

Untersuchung der Dämmwirkung ziviler Jagdschalldämpfer

Philipp Trabert¹, Karl-Wilhelm Hirsch², Steffen Kreikemeier³, Markus Kallinger⁴

¹Technische Hochschule Lübeck, 23562 Lübeck, Deutschland, Email: info@philipptrabert.de

²Cervus Consult, 47877 Willich, Deutschland, Email: hirsch@cervus.de

³Hochschule Aalen, 12345 Stadt, Deutschland, Email: steffen.kreikemeier@hs-aalen.de

⁴Technische Hochschule Lübeck, 73430 Aalen, Deutschland, Email: markus.kallinger@th-luebeck.de

Einleitung

Schalldämpfer für Handfeuerwaffen sind im zivilen Bereich essenziell um das Gehör des Schützen und des Hundes zu schützen sowie das Wild nicht unnötig zu beunruhigen. Des Weiteren ermöglichen Schalldämpfer die Einhaltung der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV). Dementsprechend ist eine sachgerechte Untersuchung und Beurteilung eines Schalldämpfers notwendig. Aktuell existiert kein genormtes Beurteilungs- bzw. Bewertungsverfahren für zivile Jagdschalldämpfer. In dieser Untersuchung wurden Emissionsdaten von Schalldämpfern unterschiedlicher Konstruktionsweisen und Kaliber nach den Vorgaben der DIN EN ISO 17201-1:2019-06 erhoben. Die Ergebnisse zeigen, dass die DIN EN ISO 17201-1:2019-06 ebenfalls für die Quelldatenerhebung ziviler Jagdschalldämpfer anwendbar ist.

Mündungsknall

Beim Vorgang des Schießens sind mehrere Pegelereignisse zu betrachten. Das primäre Ereignis stellt der Mündungsknall dar. Zum Zeitpunkt des Austritts des Geschosses aus der Mündung stehen die Gase immer noch unter einem sehr hohen Druck. Im Vergleich zur Außenluft herrschen hier Druckunterschiede zwischen 2000 bar und 5000 bar. Aufgrund der großen Druckdifferenz zum Umgebungsdruck entsteht durch die Expansion der Gase eine Stoßwelle. Diese Stoßwelle ist die Ursache des Mündungsknalls. Die Ausbreitung der Stoßwelle ist nicht kugelförmig. Grund hierfür sind die hervorgehobenen Strömungen und die nachfolgenden Gase. Diese überholen jedes andere Schallereignis beim Schuss. Diese Geschwindigkeit ist so hoch, dass in Mündungsnähe am Geschosshack stets eine Stoßwelle zu sehen ist. Diese weist Strömungsgeschwindigkeiten auf, die relativ zum Geschoss größer sind als die lokale Schallgeschwindigkeit [1].

Schalldämpfer

Schalldämpfer für Handfeuerwaffen basieren auf unterschiedlichen Funktionsweisen. Durch eine Energieumwandlung der kinetischen Energie der Treibladungsgase in Wärmeenergie wird die Schallemission gemindert. Die Umwandlung der Energie erfolgt meist durch Entspannung des Gasdruckes, Abkühlung der Gastemperatur, Drosselung der Gasstromgeschwindigkeit und durch eine Verwirbelung des Gasstromes. Maßgeblich werden die o.g. Effekte durch die Blendenkonstruktion und -anordnung, Wahl des Innenvolumens und zusätzlich ver-

baute Stahlwolle erzielt. Abbildung 1 zeigt exemplarisch eine CAD-Innenansicht eines Schalldämpfers [2].

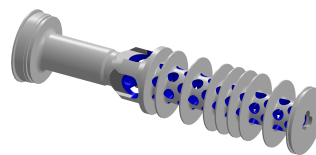


Abbildung 1: CAD-Innenansicht eines Schalldämpfers. Die Blendenanordnungen und die axialen Bohrungen sind erkennbar.

Gehörschädigungsprognoseverfahren

Im folgenden Abschnitt werden die betrachteten Gehörschädigungsverfahren, die zur Bewertung eines Schalldämpfers herangezogen wurden, eingeführt.

• Pfander-Verfahren

Dieses auf Schießlärm entwickelte Bewertungsverfahren legt einen Energieäquivalenzparameter von $3646 \text{ Pa}^2 \cdot \text{s}$ fest. Bei diesem Wert konnte bei Probanden, 24 Stunden nachdem sie Waffenknallen ausgesetzt waren, keine temporäre Verschiebung der Hörschwelle (engl. TTS - Temporary Threshold Shift) festgestellt werden [3]. Die möglichen Schusszahlen N_P nach diesem Verfahren hängen vom maximalen Schalldruck p_{max} und der Wirkzeit t_w ab und können nach Gleichung 1 berechnet werden [3]:

$$N_P = \frac{3646 \text{ Pa}^2 \cdot \text{s}}{p_{peak}^2 \cdot t_w} \quad (1)$$

• AHAAH-Modell

Die Gehörschädigungsprognosen des Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans - Modell (AHAAH) basiert auf einer komplexen elektrischen Ersatzschaltung [4]. Ziel ist es, die Auslenkung der inneren Haarzellen an 23 definierten Stellen auf der Basilarmembran zu bestimmen. Das Maximum der Auslenkung D wird quadriert und führt dann zu der Einheit Auditory Risk Unit (ARU):

$$H = \frac{D^2}{1 \mu\text{m}} \text{ARU} \quad (2)$$

Bei einem Gehörgefährdungsindex $H=500$ ARUs wird eine dauerhafte Verschiebung der Hörschwelle (engl. PTS-

Permanent Threshold Shift), bei H=200 ARUs eine TTS erwartet. Das AHAH-Modell wurde für Schießlärm entwickelt und ist seit 2015 Teil des US-Military Standard.

• L_{AE} -Verfahren

Das L_{AE} -Verfahren ist nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsstättenchutzverordnung definiert. Es sind in dieser Verordnung die oberen Auslöswerte $L_{EX,sh} \leq 85$ dB und der C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel $L_{p,C,peak} \leq 137$ dB vorgegeben [5]. Die maximal täglich zugelassenen Expositionen wird mittels Gleichung 3 m.H. des A-bewerteten Einzelereignispegel $L_{A,E}$ des Knallsignals und der Dauer eines Arbeitstages $T_E = 28800$ s ($\cong 8$ Stunden) bestimmt:

$$N_{L_{A,E}} \leq T_{8h} \cdot 10^{\frac{85 \text{ dB} - L_{EX,sh}}{10}} \quad (3)$$

Dieses Verfahren ist nicht explizit für Schießlärm entwickelt worden.

Messaufbau & Messdurchführung

Der Messaufbau ist an der DIN EN ISO 17201-1:2019-06 angelehnt. Die Waffe befand sich in der Mitte eines Halbkreises in 1,6 m Höhe über dem Boden und wurde auf einem Stativ angebracht. Der Schütze stand hinter der Waffe, die Fußstellung wurde markiert und nicht verändert. Die Position der Mündung war bei allen Waffen unabhängig der Gesamtlänge identisch. Die Mikrofone wurden in einem Abstand von 15 m in einem Halbkreis um die Mündung platziert. Die Winkelschrittweite betrug 30° , die Höhe über dem Boden ebenfalls 1,6 m. Das Mikrophon in Schießrichtung wurde 0,02 m tiefer platziert. Die Ausrichtung der Mikrofone wurde mit einem Theodoliten überprüft. Abbildung 2 zeigt den schematischen Messaufbau. Zusätzlich wurde jeweils ein Mikrophon in 1 m Entfernung von der Mündung bzw. vom Schützenohr in 1,6 m Höhe platziert (vgl. grünes und rotes unteres Mikrophon in Abbildung 2). Der Winkel betrug hier 270° bzw. 230° . Dieser Aufbau im Nahfeld der Quelle entspricht u.a. dem des DEVA-Standardverfahrens [6] und dem Aufbau nach Trabert und Goicke [7].

Die Messung gliederte sich in insgesamt in 13 Schussserien à 10 Schuss. Jede dieser Serien ist eine Kombination aus der Waffe im jeweiligen Kaliber und einem Schalldämpfer. Zusätzlich wurden die Waffen auch ohne Schalldämpfer geschossen. Insgesamt kamen vier Kaliber und vier Schalldämpfer verschiedener Hersteller zum Einsatz.

Ergebnisse

In diesem Beitrag werden lediglich die Kaliber .308 WIN und .30-06 Springfield betrachtet. Der Einfluss der Pulverform und -ladungsmenge auf die Wirkung der verschiedenen Blendenanordnungen und verbauten Materialien der Schalldämpfer wird hier nicht näher betrachtet.

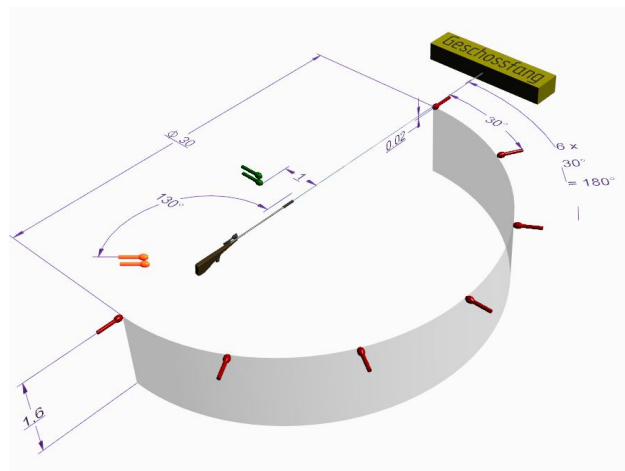


Abbildung 2: Messaufbau Seitenansicht. Die Skizze ist nicht maßstabsgerecht.

Die zu ermittelnde Zielgröße der DIN EN ISO 17201-1:2019-06 stellt der Schallenergiepegel dar. Um diesen aus dem gemessenen Schallexpositionspegel ermitteln zu können, ist es notwendig das Spektrum am Immisionsort zu beschreiben. Das von Weber entwickelte Modell für Knallfunken [8] eignet sich als mathematischer Ansatz auch um die Spektren von Waffenknallen zuverlässig beschreiben zu können:

$$p(\omega) = \frac{P_w}{\pi} \cdot \left[\frac{\alpha_w}{\alpha_w^2 + \omega^2} + j \frac{\omega}{\alpha_w^2 + \omega^2} \right] \quad (4)$$

mit

$$\alpha_w = \frac{3 \cdot c}{R_W} \cdot \left[1 + \left(\frac{c}{\omega \cdot R_W} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

mit

α_w : Kreisfrequenz in Abhängigkeit von R_W ,
 P_W : Konstante, bestimmt in [8]; $P_W=14,4$ kPa
 R_W : Weber-Radius in Meter (m)

Dieses Modell liefert auf Basis der Thermodynamik eines idealen Gases und der Strahlungsimpedanz einer Kugel in Abhängigkeit eines einzigen zu bestimmenden Parameter (Radius der Kugel) das Fourierspektrum einer Knallwelle [8]. Abbildung 3 zeigt die Fourierspektren zweier Weber-Knalle mit einem Weber-Radius von 0,5 m und 1 m.

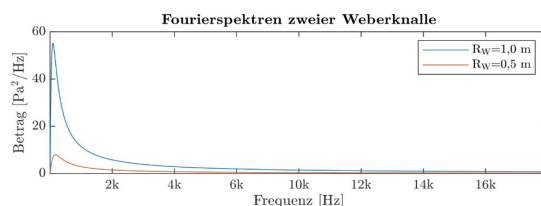


Abbildung 3: Fourierspektren zweier idealisierter Weberknalle nach Gleichung 4

Mit einer zuverlässigen Beschreibung der Eigenschaften des Bodens für die Reflexion von Kugelschallwellen für

streifenden Einfall kann die Intensität des Direktschalles bestimmt werden [9]. Bei der Betrachtung von Abbildung 4a ist der Mündungsknall ohne Schalldämpfer zu sehen. Der Geschosknall wurde für weitere Analysen entfernt. Der Mündungsknall entspricht dem Modell nach Weber [8]. Somit ist das Prognosemodell anwendbar. Abbildung 4b zeigt die Druck-Zeitverläufe der Mündungsknalle unter Verwendung der Schalldämpfer. Es ist deutlich zu sehen, dass die Amplitude geringer ausfällt. Der Verlauf ist nicht mit dem eines Mündungsknalles zu vergleichen. Lediglich die Form und Amplitude des Geschosknalles bleibt erhalten. Bei steigendem Weber-Radius ist eine fast lineare Zunahme der Wirkzeit zu beobachten. Betrachtet man allerdings die Wirkzeit der Waffenkalle mit Schalldämpfer, ist das Gegenteil zu sehen. Mit steigendem Schalldruck sinkt die Wirkzeit. Dies ist u.a. auf die Prolongation, verursacht durch den Schalldämpfer, zurückzuführen.

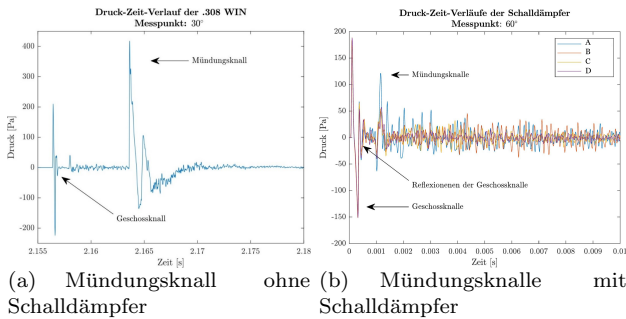


Abbildung 4: Druck-Zeit-Verläufe der Mündungsknalle mit und ohne Schalldämpfer

Abbildung 5 zeigt die Übereinstimmung der Prognose Weber-Modell [8] mit den gemessenen Werten. Dargestellt ist ein Auszug der Quelldatenerhebung in Schussrichtung im Kaliber .308 WIN ohne Schalldämpfer. Das Balkenspektrum ist aus dem prognostiziertem Schalldruckquadrat ($p * p$) abgeleitet, das Linienspektrum aus dem Energiefluss der Quelle allein abgeleitet ($p*v$). Letzteres zeigt das zu erwartende Spektrum, wenn die Ausbreitung des Schalls nicht durch Bodenreflexionen gestört werden würde. Die Sterne zeigen das Spektrum der Vergleichsmessung.

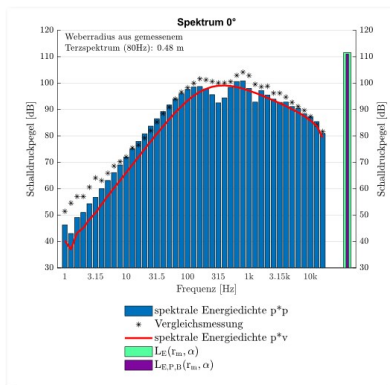


Abbildung 5: Auszug aus der Quelldatenerhebung ohne Schalldämpfer im Kaliber .308 WIN.

Waffenkalle zeichnen sich durch ihren Energieschwerpunkt im tieffrequenten Bereich aus. Das in Abbildung 5 gezeigte Signal hat einen Weber-Radius von 0,48 m. Die Hauptfrequenz dieses Spektrums beträgt hier ca. $25 \text{ Pa}^2/\text{Hz}$ bei ca. 200 Hz. Die Hauptfrequenz der Spektren derselben Kaliber mit Schalldämpfer liegt bei ca. 5 kHz.

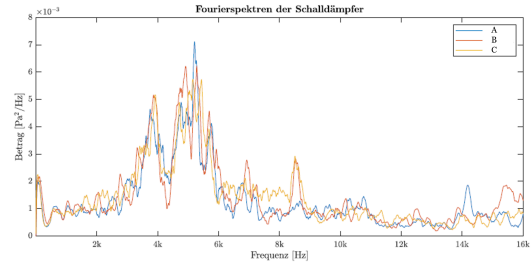


Abbildung 6: Fourierspektren der Mündungsknalle mit Schalldämpfer. Der Energieschwerpunkt ist zu höheren Frequenzen verschoben.

Die Schalldämpfer verschieben das Spektrum zu höheren Frequenzen (vgl. Abbildung 6). Hier wird deutlich, dass zur Eliminierung der Bodenreflexion die ermittelten Werte ohne Schalldämpfer herangezogen werden müssen und das ein Vergleich von Schalldämpfern mit einer Differenz des Spitzenschalldruckpegels nicht charakterisiert werden kann.

Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Richtcharakteristiken von Schalldämpfern im Kaliber .308 WIN. Die Schalldämpfer zeigen eine unterschiedliche Wirkung im Bezug auf die Richtwirkung. Die Umlenkung der Gase ist sichtbar.

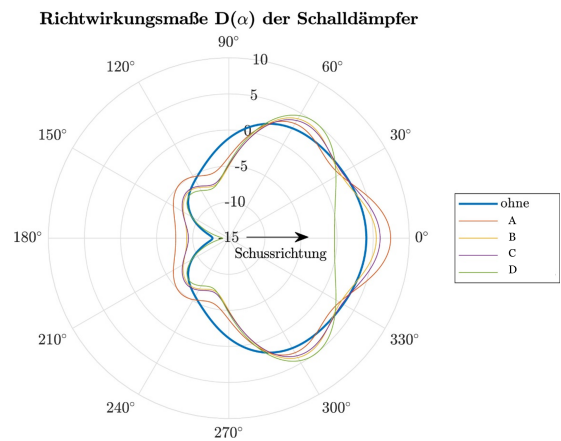


Abbildung 7: Frequenzunabhängige Richtwirkungsmaße $D(\alpha)$ der verwendeten Schalldämpfer im Kaliber .308 WIN: Die Richtwirkungen der Schalldämpfer sind abhängig von der Bauform und vom Volumen

Der auffällige Pegelanstieg bei 60° ist eine Folge der Gasumlenkung. Im hinteren Winkelbereich wirkt der Schalldämpfer wie eine Mündungsbremse, da hier die Pegel im Vergleich zum Gesamtschallenergiepegel größer sind als ohne Schalldämpfer (Ausnahme Schalldämpfer D). Der Einsatz von Stahlwolle hat eine stabilisierende

Wirkung auf das Richtwirkungsmaß. Die gezeigten Richtwirkungsmaße konnten approximativ anhand Schlierenaufnahmen validiert werden.

Anwendung der Gehörschädigungsindizes

Tabelle 1 zeigt die Differenzen der Schallenergiepegel (nach DIN EN ISO 17201-1:2019-06) und die Differenzen der Spitzenschalldruckpegel nach dem DEVA-Standardverfahren [6]. Die beiden Messmethoden zeigen erhebliche Unterschiede. Diese sind auf eine fehlende Berücksichtigung der Richtwirkung und die Vernachlässigung nicht-linearer Effekte zurückzuführen.

Tabelle 1: Differenzen der Schallenergie- und Spitzenschalldruckpegel im Kaliber .30-06 Springfield.

Schalldämpfer	ΔL_Q^1	$\Delta L_{p,Z,peak}$
A	19,3	31,6
C	18,7	31,3

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Schallenergiepegel und ermittelte, zulässige Expositionen der Gehörschädigungsprognoseverfahren. N_1 steht hier für das AHAAH-Modell (unwarned), N_2 für das Pfander-Verfahren und N_3 für das L_{AE} -Verfahren.

Tabelle 2: Schallenergie-, Spitzenschalldruckpegel und zugelassene Expositionen im Kaliber .30-06 Springfield.

Schalldämpfer	ΔL_Q^1 [dB]	$\Delta L_{p,Z,peak}$ [dB]	N_1	N_2	N_3
A	125	135,0	6	131	1785
C	127	136,3	8	151	1815
ohne	145,8	166,6	0,6	0	-

Anhand dieser Daten ist erkennbar, dass von den Messdaten nicht auf die Gehörgefährdung geschlossen werden kann: Schalldämpfer C erzielt einen höheren Schallenergiepegel und Spitzenschalldruckpegel, jedoch sind nach allen hier vorgestellten Verfahren mehr Expositionen zulässig. Das nicht für Schießlärm entwickelte L_{AE} -Verfahren liefert unrealistisch hohe zugelassene Expositionen.

Weder das Pfander- noch das L_{AE} -Verfahren berücksichtigen die Verschiebung des Spektrums. Dies ist der Grund für die größere Anzahl zugelassener Expositionen. Das AHAAH-Modell berücksichtigt die unterschiedlichen Signalverläufe und Spektren. Der Einfluss verbauter Stahlwolle wird durch das Modell positiv berücksichtigt. Nur bei der Betrachtung des Schallenergiepegels wird der Einfluss der Richtcharakteristik berücksichtigt.

Die meisten hier vermessenen Schalldämpfer würden unter der Z-Bewertung den unteren Auslösewert der LärmVibrationsArbSchV [5] erreichen. Durch die vorgegebene C-Bewertung findet allerdings keine Auslösung statt.

Zusammenfassung und Fazit

Die DIN EN ISO 17201-1:2019:06 ist prinzipiell für die Emissionsdatenerhebung von Jagdwaffen mit zivilen Schalldämpfern anwendbar. Die Eliminierung der Bodenreflexion muss zwingend ohne Schalldämpfer erfolgen. Die Angabe der Differenz des Spitzenschalldruckpegels ist unzureichend und irreführend. Für den physikalischen Vergleich sollte der Schallenergiepegel, für den Wirksamkeitsvergleich die Gehörgefährdungsindizes herangezogen werden. Es ist demnach keine pauschale Aussage über die „Qualität“ eines Schalldämpfers möglich. Durch die C-Bewertung bei Waffenknallen und der nicht sachgerechten Anwendung des L_{AE} -Verfahrens der LärmVibrationsArbSchV können betroffene Berufsgruppen nicht ausreichend geschützt werden. Das L_{AE} -Verfahren überschätzt die zulässigen Expositionen maßgeblich.

Ausblick

In kommenden Untersuchungen soll analysiert werden, inwieweit die ermittelten Expositionen des AHAAH-Modells mit einer tatsächlichen TTS übereinstimmt. Die LärmVibrationsArbSchV sollte im Bezug auf Schießlärm auf das Schallwert-100 000-Verfahren oder, noch besser, auf das AHAAH-Modell verweisen. Des Weiteren soll der Einfluss der Real Ear Unaided Gain (REUG) auf die zugelassenen Expositionen der hier vorgestellten Gehörschädigungsprognoseverfahren analysiert werden.

Literatur

- [1] Kneubuehl, Beat P.: Ballistik: Theorie und Praxis. Springer, Berlin, 2018
- [2] Lincoln, M.: CAD-Innenansicht Hunter 55: Roedale, 2021
- [3] Pfander, F.: Das Schalltrauma, Schriftreihe Präventivmedizin - PM1. Bonn: Bundesministerium für Verteidigung, 1994. 2010
- [4] Army Research Laboratory: Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH). www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343
- [5] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen, vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261)
- [6] Rottenberger, I.: DEVA Standardverfahren: zur Ermittlung des Schalldrucks und des Vergleiches von Schalldämpfern für den jagdlichen Einsatz. Altenbecken, 2019
- [7] Trabert, P. & Goicke, S.: Messung der Wirksamkeit von Schalldämpfern im Freifeld in Abhängigkeit des Kalibers. TH Lübeck, 2019
- [8] Weber, W.: Das Schallspektrum von Knallfunken und Knallpistolen mit einem Beitrag über die Anwendungsmöglichkeiten in der elektroakustischen Meßtechnik. Akustische Zeitschrift (4), S. 377–391, 1939.
- [9] Wempen, J.: Schallausbreitung über Erdboden; Messung und Interpretation des Wellenfeldes über realen

Erdböden (Dissertation). Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 1991