

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

K.-W. Hirsch, E. Buchta

(Institut für Lärmschutz, Düsseldorf)

Einleitung

Bei der Berechnung der Lärmbelastung durch Schießgeräusche für die Umgebung von Truppenübungsplätzen wird bisher der Geschößknall nicht berücksichtigt. Die Vernachlässigung dieses Beitrages zum Belastungspegel führt in davon besonders betroffenen Bereichen zu einer erheblichen Unterschätzung der Lärmbelastung.

Abb. 1 zeigt den Zeitverlauf des Schalldruckes des Schießgeräusches beim Abschuß einer Haubitze in ca. 8 km vor und ca. 4 km seitlich von der Abschußstelle. Das Schießgeräusch wird als Doppelknall gehört, wobei der zuerst eintreffende Geschößknall wegen seines höherfrequenten Spektrums deutlich lauter empfunden wird als es der Unterschied der Spitzenschalldrucke beider Knalle ausdrückt.

Die Berücksichtigung des Geschößknalles bei der Berechnung der Lärmbelastung erfordert ein Ausbreitungsmodell für dieses Geräusch. Während beim Mündungs- und Einschlagknall einfache ortsfeste Kugelschallquellen angenommen werden können, entartet beim Geschößknall bereits die Herleitung der sogenannten geometrischen Dämpfung in eine aufwendige Berechnung der Geometrie.

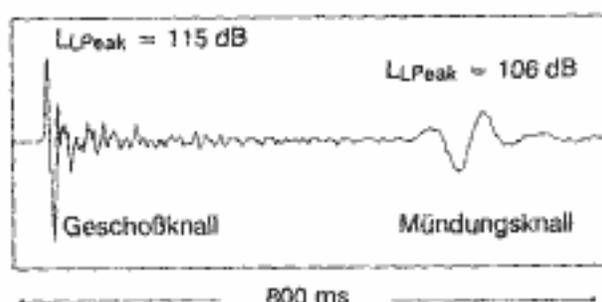


Abb. 1 Zeitverlauf des Schalldruckes eines Schießgeräusches bei einem Haubitzenschuß, aufgenommen ca. 8 km vor und ca. 4 km seitlich vom Abschußpunkt

Methode zur Berechnung der geometrischen Dämpfung

Die Entstehung des Geschößknalles wird anschaulich durch eine konstruktive Superposition der Stoßwellenfronten des mit Überschall fliegenden Geschosses erklärt. Bei einer gradlinigen Flugbahn mit konstanter Geschwindigkeit ($v = \text{const.}$) bilden die Phasenflächen des Knalles den sogenannten MACH'schen Kegel, der sich vom Geschöß aus in rückwärtiger Flugrichtung mit dem Winkel $\theta = \arcsin(c/v)$ öffnet (c Schallgeschwindigkeit). Dieses Bild ist gleichbedeutend mit der Vorstellung, daß der Knall von einer bewegten Quelle mit folgender Richtcharakteristik stammt: Die Quelle strahlt nur Schall mit Wellenzahlvektoren \underline{k} ab, deren Richtungen die Erzeugenden eines Kegels definieren. Dieser hier sog. „Wellenzahlkegel“ ist vom Geschöß aus nach vorne gerichtet und hat einen Öffnungswinkel von $\pi - \theta$. Auf dem Mantel des Wellenzahlkegels wird der Knall in allen

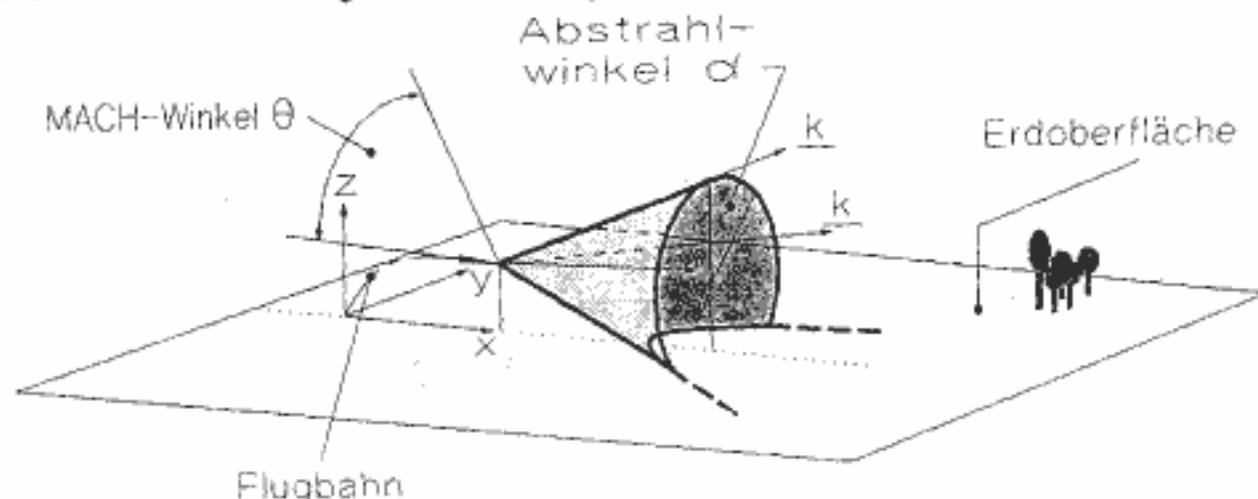


Abb. 2 Zur Definition des Wellenzahlkegels und der Koordinaten und Winkelbezeichnungen

Umfangsrichtungen α isotrop abgestrahlt. Abb. 2 veranschaulicht diesen Kegel und definiert das Koordinatensystem, in dem im folgenden gerechnet wird.

Die Schallabstrahlung der Quelle läßt sich durch eine Schalleistungsdichte Γ charakterisieren. Γ beschreibt die Schalleistung pro differentieller Flugstrecke ds auf der Flugbahn und pro differentiellem Winkelbereich $d\alpha$. Durch die geometrischen Größen ds und $d\alpha$ werden vier Wellenzahlvektoren festgelegt - zwei Vektoren auf dem Wellenzahlkegel von der Stelle s auf der Flugbahn in die Richtung α bzw. $\alpha + d\alpha$ und zwei Vektoren auf dem Wellenzahlkegel an der Stelle $s + ds$ in Richtung α bzw. $\alpha + d\alpha$. Die Richtungen dieser Vektoren definieren einen sich aufweitenden keilförmigen Raumausschnitt, in den die Leistung $dN = \Gamma ds d\alpha$ abgestrahlt wird. Für die Schallintensität I in diesem Raumausschnitt gilt dann die Beziehung $I = (dN/dA)(dA'/dA)$. Dabei ist dA' eine Schnittfläche durch den keilförmigen Raumausschnitt senkrecht zur Richtung des mittleren Wellenzahlvektors, der von der Stelle $s + ds/2$ in Richtung $\alpha + d\alpha/2$ ausgeht. Der Betrag der Intensität ist bei konstantem dN umgekehrt proportional zum Flächeninhalt dA . Der reziproke Flächeninhalt $dA^{-1}(x, y, z)$ ist daher ein Maß für die geometrische Dämpfung des Geschoßknalles.

Entscheidend für die Lärmbelastung ist die Abhängigkeit der geometrischen Dämpfung für die Erdoberfläche ($z = 0$). Die Pegelgleichung der geometrischen Dämpfung für einen Immissionspunkt $(x_p, y_p, 0)$ lautet dort $\Delta L_{geom} = 10 \lg [(dA(x_0, y_0, 0) / (dA(x_p, y_p, 0))]$. $(x_0, y_0, 0)$ ist ein frei wählbarer Bezugspunkt auf der Erde.

Nur für besonders einfache Spezialfälle läßt sich ΔL_{geom} analytisch berechnen. Für allgemeine ballistische Bahnen läßt sich ΔL_{geom} numerisch bestimmen, wenn die Flugbahn $\underline{v}(s, t)$ bekannt ist. Die Koordinaten für den Schnittpunkt $(x_p, y_p, 0)$ der Erdoberfläche mit der Verlängerung des Wellenzahlvektors von dem Bahnpunkt $(x_s, 0, z_s)$ in Richtung α lassen sich aus folgenden Gleichungen berechnen:

$$x_p = x_s - \frac{(M+1) z_s \sin \varphi \cos \varphi \pm \sqrt{(M+1)^2 z_s^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi - z_s^2 [(M^2+1) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi - M(\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi)]}}{M \sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi}$$

$$y_p = \tan \alpha (\sin \varphi (x_s - x_p) - z_s \cos \varphi)$$

$$\text{mit } M = \frac{\tan^2 \alpha + 1}{\frac{v^2}{c^2} - 1}$$

Darin bedeutet φ die Neigung der Bahn in $(x_s, 0, z_s)$ und v/c das Verhältnis der Fluggeschwindigkeit zur lokalen Schallgeschwindigkeit.

Allgemeine ballistische Flugbahnen

Die Berechnung der Flugbahn selbst ist ein eigenständiges Problem, das an dieser Stelle nicht behandelt werden kann. An die Zuverlässigkeit des Berechnungsverfahrens müssen allerdings hohe Anforderungen gestellt werden, da kleine Fehler hier zu großen Fehleinschätzungen der Winkel der Wellenzahlvektoren und damit der geometrischen Dämpfung führen. Ballistische Flugbahnen können in einem ersten Ansatz im Hinblick

auf den Geschoßknall in vier Klassen eingeteilt werden, s. Tab. 1. Das Auftreten des Geschoßknalles und die geometrische Dämpfung sind in den Klassen unterschiedlich. Bei steilen ballistischen Bahnen beispielsweise gibt es Bereiche, wo zwei Geschoßknalle in einem Immissionsort auftreten. Daneben gibt es normale ballistische Bahnen, bei denen keinerlei Geschoßknall auftritt, weil der Wellenzahlkegel vom Abschuss an bis s_1 keinen Schnittpunkt mit der Erdoberfläche hat.

rasante ballistische Flugbahn	$v(s) \geq c(s)$	für alle s
normale ballistische Flugbahn	$v(s) \geq c(s)$	$0 \leq s \leq s_1$
	$v(s) < c(s)$	$s_1 < s \leq s_{\text{Einschlag}}$
steile ballistische Flugbahn	$v(s) \geq c(s)$	$0 \leq s \leq s_1$
	$v(s) < c(s)$	$s_1 \leq s \leq s_2$
	$v(s) \geq c(s)$	$s_2 \leq s \leq s_{\text{Einschlag}}$
beschleunigte ballistische Flugbahn	$v(s) < c(s)$	$0 \leq s \leq s_1$
	$v(s) \geq c(s)$	$s_1 < s \leq s_{\text{Einschlag}}$

Tab. 1 Klassierung der Flugbahnen

Geschoßknall von einer normalen ballistischen Flugbahn

In diesem Abschnitt wird der Geschoßknall anhand von Rechnungen und Messungen von einer Flugbahn diskutiert, die durch folgende Parameter gekennzeichnet ist: Anfangsgeschwindigkeit: $v_0 = 609,1$ m/s; Abgangswinkel: $\phi_0 = 20,2$ Grad; Flugweite: $x_{\text{Einschlag}} = 12330$ m; maximale Flughöhe: $h_{\text{max}} = 1496$ m; Flugweite mit Überschallgeschwindigkeit: $x(s_1) = 7116$ m; Flugzeit bis s_1 : $t_1 = 16,5$ s.

Abb. 3 zeigt die Schnittlinien des Wellenzahlkegels mit der als eben angenommenen Erdoberfläche, sog. „Linien gleicher Emissionsorte“, für Geschoßpositionen im Abstand von 200 m auf der Flugbahn. Zu Beginn der Flugbahn ist die Linie ein Geradenpaar, dessen Öffnungswinkel sich direkt aus dem Öffnungswinkel des Wellenzahlkegels und des Abgangswinkels ergibt. Durch die Änderung der Geschwindigkeit und des Flugwinkels und durch die zunehmende Höhe während des Fluges ergeben sich Kegelschnitte, die immer kleinere Öffnungswinkel für die Asymptoten der Linien erzeugen.

Die sich aus der oben beschriebenen Methode ergebende geometrische Dämpfung (unter der Annahme $\Gamma = \text{const.}$) ist in Abb. 4 als relativer Intensitätspegel dargestellt. Die Intensitätspegel sind auf die Intensität bei $x_0 = 250$ m, $y_0 = 0$ m bezogen. Abb. 4 zeigt die Dämpfung auf der Erdoberfläche entlang von Linien parallel zur Projektion der Flugbahn. Die Dämpfung unterhalb der Flugbahn ist zunächst proportional zu $-10 \lg(l/x_0)$, bevor die Ballistik zu einer Krümmung des Verlaufes nach oben führt, l Laufstrecke des Geschoßknalles. Für große Entfernungen fällt der Pegel mit ungefähr der doppelten Steigung in dieser logarithmischen Darstellung.

Abb. 4 Geometrische Dämpfung auf der Erdoberfläche entlang von Linien parallel zur Projektion der Flugbahn

(Die geometrische Dämpfung ist dargestellt als relativer Intensitätspegel bezogen auf den Intensitätspegel in 250 m Abstand unterhalb der Flugbahn. Die Abszisse ist der logarithmierte Abstand auf einer Linie parallel zur Projektion der Flugbahn.)

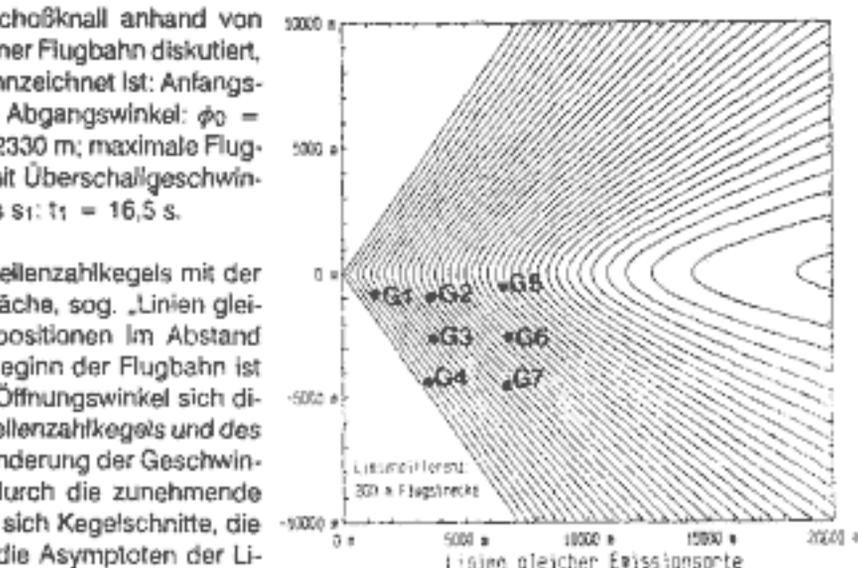
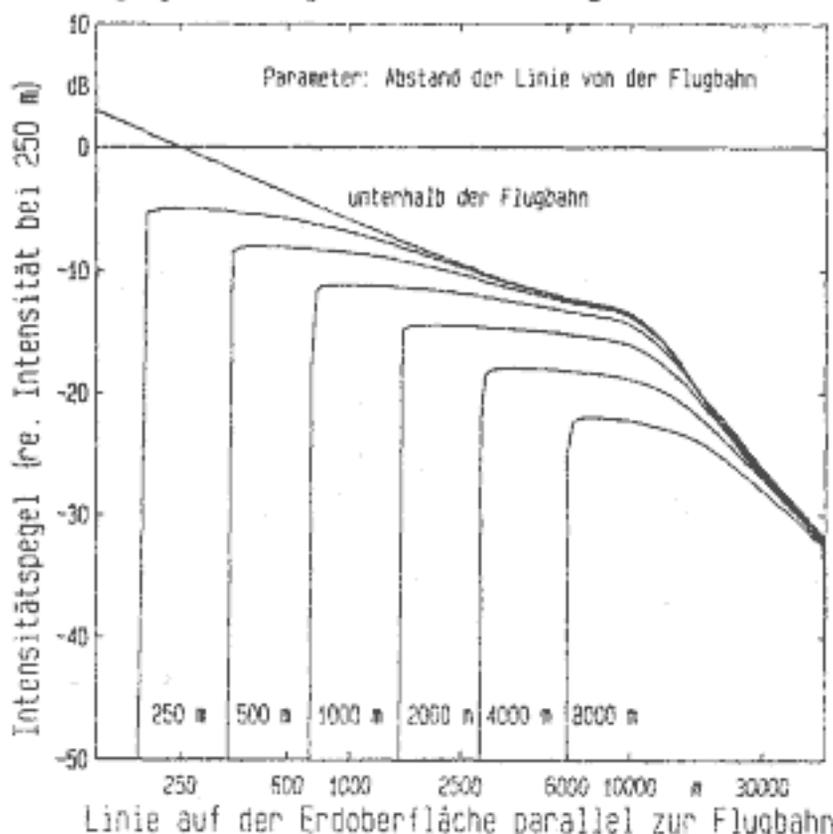


Abb. 3 Linien gleicher Emissionsorte auf der Erdoberfläche. Eingetragen ist die Projektion der Flugbahn und die Lage der Messpunkte G1 bis G7



In Abb. 5 sind die in den Immissionsorten G1 bis G7 gemessenen und energetisch gemittelten mittleren Einzelschußpegel $L_{\text{Ceq}(2s)}$ mit der arithmetischen Standardabweichung der Meßserie über der gerechneten Laufstrecke l des Geschosßknalles aufgetragen. Im Meßpunkt G4 tritt kein Geschosßknall auf. (In G4 wird der Mündungsknall mit 84,6 dB gemessen. In allen anderen Punkten dominiert der Geschosßknall den Mündungsknall).

Einen Vergleich mit den Rechenwerten für die geometrische Dämpfung erhält man dadurch, daß sowohl die Meßwerte als auch die Rechenwerte auf den Wert bei G1 bezogen werden und dann die gerechneten Pegel von den gemessenen Pegeln subtrahiert werden. Bei Übereinstimmung von Rechnung und Messung wäre als Pegeldifferenz 0 dB zu erwarten.

Abb. 6 zeigt, daß die Abweichung zwischen der geometrischen Dämpfung und den gemessenen Pegeln mit der Laufstrecke zunimmt. Diese Zunahme korreliert mit einer Regressionsgeraden, die auf eine über die geometrische Dämpfung hinausgehende, zur Laufstrecke proportionalen Dämpfung von $-1,37$ dB/1000 m hindeutet.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse für andere Flugbahnen zeigen ein ähnliches Bild für diesen über die Ausbreitungsdämpfung hinausgehenden Dämpfungskoeffizienten.

Es läge nahe, diesen Term als Einfluß der Luftabsorption zu interpretieren. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß diese Ergebnisse für $\Gamma = 0$ gerechnet wurden. Es ist ebenfalls möglich, daß sich auch eine Geschwindigkeitsabhängigkeit von Γ ähnlich auswirkt.

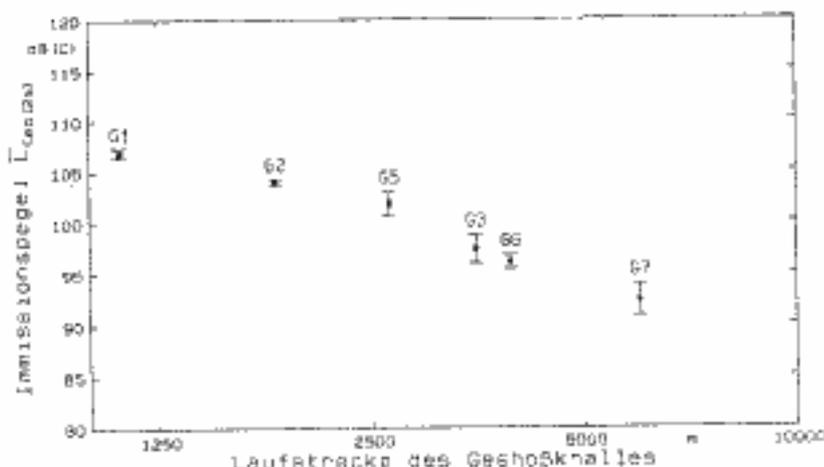


Abb. 5 Gemessene mittlere Einzelschußpegel $L_{\text{Ceq}(2s)}$ des Geschosßknalles über der gerechneten Laufstrecke des Geschosßknalles. (Die Meßstellen G1 bis G7 sind in Abb. 3 relativ zur Projektion der Flugbahn eingetragen.)

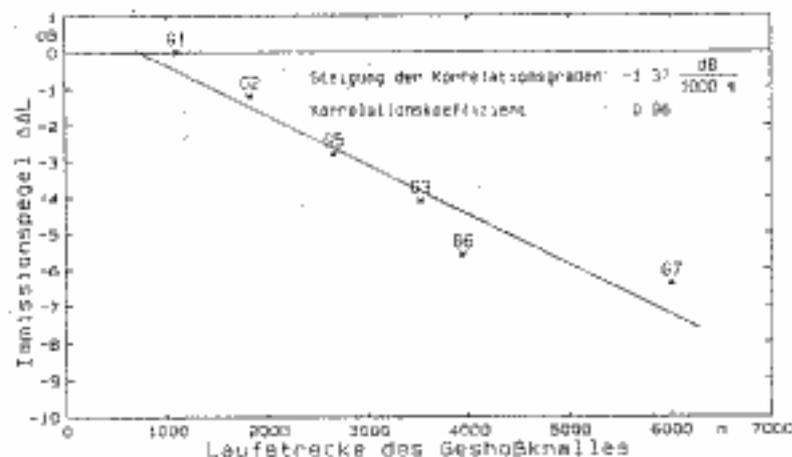


Abb. 6 Abweichung des auf den in G1 gemessenen Pegel bezogenen mittleren Einzelschußpegels von der auf den für G1 gerechneten Wert bezogenen geometrischen Ausbreitungsdämpfung in Abhängigkeit von der zu den Meßpositionen gehörenden Laufstrecke des Geschosßknalles

Einbeziehung des Geschosßknalles in die Berechnung von Lärmkarten

Auf der Basis der hier vorgestellten Vorgehensweise läßt sich der Beitrag des Geschosßknalles prognostizieren. Die Methode ist aber zu aufwendig, um sie in ein standardisiertes Verfahren zur Ermittlung der Lärmbelastung aufzunehmen. Bei der Berechnung von Lärmkarten werden alle wesentlichen Emissionssituationen auf einem Truppenübungsplatz erfaßt und deren Beiträge für jeden Immissionsort summiert. Es ist daher ein schneller Zugriff auf jeden Einzelbeitrag notwendig. Es wird erforderlich sein, anhand der oben angedeuteten Klassierung Emissionssituationen zu definieren, die den Geschosßknall auf der Basis einer minimalen Anzahl von Parametern der jeweiligen Schießsituation erfassen.

Die hier vorgestellte Methode zur Prognose des Geschosßknalles wird es ermöglichen, für diese Standard-Emissionssituationen einfache Pegelgleichungen zu optimieren.