

Zur Berücksichtigung der Bodenreflexion bei der Quellmessung von Mündungsknallen

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

Einleitung

Der Mündungsknall ist die wesentliche Quelle des Schießlärms von Handfeuerwaffen. Er entsteht beim Schuss in enger Nachbarschaft der Mündung. Seine Ursache sind die aus dem Rohr überschallig entweichenden Gase der Treibladung. Die Energie, die nach dem Austritt in dieser freien Gaswolke gespeichert ist, wird bestimmt durch die Menge und Eigenschaften der Treibladung selbst und durch die Länge und Konstruktion des Rohres. Die Abstrahlung des Mündungsknalles ist stark nach vorne gerichtet. Die Richtwirkung hängt von der Rohrlänge, aber auch davon ab, ob die Waffe z.B. durch eine Mündungsbremse den Gasstrom beeinflusst.

Daraus folgt für die Prognose von Schießlärm, dass bei der Vielfalt der Sport- und Jagdwaffen die akustische Quellbeschreibung des Mündungsknalles waffen- und munitionsspezifisch erfolgen muss. Die DIN ISO 17201 wird im Teil 1 ein Verfahren beschreiben, den Quellpegel und die Richtwirkung des Mündungsknalles zu messen, auszuwerten und zu dokumentieren. Das Verfahren setzt voraus, dass der Mündungsknall rotationssymmetrisch um die Rohrachse entsteht. Aus dieser Symmetrie folgt einerseits, dass es ausreicht, den Mündungsknall auf einem Halbkreis auf einer Seite der Waffe zu messen. Aus der Symmetrie bzw. aus dieser Messanordnung folgt andererseits, dass nicht alle Richtungen im Hinblick auf die Bestimmung der Quellenergie gleichgewichtet sind, sondern bei der Integration der Gesamtenergie aus den auf dem Halbkreis gemessenen Pegeln gewichtet aufsummiert werden müssen. Der Messwert bei 180° bei einer Auflösung von 30° Schritten trägt z.B. nur mit einem Faktor von 0,017 zur Gesamtenergie bei, die Messung bei 90° mit dem Faktor 0,259 (vgl. /1/).

Eine praxisorientierte Messanordnung, die den Anforderungen der DIN ISO 17201 genügt, ist die Messung der Schalldrucksignale auf einem - zu einem ebenen Grasboden - parallelen Messkreis mit 10 m Radius und einer Winkelauflösung von 30° von 0° bis 180° . Die Quelle befindet sich im Mittelpunkt des Kreises. Der Schütze schießt im stehenden, angestrichenen Anschlag in die 0° -Richtung parallel zum Boden. Mündung und Mikrophone befinden sich in 2 m Höhe über dem Grasboden. Es befinden sich keine störenden Reflektoren im Umfeld des Messkreises.

Das Schalldrucksignal in allen Messpositionen setzt sich aus dem Direktschall und der Bodenreflexion zusammen. Zur Bestimmung der Quellparameter ist es daher erforderlich, den Anteil des Direktschalls von dem der Bodenreflexion zu trennen. Die folgende Darstellung stellt zunächst ein dafür geeignetes Verfahren im Frequenzbereich vor. Dieses Verfahren liefert gleichzeitig Aussagen über die Empfindlichkeiten des gemessenen Spektrums im Hinblick auf Änderungen bzw. Unsicherheiten in der Bestimmung der Geometrie und der Bodenbedingungen. Aus der Diskussion dieser Empfindlichkeiten können Rückschlüsse auf die Durchführung der Messung gezogen werden.

Signaltrennung im Frequenzbereich

Vorbemerkung zur Signaltrennung im Zeitbereich

Die scheinbar einfachste Methode ist die Trennung der Signale durch ein Zeittor, dessen Länge aus der geometrischen Zeitverzögerung der Bodenreflexion zum Direktschall zu bestimmen ist. Bei der gewählten Geometrie beträgt diese Zeitspanne ca. 2,3 ms; dies entspricht einer unteren Grenzfrequenz von ca. 440 Hz. Trennverfahren im Zeitbereich sind daher bei dem eingeführten Messaufbau nur beschränkt anzuwenden.

Zum Konzept der Signaltrennung

Für die Signaltrennung im Frequenzbereich müssen drei Bedingungen erfüllt sein. (1) Es muss ein Modell zur Beschreibung der Signalform des Knalles vorliegen. (2) Die Schallausbreitungsphänomene müssen beschrieben werden können. (3) Die Richtwir-

kung muss so schwach sein, dass für den Direktschall und die Bodenreflexion dasselbe Quellsignal angenommen werden darf.

Dann kann das überlagerte Schalldrucksignal am Messort berechnet werden und dort der energetische Anteil des Direktschalls am Gesamtsignal durch ein numerisches Verfahren nach folgendem Konzept ermittelt werden: In einem Iterationsprozess werden die Parameter des Knallmodells und der Ausbreitungsrechnung solange variiert, bis die Abweichung des prognostizierten Schalldruckspektrums vom gemessenen Spektrum in ein Minimum geführt ist. In dem hier diskutierten praxisorientierten Verfahren wird die Trennung anhand des Terzspektrums im Messort durchgeführt. (In der Regel können die Terzpegel von 25 Hz bis 5 kHz ausreichend zuverlässig auch im Freien gemessen werden. Man erhält also typisch 24 unabhängige Messungen pro Einzelschuss, um die Parameter anzupassen. Es wird sich zeigen, dass die Anzahl der Parameter des Knallmodells und der Ausbreitungsrechnung deutlich kleiner ist.) Als Maß für die Übereinstimmung des prognostizierten mit dem gemessenen Spektrum dient die Summe der Pegeldifferenzen in den einzelnen Terzen. (Es kann belegt werden, dass andere Maße, z.B. die Korrelation beider Spektren, zu ununterscheidbaren Ergebnissen führen. In Abhängigkeit vom Messaufbau kann es jedoch von Vorteil sein, den mittleren Frequenzen in der Summe ein höheres Gewicht zu geben, da dann die gegebenenfalls durch Wind gestörten Spektralwerte bei tiefen Frequenzen und z.B. die durch Reflexionen am Schützen beeinflussten Spektralanteile bei höheren Frequenzen an Gewicht verlieren.) Im Folgenden wird sowohl für das benutzte Knallmodell also auch für die zu berechnende Schallausbreitung analysiert, welche Parameter Einfluss nehmen können.

Zum Modell zur Beschreibung der Signalform

Die oben skizzierte phänomenologische Beschreibung des Vorgangs zur Entstehung des Mündungsknalles legt den Rückgriff auf eine Signalform nahe, die Weber für Knallfunken abgeleitet hat. Die Anwendung dieses Modells für Waffenkalle ist vom Autor schon häufig beschrieben worden, siehe z.B. /1/. Dieses Weber-Modell liefert in Abhängigkeit eines einzigen Parameters, dem sogenannten Weber-Radius, ein vollständiges Fourierspektrum des zu erwarteten Signals. Ein Parameter bestimmt also vollständig in Betrag und Phase die Signalform. (Dieses Modell lässt sich eigentlich nur für ruhende ‚Gaswolken‘ übertragen und ist auch dann nur eine vereinfachende Näherung im Rahmen linearer Akustik. Da es aber im Grunde ein Energiemodell ist, ist es hier gerade für zur Schießrichtung seitliche Messpunkte ausreichend zuverlässig, vgl. /1/.)

Die Quellenergie und damit die Signalform hängt auch von anderen Parametern ab, z.B. der Temperatur der Treibladung. Eine um 20°C höhere Temperatur liefert einen um ca. 0,2 dB größeren Quellenergiepegel. Diese Einflüsse werden aber im folgenden nicht weiter betrachtet.

Zur Schallausbreitungsrechnung

Die Berechnung der Schallausbreitung hängt zunächst von rein geometrischen Parametern ab: der Höhe der Quelle und des Empfängers, dem Abstand zwischen beiden und der Höhe des Reflexionspunktes (als Maß für die Ebenheit des Geländes). Es kommen witterungsbedingte Parameter hinzu, die die Absorption bestimmen, aber auch bodennahe Wind- und Temperaturgradienten, die zu einer linearen Phasenverschiebung im Reflexionssignal führen. Einen wesentlichen Einfluss hat der Boden, der hier über ein Admittanz-Modell /in 2, S. 44/ mit 4 Parametern beschrieben wird. Die Berechnung der Schallausbreitung erfordert die Berechnung der Reflexion einer Kugelwelle an einer komplexen Bodenimpedanz. Einfachere Verfahren führen zu unzuverlässigen Ergebnissen.

Die im Nahbereich der Quelle auftretenden Einflüsse nichtlinearer Ausbreitung werden vernachlässigt. Messungen mit Sprengknallen legen zumindest nahe, dass die Reflexion von

hochenergetischen Knallen am Boden linearen Gesetzen hinreichend zuverlässig folgt.

Zur Iteration

Es ergeben sich insgesamt 11 Parameter (der Weber-Radius, die drei Höhen, der Abstand, die Temperatur, die Feuchte und 4 Admittanz-Parameter), die zu variieren sind, um eine Optimalanpassung der beiden Spektren zu erreichen. Der Weberradius ist dabei eine besondere Zielgröße, da aus diesem Parameter nach Maßgabe des Webermodells die Energie und das Spektrum des Quellsignals zu berechnen sind.

Zur Steuerung der Iteration wird hier ein einfaches Monte-Carlo-Verfahren benutzt, das die Parameter einzeln nach dem Zufallsprinzip variiert und entsprechende Fortschritte bei der Minimierung der Summe ‚belohnt‘. Dieses Verfahren führt nicht zwangsläufig in ein absolutes Minimum. Die Erfahrung zeigt aber, dass es im Rahmen dieser Anwendung sehr robust bei einigen Wiederholungen den Weber-Radius des Quellsignals in engem Bereich voraussagt und dabei auch die übrigen Parameter reproduziert.

Bei der Iteration wird für jeden Parameter ein Variationsbereich festgelegt, der sich aus den während der Messung angetroffenen Verhältnissen ableitet und die Unsicherheiten bei der Bestimmung der einzelnen Parameter berücksichtigt. So ist sichergestellt, dass nach der Iteration ein Parametersatz übrigbleibt, der aus der Dokumentation der Messung nicht widerlegt werden kann. Es wird also für den Weber-Radius eine Optimalanpassung in den Grenzen der gemessenen Parameterbereiche gefunden.

Ergebnisse und Anwendungen des Verfahrens zur Bestimmung der Quelldaten von Mündungsknallen sind an anderer Stelle veröffentlicht worden. Es soll hier aufgezeigt werden, wie groß der Einfluss ausgewählter Parameter auf das Ergebnis ist. Die Kenntnis dieser Einflüsse soll helfen, die Messanordnung im Hinblick auf die Minimierung der Unsicherheiten aufzubauen, zu vermesen und die Messung zu dokumentieren.

Einfluss ausgewählter Parameter

Die Einflüsse ausgewählter Parameter sind in Abb. 1 als relative Änderung des Terzspektrums am Messort als Folge der Änderung des einen Parameters dargestellt. Der Bezug (0 dB Linie) ist die Berechnung des Terzspektrums bei Eingabe der für die oben skizzierte Messanordnung geltenden Geometrie bei einem Weber-Radius von 0,2 m. Der jeweilige Parameter wird sowohl positiv wie negativ variiert. Die jeweils gewählte Variation ist willkürlich, spiegelt aber die typische Unsicherheit bei der Bestimmung des Parameters wider (Ausnahme Bodenadmittanz).

Empfindlichkeit gegen Variation der Geometrie

Durch die Änderung der Empfänger- oder Quellhöhe, beides ist hier gleichwertig, oder durch eine Absenkung bzw. Anhebung des Reflexionspunktes ändert sich das Spektrum am Messort erheblich. Die Ursache liegt in der großen Empfindlichkeit der Phasenänderung in der Bodenreflexion auf die Änderung des Reflexionswinkels bei insgesamt kleinen Reflexionswinkeln. Dies folgt aus der Berücksichtigung der Reflexion von Kugelwellen an ebenen Oberflächen. Eine Abstandsänderung der gleichen Größe hat deutlich weniger Einfluss, ist aber letztlich auch auf die Änderung der Reflexionswinkel zurückzuführen.

Empfindlichkeit gegen Variation der Bodenimpedanz

Der Unterschied zwischen Grasboden (0 dB Linie) und schallweicher Admittanz ist bei tiefen Frequenzen natürlich ausgeprägt. Dort und im mittleren Frequenzbereich verhält sich der Grasboden eher schallhart. Im höheren Frequenzbereich ergeben sich für beide Impedanzextreme höhere Pegel. Gerade im mittleren Frequenzbereich ist der Einfluss der Bodenimpedanz sehr ausgeprägt.

Empfindlichkeit gegenüber der Variation des Weber-Radius

Eine Vergrößerung des Weber-Radius führt im absoluten Terzspektrum zu einer Verschiebung des Pegelmaximums zu tieferen Frequenzen und zu einer Anhebung der Gesamtenergie. Entsprechend ändert auch die Variation des Weber-Radius das Spektrum am Messort.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Trennung des Direktschalls vom Gesamtsignal im Frequenzbereich erfordert insgesamt einen sorgfältigen geometrischen Aufbau der Messanordnung, wenn mit vorgegebenen Korrekturen,

vgl. DIN ISO 17201-1, gerechnet werden soll. Bei dem hier beschriebenen Iterationsverfahren werden auch größere Abweichungen ausgeglichen und stören kaum die hinreichend zuverlässige Bestimmung des Weberradius zur Berechnung der Quellenergie für Schallausbreitungsrechnungen.

Die Analyse der Empfindlichkeiten der Empfangsspektren gegenüber geometrischen Unsicherheiten und gegenüber Änderungen der Bodenimpedanz können erklären, warum unkorrigierte Messungen, die mit durchaus ähnlichen Messordnungen erreicht wurden, zu scheinbar nicht reproduzierbaren Spektren führen. Wenn A-bewertete Quellpegel und Richtcharakteristiken die Zielgrößen der Messung sind, spielen Unsicherheiten gerade in dem Bereich des Spektrums eine wesentliche Rolle, wo die Einflüsse der Bodenreflexion, das Maximum des Quellspektrums des Mündungskalles und der Bereich größter Korrekturänderungen der A-Bewertung zusammenfallen. Dies ist bei typischen Messanordnungen wie oben und bei Jagdgewehren größeren Kalibers immer zu erwarten.

Die Interferenzeffekte zwischen Direktschall und Bodenreflexion werden unterschätzt, wenn man vom Bild ebener Wellen ausgeht. Die Reflexion von Kugelwellen ist unabdingbar für das Verständnis der Spektren. Eine Zurückführung der Unterschiedlichkeit der Messergebnisse auf Einflüsse des Exemplars der Waffe oder Fertigungsunterschiede in der Munition sollte erst dann in Betracht gezogen werden, wenn die Einflüsse der Interferenz auszuschließen sind.

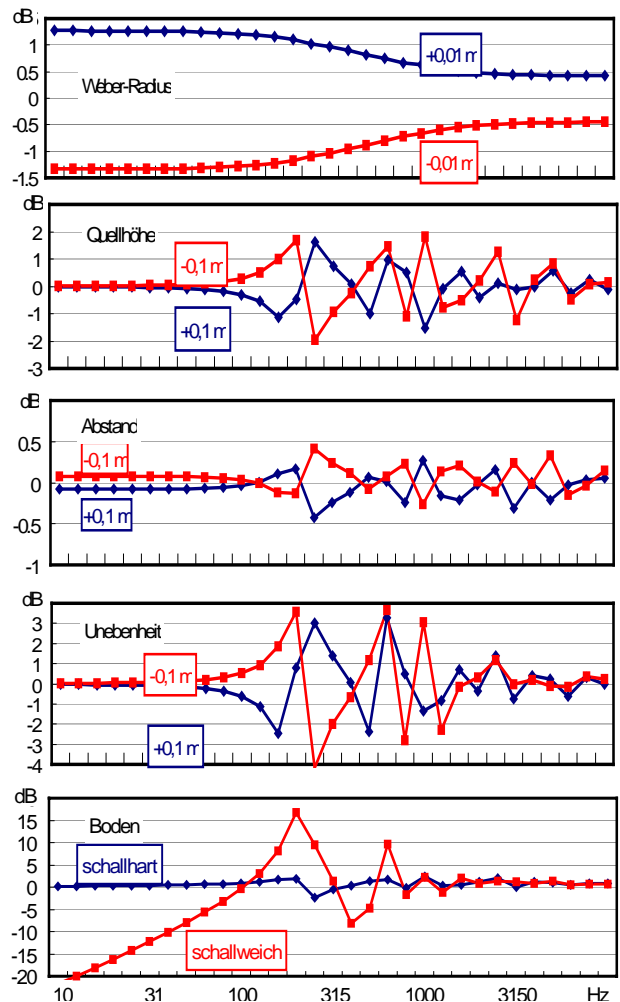


Abb 1 Relative Änderung des Terzpegels im Messort bei Variation des Weber-Radius, geometrischer Parameter und der Bodenadmittanz. Bezug ist das Spektrum bei der gegebenen Messsituation.

Literatur

- /1/ Hirsch, K.-W.: „Messung der Emissionsdaten von Mündungsknallen“ in VDI Berichte 1386, S.159-174
- /2/ Wempen, J.: „Schallausbreitung über Erdboden“, Dissertation, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg