

Anmerkungen zu Schallausbreitungsmodellen für Knallimpulse

Einführung

Zur Prognose der mittleren Immissionspegel hoch-energetischer Knallimpulse von Mündungsknallen schwerer Waffen und von Sprengknallen wird ein Modell nach /1/ eingesetzt. Neben den allgemein vorgegebenen Korrekturen für die geometrische Ausbreitungsdämpfung und für die Luftabsorption benötigt das Modell empirisch ermittelte, knallspezifische Emissionsdaten und Ausbreitungskoeffizienten. Die Emissionsdaten werden durch Messung der Schallpegel L_{CX} auf einem Meßkreis mit dem Radius 250 m um die Quelle nach dem in /2/ festgelegten Standardverfahren bestimmt. Zur Anpassung der quellspezifischen Schallausbreitung bietet das Modell jeweils einen zum Abstand logarithmischen und zum Abstand linearen Term. Beide Ausbreitungskoeffizienten werden durch Regressionsverfahren ebenfalls auf der Basis von nach /2/ standardisierten Messungen ermittelt. Diese Ausbreitungskoeffizienten entziehen sich dabei einer physikalischen Interpretation; Sie fassen die Wirkung des Bodens und der Topographie pauschal zusammen. Zur Berücksichtigung des Einflusses einer vorherrschenden Windrichtung und -geschwindigkeit bietet das Modell formal einen weiteren Ausbreitungskoeffizienten, der zu einer einfachen abstandsabhängigen Pegelkorrektur führt.

Bei der Weiterentwicklung dieses Prognosemodells wird eine Trennung dieser Einflüsse in physikalisch interpretierbare Koeffizienten angestrebt, um lokale Gegebenheiten besser im Modell abbilden zu können.

Der Einfluß des Wetters

Hoch-energetische Knallimpulse sind häufig über weite Entfernungen (über mehr als 20 km) hörbar und wirksam. Deshalb können lokale und großräumige Wetterlagen einen starken Einfluß auf die Schallausbreitung von Einzelereignissen haben. Die bei Messungen stets zu beobachtende Spannweite der Immissionspegel und die Variation in den Terzspektren wird deshalb häufig auf den direkten Einfluß der Wind- und Temperaturprofile zurückgeführt. Physikalische Modelle, die diesen Einfluß konkret, z.B. durch Strahlverfolgung, berücksichtigen, müssen sich dabei auf meteorologische Meßwerte stützen, die in der Regel an einer benachbarten Wetterstation für einen bestimmten Zeitraum ermittelt werden. Sie können deshalb die in der Praxis kurzfristig auftretenden, großen Pegelschwankungen innerhalb einer Meßserie wegen dieses unterbestimmten Parameterfeldes prinzipiell nicht beschreiben. Auch wenn genauere Wetterinformationen, d.h. zeitsynchrone Meßwerte von mehreren Orten innerhalb des Prognosegebietes vorliegen, vgl. /3/, /4/, fehlt bisher noch der Nachweis, daß diese Modelle einem einfachsten Modell, das einen Mitwindzuschlag in Abhängigkeit von dem Laufweg und von der während der Messung bzw. während des Prognosezeitraumes vorherrschenden, pauschalen Windrichtung und Windgeschwindigkeit berücksichtigt, überlegen sind.

Der Einfluß des Bodens

Eine Trennung des Einflusses des Wetters vom Einfluß des Erdbodens bedingt, daß auch für den Bodeneinfluß ein konkretes physikalisches Modell vorliegt. Knallimpulse sind einzelne, kohärente Schalle von Punktquellen. Es ist deshalb einerseits erforderlich, die Reflexion von Kugelwellen an einer ebenen, mit einer komplexwertigen Admittanz behafteten Fläche einzuführen. Andererseits wird der Ansatz eines vollständigen Knallspektrums benötigt, um auch die Phasenzusammenhänge bei der Reflexion nachzubilden zu können.

Inzwischen liegt ein derartiges Modell vor: Die hohen Rechengeschwindigkeiten heute üblicher Rechner erlauben die aufwendige Implementierung numerischer Verfahren zur Lösung des Problems der Reflexion von Kugelschallwellen an ebenen Grenzflächen. Mit Hilfe eines einfachen physikalischen Modells für Explosionen in Luft kann ein Knallspektrum hinreichend zuverlässig abgeleitet werden.

In /5/ konnte auf der Grundlage dieses Modells bereits nachgewiesen werden, daß im Nahbereich die kohärente Überlagerung des direkten Knalles und seiner Bodenreflexion zu einer systematischen Unsicherheit in bewerteten Einzalpegeln führt.

Der exemplarische Vergleich in Abb. 1 eines gemessenen Terzspektrums mit dem theoretisch zu erwartenden Schalldruckpegelspektrum und der theoretisch zu erwartenden spektralen Energiedichte macht deutlich, daß bei dieser nach /2/ durchgeführten Messung für die tiefen Frequenzkom-

ponenten Schalldruckverdopplung gemessen wird. Erst im mittleren Frequenzbereich führt die Überlagerung von direktem und reflektiertem Schall zur Auslöschung von Frequenzkomponenten. Dies gilt durchgängig für alle bodennahen Quellen der hier betrachteten Ausgangsenergie im Standardabstand von 250 m. (Für eine eingehendere Beschreibung der in Abb. 1 dargestellten physikalischen Größen vgl. /5/.)

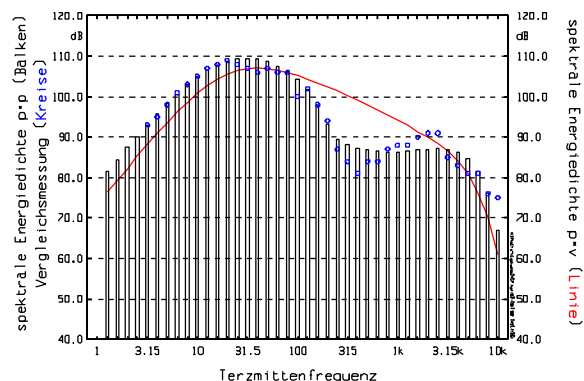


Abb. 1 Mündungsknall eines Panzerschusses aufgenommen in 250 m Abstand, Meßhöhe 1,25 m
 p^*v (Linie): gerechnete spektrale Energiedichte unter Berücksichtigung der Schnelle und der Phasenlage
 p^*p (Balken): gerechnete spektrale Energiedichte aus dem Produkt des lokalen Schalldruckes
Messung: gemessener Terzpegel, entspricht p^*p

Bei den im Nahbereich klaren geometrischen Zusammenhängen zwischen Direktschall und Bodenreflexion ist dieses Phänomen auf die Eigenschaft typischer Erdböden zurückzuführen, bei streifendem Schalleinfall tiefe Frequenzkomponenten schallhart und höhere Frequenzkomponenten schallweich zu reflektieren. Einbrüche im Schalldruckspektrum weisen hier also nicht auf Verlustmechanismen hin, sondern werden durch die Geometrie, durch lokale Eigenschaften des Erdbodens am Aufpunkt der Reflexion und durch momentan wirksame Wind- und Temperaturschichtungen auf der Meßstrecke bestimmt. Es ist entscheidend, daß die so gemessenen Terzspektren deshalb nicht Ausgangspunkt einer Schallausbreitungsrechnung sein können. Lediglich Einzalpegel, die als energetische Summe über das Terzspektrum den tieffrequenten Teil des Spektrums mit einbeziehen, sind ein zuverlässiges Maß als Emissionspegel.

Bei Messungen nach langen Laufwegen der Knalle durch die Atmosphäre überlagern sich Signalanteile des Knalles, die über verschiedene Laufwege den Immissionsort erreichen. Zusammen mit den dort jeweils lokal erzeugten Bodenreflexionen ergeben sich wiederum kohärent superponierte Signale. Durch größere Laufwegdifferenzen können nun auch tiefe Frequenzkomponenten ausgelöscht werden, der Einflußbereich der Superposition erstreckt sich nun auf den gesamten Frequenzbereich: Die Bodenbeschaffenheit um den Immissionsort prägt das gemessene Spektrum nachhaltig.

Dies belegen Ergebnisse aus einer großangelegten Meßkampagne in Norwegen zur Erfassung der Schallausbreitung von Sprengknallen über große Entfernungen. (In /3/ wird diese Meßkampagne vorgestellt und erste Ergebnisse auch von den anderen beteiligten Instituten zitiert.)

Abb. 2 zeigt die über mehrere, bei verschiedenen Wetterbedingungen aufgenommene Meßserien gemittelte Differenz der Terzspektren von Explosionsknallen in den Meßhöhen 30 m und 2 m. Die Terzpegel in 30 m liegen in wesentlichen Bereichen des Spektrums um mehr als 6 dB über den bodennah ermittelten Werten. Dieses Ergebnis wird durch hier nicht dargestellte Vergleiche bei Zwischenhöhen bestätigt, s. dazu auch /6/.

Das Spektrum in 30 m Höhe läßt sich sicher nicht ohne Einschränkungen als 'Freifeldspektrum' auffassen. Dennoch wird in Abb. 2 deutlich, daß bodennah ermittelte Werte entscheidend unzuverlässiger sind, wenn man sie als Indikator für die am Immissionsort anzutreffende Schallenergie interpretieren möchte. Letzteres ist unabdingbar, wenn man die Pegelprognosen des Modells beispielsweise auch als Maß für die Anregung von Gebäudeschwingungen einsetzen möchte.

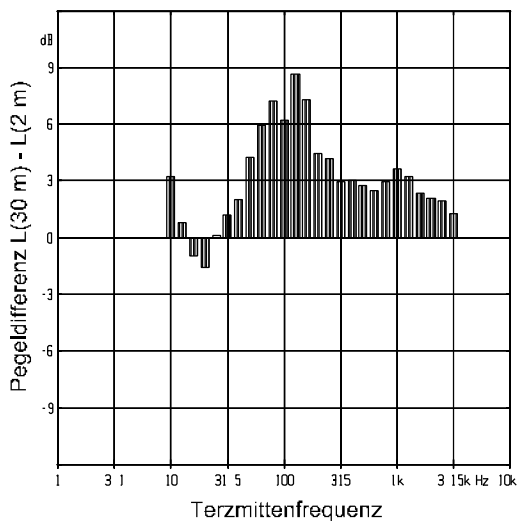


Abb. 2 Mittlere Differenz der Terzpegel in 30 m und 2 m Meßhöhe von Knallimpulsen aus großen Entfernungen nach /6/

Für die Berechnung der Bodenreflexion ist der Einfallswinkel ein entscheidender Parameter, da er in Verbindung mit der Höhe des Meßortes über der reflektierenden Oberfläche den Ort der Reflexion bestimmt. Es erscheint einleuchtend, daß auch geringe Änderungen der Windprofile und die damit verbundenen geringen Änderungen des Einfallswinkels den Ort der Reflexion erheblich verschieben können. Da dies auch für alle Reflexionen gilt, die die Signalanteile während ihrer Ausbreitung zum Immissionsort zusätzlich erleiden können, bietet sich an, die kurzfristig auftretenden Pegeländerungen in dieser Weise zu interpretieren, ohne entscheidende Wetteränderungen postulieren zu müssen. Folgt man diesem Ansatz, sollte eine Zielgröße von Modellen, die die Schallausbreitung durch die geschichtete Atmosphäre berücksichtigen, der Einfallswinkel und seine statistische Verteilung in Abhängigkeit von der Stabilität der Atmosphäre am Immissionsort sein.

Mit Hilfe des oben angedeuteten physikalischen Modells für den Einfluß des Bodens und auf der Basis einer einfachen Statistik für die Einfallswinkel des Direktschalles, die allein benötigt wird, um den Einfluß der beugenden Atmosphäre einzuführen, wird die in Abb. 3 dargestellte mittlere Differenz prognostiziert. Trotz der sehr vereinfachenden Annahmen bestätigt das Modell, daß insbesondere mittlere Frequenzkomponenten in Bodennähe hier um typisch 6 dB kleiner zu erwarten sind.

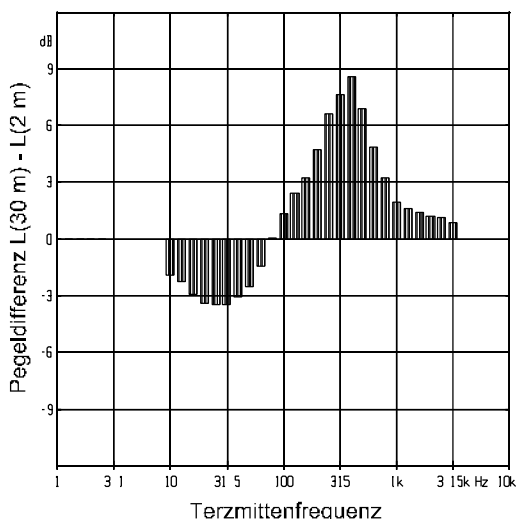


Abb. 3 Modellwerte der mittleren Differenz der Terzpegel in 30 m und 2 m Höhe von Knallimpulsen aus großen Entfernungen mit sachgerechter Häufigkeitsverteilung der Einfallswinkel

Diskussion

Aus den hier vorgestellten Aspekten lassen sich folgende Aussagen für das Ausbreitungsmodell für hoch-energetische Knallimpulse ableiten:

- Der Boden hat einen erheblichen Einfluß auf die gemessenen Schalldruckpegel.
- Terzspektren, die nach dem Standardverfahren /2/ gemessen wurden, sind als Emissionsdaten untauglich, weil sie in der Regel meßortabhängige Einbrüche und Pegelerhöhungen aufweisen.

- Die Emissionspegel (L_{CX}) gehen durchweg mit einer Schalldruckverdopplung in das bisherige Modell ein; der Pegel ist im Vergleich zu einem Pegel des akustischen Energieflusses um 6 dB zu hoch.
- In größeren Entfernungen werden bodennah durchweg geringere Schalldruckpegel gemessen als in größeren Höhen.
- Die Modell-Ausbreitungskoeffizienten werden deshalb tendenziell als zu hoch bestimmt, da sie den Ausgleich von überschätzten Emissionspegeln zu unterschätzten Immissionspegeln schaffen müssen. Die Begriffe unter- und überschätzt beziehen sich hier auf den Vergleich zu dem jeweils vorhandenen Energiefluß.

Diese Bemerkungen sollen und können nicht dahingehend interpretiert werden, daß das bisher genutzte Modell unzuverlässige Prognosewerte für die Beurteilung der Lärmbelastung liefert. Die Aussagen belegen vielmehr, daß das auf Langzeit-Mittelwerte ausgerichtete Modell gerade deshalb so erfolgreich ist, weil es auf pauschalen, aus einer Vielzahl von Meßserien ermittelten Koeffizienten beruht. Die Ergebnisse zeigen allerdings auf, daß allein die Berücksichtigung des Wetters kaum zu einer zuverlässigen Prognose für Einzelereignisse führen kann, wenn nicht gleichzeitig der Einfluß der Bodenreflexion berücksichtigt wird. Da in der Praxis sowohl das Wetter als auch die Bodeneigenschaften stets ein unterbestimmtes Parameterfeld im Hinblick auf das ganze Prognosegebiet bleiben wird, wird für Einzelereignisse lediglich die Prognose eines Erwartungswertes und seine statistische Streuung möglich sein.

Ausblick

Zur Weiterentwicklung des Modells für Knallimpulse sollte wegen der Frequenzabhängigkeit der Bodenreflexion auch frequenzabhängig gerechnet werden. Eine Auflösung der Rechnung in Terzen bietet sich an. Der Einfluß von Wind- und Temperaturschichtungen und deren Stabilität sollte in ein Fokussierungsmaß und eine statistische Verteilung der Einfallswinkel abgebildet werden. Auf der Basis dieser Angaben und einem einfachen Schallausbreitungsmodell für Kugelwellen kann dann die Wirkung des Bodens berücksichtigt werden. Es ergibt eine Häufigkeitsverteilung von Terzspektren, aus der erst dann eine Prognose des arithmetischen und energetischen Mittelwertes von bewerteten Einzelpiegeln und ihre Streuung abgeleitet werden kann.

Literaturhinweise

- /1/ K.-W. Hirsch, E. Buchta: „Zum Standardverfahren für die Berechnung der Schallimmissionen in der Umgebung von Truppenübungsplätzen“, Fortschritte der Akustik - DAGA 96, Bad Honnef: DPG-GmbH 1993, S.656-659
- /2/ „Standardmethode zur Messung der Geräuschemissionen und -immissionen von schweren Waffen“, Hrsg. E. Buchta, Forschungsberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, VDI Verlag
- /3/ G. Kerry: „An Overview Of The Long Range Impulse Sound Propagation Measurements Made In Norway“, Proceedings Inter Noise 96, Liverpool, S. 583-588
- /4/ L. R. Hole, Y. Gjessing, T. de Lange: „Meteorological Measurements During Norwegian Trials“, Proceedings Inter Noise 96, Liverpool, S.605-610
- /5/ E. Buchta, K.-W. Hirsch: „Physikalische Aspekte zur Begründung der Wahl der C-Bewertung zur Beurteilung hochintensiver Knallgeräusche“, Fortschritte der Akustik - DAGA 96, Hrsg. T. Portele und W. Hess, Oldenburg: DEGA e.V., S.294-296
- /6/ K.-W. Hirsch: „The Influence Of Receiver Height On Sound Levels From Sound Sources In Large Distances“, Proceedings Inter Noise 96, Liverpool, S.633-638

Diese Untersuchungen werden vom Bundesministerium der Verteidigung BMVg unterstützt.