

Die Schallausbreitungsmodelle für Waffenknalle in PROPPER

Jürgen Zangers¹

¹ Institut für Lärmschutz GmbH, 40489 Düsseldorf, E-Mail: zangers@jfl-acoustics.de

Einleitung

In der Planungsphase für den Neu- oder Umbau von Standortschießanlagen ist eine Messung, die den späteren Bauzustand repräsentiert, nicht möglich. Vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) wurde (und wird) zur Abschätzung der akustischen Auswirkung von baulichen Veränderungen an Standortschießanlagen die Prognosesoftware PROPPER[®] entwickelt. PROPPER[®] steht als Werkzeug für die Berechnung der Schallausbreitung von Schießgeräuschen (Mündungs- und Geschößknall) von Handfeuerwaffen der Bundeswehr für die Bauplanung zur Verfügung und ist als Referenzmodell bei der Öffentlich Rechtlichen Aufsicht der Bundeswehr eingeführt.

In umfangreichen Validierungsmessungen (vgl. z.B. [1]/[2]) wurde eine gute Übereinstimmung von Messung und Prognose festgestellt.

PROPPER[®] beschreibt die Schallausbreitung im dreidimensionalen durch die Propagation von (3D-)Schallstrahlen, wobei als Kenngröße die Schallenergie betrachtet wird. Die für die Ausbreitungsrechnung relevanten Module sind PROPPER-Ranger und PROPPER-Propagater.

PROPPER-Ranger

Der Ranger berechnet die 3D-Schallausbreitung innerhalb einer komplexen Schießanlage und letztendlich eine Ersatzschallquelle. Mit Hilfe eines dreidimensionalen Strahlenverfolgungsalgorithmus wird die Schallausbreitung von der eigentlichen Schallquelle (hier der Mündungs- bzw. der Geschößknall einer Handfeuerwaffe) durch die Ausbreitung von „Zelten“ als Träger der akustischen Energie in der geometrisch und akustisch komplexen Schießanlagen- bzw. Schießstandgeometrie abgebildet. Der RANGER verfolgt diese Zelte bis zum Verlassen des Schießstandes und ermittelt dabei den Ort, die Richtung und die akustische Energie eines jeden Zeltes (vgl. [3]).

Bei der Modellierung der physikalischen Phänomene werden die Besonderheiten der Schießgeräusche, ihre ausgeprägte Richtcharakteristik und ihre Impulshaftigkeit berücksichtigt. Letztere ist insbes. bei der Beugungsberechnung maßgeblich.

Der RANGER erfüllt die Testaufgabe nach DIN EN ISO 17201-3 [4] als ‚sophisticated model‘ zur Berechnung der Ersatzschallquelle nach dieser Norm oberhalb von 100 Hz und damit für den immissionswirksamen Frequenzbereich des Mündungsknalls.

Mündungsknall der Waffe

Die alleinige Kenntnis der 3D-Schallwege reicht bei Waffen mit ausgeprägter Richtcharakteristik nicht aus. Hierbei müssen auch die richtungsspezifischen Energien berücksichtigt werden. Dies geschieht hier mittels einer triangulierten Kugelschallquelle, deren Flächenenergiedichten gemäß der Richtcharakteristik ([5]) der Waffe berechnet werden.

Die Abb. 1 zeigt das Ergebnis einer so berechneten Kugelschallquelle mit der Richtcharakteristik einer Waffe.

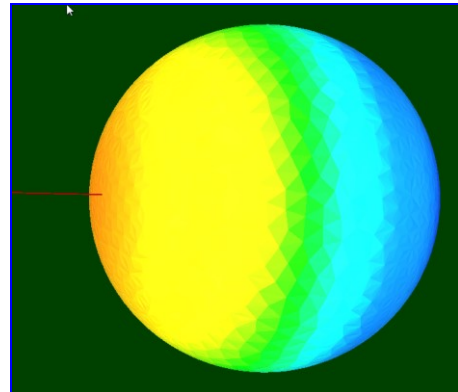


Abbildung 1: Triangulierte Kugelschallquelle mit farbskalierten Flächenenergiedichten gemäß einer Waffen-Richtcharakteristik.

Geschößknall des Projektils

Zunächst wird die Flugbahn des Projektils (Abb. 2) als zeitparametrische Raumkurve (mit räumlich äquidistanten Stützpunkten) nach dem „Point-Mass Model“ ([6]) gem. Gl. (1) berechnet.

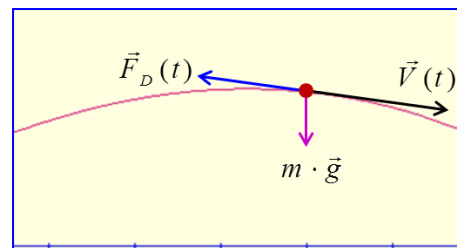


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Flugbahn eines Projektils mit dessen Geschwindigkeit und den auf es einwirkenden Kräften gem. „Point-Mass Model“.

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{V}(t)}{dt} &= \vec{g} + \vec{F}_D(t)/m \\ &= \vec{g} - \frac{\rho A}{2m} \cdot C_w(M) \cdot V^2(t) \cdot \vec{e}_V(t) \end{aligned} \quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

wobei:

t	Zeit
$\vec{F}_D(t)$	Luftreibungskraft
$\vec{V}(t), \vec{e}_V(t)$	Geschwindigkeitsvektor, Einheitsvektor in Richtung $\vec{V}(t)$

ρ	Luftdichte
A	Querschnittsfläche des Geschosses
$C_w(M)$	von der Machzahl M abh. Luftreibungskoeffizient nach McCoy [7]
$M = \vec{v} /c$	M Machzahl, c Schallgeschwindigkeit
m	Masse des Geschosses
\vec{g}	Erdbeschleunigungsvektor

Ein typischer Verlauf des $C_w(M)$ für ein bei der Bundeswehr verwendetes Projektil zeigt die Abb. 3.

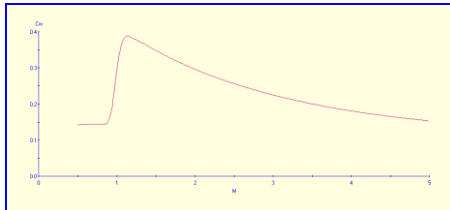


Abbildung 3: Typischer Verlauf des nach [7] berechneten C_w -Wertes.

Die Berechnung der vom Geschoss abgestrahlten Schallenergie Q_p erfolgt als Wegintegral der Luftreibungskraft längs der Flugbahn unter Berücksichtigung eines akustischen Wirkungsgrades σ_{ac} gem. Gleichung (2).

$$Q_p = -\sigma_{ac} \int_{\vec{P}_s}^{\vec{P}_{s+\Delta s}} \vec{F}_D(\vec{s}) \cdot d\vec{s} \quad [J] \quad (2)$$

Dabei ist \vec{P}_s ein Stützpunkt der Flugbahn und $\vec{P}_{s+\Delta s}$ ein direkt benachbarter.

Die Abb. 4 zeigt schematisch die in diesem Zusammenhang wichtigsten Größen für die Behandlung eines überschalligen Projektils.

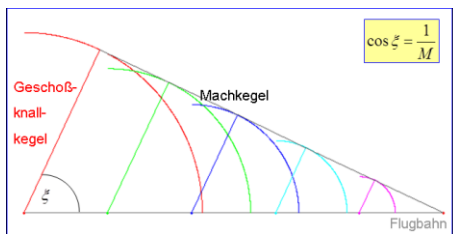


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Verhältnisse bei einem überschalligen Projektil.

Zur numerischen Behandlung der Ausbreitung der Geschossknall-Energie wird der Machkegel zwischen je zwei benachbarten Geschossknallkegeln trianguliert. Die Abb. 5 zeigt eine solche Triangulierung mit rotumrandetem Ausschnitt von 4 Zelten dieser Triangulierung, wobei zur besseren Übersicht nur der „innere“ Geschossknallkegel dargestellt ist.

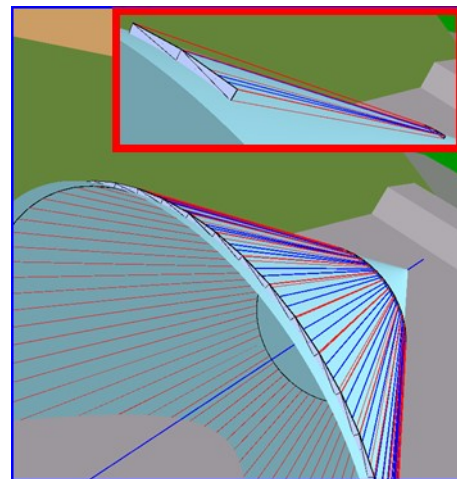


Abbildung 5: Triangulierung des Mach-Kegels zwischen zwei Geschossknallkegeln mit rotumrandetem Ausschnitt von 4 Zelten dieser Triangulierung.

Strahlausbreitungsrechnung

Bei der Berechnung der Schallausbreitung wird das auf der DAGA 2004 [8] und 2007 [3] vorgestellte Konzept der 3D-Propagation von „Zelten“ als Träger der akustischen Energie angewandt. Dabei wird eine ruhende, ortsunabhängige Atmosphäre angenommen. Ausgangspunkt ist die triangulierte Kugelschallquelle bzw. der triangulierte Machkegel. Jeder Gitterpunkt der Triangulierung wird geradlinig (mit einer geeigneten Schrittweite) propagiert. Je drei benachbarte Strahlen bilden die Kanten eines Zeltes; die Punkte gleicher Propagationszeit bilden die Ecken von zwei Dreiecken. Diese Dreiecke zusammen mit ihren Verbindungslinien bilden die geometrischen Eigenschaften eines Zeltes. Weitere Eigenschaften sind die Nachbarschaftsbeziehungen, beinhaltet Energie und viele weitere für die Berechnung notwendige Parameter. Diese Dreieckspaare werden dann propagiert (und mit ihnen die Zelte). Die Abb. 6 zeigt das Prinzip.

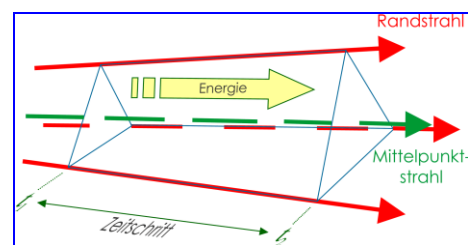


Abbildung 6: Zelt als Träger der akustischen Energie.

Bei dieser Propagation wird in jedem Schritt eine vollständige 3D-Kollisionsdetektion der Zelte mit den Objekten des Schießstandes und ggf. eine dynamische Strahlaufteilung (Details vgl. [3]) durchgeführt.

Darüber hinaus wird auch die Luftabsorption berücksichtigt und die Energie der Zelte entsprechend verringert.

Innerhalb des Schießstandes wird der Schall nicht nur an begrenzenden Flächen reflektiert und bei teildurchlässigen Absorbern transmittiert, sondern auch an Kanten gebeugt. Bei der Reflexion wird die Absorption flächenspezifisch

sowie frequenz- und winkelabhängig berücksichtigt. Entsprechendes gilt für die Transmission. Bei der Streuung wird mit einem pauschalen Streukoeffizient gerechnet.

Das Beugungs-Modell im Ranger basiert auf dem Ersatzschallquellen-Modell für Kantenbeugung von Impulsschall von Svensson [9]. Ähnlich wie bei den Huygensschen Elementar-Quellen wird die Beugung eines Schallstrahls durch eine Ersatzschallquelle am Beugungsort beschrieben. Diese Ersatzschallquelle hat eine Art „Richtcharakteristik“ (die analog dem Vorgehen bei der Waffe durch eine triangulierte Kugelschallquelle abgebildet wird), wobei die in eine Richtung abgestrahlte Beugungsenergie von geometrischen Gegebenheiten an der Beugungskante und von der einfallenden Energie abhängt.

Die Abb. 7 ist [9] entnommen und skizziert die Verhältnisse bei der Beugung an einer Kante.

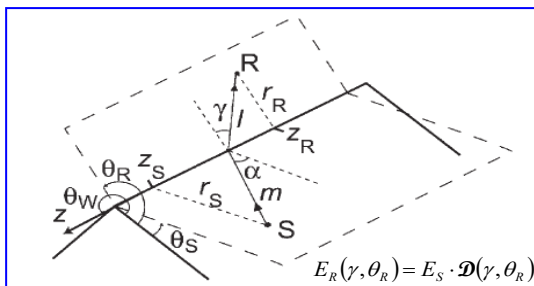


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Verhältnisse bei der Beugung an einer Kante, entnommen aus [9].

Die „Richtcharakteristik“ berechnet sich mit den Bezeichnungen in Abb. 7 wie folgt:

$$D(\gamma, \theta_R) = \frac{D^2(\gamma, \theta_R)}{\int_{0 \leq \theta_R \leq \theta_W} \int_{-\pi/2 \leq \gamma \leq \pi/2} D^2(\gamma, \theta_R) d\gamma d\theta_R}$$

$$D(\gamma, \theta_R) = \frac{1}{4\theta_W} \cdot \beta(\theta_W, \alpha, \theta_S, \gamma, \theta_R)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^4 \frac{\sin(v \cdot \varphi_i)}{\cosh(v \cdot \eta) - \cos(v \cdot \varphi_i)}$$

$$\eta = \cosh^{-1} \left(\frac{1 + \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma)} \right)$$

$$v = \frac{\pi}{\theta_W}$$

$$\varphi_1 = \pi + \theta_S + \theta_R \quad \varphi_2 = \pi + \theta_S - \theta_R$$

$$\varphi_3 = \pi - \theta_S + \theta_R \quad \varphi_4 = \pi - \theta_S - \theta_R$$

(3)

Ein 3D-Strahl wird gebeugt, wenn sein Mittelpunktstrahl (vgl. Abb. 6) einen Zylinder (um die Kante, vgl. Abb. 8) mit Radius $\lambda/2$, sog. λ -Zylinder (λ : betrachtete Wellenlänge) trifft. Nicht für jeden gebeugten Strahl wird eine einzelne Beugungersatzschallquelle generiert, sondern der an den Beugungskanten gebeugte Schall wird zunächst in den

zugeordneten Beugungersatzschallquellen kantenspezifisch gesammelt. Die Position dieser Beugungersatzschallquellen wird durch die (Beugungs-) Energieverteilung auf der Kante bestimmt. Dieses Verfahren wird zunächst für die Waffe durchgeführt. Für die daraus entstehenden Beugungersatzschallquellen (Beugungersatzschallquellen 1. Ordnung) wird das Verfahren erneut angewendet, so dass wiederum neue Beugungersatzschallquellen entstehen (Quellen 2. Ordnung). Dieses Vorgehen wird wählbar oft wiederholt (Quellen 3. Ordnung, 4. Ordnung, ...), bis in einem letzten Schritt keine erneute Beugung mehr berücksichtigt wird.

Die Abb. 8 zeigt das Ergebnis des o.g. Verfahrens. Der Übersichtlichkeit halber für nur 6 Beugungersatzschallquellen in einem D-Stand mit farbskalierter Energiebelegung der λ -Zylinder. Die kleine Kugel vorne markiert den Mündungsknall der Waffe.

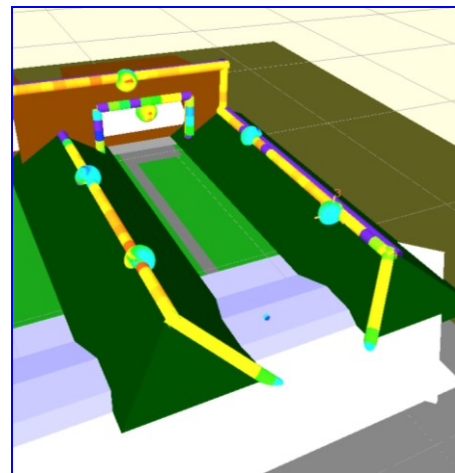


Abbildung 8: D-Stand mit Beugungersatzschallquellen, λ -Zylinder mit Energiebelegung (farbskaliert) und Kugelschallquelle des Mündungsknalls.

Die Ausbreitungsrechnung wird beendet, wenn die Zelte eine den Schießstand umfassende „Box“ verlassen. Die Gesamtheit aller dieser Zelte bildet die Ersatzschallquelle des Schießstandes für eine bestimmte Emissionssituation.

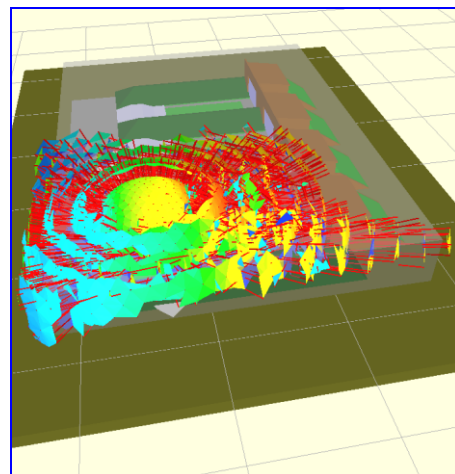


Abbildung 9: 3D-Ranger-Ersatzschallquelle für die Waffe mit farbskalierter Energiebelegung.

Die Abb. 9 zeigt eine nach obigem Verfahren berechnete

3D-Ranger-Ersatzschallquelle. Der Übersichtlichkeit wegen nur für die Waffenzelte.

PROPPER-Propagater

Der Propagater berechnet ausgehend von der Ranger-Ersatzschallquelle die Schallausbreitung außerhalb des Schießstandes bei gegebener Atmosphäre (3D-Windvektorfeld, 3D-Skalarfelder für die Temperatur und Luftfeuchtigkeit). Das angewandte Verfahren unterliegt dabei nicht den Abstands- und Signalbeschränkungen der DIN ISO 9613-2 [10]. Insbesondere setzt es auch keinen konstanten (5 km) Krümmungsradius der Schallstrahlen voraus.

Die Ausbreitung der Schallstrahlen der Ersatzschallquelle und die schließlich an den Immissionsorten ermittelte akustische Energie hängen von der vorgegebenen Atmosphäre und von den akustischen Eigenschaften des "Bodens", an dem die Strahlen ggf. reflektiert werden, ab. Das zugrunde liegende Modell basiert auf dem Konzept des "Wellenfront Ray-Tracings" von Pierce [11] für die Ausbreitung in der Atmosphäre (Details zur Numerik vgl. [8]) sowie dem Modell von Wempen [12] für die Reflexion an grasähnlichen Böden.

Der Reflexionskoeffizient $|r|^2$ ergibt sich nach dem Modell von Wempen wie folgt:

$$E_{\text{refl}} = E_{\text{cinf}} \cdot |r|^2$$

$$|r|^2 = 1 - \frac{4 \cdot Z'_{\text{in}} \cdot \cos(\Theta)}{(1 + Z'_{\text{in}} \cdot \cos(\Theta))^2 \cdot (Z'_{\text{in}} \cdot \cos(\Theta))^2}$$

$$Z'_{\text{in}} = \frac{\{r_a \cdot \cos(\varphi_a) + r_b \cdot f \cdot \cos(\varphi_b)\}}{\{r_a \cdot \cos(\varphi_a) + r_b \cdot f \cdot \cos(\varphi_b)\}^2 + \{r_a \cdot \sin(\varphi_a) + r_b \cdot f \cdot \sin(\varphi_b)\}^2} \quad (4)$$

$$Z'_{\text{in}} = \frac{\{r_a \cdot \sin(\varphi_a) + r_b \cdot f \cdot \sin(\varphi_b)\}}{\{r_a \cdot \cos(\varphi_a) + r_b \cdot f \cdot \cos(\varphi_b)\}^2 + \{r_a \cdot \sin(\varphi_a) + r_b \cdot f \cdot \sin(\varphi_b)\}^2}$$

Winkel gegen Einfallslot: Θ

Frequenz : f

Wempen-Parameter : $r_a \quad r_b \quad \varphi_a \quad \varphi_b$

Für den Propagater ist ein Immissionsort ein quadratischer Bereich auswählbarer Seitenlänge, der auf dem (waagerechten, ebenen) Boden liegt. Der Propagater prognostiziert die akustische Energie am Immissionsort als Summe der Energien aller Schallstrahlen, die diesen quadratischen Bereich treffen, d.h. die originäre Prognosegröße ist der Energiepegel L_E (L_{LSEL}). Optional kann daraus der L_{AFmax} nach [4], Gl. (6) abgeschätzt werden.

Der Propagater berechnet ganze (Raster-)Pegelkarten und nicht nur Pegel an einzelnen Immissionsorten. Diese Pegelkarten bestehen aus quadratischen Raster-Flächen, wobei jede dieser Raster-Flächen im Propagater einen Immissionsort darstellt. Die Abb. 10 zeigt eine solche Pegelkarte mit einer Ausschnitt-Vergrößerung, bei der die Raster-Flächen zu erkennen sind.

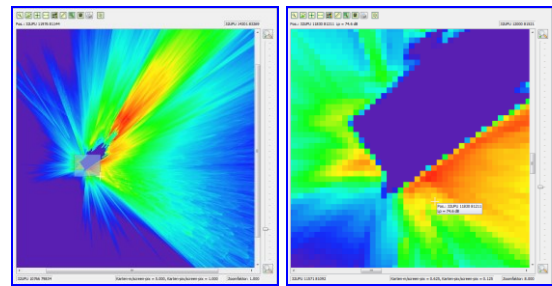


Abbildung 10: (Raster-)Pegelkarte mit Ausschnitt-Vergrößerung.

Literatur

- [1] Zangers, J., Trimpop, M.; Vogel, J.: Prognostizierte und gemessene Wirksamkeit von baulichen Schallschutzmaßnahmen in komplexen Szenarien, DAGA 2010
- [2] Zangers, J., Trimpop, M.; Wiedemann, B.; Vogel, J.: Messung und Prognose von Immissionspegeln an ausgewählten Orten in der Umgebung einer Standortschießanlage, DAGA 2015
- [3] Zangers, J., Hirsch, K.H.: Eine 3D-Ersatzschallquelle für komplexe Schießstände, DAGA 2007
- [4] DIN EN ISO 17201-3:2010-06: Akustik - Geräusche von Schießplätzen - Teil 3: Anleitung für die Berechnung der Schallausbreitung (ISO 17201-3:2010); Deutsche Fassung EN ISO 17201-3:2010
- [5] DIN EN ISO 17201-2:2006: Akustik - Geräusche von Schießplätzen - Teil 2: Bestimmung des Mündungsknalls und des Geschossgeräusches durch Berechnung (ISO 17201-2:2006); Deutsche Fassung EN ISO 17201-2:2006
- [6] McCoy, Robert L.: Modern Exterior Ballistics, Schiffer Publishing Ltd., Atglen, PA, 1999
- [7] McCoy, Robert L.: „MC DRAG“ – a computer program for estimating the drag coefficients of projectiles, Technical Report ARBRL-TR-02293, 1981
- [8] Zangers, J., Hirsch, K.H.: Ray-Tracing in a 3-D Wind Field for Prediction Purposes of Shooting Noise, Part II, DAGA 2004
- [9] Svensson, U.P., Fred, R.I., Vanderkooy, J.: An analytic secondary source model of edge diffraction impulse response, J. Acoust. Soc. Am 106 (5), November 1999
- [10] DIN 9613: Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996)
- [11] Pierce, A. D.: Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, Acoustical Society of America, Woodbury, New York, 1989, 371 ff.
- [12] Wempen, J.: „Schallausbreitung über Erdboden“, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg 1990

Diese Untersuchungen wurden vom Bundesministerium der Verteidigung gefördert.