Vergleich verschiedener Ansätze zur Prognose der Schallimmission von Geschossknallen

K.-W. Hirsch, M. Trimpop, Institut für Lärmschutz, Düsseldorf

Einleitung

Schießlärm wird durch drei akustische Quellen bestimmt: durch den Mündungsknall, den Geschossknall (Überschallknall durch die Projektile) und - in einigen besonderen Fällen – durch einen Knall im Zielbereich (Explosion oder Kugelschlag). Solange Schießlärm in ausgewählten Immissionsorten auf der Basis von Messungen beurteilt wird, VDI 3745, Blatt 1, wird das Schallereignis dieser Quellen gemeinsam erfasst; Es ist unnötig zu klären, welche der Quellen am Immissionsort pegelbestimmend ist. (Dies gilt selbstverständlich nicht für die Planung von Schallschutzmassnahmen auf Grund von Messungen; dann muss die Quelle und der Ausbreitungspfad identifiziert werden.) Bei der Fortschreibung der VDI 3745 im Hinblick auf eine Prognoserechnung für Schießlärm (als DIN ISO 17201), müssen diese Quellen getrennt betrachtet werden.

In der Regel wird der Beitrag des Geschossknalles im Vergleich zum Mündungsknall als zweitrangig betrachtet, weil einerseits die typischen Aufbauten auf einer Schießanlage eine direkte Ausbreitung des Geschossknalles verhindern und andererseits die den Knall prägenden hohen Frequenzanteile zu hohen Ausbreitungsdämpfungen infolge Luftabsorption führen. Allerdings wird im militärischen Bereich zunehmend auch auf Truppenübungsplätzen mit Handwaffen geschossen, so dass eine Abschirmung nicht mehr vorausgesetzt werden kann. Im sportlichen und jagdlichen Bereich ist inzwischen klar, dass der Geschossknall beim Skeet- und Trap-Schießen in wichtigen Immissionsbereichen pegelbestimmend sein kann. Es ist deshalb erforderlich, Quell- und Ausbreitungsmodelle für Geschossknalle zu entwickeln und im Rahmen der Schießlärmprognose zu berücksichtigen.

Inzwischen liegt der für die Normung zuständigen ISO/CEN/JWG51 ein Vorschlag für die DIN ISO 17201, Blatt 4 vor, der ein Geschossknallmodell auf der Basis einer Schalldruckprognose beschreibt, im folgenden kurz als Druckmodell bezeichnet. Dieses anspruchsvolle Modell berücksichtigt neben den nichtlinearen Effekten auch Besonderheiten bei der Ausbreitung der kohärenten Knalle. Man benötigt neben Informationen über die Flugbahn und die Abnahme der Geschossgeschwindigkeit detaillierte Angaben über Durchmesser, Länge und Form des Geschosses, um zu einer Prognose zu gelangen. Das Modell ist in /1/ näher beschrieben.

Die Grundgleichungen dieses Modells sind für den Bereich seitlich zur Flugbahn (eigentlicher Geschossknall):

$$L_E^D(r) = L_0 + 10\lg\left(\frac{d_b^3}{l_b^{3/4} r_0^{9/4}}\right) + 10\lg\left(\frac{M^{9/4}}{\left(M^2-1\right)^{3/4}}\right) - A_{nlin} - A_{geo}$$

$$A_{nlin} = 5\lg\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{\left(M^2-1\right)}{r_0 k}}\ln\left(\frac{r+\frac{M^2-1}{2k}+\sqrt{r^2+r\cdot\left(\frac{M^2-1}{k}\right)}}{r_0+\frac{M^2-1}{2k}+\sqrt{{r_0}^2+r_0\cdot\left(\frac{M^2-1}{k}\right)}}\right)\right)$$

$$A_{geo} = 10\lg\frac{r^2 k + r\left(M^2-1\right)}{{r_0}^2 k + r_0\left(M^2-1\right)}$$

In den Gleichungen für den Schalldosispegel L_E^D dieses Modells bedeutet: M die Machzahl, d_b, l_b effektiver Durchmesser bzw. Länge des Geschosses, $r_0 = 1$ m, $L_0 = 161{,}5$ dB, r die Laufstrecke des Knalles, k der Quotient aus Geschwindigkeitsverlust pro Meter und der Schallgeschwindigkeit. A_{nlin} ist der Korrekturterm für den Einfluss der Nicht-Linearität. A_{geo} ist die geometrische Dämpfung. Die Luftabsorption und weitere Einflüsse werden hier nicht diskutiert.

Dieses Modell liefert nur sinnvolle Antworten für M > 1,01. Es lässt daher einen Winkelbereich von ca. 16° vor dem Geschoss aus. Dieser Bereich ist beim Schießen mit Pistolen aber insbesondere beim Skeet und Trap-Schießen von Bedeutung. Das Schrot wird schon nach kurzer Flugstrecke (10 – 20 m) unterschallig und erzeugt dabei in einem Bereich von typisch ±20° um die Flugbahn Geschossknall, der bei der Prognose nicht vernachlässigt werden kann.

Neben diesem anspruchsvollen Modell soll die ISO DIN 17201 in Blatt 2 auch eine Näherungsverfahren anbieten. Dieses Verfahren verfolgt einen physikalisch anderen Ansatz. Es geht vom Energieverlust des Geschosses pro Meter auf der Flugbahn aus und prognostiziert unter Annahme eines empirischen Wirkungsgrades die abgestrahlte akustische Energie. Der Ansatz bestimmt dann mit Hilfe der geometrischen Dämpfung und der Annahme ‚linearer Akustik' nach einer ausreichend großen Laufstrecke den Schalldosispegel L_E^E. Dieser Modellansatz - im folgenden als Energiemodell bezeichnet - wird in /2/ im Einzelnen vorgestellt. Die Pegelgleichung dieses Verfahrens lautet

$$L_E^E(r_S) = 10\lg\left[\frac{\rho c}{p_0^2}\frac{f_{ac}\, e\, l}{2\pi l^2\left[\sin^2\theta_S\left(\frac{\cos\theta_S}{2}+\frac{r_S}{l}\right)+\frac{r_S^2}{l^2}\sin\left(\theta_S-\frac{\varepsilon_S}{2}\right)\sin\varepsilon_S\right]}\right]$$

In dieser Gleichung bedeutet: ρc die Luftimpedanz, $p_0 = 20\mu$Pa, e der Energieverlust des Geschosses pro Meter, f_{ac} den empirisch bestimmten akustischen Wirkungsgrad (≈ 0,25 für die bisher untersuchten Geschosse), l die Länge des betrachteten Flugbahnabschnittes, r_s die Laufstrecke des Knalles vom Ende von l zum Immissionsort, θ_s den Abgangswinkels des Knalles am Beginn von l und ε_s die Differenz zwischen den Abgangswinkeln am Anfang und am Ende von l. Der Zähler des zweiten Terms der obigen Gleichung beschreibt die akustische Energie von l; der Nenner gibt die geometrische Dämpfung an, also die Verteilung der Energie auf die sich im Abstand r_s zu l zugeordneten Fläche.

Vergleich der Modelle

Beide Modelle unterscheiden sich zunächst in den erforderlichen Eingangsdaten. Das Druckmodell hängt empfindlich von der Form des Geschosses ab, die zuverlässig bekannt sein muss. Beim Energiemodell geht diese Information empirisch in f_{ac} ein. Beide Modelle benötigen die Geschossgeschwindigkeit und deren Abnahme (Druckmodell), bzw. die Abnahme der kinetischen Energie (Energiemodell). Als Zielgröße prognostizieren beide den Schalldosispegel des Ereignisses. Die Grundlage ist allerdings verschieden. Das Druckmodell liefert den Dosispegel direkt auf der Basis des Druckes. Das Energiemodell verteilt die abgestrahlte Energie auf der sich geometrisch ergebenden Fläche und gibt unter Berücksichtigung der Impedanz der Luft und unter der Annahme linearer Akustik den zugehörigen akustischen Dosispegel an. Aus dieser Umrechnung folgt direkt, dass das Energiemodell die nicht-linearen Schalldruckphänomene nicht beschreiben kann, dies aber auch nicht will, weil in der Regel Immissionsorte nicht so nahe an der Geschossbahn liegen, dass diese Effekte für diesen Zweck eine Rolle spielen dürfen.

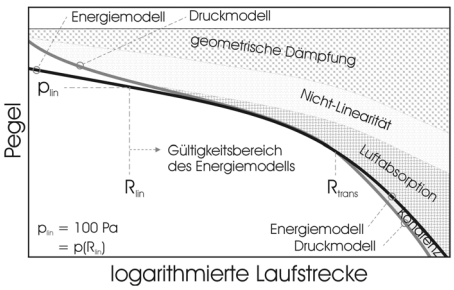

Abb. 1 Schematische Darstellung der Geschossknallmodelle entlang der Laufstrecke des Knalles

Wesentliche Unterschiede ergeben sich direkt aus dem Ansatz: Grundsätzlich hat das Druckmodell immer dann Probleme, wenn sich die Geschwindigkeit des Geschosses der Schallgeschwindigkeit nähert; dann divergieren die Grundgleichungen dieses Modells. Das Druckmodell kann deshalb den Knall von Geschossen im Bereich vor der Waffe nicht beschreiben, wenn das Geschoss unterschallig wird (Pistolenschüsse, Skeet- und Trap-Schüsse). Dies ist im Energiemodell kein Problem, weil es sich auf den Energieverlust eines Flugbahnabschnittes stützt und deshalb auch die Energie des letzten Überschallabschnittes stetig und plausibel beschreiben kann.

Das Druckmodell hat einen Term, der die Nichtlinearität im Nahbereich zuverlässig beschreibt. Dazu gehört aber nicht nur ein zur Quelle

hin nicht-linearer Anstieg des Spitzendruckes, sondern auch ein laufstrecken-abhängiges Spektrum. Das Energiemodell kann lediglich ein Spektrum angeben, das sich nach einer ausreichend großen Laufstrecke ergibt, wo ‚lineare Akustik' angenommen werden kann.
Dies hat erhebliche Folgen für die Berechnung weiterer Phänomene auf dem Ausbreitungsweg. Durch die Einführung des nicht-linearen Terms im Druckmodell ist bei der Berechnung dieser Einflüsse das lokale Spektrum zu berücksichtigen; dies gilt beispielsweise bei der Schirmrechnung, aber auch die Luftabsorption wird laufstrecken-abhängig. Beim Energiemodell entstehen diese Probleme nicht, weil das Spektrum für die gesamte Laufstrecke unverändert bleibt. Allerdings ist es kaum sachgerecht, Schirmwirkungen in der Nähe der Quelle mit dem Spektrum des Energiemodells zu berechnen. Ansätze für diese Phänomene nach der DIN ISO 9613 sind also für das Druckmodell und das Energiemodell jeweils anders. Abb. 1 zeigt schematisch den Einfluss der Ausbreitungsphänomene. Es ist zu erkennen, dass beide Modelle nahe der Quelle und in größeren Abständen von einander abweichen. Die geometrische Dämpfung ist in beiden Modellen nicht eine einfache Korrektion, sie ändert sich in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverlust und von der Laufstrecke.

Beispiele

Im Folgenden werden die Modelle für drei Beispiele verglichen:

Art	Mündungs-geschwin-digkeit	Geschwin-digkeits-verlust	Masse	effektiver Durch-messer	effektive Länge
	m/s	(m/s)/m	g	mm	mm
155	560	0,1	40k	155	150
7.62	780	0,8	8	7,62	7
Schrot	420	10	0,12	4,0	2

Die Beispielrechnungen werden ohne Luftabsorption, beim Energiemodell mit einem l = 10 mm durchgeführt. Die Flugbahnen der Geschosse enden in den Rechnungen erst bei 5000 m, so dass alle Geschosse unterschallig werden. Bei ‚Schrot' wurde der ‚Einzelkorn-

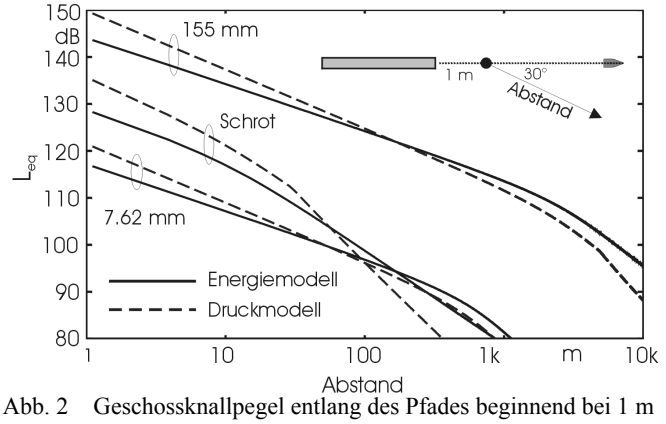

Abb. 2 Geschossknallpegel entlang des Pfades beginnend bei 1 m vor der Mündung in Richtung 30° für ein 155 mm und ein 7.62 mm Geschoss bzw. eine Schrotladung

Pegel' um 20 dB erhöht (typisch 100 Körner je Ladung).
Vergleicht man die Pegelprognosen entlang eines Strahls seitlich durch das Geschossknallfeld, s. Abb. 2, bestätigt sich die allgemeine Aussage in Abb. 1. Für alle drei Beispiele prognostiziert das Druckmodell im Nahbereich höhere Pegel, im Fernbereich kehrt sich diese Aussage wegen des auch dort immer noch wirksamen Einflusses von A_{nlin} um. Bei Schrot erkennt man bei ca. 50 m das Einsetzen der hier nicht weiter diskutierten Korrektion im Druckmodell wegen des Verlustes der Kohärenz, die ab einem durch die Turbulenzlänge bestimmten Abstand (R_{trans}) den Pegel weiter reduziert.
In den Abb. 3 und 4 ist die Prognose auf einem Halbkreis (Radius 250 m bzw. 1000 m) dargestellt. Das Energiemodell liefert in weiten Bereichen höhere Pegel. Dies ließe sich durch eine andere Wahl des empirischen f_{ac} ausgleichen. Hier wurde durchgängig $f_{ac} = 0{,}25$ angenommen; Dieser Ansatz koppelt beide Modelle ungefähr an der Stelle, wo der Spitzenpegel des Knalles 100 Pa beträgt, man also im Weiteren näherungsweise von linearer Akustik ausgehen kann.
Für beide Einzelgeschosse ist die Übereinstimmung zufriedenstellend. Das Energiemodell kann die aufwändige Prognose des Druckmodells dort nachbilden, wo es gültig ist. Wie oben ausgeführt, kann das Druckmodell wegen M > 1,01 keine Aussagen treffen, wenn die Geschosse unterschallig werden. Nur das Energiemodell liefert hier Voraussagen, vgl. Abb. 3 für Schrot und Abb. 4 für Kaliber 7.62 und Schrot. Die Prognose des Energiemodells ist für diesen Bereich stetig und plausibel. In der Praxis kommt dieser Fall zwar bei 7.62 nicht vor, weil stets auf eine nahes Ziel geschossen wird, bei Pistolen aber, die hier nicht gezeigt sind, trifft dies standardmäßig zu.

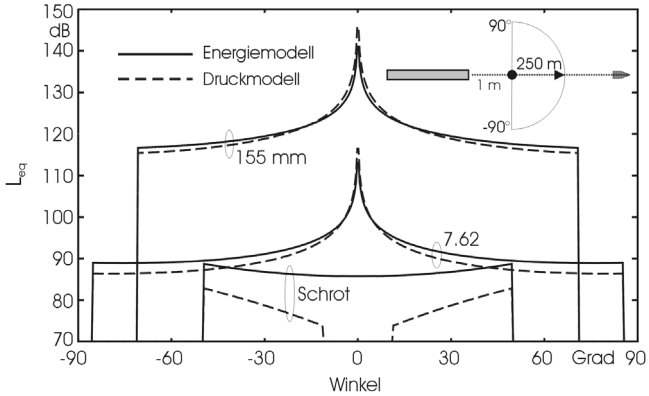

Abb. 3 Geschossknallpegel auf einem Halbkreis um den Punkt 1 m vor der Mündung mit dem Radius 250 m für ein 155 mm und ein 7.62 mm Geschoss bzw. eine Schrotladung

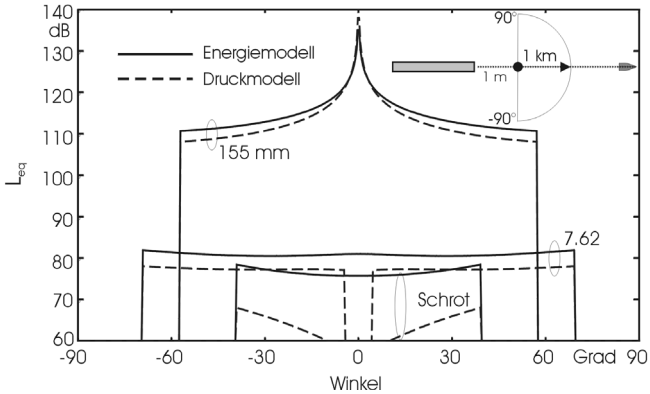

Abb. 4 Geschossknallpegel auf einem Halbkreis um den Punkt 1 m vor der Mündung mit dem Radius 1000 m für ein 155 mm und ein 7.62 mm Geschoss bzw. eine Schrotladung

Zusammenfassung

Das von der JWG51 als ISO 17201 Blatt 4 favorisierte Druckmodell für den Geschossknall ist ein aufwendiges Verfahren, das auch die nichtlinearen Effekte beschreibt. Dies ist für die Betrachtung des Geschossknalles im Nahbereich, z.B. zur Auslegung von Schallschutzmaßnahmen erforderlich. Das Energiemodell ist als Näherungsverfahren (ISO 17201 Blatt 2) vorgesehen. Es verlangt eine nicht so detaillierte Kenntnis über das Geschoss, kann empirisch angepasst werden und hat deutlich einfachere Grundgleichungen. Beide Modelle liefern im Rahmen ihrer Gültigkeitsbereiche zufriedenstellend ähnliche Pegelprognosen.
Wegen der Beschränkung des Druckmodells auf Machzahlen > 1,01 kann dieses Modell bestimmte Bereiche des Geschossknallfeldes nicht beschreiben. Hier ist das Energiemodell eine plausible Ersatzlösung.
Das Druckmodell als nichtlineares Modell passt nicht zu den Prognoseverfahren üblicher Ausbreitungsrechnungen, z.B. nach DIN ISO 9613. Das Energiemodell liefert hierzu die notwendigen Näherungen und passt eher zu derartigen Ansätzen. Es ist allerdings durchaus zweifelhaft, ob Schießlärm insgesamt wegen der Kohärenz der Knalle durch Verfahren nach 9613-2 überhaupt beschrieben werden kann. Dieser Aspekt wird in naher Zukunft die Diskussion um die Prognose von Schießlärm bestimmen.

Literatur

/1/ van den Berg, F.H.A; Noordhoek, I.M., Otter, G.C.J.:"A practical method for calculating the long-range sound propagation of projectile noise", Proceedings Internoise 2000, Nizza, S.791-794
/2/ Hirsch, K.-W.: " An energy model for projectile sound", als Beitrag zur Internoise 2001, Den Haag, in Vorbereitung

Diese Untersuchungen werden vom Bundesministerium der Verteidigung gefördert.