

# Schallschutzmaßnahmen in der Nähe von Schießgeräuschquellen

Karl-Wilhelm Hirsch<sup>1</sup>, Werner Bertels<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Cervus Consult, Willich, consult@cervus.de*

<sup>2</sup>*Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition der Bundeswehr, WTD 91, Meppen, wernerbertels@bwb.org*

## Einleitung

Die Auslegung und Beurteilung von baulichen Schallschutzmaßnahmen in enger Nachbarschaft von Schießgeräuschquellen erfordern Berechnungsverfahren, die in einigen Aspekten über den Anwendungsbereich hinausgehen, den eingeführte technische Verfahren (z.B. die DIN ISO 9613) bieten. Ein Aspekt ist die Berücksichtigung der signifikanten dreidimensionalen Richtcharakteristik vieler Schießgeräuschquellen mit einer ausgeprägten vertikalen Komponente. Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit, die Wirkung der Schallschutzmaßnahmen unter beliebigen Brechungsverhältnissen in der Atmosphäre auch in größeren Abständen (> 1000 m) abschätzen zu können. Dieser Aspekt ist besonders im Rahmen eines Lärmmanagements von wesentlicher Bedeutung, da die Wirksamkeit der Schallschutzmaßnahme nicht unbedingt anhand eines Falls mit günstigen Schallausbreitungsbedingungen, der zwar zu hohen Immissionspegeln führt aber nur selten - insbesondere unter Berücksichtigung der üblichen Betriebszeit eines Schießplatzes - auftritt.

Die Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition der Bundeswehr, WTD 91, hat eine Studie mit dem Ziel begonnen, ein unter diesen Aspekten sachgerechtes Planungswerkzeug (SchaMa) für bauliche Schallschutzmaßnahmen auf Schießplätzen zu entwickeln. Diese Schallschutzmaßnahmen müssen besondere Bedingungen erfüllen: Sie dürfen keinesfalls die Schießsicherheit beeinträchtigen. Dazu gehört z. B., dass die Treibladungsgase ungehindert abziehen können. Die Maßnahmen müssen sich in den Erprobungs- bzw. militärischen Übungsbetrieb einfügen; Dazu gehört z. B., dass Feuerstellungen befahrbar bleiben müssen.

Das im Rahmen dieser Studie zu entwickelnde Schallausbreitungsmodell (SchaMa Modell) soll gerade für Waffenknalle (zunächst Explosionen und Mündungsknalle) hinreichend zuverlässig sein. Das bedeutet zunächst, dass der Gültigkeitsbereich im Hinblick auf den Abstand zwischen Quelle und Empfänger grundsätzlich nicht beschränkt sein sollte. Neben der oben erwähnten ausgeprägten Richtcharakteristik kommt zumindest im Nahbereich u.U. die Berücksichtigung nicht-linearer Effekte hinzu, die die Abstrahlung selbst und die Wechselwirkung mit dem Boden aber auch die Schirmung im Vergleich zur linearen Näherung ändern kann.

Eine zentrale Forderung an das (technische) Schallausbreitungsmodell ist die Eigenschaft, dass das SchaMa Modell auch Zeitverläufe des Schalldrucks prognostizieren kann. Aus diesen Zeitverläufen sollen sich dann z.B. der  $L_{C\text{Peak}}$  des Waffenknalls und auch der für die Beurteilung von Schießgeräuschen kleiner Waffen (Rohrwaffen mit Kaliber < 20 mm, Sprengungen mit einem TNT-Äquivalent von < 50 g) bedeutsame  $L_{AF\text{max}}$  ermitteln lassen. Die Validierung des Modells soll sich auch auf den Vergleich der prognostizierten Zeitverläufe mit gemessenen Zeitverläufen abstützen. Dieser Vergleich wird insbesondere das Bodenmodell kalibrieren.

Im Rahmen der Studie wird ein physikalisches Modell als Referenzmodell zu entwickeln. Dieses Referenzmodell dient zur Abschätzung Zuverlässigkeit des technischen SchaMa Modells. Aus dem Vergleich der Ergebnisse des SchaMa Modells mit dem Referenzmodell sollen Konzepte abgeleitet werden, wie die ins Spiel kommenden physikalischen Phänomene der Quelle und die Ausbreitung von Waffenknallen über große Entfernungen in einem technischen Modelle so nah wie möglich an der physikalischen Beschreibung der Phänomene modelliert werden können.

Gegenstand dieses Beitrags hier ist zunächst die Darlegung einiger wesentlicher Aspekte des Konzeptes für das SchaMa Modell.

## Konzept des SchaMa Modells

Mehrere Gründe haben dazu geführt, das technische Ausbreitungsmodell als Strahlenmodell zu konzipieren. Ein Grund dafür ist die Erwartung, dass ein Strahlenmodell relativ ‚antwortschnell‘ Prognosen berechnen kann. Dies ist wesentlich, um die hohe Anzahl von Punkt-zu-Punkt-Rechnungen, die zu einer Beurteilung einer Schallschutzmaßnahme bei einer Vielzahl von Wetterbedingungen in der gesamten Nachbarschaft eines Schießplatzes durchzuführen sind, in angemessener Zeit zu liefern. Ohne ‚zügige‘ Variantenvergleiche wäre das Werkzeug nicht anwenderfreundlich einsetzbar. In Strahlenmodellen kann die vertikale Richtcharakteristik der Quelle sachgerecht modelliert werden. Dies ist ein weiterer Grund für die Verwendung eines Strahlenmodells.

Dabei ist klar, dass Strahlenmodelle grundsätzlich „Hochfrequenzlösungen“ darstellen; der „Strahl“ als geometrische Phasenbedingung im Schallfeld im tiefen Frequenzbereich der Waffenknalle großer Waffen (Rohrwaffen ab Kaliber 20 mm, Sprengungen mit einem TNT-Äquivalent ab 50 g) nur eine Näherung darstellt, die mit zunehmender Wellenlänge an Qualität verliert. Diese grundsätzliche Schwäche eines Strahlenmodells soll durch aus Vergleichsrechnungen mit dem physikalischen Referenzmodell abgeleiteten Korrekturen im technischen Modell aufgefangen werden. Bei diesem Prozess kann auf die verlässliche Kenntnis der spektralen Zusammensetzung der Waffenknalle zurückgegriffen werden.

Der große Einwirkungsbereich von Waffenknallen kennzeichnet in besonderer Weise diese Geräuschquellenart. Die nächste Nachbarschaft liegt in vielen Fällen in einem Abstandsbereich von 1 km bis 3 km und damit außerhalb des validierten Bereichs einschlägiger Schallausbreitungsmodelle (DIN ISO 9613, Harmonoise Modell).

Bei der Schallausbreitungsrechnung über große Entfernungen gewinnen die Bodenbeschaffenheit und die Refraktion in der Atmosphäre an Bedeutung. Es kann sicher nicht mit geraden Strahlen gerechnet werden. Zurzeit wird im Rahmen der Studie untersucht, ob ein Kreisstrahlenmodell (CRM) ausreichen kann, um die Schallausbreitung auch über große Entfernungen hinreichend zuverlässig zu beschreiben. Ein Kreisstrahlenmodell hält die geometrischen Rechnungen im Rahmen, bietet allerdings zunächst nur einen Parameter (die Krümmung bzw. den Krümmungsradius) an, um unterschiedliche Refraktionseigenschaften der Atmosphäre zu beschreiben. Dies ist auf der einen Seite deutlich zu wenig, um reale Atmosphären tatsächlich beschreiben zu können. Auf der anderen Seite sollte bei der Auslegung von Modellen stets beachtet werden, welche Informationen bei der Anwendung des Modells als Eingangsparameter zur Verfügung stehen. Es ist nicht sinnvoll, ein Modell mit einem komplexen Satz von Eingangsparametern auszustatten, der bei der Anwendung des Modells nicht hinreichend zuverlässig befüllt werden kann. Dies ist gerade bei der Beschreibung der Refraktionseigenschaften der Atmosphäre entlang des gesamten Ausbreitungsweges über einige Kilometer zu beachten. Denn es ist kaum zu erwarten und darf deshalb auch nicht vorausgesetzt werden, dass die Atmosphäre tatsächlich bekannt sein wird.

Wird ein Kreisstrahlenmodell für größer werdende Entfernung unter Mitwindbedingungen verwendet, erreichen die Umkehrpunkte der Kreisbögen der Strahlen mit niedrigen Ordnungen (Ordnung als Maß für die Anzahl der Bodenreflektionen) immer größere Höhen. Überschreitet die Entfernung sogar den doppelten Krümmungsradius, gibt's es keinen ‚Direktschall‘ (Ordnung 0) mehr, weil selbst ein Halbkreis mit dem Krümmungsradius die Geometriebedingung zwischen Quellpunkt und Aufpunkt nicht mehr er-

füllt. Die Näherung einer konstant krümmenden Atmosphäre ist schon viel früher nicht mehr erfüllt: Der in vielen Fällen in größeren Höhen dominant anzunehmende negative Temperaturgradient führt dort in der Regel zu einer ‚Gegenwindssituation‘, also zu einer Brechung nach oben.

Ein Kreisstrahlenmodell benötigt deshalb im einfachsten Falle eine obere Schichtgrenze: Überschreitet der Strahl die Höhe dieser Schicht, werden sie im Aufpunkt nicht mehr berücksichtigt. Ein erweitertes Kreisstrahlenmodell hat also zwei Parameter zur Kennzeichnung der Atmosphäre.

Ebenfalls bei großen Entfernungen treten bodennah Strahlen mit sehr hohen Ordnungen auf. Dies ist sachgerecht, wenn man einen völlig ebenen Boden unterstellt. Zur Berücksichtigung einer Bodenrauigkeit wird hier eine weitere Schichtgrenze eingeführt, über die solche Strahlen bewertet werden: Erreichen die Umkehrpunkte der Kreisbögen nicht diese Schichtgrenze, tragen sie ebenfalls nicht mehr zum Ergebnis bei.

### Berechnung von Zeitsignalen

Aus einem klaren Knallsignal (Weber-Impuls oder N-Welle) in der Nähe der Quelle wird bei der Ausbreitung über größere Entfernungen erfahrungsgemäß ein Signal, dessen Dauer signifikant verlängert ist und dessen Signatur sich in Abhängigkeit von den Schallausbreitungsbedingungen ändert. Dabei treten die höchsten Schalldrücke nicht notwendig zu Beginn des Signals auf. Die Bestimmung zeitbewerteter Spitzen- und Maximalpegel (z. B.  $L_{CPeak}$  oder  $L_{AFmax}$ ) lassen sich deshalb nur aus Zeitsignalen gewinnen.

Der Grund für die Änderung der Signalform ist nicht eine dispersive Schallausbreitung oder die quellnahen nicht-linearen Ausbreitungsphänomene für die hochenergetischen Knalle. Es ist offensichtlich, dass die Signale in den Aufpunkten durch die Überlagerung der Schallbeiträge verschiedener Laufwege gebildet sind.

Im Kontext eines Kreisstrahlenmodells ist eine solche Überlagerung modeltypisch, da die Geometriebedingung eines solchen Modells (Quelle und Aufpunkt liegen auf einer Folge von Kreisbögen gleicher Radien, die sich in der Bodenoberfläche schneiden) von einer mit der Entfernung schnell wachsender Schar von Strahlen erfüllt werden kann. Diese Strahlen unterscheiden sich im Hinblick auf ihren Abgangswinkel, ihrer Ordnung und ihres Einfallswinkels bei der Bodenreflexion.

Die Quellsignale werden in SchaMa grundsätzlich als komplexe Fourier Spektren vorgegeben. Dies ist bei der Anwendung auf Waffenknalle eine zweckmäßige Vorgabe, da diese Fourierspektren zuverlässig in Betrag und Phase sowohl für Explosionen, Mündungsknalle als auch für Geschosknalle angegeben werden können. Auch die Schallausbreitung wird im Frequenzraum durch eine sogenannte Transferfunktion berechnet. Auf dem Ausbreitungsweg ändert sich der Betrag des Fourierspektrums nach Maßgabe der geometrischen Dämpfung, der höhenabhängigen Luftabsorption und den energetischen Verlusten bei den Reflexionen am Boden. Die Phase ändert sich proportional zur Laufzeit des Strahls, die wiederum von der lokalen Schallgeschwindigkeit abhängt, und wird durch die Bodenreflexion frequenzabhängig verzögert. Turbulenz in Atmosphäre kann dadurch berücksichtigt werden, dass die Phase stochastisch beeinflusst wird. Die Überlagerung der Signalbeiträge der einzelnen Strahlen erfolgt auch im Frequenzbereich.

Im Nahbereich ergeben sich bei der Addition der Fourierspektren bei der geringen Zahl beitragender Strahlen klare Interferenzmuster (Bodendips). In größeren Abständen tragen immer mehr Strahlen zur Signalsumme bei; klare Bodendips treten nicht mehr auf. Das Zeitsignal verlängert sich und verliert die Signatur als Knallsignal. Abbildung 1 und Abbildung 2 verdeutlichen diesen Effekt, berechnet mit der zurzeit erreichten Entwicklungsstufe des SchaMa Kreisstrahlenmodells.

Es wäre ein Fortschritt, wenn mit dem SchaMa Modell auch die Impulshaltigkeit, die eine Eigenschaft des Phasenspektrums und nicht des Amplitudenspektrums ist, prognostiziert werden könnte.

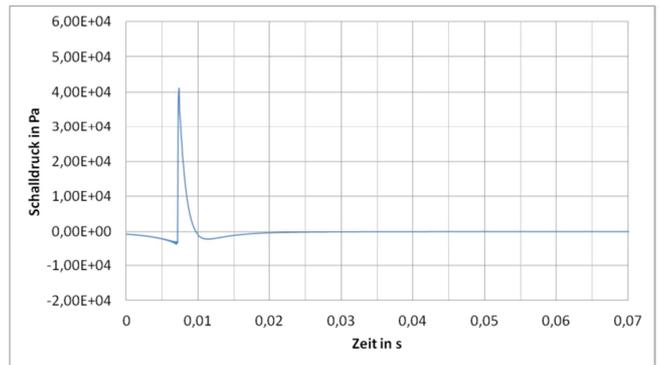


Abbildung 1 Schalldruck-Zeitverlauf eines Waffenknalls 1 m Weber-Radius 1 m (Quellsignal)

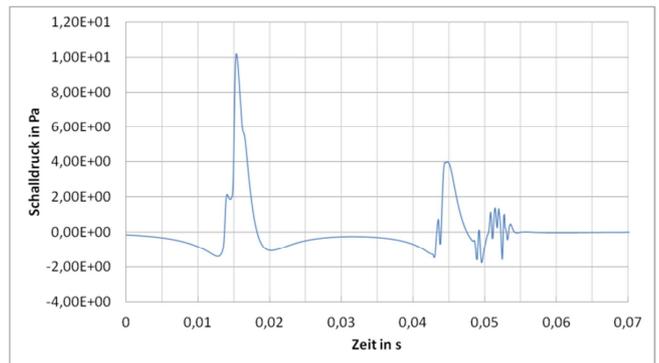


Abbildung 2 Schalldruck-Zeitverlauf des Waffenknalls in 2 km Weber-Radius 1 m, Quell- und Aufpunkthöhe 1 m, Krümmungsradius 5 km, Grasboden

Die Einführung eines abstandsabhängigen Impulszuschlags statt eines pauschalen und konstanten Zuschlags kann eine Neubewertung des Beurteilungsverfahrens für Schießlärm nach VDI 3745 einleiten.

### Vertikale Richtcharakteristik

Die vertikale Richtcharakteristik spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn man die Wirkung von quellnahen Wänden/Wällen in entfernten Aufpunkten betrachtet. Das Beispiel in Abbildung 3 skizziert die prinzipielle Herausforderung bei einer ausgeprägten Richtcharakteristik, die durch die Länge der Pfeile um die Quelle angedeutet ist. Es kann die Situation eintreten, dass durch Einfügen einer Wand, der Pegel im Aufpunkt nicht gemindert wird. Betrachtet man die Situation spektral, ist davon auszugehen, dass der Nutzen der Wand sich ins Gegenteil verkehrt. Es hängt dann vom Signalspektrum der Quelle ab, ob sich z. B. A-bewertet ein Nutzen ergibt, während sich C-bewertet sogar höhere Pegel im Aufpunkt einstellen. Dieser Effekt ist bei Waffenknallen, die eine starke Richtcharakteristik aufweisen nicht zu vernachlässigen.

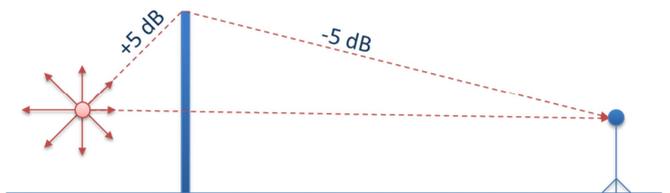


Abbildung 3 Zur Unwirksamkeit einer Schallschutzmaßnahme wegen vertikaler Richtcharakteristik

Die Studie wird fortgesetzt mit einem Vergleich von gemessenen Zeitverläufen, die in einer Messkampagne unter besonders kontrollierten Bedingungen im Freien ermittelt werden.