

## Das Pfander-Kriterium im Vergleich zum Gehörgefährdungsindex des AHAAH-Modells

Carsten Hudasch, Philipp Bechtel, Karl-Wilhelm Hirsch,  
Christian Kleinhenrich und Tobias Langenbucher

*Cervus Consult GmbH, 47877 Willich, E-Mail: consult@cervus.de*

### Einleitung

Zur Einschätzung des Gefährdungsrisikos von Impulsschall für das menschliche Gehör stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Das Pfander-Kriterium ermittelt zulässige Expositionen auf der Basis von Spitzenschalldruck und Wirkzeit eines Signalverlaufs [1]. Dagegen führt das vom amerikanischen Army Research Laboratory (ARL) entwickelte AHAAH-Modell (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans) eine Risikobewertung mit Hilfe eines elektro-akustischen Modells des menschlichen Gehörs durch. Es wurde im Jahr 2015 in den militärischen Standard MIL-STD-1474E [2] integriert. Neben dem US-Militär wird das AHAAH-Modell auch von anderen Streitkräften eingesetzt sowie bei zivilen Anwendungen zur Risikobewertung von Impulsschall genutzt.

In einem Beitrag auf der DAGA 2019 konnte gezeigt werden, dass der Gehörschadenindex des AHAAH-Modells nicht mit Einzahlwerten wie der im Arbeitsschutz gebräuchlichen Spitzen- oder Energiepegeln korreliert [3]. Vielmehr wurde dabei deutlich, dass es unter bestimmten Umständen sogar zu einer Abnahme des Gefährdungsindex trotz zunehmender Pegel kommen kann. Diese Umkehr wurde zuletzt auch von Zagadou et al. [4] beobachtet. Auch Pfander hat diesen Effekt 1991 auf Grundlage empirischer Untersuchungen beschrieben [5].

In diesem Beitrag wird der Frage nachgegangen, inwieweit eine Korrelation zwischen den Ergebnissen des AHAAH-Modells und der Bewertungsmethode nach Pfander besteht. Dazu werden praxisrelevante Signale als Eingangsgrößen verwendet.

### AHAAH-Modell

Das Modell des Army Research Laboratory basiert auf einer elektrischen Ersatzschaltung des menschlichen Gehörs und ermöglicht eine Risikobewertung von Impulsschall.

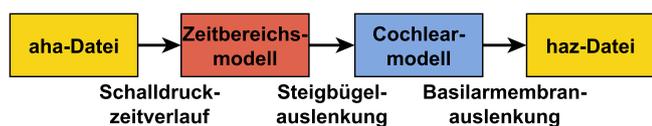


Abbildung 1: Grundelemente des AHAAH-Modells

Wie in Abbildung 1 dargestellt ist, hat das Modell einen Schalldruckzeitverlauf als Eingangsgröße. Aus dieser Größe werden im Zeitbereichsmodell bis zu 24 Differentialgleichungen mithilfe eines Runge-Kutta-Verfahrens gelöst, um die Auslenkung des Steigbügels zu bestimm-

men. Die Steigbügel auslenkung ist wiederum Eingangsgröße des nachfolgenden Cochlearmodells, das mit einer Näherungsformel die Auslenkung der Haarzellen an 23 Positionen auf der Basilarmembran berechnet. Das Maximum  $D$  dieser 23 Auslenkungen wird zuletzt quadriert und erhält die neue Einheit Auditory Risk Unit (ARU):

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

Ab einem Gehörgefährdungsindex  $H = 500$  ARU treten dauerhafte Verschiebungen der Hörschwelle (engl. PTS - Permanent Threshold Shift) auf.

### Pfander-Kriterium

Die Bewertungsmethode legt einen täglichen Energiegrenzwert von  $3646 \text{ Pa}^2 \text{ s}$  fest. Bei diesem Wert konnte bei Probanden 24 Stunden nachdem sie Knallen ausgesetzt waren keine temporäre Verschiebung der Hörschwelle (engl. TTS - Temporary Threshold Shift) nachgewiesen werden.

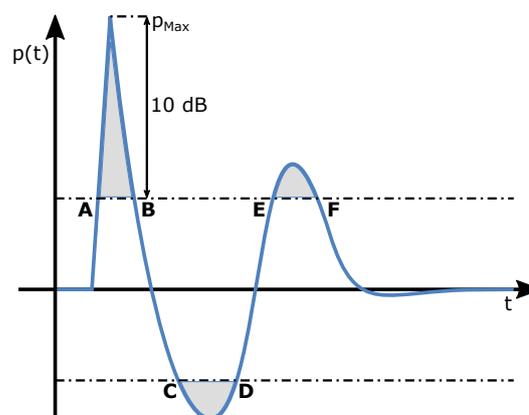


Abbildung 2: Bestimmung der Wirkzeit [1]

Um aus dem Energiegrenzwert die maximal zulässige Anzahl von Expositionen ermitteln zu können, ist zudem die Bestimmung der Wirkzeit  $t_W$  notwendig. Abbildung 2 zeigt den Schalldruckzeitverlauf eines Knalls. Von diesem Zeitverlauf werden alle Teildauern addiert, die innerhalb der 10-Dezibel-Linie relativ zum Spitzenschalldruck  $p_{\text{Max}}$  liegen:

$$t_W = \overline{AB} + \overline{CD} + \overline{EF} \quad (2)$$

Zusammen mit der nach Gleichung (2) bestimmten Wirkzeit  $t_W$  und dem Spitzenschalldruck  $p_{\text{Max}}$  kann nun die zulässige Schusszahl  $N_P$  bestimmt werden [1]:

$$N_P = \frac{3646 \text{ Pa}^2 \text{ s}}{p_{\text{Max}}^2 \cdot t_W} \quad (3)$$

Ein optionaler Gehörschutz wird in diesem Beitrag nicht angewendet und daher nicht weiter betrachtet.

### Testsignale

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen werden sowohl synthetisierte Knalle als auch eine frei verfügbare Aufnahme eines Waffenknalls als Testsignal verwendet.

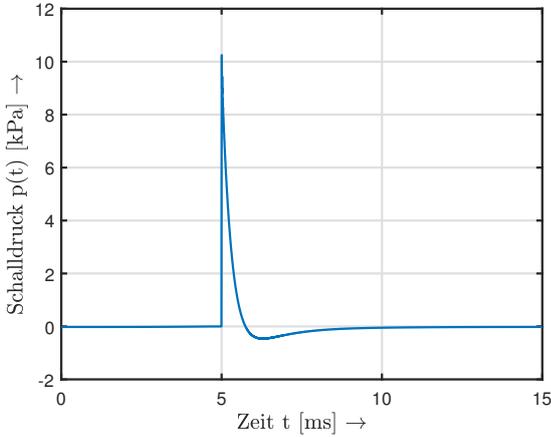


Abbildung 3: Schalldruckzeitverlauf des Weberknalls

Abbildung 3 zeigt den Schalldruckzeitverlauf eines nach dem Modell von WEBER [6] berechneten Knalls. Dieser Zeitverlauf wird durch inverse Fouriertransformation aus den von WEBER formulierten Gleichungen gewonnen. Der Hauptparameter des Modell ist der sogenannte Weberradius  $R_W$ , der sowohl den Spitzenpegel als auch die spektrale Zusammensetzung der Impulse beeinflusst. Die Radien der in diesem Beitrag verwendeten Testsignale liegen im Bereich von  $R_W = 0,1$  m bis 1 m und decken so die Mündungsknalle typischer Handfeuerwaffen ab.

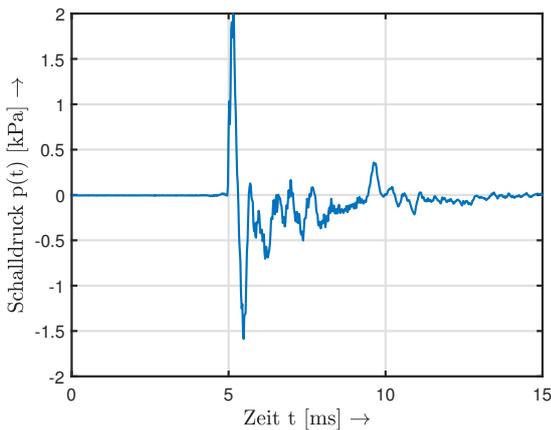


Abbildung 4: Schalldruckzeitverlauf des Waffenknalls

Bei dem in Abbildung 4 dargestellten Schalldruckzeitverlauf handelt es sich um den Mündungsknall eines M16-Gewehrs. Dieses Signal ist Teil der AHAH-Software und kann von der Internetseite des ARL [7] heruntergeladen werden. Für unsere Untersuchungen ist es so normiert, dass der Spitzenschalldruck  $p_{Max} = 2$  kPa beträgt. Alle folgenden Berechnungen wurden mithilfe eigener Implementierungen der beiden Bewertungsverfahren in der Mathematiksoftware MATLAB durchgeführt.

### Einfluss des Weberradius

In diesem Abschnitt soll der Einfluss des Weberradius der modellierten Knalle auf die beiden Bewertungsverfahren untersucht werden. Dazu wird der Radius in einem Bereich von  $R_{W1} = 0,1$  m bis  $R_{W19} = 1$  m schrittweise um jeweils  $\Delta R_W = 5$  cm erhöht.

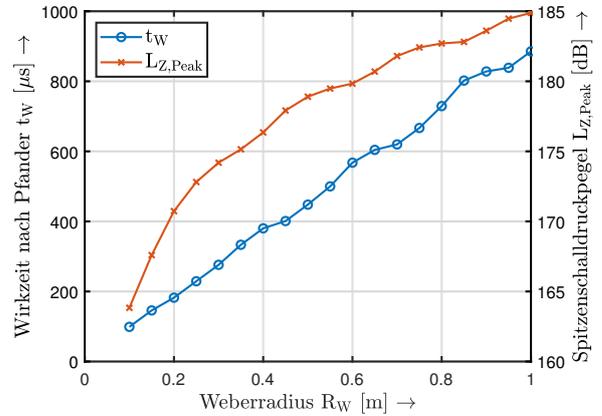


Abbildung 5: Wirkzeit und Spitzenschalldruck in Abhängigkeit des Weberradius

Abbildung 5 zeigt, dass die Wirkzeiten der untersuchten Weberknalle im Bereich zwischen  $t_{W1} = 98,95 \mu s$  und  $t_{W19} = 885,42 \mu s$  liegen. Der Anstieg der Wirkzeit verläuft in diesem Bereich nahezu linear. Dagegen steigt der unbewertete Spitzenschalldruckpegel des Weberknalls bei einer linearen Skalierung der Abszissenachse logarithmisch an und liegt im Bereich zwischen  $L_{Z,Peak1} = 163,8$  dB und  $L_{Z,Peak19} = 184,8$  dB.

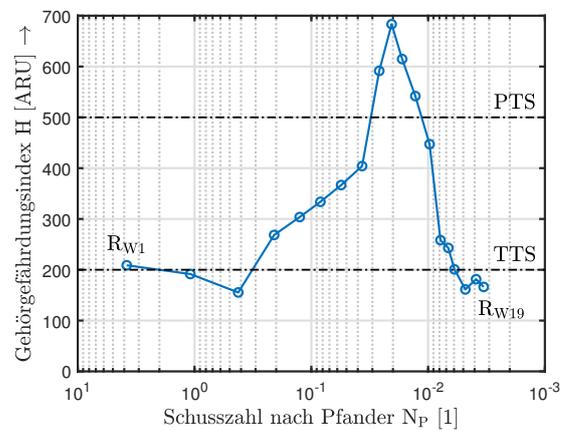


Abbildung 6: Gehörgefährdungsindex in Abhängigkeit der Schusszahl nach Pfander

Die aus Wirkzeit und Spitzenschalldruck errechneten Expositionen nach Pfander sind in Abbildung 6 zusammen mit dem Gehörgefährdungsindex  $H$  des AHAH-Modells dargestellt. Wie bereits aus Abbildung 5 deutlich wird, ergeben sich geringere Schusszahlen für steigende Weberradien aufgrund der zunehmenden Wirkzeiten und Spitzenpegeln. Zudem ergibt sich durch eine logarithmische Einteilung und Umkehr der Abszisse eine ähnliche Kurve wie in unserem Beitrag aus dem Vorjahr [3]. Wie zuvor beim Vergleich des AHAH-Modells mit dem C-Peak-Kriterium des Arbeitsschutzes kommt es ab einem gewissen Weberradius zu einer Umkehr des Anstiegs des

Gehörgefährdungsindex und es ist keine Korrelation zwischen den Beurteilungsverfahren erkennbar. In unseren Untersuchungen stieg der vom AHAH-Modell prognostizierte Gehörschadenindex bis zu einem Radius von  $R_{W10} = 0,55$  m an und fiel danach ab. Diese Abnahme der Gehörgefährdung für größere Waffen oder Sprengladungen wurde ebenfalls von Pfander beobachtet [5] und zuletzt von Zagadou et al. [4] diskutiert.

### Beeinflussung durch Zeitdifferenzen

Bisher wurden in diesem Beitrag Schallereignisse betrachtet, die einzeln auftreten. Ergänzend soll nun untersucht werden, welchen Einfluss die Zeitdifferenzen zwischen zwei Schallimpulsen haben, die sich kurz hintereinander ereignen. In der Praxis könnten solche Signale beispielsweise durch zwei zeitlich versetzte Knalle oder die Reflexionen von umliegenden Objekten hervorgerufen werden.

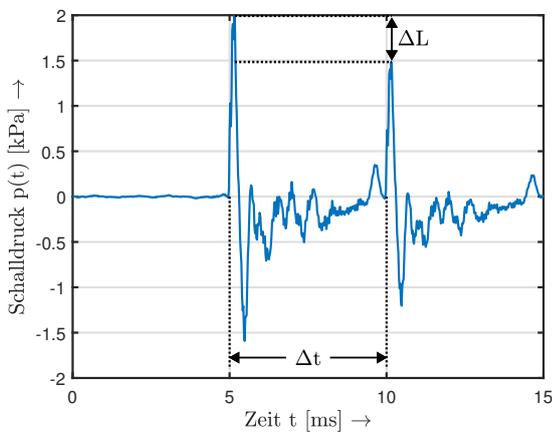


Abbildung 7: Modifiziertes Testsignal

Abbildung 7 zeigt exemplarisch ein modifiziertes Testsignal. Dieses Signal besteht zunächst aus dem bereits in Abbildung 4 dargestellten Mündungsknall des M16-Gewehrs. Allerdings wurde zu diesem Knall das gleiche Signal mit einer Dämpfung von  $\Delta L = 3$  dB und einer Verzögerung von  $\Delta t = 5$  ms hinzuaddiert.

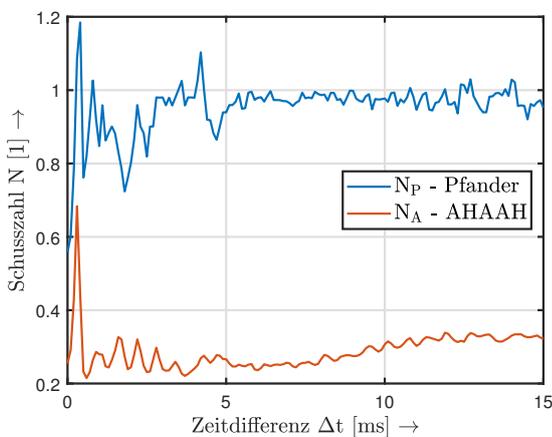


Abbildung 8: Schusszahlen in Abhängigkeit von Zeitdifferenzen

In der weiteren Untersuchung wurde die Zeitverzögerung im Bereich von  $\Delta t_{\text{Min}} = 0$  ms bis  $\Delta t_{\text{Max}} = 15$  ms mit ei-

ner Schrittweite von  $100 \mu\text{s}$  variiert. Für alle Variationen wurden anschließend sowohl die Exposition nach Pfander als auch der Gehörschadenindex des AHAH-Modells berechnet. Um eine Vergleichbarkeit aus diesen beiden Größen herzustellen, wurde die letztgenannte noch in eine Schusszahl  $N_A$  gemäß Gleichung (4) umgerechnet. Dabei wurde der Grenzwert von  $H_{\text{TTS}} = 200$  ARU für eine temporäre Verschiebung der Hörschwelle angenommen, die ebenfalls durch das Pfander-Kriterium ausgeschlossen werden soll:

$$N_A = \frac{H_{\text{TTS}}}{H} = \frac{200 \text{ ARU}}{H} \quad (4)$$

Abbildung 8 trägt die so ermittelten Werte in Abhängigkeit der Zeitdifferenz auf. Dabei sind die Werte des Pfander-Kriteriums  $N_P$  als blaue Linie und die Ergebnisse des AHAH-Modells  $N_A$  als roter Graph dargestellt. Beim Vergleich der beiden Kurven fällt auf, dass das AHAH-Modell stets kleinere Schusszahlen ermittelt als die Methode nach Pfander. Außerdem zeigen beide Bewertungsverfahren nur für Zeitdifferenzen  $\Delta t \leq 5$  ms größere Beeinflussungen. Die vom Modell des ARL prognostizierten Expositionen steigen sogar nach einer Zeitdifferenz von  $\Delta t \geq 9$  ms. Dies ist damit zu erklären, dass ab dieser Zeit der vom AHAH-Modell simulierte Stapediusreflex einsetzt und zum Tragen kommt.

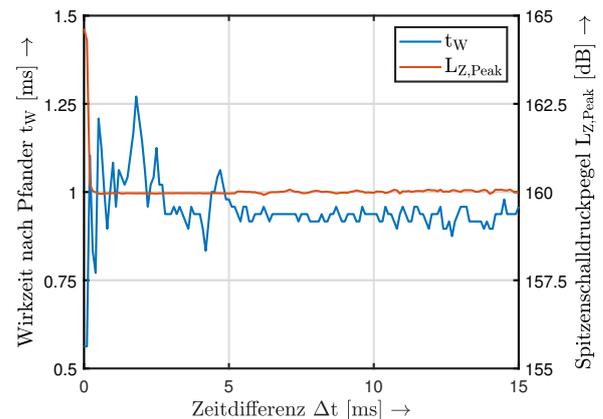


Abbildung 9: Wirkzeit und Spitzenschalldruckpegel in Abhängigkeit von Zeitdifferenzen

Für jede untersuchte Zeitdifferenz wurden zudem der Spitzenschalldruckpegel  $L_{Z,\text{Peak}}$  und die Wirkzeit  $t_W$  ermittelt. Diese Werte sind in Abbildung 9 dargestellt. Ein Vergleich mit den zuvor in Abbildung 8 gezeigten Schusszahlen nach Pfander macht deutlich, dass diese in der vorliegenden Untersuchung vor allen Dingen durch die Wirkzeit geprägt werden. Dies lässt sich leicht durch die Tatsache erklären, dass der Spitzenschalldruck abgesehen von einer maximalen Zunahme von  $\Delta L_{\text{Max}} = 4,62$  dB innerhalb der ersten Zeitverschiebungen bis  $\Delta t \leq 300 \mu\text{s}$  nahezu konstant bleibt. Auf der anderen Seite wird so aber auch deutlich, dass sich Reflexionen nur schwer durch Parameter wie den Spitzenschalldruckpegel erfassen lassen.

### Einfluss von Reflexionen

Wie bereits zuvor gezeigt, werden beide Bewertungsverfahren durch zeitversetzte Signale wie sie beispielsweise

auch von Reflexionen verursacht werden, beeinflusst. Dieser Einfluss soll nun näher betrachtet werden.

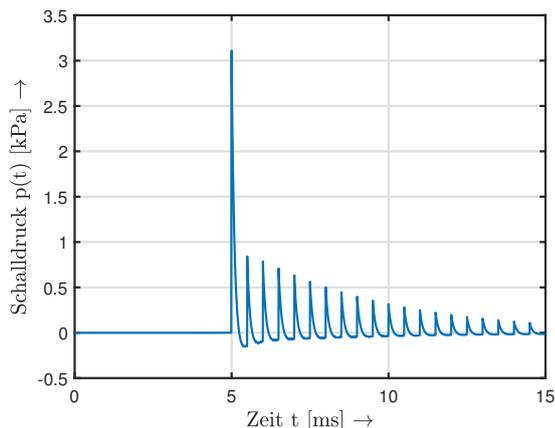


Abbildung 10: Weberknall mit künstlichen Reflexionen

Abbildung 10 zeigt einen Weberknall mit dem Radius  $R_W = 0,1$  m, dem insgesamt 19 Reflexionen hinzugefügt worden sind. Dabei besitzt die erste Reflexion einen Pegelunterschied von  $\Delta L_1 = 10$  dB und jeder weitere Beitrag eine Dämpfung von zusätzlich einem Dezibel. Zwischen zwei Reflexionen liegt jeweils ein zeitlicher Abstand von  $\Delta t = 500 \mu\text{s}$ . Aufgrund des gewählten Pegelunterschieds der Reflexionen tragen diese Anteile weder zur Wirkzeit noch zum Spitzenschalldruckpegel des Signals bei. Folglich ist es für die Bewertung nach dem Pfander-Kriterium völlig unerheblich, ob die Reflexionen existieren oder nicht. Dagegen zeigen die mithilfe des AHAAH-Modells errechneten Schusszahlen  $N_A$  in Abbildung 11 eine Abnahme mit jeder sukzessive addierten Reflexion bis eine Sättigung durch den simulierten Stapediusreflex eintritt. Außerdem liegt die mithilfe des Pfander-Kriteriums bestimmte Schusszahl  $N_P = 3,81$  um ein Vielfaches höher als die vom AHAAH-Modell prognostizierten Werte.

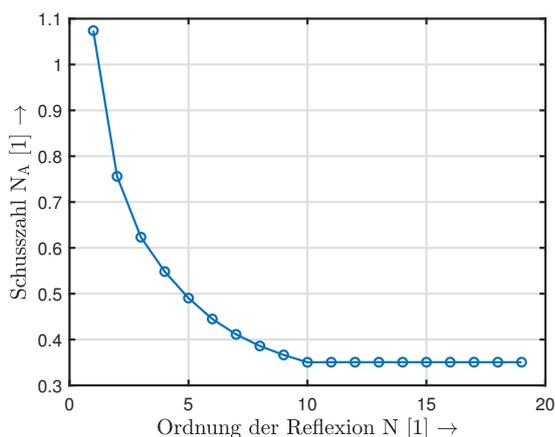


Abbildung 11: Schusszahlen nach dem AHAAH-Modell in Abhängigkeit der Reflexionsordnung

### Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die Aussagen des Pfander-Kriteriums und des AHAAH-Modells zur Kennzeichnung der Gehörgefährdung miteinander verglichen. Als Grundlage des Vergleichs dienten sowohl ein theoretischer Ex-

plosionsknall als auch ein gemessenes Signal. Die Ergebnisse der Methoden weichen deutlich voneinander ab und widersprechen sich sogar in einigen Fällen. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch bei dem Vergleich des AHAAH-Modells mit der Kennzeichnung der Gehörgefährdung durch das C-Peak-Kriterium ermittelt. Im Gegensatz zu diesem Kriterium versucht das Bewertungsverfahren nach Pfander die Signalform über den Parameter der Wirkzeit zu berücksichtigen. Allerdings wurde gezeigt, dass dies im Vergleich zum AHAAH-Modell nur bis zu einem bestimmten Grad gelingt und sich die ermittelten Expositionen teils deutlich voneinander unterscheiden. Es ist aber anzumerken, dass das Modell selbst Unsicherheiten in sich birgt. Die Festlegung von einzelnen Parametern der elektrischen Ersatzschaltung ist teilweise zu hinterfragen.

Die für diese Untersuchungen eingesetzte Implementierung des AHAAH-Modells erleichtert die Durchführung weiterer Variationsrechnungen und Verfahrensvergleichen. Mit ihrer Hilfe sollten die Werte einzelner Modellparameter verifiziert oder die Integration des Stapediusreflex näher untersucht werden. Zudem steht ein Vergleich mit dem Bewertungsverfahren nach SMOORENBURG [8] bisher noch aus.

### Literaturverzeichnis

- [1] F. Pfander, *Das Schalltrauma*, Schriftreihe Präventivmedizin - PM1. Bonn: Bundesministerium für Verteidigung, 1994.
- [2] US Department of Defense, *MIL-STD-1474E: Design Criteria Standard Noise Limits*, Militärischer Standard, 2015.
- [3] K.-W. Hirsch u. a., „Das C-Peak-Kriterium des Arbeitsschutzes im Vergleich zum Gehörgefährdungsindex des AHAAH-Modells,“ in *Fortschritte der Akustik*, Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA), Hrsg., Rostock, März 2019, S. 212.
- [4] B. Zagadou u. a., „Impulse noise injury prediction based on the cochlear energy,“ *Hearing Research*, Jg. 342, Elsevier BV, Hrsg., S. 23–38, Dez. 2016.
- [5] F. Pfander, *Untersuchungen mit dem Knallsimulator zur Entdeckung des akustisch empfindlichen Ohres mit zusammenfassender Betrachtung über die Reaktion des Hörorgans auf akustische Belastung*, Forschungsbericht aus der Wehrmedizin. Bonn: Bundesministerium für Verteidigung, 1991.
- [6] 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.
- [7] Army Research Laboratory, *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH)*. Adresse: [www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343](http://www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343).
- [8] G. F. Smoorenburg, „New Perspectives on Noise-induced Hearing Loss,“ in R. Hamernik u. a., Hrsg. Raven Press, 1982, Kap. Damage-risk criteria for impulse noise, S. 471–490.