



# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025

## TWO HYBRID DIRECTIVITY MODELS OF MUZZLE BLASTS TO DESCRIBE THE FREQUENCY AND DISTANCE DEPENDENCY

Philipp Bechtel\*

Christian Kleinhenrich

Karl-Wilhelm Hirsch

Cervus Consult GmbH, Germany

(Deutschsprachige Version des gleichnamigen Beitrags zu Forum Acusticum, Euronoise 2025)

### ABSTRACT

The muzzle blast is an auditory risk if the shooter or other personnel are exposed close to the weapon. To evaluate the risk, the signature of the blast must be measured or synthesized for simulation purposes. Muzzle blasts are highly directional. A common approach for simulation is to assume a source model with scalar directivity. This approach neglects the angle- and distance-dependent changes in the frequency spectrum of the blast. Hence, significant discrepancies occur between synthesized and measured shooting signals. This paper presents two alternative approaches to describe the distance- and frequency-dependent directivity of a muzzle blast. The first approach is based on the ANX model by Salomons. In contrast to the scalar directivity of the latter, here a separate source energy is determined for each exit angle using cosine transformation. This model synthesizes the blasts with only a few parameters. For the second model, a transfer function is given by the ANX model and a spherical harmonic source describes the angle and frequency dependency of the blast signature. Depending on the input data, this model provides very detailed reconstructions of measured muzzle blasts even close to the muzzle.

**Keywords:** *Muzzle blasts, nonlinear, directivity, ANX*

### 1 Einleitung

Die Belastung des Gehörs des Schützen beim Schießen von Handfeuerwaffen wird primär durch

\*Corresponding author: [bechtel@cervus.de](mailto:bechtel@cervus.de)

**Copyright:** ©2026 Philipp Bechtel et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

den Mündungsknall verursacht. Die entscheidende Eingangsgröße von Modellen zur Beurteilung der Belastung und des Gehörschädigungsrisikos ist der Schalldruckzeitverlauf am Ohr. Für die Untersuchung solcher Belastungsmodelle werden zuverlässige Quellmodelle der Mündungsknalle benötigt, die das Schalldruckzeitsignal bereitstellen. Im Nahfeld der Waffe müssen dabei zusätzlich zur ausgeprägten frequenzabhängigen Richtcharakteristik des Mündungsknalls, nichtlineare Effekte bei der Schallausbreitung berücksichtigt werden.

### 2 Grundlagen: Richtcharakteristik eines Mündungsknalls

Zunächst werden die Besonderheiten der Richtcharakteristik eines Mündungsknalls diskutiert.

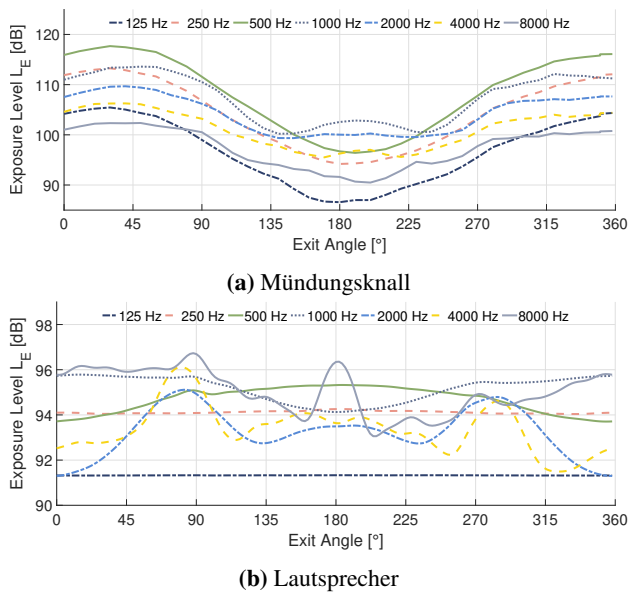
Hierzu sind in Figure 1 die Pegelabweichungen der Oktavbänder über dem Azimutwinkel in der Transversalebene eines Gewehrmündungsknalls und eines Lautsprechers dargestellt. Als Lautsprecher wurden Messdaten des Genelec 8020c aus dem BRAS-Projekt verwendet[1]. Aus dem Vergleich der Pegelabweichungen der Oktavbänder werden folgende Aspekte deutlich

- Die oktavbandabhängige Pegelabweichung des Waf-fenmündungsknalls beträgt je nach Abgangswinkel bis zu 20 dB und ist somit um ein vielfaches größer als die des Lautsprechers
- Die Exzentrizität - die Pegeldifferenz zwischen vorne (Schussrichtung) und hinten - des Mündungsknalls ist in den tiefen Frequenzbändern von 125 Hz to 500 Hz am stärksten ausgeprägt und nimmt zu hohen Frequenzen hin von ca. 20 dB auf 10 dB ab
- Die meiste Energie wird bei diesem Gewehr zwischen 500 Hz und 1 kHz abgestrahlt



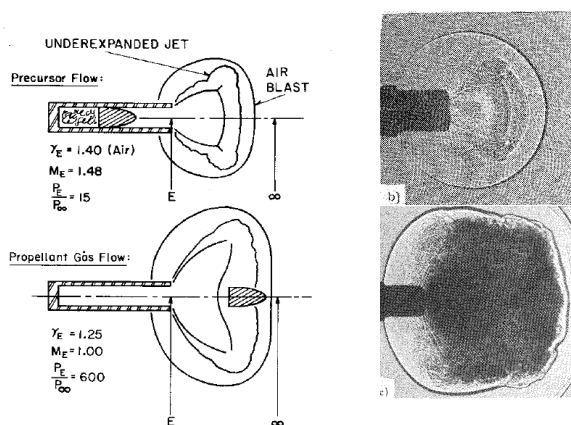


# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025



**Figure 1:** Pegel einzelner Oktavbänder in Abhängigkeit des Abgangswinkels in der Transversalebene für einen Waffenmündungsknall und einen Lautsprecher (Genelec 8020c)

Die beim Mündungsknall aus dem Rohr austretenden Treibladungsgase ähneln einer massiv verformten Kugel, wie in den Schlierenaufnahmen aus Figure 2 angedeutet.



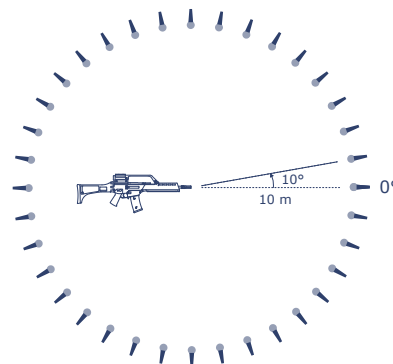
**Figure 2:** Beim Mündungsknall auftretende Strömungen [2]

Die in den Schlierenaufnahmen erkennbare kugelförmige erste Schallfront ist der so genannte *Precursor*, der von der durch das Geschoss mit Überschallgeschwindigkeit

herausgedrückten Luft stammt. Der eigentliche Mündungsknall wird von den Treibladungsgase hinter dem Geschoss gebildet. Diese treten auch mit Überschallgeschwindigkeit aus dem Rohr aus und strömen in die ruhende Luft. Dabei bildet sich eine sogenannte Machsche Platte, ein wohl bekanntes Phänomen der Strömungsdynamik. Der Mündungsknall wird also nicht von der Mündung selbst, noch von einer Kugel um diese, sondern näherungsweise von einer Scheibe abgestrahlt[3]. Dies erklärt, dass die Richtwirkung auch bei größeren Wellenlängen nach vorne gerichtet ist, während sie zu kleineren Wellenlänge eher rund bleibt.

### 3 Roh- und Referenzdaten

In Figure 3 sind die 36 Messpunkte in der horizontal Ebene skizziert.



**Figure 3:** Skizze der 360° Messung

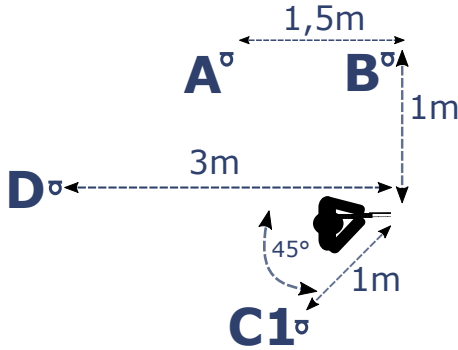
Pro Messpunkt liegen drei aufgezeichnete Schussprofile vor. Der Abstand der Mikrofone zur Mündung beträgt jeweils 10 m. Als Waffe wird ein Gewehr auf einem Schießbock mit Mündungsbremse<sup>1</sup> verwendet. Sowohl die Mündung als auch die jeweiligen Messpunkte sind 2 m über dem näherungsweise schallharten Grasboden positioniert. Somit trifft die Bodenreflexion ca. 2.1 ms nach dem Direktschall ein. Für die hier präsentierten Untersuchungen wird nur der, mittels Hamming window ausgefensterte, Direktschallanteil betrachtet. Die Vollmantelmunition entspricht dem Kaliber 5.56 mm × 45 mm. Bei den Berechnungen wurde für diese Munition eine Aus-

<sup>1</sup>Nach aktuellem Untersuchungsstand beeinflusst die Mündungsbremse den abgestrahlten Schall ab einem Winkel von  $\approx 140^\circ$ , sodass dort kein sauberer Knall mehr gemessen wird.



# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025

trittsgeschwindigkeit  $v_0 = 1200 \text{ m/s}$  und eine Geschoss-  
masse  $m_p = 3.7 \text{ g}$  angesetzt.



**Figure 4:** Skizze Referenzmesspunkten

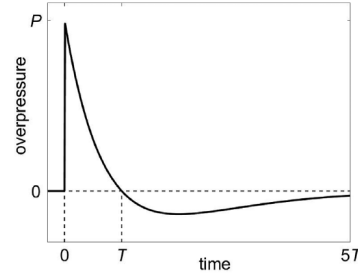
Zur Untersuchung der Ausbreitungsmodelle werden zusätzlich insgesamt sechs Messpunkte einer anderen Messkampagne verwendet. Dort wurde der selbe Gewehrtyp mit identischer Munitionierung auf einem offenen Schießstand vermessen. Im Gegensatz zur 360° Messung bestand der Boden hier aus Schotter und es kam ein Schütze anstelle eines Schießbockes zum Einsatz. Vier der Sechs Referenzpunkte sind in Figure 4 skizziert. Die beiden übrigen Messpunkte C5 und C10 sind im Ausbreitungspfad des Messpunktes C1 im Abstand von 5 m bzw. 10 m zur Mündung.

## 4 ANX QUELLMODELL

Dieses Modell wurde 2024 von Salomons [4] unter dem Titel: *Analytical model for sound of explosives and firearms (ANX)* vorgestellt. Es basiert auf einem Friedlanderknall[5], der mit dem Spitzenschalldruck  $P$  und der positiven Durchlaufzeit  $T$  zwei charakteristische Kennwerte hat. Die Kennwerte sowie der daraus resultierende Schalldruckzeitverlauf sind in Figure 5 skizziert.

Die Besonderheit des ANX-Modell ist die nichtlineare Schallausbreitung. Hierbei sind der Spitzenschalldruck  $P(r)$  und die Dauer der positiven N-Wellenflanke  $T(r)$  abstandsabhängige Größen, die nach Equations (2) and (3) bestimmt werden. Da die Spektralenergie eines Signals mit steigendem  $T(r)$  zunehmenden zu tiefen Frequenzen wandert, wird ein Knall nach dem ANX-Modell mit wachsendem Abstand zur Mündung tieffrequenter.

Die von der Quellenergie  $E$  abhängige Hilfsgröße  $r_*$  begrenzt unter anderem den Anwendungsbereich des Mod-



**Figure 5:** Friedlander-Wellenform, mit Spitzenschall-  
druck  $P$  und positiven Durchlaufzeit  $T$ [4]

**Table 1:** Relevante Konstanten und Referenzgrößen

$K$	$\beta$	$\rho$	$c$	$t_0$	$p_0$
0.38	1.2	$1.2 \text{ kg/m}^3$	$340 \text{ m/s}$	1 s	$20 \text{ }\mu\text{Pa}$

ells mit  $r > 1.6 r_*$  und kann nach Equation (4) mit den Werten aus Table 1 bestimmt werden. Die Quellenergie von Handfeuerwaffen beträgt in der Regel weniger als 20 kJ was einem maximalen  $r_*$  von 367 mm entspricht. Somit ist das Modell für die meisten Handfeuerwaffen ab einer Entfernung von ca. 0.6 m anwendbar.

$$p(t) = P(r) \left(1 - \frac{t}{T(r)}\right) e^{-t/T(r)} \quad (1)$$

$$P(r) = K \rho c^2 \frac{r_*}{r} \sqrt{\frac{1}{\ln(r/r_*)}} \quad (2)$$

$$T(r) = K \beta \frac{r_*}{c} \sqrt{\ln\left(\frac{r}{r_*}\right)} \quad (3)$$

$$r_* = 0.7 \sqrt[3]{\frac{E}{\rho c^2}} \quad (4)$$

### 4.1 Skalare Richtcharakteristik

Salomons[4] verwendet als Richtcharakteristik einen skalaren Ansatz mit dem Richtwirkmaß  $D$ . Dieses Maß kann mit der Referenzgröße  $m_0 = 75 \text{ g}$  nach Equation (5) berechnet werden. Für Handfeuerwaffen beträgt die Treibladungsmasse  $m$  nur wenige Gramm, sodass



$m \ll m_0$  gilt und das Richtwirkmaß näherungsweise 17.5 dB beträgt. Der Richtungskorrekturterm  $C_{\text{dir}}$  kann nach Equation (6) bestimmt werden und beträgt bei  $m \ll m_0$  ca. 11 dB.

Der skalare, abgangswinkelabhängige Korrekturpegel  $\Delta L(\phi)$  resultiert damit nach Equation (7).

$$D = \frac{17.5}{1 + (m/m_0)^{1.5}} \quad (5)$$

$$C_{\text{dir}} = 10 \log \left( \frac{10 \cdot 10^{D/10}}{D \ln(10)} \left[ 1 - 10^{-D/10} \right] \right) \quad (6)$$

$$\Delta L(\phi) = D \left( 1 - \frac{\phi}{180} \right) - C_{\text{dir}} \quad (7)$$

Für das hier betrachtete Gewehr wird für die Quellenergie  $E = 2500$  J angesetzt.

## 4.2 Quellenergieabhängige Richtcharakteristik mittels Kosinustransformation

Bei diesem Ansatz wird eine winkelabhängige Quellenergie  $E(\phi)$  bestimmt. Mit den Koeffizienten eines Gewehrs des 5.56 mm  $\times$  45 mm Kalibers aus Table 2 kann mittels Kosinustransformation nach Equation (8) die winkelabhängige Quellenergie bestimmt werden. Mit der winkelabhängigen Quellenergie können anschließend nach Equations (2) and (3) die abstandsabhängigen Signalparameter berechnet werden aus denen das finale Signale am Empfänger resultiert.

**Table 2:** Koeffizienten zur Bestimmung der richtungsabhängigen Quellenergie eines Gewehrmündungsknalls mittels Kosinustransformation 5. Ordnung.

Index $i$	1	2	3	4	5
$c_i / \text{J}$	2521	1908	557	79	52

$$E(\phi) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot \cos(\phi \cdot (i - 1)) \quad (8)$$

## 5 Spherical Harmonics (SH) Quelle

Als weiteres Quellmodell wird eine Transformation der Messdaten in die *spherical frequency domain* betrachtet. Diese wurde mit einer Spherical Harmonics Zerlegung der 15. Ordnung durchgeführt, woraus für jede Frequenz-Stützstelle 256 komplexe Koeffizienten resultieren. Detaillierter wird das Verfahren unter anderem von Williams[6] sowie Pollow[7] beschrieben. Die rekonstruierten Signale dieses Quellmodells repräsentieren selbstredend nur diesen Gewehrtyp mit entsprechender Munition.

## 6 AUSBREITUNGSMODELLE

In diesem Kapitel werden zwei verschiedene Ausbreitungsmodelle behandelt. Beide behandeln ausschließlich die abstandsabhängige Dämpfung. So werden z.B. Atmosphärische Dämpfungsanteile die ebenfalls bei der Schallausbreitung auftreten in diesen Modellen nicht berücksichtigt.

Als Referenzabstand  $r_0$  wurden bei den Spherical Harmonics 10 m angesetzt, da die zur Zerlegung verwendeten Daten in diesem Abstand vorlagen. Für das ANX-Quellmodell wurde  $r_0 = 1$  m als Referenzabstand gewählt.

### 6.1 Lineares Schallausbreitungsmodell

Beim linearen Ausbreitungsmodell wird der in der Akustik übliche  $1/r$  Ansatz verwendet. Die Berechnung des Schalldruckzeitverlaufs  $p_r(t, \phi)$  im Abstand  $r$  ist in Equation (9) unter Vernachlässigung der Phase sowie weiterer Dämpfungseffekte dargestellt.

$$p_r(t, \phi) = p_{r_0}(t, \phi) \cdot \frac{r_0}{r} \quad (9)$$

### 6.2 Nichtlineares Schallausbreitungsmodell

Dieses Modell beschreibt die nichtlineare Schallausbreitung einer N-Welle mit sphärischer Ausdehnung in homogener Umgebung nach Pierce[8]<sup>2</sup>. Bei der Umsetzung orientiert sich dieses Modell an dem ANX-Modell nach Section 4.

Zur Bestimmung der abstandsabhängigen Übertragungsfunktion wird zunächst die winkelabhängige

<sup>2</sup> Kapitel 11.9



Energie  $E(\phi)$  der Schallquelle benötigt. Sollte diese nicht bekannt sein, sondern beispielsweise Schalldruckzeitverläufe in dem bekannten Quellabstand  $r$ , so kann die Energie dieser Signale geschätzt werden. Hierzu muss der Expositionspegel  $L_E$  des Signals berechnet werden. Aus diesem Pegel kann anschließend die Hilfsgröße  $r_*$  nach Equation (10) abgeschätzt werden<sup>3</sup>. Mit den Konstanten und Referenzgrößen aus Table 1 kann abschließend die Quellenergie mit Equation (11) bestimmt werden.

$$L_E = 10 \log \left( \frac{\pi K^3 \beta \rho^2 c^3 r_*^3}{p_0^2 r_0^2 t_0} \frac{r_0^2}{4\pi r^2} \sqrt{\frac{1}{\ln(r/r_*)}} \right) \quad (10)$$

$$E = \rho c^2 \left( \frac{r_*}{0.7} \right)^3 \quad (11)$$

Im nächsten Schritt wird die Erstellung der Übertragungsfunktion skizziert. Mit der winkelabhängigen Quellenergie  $E(\phi)$  wird ein ANX-Signal  $p_{r_0}(t, \phi)$  für den Referenzabstand  $r_0$  und ein zweites Signal  $p_r(t, \phi)$  für den gewünschten Quellabstand  $r$  generiert. Mittels Fourier Transformation werden diese beiden Signale in den Bildbereich überführt und der Quotient gebildet, der der Übertragungsfunktion entspricht.

Durch Multiplikation des ebenfalls in den Frequenzbereich transformierten Quellsignals mit der Übertragungsfunktion kann der Frequenzgang des Signals im Abstand  $r$  unter dem Abgangswinkel  $\phi$  bestimmt werden. Aus der Rücktransformation in den Zeitbereich resultiert das Schussignal am Betrachtungspunkt mit nichtlinearer Schallausbreitung.

## 7 UNTERSUCHUNG

In diesem Abschnitt werden die präsentierten Quellmodelle hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Nahbereich der Mündung untersucht. Hierzu werden die prognostizierte Gehörbelastung sowie die Schalldruckzeitverläufe und Frequenzgänge betrachtet.

Die im folgenden verwendeten Kürzel können Table 3 entnommen werden.

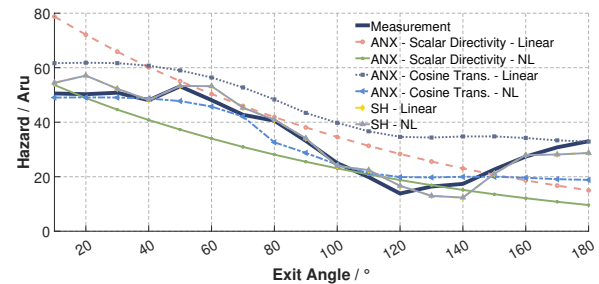
<sup>3</sup> Nach Salomons[4] beträgt die Abweichung maximal 1 dB

**Table 3:** Nomenklatur der Kürzel

Scalar Directivity	skalare Richtcharakteristik nach Section 4.1
Cosine Trans.	energetisch Richtcharakteristik nach Section 4.2
Linear	lineares Ausbreitungsmodell nach Section 6.1
NL	nichtlineare Ausbreitung nach Section 6.2

### 7.1 Prognostizierte Gehörbelastung

Das zur Bestimmung der Gehörbelastung verwendete AHAH-Modell[9] wurde explizit für Schießlärm entwickelt. Es ist ein sachgerechtes Gehörschädigungsprognoseverfahren und wird zur Zeit unter anderem vom US-Militär verwendet[10]. Die AHAH-Einstellungen ungewarnt, kein Gehörschutz und frontaler Schalleinfall wurden durchgängig für alle Berechnungen angewendet.



**Figure 6:** Gehörbelastung über dem Abgangswinkel in 10 m Mündungsabstand

Aus den in Figure 6 präsentierten Gehörbelastungen über dem Abgangswinkel in 10 m Entfernung können folgende Aussagen abgeleitet werden.

- Die prognostizierte Gehörbelastung der Messsignale nimmt mit zunehmendem Winkel ab, bis der Einfluss der Mündungsbremse ab  $\approx 140^\circ$  diese wieder ansteigen lässt
- Die Kurven der Spherical Harmonics Rekonstruktionen mit linearer und nichtlinearer Schallausbreitung sind aufgrund des Referenzabstandes  $r_0 = 10$  m identisch und weichen nur geringfügig von den Sollwerten ab
- Die Gehörbelastungen nach den ANX-Modellen mit skalarer Richtcharakteristik fallen näherungsweise linear über dem Abgangswinkel ab. Mit dem linearem Ausbreitungsmodell sind die Werte erwartungsgemäß

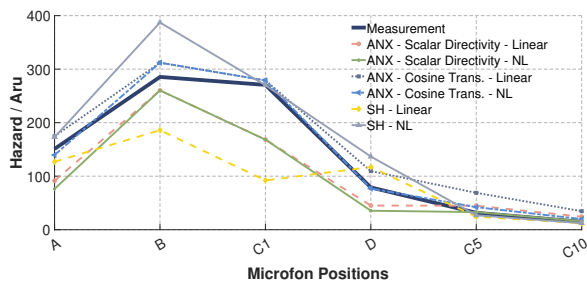


# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025

höher, da sowohl der stärkere zusätzliche Pegelabfall sowie die Verschiebung im Spektrum vernachlässigt werden. Die Korrelation mit den Werten der Messung sind für die ANX-Quellmodelle mit skalarer Richtcharakteristik nur gering

- Das ANX-Quellmodell mit Kosinustransformation - Richtcharakteristik überschätzt bei linearer Ausbreitungsrechnung die Sollwerte deutlich. In Kombination mit dem nichtlinearen Ausbreitungsmodell liefert das Verfahren für Winkel  $< 140^\circ$  sachgerechte Gehörbelastungsprognosen

Als nächstes werden die Modelle an den Referenzdaten nach Figure 4 untersucht. Hierzu sind in Figure 7 die Gehörbelastungen an den in 1 m to 10 m entfernten Referenzmesspunkten dargestellten und folgende Aussagen können abgeleitet werden.



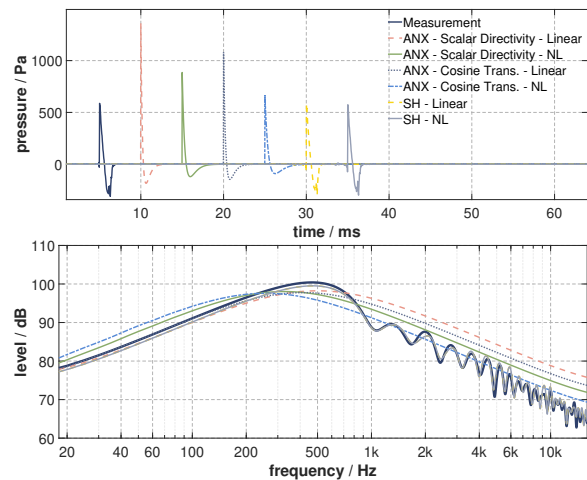
**Figure 7:** Gehörbelastung an den Referenzmesspunkten gemäß Figure 4

- Die prognostizierte Gehörbelastung der Messsignale nimmt tendenziell mit zunehmendem Abstand zur Mündung hin ab
- An den Mündungsnahen Messpunkten B und C1 weichen die Spherical Harmonics Werte deutlich von einander ab je nachdem welches Ausbreitungsverfahren angesetzt wurde. Dabei sind die Abweichungen mit dem nichtlinearen Ausbreitungsmodell gegenüber den Sollwerte signifikant geringer
- Das ANX-Modell mit skalarer Richtcharakteristik unterschätzt unabhängig des Ausbreitungsmodells die tatsächliche Gehörbelastung größtenteils deutlich
- Das ANX-Quellmodell mit der Kosinustransformation - Richtcharakteristik und nichtlinearer Schallausbreitung liefert nahezu identische Gehörschädigungsrisikos wie die Messdaten Bei Verwendung des linearen

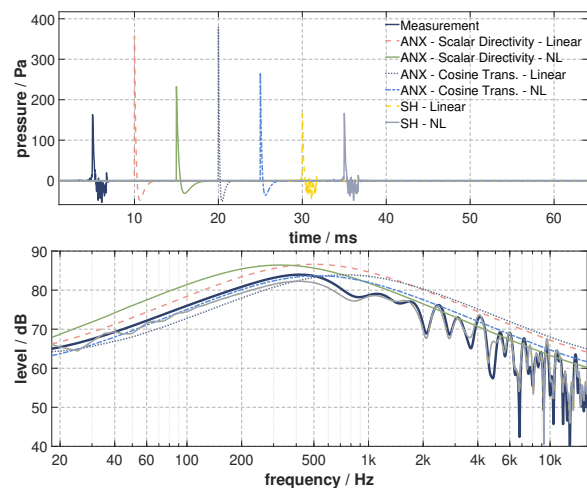
Ausbreitungsmodells nimmt die Überschätzung der Gehörbelastung mit dem Abstand zu

## 7.2 Rekonstruierte Schussignale

Zur weiteren Untersuchung werden die gemessenen und rekonstruierten Signale an zwei Messpunkten auf dem Kreis nach Figure 3 sowie zwei relevante Positionen in 1 m Mündungsabstand detaillierter betrachtet.



**Figure 8:** Schalldruckzeitverlauf und Frequenzgang unter  $10^\circ$  in 10 m Abstand



**Figure 9:** Schalldruckzeitverlauf und Frequenzgang unter  $130^\circ$  in 10 m Abstand

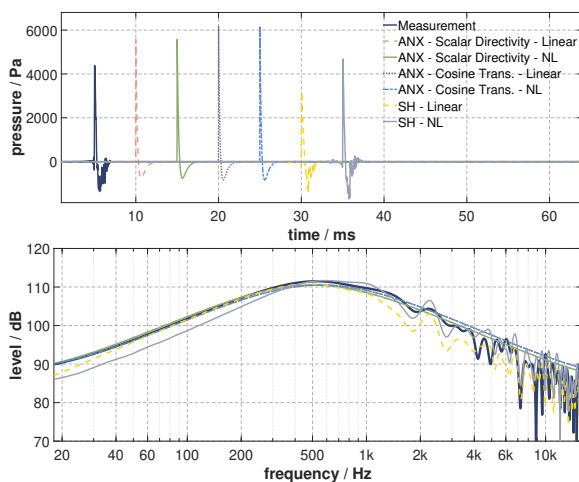
In Figures 8 and 9 werden die Schalldruckzeitverläufe und Frequenzgänge an zwei repräsentativen Messpunkten



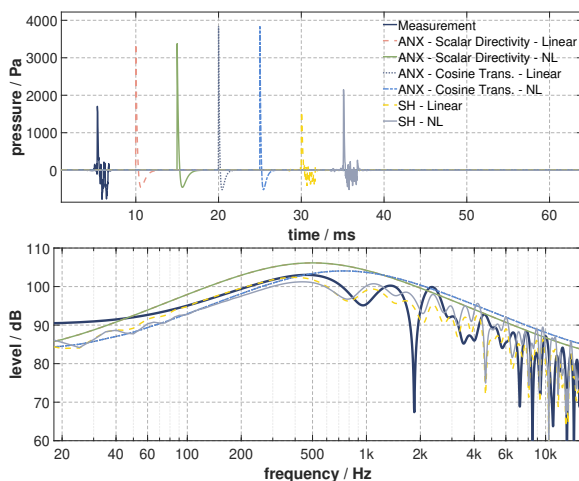


# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025

der Rundummessung diskutiert. Daraus ist ersichtlich, dass die Spherical Harmonics Signale erwartungsgemäß untereinander identisch sind und kaum Abweichungen zu den Messsignalen aufweisen. Die ANX-Ansätze mit linearer Schallausbreitung überschätzen die Spitzenpegel mit teilweise mehr als 6 dB signifikant. Mit dem nichtlinearen Ausbreitungsmodell sind die Differenzen zu den Sollwerten deutlich geringer. Hinsichtlich der Frequenzgänge liefern alle betrachteten Quellmodelle passable Rekonstruktionen.



**Figure 10:** Schalldruckzeitverlauf und Frequenzgang unter  $90^\circ$  in 1 m Abstand (Referenzmesspunkt B)

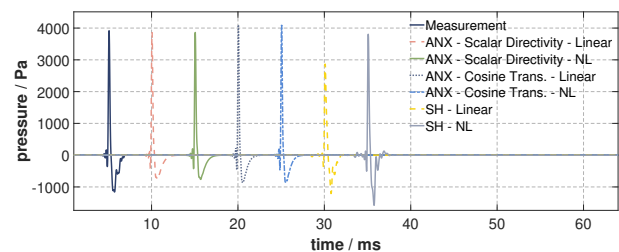


**Figure 11:** Schalldruckzeitverlauf und Frequenzgang unter  $135^\circ$  in 1 m Abstand (Referenzmesspunkt C1)

In Figures 10 and 11 werden die Schall-

druckzeitverläufe und Frequenzgänge in 1 m Abstand unter unterschiedlichen Abgangswinkeln diskutiert. Bei den Spherical Harmonics Signalen beträgt die Differenz untereinander 3 dB to 4 dB. Hierbei weisen die Schalldruckzeitverläufe mit nichtlinearer Ausbreitung tendenziell höhere Ähnlichkeiten mit den Messdaten auf. Auch bei den Spektren bildet das Modell mit nichtlinearer Schallausbreitung die Frequenzgänge oberhalb von ca. 500 Hz besser nach. Aufgrund der geringen Nutzsig-nallänge von 7 ms sind die Kurven unterhalb von 500 Hz nur bedingt belastbar.

Die ANX-Quellmodelle weisen in dieser Distanz erwartungsgemäß keine Unterschiede bezüglich des Schallausbreitungsverfahrens auf. Hinsichtlich der Richtcharakteristik sind die Spitzenpegel des Verfahrens mit Kosinustransformation geringfügig höher als die des skalaren Ansatzes. Zudem sind die Spektren des skalaren ANX-Modells tieffrequenter als die der Kosinustransformation. Beide ANX-Quellmodell überschätzen den Spitzenpegel der Messsignale mit 3 dB to 8 dB teils enorm. Bei genauerer Betrachtung der Spektren resultiert diese Differenz primär aus der Überschätzung der Frequenzanteile oberhalb von  $\approx 3$  kHz. Die in Figure 12 dargestellten Schalldruckzeitverläufe am Messpunkt B wurden zur Veranschaulichung bei 4 kHz Tiefpass<sup>4</sup> gefiltert. Ein Vergleich zu Figure 10 zeigt, dass die Spitzenpegeldifferenzen der ANX-Modelle gegenüber des Messsignals von über 3 dB auf unter 1 dB gefallen sind.



**Figure 12:** Tiefpass<sup>4</sup> gefilterter Schalldruckzeitverlauf unter  $90^\circ$  in 1 m Abstand (Referenzmesspunkt B)

Dieser Aspekt erklärt die hohe Übereinstimmung der AHAH-Gehörschädigungsprognosen des ANX-Modells mit Kosinustransformation und nichtlinear Ausbreitung, trotz der markanten Pegeldifferenzen. Die Ursache dafür liegt in der Arbeitsweise des AHAH-Modell. Dieses

<sup>4</sup> Butterworth-Filter 10. Ordnung mit 4 kHz Grenzfrequenz



# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025

berechnet die Auditory Risk Units für einzelne Bark Bänder, wobei der maximale Wert maßgeblich ist. Bei den hier betrachteten Schussignalen liegt der maximale Wert stets im Frequenzbereich zwischen 1 kHz to 2.5 kHz. Die tiefer- und höherfrequenten Signalanteile fallen somit bei der Prognose des Gehörschädigungsrisikos weniger stark ins Gewicht. Unabhängig dessen tendiert das ANX-Modell dazu die Energie der hochfrequenten Signalanteile dieses Gewehrmündungsknalls zu überschätzen, was weiterer Untersuchungen bedarf.

## 8 FAZIT

Es konnte gezeigt werden, dass das ANX-Quellmodell mit Kosinustransformation als Richtcharakteristik insbesondere in Bezug auf die prognostizierte Gehörbelastung realistischere Signale als der skalare Ansatz generiert. Die Ursache hierfür liegt in dem zu stark vereinfachten Modellierungsansatz der frequenzabhängige Richtcharakteristik eines Mündungsknalls. Aus dem Versuch diese mit einem einzigen skalaren Faktor nachzubilden folgen logischerweise höhere Abweichungen als mit dem komplexeren Ansatz der Kosinustransformation.

Zudem wurde deutlich, dass die Qualität der im Nahbereich der Mündung generierten Schussignale steigt, wenn anstelle der linearen Schallausbreitung nichtlineare Übertragungsfunktionen verwendet werden. So kann beispielsweise mit dem ANX-Modell mit Kosinustransformation-Richtcharakteristik und nichtlinear Ausbreitung die Gehörbelastung des Direktschallanteils des hier betrachteten Gewehrmündungsknalls sowohl in Abhängigkeit des Abgangswinkels als auch des Mündungsabstand sachgerecht prognostiziert werden.

Die hier vorgestellten Erkenntnisse unterliegen einigen Einschränkungen. So wurden ausschließlich die Direktschallanteile von Waffenknullen betrachtet. Untersuchungen hinsichtlich der Qualität der Quell- und Ausbreitungsmodelle in Kombination mit mehrfach Reflexionen in geschlossenen Anlagen stehen noch aus. Das hier nur ein Gewehr betrachtet wurde stellt eine weitere Limitierung da. Zur weiteren Bewertung müssen die Verfahren auf andere Waffen angewendet und validiert werden. Alternativ zu den hier betrachteten Verfahren steht mit dem Webermodell ein weiteres Quellmodell zur Verfügung, auf welches das nichtlineare Schallausbreitungsmodell als Übertragungsfunktion angewendet werden kann. Erste Untersuchungen hierzu erscheinen vielversprechend.

## 9 REFERENCES

- [1] L. Aspöck, F. Brinkmann, D. Ackermann, S. Weinzierl, and M. Vorländer. *BRAS - Benchmark for Room Acoustical Simulation*. en. 2020. DOI: 10.14279/DEPOSITONCE-6726.3.
- [2] E. M. Schmidt and D. D. Shearf. “Optical Measurements of Muzzle Blast”. In: *AIAA Journal* 13.8 (1975), pp. 1086–1091.
- [3] J. Zhang, G. Liu, W. Han, L. Liu, and Z. Wang. “Numerical research on the muzzle multiphase flow field produced by gas curtain launch”. In: *Scientific Reports* 14.1 (Nov. 2024). DOI: 10.1038/s41598-024-81216-1.
- [4] E. M. Salomons. “Analytical model for sound of explosives and firearms”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 156.3 (Sept. 2024), pp. 2034–2044. ISSN: 0001-4966. DOI: 10.1121/10.0030301.
- [5] F. G. Friedlander. “The diffraction of sound pulses I. Diffraction by a semi-infinite plane”. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 186.1006 (Sept. 1946), pp. 322–344. ISSN: 2053-9169. DOI: 10.1098/rspa.1946.0046.
- [6] E. G. Williams. *Fourier acoustics - Sound radiation and nearfield acoustical holography*. Academic Press, 1999. DOI: 10.1016/B978-0-12-753960-7.X5000-1.
- [7] M. Pollow. *Directivity patterns for room acoustical measurements and simulations*. Logos Verlag Berlin GmbH, 2015. ISBN: 978-3-8325-4090-6.
- [8] A. D. Pierce. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Springer International Publishing, 2019. ISBN: 9783030112141. DOI: 10.1007/978-3-030-11214-1.
- [9] P. D. Fedele, M. S. Binseel, J. T. Kalb, and G. R. Price. *Using the Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans (AHAH)*





# FORUM ACUSTICUM EURONOISE 2025

*With Hearing Protection Software, Release MIL-STD-1474E.* Tech. rep. ARL-TR-6748. Army Research Laboratory, 2013.

- [10] US Department of Defense. *MIL-STD-1474E: Design Criteria Standard Noise Limits.* Military Standard. 2015.



**11<sup>th</sup> Convention of the European Acoustics Association**  
Málaga, Spain • 23<sup>rd</sup> – 26<sup>th</sup> June 2025 •

