

Zur Reproduzierbarkeit von quellenahen Schießlärmmessungen zur Beurteilung des Gehörschädigungsrisikos

Christian Kleinhenrich, Philipp Bechtel, Tobias Langenbacher, Carsten Hudusch, Karl-Wilhelm Hirsch

Cervus Consult GmbH, consult@cervus.de

Einleitung

Untersuchungen zeigen, dass die ausschlaggebende Kenngröße zur Beurteilung der Gehörfähigung durch hochenergetische Impulsschalle nicht allein der Spitzenschalldruck ist, sondern viele Komponenten des gesamten Schalldruckzeitsignals eine maßgebliche Rolle spielen. Zur Untersuchung der Auswirkung von Mündungsknallen von Handfeuerwaffen auf das Gehör wird häufig der Schalldruckzeitverlauf in Entfernungen größer gleich 80 cm von der Mündung an mehreren Messpositionen aufgezeichnet. Seit 2021 steht als Regelwerk dazu die ISO 17201 Teil 6 „Geräuschexposition im Nahbereich der Geräuschquelle“ zur Verfügung [1]. Für die so aufgezeichneten Signale können Gehörfähigungsprognosen anhand unterschiedlicher etablierter Verfahren berechnet und anschließend eine Anzahl unbedenklicher Schüsse abgeleitet werden. Es ist gängige Praxis, durch Wiederholung des Messvorgangs, bei ansonsten unveränderten Randbedingungen, das Vertrauensniveau der Untersuchung zu erhöhen. Waffenknalle gelten als sehr gut reproduzierbar. Allerdings ist bei Messungen zu beobachten, dass bei der realitätsnahen Versuchsdurchführung mit Schützen oder Schützinnen der Quellort zwangsläufig variiert. Im vorgestellten Beitrag werden die Auswirkungen der Variationen von Ort und Ausrichtung der Quelle auf die zu ermittelnden Gehörfähigungsprognosen diskutiert. Dabei wird insbesondere untersucht, wie robust die beiden ausgewählten Prognoseverfahren Pfander- und AHAH-Modell gegenüber derartigen Messunsicherheiten sind. Hierzu werden sowohl computergestützte als auch messtechnische Untersuchungen vorgestellt.

Schießlärmmessungen im Nahbereich

Für die Sicherheit des in einer Schießanlage beschäftigten Personals ist die Kenntnis der durch unterschiedliche Waffen und Munitionsarten hervorgerufenen Gehörschädigungsrisiken essentiell. Insbesondere das auszubildende Personal wird innerhalb eines Tages einer hohen Anzahl an gehörfähigkeitsgefährdenden Schallexpositionen ausgesetzt. Üblicherweise werden daher an festgelegten Positionen - in Abständen von etwa 80 cm bis 3 m zur Mündung - Folgen von Schalldruckzeitverläufen aufgezeichnet und im Nachgang daraus das Gehörfähigungspotenzial bestimmt. Aus diesen Untersuchungsergebnissen können wiederum unbedenkliche Schusszahlen für eine bestimmte Kombination aus Waffe, Munition, Messposition, Schießstand-Typen und Gehörschutz prognostiziert werden.

Fragestellung

Für die Aufzeichnung der Schalldruckzeitverläufe werden Mikrofone verwendet. Deren Positionierung wird hier als präzise und konstant für den gesamten Untersuchungszeitraum angenommen. Die schießende Person versucht, die Waffenmündung bei jedem Schuss an der vorgegebenen Position zu halten. Dies ist erfahrungsgemäß nur bedingt möglich und Abweichungen um einige Zentimeter können nicht ausgeschlossen werden. Zwar sind die daraus resultierenden Abweichungen der gemessenen Spitzenschalldruckpegel eher gering, jedoch ergeben sich Abweichungen in der zeitlichen Struktur der Signale, was wiederum zu veränderten Prognosen durch die eingesetzten Bewertungsverfahren führt. Dementsprechend wird im weiteren Verlauf untersucht, wie stark die prognostizierten Schusszahlen nach dem AHAH-Modell und nach Pfander variieren, wenn die Mündungsposition um wenige Zentimeter vom Soll abweicht. Dies wird innerhalb der Voruntersuchungen durch Computersimulationen und im Anschluss anhand von Messungen in einer Raumschießanlage (RSA) diskutiert.

Beurteilungsverfahren

Zur Beurteilung des Gehörschädigungsrisikos von Schussignalen werden unter anderem das Pfander-Verfahren [2] oder das AHAH-Modell (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans) [3] angewendet. Das Gehörschädigungsprognoseverfahren (Damage Risk Criteria, DRC) werden im folgenden skizziert.

Pfander-Verfahren

Das Pfander-Verfahren wurde in den 1970er Jahren auf Grundlage empirischer Untersuchungen entwickelt und basiert auf der Ermittlung des Spitzenschalldruckpegels $L_{p,peak}$ und der Wirkzeit t_w aus Schalldruckzeitverläufen von Schussignalen. Zur Ermittlung der Wirkzeit werden alle Zeitintervalle aufaddiert, in denen der Betrag des Signals den Schwellwert $L_{p,peak} - 10$ dB überschreitet. Anschließend kann nach Pfander die unbedenkliche Anzahl an Schüssen N_P wie folgt bestimmt werden:

$$N_P = \frac{10^{\frac{85 \text{ dB}}{10}} \cdot 28\,000 \text{ s} \cdot 10^{\frac{\bar{D}_k}{10}}}{10^{\frac{L_{p,peak}}{10}} \cdot t_w} \quad (1)$$

Darin wird mit \bar{D}_k der Knalldämmwert eines optionalen Gehörschutzes bezeichnet, der hier nicht Gegenstand der Untersuchungen ist.

AHAH-Modell

Das AHAH-Modell basiert auf einer umfangreichen, nicht-linearen Nachbildung des menschlichen Gehörs

durch eine elektrische Ersatzschaltung. Es ist seit 2015 Teil des MIL-STD-1474E [4] der USA. Die linear kombinierbare Ausgangsgröße wird in Auditory Risk Unit (ARU) angegeben. Es wurden die Grenzwerte 200 ARU und 500 ARU ermittelt, um anzuzeigen, ob durch ein Schussignal jeweils eine temporäre (TTS) oder eine permanente (PTS) Hörschwellenverschiebung wahrscheinlich ist. Aus einer per AHAH-Modell ermittelten Gehörfähigkeit H lassen sich die unbedenklichen Schusszahlen wie folgt angeben:

$$N_{A,TTS} = \frac{200 \text{ ARU}}{H}, \quad N_{A,PTS} = \frac{500 \text{ ARU}}{H} \quad (2)$$

Im weiteren Verlauf werden die unbedenklichen Schusszahlen nach AHAH im Modus *unwarned*, ohne Gehörschutz und anhand $N_{A,TTS}$ ermittelt.

Voruntersuchungen

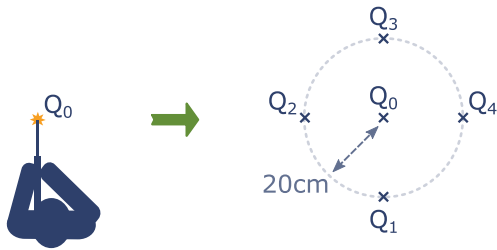


Abbildung 1: Untersuchungsanordnung

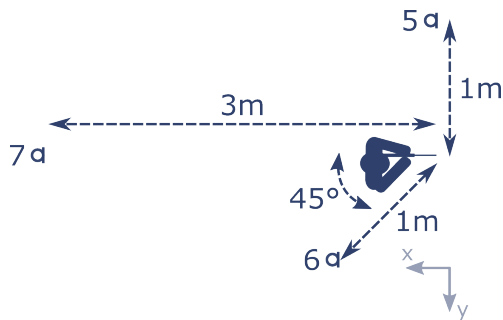


Abbildung 2: Mikrofonpositionen und Schussrichtung

Um die Abhängigkeit der prognostizierten Schusszahlen von der Mündungsposition zu untersuchen, wird die Anordnung nach Abbildung 1 innerhalb von Schallfeldsimulationen verwendet. Die Soll-Position der Mündung ist mit Q_0 , die fehlerhaften Positionen sind mit Q_1 bis Q_4 bezeichnet. Es wird angenommen, dass eine Fehlpositionierung von 20 cm in jeweils vier Richtungen vorliegt.

Randbedingungen

Die Schallfeldsimulationen erfolgen für das Halbfreifeld (draußen, nur Boden) und für einen Schießraum (RSA). Für die RSA werden eine Länge von 33 m, die Breite 12 m und eine Höhe von 3 m angenommen. Die breitbandigen Reflexionsdämpfungen der einzelnen Oberflächen können Tabelle 1 entnommen werden. Die Aufzeichnung der Schalldruckzeitsignale erfolgt an den drei Mikrofonpositionen 5, 6 und 7 nach Abbildung 2. Die Mündung befindet sich an der Position $x = 12,5 \text{ m}$ und $y = 0 \text{ m}$, also im Falle der RSA in 12,5 m Entfernung zum Ziel, mit gleichem Abstand zu beiden Seitenwänden. Die Schussrichtung ist konstant in negativer x -Richtung. Quelle und

Empfänger sitzen jeweils in 1,6 m Höhe. Als Impulsquelle dient ein Weberknall [5], welcher der Pistolenklasse des LeitGeStand [6] entspricht woraus ein Quellenergiepegel von 138 dB, ein Webradius von 0,38 m und eine Exzentrizität von 18 dB resultieren.

Tabelle 1: Breitbandige Reflexionsdämpfungen der Oberflächen

Szenario	Halbfreifeld	RSA
Boden	6 dB	1 dB
Seitenwände	-	3 dB
Decke	-	3 dB
Rückwand	-	4 dB
Geschossfang	-	10 dB

Bewertungsgröße

Aus den Schalldruckzeitverläufen an den Mikrofonpositionen 5, 6 und 7 werden die unbedenklichen Schusszahlen N nach Pfander und AHAH bestimmt. Anschließend erfolgt die Berechnung der relativen Abweichungen $d_{\text{DRC,Mic}}$ wie folgt:

$$d_{\text{DRC,Mic}}(Q_n) = \frac{N_{\text{DRC,Mic}}(Q_n) - N_{\text{DRC,Mic}}(Q_0)}{N_{\text{DRC,Mic}}(Q_0)} \quad (3)$$

Dabei repräsentieren DRC das verwendete Beurteilungsverfahren, Mic die Mikrofonpositionen, Q_n die Fehlpositionen und Q_0 die Sollposition. Die Bewertungsgröße $d_{\text{DRC,Mic}}$ beschreibt die vorzeichenbehafteten, relativen Abweichungen der prognostizierten Schusszahlen in Abhängigkeit der Fehlpositionierung der Mündung.

Ergebnisse der Voruntersuchungen

Aus den Computersimulationen für das Halbfreifeld und die RSA resultieren die relativen Abweichungen der Abbildungen 3 bis 5. Die roten Balken zeigen die Resultate des Pfander-Verfahrens, die blauen jene des AHAH-Modells an. Aus allen drei Abbildungen ist ersichtlich, dass für das Pfander-Verfahren grundsätzlich höhere relative Abweichungen vorliegen.

An Mikrofonposition 5 sind nur unmerkliche Unterschiede zwischen Halbfreifeld und RSA erkennbar, da hier offensichtlich der Direktanteil gegenüber den Reflexionen dominiert. Für beide Beurteilungsverfahren erfolgt für die fehlerhaften Positionen Q_1 und Q_2 eine Überschätzung des Gehörschädigungsrisikos, da die relativen Abweichungen negativ ausfallen. Es werden also geringere unbedenkliche Schusszahlen prognostiziert als an der Sollposition. Umgekehrt verhält es sich an Q_3 und Q_4 , da hier die Balken in positiver Richtung ausschlagen. Es werden mehr zulässige Schüsse prognostiziert als für Q_0 angemessen wären.

Mikrofonposition 6 befindet sich 45° hinter der Mündungsposition in 1 m Entfernung. Die relativen Abweichungen nach Abbildung 4 fallen hier für Halbfreifeld und RSA ähnlich aus, jedoch sind die Werte des Pfander-Verfahrens für draußen deutlich höher als für drinnen. Für Position Q_3 werden die unbedenklichen Schusszahlen

um etwas über 60 % überschätzt. Das AHAAH-Modell zeigt auch für diese Mikrofonposition deutlich geringere relative Abweichungen.

An Mikrofonposition 7 ist der Einfluss des Raumes signifikant. Dies steht im Einklang mit der Vorstellung, dass mit zunehmender Entfernung von der Mündung, die Relevanz der Reflexionen gegenüber dem Direktanteil zunimmt. Während die Prognosen des AHAAH-Modells hier nur geringe Abweichungen verursachen, sind insbesondere in der RSA die relativen Abweichungen nach dem Pfander-Verfahrens deutlich zu erkennen. Dieses Resultat unterstreicht, dass das Pfander-Verfahren kein geeignetes Verfahren zur Gehörbelastungsprognose in Raumschießanlagen ist [7].

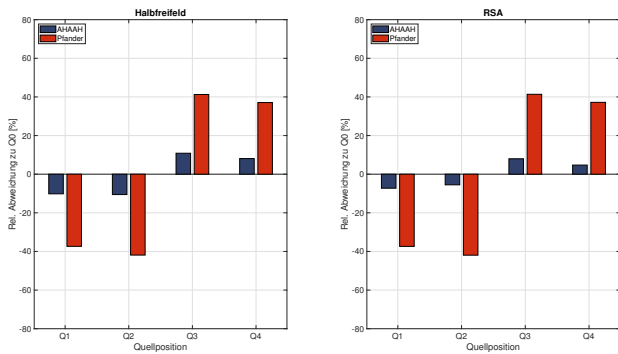


Abbildung 3: Rel. Abweichungen an Mikrofonposition 5

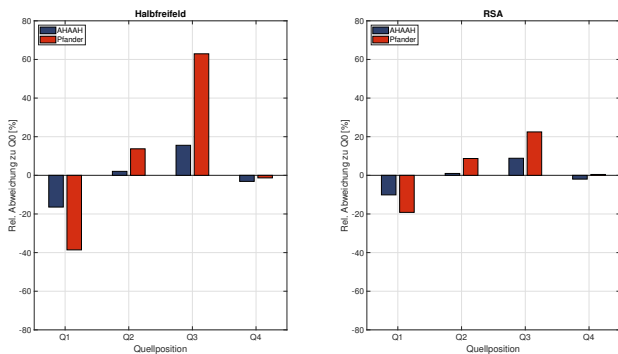


Abbildung 4: Rel. Abweichungen an Mikrofonposition 6

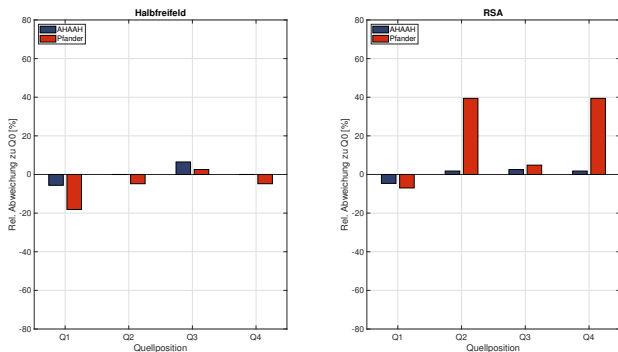


Abbildung 5: Rel. Abweichungen an Mikrofonposition 7

Fazit der Voruntersuchungen

Bereits für das Halbfreifeld ergeben sich mit dem Verfahren nach Pfander hohe relative Abweichungen von bis zu 60 % bei der Prognose zulässiger Schusszahlen, wenn die Mündungsposition um 20 cm vom Soll abweicht. Das

AHAAH-Modell dagegen ist gegenüber dieser Fehlpositionierung unempfindlicher. Es ist also zu erwarten, dass Schusszahlprognosen auf Grundlage gemessener Schall-druckzeitverläufe ein hohes Vertrauensniveau aufweisen, wenn sie mit dem AHAAH-Modell erstellt wurden. Für das Pfander-Verfahren kann ein deutlich geringeres Vertrauensniveau erwartet werden.

Messtechnische Untersuchungen

Es wurden Schießlärmmessungen in einer RSA durchgeführt, die dieselben Maße wie das Modell der Voruntersuchungen aufweist. Die Mündung befand sich ebenfalls in der Mitte der Halle gegenüber den Seitenwänden und 12,5 m vom Anlagenbezugspunkt entfernt. Die Mikrofone wurden entsprechend Abbildung 2 und in 1,6 m Höhe positioniert. Ein Schütze verwendete die Waffen und Munitionsarten nach Tabelle 2 im stehenden Anschlag. Die in der Tabelle aufgeführten Spitzenpegel wurden an Mikrofonposition 6 ermittelt.

Tabelle 2: Untersuchte Waffen

Waffe	Munition	Spitzenpegel ¹ [dB]
P30	9 mm × 19 mm	164
MP7	4,6 mm × 30 mm	164
G36K	5,56 mm × 45 mm	165
G36	5,56 mm × 45 mm	165
G28	7,62 mm × 51 mm	167

Der Schütze gab nacheinander mit jeder Waffe jeweils 10 Schuss ab, welche mit einer Pause von 10 s getrennt waren. Die Ausrichtung der Mündung - nach jedem Waffenwechsel - erfolgte mit Hilfe einer Schablone, um eine möglichst präzise Positionierung zu gewährleisten. Nach dem alle fünf Waffen vermessen wurden, wurde ein zweiter Durchlauf gestartet und die Messung wiederholt.

Auswertung

Die Schalldruckzeitverläufe der Schüsse wurden an allen drei Mikrofonpositionen aufgezeichnet und im Nachgang daraus die möglichen Schusszahlen nach Pfander und dem AHAAH-Modell für jeden Einzelschuss bestimmt. Da bei diesen Untersuchungen kein Sollwert bekannt war, wurden die relativen Abweichungen wie folgt bestimmt:

$$\delta_{\text{DRC,Mic}} = 100 \% \cdot \left| \frac{\max [N_{P_{80},\text{DRC,Mic},D_{1,2}}] - \min [N_{P_{20},\text{DRC,Mic},D_{1,2}}]}{\min [N_{P_{20},\text{DRC,Mic},D_{1,2}}]} \right| \quad (4)$$

Darin sind $N_{P_{80},\text{DRC,Mic},D_{1,2}}$ und $N_{P_{20},\text{DRC,Mic},D_{1,2}}$ jeweils die 80er- und 20er-Perzentile für das entsprechende Beurteilungsverfahren (DRC) und Mikrofon (Mic). Da in zwei Durchläufen D_1 und D_2 gemessen wurde, liegen pro Durchgang ein 80er- und ein 20er-Perzentil-Wert vor. Daraus wurden jeweils das Maximum der beiden 80er-Perzentile und das Minimum der beiden 20er-Perzentile ausgewählt.

Ergebnisse

Die ermittelten relativen Abweichungen stellen Abbildung 6 für das AHAAH-Modell und Abbildung 7 für das Pfander-Verfahren dar.

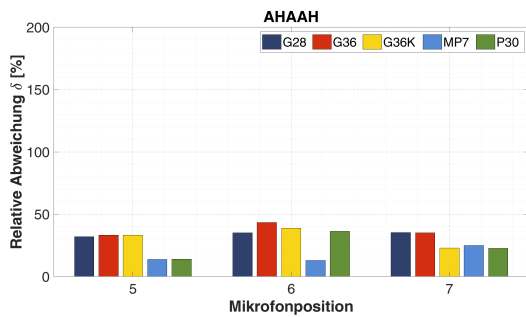


Abbildung 6: Rel. Abweichungen für das AHAAH-Modell

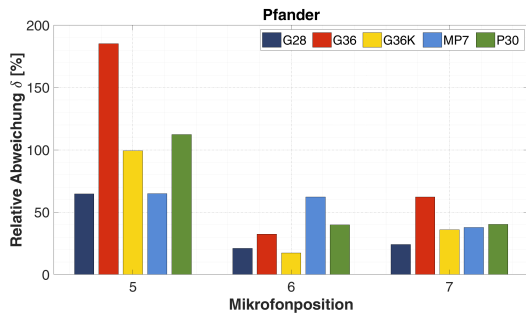


Abbildung 7: Rel. Abweichungen für das Pfander-Verfahren

Auch für die mittels Messung ermittelten Schusszahlprognosen ist ersichtlich, dass die relativen Abweichungen nach dem AHAAH-Modell deutlich geringer sind als nach dem Pfander-Verfahren. Da der Sollwert nicht bekannt ist, können an dieser Stelle lediglich Aussagen zum Vertrauensniveau der ermittelten Schusszahlen diskutiert werden. An Mikrofonposition 5 liegen die größten Unterschiede zwischen den beiden Gehörschädigungsprognoseverfahren vor. Für das G36 wurde nach dem Pfander-Verfahren beispielsweise eine relative Abweichung von annähernd 180 % ermittelt. Daraus folgt dementsprechend eine hohe Unsicherheit bzw. ein sehr geringes Vertrauensniveau für die so prognostizierten Schusszahlen.

Dieses Vertrauensniveau kann grundsätzlich nur durch eine sehr hohe Anzahl an Messwiederholungen gesteigert werden. Aus Sicherheitsgründen ist zudem die Orientierung an den geringsten Werten - also eine konservative Bewertung - für zulässige Schusszahlen anzuraten.

An den beiden übrigen Mikrofonpositionen fallen die Unterschiede zwischen AHAAH-Modell und Pfander-Verfahren geringer aus. Jedoch gilt auch dort die Empfehlung konservativer Angaben für unbedenkliche Schusszahlen nach beiden Prognoseverfahren.

Zusammenfassung und Fazit

Unter Verwendung des AHAAH-Modells und des Pfander-Verfahrens wurde verglichen, inwieweit prognostizierte Schusszahlen im Nahfeld der Mündung variieren, wenn die Mündungsposition von ihrem Soll abweicht. Dazu wurden Signale aus Computersimulation sowie gemessene Signale aus einer RSA untersucht.

Sowohl die computergestützten Voruntersuchungen als

auch die messtechnisch ermittelten Ergebnisse zeigen, dass das Pfander-Verfahren deutlich höhere Unsicherheiten bezüglich prognostizierter Schusszahlen im Nahfeld der Mündung aufweist als das AHAAH-Modell. So unterschätzt das Pfander-Verfahren bereits in den Simulationen des Halbfreifelds die Gehörbelastung um bis zu 60 %. Aus den Messungen in der RSA resultiert, dass in 1 m Entfernung neben der Mündung sehr hohe relative Abweichungen bei der Prognose nach Pfander entstehen. Somit unterliegen nach diesem Verfahren bestimmte unbedenkliche Schusszahlen einer hohen Unsicherheit und sind nicht belastbar.

Das AHAAH-Modell zeigt hingegen eine deutlich geringere Empfindlichkeit gegenüber Fehlpositionierungen der Mündung bei Schießlärmmessungen. Dementsprechend weisen Schusszahlenprognosen nach diesem Modell ein deutlich höheres Vertrauensniveau auf.

Grundsätzlich ist jedoch zu empfehlen, bei Messungen eine ausreichend hohe Anzahl an Wiederholungen aufzunehmen. Innerhalb von Computersimulationen sollten Variationen der Mündungsposition berücksichtigt werden. Für beide Fälle gilt, dass eine konservative Abschätzung der prognostizierten Schusszahlen sinnvoll ist.

Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 17201-6:2022-02, Akustik - Geräusche von Schießplätzen - Teil 6: Schalldruckmessung im Nahbereich der Geräuschquelle zur Bestimmung der Schalleexposition*, 2022.
- [2] H. Brinkmann, „Das Schalltrauma,“ in Ser. Schriftreihe Präventivmedizin - PM1. Bundesministerium für Verteidigung, 1994, Kap. Die bundeswehrspezifischen Gefahren des Knalls aus physikalischer Sicht, S. 49–78.
- [3] Army Research Laboratory, *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH)*. Adresse: www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343.
- [4] US Department of Defense, *MIL-STD-1474E: Design Criteria Standard Noise Limits*, Military Standard, 2015.
- [5] W. Weber, „Das Schallspektrum von Knallfunken und Knallpistolen mit einem Beitrag über die Anwendungsmöglichkeiten in der elektroakustischen Meßtechnik,“ *Akustische Zeitschrift*, Jg. 4, Nr. 6, S. 373–391, 1939.
- [6] Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, *Leitfaden für die Genehmigung von Standortschießanlagen - LeitGeStand*, Version 1.0 vom 03.09.2018.
- [7] S. Dantscher und A. Wolf, „Beurteilung der Gefährdung durch Schießlärm: Pfander oder LAE-Verfahren?,“ Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA), Hrsg., S. 208–211, 2019.