

Evaluation of a newly constructed Shooting Range with regard to Acoustic Safety

(Deutschsprachige Version des gleichnamigen Beitrags zur DAGA 2026)

Christian Kleinhennrich, Philipp Bechtel, Karl-Wilhelm Hirsch
Cervus Consult GmbH, kleinhennrich@cervus.de

Einleitung

Im Jahr 2022 trat die Erweiterung „Akustische Sicherheit“ [1, 2] zur Bauvorschrift der Bundeswehr in Kraft. Auf Grundlage moderner Messmethoden und geeigneter Bewertungsverfahren zielt diese Verordnung darauf ab, die Lärmbelastung für das Personal beim Schießen durch bauliche Maßnahmen zu reduzieren. Das Hauptziel ist die Minimierung zusätzlicher Schallreflexionen, die insbesondere in geschlossenen Schießständen auftreten.

Dieser Beitrag beschreibt die schrittweise Anwendung der Methodik, von den Anforderungen des Betreibers und der Identifikation geeigneter Oberflächenmaterialien bis hin zur Fertigstellung der Anlage. Darüber hinaus werden die Bewertungsergebnisse auf Grundlage von Reflexions- und Schießmessungen vorgestellt.

Grundlagen - Akustische Sicherheit

Ziel des Verfahrens ist es, die Gehörbelastung in einer neuen Anlage mit der einer bereits bekannten Anlage zu vergleichen.

Bestimmung der Qualitätszahl

Die Qualitätszahl (Q_S) ist ein Parameter zur Bestimmung der zulässigen Schussanzahl auf einem Schießstand. Sie gibt die prozentuale Anpassung der maximalen Schussanzahl an, die erforderlich ist, um im Vergleich zu einer Referenzanlage gleichwertige Gehörbelastungsbedingungen zu gewährleisten.

$$Q_S = \frac{N_S}{N_A} \quad (1)$$

Dabei ist N_A die maximale Schussanzahl auf einem Referenzschießstand und N_S die maximale Schussanzahl an einer relevanten Schützenposition im untersuchten Schießstand. Als Referenz dient in der Regel ein offener Schießstand mit geneigten Seitenwänden. Die Qualitätszahl kann entweder durch Prognose oder durch Messung ermittelt werden, wobei sowohl N_S als auch N_A aus berechneten oder gemessenen Schalldruck-Zeitverläufen mithilfe des AHAH-Modells [3] abgeleitet werden.

Belastungsklassen

Gemäß Tabelle 1 wird die Qualitätszahl Q_S in Belastungsklassen eingeteilt. Die Tabelle gibt die relative Schussanzahl für jede Klasse von A bis F an.

Reflexionseigenschaften

Die korrekte Berücksichtigung von Reflexionen innerhalb einer Anlage ist eine grundlegende Voraussetzung für das hier vorgestellte Verfahren. In Hallräumen ge-

Tabelle 1: Klassifizierung der Belastungsklassen.

Class	Quality Number	Relative number of shots
A	$0,9 \leq Q_S$	90 %
B	$0,7 \leq Q_S < 0,9$	70 %
C	$0,5 \leq Q_S < 0,7$	50 %
D	$0,3 \leq Q_S < 0,5$	30 %
E	$0,1 \leq Q_S < 0,3$	10 %
F	$0 \leq Q_S < 0,1$	0 %

messene Absorptionskoeffizienten liefern keine zulässigen Werte zur Bewertung von Oberflächenmaterialien im Kontext der Schallminderung in Schießanlagen [4]. Die hierfür herangezogene Norm ist DIN EN 1793-5:2018-12, die üblicherweise im Straßenbau eingesetzt wird. Zweckorientierte Vereinfachungen ermöglichten Testmessungen mit reduziertem Aufwand. Zudem sind auch Verfahren mittels Nahfeldholographie [5] zulässig.

Reflexionsklassen

Nach der Bestimmung der winkel- und frequenzabhängigen Reflexionseigenschaften werden die Wand- und Deckensysteme gemäß Abbildung 1 in sogenannte Reflexionsklassen eingeteilt. Zur Erfüllung einer bestimmten Reflexionsklasse müssen die Werte in jedem Terzband zwischen 500 Hz und 4 kHz unterhalb der entsprechenden horizontalen Kurven in Abbildung 1 liegen. Beispielsweise darf ein Wandsystem zur Erfüllung der Reflexionsklasse RK_{AS6} im Frequenzbereich von 1 kHz bis 4 kHz einen Reflexionskoeffizienten von maximal 0,5 aufweisen. Unterhalb von 1 kHz sind die Anforderungen niedriger, da dieser Frequenzbereich hinsichtlich der Gehörgefährdung weniger kritisch erachtet wird.

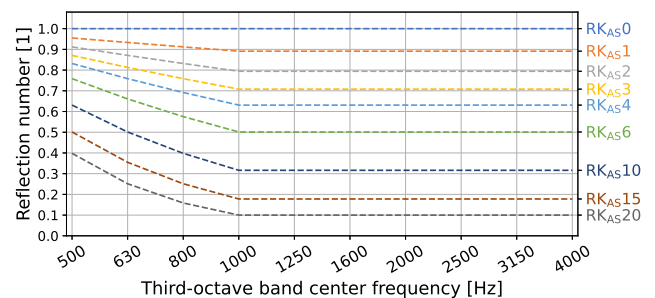


Abbildung 1: Terzbandabhängige Reflexionswerte der Reflexionsklassen

Die Verwendung von Reflexionsklassen ermöglicht Voruntersuchungen mit realistischen Reflexionswerten. Darüber hinaus können mit diesen Klassen produktneutrale akustische Anforderungen an Oberflächensysteme definiert werden.

Voruntersuchungen

Dieser Abschnitt beschreibt die Planungsphase einer Raumschießanlage. Nachdem die Bundeswehr den Bedarf für eine neue Anlage festgestellt hatte, lag der Fokus der Auslegung zunächst auf der vorgesehenen Nutzung, während akustische Aspekte anfangs eine untergeordnete Rolle spielten. Es wurden vorläufige Wand- und Deckensysteme mit einer maximalen Tiefe von 200 mm ausgewählt, um einen Rückprallschutz sowie grundlegende akustische Eigenschaften sicherzustellen. Nachdem die Innenabmessungen – etwa 32 m Länge, 8 m Breite und 3 m Höhe – festgelegt waren, begannen die Voruntersuchungen zu geeigneten Oberflächensystemen.

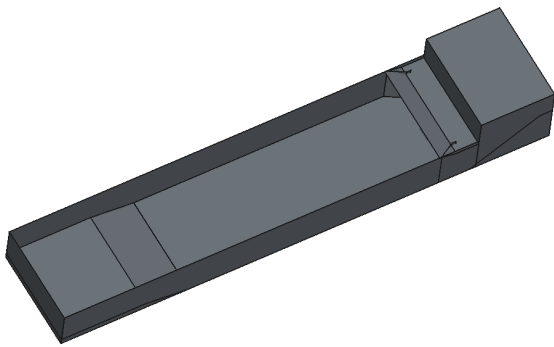


Abbildung 2: CAD-Modell der Raumschießanlage

Im Gegensatz zum finalen Modell in Abbildung 2 wurde für diese Voruntersuchungen eine vereinfachte Raumgeometrie angenommen. Die hintere Rampe wurde vernachlässigt, und der geneigte Geschossfang wurde durch eine stark absorbierende vertikale Fläche ersetzt. Anschließend wurden breitbandige Reflexionsklassen auf alle Oberflächen angewendet. Beispielsweise wurde der Boden auf RK_{AS0} gesetzt. Dies blieb aufgrund anderer baulicher Anforderungen unverändert. Die Seitenwände und die Decke stellten die einzigen variierbaren Flächen dar.

Exemplarische Personalbelastungskarten für drei Szenarien, in denen unterschiedliche Reflexionsklassen an den Seitenwänden und der Decke angewendet wurden, sind in Abbildung 3 dargestellt. Die relativen Schusszahlen lagen bei 10 %–30 % für RK_{AS3} , 30 %–50 % für RK_{AS6} und 50 % für RK_{AS10} . Dies zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen der Oberflächen-Reflexionsklasse und der Gehörbelastung. Auf Basis der Einbautiefe und der verfügbaren Systeme¹ setzte der Betreiber RK_{AS6} als Mindestanforderung und RK_{AS10} als Idealwert fest. Dementsprechend betragen die prognostizierten relativen Schusszahlen im fertiggestellten Schießstand 30 %–50 %.

¹Im Jahr 2021 erreichten kommerziell verfügbare Systeme, die die übrigen Anforderungen erfüllten, maximal RK_{AS3} .

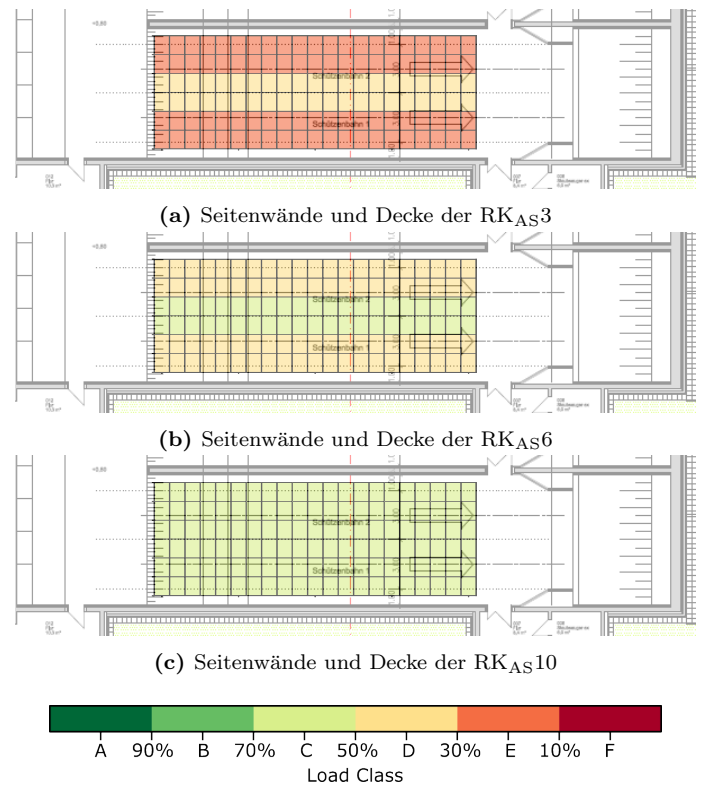


Abbildung 3: Personalbelastungskarten aus den Voruntersuchungen als Draufsichtprojektionen. Gewehr als Waffenklasse und $P_{B,2}$ als Bewertungsposition

Wettbewerblicher Dialog

Auf Grundlage dieser Anforderungen wurde im Jahr 2021 ein wettbewerblicher Dialog gestartet. In diesem Vergaberechtlich konformen Verfahren entwickelten Auftraggeber und Hersteller gemeinsam ein Produkt. Nach der ersten Phase verblieb nur noch ein Hersteller, der mit der Entwicklung eines Systems begann, das die Anforderungen der RK_{AS6} erfüllte.

Erste akustische Untersuchungen erfolgten an Einzelmaterialien mithilfe eines auf Nahfeldholographie basierenden Mikrofonarray-Verfahren [5]. Auf diese Art wurden die Reflexionsparameter für 1 m^2 -Proben bestimmt. Die Materialien wurden zu Schichtsystemen kombiniert und solange erneut vermessen, bis das finale System feststand. Anschließend wurde ein Prototyp mit den Abmessungen $3,6 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ aufgebaut und sowohl mit dem Mikrofonarray als auch nach DIN EN 1793-5 getestet. Die Reflexionswerte sind in Abbildung 4 dargestellt. Nachdem das System die Anforderungen der RK_{AS6} sowie alle weiteren schießtechnischen Prüfungen erfüllte, war der wettbewerbliche Dialog im Sommer 2022 abgeschlossen.

Abnahmemessungen

Ende 2024 waren die akustischen Oberflächensysteme installiert und wurden mit einer auf Nahfeldholographie basierenden Messsonde – einer Weiterentwicklung des Mikrofonarrays – beprobt. Die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse („Installed, Measurementprobe“) bestätigen, dass das System die Anforderungen der RK_{AS6} erfüllt. Der Vergleich mit den Prototypmessungen sowie zwi-

schen den verschiedenen Messverfahren zeigt eine hohe Übereinstimmung.

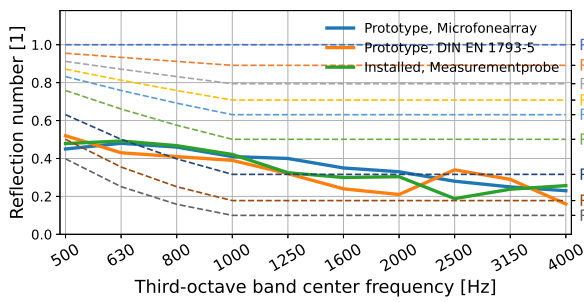


Abbildung 4: Am Prototyp und in der fertiggestellten Anlage gemessene Reflexionskoeffizienten

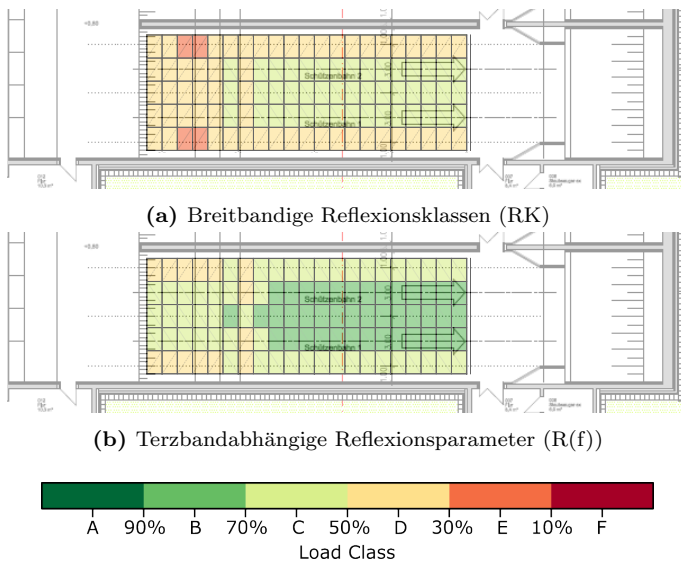


Abbildung 5: Personalbelastungskarten mit breitbandigen Reflexionsklassen und terzbandabhängigen Parametern als Draufsichtprojektionen. Pistole² als Waffenklasse und P_{B,2} als Bewertungsposition

Neben den Abnahmemessungen wurden die Reflexionseigenschaften der Rückwand, die vollständig aus Lüftungsgittern besteht, sowie der akustische Einfluss der deckenmontierten Leuchten untersucht. Unter Verwendung dieser sowie weiterer vor Ort gemessener terzbandabhängiger Reflexionswerte wurden die in den Vorberechnungen ermittelten Personalbelastungskarten verfeinert. Das CAD-Modell in Abbildung 2 wurde detailliert simuliert, einschließlich der hinteren Rampe, des geeigneten Geschossfangs sowie der Türen.

Über die Reflexionsparameter hinaus können auch weitere Simulationsgrößen – wie beispielsweise das Quellmodell oder die Mündungshöhe – angepasst werden, wobei jede Variation eine eigene Personalbelastungskarte erzeugt. Diese Studie betrachtet zwei Varianten, dargestellt in Abbildung 5, die sich ausschließlich in den Oberflächen-Reflexionseigenschaften unterscheiden: breitbandige versus terzbandabhängige Parameter. Die Bewer-

²Im Laufe der Jahre wurde das Standard-Quellmodell von der Gewehrklasse auf die konservativere Pistolenklasse geändert.

tung dieser Varianten erfolgt im Abschnitt „Auswertung“ durch Vergleich mit Schallsignalmessungen in Abbildung 7.

Schießsignalmessungen

Bis November 2025 war die Anlage vollständig fertiggestellt und für Schießmessungen bereit. Diese Untersuchungen dienten dazu zu überprüfen, ob die zuvor berechneten Qualitätszahlen und relativen Schusszahlen tatsächlich erreicht wurden.

Das Verfahren der Akustischen Sicherheit definiert feste Schützen- und Mikrofonpositionen. Für die Raumschießanlage wurden sechs relevante Schützenpositionen³ berücksichtigt. Zusätzlich zu den zwei primären Mikrofonpositionen (P_{B,1} und P_{B,2}) wurden vier weitere Messpunkte ergänzt. Siehe Abbildung 6. .

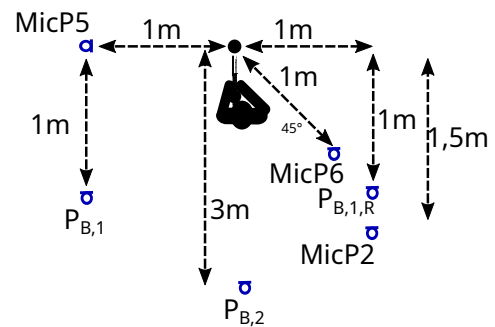


Abbildung 6: Skizze der für jede Schützenposition verwendeten Messpunkte

An jeder Schützenposition wurden eine Pistole (P), eine Maschinenpistole (MP) sowie zwei Gewehre (G1 & G2) unterschiedlichen Kalibers eingesetzt. Pro Schützenposition wurden je Waffe zehn Schüsse abgegeben und aufgezeichnet. Dieselben Waffen wurden auf einem offenen Schießstand als Freifeld-Referenz unter identischen Bedingungen an den gleichen Punkten vermessen. Die Gehörbelastungen wurden aus diesen Signalen mithilfe des AHAH-Modells berechnet, anschließend wurden die Qualitätszahlen für jede Schützenposition, Mikrofonposition und Waffe bestimmt.

Auswertung

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Qualitätszahlen mit den prognostizierten Werten verglichen. Ein Beispiel für die Messposition P_{B,1} über alle Schützenpositionen ist in Abbildung 7 dargestellt.

Die Abkürzungen Z1 und Z2 bezeichnen die vordere bzw. hintere Zone, während WL, WR und M Positionen in Wandnähe links, rechts sowie in der Raummitte darstellen. Die Qualitätszahlen aus den breitbandigen (Chaser RK) und terzbandabhängigen (Chaser R(f)) Prognosen sind als Rechtecke dargestellt. Die Oberkante entspricht dabei dem höchsten prognostizierten Wert, die Unterkante der gemäß Tabelle 1 erreichten Belastungsklasse. Marker kennzeichnen die jeweiligen Waffen, und das 20. sowie 80. Perzentil definieren die obere und untere Grenze der Streubalken.

³Jeweils eine vordere und hintere Zone links, mittig und rechts.

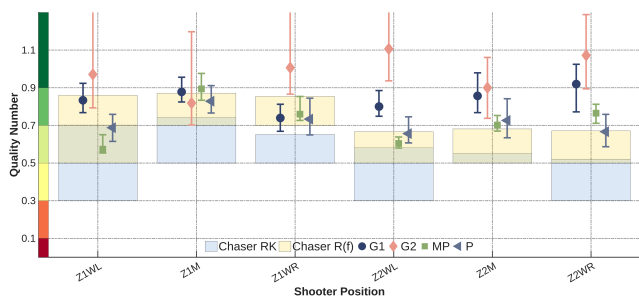


Abbildung 7: Vergleich der Qualitätszahl auf Basis gemessener und prognostizierter Werte an $P_{B,1}$ über alle Schützenpositionen

Für die Bewertung wird jede Position und Waffe als kritische Überschätzung \otimes , treffende Vorhersage \checkmark oder konservative Overprotection δ klassifiziert. Tabelle 2 zeigt ein Beispiel für die Schützenposition Z1WL gemäß Abbildung 7.

Tabelle 2: Exemplarische Bewertung der Prognosemodelle für $P_{B,1}$ und Z1WL

Weapon	G1	G2	MP	P
Chaser RK	δ	δ	\checkmark	\checkmark
Chaser R(f)	\checkmark	δ	\checkmark	\checkmark

Mit sechs Mikrofon- und Schützenpositionen ergeben sich pro Waffe 36 Datenpunkte, wodurch eine objektive Bewertung der Prognosegüte ermöglicht wird. Ein Beispiel für das Gewehr G1 ist in Tabelle 3 dargestellt.

Unter Verwendung des breitbandigen Reflexionsmodells treten keine kritischen Überschätzungen auf, jedoch zeigen 86 % der Fälle eine Overprotection, wodurch das Modell als stark konservativ einzustufen ist. Bei Verwendung der terzbandabhängigen Reflexionsparameter reduziert sich die Overprotection auf 50 %, während nur 8 % der Fälle eine kritische Überschätzung aufweisen.

Tabelle 3: Beispielhafte Zuordnung für das Gewehr G1 in der Raumschießanlage

Model	\otimes	\checkmark	δ
Chaser RK	0 (0%)	5 (14%)	31 (86%)
Chaser R(f)	3 (8%)	15 (42%)	18 (50%)

Der zulässige Anteil kritischer Überschätzungen wurde auf 10 % festgelegt. Dies berücksichtigt die dynamische Natur moderner Schießausbildungskonzepte, bei der sich sowohl Schützen als auch Ausbilder kontinuierlich bewegen. Darüber hinaus wird die Gehörbelastung über viele Schüsse hinweg kumulativ bewertet, sodass die Betrachtung eines einzelnen kritischen Falls nicht sachgerecht ist. Zusätzlich sind sowohl die Prognosemodelle als auch die Belastungskarten konservativ ausgelegt.

Unter Berücksichtigung des 10%-Schwellenwerts ist das terzbandabhängige Reflexionsmodell für die Pistole P

sowie die Gewehre G1 und G2 geeignet, sodass die in Abbildung 5b dargestellte Belastungskarte relevant ist. Für die Maschinenpistole MP werden beim terzbandabhängigen Modell in 11 % der Fälle kritische Schwellen überschritten, jedoch in keinem Fall beim breitbandigen Modell. Daher ist für die MP die Belastungskarte in Abbildung 5a anzuwenden.

Fazit

Das dargestellte Verfahren – von der Bedarfsanalyse über die Produktentwicklung bis zur fertiggestellten Anlage – liefert in jeder Phase eine akustisch relevante Bewertungsgröße. Die prognostizierten Qualitätszahlen definierten zunächst realistische Ziel-Schusszahlen, die wiederum die akustischen Mindestanforderungen an Oberflächensysteme festlegten und eine produktneutrale Beschaffung ermöglichten, die hier im Rahmen eines wettbewerblichen Dialogs durchgeführt wurde. Reflexionswerte wurden in-situ an Prototypen und an der finalen Installation gemessen, um die Einhaltung zu überwachen und zu verifizieren. Die Abnahme wurde durch Schießsignalmessungen abgeschlossen, die bestätigten, dass die erforderlichen relativen Schusszahlen erreicht wurden.

Trotz des Verfahrens der Akustischen Sicherheit verbleibt in den Prognosen eine gewisse Unsicherheit, die derzeit durch die Zulassung von 10 % kritischen Abweichungen berücksichtigt wird. Die Optimierung von Quellmodellen [6, 7] könnte die Prognosegenauigkeit weiter verbessern und Abweichungen reduzieren.

Danksagungen

Die Arbeit wurde durch BAIUDBw GSII 2 und IUDI 5 des deutschen Verteidigungsministeriums unterstützt.

Literatur

- [1] *Baufachliche Richtlinien Standortschießanlagen der Bundeswehr, Anhang 6: Anwendung Baulicher Lärmschutz für Schießanlagen der Bundeswehr – Grundlagen für die Berücksichtigung des Lärmschutzes beim Schießen mit Handwaffen.* Techn. Ber. Version 1.0. Bundesministerium der Verteidigung, 2022.
- [2] F. Hammelmann u. a. „Akustische Aspekte bei der Errichtung und Ertüchtigungen von Schießanlagen der Bundeswehr“. In: *Fortschritte der Akustik*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA). Stuttgart, März 2022.
- [3] Army Research Laboratory. *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAH)*. URL: www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343.
- [4] C. Kleinhenrich u. a. „Acoustic aspects in the construction and upgrading of military firing ranges - Part 1“. In: *INTER-NOISE24*. Hrsg. von Institute of Noise Control Engineering. Nantes, Aug. 2024.
- [5] P. Bechtel u. a. „In-situ-Messverfahren zur Bestimmung des Reflexionsfaktors komplexer Oberflächen“. In: *Fortschritte der Akustik*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA). Hannover, März 2020.
- [6] P. Bechtel u. a. „Two hybrid directivity models of muzzle blasts to describe the frequency and distance dependency“. In: *Proceedings of the 11th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum / Eu-*

- roNoise 2025*. FA2025. European Acoustics Association, Dez. 2025, S. 3117–3124. DOI: 10.61782/fa.2025.0922.
- [7] P. Bechtel u. a. „Frequency- and Angle-dependent Source Models of Muzzle Blasts close to the Gun“. In: *Proceedings of DAS—DAGA 2025*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.(DEGA). 2025, S. 798–801. ISBN: 978-3-939296-23-2. URL: https://pub.dega-akustik.de/DAS-DAGA_2025/files/upload/start/DAS-DAGA2025_proceedings_manuscripts.pdf.