

Das C-Peak-Kriterium des Arbeitsschutzes im Vergleich zum Gehörfähigungsindex des AHA AH-Modells

Christian Kleinhennrich, Carsten Hudach und Karl-Wilhelm Hirsch

Cervus Consult GmbH, 47877 Willich, Deutschland, Email: consult@cervus.de

Einleitung

Seit der Integration des PRICEschen AHA AH-Modells (Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans) in den Standard MIL-STD-1474E [1] kann dieses Verfahren zum Stand der Technik für die Beurteilung des Gehörschädigungsrisikos beim Hören von hochenergetischen Schallimpulsen werden.

Ausgehend von einem Schalldruckzeitverlauf am Eingang des menschlichen Gehörs, wagt das AHA AH-Modell den Versuch, die vollständige Übertragungskette bis hin zur Auslenkung der Basilarmembran in einem nicht-linearen elektroakustischen Modell abzubilden. Dieses Modell offenbart, dass mitnichten reine Spitzenpegel oder der Energiegehalt alleinige Kenngrößen einer mitunter dauerhaften Schädigung des Gehörs sein dürfen. Die Signalform spielt eine bedeutende Rolle. Es entscheiden durchaus wenige Millisekunden Unterschied im Abstand von nacheinander eintreffenden Schallimpulsen (Direktschall und Reflexion beispielsweise), ob die Schutzmechanismen des Gehörs durch den Impuls überwunden werden, oder nicht.

Es wird der Frage nachgegangen, inwiefern eine Korrelation zwischen dem C-bewerteten Spitzenpegel des Arbeitsschutzes [2] und dem durch das AHA AH-Modell prognostizierten Gehörschadenindex für ausgesuchte Signale besteht. Dabei wird mit in Betracht gezogen, dass die Messung ohrnaher, hochintensiver Schallimpulse noch eine messtechnische Herausforderung darstellt. Das Mikrofon und seine Kalibrierung bringen erheblichen Unsicherheiten ein. Es wird deshalb auch untersucht, in wie weit fehlerbehaftete Schalldruckzeitverläufe durch unsichere Kalibrierung im Hochdruckbereich, Bandbegrenzungen und Phasenverschiebungen Einfluss auf das C-Peak-Kriterium und den Gehörschadenindex haben.

Testsignale

Für die folgenden Untersuchungen wurden zum einen Schallimpulse nach dem Modell von WEBER [3] erzeugt sowie ein in der AHA AH-Software enthaltenes Testsignal genutzt. Mithilfe der von WEBER formulierten Gleichungen (1) bis (2) lassen sich die Frequenzspektren von Knallfunken und Waffenknallen hinreichend zuverlässig beschreiben:

$$P(\omega) = \frac{P_W}{\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + j \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \right] \quad (1)$$

mit

$$\alpha = \frac{3c}{R_W} \left[1 + \left(\frac{c}{\omega R_W} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

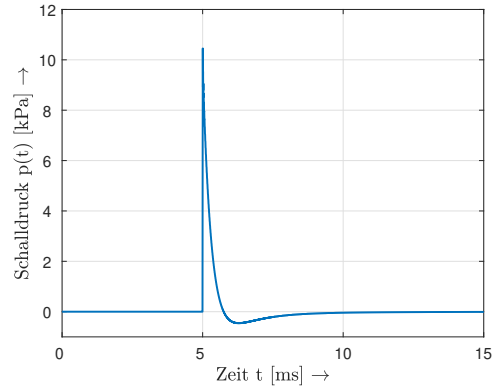


Abbildung 1: Schalldruckzeitverlauf des Weberknalls

Die beiden Gleichungen enthalten die Kreisfrequenz ω , die Schallgeschwindigkeit c sowie eine von WEBER experimentell bestimmte Konstante von $P_W = 14\,400$ Pa und dem nach ihm benannten Weberradius R_W . Mithilfe der Mathematiksoftware MATLAB wurden die Gleichungen für die weiteren Untersuchungen umgesetzt und der Zeitverlauf des Schalldruck des Knalls durch inverse Fouriertransformation bestimmt. Abbildung 1 zeigt den Verlauf eines solchen Weberknalls für einen Radius von $R_W = 0,3$ m im Abstand zur Schallquelle von $d = 1$ m.

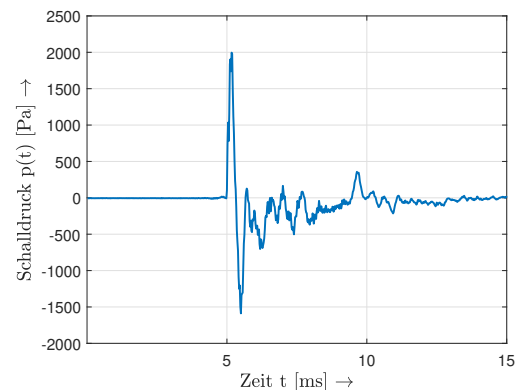


Abbildung 2: Schalldruckzeitverlauf des Mündungsknalls

Neben dem zuvor beschriebenen Signal wird zusätzlich der Waffenknall eines M16-Gewehrs genutzt, der in Abbildung 2 dargestellt ist. Das Signal ist Bestandteil der Software, die auf der Internetseite des Army Research Laboratory (ARL) [4] heruntergeladen werden kann. Im Gegensatz zum zuvor vorgestellten Weberknall enthält die Aufnahme neben Direktschall auch Reflexionen, die vermutlich auf den Einfluss des Schützen zurückzuführen sind.

Der Beginn beider Signale ist so ausgerichtet, dass eine gewisse Totzeit vor dem ersten Anstieg vergeht. Diese Ausrichtung ist für eine weitere Verarbeitung mit dem AHAH-Modell und dessen korrekter Simulation des Stapediusreflexes wichtig. Das entwickelte MATLAB-Skript ermöglicht es, die Zeitverläufe für beliebige Weberadien zu erzeugen und diese anschließend im AHAH-internen Dateiformat zu exportieren, sodass eine direkte Verarbeitung in der Analysesoftware des Army Research Laboratory stattfinden kann.

Einfluss des Weberradius

Das Webermodell geht davon aus, dass die spektrale Schalldruckamplitude $P_W = 14\,400\text{ Pa}$ gleichförmig auf der Oberfläche einer Kugel mit dem Radius R_W herrscht. In einem gegebenem Abstand nehmen deshalb sowohl der Spitzenpegel als auch der akustische Energiegehalt eines Waffenknall mit steigendem Weberradius zu. Dies gilt ebenso, wenn diese Größen mit der in der Norm DIN EN 61672-1 [5] angegebenen Bewertungskurve gefiltert werden.

Ein ähnlicher Zusammenhang lässt sich für den Gehörgefährdungsindex H des AHAH-Modells nicht finden. Zwar steigt der Index bis zu einem gewissen Weberradius, fällt dann aber wieder zu großen Radien hin ab. Dieser Umstand lässt sich möglicherweise damit erklären, dass sich die Hauptfrequenz des Weberknalls mit größerem Radius immer weiter zu niedrigeren Frequenzen hin verschiebt und sich somit auch die spektrale Zusammensetzung des Signals verändert beziehungsweise das Gehör anders auf die Anregung reagiert.

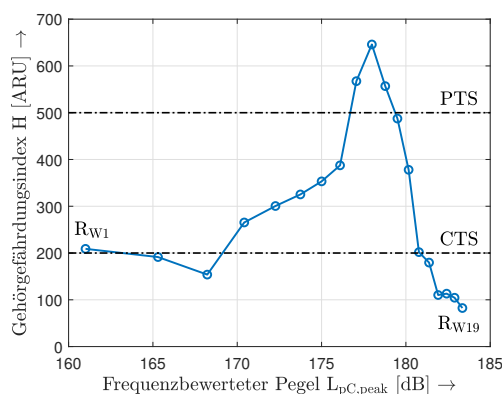


Abbildung 3: Gehörgefährdungsindex in Abhängigkeit des C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel

Abbildung 3 trägt den frequenzbewerteten Spitzenpegel $L_{pC,peak}$ gegen den Gehörgefährdungsindex auf. Bei dieser und allen folgenden Analysen mit dem AHAH-Modell wird davon ausgegangen, dass der Hörende nicht gewarnt ist und der Knall ihn somit unvorbereitet trifft. Wird der Hörende gewarnt, kann sich sein Gehör unbewusst im Voraus auf den Knall einstellen. Die Analyseergebnisse würden in diesem Fall geringer ausfallen.

Der Verlauf des Graphen beginnt bei einem Weberadius von $R_{W1} = 0,1\text{ m}$ und endet bei $R_{W19} = 1\text{ m}$. Die Schrittweite beträgt dabei jeweils $\Delta_{R_W} = 0,05\text{ m}$. Der Bereich in dem die Weberadien liegen, wurde so gewählt, dass die Mündungsknalle typischer Handfeu-

erwaffen durch das Modell abgedeckt werden. In dieser und in allen weiteren Untersuchungen, die einen Weberknall als Testsignal verwenden, beträgt der Abstand zur Schallquelle $d = 1\text{ m}$. Die beiden horizontalen gestrichelten Linien kennzeichnen zum einen eine temporäre Hörschwellenverschiebung (CTS) bei einem Wert von $H_{CTS} = 200\text{ ARU}$ und zum anderen eine permanente Hörschwellenverschiebung (PTS), die ab einem Analyseergebnis von $H_{PTS} = 500\text{ ARU}$ auftritt. Die Abbildung macht außerdem deutlich, dass kein linearer Zusammenhang zwischen dem Spitzenschalldruckpegel und dem Gehörgefährdungsindex besteht.

Beeinflussung durch Zeitdifferenzen

Um den Einfluss von Zeitdifferenzen zweier Schallereignisse auf das AHAH-Modell zu untersuchen, wird der Waffenknall des M16-Gewehrs wie folgt modifiziert. Ein um 3 dB gedämpftes Signal wird dem Originalknall mit einer vorgebbaren Zeitverzögerung zur Originalversion hinzu addiert.

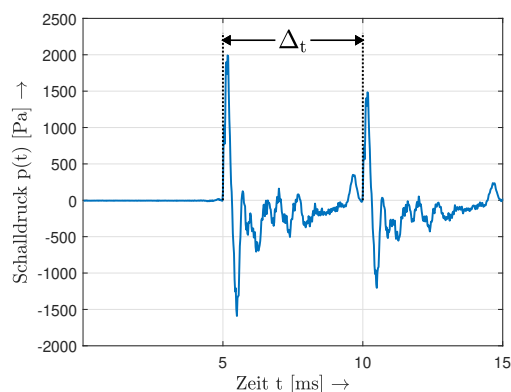


Abbildung 4: Modifiziertes Testsignal

Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein zuvor beschriebenes Signal bei dem die Zeitdifferenz $\Delta_t = 5\text{ ms}$ beträgt. Insgesamt liegen die Verzögerungen der addierten Signale für diese Untersuchung im Bereich von $\Delta_{t_1} = 1\text{ ms}$ bis $\Delta_{t_{15}} = 15\text{ ms}$ und steigen mit einer Schrittweite von $\Delta_t = 100\text{ }\mu\text{s}$ an. Nach der Erzeugung der Testsignale werden diese mit dem AHAH-Modell analysiert und die Ergebnisse ausgewertet. Abbildung 5 zeigt die Resultate für den zuvor beschriebenen Wertebereich an.

Die Abbildung macht deutlich, dass die Zeitdifferenzen erhebliche Schwankungen des Gefährdungsindex verursachen. Das ursprüngliche Analyseergebnis ist in Abbildung 5 als horizontale gestrichelte Linie gekennzeichnet und beträgt $H_{Orig} = 488\text{ ARU}$. Der minimale Wert von $H_{Min} = 281\text{ ARU}$ wird bei der Zeitdifferenz von $\Delta_{t_{Min}} = 300\text{ }\mu\text{s}$ erreicht und resultiert durch destruktive Interferenzen der überlagerten Signale. Wird das zweite Schallereignis dagegen um $\Delta_{t_{Max}} = 600\text{ }\mu\text{s}$ verzögert, steigt der Gehörgefährdungsindex auf das Maximum von $H_{Max} = 911\text{ ARU}$. Einen ähnlichen Einfluss werden reflektierende Oberflächen mit komplexen Impedanzen haben. Sie können die Phase frequenzabhängig drehen, ohne die Amplitude dabei signifikant zu beeinflussen.

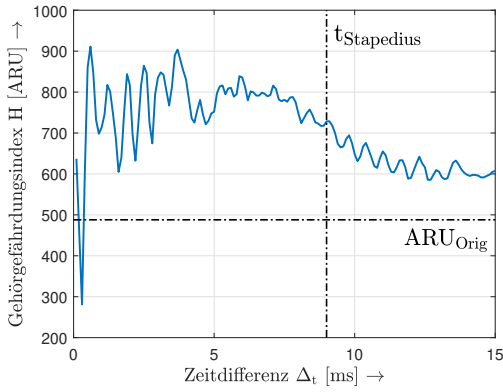


Abbildung 5: Gehörgefährdungsindex des modifizierten Testsignals in Abhängigkeit von Zeitdifferenzen

Ab einer Verschiebung von $\Delta_t > 5$ ms gehen die Schwankungen des Gefährdungsindex zurück. Sobald der verzögerte Knall im Bereich nach Einsetzen des Stapediusreflexes liegt, nimmt auch der Wert des Index insgesamt ab. Durch diesen Reflex des Mittelohres wird die Einkopplung der Bewegung des Steigbügels auf das ovale Fenster massiv verändert. Infolgedessen reduziert sich die Bewegung der Basilarmembran signifikant. Dies wird vom Gehörmodell des Army Research Laboratory berücksichtigt und fließt in das Analyseergebnis mit ein. Als Reaktionszeit für den Stapediusreflex auf den Auslöseschwellwert nimmt das AHAH-Modell einen Wert von $t_{\text{Stapedius}} = 9$ ms an, der in der Abbildung als vertikale gestrichelte Linie dargestellt ist. Für Zeitverzögerungen oberhalb von $\Delta_t > 15$ ms kommt es nur noch zu kleineren Änderungen im Analyseergebnis. Dies hat zum einen den Grund, dass der Stapediusreflex im Modell nun vollständig ausgeprägt ist und zum anderen, dass sich die Signale weniger stark überlappen und Interferenzen kaum noch auftreten.

Tabelle 1: Vergleich von Pegeln und Gefährdungsindex

Δ_t	$L_{pC, \text{peak}}$	$L_{E, A}$	H
–	159,8 dB	124,2 dB	488 ARU
300 μs	160,1 dB	123,1 dB	281 ARU
600 μs	159,9 dB	126,6 dB	911 ARU

Tabelle 1 ergänzt die zuvor beschriebenen Messergebnisse um einen jeweils frequenzbewerteten Schalldruck- sowie Expositionspegel. Wie zu erkennen ist, geben die Pegelwerte die großen Abweichungen des Gefährdungsindex nicht wieder. Besonders der C-bewertete Spitzenschalldruckpegel verändert sich gegenüber der relativen Zunahme des Gehörgefährdungsindex von +89,7% um nur ein Zehntel eines Dezibels.

Einfluss der Messkette

Am Anfang einer elektroakustischen Messkette steht in der Regel ein Mikrofon. Durch das Übertragungsverhalten dieses Messmikrofons ergibt sich bereits die erste Bandbegrenzung, die sowohl die Amplitude als auch die Phase der Messgröße beeinflusst. Im Folgenden soll dieses

Verhalten durch zwei Filter angenähert und der Einfluss auf den Gehörgefährdungsindex näher untersucht werden.

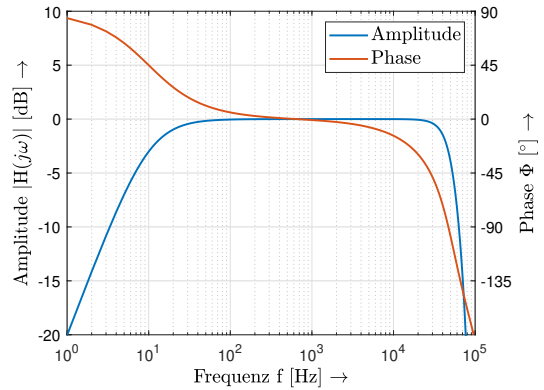


Abbildung 6: Übertragungsverhalten eines idealisierten Messmikrofons

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, wird der Übertragungsbereich des Mikrofons durch ein Hochpassfilter erster Ordnung sowie ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung begrenzt. Die Grenzfrequenzen der Filter liegen bei $f_{\text{HP}} = 10$ Hz beziehungsweise $f_{\text{LP}} = 47$ kHz und die resultierenden Phasenverschiebungen bei diesen Frequenzen betragen $\Phi_{\text{LP}} = 45^\circ$ sowie $\Phi_{\text{HP}} = -90^\circ$. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Phasengänge im Regelfall nicht Gegenstand der Qualitätssicherung sind, die aus Eichung und Kalibrierung der Messkette besteht.

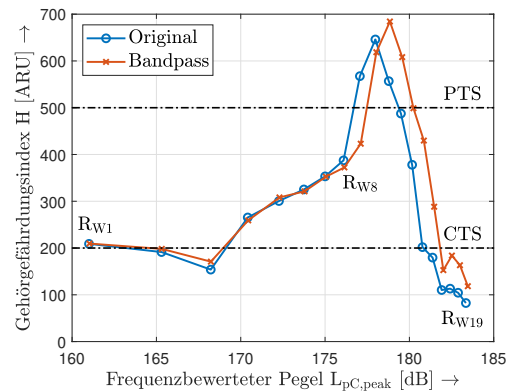


Abbildung 7: Gehörgefährdungsindex in Abhängigkeit des C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel

Abbildung 7 trägt den frequenzbewerteten Spitzenpegel $L_{pC, \text{peak}}$ gegen den Gehörgefährdungsindex auf. Um den Einfluss des Bandpassfilters auf die Ergebnisse des AHAH-Modells zu verdeutlichen, sind erneut die Analyseergebnisse der Originalsignale aus Abbildung 3 als blaue Kurve dargestellt. Die Verläufe der beiden Graphen ähneln sich bis zu einem Weiterradius von $R_{W8} = 0,45$ m. Danach kommt es vor allem für die Ergebnisse des Gehörmodells zu erheblichen Abweichungen, die vom frequenzbewerteten Schalldruckpegel in dieser Form nicht wiedergegeben werden.

Auch Expositionspegel erfassen diese Abweichungen nicht, wie folgendes Beispiel zeigt. Der vom Messsystem

eingebraachte Phasenfehler sei nun von der Frequenz unabhängig und betrage konstant $\Phi = 180^\circ$. Mögliche Ursachen eines solchen Fehlers könnten beispielsweise ein falsch belegter Steckverbinder oder die Phasenlage des Mikrofons selbst sein. In einem technischen Bericht [6] weisen die Herausgeber des Modells außerdem darauf hin, dass ihre Software auf die Polarität des Signals reagiert. Im Folgenden sollen daher die Auswirkungen auf das Ergebnis der AHAAH-Analyse sowie auf den Expositionspegel näher betrachtet werden.

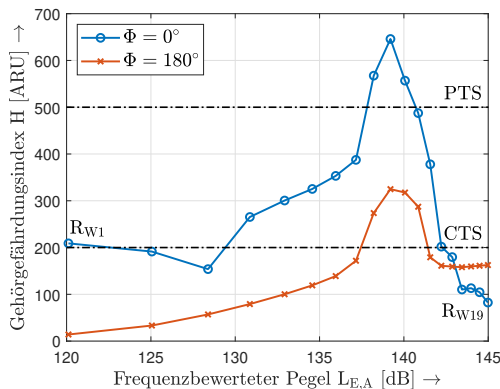


Abbildung 8: Gehörgefährdungsindex in Abhängigkeit des A-bewerteten Expositionspegels

Wie zuvor beginnen die beiden Verläufe in Abbildung 7 jeweils mit einem Weerradius von $R_{W1} = 0,1$ m und enden bei einem Radius von $R_{W19} = 1$ m. Bei Betrachtung der blauen Kurve ist zunächst zu erkennen, dass genau wie zuvor in Abbildung 3 kein linearer Zusammenhang zwischen einem Pegel und dem Gehörgefährdungsindex besteht. Außerdem sind große Unterschiede beim Gefährdungsindex zwischen dem blauen und dem roten Graphen erkennbar, die ausschließlich durch die veränderte Phase hervorgerufen werden. Sowohl die Expositionspegel als auch frequenzbewertete Spitzenschalldruckpegel sind für beide Signale identisch und erlauben somit keinen Rückschluss auf das Analyseergebnis des AHAAH-Modells.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden das C-Peak-Kriterium und der Gehörgefährdungsindex des AHAAH-Modells gegenübergestellt und verglichen. Es zeigte sich, dass sich die Aussagen zumindest für ausgeprägte Knalle – wie in diesem Beitrag die Mündungsknalle von Handfeuerwaffen – nicht decken. Durch Simulation von Knallen in reflektierenden Umgebungen wurde der Unterschied besonders deutlich. Während das Spitzenpegelkriterium auf solche nachlaufenden Reflexionen nicht reagiert, zeigt das AHAAH-Modell eine signifikante Risikoerhöhung durch eben solche Signalanteile. Es ist also nicht auszuschließen, dass beim Schießen in Räumen beziehungsweise Schießständen mit Sicherheitsblenden und schützennahen Aufbauten Risiken für das Gehör auftreten, die bisher unerkannt sind und unbeachtet bleiben. Eine ähnliche Unwägbarkeit lässt sich aus einer Messkette ableiten, die fehlerbehaftet ist oder anwendungsbedingt nicht die wahren Schalldruckzeitverläufe zur Verfügung stellt.

Die Untersuchungen im Hinblick auf das AHAAH-Modell stehen noch am Anfang. Die Verfahrensvergleiche müssen ausgedehnt werden und durch Schalldruckmessungen in den realen Umgebungen eines Schützen sachgerecht abgestützt werden. Dabei sollten auch andere bekannte Beurteilungsverfahren wie beispielsweise das Kriterium nach PFANDER [7] berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] US Department of Defense, *MIL-STD-1474E: Design Criteria Standard Noise Limits*, Militärischer Standard, 2015.
- [2] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen*, vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261).
- [3] 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.
- [4] Army Research Laboratory, *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH)*. Adresse: www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343.
- [5] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 61672-1:2014-07: Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013)*, Norm, 2014.
- [6] P. D. Fedele u. a., „Using the Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH) With Hearing Protection Software, Release MIL-STD-1474E“, Army Research Laboratory, Techn. Ber. ARL-TR-6748, 2013.
- [7] F. Pfander, *Das Knalltrauma - Analyse, Vorbeugung, Diagnose, Behandlung, Prognose und Begutachtung*. Berlin: Springer-Verlag, 1975.