

Zur Berücksichtigung des Geschößknalles bei der Berechnung von Lärmkarten für die Umgebung von Truppenübungsplätzen

K.-W. HIRSCH, E. BUCHTA (Institut für Lärmschutz, Düsseldorf)

1. Einleitung

Der Schießlärm in der Umgebung von Truppenübungsplätzen wird durch drei Knallgeräusche geprägt,

- durch den Mündungsknall beim Abschuß von Geschossen und Raketen,
- durch den Explosionsknall beim Einschlag von Sprenggeschossen, bei Zerlegungssprengungen auf der Flugbahn und bei Übungssprengungen
- durch den Geschößknall der mit Überschall fliegenden Geschosse.

Exemplarische Messungen und Rechnungen /1/ zeigen, daß der Geschößknall - insbesondere von Artilleriegeschossen und Raketen auf weiten, ballistischen Flugbahnen - in bestimmten Regionen in der Umgebung von Truppenübungsplätzen den Hauptbeitrag zur Geräuschbelastung liefert. Die Vernachlässigung des Geschößknalles in Berechnungsmodellen zur Prognose der Belastung durch Schießgeräusche schwerer Waffen, wie in /2, 3/, führt daher zu einer unzulässigen Unterschätzung der Geräuschbelastung in diesen Regionen.

Das "Standardverfahren zur Berechnung der Schallimmissionen in der Umgebung von Truppenübungsplätzen" (BMVg/IfL) /4/ berücksichtigt deshalb den Geschößknall gleichrangig zu den übrigen Knallgeräuschen: Es definiert ein einfaches, für alle drei Knallgeräusche ähnlich strukturiertes Berechnungsverfahren für den jeweiligen mittleren Einzelereignispegel. Ausgangspunkt des Verfahrens ist dabei auch für den Geschößknall das Modell einer im Abschußpunkt ruhenden Punktschallquelle mit Richtcharakteristik. Diese Art und Weise der Beschreibung erfolgt dort einerseits mit Blick auf die Standardisierbarkeit des gesamten Verfahrens; Diese Beschreibung hat andererseits den Vorteil, bereits im Ansatz die Abstandsabhängigkeit von der Winkelabhängigkeit bei der Pegelrechnung zu separieren.

In /4/ werden die sehr unterschiedlichen Merkmale der Waffenknalle durch standardisierte, knallspezifische Sätze von Emissions- und Schallausbreitungsparametern dargestellt, die in einer Datenbank strukturiert abgelegt sind. Der Ermittlung der knallspezifischen Parametersätze für Geschößknalle kommt wegen der komplexen Schallausbreitung eine besondere Bedeutung zu. Im folgenden wird ein Verfahren zur Bestimmung dieser Parametersätze beschrieben, das eine Prognose des Pegelbeitrages des Geschößknalles zur Lärmlast im Rahmen der Berechnung von Lärmkarten für Langzeit-Mittelungspegel erlaubt.

2. Verfahren zur Ermittlung der Koeffizienten des Prognosemodells

2.1 Vorüberlegungen

Ein einziger Parametersatz im Prognosemodell /4/ soll für alle Schüsse einer Waffe mit einer bestimmten Munition gültig sein. Dies bedeutet beispielsweise, daß ein Parametersatz den mittleren Einzelereignispegel des Geschößknalles für alle Schüsse einer Haubitze mit einer bestimmten Ladung liefern muß. Mit ein und der selben Ladung kann aber durch Veränderung des Elevationswinkels ein bestimmter Schußweitenbereich erreicht werden. Damit ergeben sich u.U. sehr unterschiedliche Flugbahnen mit sehr unterschiedlichen Geschößknallfeldern. Zudem wird häufig im Laufe einer Übung das Ziel in den Grenzen eines ausgedehnten Zielgebietes variiert. Dies führt ebenfalls zu einer Unsicherheit bei der Beschreibung der Flugbahn. Die Bereitstellung eines Parametersatzes für die Berechnung des mittleren Einzelereignispegels für das Prognosemodell erfordert daher nicht nur eine Mittelung der Pegel, sondern auch eine sachgerechte Mittelung über die Einflüsse der Variation der Flugbahn.

Dies ist einerseits bei der Wahl der Meßsituation bzw. Berechnungssituation zu beachten, die der Bestimmung des Parametersatzes zugrunde gelegt wird. Andererseits muß das Geschößknallfeld so nachbehandelt werden, daß die für Einzelereignisse scharfen Übergänge vom Gebiet mit Geschößknall in das Gebiet ohne Geschößknall im Sinne der oben geschilderten Mittelung über die Einflüsse der Variation der Flugbahnen ausgeglichen werden.

Abb. 1 skizziert im Überblick die Vorgehensweise des Verfahrens bei der Ermittlung der Modellkoeffizienten. Die folgende Beschreibung erläutert die dort aufgezeigten Schritte.

2.2 Optimalanpassung an das physikalische Modell

Ausgangspunkt des Verfahrens sind Pegelmessungen in einigen signifikanten Orten des Geschößknallfeldes eines typischen Schusses der betrachteten Waffe. Aus den für die Meßsituation gültigen Flugbahndaten läßt sich zunächst mit Hilfe des in /3/ beschriebenen Berechnungsverfahrens die geometrische Dämpfung des Geschößknalles zu den einzelnen Meßorten berechnen. Aus der Ablage dieser theoretischen Pegelminderun-

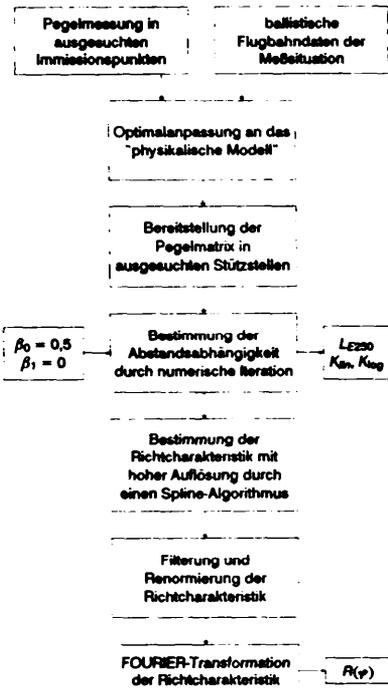


Abb. 1 Überblick über das Bestimmungsverfahren der Modellkoeffizienten

werden. Bei Geschößknallen kann nach der hier vorgestellten Methode keine Aussage über β_1 gewonnen werden, da bereits im physikalischen Modell die Abhängigkeit der spektralen Hauptkomponente des Geschößknalles von der Fluggeschwindigkeit vernachlässigt wurde.

$$D = 10 \lg \left(\frac{d}{250 \text{ m}} \right) + \beta_0 \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right)^{\beta_1} (d - 250 \text{ m}) - K_{\min} (d - 250 \text{ m}) - K_{\log} \lg \left(\frac{d}{250 \text{ m}} \right) \quad \text{Gl. 1}$$

Es wird daher für Geschößknalle $\beta_1 = 0$ angenommen. Da für $\beta_1 = 0$ die anpassende Wirkung des Termes mit β_0 im Koeffizienten K_{\min} aufgefangen wird, kann ohne Einschränkung der Optimalanpassung β_0 auf einen sachgerechten Wert von $-0,5 \text{ dB/km}$ gesetzt werden. Damit müssen lediglich K_{\min} und K_{\log} aus der Pegelmatrix abgeleitet werden. Dies erfolgt über eine numerische Iterationsrechnung unter Variation des Paares K_{\min} , K_{\log} . Da K_{\min} und K_{\log} nur die Pegelminderung in Abhängigkeit vom Abstand beschreiben, darf auch das Optimierungskriterium der Variation nur auf die Pegelminderung im Pegelfeld, d.h. auf die Pegelminderung entlang der 19 Strahlen, abstellen. Für jedes Iterationspaar K_{\min} , K_{\log} werden deshalb die Pegel temporär um die sich für jeden dieser Strahlen aus dem Ansatz ergebenden Modellpegel in 250 m Abstand vermindert (Subtraktion der Richtcharakteristik). Danach wird aus der Summe der Fehlerquadrate für jede Stützstelle auf den einzelnen Strahlen das Optimierungskriterium gebildet, das im Sinne einer Optimalanpassung in ein Minimum zu führen ist. Durch diese Vorgehensweise wird dem Pegelfeld eine Separation der Winkelabhängigkeit von der Abstandsabhängigkeit, wie im Prognosemodell gefordert ist, aufgezwungen.

2.5 Bestimmung des Emissionspegels (L_{E250})

Nach der Bestimmung der Abstandsabhängigkeit läßt sich der Emissionspegel in 250 m Abstand unterhalb der Flugbahn direkt aus der Pegelmatrix und der angepaßten Modellgleichung des Prognosemodells durch Extrapolation berechnen.

gen zu den aus den Meßwerten resultierenden Pegelminderungen wird durch eine lineare Regression dieser Ablage gegen die Laufstrecke des Geschößknalles der Koeffizient eines laufstreckenproportionalen Dämpfungstermes bestimmt. Das Ergebnis dieses ersten Schrittes ist ein optimal angepaßtes "physikalisches Modell" zur Berechnung des gesamten Geschößknallfeldes der Meßsituation unter Benutzung der konkreten Flugbahndaten. Dieses Verfahren ist vollständig in /1/ beschrieben.

2.3 Bildung einer Pegelmatrix

Da für die weiter unten auszuführenden numerischen Iterationen Direktzugriffe auf das "physikalische Modell" zu sehr langen Rechenzeiten führen, wird zunächst mit Hilfe des "physikalischen Modells" eine Pegelmatrix zur Beschreibung des Geschößknallfeldes bereitgestellt. Wegen der Symmetrie des Problems in bezug auf die Flugbahn und weil im gesamten rückwärtigen Winkelbereich bezogen auf die Flugrichtung (0°) kein Geschößknall auftritt, reicht die Betrachtung des ersten Quadranten. Die Matrixelemente enthalten den Pegel auf 19 Strahlen im Winkelbereich $0^\circ - 90^\circ$ mit einer Schrittweite von 5° und in 51 Abständen im Bereich von 0 m - 50000 m mit einer Schrittweite von 1000 m.

2.4 Bestimmung der Abstandsabhängigkeit

(β_0 , β_1 , K_{\min} , K_{\log})

Die Pegelminderung auf dem Ausbreitungsweg wird im Prognosemodell nach Gl.1 bestimmt. (Darin bedeutet d der Abstand zwischen Abschußpunkt und Immissionspunkt, s. /4/.) Der Koeffizient β_0 beschreibt die Absorption der Frequenzhauptkomponente in Luft und der Koeffizient β_1 die Änderung von β_0 über große Laufwege wegen der Verschiebung der Hauptspektrallinie im Signal des Geschößknalles. Dieser pragmatische Ansatz ist im Prognosemodell für einige Knallereignisse erforderlich, da Einzelpegel betrachtet

2.6 Bestimmung der Winkelabhängigkeit (Richtcharakteristik $R(\varphi)$)

Zur Ermittlung der Winkelabhängigkeit werden die Pegel in 250 m Abstand mit den nun gültigen K_{lin} und K_{log} für jede der 19 Richtungen berechnet. Durch einen Spline 3. Ordnung wird diese Winkelabhängigkeit auf eine "scheinbare" Auflösung von 1° expandiert. Diese Expansion ist erforderlich, um den steilen Abfall der Richtcharakteristik außerhalb des in der Regel scharf begrenzten Geschoßknallgebietes erfassen zu können. Die sich ergebende Richtcharakteristik im ersten Quadranten wird unter Beachtung der Symmetriebedingung und der verschwindenden Pegel in den zur Schießrichtung rückwärtigen Quadranten zum Vollkreis ebenfalls in 1° Schritten erweitert. Man erhält nach diesem Schritt eine Richtcharakteristik, die durch 360 Punkte beschrieben ist.

2.7 Nachbehandlung der Richtcharakteristik

Die bisher erhaltene Richtcharakteristik beschreibt zwar die Meßsituation optimal, ist jedoch im Hinblick auf die repräsentative Benutzung im verallgemeinerten Parametersatz ungeeignet. Eine sachgerechte Mittelung über die Einflüsse der Variation der Flugbahn läßt sich durch eine Faltung der Richtcharakteristik mit einer Gaußfunktion mit einer Halbwertsbreite von 45° erreichen. Durch diese "Filterung" wird die Variationsmöglichkeit der Flugbahn plausibel abgebildet und der Übergang zwischen dem Gebiet ohne und mit Geschoßknall vermindert.

Nach der Filterung wird die Richtcharakteristik so renormiert, daß im Bezugspunkt (250 m, 0°) keine Korrektur erforderlich ist. Die dadurch in allen Bereichen erzwungene Pegelerhöhung oder -erniedrigung (typisch kleiner 0,5 dB) kann im Hinblick auf die systemimmanenten Prognoseunsicherheiten vernachlässigt werden.

Die FOURIER-Koeffizienten der nun vorliegenden Richtcharakteristik werden als Richtcharakteristik $R(\varphi)$ in die Datenbank aufgenommen, vgl. /5/.

3. Beispiel

Im folgenden werden die Ergebnisse für einen Schuß einer 105 mm Haubitze vorgestellt. Aus Tab. 1 ist die zur Flugbahn relative Lage der 7 Meßpunkte, die dort gemessenen mittleren Pegel einer Serie aus 20 Schuß, die sich aus dem physikalischen Modell ergebende Schallaufstrecke der Knalle und die sich nach Optimalanpassung nach diesem Modell ergebenden Pegel und die aus dem angepaßten Prognosemodell folgenden Pegel zu entnehmen. Abb. 2 zeigt das Geschoßknallfeld, dessen Kurven gleicher Emissionsorte infolge der ballistischen Flugbahn des Geschosses über ca. 9000 m immer enger werdende Parabeln bilden. Abb. 3 zeigt die Richtcharakteristik vor und nach der Filterung. In Abb. 4 sind die nach der Richtcharakteristik des Prognosemodells auf die 0°-Richtung zurückgerechneten Meßwerte zusammen mit der Pegelmin- derung nach dem Prognosemodell dargestellt.

Nr.	rel. Lage zur Flugbahn		Knall- lauf- strecke	Immissionspegel L_{cx}		
	längs	quer		Mes- sung	phys. Modell	Pro- gnose
	m	m	m	dB(C)	dB(C)	dB(C)
1	250	0	116	115,6	114,1	116,9
2	4450	1670	3845	89,6	92,6	93,9
3	6200	0	4526	91,4	91,5	90,9
4	10000	840	8287	84,5	82,1	82,6
5	9300	3900	9059	78,8	80,1	80,9
6	9300	6250	10806	77,8	76,5	76,7
7	12000	5000	11918	74,4	74,5	74,8

Tab. 1 Relative Lage der Meßpunkte und Gegenüberstellung der gemessenen und aus den Modellen gewonnenen Pegel

Bei der Ermittlung der Koeffizienten K_{lin} und K_{log} ergibt sich nach der Iteration ein mittlerer Fehler von 0,87 dB und eine maximale Ablage von 2,8 dB zu den Stützstellen des physikalischen Modells. Nach der Filterung ist eine Pegelkorrektur der Richtcharakteristik von 0,23 dB erforderlich. Der Vergleich der Meßwerte mit den Ergebnissen zeigt einerseits, daß mit dem pragmatischen Ansatz einer Punktschallquelle mit Richtcharakteristik eine gute Prognose der Immissionspegel erreicht werden kann. Andererseits muß festgehalten werden, daß bei einer Variation der Flugbahn - bei der verwendeten Ladung der Haubitze kann ein Schußweitenbereich von ca. 8000 m bis 11000 m erreicht werden, wobei die maximale Flughöhe von ca. 1000 m bis 2000 m variieren kann - größere Prognoseunsicherheiten zu erwarten sind.

Das ausgewählte Beispiel ist ein einfaches Geschoßknallfeld, da die Flugbahn relativ flach verläuft. Bei Flugbahnen mit größeren maximalen Flughöhen bleibt in Flugrichtung ein keilförmiges Gebiet frei von Geschoßknall. Durch das hier vorgestellte Verfahren wird dieses Gebiet durch Extrapolation "aufgefüllt". Ähnliches gilt für Raketen (beschleunigte Flugbahnen), bei denen der zweifach eintreffende Geschoßknall als Summe prognostiziert wird.

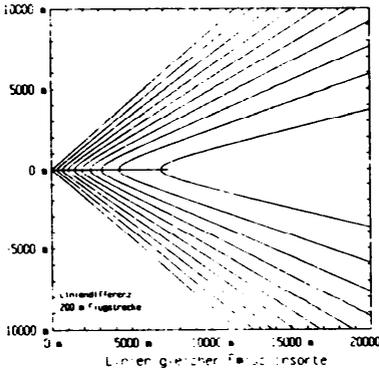


Abb. 2 Projektion der Schußbahn und Linien gleicher Emissionsorte auf der Erdoberfläche

4. Schlußbemerkung

Das hier vorgestellte Verfahren folgt dem in der Anlage des gesamten Prognoseverfahrens in /4/ zugrunde liegenden Gedanken der überschlägigen Prognose. Gerade bei der Betrachtung des Geschößknalles können sich im Einzelfall und insbesondere bei außergewöhnlichen Übungssituationen große Abweichungen ergeben. Die kritischen Bereiche sind die seitlichen Grenzbereiche des Geschößknallgebietes und die Bereiche in Flugrichtung hinter dem Zielgebiet.

Es soll noch einmal deutlich herausgestellt werden, daß diese Abweichungen allein eine Folge der Berücksichtigung der Flugbahnvariationen sind. Bei bekannter Flugbahn zeigen die Prognosen auf der Basis des "physikalischen Modells" eine im Vergleich zu den Prognosen von Mündungs- bzw. Explosionsknallen kleinere Unsicherheit. Dies ist auf den vernachlässigbaren Einfluß der Bodenbeschaffenheit bei der Ausbreitung des Geschößknalles zurückzuführen. Der erhebliche Rechenaufwand, der mit der Benutzung des "physikalischen Modells" verbunden ist, macht seinen Einsatz im Rahmen eines nachvollziehbaren und standardisierbaren Modells allerdings unmöglich.

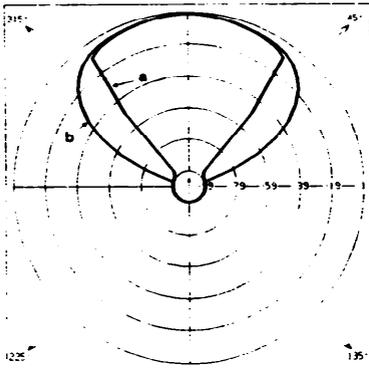


Abb. 3 Richtcharakteristik vor (a) bzw. nach der GAUSS-Filterung (b)

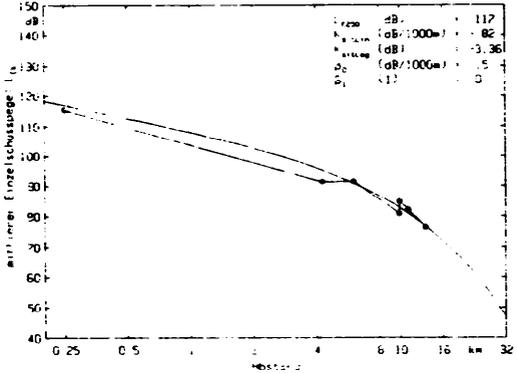


Abb. 4 Ausbreitungskurve des Prognosemodells in Flugrichtung (0°) und die auf diese Richtung mit Hilfe der Richtcharakteristik nach Abb. 3 zurückgerechneten Meßwerte

5. Literatur

- /1/ Hirsch, K.-W.; Buchta, E.: Zur Berücksichtigung des Geschößknalles bei der Berechnung von Lärmkarten für die Umgebung von Truppenübungsplätzen, Fortschritte der Akustik - DAGA'91, Bad Honnef: DGP-GmbH 1991, S 539 - 542
- /2/ "Impulse Sound Propagation For Environmental Assessment", ANSI-Standard S12.17/227, 4. Draft, 04.03.1993
- /3/ "Beurteilung von Schießgeräuschmissionen durch großkalibrige Waffen", Runderlaß des Ministeriums für Umwelt des Landes Niedersachsen vom 20.07.1993
- /4/ Hirsch, K.-W.; Buchta, E.: Zum Standardverfahren für die Berechnung der Schallmissionen in der Umgebung von Truppenübungsplätzen, Fortschritte der Akustik - DAGA'93, Bad Honnef: DGP-GmbH 1993, S 656 - 659
- /5/ Hirsch, K.-W.; Buchta, E.; Trimpop, M.: Zur mathematischen Darstellung der Richtcharakteristik einer Punktschallquelle, Fortschritte der Akustik - DAGA'94, im vorliegenden Band

Diese Untersuchungen werden vom Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) gefördert.