

Chaser

Qualitätssicherung der Web-Anwendung zur Beurteilung des Gehörschädigungsrisikos von Schießanlagen

Christian Kleinhennrich, Philipp Bechtel, Tobias Langenbacher, Carsten Hudusch
Cervus Consult GmbH, consult@cervus.de

Einleitung

Entsprechend der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) haben technische Schutzmaßnahmen Vorrang gegenüber persönlichen [1]. Dies trifft besonders auch auf Schießanlagen zu. Um bereits während der Planung einer Anlage eine sachgerechte Prognose der zu erwartenden Akustik zu ermöglichen, wird die Web-Anwendung Chaser entwickelt. Diese berechnet die Schalldruckzeitverläufe am Ohr des Personals auf Grundlage phasentreuer Schallausbreitungsrechnungen und Integration frequenzabhängiger Reflexionsparameter. Das generierte Signal wird anschließend mit einem Gehörmodell hinsichtlich des Gefährdungsrisikos ausgewertet. So kann beispielsweise durch Variation der Reflexionseigenschaften der Oberflächen eines Raumes dessen Einfluss auf die ortsabhängige Gehörbelastung untersucht und folglich minimiert werden.

Maßstab einer Akustiksoftware ist die Praxis. In diesem Beitrag werden daher in Chaser prognostizierte Schalldruckzeitverläufe sowie deren Gehörgefährdungspotenzial mit Resultaten aus Messungen verglichen. Dazu wurden Schallausbreitungsrechnungen mit CAD-Modellen von existierenden Schießanlagen mit Chaser durchgeführt, deren Oberflächeneigenschaften zuvor akustisch vermessen wurden. In diesen Anlagen wurden ebenfalls Schussignale an maßgeblichen Betrachtungspunkten aufgezeichnet und ihre Gehörbelastungen ausgewertet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mittels Chaser sachgerechte Prognosen der Gehörbelastung möglich sind. Somit stellt diese Anwendung einen essenziellen Bestandteil zur effizienten Planung und Ertüchtigung von Schießanlagen dar.

Akustische Sicherheit

Seit Fortschreibung der baufachlichen Richtlinien der Bundeswehr (BFR) im Jahr 2022, steht deren Erweiterung „Anwendung Baulicher Lärmschutz für Schießanlagen der Bundeswehr“ zur Verfügung [2]. Das darin enthaltene Kapitel *Akustische Sicherheit* zielt darauf ab, durch bauliche Maßnahmen die zusätzliche Gehörbelastung einer Schießanlage gegenüber einer Referenzanlage zu minimieren. Letztere stellt in der Regel ein offener A-Stand ohne erhöhten Sicherheitsgrad dar. Die Referenzanlage besitzt nahezu keine relevanten Oberflächen, die zur Gehörbelastung durch zusätzliche Reflexionen beitragen. Hingegen treten in Anlagen mit erhöhtem Sicherheitsgrad und insbesondere in Raumschießanlagen deutlich mehr Reflexionen auf als im Freien. Die für die akustische Sicherheit relevanten Kenndaten der in Schießanlagen eingesetzten Waffen-, Munitions- und Gehörschützerkombinationen

liegen aber nur für offene Anlagen vor. Damit besagte Kenndaten nicht erneut für Raumschießanlagen vermessen werden müssen, wurde im Kapitel *Akustische Sicherheit* der BFR-Erweiterung „Anwendung Baulicher Lärmschutz für Schießanlagen der Bundeswehr“ ein entsprechendes Verfahren festgelegt, wodurch sachgerechte Prognosen der zusätzlichen Gehörbelastung erstellt werden können. Weitergehende Informationen sind dem DAGA-Beitrag des Jahres 2022 zu entnehmen [3].

Qualitätszahl

Die Qualitätszahl stellt die wesentliche Kenngröße des Verfahrens *Akustische Sicherheit* dar. Sie gibt an, in welchem Verhältnis die maximal zulässige Schusszahl der zu untersuchende Anlage gegenüber der Referenzanlage steht, wenn die Gehörbelastung in beiden Anlagen gleich sein soll:

$$Q_S = \frac{N_A}{N_{Ref}} = \frac{H_{Ref}}{H_A}. \quad (1)$$

N_{Ref} bezeichnet die maximale Schusszahl auf einem Referenzschießstand und N_A die auf dem zu untersuchenden Schießstand an einer maßgeblichen Schützenposition ermittelte maximale Schusszahl. H_{Ref} und H_A sind wiederum die Gehörbelastungen in den jeweiligen Anlagen. Als Referenzschießstand dient ein offener Schießstand mit Seitenwänden. Die Qualitätszahl kann sowohl durch Prognose als auch durch Messung bestimmt werden. Die dafür notwendigen Schusszahlen N_{Ref} und N_A werden aus prognostizierten oder gemessenen Schalldruckzeitverläufen mit Hilfe des AHAAH-Modells errechnet [4]. Die Qualitätszahl wird entsprechend Tabelle 1 klassiert.

Tabelle 1: Belastungsklassen

Belastungs- klasse	Q_S	Relative Schusszahl
A	0,9 bis 1	90 %
B	0,7 bis 0,9	70 %
C	0,5 bis 0,7	50 %
D	0,3 bis 0,5	30 %
E	0,1 bis 0,3	10 %
F	0 bis 0,1	0 %

Reflexionseigenschaften und Reflexionsklassen

In [3] wurde hinreichend dargestellt, weshalb die Nachhallzeit ein unzureichendes Kriterium zur Klassifizierung

akustisch wirksamer Oberflächen bei der Ertüchtigung von Schießräumen ist. Die *Akustische Sicherheit* greift daher auf das Messverfahren der DIN EN 1793-5:2018-12 mit zweckdienlichen Vereinfachungen hinsichtlich der Probengröße zurück [5]. Für die Planung einer Anlage ist somit die Kenntnis der nach diesem Verfahren ermittelten Reflexionseigenschaften aller Oberflächen notwendig. Dabei erfolgt die Zuordnung der Messergebnisse sogenannter Reflexionsklassen, die im weiteren Verlauf näher beschrieben werden. Weitere Informationen sind zudem [3] zu entnehmen.

Chaser

Für die Optimierung der akustischen Sicherheit einer Anlage entwickelt Cervus Consult die Software Chaser. Diese wird als Web-Anwendung entworfen. Aus dem gleichen Code können ebenfalls Desktop-Versionen für Windows, MacOS oder Linux erstellt werden.

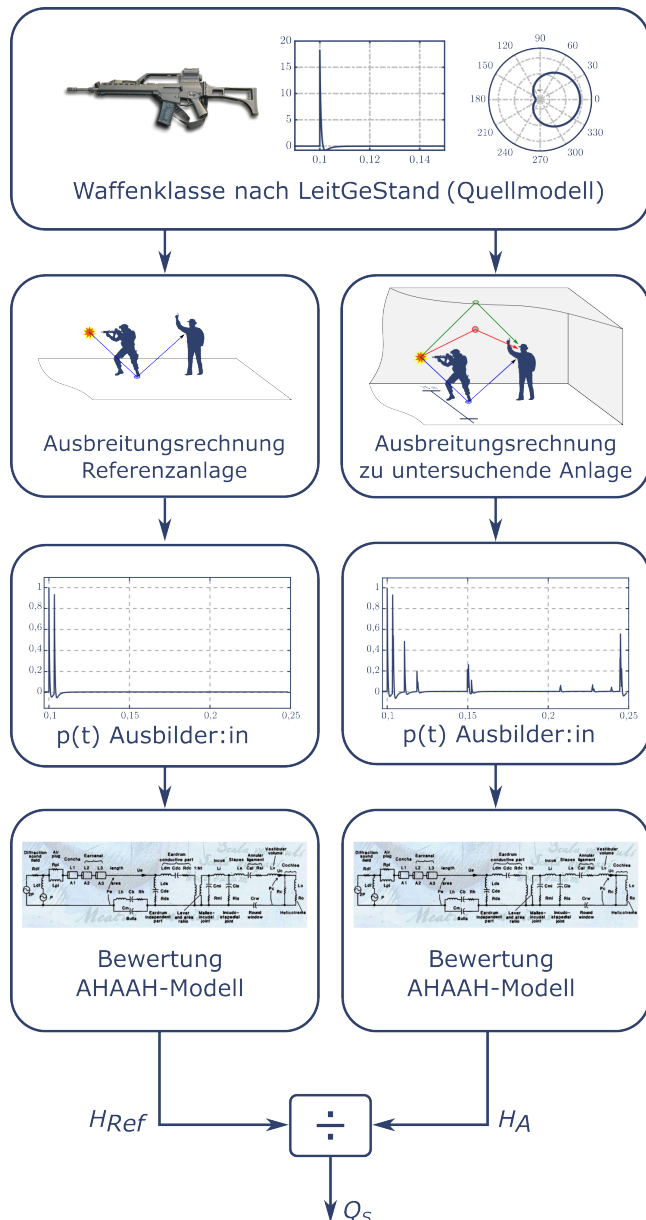


Abbildung 1: Bestimmung der Qualitätszahl in Chaser

Berechnung der Qualitätszahl

In Abbildung 1 ist die in Chaser verwendete Berechnung der Qualitätszahl schematisch dargestellt. Grundsätzlich teilt sich diese in eine Berechnung für die Referenzanlage und eine für die zu untersuchende Anlage auf. In der Abbildung wird dies jeweils durch den linken und rechten Berechnungszweig veranschaulicht. Auf Grundlage der Waffenklassen des LeitGeStand [6] werden das Weber-Modell [7] und die zugehörige Richtcharakteristik für die zu untersuchende Waffenart als Quellmodell verwendet. Anschließend erfolgt die Schallausbreitungsrechnung von der Mündung (Quelle) zum Ohr des Ausbildungspersonals (Senke). Chaser verwendet dreidimensionale CAD-Modelle der Anlagen, deren Oberflächeneigenschaften im 3D-Editor des Programms festgelegt werden. Der in der Senke aufgezeichnete Schalldruckzeitverlauf $p(t)$ stellt das Eingangssignal des AHAAH-Modells dar, welches die Gehörgefährdungsrisiken H_{Ref} und H_A für die Referenz und die zu untersuchende Anlage bestimmt. Die Qualitätszahl bildet sich anschließend aus deren Quotient. Somit sind Randparameter wie Art und Höhe der Quelle, deren Abstand zur Senke oder die Konfiguration des AHAAH-Modells in beiden Berechnungszweigen identisch. Die resultierenden Qualitätszahlen hängen daher von der Position des Personals in der zu untersuchenden Anlage und der dortigen Schallausbreitungssituation ab.

Qualitätssicherung

Zur Überprüfung der Chaser-Prognosen wurden Untersuchungen in Bestandsanlagen durchgeführt. Ziel war es, die durch Chaser prognostizierten Qualitätszahlen mit denen in den Anlagen ermittelten zu vergleichen. Die Vorgehensweise lässt sich wie folgt beschreiben:

- Vermessung der akustischen Reflexionseigenschaften der Oberflächen der Anlagen
- Aufzeichnung von Schussignalen verschiedener Waffen an maßgeblichen Beurteilungspunkten
 - Dies erfolgte sowohl in Raumschießanlagen als auch auf offenen Ständen (Referenz)
- Berechnung der Qualitätszahlen mittels Chaser-Prognosen und aus den aufgenommenen Schalldruckzeitverläufen
 - Chaser verwendet CAD-Modelle der Anlagen
 - Den Oberflächen der Modelle wurden Reflexionsklassen anhand der messtechnisch ermittelten Reflexionseigenschaften zugewiesen

Im weiteren Verlauf wird anhand einer Raumschießanlage (RSA) dargestellt, wie sich die Qualitätszahlen aus Chaser-Prognosen gegenüber messtechnisch ermittelten verhalten. Dabei erfolgt die Beschränkung auf die Waffenklasse Pistole.

Untersuchungen in einer RSA

Die untersuchte RSA besitzt einen 34m langen, 12m breiten und 3m hohen Schießraum mit rechteckigem Grundriss. Der Geschossfang ist durch



Abbildung 2: Innenraum der RSA

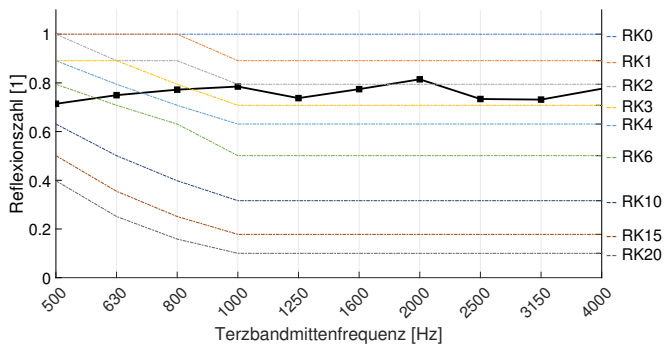


Abbildung 3: Reflexionseigenschaften der Seitenwände

einen Staubschutzvorhang vom Schießraum abgetrennt. Die Wand- und Deckenverkleidung besteht aus Blähglasgranulatplatten. Eine Lüftungsanlage bildet den rückseitigen Wandabschluss. Abbildung 2 zeigt die Innenansicht in Richtung der Zieleinrichtung der RSA.

Oberflächenverkleidungen

Im ersten Schritt wurden die Oberflächen des Raums nach DIN EN 1793-5 vermessen. Die frequenzabhängigen Reflexionseigenschaften der Seitenwände sind zwischen 500 Hz und 4 kHz in Abbildung 3 dargestellt. Auf der linken Ordinate ist die Reflexionszahl aufgeführt. Diese entspricht dem Betrag des komplexen Reflexionsfaktors. Die rechte Ordinate zeigt die Zuordnung der Reflexionsklassen RK0 bis RK20, deren Grenzen durch farbliche Linien im Plot verdeutlicht werden. Unterschreitet eine Messkurve die Grenze einer Reflexionsklasse vollständig, erfüllt das Material die entsprechende Klasse. Im Falle der untersuchten Seitenwände, kann eine frequenzabhängige Dämpfung des reflektierten Schalls von 1,8 dB bis 3 dB beobachtet werden. Das Oberflächenmaterial erfüllt somit die RK1.

Die Messergebnisse für die übrigen Oberflächen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Diese Werte wurden ebenfalls in den Chaser-Prognosen verwendet. Da durch eine zusätzliche Reflexionsmessung der Wand- und Deckenverkleidung per Nahfeldholografie eine Zuordnung der Reflexionsklasse RK3 erfolgte, wurden die Prognoserechnungen für beide Klassen RK1 und RK3 durchgeführt.

Tabelle 2: Ermittelte Reflexionsklassen

Oberfläche	Material	Reflexionsklasse
Boden	Gummi	RK1
Seitenwände	Blähglasplatten	RK1/ RK3
Decke	Blähglasplatten	RK1/ RK3
Rückwand	Lüftungsanlage	RK4
Geschossfang	Staubschutzvorhang	RK10



Abbildung 4: Betrachtete Mikrofonposition

Schießlärmmessungen

Im nächsten Schritt wurden Schießlärmmessungen an maßgeblichen Schützenpositionen entsprechend Tabelle 3 im Schießraum durchgeführt. Dabei wurden Schalldruckzeitverläufe an mehreren möglichen Positionen des Ausbildungspersonals aufgezeichnet. An jeder Schützenposition waren die Abstände der aufzeichnenden Mikrofone zur Mündung gleich. Pro Waffe und Schützenposition wurden 10 Schuss aufgezeichnet. Im weiteren Verlauf wird ausschließlich die Position hinten rechts der Mündung mit 1 m Abstand nach Abbildung 4 betrachtet.

Qualitätszahlen

Abschließend wurden die Qualitätszahlen aus den aufgezeichneten Schussignalen gebildet. Zu diesem Zweck wurden Signale aus Schussmessungen auf einem offenen A-Stand herangezogen, die als Referenzwerte dienten. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass bei den Referenzmessungen und den Messungen in der RSA der Schütze, die Waffentypen und -anbauten nicht exakt übereinstimmten.

Chaser-Prognosen

In Chaser wurde ein CAD-Modell des Schießraums und für die Oberflächen die Reflexionsklassen entsprechend Tabelle 2 verwendet. Alle Prognosen wurden an den Schützenpositionen nach Tabelle 3 durchgeführt. Dabei variierte die Mündungsposition um die exakte Position

Tabelle 3: Maßgebliche Schützenpositionen

Schützenposition	Abstand Bezugspunkt	Abstand Seitenwand
VL (vorne links)	12,5 m	2 m (links)
VM (vorne Mitte)	12,5 m	6 m
VR (vorne rechts)	12,5 m	2 m (rechts)
HL (hinten links)	25 m	2 m (links)
HM (hinten Mitte)	25 m	6 m
HR (hinten rechts)	25 m	2 m (rechts)

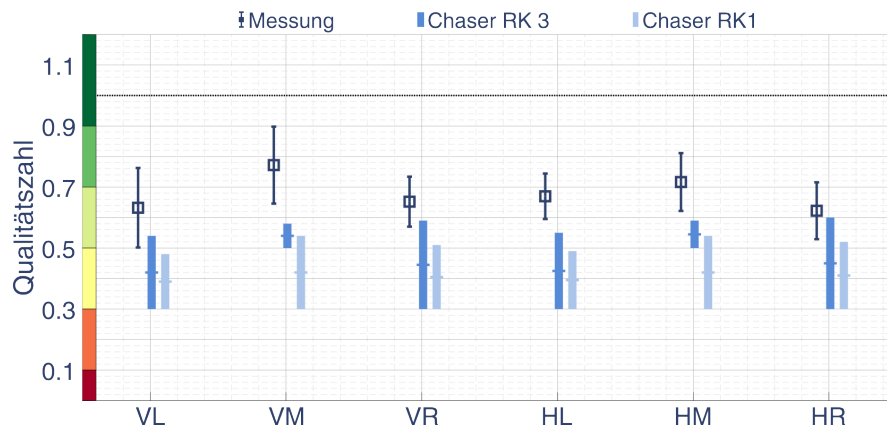


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Qualitätszahlen

herum. Wie [8] zeigt, hängen auch in Computersimulationen die aufgezeichneten Schalldruckzeitverläufe und damit auch die resultierenden Gehörbelastungswerte von der Variation des Ortes ab. Als Referenz der Chaser-Prognose diente ein offener A-Stand, dessen Schotterboden die RK6 erfüllt.

Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 5 sind sowohl die resultierenden Qualitätszahlen an den maßgeblichen Schützenpositionen für die Mikrofonposition 6 nach Messung als auch die der Chaser-Prognose zu sehen. Es wurden das 20er-, das 50er- und das 80er-Perzentil dargestellt. Danach fallen Qualitätszahlen nach Messung im Mittel eine Belastungsklasse höher aus als Qualitätszahlen aus Chaser-Prognosen. Besonders an den mittleren Schützenpositionen sind die Q_s -Werte nach Messung höher. Die in der Mitte geringere Differenz zwischen den 20er- und 80er-Perzentilen innerhalb der Chaser-Prognosen mit RK3, deuten darauf hin, dass dort die Decke akustisch dominiert.

Diskussion

Die Untersuchungen zeigen, dass Chaser eine konservative Abschätzung der Qualitätszahlen einer Anlage liefert. Dadurch können insbesondere Schießräume bereits bei der Planung hinsichtlich ihrer akustischen Sicherheit optimiert werden. Messungen in fertiggestellten Anlage führen dann in der Regel zu einem verringerten Gehörschädigungsrisiko beziehungsweise zu höheren zulässigen Schusszahlen.

In den hier durchgeführten Chaser-Prognosen wurden breitbandige Reflexionsklassen genutzt. Das bedeutet, dass für jede Terzmittenfrequenz der selbe Dämpfungsfaktor verwendet wurde. In anderen Untersuchungen hingegen wurden innerhalb der Prognosen frequenzabhängige Messwerte eingesetzt und so die Differenz in den Qualitätszahlen gegenüber der Schussmessungen deutlich verringert. In der Planungsphase ist die Verwendung von Reflexionsklassen dennoch sinnvoll, da auf diesem Wege Mindestanforderungen an die Wand- und Deckenverkleidungen festgelegt werden können. Bei der Auswahl bestimmter Produkte ist die Verwendung gemessener, frequenzabhängiger Reflexionsdaten anzuraten, um die Auswirkungen auf die Qualitätszahlen unter-

suchen und vergleichen zu können.

Abschließend sei darauf hinzuweisen, dass es Abweichungen zwischen den Messungen in der RSA und auf dem offenen A-Stand gab, deren Einfluss auf die Qualitätszahlen nach Messung unklar sind.

Die Web-Anwendung Chaser stellt somit ein zuverlässiges Werkzeug zur Optimierung der baulichen Maßnahmen hinsichtlich der akustischen Sicherheit von Schießstätten dar.

Literatur

- [1] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen*, vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261).
- [2] „Anwendung Baulicher Lärmschutz für Schießanlagen der Bundeswehr - Grundlagen für die Berücksichtigung des Lärmschutzes beim Schießen mit Handwaffen,“ Bundesministerium der Verteidigung, Techn. Ber. Version 1.0, 2022.
- [3] F. Hammelmann u. a., „Akustische Aspekte bei der Errichtung und Ertüchtigungen von Schießanlagen der Bundeswehr,“ in *Fortschritte der Akustik*, Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA), Hrsg., Stuttgart, März 2022.
- [4] Army Research Laboratory, *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHA AH)*. Adresse: www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343.
- [5] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 1793-5:2018-12: Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 5: Produktspezifische Merkmale – In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern*, Norm, 2018.
- [6] Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, *Leitfaden für die Genehmigung von Standortschießanlagen - LeitGeStand*, Version 1.0 vom 03.09.2018.
- [7] 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.
- [8] C. Kleinhenrich u. a., „Zur Reproduzierbarkeit von quellenahen Schießlärmmessungen zur Beurteilung des Gehörschädigungsrisikos,“ in *Fortschritte der Akustik*, Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA), Hrsg., Stuttgart, März 2022.