

Einfluss des Bodens und der Meteorologie auf die Schallausbreitung im Freien bei Dauerschall und Impulsgeräuschen

U.J. Kurze, Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Straße 11, 82152 Planegg bei München

1. Grundlagen und Erfahrungen mit Impulsen

Die Lösung der Wellengleichung für die Ausbreitung des Luftschalls von einer Quelle in den umgebenden freien Raum wird durch die Anfangsbedingungen und die lokale Schallgeschwindigkeit bestimmt. Die Anfangsbedingungen sind durch die Stärke der Quelle und ihre Verteilung auf Monopol (atmende Kugel), Dipol (oszillierende Kugel) und höhere Ordnungen zu beschreiben. Abhängig von der Größe der Quelle und von der Ordnung ist zu unterscheiden zwischen akustischen Nahfeldern, die nicht zur Schallausbreitung beitragen, und Fernfeldern, die den Energietransport übernehmen. Sieht man von geringer Luftabsorption ab, so erfolgt der Energietransport dispersionsfrei, d.h. frequenzunabhängig. Eine Änderung der Schallgeschwindigkeit im Ausbreitungsweg tritt in geschlossenen Räumen in der Regel nicht auf, wohl aber im Freien.

Sehr hohe Schalldrücke bewirken in der Überdruckphase eine höhere Schallgeschwindigkeit als in der Unterdruckphase. Es bilden sich Stoßwellen aus [1]. Weil die Entropieänderung in einer Unstetigkeit eine Größe dritter Ordnung ist, kann trotzdem noch mit einer einfachen Welle gerechnet werden, nur zerfließt sie mit zunehmender Laufzeit. Im dreidimensionalen Schallfeld wirkt die Divergenz dagegen, sodass der Effekt im Fernfeld keinen Einfluss hat. Von Nichtlinearitäten kann dort abgesehen werden und es gelten die linearen Zusammenhänge zwischen den Fourier-Transformationspaaren, z.B. Übertragungsfunktion für Dauerschall (im Spektralbereich) und Impulsantwort (im Zeitbereich).

In Räumen nutzt man diesen Zusammenhang, um an Modellen oder im Original eine Vielzahl von Reflexionen an Wänden und Einrichtungsgegenständen über Impulsantworten zu erfassen und dann spektral auszuwerten [2]. Früher diente dazu die einmalige Anregung mit einem Funken- oder Pistolenknall, heute werden elektronisch kontrollierte MLS-Signale bevorzugt. Im Freien werden Impulse auch mit berstenden Membranen erzeugt, um die Dämpfung bei der Schallausbreitung über Entfernungen bis etwa 1000 m zu messen [3]. Dabei wird insbesondere der Einfluss des Bodens, aber auch der Beitrag von Reflexionen an Gebäuden, Bewuchs u.a. erfasst.

Interferenzeffekte zwischen dem Direktschall und Bodenreflexionen, die zunächst über Absorptionsmaterial im Labor [4] und auch über der Bestuhlung von Konzertsälen [5] beobachtet wurden, dienten später auch der Interpretation von Messergebnissen zur Ausbreitung von Triebwerkslärm im Freien [6]. Wegen sehr unterschiedlicher Quellhöhen waren sie aus Messungen in der Umgebung von Industrieanlagen zunächst nicht bekannt und wurden deshalb in der Richtlinie VDI 2714 nicht berücksichtigt [7]. Wohl aber konnten diese Effekte bei Impulsanregung durch Handfeuerwaffen oder berstende Membranen beobachtet werden [8].

Im Gegensatz zu den theoretisch und experimentell gesicherten Erkenntnissen gibt es immer wieder Zweifel an der Gültigkeit des Zusammenhangs zwischen der Impulsantwort und der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion. Auslöser mag die

alleinige Betrachtung des Maximums der Zeitfunktion sein, die maßgeblich von hochfrequenten Anteilen abhängt. So wurde jahrelang – natürlich ohne Ergebnis – die Besonderheit der Abschirmung von Impulsärm in Arbeitsräumen untersucht, die sich hauptsächlich auf hohe Frequenzen auswirkt. Seit einiger Zeit werden militärische Impulsgeräusche gesondert dargestellt. Aus der Natur der Geräusche mag sich die Berechtigung für eine eigene Bewertung ergeben. Als Grundlage dafür dienen derzeit anstelle von früher verwendeten frequenzbewerteten Spitzenwerten nur noch frequenzbewertete Energiegrößen (Einzelereignispegel) [9]. Die Ausbreitung der Impulsgeräusche und die Bestimmung dieser Energiegrößen in Frequenzbändern unterliegt keiner speziellen Physik und sollte einheitlich beschrieben werden.

2. Schallausbreitung im Freien

Wind und Sonneneinstrahlung beeinflussen die Schallgeschwindigkeit einerseits großräumig, was näherungsweise mit einer mittleren Höhenabhängigkeit berücksichtigt wird und zur Berechnung der Schallbrechung in der Atmosphäre dient [10], und andererseits die Ausbildung einer mit der Schallwellenlänge vergleichbaren Turbulenzstruktur der Atmosphäre, die zur Streuung von Schall und damit zur Verringerung der Kohärenz unterschiedlicher Schallstrahlen führt [11][12]. Bodenprofil, -struktur, -bedeckung und -bewuchs bestimmen die Mikrometeorologie und damit die Schallausbreitung. Um die Variabilität in Grenzen zu halten, werden in Regelwerken nur enge Meteo-Fenster zugelassen, minimale Höhen über Grund spezifiziert und kritische Bodenbedeckungen, wie Wasser oder Schnee, ausgeschlossen. Außerhalb solcher Abgrenzungen (Schichtungen) gewonnene Messergebnisse [13] müssen mit regelwerkskonformen Prognosen natürlich nicht übereinstimmen. Dagegen erweisen sich innerhalb der üblichen Schichtung ermittelte Ausbreitungsdämpfungen als hauptsächlich beeinflusst durch den Abstand von Original- und Spiegelquellen, die Interferenz zwischen Direktschall und einfachen Bodenreflexionen (häufig im Frequenzbereich von etwa 200 Hz bis 800 Hz) [14], die Beugung über Hindernisse und – abhängig von Abstand und Frequenzband – durch die Luftabsorption.

Tieffrequenter Schall wird durch Luftabsorption kaum gedämpft. Das Maximum der Dämpfung durch molekulare Relaxation der Stickstoffschwingungen liegt bei typisch 500 Hz. Bei tiefen Frequenzen zeigt bewachsener oder durch Wurzeln aufgelockerter Boden eine Federungsimpedanz, die für Schall wie eine Verzögerungsleitung mit geringer Dämpfung wirkt. Schall kann dadurch in bestimmten Abstandsbereichen am Boden geführt werden und nimmt dann in der Amplitude nur etwa mit $1/\sqrt{r}$ ab. An Unebenheiten des Bodens, die zu einer Verlängerung z des kürzest möglichen Schallwegs führen, tritt keine wesentliche Beugungsdämpfung auf, solange die Schallwellenlänge $\lambda \gg z$ ist [15]. Kanonendonner mit herausragenden Anteilen unter 100 Hz – entsprechend einer Wellenlänge von mehr als 3,4 m – trägt daher sehr weit.

Schallabsorption, Interferenzen und Beugung sind zwar vorzugsweise im Spektralbereich beschreibbar, gelten aber auch im Zeitbereich und sind entsprechend für Dauerschall ebenso wie für Impulsgeräusche wirksam.

Vielfachreflexionen und Streuungen des Schalls beim Durchgang durch Vegetation sind als Nachhallproblem bekannt [16]. Die dabei auftretende frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung gilt in gleicher Weise für Impulse und Dauerschall. Wegen der saisonal schwankenden und nur in Ausnahmefällen dauerhaften Wirkung wird diese Dämpfung in der Praxis nicht angesetzt.

3. Besonderheiten von Impulsgeräuschen

Die herausragende Eigenschaft eines Schallimpulses ist die Konzentration der Energie in einem kurzen Zeitabschnitt, in dem die Lautstärkebildung im Ohr durch Integration über die Schalldruckquadrate in Frequenzbändern erfolgt. Die Höhe eines Impulses wird durch die nichtlineare Beziehung zwischen Verdichtung und Gasdruck an der Quelle begrenzt. Die Lage des spektralen Maximums der Abstrahlung nimmt für Monopolquellen umgekehrt proportional mit der Größe der Quelle ab [17]. Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit im Ausbreitungsweg kommt es auf den Pegelabstand zwischen Signal und Grund- oder Fremdgeräusch an. Die Grenze liegt typisch bei -10 dB.

Messtechnisch lassen sich Signal und Fremdgeräusch im Zeitbereich in der Regel hinreichend gut trennen. Dabei genügt es jedoch nicht, auf die Signalamplitude zu achten. Moderne Analytoren erlauben Zeitausschnitte, die zur weiteren spektralen Auswertung und zur Bestimmung von ohrgemäß bewerteten Energien genutzt werden können.

Derartige Messungen von Impulsen zeigen mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle Impulsverbreiterungen. Soweit sie durch Streuung an der Turbulenzstruktur der Atmosphäre oder durch Bodenreflexionen hervorgerufen sind, bleiben sie im allgemeinen so klein, dass sie sich auf die Lautstärkeempfindung nicht auswirken. Durch Reflexionen oder Streuungen an entfernteren Objekten verursachte Verbreiterungen sind im Zeitbereich identifizierbar und können dann getrennt beurteilt werden.

4. Schlussfolgerungen

Bewährte Modelle zur Prognose der Schallausbreitung im Freien, die das Spektrum und die Richtwirkung der Schall-emission, die hauptsächliche Ausbreitungsdämpfung durch Divergenz und die frequenzabhängigen Ausbreitungsdämpfungen durch Luftabsorption, mittlere Bodeneffekte und Abschirmung durch Hindernisse berücksichtigen, lassen sich auf Schallereignisse beliebiger Dauer anwenden. Impulsschall sollte als frequenzbewerteter Einzelereignispegel erfasst und nur hinsichtlich eines Auffälligkeitszuschlags am Immissionsort gesondert berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] L.D. Landau, E.M. Lifschitz: Hydrodynamik, Berlin: Akademie Verlag, 1966, S.434 ff
- [2] H. Kuttruff in M. Heckl, H.A. Müller: Taschenbuch der Techn. Akustik, 2. Aufl., Berlin: Springer 1994, S. 613
- [3] U.J. Kurze: Abschirmung über große Entfernungen. FASE/DAGA 1982, 359 - 362
- [4] K.U. Ingard: On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane. J. Acoust. Soc. Am. 23, 329 – 335 (1951)

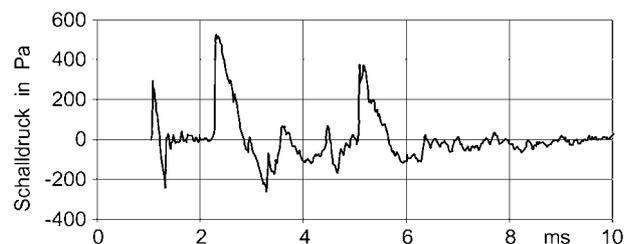


Bild 1: Zeitverlauf des Schießgeräuschs einer Winchester 308 in 10 m Abstand von der Mündung, 4 m über Grund, 45°-Richtung, stehend geschossen; zu erkennen sind nacheinander der Geschossknall, der Mündungsknall und dessen Bodenreflexion

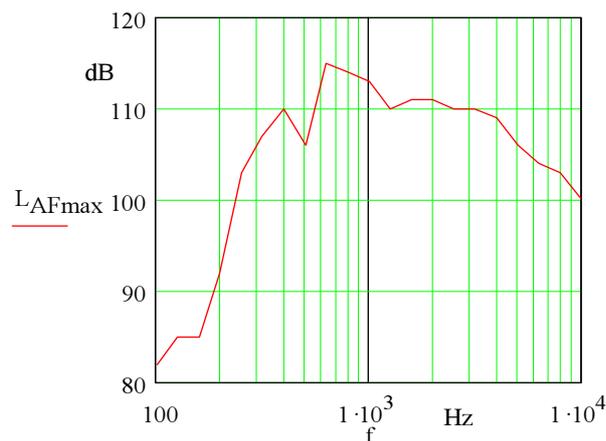


Bild 2: A-bewertetes Terz-Spektrum zum Zeitverlauf in Bild 1

- [5] L. Cremer, H.A. Müller: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik I, Stuttgart: S. Hirzel 1978, S. 119
- [6] P.H. Parkin, W.E. Scholes: The horizontal propagation of sound from a jet engine close to ground, at Radlett. J. Sound Vib. 1 (1964), 1 – 13; ... at Hatfield. J. Sound Vib. 2 (1965), 353 – 374
- [7] A. Moerkerken: The state of the art in outdoor noise prediction schemes. Inter-Noise 86, Proc. 413 – 418
- [8] L.J. Schreiber, U.J. Kurze: Sound propagation from rifle shooting ranges. Inter-Noise 86, 425 – 430
- [9] J. Vos : On the annoyance caused by impulse sounds produced by small, medium-large, and large firearms. J. Acoust. Soc. Am. 109 (2001), 244 - 253
- [10] K.B. Rasmussen, J. Sound Vib. 104 (1986), 321 - 335
- [11] V.I. Tatarskii: The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation. Nat. Techn. Inf. Ser., Springfield Va. (1971)
- [12] S.F. Clifford, J. Opt. Soc. Am. 61 (1971), 1285 – 1292
- [13] D.G. Albert, L.R. Hole: Blast noise propagation above a snow cover. J. Acoust. Soc. Am. 109 (2001), 2675 – 2681
- [14] K. Attenborough: Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources. Applied Acoustics 24 (1988), 289 – 319
- [15] U.J. Kurze: Noise reduction by barriers. J. Acoust. Soc. Am. 55 (1974), 504 – 518
- [16] H. Kuttruff: Über Nachhall in Medien mit unregelmäßig verteilten Streuzentren,... Acustica 18 (1967), 131 – 143
- [17] L. Cremer: Über das Ersatzschema des Kugelknalls, Akust. Z. 5 (1940), 46 - 50