

## Physikalische Aspekte zur Begründung der Wahl der C-Bewertung zur Beurteilung hochintensiver Knallgeräusche

### Einleitung

Schießlärm unterscheidet sich in mehreren Aspekten vom beispielsweise Verkehrslärm oder normalem Gewerbelärm: Die Quellen des Schießlärms sind meist freie Explosionen oder Schüsse, die hochenergetische, breitbandige und kohärente Impulsschalle abstrahlen. Im Gegensatz dazu sind andere Geräuschquellen typisch kontinuierlich aktive Schallquellen, die stochastisch Schall mit moderater Quellenergie abstrahlen. Während die kontinuierlichen Lärmquellen über relativ kurze Entfernungen bereits im Hintergrundgeräusch aufgehen können, treten Schießgeräusche wegen ihrer hohen Quellenergie noch nach großen Laufstrecken deutlich aus dem Hintergrundpegel hervor. Großräumige Boden- und Witterungseinflüsse spielen deshalb bei der Beschreibung der Schallausbreitung des Schießlärms eine wesentliche Rolle.

Auch am Immissionsort unterscheiden sich die Schalle dieser Lärmarten erheblich: Während sich kontinuierliche Schallquellen am Empfangsort meist mit anderen gleichartigen Geräuschquellen wiederum stochastisch überlagern, bleiben die Schießgeräusche in der Regel auch hier Einzelereignisse mit kohärentem Charakter.

Dieser maßgebliche Unterschied ist eine wesentliche Ursache für die bekannten großen Spannweiten der Immissionspegel von Schießlärm. Wegen der noch ausgeprägten Kohärenz der Signale am Empfangsort spielt gerade die dort vorhandene Umgebung - die Bodenbeschaffenheit, lokale, reflektierende und schirmende Hindernisse - eine große Rolle. Gerade der Bodenreflexion wird in der Regel kaum Beachtung geschenkt, weil der Schalleinfall als streifend erachtet wird und deshalb dieser zur Schallausbreitung nahezu parallel liegende Reflektor scheinbar kaum Anlaß zur Berücksichtigung von Überlagerungseffekten gibt. Dieser Beitrag möchte zeigen, daß gerade die Überlagerung der Bodenreflexion und des direkten Schalles Ursache für die nur unzuverlässig zu messenden, üblichen Schallpegel ist.

### ‘Energie-äquivalente’ Lärmpegel

Für die Beurteilung der Geräuschbelastung in einem Immissionsort werden in den einschlägigen Vorschriften maßgebliche Außenschallpegel definiert. Bei diesen Pegeln handelt es sich durchweg um sogenannte ‘energie-äquivalente’ Pegel, die aus der Messung des frequenzbewerteten Schalldruckes die Signalenergie durch Quadratur und Zeitintegration bilden. Werden Maximalpegel eingeführt, werden sie dennoch wie energie-äquivalente Pegel zur Bildung des Beurteilungspegels durch energetische Addition der Maximalpegel der Einzelereignisse verwendet. Klare Reflexionssituationen am Empfangsort, die zu lokaler Kohärenz und damit zu Superpositionen führen, werden durch Zuschläge berücksichtigt.

Während bei stochastisch überlagerten Schallen die Signalenergie des Schalldruckes ein in guter Näherung zuverlässiges Maß für die einfallende akustische Energie darstellt, führt die stets auftretende Superposition der auch am Empfangsort von sich aus kohärenten Knallsignale hier zu wesentlichen Fehleinschätzungen.

Überlagern sich Direktschall und Reflexion bei gleicher Phase, verdoppelt sich der Schalldruck, die akustische Energie wird um 6 dB überschätzt. Löschen sich beide Signale aus, wird kein Schalldruck gemessen, der Pegel wird daher um eine große Maßzahl in Dezibel unterschätzt. Bei ebenen Wellen geschieht das spektral periodisch, so daß der Gesamtpegel nur um wenige dB vom ‘wahren’ Wert abweicht. Bei der Ausbreitung von Kugelwellen über typischen Bodenverhältnissen - insbesondere bei streifendem Einfall - ist dies aber nur bedingt der Fall. Dort können breite Spektralbereiche von konstruktiver bzw. destruk-

tiver Überlagerung betroffen sein und so gerade bewertete Pegel maßgeblich beeinflussen.

### Der besondere Einfluß der Bodenreflexion

Die Beschreibung des Einflusses der Reflexion von Kugelschallwellen an einer ebenen Grenzfläche ist im grundsätzlichen Ansatz bereits von Sommerfeld /1/ gelöst. Die Berücksichtigung dieses Einflusses in Modellen der Schallausbreitung ist allerdings wegen des erforderlichen erheblichen numerischen Aufwandes bzw. wegen der scheinbar geringen Signifikanz nicht verbreitet. In jüngster Zeit hat Wempen /2/ gezeigt, daß das Verständnis und die Beschreibung der Schallausbreitung über Erdboden ganz wesentlich von der Berücksichtigung dieses Effektes abhängt. /2/ enthält eine Literaturübersicht über dieses Thema und beschreibt auch ein numerisches Verfahren zur Berechnung der Bodenreflexion.

### Ein einfaches Modell einer Knallquelle

Die Berücksichtigung der Bodenreflexion, also die Einführung eines komplexen, frequenzabhängigen und winkelabhängigen Reflektionsfaktors für den Erdboden, bei der Ausbreitungsrechnung für Knallgeräusche von Explosionen setzt aber eine vollständige mathematische Beschreibung des Knallsignals voraus. Knallsignale lassen sich nicht durch einfache mathematische Ansätze, beispielsweise durch einen Rechteckimpuls, annähernd beschreiben. Typische Knallsignale zeigen ein breitbandiges Spektrum, das durch ein ausgeprägtes Pegelmaximum aber auch ein eindeutig definierten Phasenzusammenhang bestimmt wird.

Aus dem wenig bekannten Ansatz von Weber /3/ läßt sich ein einfaches physikalisches Modell einer solchen Knallquelle ableiten und numerisch umsetzen. Der wesentliche Gedanke des Weber’schen Ansatzes ist, daß sich eine Knallquelle durch eine sich explosionsartig ausdehnende Kugel beschreiben läßt. Solange die Ausdehnungsgeschwindigkeit größer ist, als die Schallgeschwindigkeit der umgebenden Luft - die Kugel also explodiert -, kann keine Schallabstrahlung stattfinden. Erst zu dem Zeitpunkt, zu dem die sich ständig vermindernde Ausdehnungsgeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit unterschreitet, wird der Knall von der Kugel abgestrahlt. Der Ansatz der Strahlungsimpedanz eines Kugelstrahlers erster Ordnung zusammen mit der thermodynamischen Beschreibung des Zustandes zu diesem Zeitpunkt liefert eine einfache Lösung für die oben geforderte vollständige mathematische Beschreibung des Knallsignals.

Als einziger Parameter zur Beschreibung der Knallquelle steht in diesem einfachen Modell der Radius der Kugel zum Zeitpunkt der Knallabstrahlung zur Verfügung. Eine eingehende Beschreibung dieses Modells, die Ableitung des FOURIER-Spektrums einschließlich der Validierung dieses Modells einer Schallquelle für kleine und große Knallquellen unter Berücksichtigung der Bodenreflexion wird in /4/ vorgestellt und diskutiert.

### Diskussion der Ergebnisse für eine Explosion

Das oben in den Ansätzen vorgestellte Modell wird im folgenden genutzt, um die Meßergebnisse für eine Sprengung mit ca. 50 g Explosivstoffmasse zu diskutieren. Diese Messungen wurden in zwei entgegengesetzten Punkten um den Sprengort in einem Abstand von 250 m in Gegenwindrichtung und in Mitwindrichtung gleichzeitig aufgenommen. Die Sprengungen erfolgte von einem Pfosten in einer Höhe von ca. 1,35 m; die Mikrophone waren ebenfalls in dieser Höhe angebracht. Das Gelände ist grasbewachsen, aber bei einer Lufttemperatur von -6 C befroren. Der mittlere Bodenwind wurde mit 1 m/s gemessen. Die Meßsituation entspricht damit den Voraussetzungen und Vorschriften des dafür vorgesehenen Meßstandards /5/.

Die zum Vergleich herangezogene Modellrechnung erfolgt mit dem für diese Sprengung angepaßten Modellradius von 0,8 m. Die Bodenbeschaffenheit wird durch die Bodenadmittanz durch die Formel

$$\text{Admit } \tan z = \left[ 0,027 e^{-0,38j} + 10^{-4} \text{ Frequenz } e^{-1,34j} \right] \frac{1}{rc}$$

berücksichtigt. Diese Parameter werden von Wempen [2] als plausibler Ansatz für einen Grasboden angegeben ( $\rho$ ,  $c$  Dichte bzw. Schallgeschwindigkeit in Luft).

In den folgenden Abbildungen werden jeweils drei Terzspektren gegenübergestellt:

- Die „Vergleichsmessung“ als gemessene Terzpegel  $L_{Leq(1s)}$  in dB re. 20  $\mu\text{Pa}$  (dargestellt durch Kreise).
- Die hier sogenannte „spektrale Energiedichte  $p^*p$ “ als Terzpegel in dB re.  $10^{-12} \text{ W/m}^3$  (dargestellt als Balken), berechnet aus dem Betrag quadrat des lokalen Schalldruckes.
- Die hier sogenannte „spektrale Energiedichte  $p^*v$ “ als Terzpegel in dB re.  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  (dargestellt als durchgezogene Linie), berechnet aus dem Betrag des Produktes von Schalldruck und Schallschnelle (= Betrag des lokalen Intensitätsvektors).

Beide Energiedichten liefern für eine ebene Welle gleiche Pegelwerte. Sie zeigen unterschiedliche Pegel bei der Betrachtung von Kugelwellen und/oder Überlagerungen von zwei oder mehreren Wellen.

Die Bildunterschriften dokumentieren jeweils die Randbedingungen des Modells und die bewerteten Einzahlpegel der drei Terzspektren.

Die Abbildungen zeigen exemplarisch die Auswirkungen von Variationen der Modellparameter auf das Terzspektrum des Modells für die Mit- bzw. Gegenwindmessung. Abb. 1 stellt die Mitwindmessung den Modellergebnissen ohne Berücksichtigung des Windes vor. Abb. 2 und Abb. 5 zeigen die Veränderungen des prognostizierten Spektrums bei Berücksichtigung eines Windfeldes von 1 m/s in 1 m Höhe und 1,5 m/s in 10 m Höhe. In den Abb. 3 und Abb. 6 ist zusätzlich der den Frequenzeinfluß berücksichtigende Admittanzparameter von 0,1 auf 0,4 erhöht. In Abb. 3 ist für die Mitwindsituation weiterhin die Quellhöhe auf 0,01 m gesetzt, um z.B. eine leichte Geländeanhebung um 1 m in der Mitte des Ausbreitungspfad zu simulieren. Der letzte Fall bedeutet einen äußerst streifenden Schalleinfall für die Reflexion.

Die Abbildungen weisen nach, daß im tiefen Frequenzbereich das Modell den gemessenen Anstieg und die absoluten Pegelhöhen sehr gut wiedergibt. Die Variation der Schallausbreitungsbedingungen für das Modell zeigen aber deutlich, wie leicht sich das Spektrum im mittleren und hohen Frequenzbereich beeinflussen läßt. Der stets vorhandene Einbruch im Spektrum bei den mittleren Frequenzen, der allein auf die destruktive Interferenz des Direktschalles und der Reflexion zurückzuführen ist, läßt sich verschieben und in der Form verändern. Dabei handelt es sich stets um die gleiche akustische Energie, die an beiden Mikrofonen auftritt. (Das Modell berücksichtigt nicht die Schallbrechung durch Wind- oder Temperaturprofile, sondern nur die Luftabsorption.)

Tab. 1 stellt die Auswirkungen aller Modellrechnungen auf die Einzahlpegel gegenüber. Vergleichskriterium ist der vom Modell prognostizierte 'wahre' Pegel von  $L_{LX} = 93,9 \text{ dB}$ ,  $L_{CX} = 93,7 \text{ dB}$  und  $L_{AX} = 88,4 \text{ dB}$ . Demgegenüber weicht die Mitwindmessung (Gegenwindmessung) um  $\Delta L_{LX} = -3,2 \text{ dB}$ ,  $\Delta L_{CX} = -3,8 \text{ dB}$  und  $L_{AX} = -9,1 \text{ dB}$  ( $\Delta L_{LX} = -0,8 \text{ dB}$ ,  $\Delta L_{CX} = -1,0 \text{ dB}$  und  $\Delta L_{AX} = -0,7 \text{ dB}$ ) ab.

Variation	Mitwind			Gegenwind		
	$\Delta L_{LX}$ in dB	$\Delta L_{CX}$ in dB	$\Delta L_{AX}$ in dB	$\Delta L_{LX}$ in dB	$\Delta L_{CX}$ in dB	$\Delta L_{AX}$ in dB
Abb. 1	0	-0,2	-7,0	0	-0,2	-7,0
Abb. 2, 5	-0,1	-0,3	-2,8	0,6	0,5	-4,4
Abb. 3, 6	-1,1	-1,5	-2,8	-1,3	-1,7	-8,8
Abb. 4, 7	-0,7	-1,1	-12,5	-0,7	-1,1	-12,7

Tab. 1: Relative Pegeländerungen bei Variation der Modellparameter für die Ausbreitungsbedingungen

Die angegebenen Pegelabweichungen zeigen also die Differenzen des Modellpegels zum 'wahren' Pegel und sind damit ein Maß für die Empfindlichkeit ihrer Werte auf die den Abbildungen zugrunde liegenden Variationen der Ausbreitungsparameter.

Die Gegenüberstellung in Tab. 1 zeigt deutlich, daß unbewertete und C-bewertete Pegel entscheidend unempfindlicher auf leichte Änderungen der Ausbreitungsbedingungen reagieren. Dies liegt daran, daß die unteren Terzbändern nahezu unabhängig von den Ausbreitungsbedingungen eine Schalldruckverdopplung zeigen.

Die A-Pegel unterschätzen in allen Variationen den eigentlich zugrunde liegenden Wert, weil die Interferenz zwischen Direktschall und Reflexion in dem für die A-Bewertung entscheidenden Frequenzbereich im wesentlichen zu einer Auslöschung beiträgt.

### Schlußfolgerung

Wegen der höheren Zuverlässigkeit (Unempfindlichkeit gegen Ausbreitungseinflüsse) sollten die Emissionsdaten bei der Vermessung von Knallquellen besonders auf den tieffrequenzen Bereich abgestellt sein. Auch bei der Messung von Immissionspegeln liegt hier die höhere Zuverlässigkeit. Deshalb ist auch bei der Prognose eines maßgeblichen Außenschallpegels der C-Bewertung aus physikalischer Sicht der Vorzug vor der A-Bewertung zu geben. A-Pegel haben bei den kohärenten Knallsignalen eine höhere Spannweite, die insbesondere dazu führt, daß die Pegel zu kleine Werte liefern im Vergleich zu der tatsächlich einfallenden akustischen Energie.

### Literaturhinweise

- /1/ Sommerfeld, A.: „Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie“; Annalen der Physik, vierte Folge 28 (1909) S. 665-736
- /2/ Wempen, J.: „Schallausbreitung über Erdboden“, Dissertation, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 1991
- /3/ Weber, W.: „Das Schallspektrum von Knallfunken und Knallpistolen mit einem Beitrag über die Anwendungsmöglichkeiten in der elektroakustischen Meßtechnik“, Akustische Zeitschrift 4(1939) S. 377-391
- /4/ Hirsch, K.-W.: „A Simple Acoustical Model For Explosions In Air“, Institut für Lärmschutz, Düsseldorf, im Druck
- /5/ Working Group On Low Frequency Impulse Noise: „Standardmethode zur Messung der Geräuschemissionen und -immissionen von schweren Waffen“ VDI-Verlag, im Druck

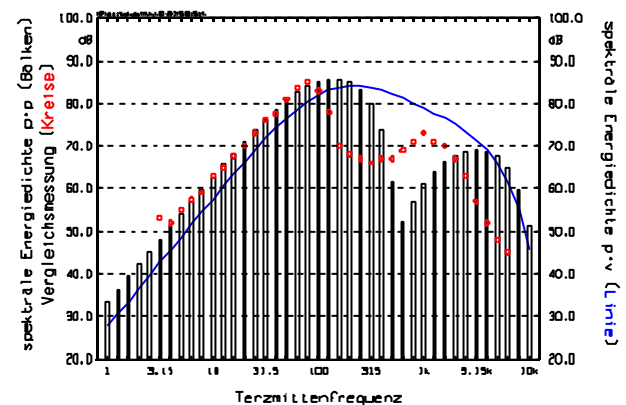


Abb. 1: Sprengung ( 50 g), Mitwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0,8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}$ ,  $H_s = 1,35 \text{ m}$ ,  $H_r = 1,35 \text{ m}$   
 Pegel:  $L_{LX}$   $L_{AX}$   $L_{CX}$   
 $p^*v$  (Linie) 93,9 dB 88,4 dB 93,7 dB  
 $p^*p$  (Säulen) 93,9 dB 81,4 dB 93,5 dB  
 Test (Kreise) 90,7 dB 79,3 dB 89,9 dB

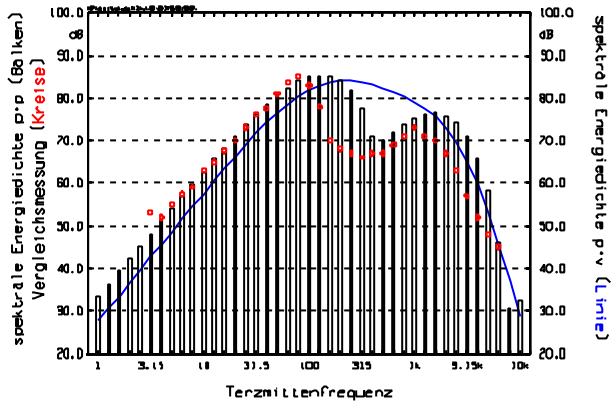


Abb. 2: Sprengung (50 g), Mitwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0.8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}, H_s = 1.35 \text{ m}, H_r = 1.35 \text{ m}$   
 Ausbreitung:  $w_1 = 1 \text{ m/s}, w_{10} = 1.5 \text{ m/s}$   
 Pegel:  $L_{LX} \quad L_{AX} \quad L_{CX}$   
 p\*v (Linie) 93.9 dB 88.4 dB 93.7 dB  
 p\*p (Säulen) 93.8 dB 85.6 dB 93.4 dB  
 Test (Kreise) 90.7 dB 79.3 dB 89.9 dB

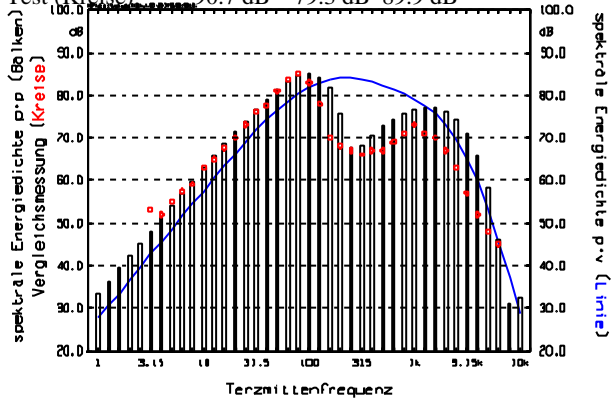


Abb. 3: Sprengung (50 g), Mitwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0.8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}, H_s = 1.35 \text{ m}, H_r = 1.35 \text{ m}$   
 Ausbreitung:  $w_1 = 1 \text{ m/s}, w_{10} = 1.5 \text{ m/s}, b = 0.4$   
 Pegel:  $L_{LX} \quad L_{AX} \quad L_{CX}$   
 p\*v (Linie) 93.9 dB 88.4 dB 93.7 dB  
 p\*p (Säulen) 92.8 dB 85.6 dB 92.2 dB  
 Test (Kreise) 90.7 dB 79.3 dB 89.9 dB

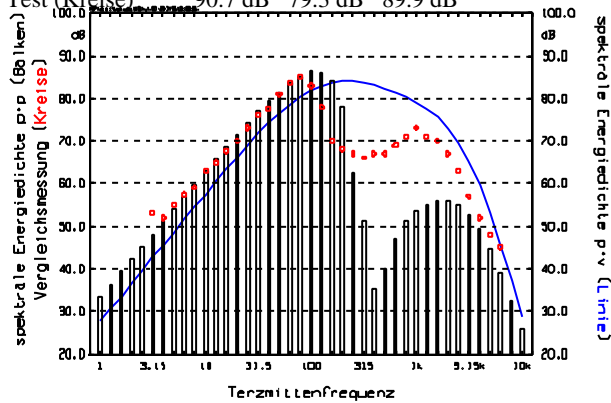


Abb. 4: Sprengung (50 g), Mitwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0.8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}, H_s = 0.01 \text{ m}, H_r = 1.35 \text{ m}$   
 Ausbreitung:  $w_1 = 1 \text{ m/s}, w_{10} = 1.5 \text{ m/s}, b = 0.4$   
 Pegel:  $L_{LX} \quad L_{AX} \quad L_{CX}$   
 p\*v (Linie) 93.9 dB 88.4 dB 93.7 dB  
 p\*p (Säulen) 93.2 dB 75.9 dB 92.6 dB  
 Test (Kreise) 90.7 dB 79.3 dB 89.9 dB

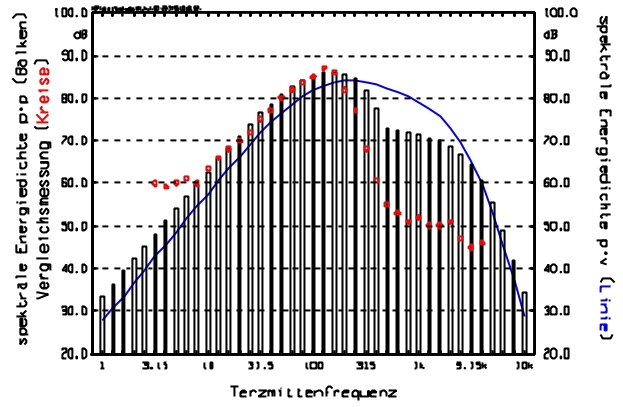


Abb. 5: Sprengung (50 g), Gegenwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0.8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}, H_s = 1.35 \text{ m}, H_r = 1.35 \text{ m}$   
 Ausbreitung:  $w_1 = -1 \text{ m/s}, w_{10} = -1.5 \text{ m/s}, b = 0.4$   
 Pegel:  $L_{LX} \quad L_{AX} \quad L_{CX}$   
 p\*v (Linie) 93.9 dB 88.4 dB 93.7 dB  
 p\*p (Säulen) 92.6 dB 79.6 dB 92.0 dB  
 Test (Kreise) 93.1 dB 77.7 dB 92.7 dB

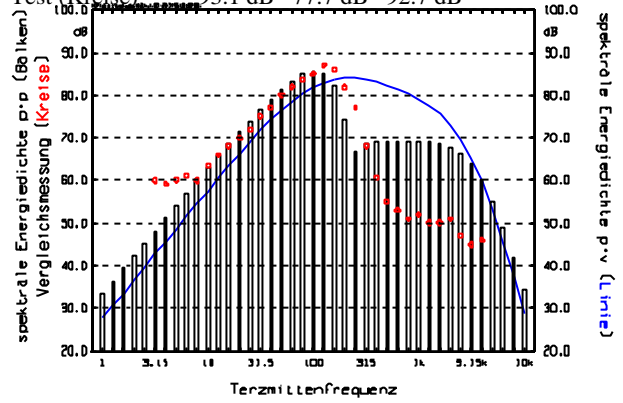


Abb. 6: Sprengung (50 g), Gegenwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0.8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}, H_s = 1.35 \text{ m}, H_r = 1.35 \text{ m}$   
 Ausbreitung:  $w_1 = -1 \text{ m/s}, w_{10} = -1.5 \text{ m/s}, b = 0.4$   
 Pegel:  $L_{LX} \quad L_{AX} \quad L_{CX}$   
 p\*v (Linie) 93.9 dB 88.4 dB 93.7 dB  
 p\*p (Säulen) 92.6 dB 79.6 dB 92.0 dB

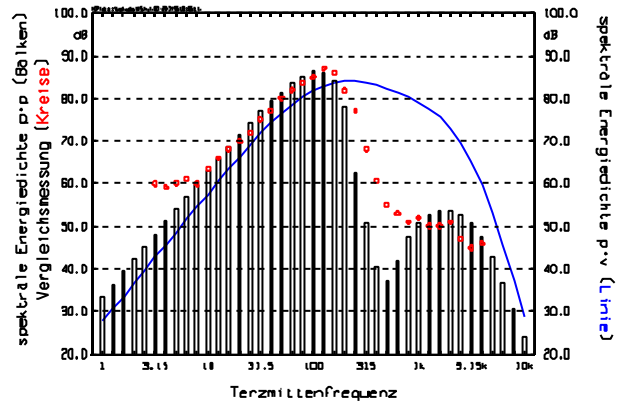


Abb. 7: Sprengung (50 g), Gegenwind Mikrophon

Quelle:  $R_0 = 0.8 \text{ m}$   
 Geometrie:  $d = 250 \text{ m}, H_s = 0.01 \text{ m}, H_r = 1.35 \text{ m}$   
 Ausbreitung:  $w_1 = -1 \text{ m/s}, w_{10} = -1.5 \text{ m/s}, b = 0.4$   
 Pegel:  $L_{LX} \quad L_{AX} \quad L_{CX}$   
 p\*v (Linie) 93.9 dB 88.4 dB 93.7 dB  
 p\*p (Säulen) 93.2 dB 75.7 dB 92.6 dB  
 Test (Kreise) 93.1 dB 77.7 dB 92.7 dB