

# Zur Objektivierung der Pegelprognose in Modellen zur Schallausbreitung tieffrequenter Knalle über große Entfernungen

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

## Einleitung

Die Schallausbreitungsphänomene tieffrequenter, hochintensiver Waffenknalle lassen sich nur zum Teil auf stringent berechenbare physikalische Vorgänge zurückführen. Zu den berechenbaren Vorgängen gehören die geometrische Dämpfung und die Absorption in Luft. Zu den nicht stringent berechenbaren Vorgängen und Randbedingungen gehört das Maß für die Quellstärke (Quellpegel und Richtcharakteristik), der Einfluß der Witterungsbedingungen und der Einfluß des Erdbodens. In Prognoseverfahren für die Bestimmung der Lärmbelastung werden deshalb pauschale Schallausbreitungsmodelle verwendet. Diese Modelle berücksichtigen die stringent berechenbaren Phänomene und fügen dann pauschale Korrekturkoeffizienten ein, die das Modell an gemessene Pegel anpassen.

Das Ziel dieser Untersuchung ist die objektivierbare Bestimmung von Modellkoeffizienten und die Erweiterung dieser Modelle auf die Prognose von Pegelverteilungen. Dies hat zwei wesentliche Gründe:

- Bei der Entwicklung des vom IfL vorgeschlagenen Modells erfolgt die Anpassung der drei Korrekturkoeffizienten bisher heuristisch. Und zwar so, daß das Modell in den weitaus überwiegenden Fällen einen höheren Pegel prognostiziert als er in Meßkampagnen gemessen wurde. Diese Meßkampagnen fanden regelmäßig unter Mitwindbedingungen statt. Dies entspricht dem allgemeinen Grundsatz bei der Bereitstellung von Beurteilungspegeln, daß der physikalische Prognosepegel bei Unterstellung einer guten Schallausbreitung zu berechnen ist (Mitwindpegel). Zur Standardisierung des Modells ist es erforderlich, die Bestimmung dieser Koeffizienten zu standardisieren und zu objektivieren.
- Neuere Untersuchungen des Zusammenhanges zwischen der prognostizierten Lärmbelastung und der Belästigungsreaktion der Anlieger von Truppenübungsplätzen zeigen auf, daß die Prognose der über alle Ereignisse aufsummierten Lärmbelastung u.U. nicht ausreicht, um die Belästigungsreaktion zu prognostizieren. Zwar ergaben Feldbefragungen eine Korrelation zwischen der aufsummierten C-bewerteten Lärmbelastung auf der Basis dieser Mitwindpegel und der Belästigung /3/. Sogenannte Paartests /4/ belegen jedoch eindeutig, daß die Belästigung durch Einzelereignisse überproportional vom tatsächlichen C-bewerteten Einzelereignispegel abhängt. Deshalb ist es erforderlich die Pegelverteilung zu kennen, um das Ergebnis des Paartests umsetzen zu können. Wichtige Zielgröße des Prognoseverfahrens ist daher die statistische Verteilung der Erwartungswerte der Einzelereignispegel jeder Emissionssituation.

## Analyse einer vorliegenden Datenbasis

SCHOMER und LUZ /1/ haben unter dem Eindruck der oben dargelegten Überlegungen ältere Messungen mit Sprengknallen statistisch neu ausgewertet. Sie schließen aus ihrer Analyse, daß die Verteilung der Pegel in einem Abstand von der Quelle mit zwei separierbaren GAUSSischen Verteilungen beschreibbar ist. Sie weisen diesen beiden GAUSS-Verteilungen sinngemäß die Bedeutung einer Mitwind-Verteilung (high-level distribution) und einer Gegenwind-Verteilung (low-level distribution) zu. (Die hier gewählten Bezeichnungen 'Mitwind' und 'Gegenwind' sind nicht wörtlich zu nehmen. Sie sollen eigentlich ohne eine implizite Vermutung über die Gründe eine Ausbreitung unter 'guten' und 'schlechten' Bedingungen charakterisieren.) Die in /1/ nach Augenschein durchgeführte Analyse macht einerseits wegen der Bedeutung der Objektivierbarkeit im Gesamtzusammenhang einen objektivierbaren mathematischen Ansatz erforderlich; andererseits führen notwendige Korrekturen an der Datenbasis zu in sich konsistenteren Ergebnissen und erlauben weitreichendere Schlußfolgerungen.

In /1/ wird auf eine Datenbasis für 735 Sprengungen mit einer Sprengstoffmasse von 2,27 kg zurückgegriffen, siehe /2/. Gemessen wurde der  $LCX$  gleichzeitig auf einem Meßkreuz (Vier Pfade  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) um den Sprengort herum in den Abständen 3,2 km, 8 km, 16 km und 24 km. Dies ergibt 2940 Einzelmessungen für jeden Meßabstand. Die Datenbasis zeichnet sich dadurch aus, daß sie gleichgewichtig Gegenwind- bzw. Mitwind- und windneutrale Ausbreitung enthält. Es ist damit eine notwendige Voraussetzung dafür geschaffen, die Annahme zweier separierbarer GAUSS-Verteilungen zu untersuchen.

Im folgenden wird die Methode der Auswertung der Pegelverteilung exemplarisch anhand der im Abstand 8 km aufgenommenen Pegeln diskutiert. In Abb. 1 ist zunächst durch die Folge der \* die Summenhäufigkeitsverteilung der gemessenen Pegel dargestellt, dabei nimmt der Anteil der nicht auszuwertenden Pegel,  $LCX < 45$  dB,

einen Anteil von ca. 33 % ein. Es schließt sich ein Bereich von 45 dB bis 75 dB an, in dem die Summenhäufigkeit nahezu linear zunimmt, der als Beitrag der Gegenwindverteilung angesehen werden kann. Nach einem Übergangsbereich folgt wiederum ein linearer Bereich von 85 dB bis 100 dB, der als Mitwindverteilung interpretiert werden kann.

### Korrektur der Summenhäufigkeit aufgrund der Meßbarkeitsgrenze

Die Pegelverteilung ist im Bereich kleiner Pegel erheblich durch den während der Messung herrschenden Hintergrundpegel gestört. Es werden viele Pegel, die eigentlich bei niedrigem Hintergrundpegel

z.B. im Bereich 50 dB bis 60 dB gemessen worden wären, im Bereich < 45 dB (nicht auswertbar) eingeordnet. Diese Verzerrung der Summenhäufigkeit wird durch die folgende Methode korrigiert: Es wird für die vorliegende Datenbasis unterstellt, daß die Wahrscheinlichkeit, einen Pegel von  $L_{CX} = 65$  dB als gemessenen Pegel im Ensemble der Datenbasis zu finden, gerade 50%, und die Wahrscheinlichkeit, einen Pegel von  $L_{CX} = 76$  dB zu finden, gerade 75% beträgt. Die Eckwerte sind griffweise bestimmt und entsprechen der Erfahrung. Mit Hilfe dieser Eckwerte läßt sich die Wahrscheinlichkeit  $W(L_{CX})$ , einen Pegel im Ensemble der Datenbasis zu finden, mit folgender mathematischer Darstellung angeben:

$$W(L_{CX}) = 1 / (1 + \exp((65\text{dB} - L_{CX}) / 10 \text{ dB}))$$

Mit Hilfe dieser Wahrscheinlichkeit werden bei der folgenden Auswertung die Häufigkeiten der klassierten Pegelmessungen korrigiert. Die korrigierte Summenverteilung ist in Abb. 1 durch die Folge der + angegeben.

### Ergebnisse des numerischen Anpassungsverfahrens

Der Ansatz mit zwei GAUSS-Verteilungen bietet insgesamt fünf einstellbare Parameter, einen Mittelwert und eine Standardabweichung je Verteilung und den relativen Anteil der Pegel, die den beiden Verteilungen zugeordnet wird. Deshalb wird zur Objektivierung der Anpassung hier ein Monte-Carlo-Verfahren für diese fünf Parameter auf die korrigierten Summenhäufigkeiten angewendet. Ziel des Monte-Carlo-Verfahrens ist die Minimierung einer gewichteten Fehlerquadratsumme über die Summenhäufigkeitsklassen, auf das hier nicht im Einzelnen eingegangen werden soll.

In Abb. 1 ist die mit diesem Verfahren erreichte Optimalanpassung durch die Schar der durchgezogenen Linien dargestellt. Diese Schar besteht aus 10 mit Hilfe eines Random-Generators berechneten Summenverteilungen mit den angegebenen Parametern der beiden GAUSS-Verteilungen. Die Erfahrung mit dieser Anpassungsprozedur zeigt, daß insbesondere wegen des Einflusses des Verhältnisses der zur 'Mitwind-' bzw. 'Gegenwind-Verteilung' gehörenden Punkteanzahl eine manuelle Auswertung zu erheblichen Fehleinschätzungen führen kann. Bei dieser Auswertung ergeben sich deshalb Unterschiede in den Mittelwerten und Standardabweichungen zu /1/.

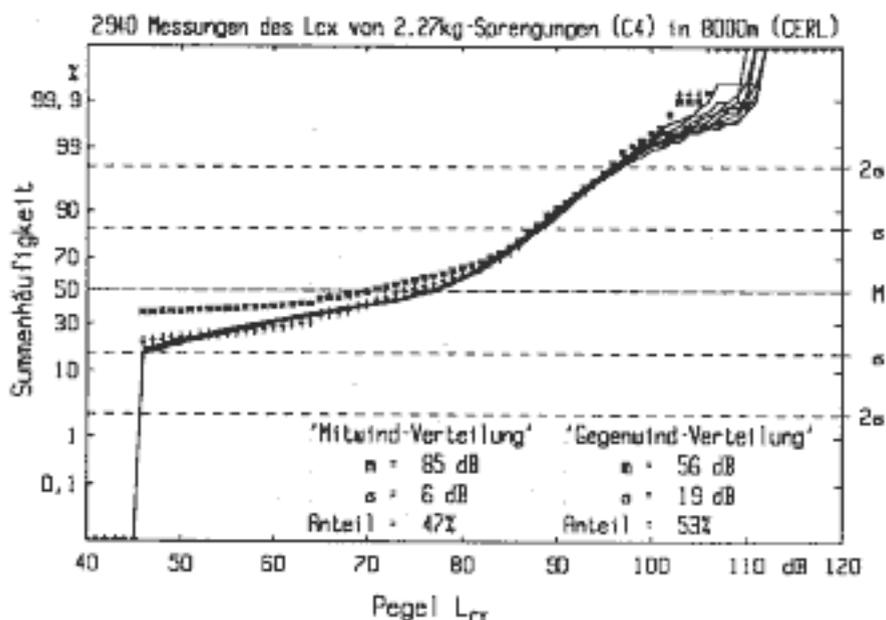


Abb. 1 Summenhäufigkeit der gemessenen (\*) bzw. korrigierten (+)  $L_{CX}$  mit Kurvenschar (Linien) der Optimalanpassung, nach /2/

Abstand	Verteilung	Mittelwert (d)	Standardabweichung (d)	Anteil (d)
[m]		[dB]	[dB]	[%]
3200	Mitwind	92,5 (0,9)	6,8 (0,8)	50,0 (6,0)
	Gegenwind	73,5 (1,6)	14,5 (6,9)	50,0
8000	Mitwind	85,0 (1,0)	6,0 (2,2)	47,0 (10,7)
	Gegenwind	56,0 (3,1)	19,0 (10,7)	53,0
16000	Mitwind	78,0 (1,5)	6,8 (2,1)	40,0 (12,5)
	Gegenwind	43,5 (2,0)	22,7 (13,8)	60,0
24000	Mitwind	77,0 (1,3)	5,8 (1,3)	18,0 (5,6)
	Gegenwind	35,5 (2,0)	14,5 (7,2)	82,0

Tab. 1 Parameter der Optimalanpassung der beiden GAUSS-Verteilungen für die vier Meßabstände

### Abschätzung der Empfindlichkeit der Ergebnisse gegen Variationen

Das hier eingesetzte Anpassungsverfahren sucht ein Minimum in einem 5-dimensionalen Parameterraum. Es ist nicht auszuschließen, daß nur relative Minima gefunden werden. Es wird deshalb die Variation jedes einzelnen Parameters untersucht, die zu einer gleichen relativen Zunahme der Zielgröße des Optimierungsprozesses führt. Die im folgenden eingeführte Variation  $d$  für jeden Parameter gibt an, um wieviel der Parameter verändert werden muß, um diese Zielgröße um - hier willkürlich eingeführte - 100% zu erhöhen. Hilfreich ist diese Größe nur im relativen Vergleich der Parameter untereinander. Kleine  $d$  bedeuten, daß das Minimum im Parameterraum in Richtung dieses Parameters relativ ausgeprägt ist, d.h., daß eine hohe Bestimmtheit in diesem Minimum für den Parameter vorliegt. Bei großen  $d$  ist der Parameter sinngemäß relativ unbestimmt. Tab. 1 faßt die Ergebnisse für die Parameter und ihres Maßes an Bestimmtheit für alle Meßentfernungen zusammen.

### Abstandsabhängigkeit der Mittelwerte

Abb. 2 zeigt die Abstandsabhängigkeit der ermittelten Mittelwerte der Verteilungen. Die beiden eingetragenen Regressionsgeraden berücksichtigen den sehr zuverlässig bekannten Emissionspegel von 118,5 dB in 250 m Abstand. Es ist bemerkenswert, wie gut beide Verteilungsmittelwerte diesen einfachen Regressionsansatz, der nur einen freien Parameter zuläßt, bestätigen. Dieses Teilergebnis rechtfertigt den Ansatz zweier GAUSS-Verteilungen zur Beschreibung der Pegelstatistik und legt auch die Wortwahl 'Mitwind'- und 'Gegenwind'-Verteilung nahe. Sonstige physikalische Interpretationen sollen aber an dieser Stelle vermieden werden.

### Abstandsabhängigkeit der Standardabweichung

Abb. 3 zeigt die Abstandsabhängigkeit der Standardabweichungen einschließlich des Maßes ihrer Bestimmtheit. Die eingetragene Regression auf eine Potenzfunktion beschreibt die Ergebnisse im Sinne der späteren Berechnung der gesamten Abstandsabhängigkeit der Pegelverteilung sachgerecht. Die Folge der Standardabweichungen wurde durch eine Standardabweichung bei 250 m mit jeweils 2 dB ergänzt, um der allgemein zu erwartenden Tendenz einer abnehmenden Standardabweichung hin zu geringeren Abständen Rechnung zu tragen.

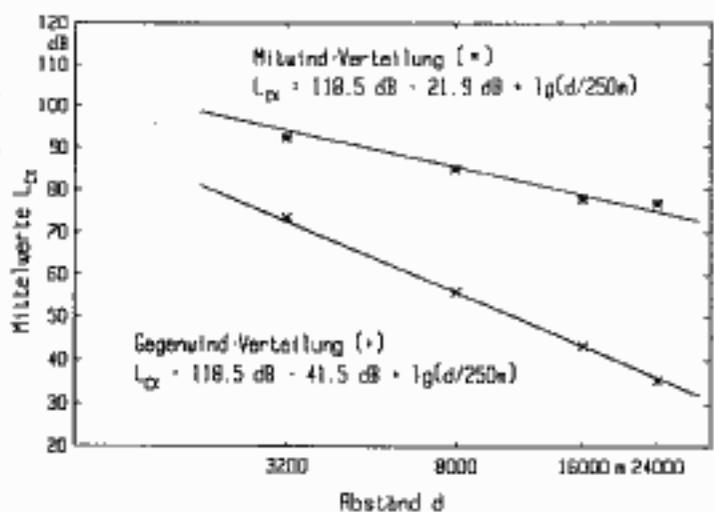


Abb. 2 Abstandsabhängigkeit der Mittelwerte 'Mitwind'- (\*) und 'Gegenwind'- Verteilung (+)

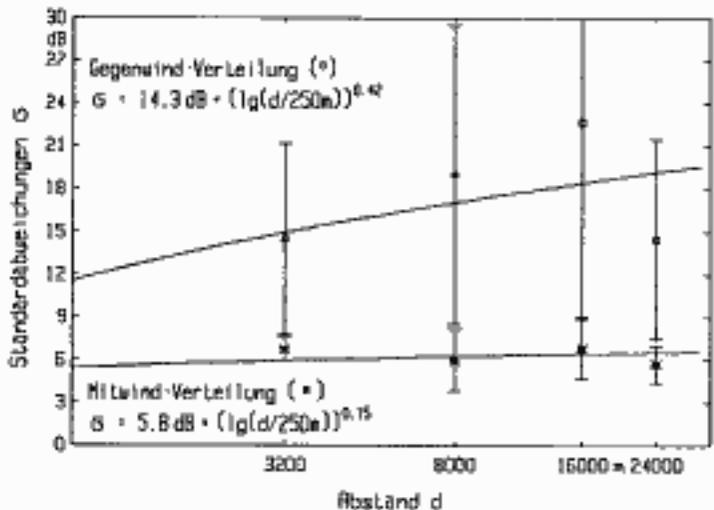


Abb. 3 Abstandsabhängigkeit der Standardabweichungen 'Mitwind'- (\*) und 'Gegenwind'- (+) Verteilung

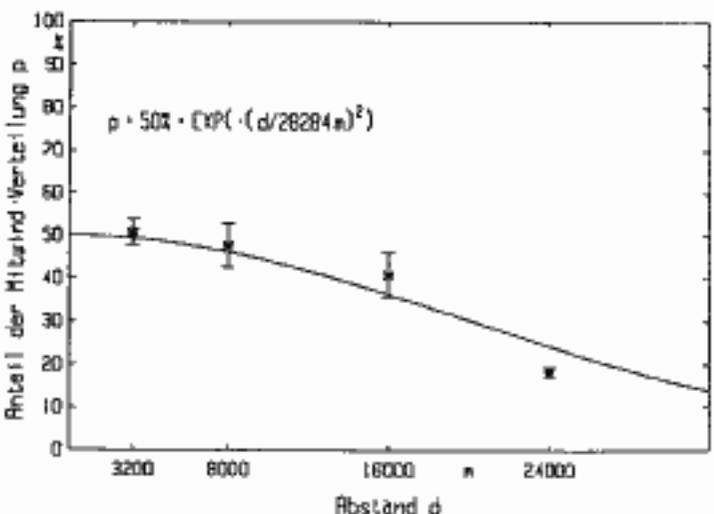


Abb. 4 Abstandsabhängigkeit des relativen Punkteanteils der 'Mitwind'-Verteilung

### Abstandsabhängigkeit des relativen Punkteanteils

Der relative Punkteanteil an der 'Mitwind'-Verteilung sagt aus, wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß ein gemessener Pegel zur 'Mitwind'-Verteilung gehört. Im Nahbereich der Quelle, also dort, wo der Einfluß der Witterung noch keine Rolle spielt, ist diese Wahrscheinlichkeit 50%. Bei größeren Abständen muß die Bedingung der 'guten Schallausbreitung' über immer mehr Bereiche gültig sein. Die Wahrscheinlichkeit, daß dies zutrifft, sinkt also mit dem Abstand. Es wird hier angenommen, daß sie für sehr große Laufstrecken asymptotisch gegen null geht. Die in Abb. 4 eingetragene Optimalanpassung an eine einfachste Übergangsfunktion, (GAUSS-Verteilung mit dem Mittelwert 0) ist daher ein sachgerechter Ansatz im Hinblick auf eine Berechnung der Abstandsabhängigkeit der Pegelverteilung.

### Abstandsabhängigkeit der Pegelverteilung (Percentilfeld)

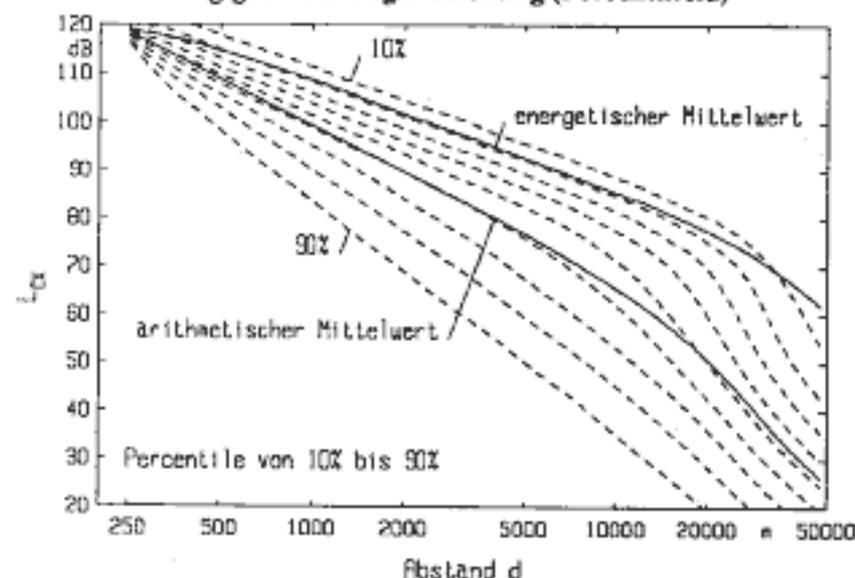


Abb. 5 Abstandsabhängigkeit des Percentilfeldes der Pegelverteilung, des arithmetischen und energetischen Mittelwertes

Aus den oben zusammengestellten Ansätzen für die Abstandsabhängigkeit der Parameter der GAUSS-Verteilungen läßt sich die Pegelverteilung in Abhängigkeit vom Abstand als Percentilfeld darstellen. Aus Abb. 5 ist zu entnehmen, daß das 20%-Percentil (20% der zu erwartenden Meßwerte liegen höher als die eingezeichnete Kurve) über weite Bereiche mit dem energetischen Mittelwert zusammenfällt. Gerade in großen Abständen unterschneidet der Percentilwert aber den energetischen Mittelwert; hohe Pegel werden nur sehr selten auftreten. Der strukturelle Verlauf der Percentilkurven deckt sich mit dem bisher vom IfL verwendeten Prognosemodell zur Beschreibung der Schallausbreitung von Waffenknallen in der Umgebung von Truppenübungsplätzen und begründet die pauschale Einführung eines zum Abstand linearen Termes in dieses Modell.

### Zusammenfassung und Ausblick

Der Ansatz zweier GAUSS-Verteilungen führt zu einer sachgerechten Beschreibung der Ergebnisse in /2/. Der Ansatz ergibt einen erheblichen Fortschritt in der statistischen Beschreibung der Immissionspegel und liefert so eine verbesserte Berechnung von Pegelprognosen. Es ist möglich, auf der Basis dieses Ansatzes die Bestimmung der ausbreitungsbeschreibenden Modellparameter zu objektivieren und sie gleichzeitig an einfach durchzuführenden Messungen (ungesteuertes Messen) für einzelne Waffen-Munitionskombinationen zu binden. Die hier vorgestellte Analyse unterstreicht, daß die exemplarische 'Nachmeßbarkeit' von Immissionspegeln an wenigen Tagen problematisch ist. Es soll an dieser Stelle betont werden, daß gerade eine Meßserie mit kleiner Standardabweichung wenig hilfreich ist. Vorschriften, die die Stichprobenanzahl je Meßserie zur Sicherstellung der statistischen Bestimmtheit des Mittelwertes vorgeben, sind eher kontraproduktiv, da sie lediglich Witterungsbedingungen nach den Kriterien stratosphärisch oder turbulent auszeichnen. Zur Verifikation der hier vorgestellten Ergebnisse sind allerdings weitere Messungen unter den notwendigen statistischen Bedingungen erforderlich.

### Literatur

- /1/ SCHOMER, P.D.; LUZ, G.A.: "A Revised Statistical Analysis of Blast Sound Propagation", Noise Control Eng. J. 42(1994)3,1-6
- /2/ SCHOMER, P.D.; GOFF, R.J.; LITTLE, L.M.: "Statistics of Amplitude and Spectrum of Blasts Propagated in the Atmosphere", Journ. Acoust. Soc. Am. 63(1978),1431-1441
- /3/ BUCHTA, E.: "Lästigkeit von impulsartigen Geräuschen in Abhängigkeit vom Geräuschpegel und Immissionsort", in Fortschritte der Akustik - DAGA '94, Bad Honnef: DPG-GmbH 1994
- /4/ KRAHE, D.; BUCHTA, E.: "Bestimmung der Lästigkeit von impulsartigen Geräuschen auf Basis der Lautheit", in Fortschritte der Akustik - DAGA '94, Bad Honnef: DPG-GmbH 1994