusszahlen und Bewertungsgröße

Die Referenzschusszahlen  $N_{Ref}(Sig, DRC)$  werden direkt aus den am Ohrkanaleingang des Probanden unter dem Gehörschützer gemessenen Waffenknallen bestimmt. Sie hängen somit nur von der verwendeten Waffe und dem Gehörschädigungsprognoseverfahren ab.

Anhand der Referenzschusszahlen kann die Abweichung der prognostizierten Schusszahlen<sup>4</sup> des jeweiligen Rechenmodells in Abhängigkeit der Waffe und des Prognoseverfahrens untersucht werden. Hierzu wird die Größe der relativen Abweichung  $\delta_{rel,HPM}(Sig, DRC)$  nach Gleichung (4) verwendet. Diese beschreibt die prozentuale Abweichung des Modellwertes zu dem gemessenen Sollwert und stellt hier die Bewertungsgröße dar.

$$\delta_{rel,HPM}(Sig, DRC) = \left| \frac{N_{Ref}(Sig, DRC) - N_{HPM}(Sig, DRC)}{N_{Ref}(Sig, DRC)} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

## Ergebnisse

### • Einzahl-Rechenmodelle

Zunächst werden die relativen Abweichungen der Einzahl-Rechenmodelle betrachtet. Zusätzlich zu den beiden festen Dämmwerten - Knalldämmwert und M-Wert - wurde eine Variationsrechnung durchgeführt. Der Dämmwert  $D_W$  durchlief hierbei das Intervall von 24 dB bis 46 dB mit einer Schrittweite von 0,1 dB. Die daraus resultierenden relativen Abweichungen sind in den Abbildungen 6 bis 8 für das jeweilige Gehörschädigungsprognoseverfahren dargestellt. Die Kurven der einzelnen Waffen sind hierbei farblich kodiert und eine schwarz gestrichelte Linie repräsentiert die geringstmögliche Abweichung über alle Waffen in Abhängigkeit des Dämmwertes. Aus den Abbildungen kann für jede Waffe der modelgetreue Dämmwert des Peltor X5A anhand des Minimums der relativen Abweichung abgelesen werden. Unterhalb dieses Minimums wird das Gehörschädigungsrisiko überschätzt und es liegt Overprotection vor. Eine kritische Unterschätzung des Risikos, was zu einer höheren Schusszahl führt, tritt auf, wenn das Minimum bzw. der modelgerechte Dämmwert überschritten wird.

Exemplarisch folgt daraus für das Schallwert-100 000-Verfahren nach Abbildung 6, dass der modelgetreue Dämmwert des Peltor X5A für die Pistole 34,4 dB und 24,8 dB für das G28 beträgt. Diese modelgetreuen Dämmwerte sind erheblich kleiner als der Knalldämmwert mit 40,8 dB. Für die hier untersuchten Handfeuerwaffen entspricht dies einer Bandbreite von

<sup>4</sup>Die Schusszahlen resultieren jeweils aus dem Median der 10 einzelnen Schüsse pro Waffe.

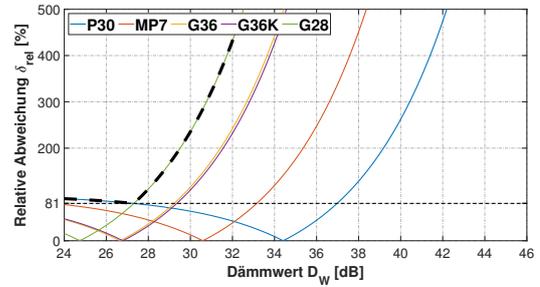


Abbildung 6: Dämmwert-Variation: Schallwert-Verfahren

näherungsweise 10 dB. Diese Bandbreite resultiert mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den jeweiligen Waffenmitfrequenzen: Je höher diese Frequenz, desto höher ist der modelgerechte Dämmwert.

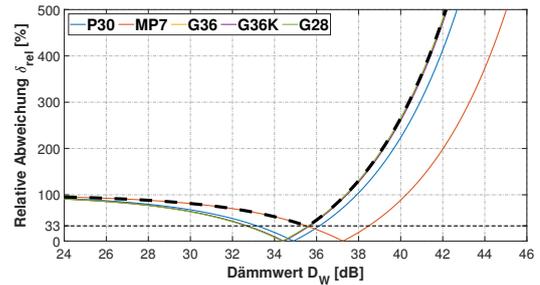


Abbildung 7: Dämmwert-Variation:  $L_{A,E}$ -Verfahren

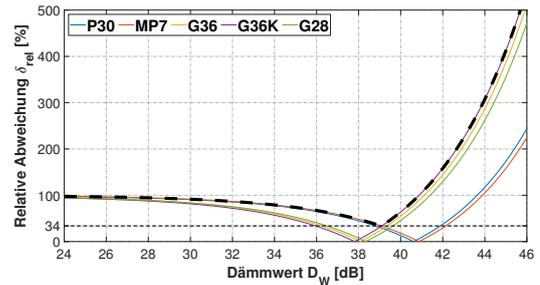


Abbildung 8: Dämmwert-Variation: AHAAH-Modell

Die Bandbreiten der Dämmwerte betragen für das  $L_{A,E}$ -Verfahren und das AHAAH-Modell nach den Abbildungen 7 und 8 mit ca. 3 dB deutlich weniger. Des Weiteren sind die modelgetreuen Dämmwerte dieser Verfahren signifikant höher als nach dem Schallwert-100 000-Verfahren.

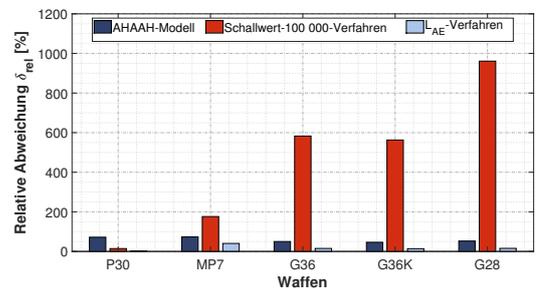


Abbildung 9: M-Wert: 35 dB

In den Abbildungen 9 und 10 werden die beiden festen Einzahl-Dämmwerte nochmals genauer betrachtet. Mit dem M-Wert liegt für das AHAAH-Modell Overprotection vor, die kritische Abweichung des  $L_{A,E}$ -Verfahrens beträgt maximal 29 % und die des Schallwert-100 000-Verfahrens 960 %. Für den Knalldämmwert beträgt die maximale kritische Abweichung des AHAAH-Modells 84 %, die des  $L_{A,E}$ -Verfahrens 328 % und nach dem

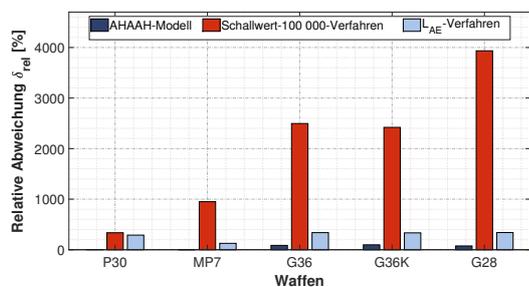


Abbildung 10: Knalldämmwert: 35 dB

Schallwert-100 000-Verfahren steigt sie auf fast 4000 % an. Dies bedeutet zum einen, dass das Schallwert-100 000-Verfahren bis zu 40 mal so viele Schüsse als unbedenklich prognostiziert, wenn es den Knalldämmwert als Rechenmodell anstelle einer Messung unter dem Gehörschützer verwendet. Wird hingegen das AHAAH-Modell mit dem M-Wert verwendet, wird nur ca. ein Fünftel der möglichen Schüsse prognostiziert.

### • Frequenzabhängige Rechenmodelle

In den Abbildungen 11 und 12 werden die relativen Abweichungen der beiden frequenzabhängigen Gehörschützer-Rechenmodelle präsentiert.

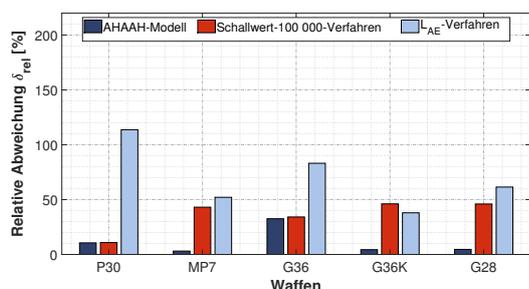


Abbildung 11: Interpolation der Oktavwerte

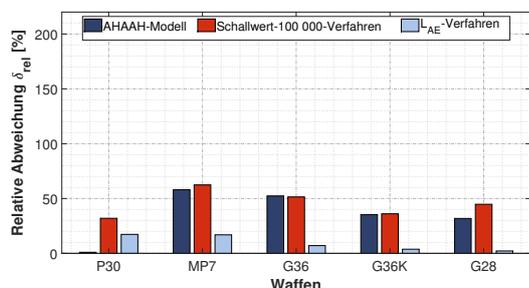


Abbildung 12: Individuelle HpTF

Für die Übertragungsfunktion, welche aus der Interpolation der Oktavdämmwerte resultiert, beträgt die maximale kritische Abweichung 113 % mit dem  $L_{A,E}$ -Verfahren. Die beiden anderen Prognoseverfahren tendieren hier zur Overprotection.

Wird die individuelle Gehörschützerübertragungsfunktion als Rechenmodell verwendet, so wird die geringste Abweichung aller betrachteten Gehörschützer-Rechenmodelle erzielt. Diese beträgt hier mit dem AHAAH-Modell 58 %. Für das  $L_{A,E}$  und das Schallwert-100 000-Verfahren liegt hier Overprotection vor.

### Zusammenfassung und Fazit

Die Einzahl-Dämmwerte vernachlässigen die frequenzabhängige Pegeldämpfung eines Gehörschützers und ergeben somit, losgelöst vom Prognoseverfahrens, für jede

Waffe einen unterschiedlichen modelgetreuen Dämmwert. Daraus resultiert entweder eine kritische Unterschätzung des Gehörschädigungsrisikos oder es liegt eine Overprotection vor. Dies kann für das Schallwert-100 000-Verfahren in Kombination mit dem Knalldämmwert dazu führen, dass die berechnete Schusszahl bis zu 40-mal zu groß ausfällt. Somit kann mit dieser Kombination offensichtlich keine belastbare unbedenkliche Schusszahl prognostiziert werden.

Die frequenzabhängigen Gehörschützerübertragungsfunktionen überschätzen das Gehörschädigungsrisiko um maximal 113 % und unterschätzen es um höchstens 70 %. Somit sind diese Übertragungsfunktionen zum einen deutlich sicherer und zum anderen auch effizienter als die Einzahl-Rechenmodelle.

### Ausblick

In Tabelle 2 sind die prognostizierten Schusszahlen abgebildet, die sich aus den Messungen am Ohrkanaleingang des Probanden unter dem „Peltor X5A“ ergeben. Diese sind somit unabhängig von den Gehörschützer-Rechenmodellen und ermöglichen eine Diskussion der Prognoseverfahren.

Tabelle 2: Prognostizierte unbedenkliche Schusszahlen aus den unter dem Gehörschützer gemessenen Waffenknallen

Waffe	Schallwert	$L_{A,E}$	AHAAH
P30	22 574	57 161	2 275
MP7	19 921	143 306	4 335
G36K	1 583	25 856	961
G36	3 357	37 617	1 166
G28	870	19 007	685

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass das AHAAH-Modell stets die geringsten Schusszahlen prognostiziert. Für die niederfrequenten Waffen ist die Differenz zu den Schusszahlen des Schallwert-100 000-Verfahrens gering, nimmt jedoch mit steigender Waffenmittenfrequenz zu. Das  $L_{A,E}$ -Verfahren prognostiziert für alle Waffen deutlich höhere unbedenkliche Schusszahlen als die beiden anderen Verfahren. Da dieses energetische Verfahren nicht explizit auf Schießlärm ausgelegt ist, sind diese Schusszahlen möglicherweise zu hoch und nicht belastbar.

### Literatur

- [1] F. Pfander, *Das Knalltrauma - Analyse, Vorbeugung, Diagnose, Behandlung, Prognose und Begutachtung*. Berlin: Springer-Verlag, 1975.
- [2] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen*, vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261).
- [3] S. Dantscher und A. Wolf, „Beurteilung der Gefährdung durch Schießlärm: Pfander oder LAE-Verfahren?“, Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA), Hrsg., S. 208–211, 2019.
- [4] Army Research Laboratory, *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH)*. Adresse: [www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343](http://www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343).
- [5] 3M, *Datenblatt 3M Peltor X Serie*. Adresse: <https://multimedia.3m.com/mws/media/8735830/3m-peltor-x-series-ear-muffs-datasheet.pdf>.