

Schussignal-Datenbank

Serverbasierte Datenbankanwendung zur Verwaltung und Auswertung von Schussignalen

Philipp Bechtel, Tillmann Küther, Christian Kleinhenrich, Carsten Hudusch, Tobias Langenbacher

Cervus Consult GmbH, consult@cervus.de

Einleitung

Zur Beurteilung des Gehörschädigungsrisikos von Waffenknallen ist die Messung von Schussignalen und die anschließende Untersuchung anhand unterschiedlicher Kriterien notwendig. Üblicherweise werden dabei Parameter wie Waffen, Mikrofon- und Schützenpositionen variiert, wodurch eine Vielzahl an Messsignalen entsteht.

Anschließende Signaloperationen und Auswertungen können die Menge der Datensätze zusätzlich erhöhen und einen großen Zeitaufwand erfordern. Zum Beispiel seien hier die Applikation von Gehörschützerübertragungsfunktionen, die Bestimmung gebräuchlicher Pegel oder die Bewertung durch das AHAH-Modell genannt. Die strukturierte Organisation sowohl der zu speichernden Daten als auch der durchgeführten Rechenoperationen ist essentiell.

In diesem Beitrag wird der aktuelle Fortschritt einer serverbasierten Datenbankanwendung vorgestellt, die die obengenannten Herausforderungen adressiert. Durch Automatisierung der Berechnungen wird der Zeitaufwand zur Aufarbeitung sowie zur Auswertung signifikant reduziert. Zusätzlich ermöglicht der serverbasierte Ansatz der Anwendung einen dezentralisierten und parallelen Zugriff auf die Daten.

Freiheitsgrade

Um einen Überblick über die Komplexität einer Schießlärmmessung und der anschließenden Auswertung zu vermitteln werden zunächst die Freiheitsgrade und Randwerte diskutiert.

Freiheitsgrade einer Schießlärmmessung

Neben den naheliegenden Variablen wie Waffe, Munition und dem Abstand des Messpunktes zur Mündung - hier Mikrofonposition nach Abbildung 1 - beeinflussen noch weitere Parameter die gemessenen Waffenknalle im Nahbereich¹ der Mündung. Exemplarisch werden drei dieser Freiheitsgrade in diesem Abschnitt ausführlicher behandelt.

★ **Schießende Person:** Zusätzlich zu den körperbezogenen Daten wie Größe und Statur beeinflussen Händigkeit sowie Ausrüstung die zu messenden Schalldruckzeitverläufe. So ist unter anderem bei Gewehren zu berücksichtigen, ob diese an der linken oder rechten Schulter angelehnt oder mittig vor dem Körper geführt werden. Bzgl. der Ausrüstung sind Einflüsse von Kleidung, Helmen oder Kapselgehörschützern auf körpernahe Messpunkte ebenfalls nicht zu vernachlässigen.

★ **Bauumfassungen:** Unter diesem Punkt wird betrachtet, welche Bauumfassungselemente vorliegen. So

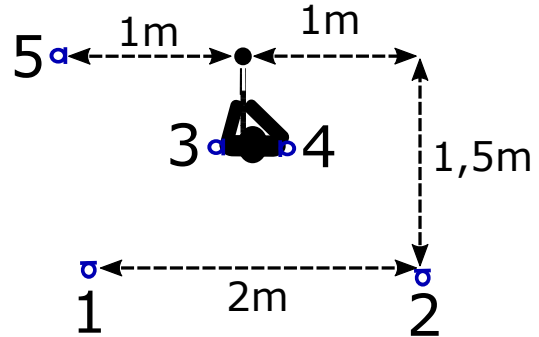


Abbildung 1: Mikrofonpositionen im Nahbereich der Mündung

gilt es bei Raumschießanlagen, akustische sachgerechte Informationen über die Oberflächenverkleidungen zu berücksichtigen. Ebenso muss bei offenen Anlagen zwischen Stand- und Zielgeländefläche sowie dem vorliegenden Absicherungsgrad und der Ausführung der Oberflächen differenziert werden.

★ **Schützenposition:** Sofern keine offene Anlage ohne reflektierende Blenden vorliegt, ist das gemessene Signal stark ortsabhängig. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, müssen eindeutige Positionen in den Anlagen definiert und dokumentiert werden. In Abbildung 2 sind die maßgeblichen Schützenpositionen der baufachlichen Richtlinie der Bundeswehr (BFR)[1], [2] aufgeführt, die hierfür eine Grundlage bietet.

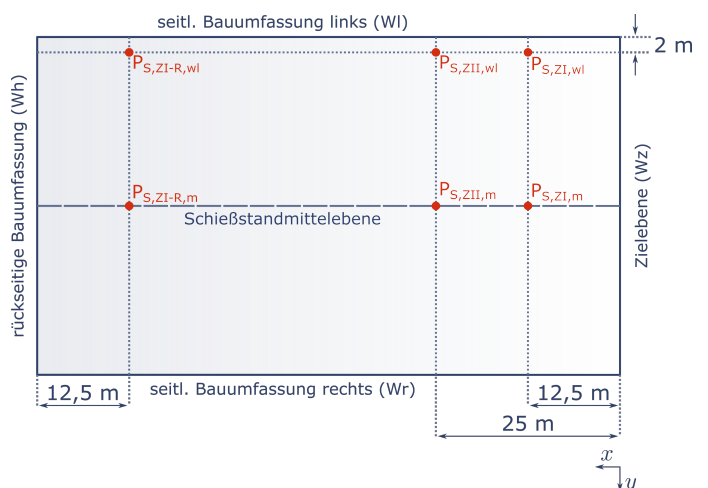


Abbildung 2: Maßgebliche Schützenpositionen nach BFR[1]

Weitere Freiheitsgrade wie beispielsweise der gewählte Anschlag, montierte Zieloptiken oder zusätzliche Griffe können ebenfalls relevante Auswirkungen auf den Schalldruckzeitverlauf haben.

¹Abstand zur Mündung beträgt maximal 10 m

Freiheitsgrade der Signalaufbereitung

Bei der Signalaufbereitung folgen für jedes gemessene Signal weitere Randparameter, die festgelegt werden müssen. Im Folgenden werden von der Anwendung definierte sowie variable Parameter vorgestellt.

★ **Signallänge:** Alle vorliegenden Schussignale sind konsistent zum AHAAH-Modell ausgerichtet. Dies bedeutet unter anderem, dass der Direktschall des Knalls bei 5 ms anliegt. Die Länge der einzelnen Signale ist auf 400 ms festgeschrieben. Zusätzlich zu diesen Signalen mit den für die Gehörschädigungsprognosen relevanten Reflexionen bietet die Datenbank Anwendung die Möglichkeit, nur den Direktschall zu betrachten. Zur Berechnung des Direktschallanteils wird nach 7 ms ein 1 ms langes rechtsseitiges Hannfenster angesetzt und die restlichen Abtastwerte von 8 ms bis 400 ms zu Null gesetzt.

★ **Abtastrate:** Grundsätzlich wird das Ziel verfolgt, alle Signale mit einer Abtastrate von 192 kHz oder höher einzulesen. Teilweise liegen Signale jedoch nur in einer geringeren Auflösung vor oder die hochfrequenten Signalanteile sind z.B. aufgrund nichtlinearer Mikrofonfrequenzgänge, unbrauchbar. Um möglichst aussagekräftige Vergleiche zu ermöglichen, besteht für alle Signale die Option, sie mit der niedrigeren Abtastrate von 48 kHz, welche zugleich der Minimalanforderung entspricht, auszuwerten.

★ **Kalibrierung oder Normierung:** Zusätzlich zu der energetischen Kalibrierung eines jeden Messsignals mit einer während der Messreihe bestimmten Kalibrierkonstante, wird eine Normierung der Signale angeboten. Dabei wird der Ansatz verfolgt, dass der Schalldruckspitzenpegel des Direktschalls bei gleicher Waffe, Munition und Mikrofonposition identisch ist. Unabhängig davon, ob die übrigen Freiheitsgrade voneinander abweichen bzw. ob in einer Raumschießanlage oder offenem Gelände geschossen wird. Dementsprechend wird bei der Normierung das Signal so skaliert, dass der Direktschall des Knalls den geforderten Schalldruckspitzenpegel aufweist. Durch diese Methode kann der Einfluss unerwünschter Abweichungen im Messsetup reduziert werden, weshalb diese auch bei der Bestimmung der Qualitätszahl durch Messung in der BFR[1] vorgesehen ist.

Freiheitsgrade der Auswertung

Hier werden zunächst die Bewertungsgrößen und externen Applikationen beschrieben. Anschließend wird die Anzahl der daraus resultierenden Variationen näherungsweise abgeschätzt.

★ **Auswertungsgrößen:** Zur Bewertung der einzelnen Signale werden akustische Standardgrößen, unter anderem der $L_{A,eq}$, der $L_{A,F,max}$ oder der $L_{C,peak}$, berechnet. Da das Hauptaugenmerk der Datenbank Anwendung auf Schussignalen aus dem Nahbereich der Mündung liegt, werden auch Gehörschädigungsprognosen nach gängigen Verfahren bestimmt. So können die Gehörschädigungsrisiken neben den linearen Pfander[3] und $L_{A,E}$ -Verfahren[4] ebenso für das nicht lineare AHAAH-Modell[5] in den Konfigurationen „warned“ und „unwarned“ kalkuliert werden. Diese Auswertungsgrößen

können für alle Variationen der Signalaufbereitung bestimmt werden.

★ **Gehörschützermodelle:** Des Weiteren ist eine Gehörschützer-Datenbank an die Schussignal-Datenbank gekoppelt, welche mehr als 40 unterschiedliche Gehörschützermodelle, darunter Gehörstöpsel, Kapselgehörschützer sowie doppelte Gehörschützer, verwaltet. Zusätzlich zu selbst eingefügten Gehörschützern wurden die dem AHAAH-Modell beiliegenden HPD-Devices importiert. Die Dämmwirkung der Gehörschützer kann unter anderem mit Einzahlwert-Rechenmodellen wie dem Knalldämmwert[3] oder M-Wert[4] auf die Schussignale adaptiert werden. Ebenso liegen für die meisten Gehörschützer auch frequenzabhängige Rechenmodelle wie die Oktaven Interpolation[6], individuelle Gehörschützerübertragungsfunktionen oder die HPD-Transferfunktionen des AHAAH-Modells vor. Diese frequenzabhängigen Rechenmodelle liefern nach aktuellen Erkenntnissen realistischere Signalverläufe und folglich auch Gehörschädigungsprognosen[6] als die Einzahlwert-Modelle.

★ **Variationsvielfalt:** Aus der Kombination der Gehörschützer-Rechenmodelle, der Gehörschützer, der Auswertungsgrößen und der Optionen der Signalaufbereitung resultieren eine Vielzahl an Variationen für ein einziges gemessenes Schussignal. Zur Verdeutlichung der Variationsvielfalt wird eine rudimentäre Abschätzung durchgeführt.

Für die Signalaufbereitung resultieren mit jeweils zwei möglichen Signallängen und Abtastraten sowie der Kalibrierungs- und Normierungsoption insgesamt acht Variationen. Bei den Gehörschützern ist die Abschätzung etwas komplexer, da für einige Gehörschützer nur zwei Rechenmodelle, der Knalldämmwert und die Oktaven Interpolation, vorliegen. Für andere Modelle liegen hingegen alle fünf Rechenmodelle sowie die gemessenen Gehörschützerübertragungsfunktionen beider Ohren von acht Probanden vor, woraus alleine 20 verschiedene Variationen resultieren. Vereinfacht werden somit fünf Rechenmodell-Varianten für jeden der 40 Gehörschützer angenommen. Daraus ergeben sich insgesamt 200 Variationen für die Anwendung der Gehörschützer. Somit liegen für jedes Schussignal 1 600 mögliche Variationen vor, die hinsichtlich der akustischen Standardgrößen sowie der Gehörschädigungsprognoseverfahren ausgewertet werden können.

Datenbankaufbau

Um die Vielzahl der zuvor beschriebenen Parameter zu verwalten, nach ihnen filtern sowie Vergleiche anstellen zu können, wurde eine Datenbank Anwendung konzipiert. Zur besseren Übersicht wird zwischen der Verwaltung und der Anwendung separiert.

Datenverwaltung

Zunächst wird die Datenverwaltung betrachtet. Als Datenbank wurde PostgreSQL ausgewählt. Durch die vorher bereits bekannten strukturierten und klar trennbaren Informationen der Daten wurde ein relationales Daten-

bankmodell ausgewählt. Entity Framework Core wurde als ORM (Object-Relational Mapper) benutzt, um mit den Modell in .NET arbeiten zu können.

Die vorhandenen Informationen werden hierbei in möglichst kleine Teile zerlegt, um große Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten. Außerdem kann so bei Abfragen nur die kleinstmögliche Menge an Informationen abgerufen werden, was einerseits die Bedienbarkeit erhöht und andererseits die benötigte Anfragedauer verringern kann. Des Weiteren erfolgt eine Trennung der Metainformationen und eigentlichen Signale. So müssen nicht für jede Anfrage die dazugehörigen Signale geladen werden, was die angefragten Datenmengen signifikant verringert. Die Signale selbst sind als JSON-Files in der Datenbank abgelegt und beinhalten neben dem Vektor mit den Abtastwerten nur die Abtastrate, Anzahl der Sample, Signallänge und Einheit als Informationen. Hierdurch ist das Signal eindeutig beschrieben und kann in beliebige Formate konvertiert werden. Die Eindeutigkeit der Signale, der geringe Overhead sowie das weitverbreitete JSON-Format ermöglichen das einfache Einrichten weiterer qualitätsgesicherter Schnittstellen.

Als erste Erweiterung wurden vorhandene Strukturen und Daten einer Waffen- und Munitionsdatenbank zur Schussignal-Datenbank hinzugefügt.

Aktuell sind fünf Messreihen mit insgesamt ca. 16 750 Schussignalen in der Datenbank eingepflegt. Mit den ebenfalls hinterlegten Rohdaten der jeweiligen Messung annonciieren diese einen Speicherbedarf von ca. 170 GB. Die restlichen Daten sowie die Gehörschützer-Datenbank benötigen zur Zeit ca. 2 GB Datenspeicher. Damit die Daten nicht lokal vorgehalten werden müssen und weitere Messreihen - ohne Rücksicht auf Speicherauslastung - hinzugefügt werden können, wurde die Datenbank auf einem Server eingerichtet.

Der serverbasierte Ansatz ermöglicht ebenfalls die Einrichtung eines Mehrnutzersystems. So können zum einen mehrere Nutzer parallel mit der Datenbank arbeiten. Zum anderen kann für jeden einzelnen Nutzer genau festgelegt werden, auf welche Daten dieser zugreifen kann.

Datenbankanwendung

Zur Auswertung der Schussignale nach unterschiedlichen Parametern bietet die Anwendung diverse mathematische Funktionalitäten. Neben den Fourier-Transformationen für den Wechsel zwischen Zeit- und Frequenzbereich sind unter anderem Methoden zur zeitlichen Fensterung und Frequenzgewichtung implementiert. Zur Bestimmung aussagekräftiger Einzahlwerte sind die Rechenroutinen gängiger Kenngrößen sowie einiger Gehörschadigungsprognoseverfahren an die Datenbankanwendung angebunden.

Die Anwendung selbst läuft derzeit als .NET-Skript in JupyterHub. Der Vorteil dieses zentralen Ansatzes wird besonders deutlich, wenn die dezentrale Alternative betrachtet wird. So müssten die Signale aus der Datenbank geladen und lokal nach den gewünschten Parametern ausgewertet werden. Mittels der zentralen Datenbankanwen-

dung können die Resultate direkt auf dem Server berechnet werden. Dies reduziert neben dem Datentransfer auch die Rechenzeiten signifikant, da der Server bei Bedarf über Docker Container erweitert werden kann. Des Weiteren werden doppelte Berechnungen vermieden, da die Ergebnisse eines einmal angefragten und berechneten Szenarios ebenfalls in der Datenbank hinterlegt werden. Bei einem erneuten Aufruf werden diese folglich nur ausgelesen und zurückgegeben. Um die Bearbeitung von Anfragen mit möglichst geringer Verzögerung zu ermöglichen, werden die Auswertungsroutinen beim Einfügen neuer Schussignale für ausgewählte Signalvariationen, welche im nächsten Abschnitt diskutiert werden, automatisch gestartet.

Benchmark / Performance

Im Folgenden wird an einem Beispiel das Erstellen einer Anfrage sowie deren Bearbeitungsdauer detaillierter untersucht. Hierzu ist in Abbildung 3 der Ausschnitt einer Anfrage an die Datenbank schematisch abgebildet.



Abbildung 3: Skizze einer exemplarischen Anfrage

Zunächst wird die Anlage bzw. der Messort abgefragt. Exemplarisch wird hier die Zielgeländefläche (ZGF) eines A-Standes ausgewählt. Daraufhin wird die Liste der dort vermessenen Waffen zurückgegeben, um diese zu spezifizieren. Die Wahl fällt hier auf die fiktive Waffe, das Gewehr Nr. 1. Da die Signale dieses Szenarios nur für einen Schützen im stehenden Anschlag mit Gefechtsmunition vorliegen, wird die Filterung nach diesen Parametern hier ausgeblendet. Anschließend werden die vorhandenen Mikrophonpositionen dieses Setups und validen Schützenpositionen abgefragt. In diesem Beispiel wird nach der Mikrophonposition 5 und der Schützenposition P_{S,ZII,m} (Zone II Mitte) gemäß Abbildung 1 und Abbildung 2 gefiltert. Für diese Anfrage sind zehn Schussignale in der Datenbank hinterlegt, welche im Folgenden für die Abschätzung der Bearbeitungsdauer verwendet werden.

Bzgl. der variablen Parameter der Signalaufbereitung werden die normierten Signale mit der gesamten Länge von 0,4s bei einer Abtastrate von 192 kHz betrachtet. Zur Bearbeitung der Anfrage wird ein Thread eines AMD EPYC 7282 Server mit einer Taktfrequenz von 2,8 GHz verwendet. Sofern die Auswertung für dieses Setup noch nicht bestimmt wurde, beträgt die Bearbeitungszeit ~110s. Wird die Anfrage erneut gestellt bzw. die Ergebnisse liegen bereits vor, so sind die Resultate innerhalb von ~3s verfügbar.

Wird ein Gehörschützer mit einem frequenzabhängigen Rechenmodell auf die zehn Signale angewendet, so steigt die Bearbeitungszeit auf ~150s. Müssen die Resultate nicht berechnet, sondern nur ausgelesen werden, so liegen die Ergebnisse ebenfalls binnen ~3s vor.

Die Auswertung beinhaltet sowohl die Berechnung der gängigen akustischen Kenngrößen als auch der Gehörschädigungsprognosen. Hierbei sei zu erwähnen, dass das AHAAH-Modell die längste Rechenzeit in Anspruch nimmt.

In erster Näherung kann die Auswertungszeit für ein Signal mit ~ 12 s abgeschätzt werden. Mit den insgesamt 16 750 Schussignalen, den acht Möglichkeiten der Signalaufbereitung und den 1 600 Gehörschützer-Variationen resultieren 214 400 000 Signalkombinationen. Die Auswertung all dieser Signale mit einem Prozessor-Kern würde somit 25 728 000 000 s bzw. 81,5 Jahre dauern. Dementsprechend ist die automatisierte Vorabberechnung aller Signalkombinationen nicht praktikabel. Durch Streichung der Gehörschützer-Variationen sinkt die Zahl der zu berechnenden Signalkombinationen auf 134 000, was einer Rechenzeit von ca. 18,6 Tagen entspricht. Somit wird dieser Ansatz gewählt und es werden beim Einfügen neuer Schussignale die Auswertungsroutinen für diese in den acht Variationen der Signalaufbereitung gestartet.

Fazit

Zusätzlich zu dem bisher diskutierten Aufbau, den Funktionalitäten und der Performance der Datenbankanwendung werden abschließend die konkreten aktuellen Anwendungsgebiete sowie mögliche zukünftige Perspektiven aufgezeigt.

Anwendungen

Bisher hat die Datenbankanwendung nur den Status einer internen Laboranwendung. Dementsprechend liegt noch keine graphische Nutzeroberfläche vor und die Anfragen können nur über Skripte in .NET oder Python gestellt werden. Sie erfüllt somit zunächst auch nur ihre primären Ziele:

- Strukturierte Abspeicherung der im Rahmen des Projektes „Akustische Sicherheit“ [1], [2] aufgezeichneten Schussignale.
- Validierung der mittels Chaser² prognostizierten Qualitätszahlen.
- Untersuchungen zum Einfluss von Gehörschützern in eingehausten Schießanlagen.

Ausblick

Zunächst wird der Fokus auf das Potenzial des Programms gelegt und anschließend auf mögliche Anwender. Als ersten Schritt in der Weiterentwicklung der Anwendung steht die Benutzerfreundlichkeit. So wird aktuell an einer graphischen Desktopanwendung gearbeitet, die die Grundlage für eine zukünftige Webanwendung bildet. Ein weiterer Aspekt ist das Einrichten neuer Schnittstellen, um die Verwendbarkeit der Anwendung zu erhöhen. So müssen unter anderem die Anforderungen an externe Schussignal-Messreihen sowie Gehörschützer klar definiert werden. Ebenso soll die Variabilität erhalten bleiben, um beispielsweise neue Auswertungsgrößen und Rechenmodelle effizient integrieren zu können.

Neben der aktuellen Verwendung ist der Aufbau eines Monitoring-Systems für die akustischen Beschaffenheiten von Schießanlagen geplant. Perspektivisch bietet das Programm natürlich noch weitere Nutzungsmöglichkeiten. So könnte es beispielsweise von Arbeitsschützern zur Auswahl des optimalen Gehörschützers für unterschiedliche Schießübungen Verwendung finden. Ebenso können durch Verknüpfungen der Schussignale mit Audiometrien Untersuchungen zur Belastbarkeit von Gehörschädigungsprognoseverfahren durchgeführt werden.

Eine Erweiterung der Datenbank auf Schussignale aus größerer Entfernung zur Mündung ist ebenfalls möglich. Somit könnte eine Datenbasis für Untersuchungen über die derzeit maßgeblichen Einzahlpiegel hinaus gelegt werden.

Literatur

- [1] „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.
- [2] 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.
- [3] F. Pfander, *Das Knalltrauma - Analyse, Vorbeugung, Diagnose, Behandlung, Prognose und Begutachtung*. Berlin: Springer-Verlag, 1975.
- [4] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen*, vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261).
- [5] Army Research Laboratory, *Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAAH)*. Adresse: www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=343.
- [6] P. Bechtel u. a., „Schießlärm & Gehörschützer - Modellierung von Gehörschützern für Schießgeräusche - Gehörgefährdungsprognosen,“ in *Fortschritte der Akustik*, Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA), Hrsg., Stuttgart, März 2022.

²Die Software Chaser setzt die Anforderungen der BFR zur akustischen Sicherheit um.