

Schießlärm & Gehörschädigungsprognoseverfahren

Gehörschützermodelle und ihr Einfluss auf Schusszahlprognosen

Philipp Bechtel, Marten Humberg, Carsten Hudasch, Tobias Langenbacher und Christian Kleinhenrich

Cervus Consult GmbH, consult@cervus.de

Einleitung

Das Gehörschädigungsrisiko von Schießlärm in Mündungsnähe hängt signifikant von dem verwendeten Gehörschützer ab. Um dieses Risiko prognostizieren zu können, werden Gehörschädigungsprognoseverfahren (*Damage Risk Criteria, DRC*) wie z.B. das Pfander-, L_{AE} -Verfahren oder das AHA AH-Modell benötigt. Aus dem prognostizierten Gehörschädigungsrisiko kann anschließend eine Anzahl möglicher Schüsse abgeleitet werden, bei der die betrachtete Person keine Gehörschädigungen befürchten muss. Die eingangs genannten DRCs verfügen jeweils über eigene Rechenmodelle zur Berücksichtigung von Gehörschützern, welche einen erheblichen Einfluss auf die prognostizierten Schusszahlen haben.

Dementsprechend wird in diesem Beitrag zum einen die Validität der Rechenmodelle untersucht. Zum anderen wird die Sensibilität der gängigen DRCs bezüglich dieser Rechenmodelle diskutiert.

Gehörschädigungsprognoseverfahren

In diesem Abschnitt werden die betrachteten DRCs und die dazu gehörigen Rechenmodelle für den Gehörschutz eingeführt.

• Pfander-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 D_{mf} 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_{AE} -Verfahren

Das L_{AE} -Verfahren ist nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [2] (LärmVibrationsArbSchV) definiert. Für mündungsnahen Schießlärm müssen die beiden oberen Auslöswerte für den Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,sh} \leq 85 \text{ dB}$ 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.

$$N_L \leq \frac{T_e}{s} \cdot 10^{\frac{L_{EX,sh} - L_{A,E}}{10}} \quad (3)$$

Als Gehörschützer-Rechenmodell wird für dieses Verfahren der M-Wert empfohlen [3]. Dieser wird nach DIN EN ISO 4869-2 bestimmt und repräsentiert die Dämmwirkung für „mittlere“ Frequenzen zwischen 1 kHz bis 2 kHz.

• AHA AH-Modell

Die Gehörschädigungsprognosen des AHA AH-Modells (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans) basieren auf einer komplexen elektrischen Ersatzschaltung [4]. Ein Gehörschützer wird ebenfalls als elektrische Schaltung modelliert, woraus eine frequenzabhängige Übertragungsfunktion resultiert. Die zur Berechnung benötigten elektrischen Parameter diverser Gehörschützer liegen mittels „HPH Atten.txt“ der AHA AH-Software bei. Im folgenden wird das Gehörschützer-Rechenmodell des AHA AH-Modells mit $HP_{AHA AH}$ abgekürzt.

Verwendete Parameter

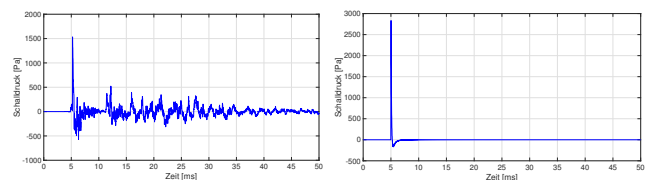
In diesem Abschnitt werden die verwendeten Testsignale sowie der betrachtete Gehörschützer vorgestellt.

• Testsignale

Als Testsignale werden drei in Mündungsnähe gemessene Schussignale einer Pistole P-1 und zweier Gewehre G-1 und G-2 sowie drei Weberknalle [5] verwendet.

Tabelle 1: Kenndaten der Testsignale

Waffenname / Weberradius R_w	Spitzenpegel	Waffenmitten- frequenz
Pistole Nr.1 (P-1)	155 dB	1 kHz
Gewehr Nr.1 (G-1)	163 dB	250 Hz
Gewehr Nr.2 (G-2)	158 dB	500 Hz
$R_w = 5 \text{ cm}$	155 dB	2 kHz
$R_w = 10 \text{ cm}$	163 dB	1 kHz
$R_w = 25 \text{ cm}$	172 dB	250 Hz



(a) Schussignal des G-1 (b) Weberknall ($R_w = 10 \text{ cm}$)

Abbildung 1: Schalldruckzeitverläufe der Testsignale

Die Kenndaten dieser Signale sind in Tabelle 1 aufgeführt und in Abbildung 1 sind zwei Schalldruckzeitverläufe exemplarische dargestellt.

• Der betrachtete Gehörschützer

Alle Untersuchungen wurden anhand des passiv betriebenen Kapselgehörschützers MSA Sordin Supreme [6] durchgeführt. Dessen M-Wert wird vom Hersteller mit $\bar{D}_M = 22 \text{ dB}$ angegeben. Der Knalldämmwert berech-

net sich mittels Datenblatt und Gleichung (2) zu $\overline{D}_k = 25,1$ dB. In der „HPD Atten.txt“ des AHAH-Modells sind zusätzlich alle benötigten Komponenten zur Berechnung der HP_{AHAH} hinterlegt.

Zusätzlich wurde die Gehörschützerübertragungsfunktion (Hearing Protector Transferfunction, HpTF) In-Situ gemessen. Abbildung 2 präsentiert die daraus resultierenden frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen.

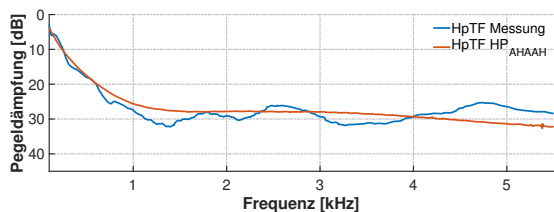
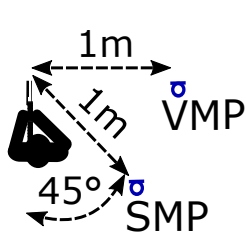


Abbildung 2: In-Situ gemessene und modellierte Übertragungsfunktion des MSA Sordin Supreme

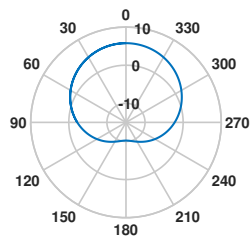
Der M-Wert und Knalldämmwert entsprechen in Abbildung 2 jeweils einer horizontalen Linie, deren Pegeldämpfung frequenzunabhängig 22 dB bzw. 25,1 dB betragen würde.

Validierung der HpTF

In diesem Abschnitt wird die Qualität der In-Situ gemessenen HpTF diskutiert. Es wird untersucht ob mit dieser und einem Freifeld-Waffenknall das Schussignal unter dem Gehörschützer sachgerecht reproduziert werden kann.



(a) Messpunkte



(b) Richtwirkmaß D_I [7]

Hierzu sind in Abbildung 3a zwei mündungsnahe Messpunkte dargestellt. Der Abstand dieser Messpunkte zur Waffenmündung beträgt jeweils 1 m, wobei der Abstand des Schützenohres je nach Lauflänge der Waffe 50 cm bis 70 cm beträgt. Hieraus resultiert aufgrund der geometrischen Ausbreitungsdämpfung $A_{div,rel}$ ein Pegelzuschlag von 3 dB bis 6 dB am Ohr des Schützen im Vergleich zu den Messpunkten. Unter Berücksichtigung des Richtwirkmaßes einer Waffe $D_{I,rel}$ nach LeitGeStand [7] ergeben sich Pegelzuschläge für die Messpunkte gegenüber dem Schützenohr von 1,6 dB bis 9,0 dB, je Abstrahlwinkel und Waffenklasse. In Tabelle 2 sind die gesamten Pegelzuschläge ΔL je Messpunkt aufgeführt.

Aus den Pegelzuschlägen resultiert:

- Der Pegel am vorderen Messpunkt ist stets größer gleich dem am Schützenohr.
- Der Pegel am Standardmesspunkt ist durchgängig geringer als an den anderen beiden Positionen.

Tabelle 2: Pegelzuschläge ΔL der Messpunkte gegenüber des Schützenohres

	Vorderer Messpunkt (VMP)	Standardmesspunkt (SMP)
$D_{I,rel}$	6 dB bis 9,0 dB	1,6 dB bis 2,6 dB
$A_{div,rel}$	-6 dB bis -3 dB	
ΔL	0 dB bis 6 dB	-4,4 dB bis -0,4 dB

Da das Gehörschädigungsrisiko bei ähnlichem Signalverlauf und -spektrum in erster Näherung proportional zum Pegel ist, kann Lemma 1 aufgestellt werden.

Lemma 1 *Das Gehörschädigungsrisiko, welches aus einem unter einem Gehörschützer gemessenen Waffenknall resultiert, ist geringer als jenes, welches an dem vorderen Messpunkt gemessen und anschließend mit der HpTF des Gehörschützers gefaltet wurde. Analog hierzu muss das am Standardmesspunkt bestimmte Gehörschädigungsrisiko geringer als am Schützenohr sein.*

Erfüllen Messergebnisse Lemma 1, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass die gemessene HpTF den spektralen Einfluss des Gehörschützers für mündungsnahen Schießlärm realitätsnah abbildet.

Validierung der gemessenen HpTF

Auf dieser Grundlage wird die Qualität der gemessenen HpTF des MSA Sordin Supreme (Abbildung 2) nach Lemma 1 anhand von Messergebnissen bestimmt. Hierzu wird die Bewertungsgröße der relativen Abweichungen $\delta_{rel,P}$, in Abhängigkeit der Waffe W , des Gehörschädigungsprognoseverfahrens DRC und des Messpunktes P nach Gleichung (4) definiert¹.

$$\delta_{rel,P}(W, DRC) = \frac{N_{ear}(W, DRC) - N_P(W, DRC)}{N_{ear}(W, DRC)} \cdot 100\% \quad (4)$$

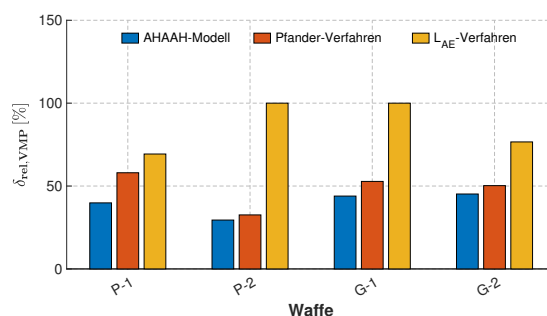


Abbildung 4: Relative Abweichungen vorderer Messpunkt

N_{ear} repräsentiert die prognostizierten Schusszahlen am Ohr des Schützen und N_P die am jeweiligen Messpunkt. Die so bestimmten relativen Schusszahlabweichungen sind in Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass die relativen Abweichungen am vorderen Messpunkt stets positiv sind. Am Standardmesspunkt nach Abbildung 5 fällt $\delta_{rel,SMP}$ hingegen durchgängig negativ aus. Somit werden die Anforder-

¹Die Resultate des L_{AE} -Verfahrens sind nur bedingt belastbar, da es kein stetiges Verfahren ist.

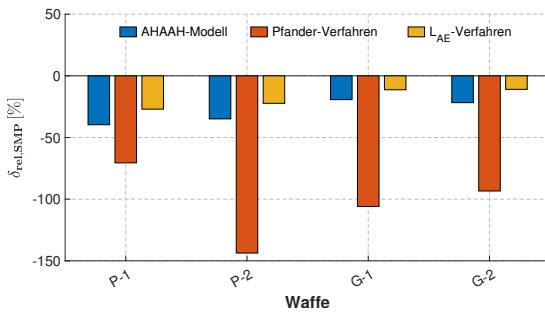


Abbildung 5: Relative Abweichungen Standardmesspunkt

rungen nach Lemma 1 erfüllt und die mittels HpTF bestimmten Schalldruckzeitverläufe können als realitätsnah und sachgerecht angesehen werden.

Referenz-Schusszahlen und Modell

Nachdem alle Hilfsgrößen eingeführt wurden und gezeigt werden konnte, dass die gemessene HpTF des MSA Sordin Supreme einer sachgerechten Referenz entspricht, wird in diesem Abschnitt die Bewertungsgröße der Gehörschützermodelle - die relative Abweichung $\delta_{rel,HPM}$ - und deren Herleitung mit Hilfe des Verlaufsdiagramms aus Abbildung 6 eingeführt.

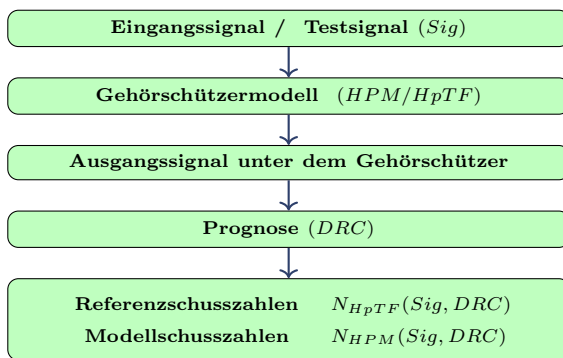


Abbildung 6: Verlaufsdiagramm Schusszahlbestimmung

Zur Berechnung der relativen Abweichungen werden die prognostizierten Schusszahlen N_{HPM} des jeweiligen Gehörschützer-Rechenmodells HPM , in Abhängigkeit des Testsignals Sig und Prognoseverfahrens DRC , benötigt. Hierzu wird das jeweilige Gehörschützer-Rechenmodell auf das Testsignal angewendet, woraus das Ausgangssignal am Ohrkanaleingang resultiert. Für den Knalldämmwert sowie den M-Wert entspricht dies einer Multiplikation des Schalldruckzeitsignals mit dem Dämpfungsfaktor. Die Ausgangssignale des HP_{AHAAH} werden durch Faltung des Testsignals mit der Übertragungsfunktion bestimmt. Für jedes Gehörschützer-Rechenmodell liegen nun sechs Ausgangssignale vor. Im nächsten Schritt werden die Schusszahlen dieser Signale nach allen betrachteten Prognoseverfahren bestimmt. Somit liegen z.B. für den Knalldämmwert insgesamt 18 prognostizierte Schusszahlen vor, je sechs nach dem Pfander-Verfahren, dem L_{AE} -Verfahren und dem AHAAH-Modell.

Analog hierzu werden die Schusszahlen der gemessenen HpTF N_{HpTF} bestimmt. Die Ausgangssignale unter dem

Gehörschützer werden hier ebenfalls durch Faltung des jeweiligen Testsignals mit der gemessenen HpTF berechnet. Mit diesen Referenzschusszahlen kann anschließend nach Gleichung (5) die Berechnung der relativen Abweichung durchgeführt werden.

$$\delta_{rel,HPM}(S, DRC) = \left| \frac{N_{HpTF}(S, DRC) - N_{HPM}(S, DRC)}{N_{HpTF}(S, DRC)} \right| \cdot 100\% \quad (5)$$

Ergebnisse - Relative Abweichungen

In diesem Abschnitt werden die relativen prognostizierten Schusszahlabweichungen der untersuchten Gehörschützer-Rechenmodelle in den Abbildungen 7 bis 9 als Balkendiagramme präsentiert. Auf der Abszisse sind jeweils die sechs Testsignale und auf der Ordinate die relativen Abweichungen in Prozent abgebildet. Die Gehörschädigungsprognoseverfahren sind farblich kodiert sowie stets in der selben Reihenfolge angeordnet. Die Resultate des AHAAH-Modells sind blau und links, die des Pfander-Verfahrens rot und mittig und die des L_{AE} -Verfahrens² gelb und rechts eingefärbt bzw. orientiert.

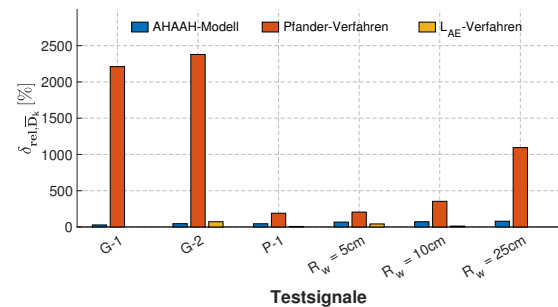


Abbildung 7: Abweichungen des Knalldämmwert-Modells

Zunächst werden die relativen Abweichungen des Knalldämmwertes ($\bar{D}_k = 25,1$ dB) nach Abbildung 7 diskutiert. Für das AHAAH-Modell sowie das L_{AE} -Verfahren betragen diese stets weniger als 100 %. In Kombination mit dem Pfander-Verfahren beträgt δ_{rel,\bar{D}_k} für die realen Schussignale der beiden Gewehre mehr als 2000 %.

Detaillierte Betrachtung der Knalldämmwert-Schusszahlen des G-2:

Das Pfander-Verfahren prognostiziert 82 Schuss für den Knall des G-2, welcher am Ohrkanaleingang unter dem MSA Sordin Supreme gemessen wurde. Wird der selbe Knall mittels Freifeldmikrofon aufgenommen und anschließend das Pfander-Verfahren mit dem Knalldämmwert des MSA Sordin Supreme angewendet, so resultieren daraus 2049 mögliche Schuss.

Dies entspricht dem 25-fachen.

Auf Basis von Abbildung 8 werden die Ergebnisse des M-Wert Gehörschützermodells ($\bar{D}_M = 22$ dB) erläutert. Dieses Modell bildet den Gehörschützer ebenfalls als Einzahlwert-Dämpfungswert ab, wobei dieser etwas geringer als der Knalldämmwert ist. Dementsprechend sind die relativen Abweichungen des Pfander-Verfahrens

²Wenn der $L_{p,C,peak}$ eines Testsignals 137 dB unter dem Gehörschützer übersteigt, so können keine belastbaren Ergebnisse für das L_{AE} -Verfahren angegeben werden.

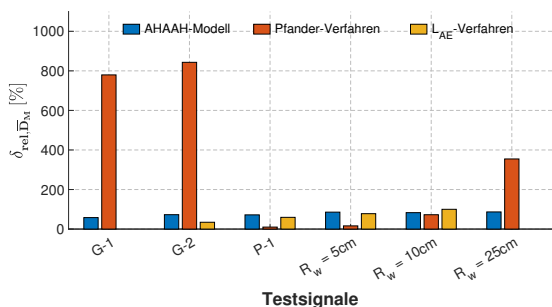


Abbildung 8: Abweichungen des M-Wert-Modells

für die beiden Gewehr-Signale auf ca. 800 % gesunken. Nach dem AHAAH-Modell und dem L_{AE}-Verfahren beträgt $\delta_{rel, \overline{D}_M}$ nicht mehr als 100 %. Des Weiteren ist für dieses Gehörschützer-Rechenmodell sowie das Knalldämmwertmodell die Tendenz ersichtlich, dass die relativen Abweichungen des Pfander-Verfahrens für tieffrequente Testsignale, deren Waffenmittenfrequenz 250 Hz bis 500 Hz betragen, besonders hoch ausfallen.

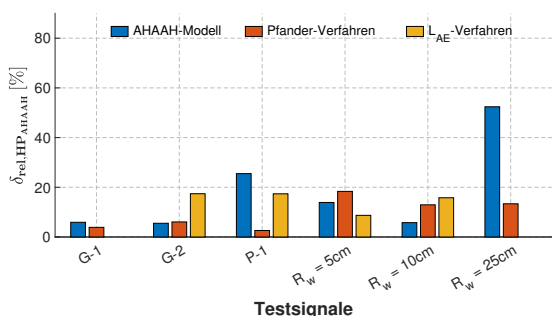


Abbildung 9: Abweichungen des HP_{AHAAH}

Abschließend werden die relativen Abweichungen des AHAAH-Gehörschützer-Rechenmodells - HP_{AHAAH} nach Abbildung 9 diskutiert. Mit diesem Gehörschützer-Rechenmodell betragen die Abweichungen für alle realen Testsignale maximal 30 %. Die höchste relative Abweichung von 52 % liegt für das AHAAH-Modell bei dem Weberknall mit R_W = 25 cm vor. In Tabelle 3 sind die maximalen relativen Abweichungen je Gehörschützer-Rechenmodell und des Prognoseverfahrens zusammengefasst.

Tabelle 3: Maximale relative Schusszahlabweichungen

Gehörschützermodell	Gehörschädigungsprognoseverfahren		
	Pfander	L _{AE}	AHAAH
Knalldämmwert	2378 %	72 %	79 %
M-Wert	843 %	100 %	87 %
HP _{AHAAH}	18 %	17 %	52 %

Fazit

Aus den Untersuchungen resultiert folgendes bezüglich der Validität der Gehörschützer-Rechenmodelle:

- Unter einem Gehörschützer gemessene Schussignale können sachgerecht mittels Freifeldwaffenknall und einer gemessener Gehörschützerübertragungsfunktion reproduziert

werden, sofern Lemma 1 erfüllt wird.

- Von den hier betrachteten Verfahren liefert nur das Gehörschützer-Rechenmodell des AHAAH-Modells eine realitätsnahe Nachbildung des MSA Sordin Supreme. Die anderen beiden Modelle - der Knalldämmwert und M-Wert - modellieren mit einem Einzahlwert eine frequenzunabhängige Übertragungsfunktion, wodurch ausschließlich die Pegelreduktion berücksichtigt wird. Weitere signifikante Aspekte des Gehörschützers wie z.B. die Tiefpassfilterung werden vernachlässigt.

Zur Sensibilität der Prognoseverfahren kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Das L_{AE}-Verfahren und das AHAAH-Modell prognostizieren mit einem stark verfälschten Gehörschützer-Rechenmodell im schlimmsten Fall eine um den Faktor 2 zu hohe Schusszahl.
- Das Pfander-Verfahren ist auf ein realitätsnahes Gehörschützer-Rechenmodell angewiesen, da ansonsten die prognostizierten Schusszahlen um den Faktor 25 zu hoch ausfallen können. Besonders kritisch ist, dass das Gehörschützer-Rechenmodell mit den größten Abweichungen - der Knalldämmwert - standardmäßig für das Pfander-Verfahren verwendet wird.

Zur Verallgemeinerung dieser Resultate bedarf es weiterführender Untersuchungen.

Literatur

- [1] 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.
- [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.
- [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] MSA Sordin, *MSA Sordin Data Sheet*. Adresse: <https://www.best4systems.co.uk/pdf-manuals/MSA-Sordin/MSA%20Sordin%20Supreme%20Pro%20Data%20Sheet.pdf>.
- [7] Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, *Leitfaden für die Genehmigung von Standortschießanlagen - LeitGeStand*, Version 1.0 vom 03.09.2018.