



Fachbeiträge des Landesumweltamtes Heft-Nr. 96

Besonderheiten der Schallimmissionen im Umfeld von Truppenübungsplätzen und Aspekte der Schallausbreitung über große Entfernungen



**Besonderheiten der Schallimmissionen
im Umfeld von Truppenübungsplätzen
und Aspekte der Schallausbreitung
über große Entfernungen**

Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Titelreihe – Heft-Nr. 96

Besonderheiten der Schallimmissionen im Umfeld von Truppenübungsplätzen und Aspekte der Schallausbreitung über große Entfernungen

Herausgeber und Copyright:

Landesumweltamt Brandenburg (LUA)
Referat Umweltinformation /Öffentlichkeitsarbeit (S5)
Berliner Straße 21-25
14467 Potsdam
Tel.: 0331 - 23 23 259
Fax: 0331 - 29 21 08
E-Mail: info@lua.brandenburg.de
www.brandenburg.de/land

Bearbeiter:

LUA, Abteilung Technischer Umweltschutz (TUS)
Ref. Lärmschutz, Verkehr, Energie, Klimaschutz – T2, Dr. H.-J. Albrecht, Dipl.-Phys. E. Peters
Tel.: 0331 - 2776-422

Potsdam, im Juli 2005

Die Veröffentlichung erfolgt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Dritten zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Der Bericht ist urheberrechtlich geschützt.

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Vorbemerkungen und Problemstellung	4
2 Angaben zu den örtlichen Verhältnissen und den Schallemissionen	5
3 Darstellung der Ergebnisse	8
3.1 Schallemissionen	8
3.2 Sprengungen	11
3.2.1 Analyse der Schallimmissionen an den Messpunkten	11
3.2.2 Analyse der Schallimmissionen für verschiedene Sprengstoffmassen und der Schallausbreitung zwischen den Messpunkten	16
3.3 Messungen zur Bestimmung der Dämmwirkung an Gebäuden	24
3.4 Meteorologische Messungen	25
3.5 Zusammenfassung der akustischen und meteorologischen Messergebnisse sowie ihre Interpretation	26
4 Schlussfolgerungen	29
Verzeichnisse	30
Quellen	30
Abkürzungen	31
Abbildungen	32
Tabellen	33

Zusammenfassung

Die Schallimmissionen im Umfeld von Truppenübungsplätzen weisen hohe Energieanteile im Spektralbereich unterhalb 100 Hz auf. Diese hochenergetischen Schallimpulse breiten sich über große Entfernungen aus. Dabei wurden teilweise positive Dämpfungswerte festgestellt. Die mittlere Differenz zwischen synchronen Messungen innerhalb und außerhalb von Gebäuden beträgt ca. 12 dB bei einer Schwankungsbreite von 7,5 dB bis 22,5 dB.

Es werden Beziehungen zur näherungsweisen Berechnung der Schallexpositionspegel in Abhängigkeit vom Abstand und von der Sprengstoffmasse für Mitwind- und für Nichtmitwindbedingungen angegeben.

Die Streuung der Messwerte bei gleicher Sprengstoffmasse und gleichem Abstand ist erheblich. Ursache dafür sind labile atmosphärische Schichtungsverhältnisse. Es bilden sich vertikale Konvektionszellen aus, die zeitlich und räumlich stochastisch verteilt sind. Die horizontalen Abmessungen dieser Konvektionszellen sind von der Größenordnung oder größer als die Wellenlänge des tieffrequenten Anteils im Spektrum der Schallimpulse. Unter solchen Bedingungen können nur bedingt repräsentative Messergebnisse gewonnen werden.

Es wird ein Verfahren zur Berechnung der Standardabweichung der Schallexpositionspegel auf der Grundlage von Standardabweichungen meteorologischer Kenngrößen angegeben. Die meteorologischen Kenngrößen werden auf der Grundlage des Grenzschichtmodells der TA Luft berechnet.

1 Vorbemerkungen und Problemstellung

Die Schallimmissionen im Umfeld von Truppenübungsplätzen weisen im Vergleich zu anderen Geräuschen, wie z. B. an Straßen, im Einwirkungsbereich von Flugplätzen oder von industriellen Schallquellen einige Besonderheiten auf. Diese Besonderheiten bestehen insbesondere in der Zeitstruktur und in der Frequenzzusammensetzung. Durch die militärischen Aktivitäten wie Schießübungen mit großkalibrigen Waffen oder Sprengübungen entstehen hochenergetische Schallimpulse mit wesentlichen Energieanteilen im tieffrequenten Bereich des Spektrums, die sich über große Entfernungen ausbreiten. Als großkalibrige Waffen gelten Waffen mit einem Kaliber größer 20 mm [1].

Die Schallimmissionen aus anderen Geräuschquellen, wie z.B. das Fahren von Panzern oder Hubschrauberflüge werden im Folgenden nicht betrachtet. Es werden ausschließlich Schallimmissionen, die durch den Mündungsknall beim Schießen mit dem Panzer Leopard 2 (Kaliber 120 mm) und durch Sprengungen verursacht werden, analysiert. Der Geschossknall, der immer dann entsteht, wenn sich das Geschoss mit Überschallgeschwindigkeit bewegt, kann hier nicht betrachtet werden, da sich die Messpunkte außerhalb des Bereiches befanden in dem dieser Knall auftritt.

Ziel dieser Untersuchung ist es, Hinweise für die Siedlungsplanung im Umfeld von Truppenübungsplätzen bezüglich der zu erwartenden Frequenzstruktur und der möglichen Pegel von Einzelschallereignissen zu geben. Dies ist insofern von gewisser Bedeutung, da von der Bundeswehr für ihre Truppenübungsplätze Schallprognosen erstellt werden, die als akustische Kenngröße den mittleren Einzelschallereignispegel mit der Frequenzbewertung C (CSEL) ausweisen. Angaben zum Schallspektrum sind in der Regel öffentlich nicht verfügbar. Des weiteren werden einige Aspekte der Schallausbreitung diskutiert. Es wird eine Möglichkeit zur Berechnung der Standardabweichung der Schallexpositionspegel aus meteorologischen Kenngrößen angegeben.

2 Angaben zu den örtlichen Verhältnissen und den Schallemissionen

Vom Landesumweltamt Brandenburg wurden gemeinsam mit einem Messtrupp der Bundeswehr und teilweise mit dem Institut für Lärmschutz Düsseldorf akustische Messungen im Umfeld eines Truppenübungsplatzes durchgeführt. Diese Messungen erfolgten in drei zeitlich voneinander getrennten Perioden. Für jede Messperiode wurde von der Bundeswehr ein Funknetz entfaltet, so dass gesteuerte Messungen durchgeführt werden konnten.

Die ersten Messungen erfolgten am 15./16. November 2000 im Zusammenhang mit einem Übungsschießen eines Panzers des Typs Leopard 2. Dieser Panzer hat ein Kaliber von 120 mm. Das Schießen erfolgte aus fünf räumlich voneinander getrennten Feuerstellungen (EO-1 bis EO-5) in Richtung Nordwest. Es wurden jeweils zwei Serien mit je sieben Einzelschüssen geschossen. Vom Landesumweltamt wurden an vier Immissionsorten Messungen zur Ermittlung der Differenz zwischen den Schallpegeln außerhalb und innerhalb von Gebäuden durchgeführt. Neben den akustischen erfolgten auch meteorologische Messungen. Vom Landesumweltamt wurden an einem Messmast in einer Höhe von 10 m die Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die Temperatur sowie in der Höhe von 2 m die Windgeschwindigkeit und die Temperatur synchron gemessen und aufgezeichnet. Zusätzlich wurden von der Bundeswehr Radiosondenaufstiege durchgeführt. Dabei wurden die Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit ermittelt. Die Zuordnung der Immissionsmesspunkte zu den Emissionsorten und die jeweiligen Abstände sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Ihre geographische Lage ist aus Abbildung 1 ersichtlich.

Tab. 1: ***Zuordnung der Feuerstellungen und der Immissionsmesspunkte beim Panzerschießen***

Emissionsort	Messpunkt	Abstand EO – MP in m
1	1	8.875
1	2	6.380
2	1	6.375
2	2	3.800
3	3	4.325
3	4	3.375
4	3	3.575
4	4	2.600
5	3	3.575
5	4	2.650

Beim Schießen aus den Feuerstellungen EO-1 und EO-2 am 15.11.2000 waren am Messpunkt MP-2 keine Schüsse hörbar. Am Messpunkt MP-1 waren die Schüsse trotz größerer Entfernung zum Emissionsort deutlich wahrnehmbar und konnten ausgewertet werden.

Die Sprengungen wurden im Zeitraum 31.07./01.08.2001 und am 05.08.2003 immer am Sprengplatz C-1 durchgeführt. Die akustischen Messungen erfolgten in beiden Perioden an den Messpunkten MP-9, MP-12 und MP-6. In der Periode im Jahr 2001 kamen Sprengstoffmassen von 25 kg, 10 kg, 5 kg und 1 kg PETN zum Einsatz. Im Jahr 2003 fehlte die Sprengstoffmasse 25 kg. Die Messungen erfolgten bei streifendem Schalleinfall an allen drei Messpunkten synchron. Die Mikrofonhöhe betrug immer 5 m über Grund. Gab es an einem Messpunkt eine Störung, wurde der entsprechende Messwert auch an den beiden übrigen Messpunkten verworfen. Dadurch wurde die Anzahl der Messwerte etwas verringert. Dieser Nachteil wurde dadurch aufgewogen, dass tatsächlich an allen drei Messpunkten die selben Schallereignisse in die Auswertung eingegangen sind. Nähere Angaben zu den Messpunkten befinden sich in Tabelle 2 und zur Anzahl der Messwerte in Tabelle 3. Die räumliche Lage des Sprengplatzes und der Messpunkte sowie die Standorte des Mastes für die meteorologischen Messungen können aus Abbildung 2 entnommen werden.

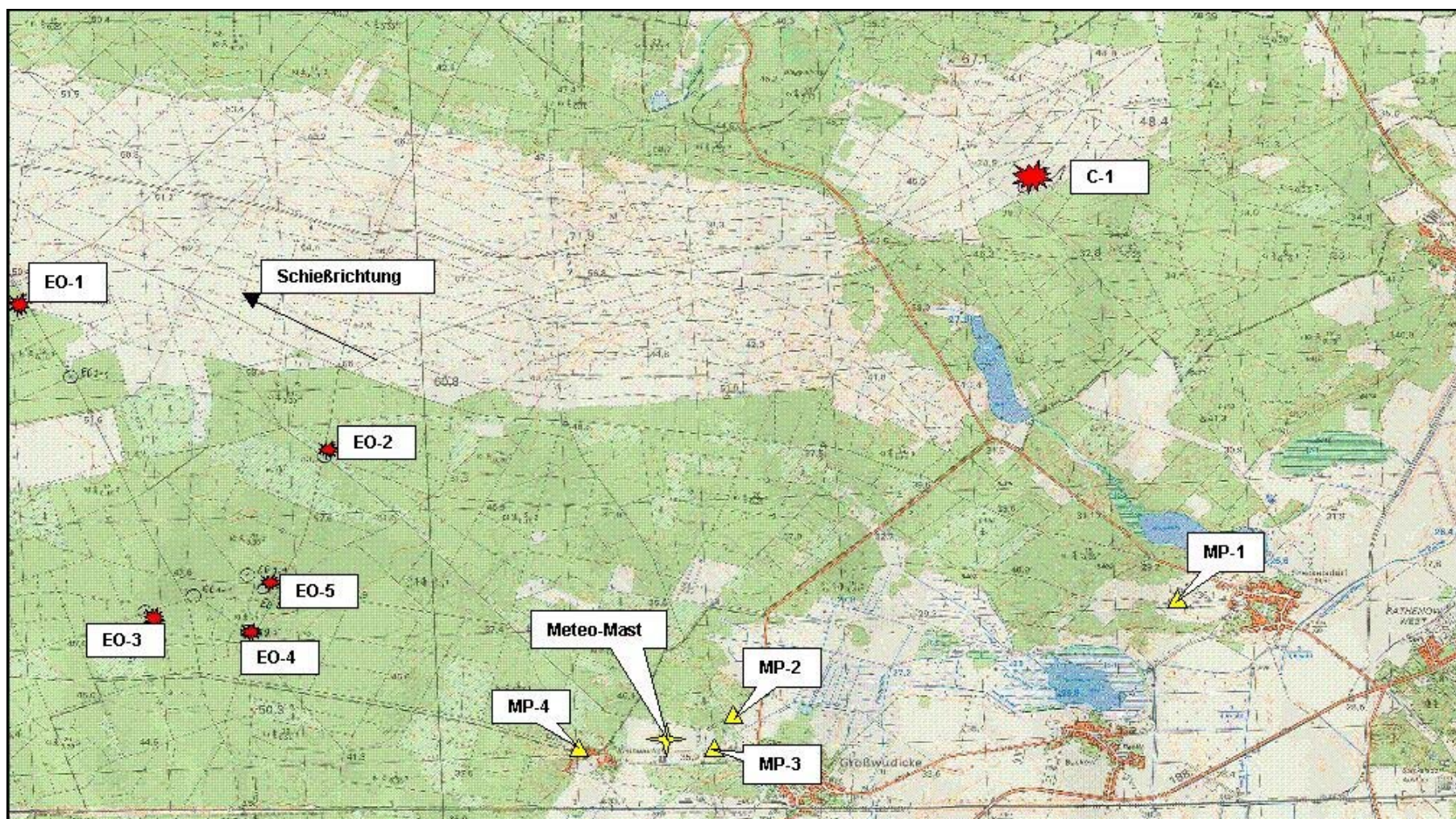


Abb. 1: Lage der Feuerstellungen EO und der Immissionspunkte beim Panzerschießen

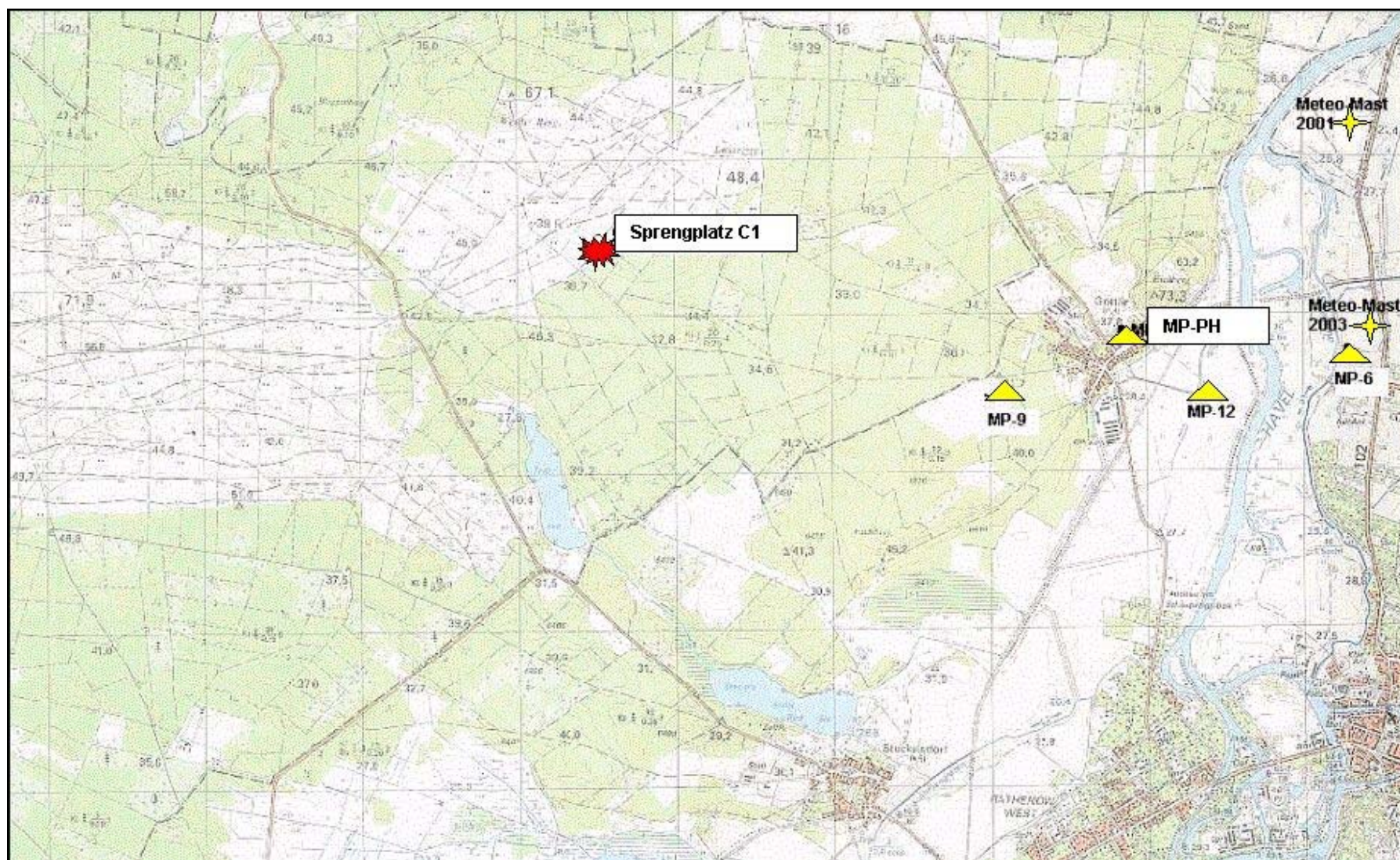


Abb. 2: Lage des Sprengplatzes C-1 und der Messpunkte während der Sprengungen

Tab. 2: Beschreibung der Messpunkte während der Sprengungen

Messpunkte	Abstand C1 – MP	Richtung C1-MP	Bemerkungen
MP-9	2.720 m	110°	Brachland; Mikrophonstandort 100 m von der Waldkante entfernt; Messgeräte: 2 SA 110 (Norsonic)
MP-12	4.000 m	104°	Weide mit einzelnen Bäumen und Büschen; verkrauteter Graben mit etwas Wasser; Messgeräte: 2 SA 110 (Norsonic)
MP-6	4.820 m	98°	Brachland mit trockenem Gras; Abstand zur Mitte des Flüsschen Stremme ca. 25 m; Messgerät: SA 121 (Norsonic), 10 m-Mast für meteorologische Messung
MP-PH	3.480 m	100°	Nur 2001, Altbau mit massivem Mauerwerk; Messung innen und außen

Tab. 3: Anzahl der Einzelschallereignisse, die je Sprengstoffmasse an den Messpunkten ausgewertet wurden

Sprengstoffmasse in kg	Anzahl der Einzelschallereignisse
1	28
5	24
10	25
25	20

3 Darstellung der Ergebnisse

3.1 Schallemissionen

Die Erfassung der Emissionssituationen war messtechnisch nicht möglich. Sie kann jedoch mit hinreichender Genauigkeit theoretisch ermittelt werden [2]. Danach können die Spektren und die Emissionspegel in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse mit Hilfe der Gleichungen (1) und (2) berechnet werden:

$$(1) \quad p(\omega) = \frac{P_W}{\pi} \cdot \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + j \cdot \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \right]$$

$$(2) \quad \alpha = \frac{3 \cdot c}{R_W} \sqrt{1 + \left(\frac{c}{\omega \cdot R_W} \right)^2}$$

Es bedeuten:

$P_W = 14,4 \text{ kPa}$	Konstante; von Weber experimentell bestimmt
$p(\omega)$	Schalldruck
ω	Kreisfrequenz
c	Schallgeschwindigkeit
R_W	Weber-Radius
j	imaginäre Einheit

Der Weber-Radius kann entsprechend [2] aus der Sprengstoffmasse ermittelt werden (Abb. 3).

Da die Ladungsmenge für die Munition des Leopard 2 nicht bekannt war, wurde der Weber-Radius näherungsweise aus den Angaben in [3] bestimmt.

In den Abbildungen 4 und 5 werden die Spektren der Schallemission für die interessierenden Sprengstoffmassen bei der Sprengung bzw. beim Panzerschießen dargestellt.

Aus Abbildung 4 ist deutlich die Verlagerung der Schwerpunktfrequenz mit zunehmender Sprengstoffmasse in den Bereich tieferer Frequenzen erkennbar. Liegt das Maximum bei einer Sprengstoffmasse von 1 kg im Bereich der Terzmittenfrequenzen von 40 Hz bis 50 Hz verlagert es sich bei einer Sprengstoffmasse von 25 kg in den Bereich von 12,5 Hz bis 16 Hz. Gleichzeitig wird die Zunahme des Energieanteils im unteren Frequenzbereich des Spektrum deutlich. Das Terzspektrum des Mündungsknalls vom Leopard 2 (Abb. 5) ist vergleichbar mit dem der Sprengstoffmasse 10 kg.

Aus den Angaben in [2] und [3] lassen sich ebenfalls die 1 m-Schallexpositionspegel LSEL, CSEL und ASEL in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse bestimmen (Abb. 6). Deutlich ausgeprägt ist die Zunahme der Differenz zwischen den C- und A-bewerteten Pegeln mit der Zunahme der Sprengstoffmasse. Der Differenzbetrag ist in Tabelle 4 ausgewiesen.

Tab. 4: *Differenz $\Delta L(C - A)$ zwischen der C- und der A-Bewertung für die Emissionspegel in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m*

m in kg	1	5 kg	10 kg	25 kg
$\Delta L(C - A)$ in dB	7,2	9,1	9,2	10,1

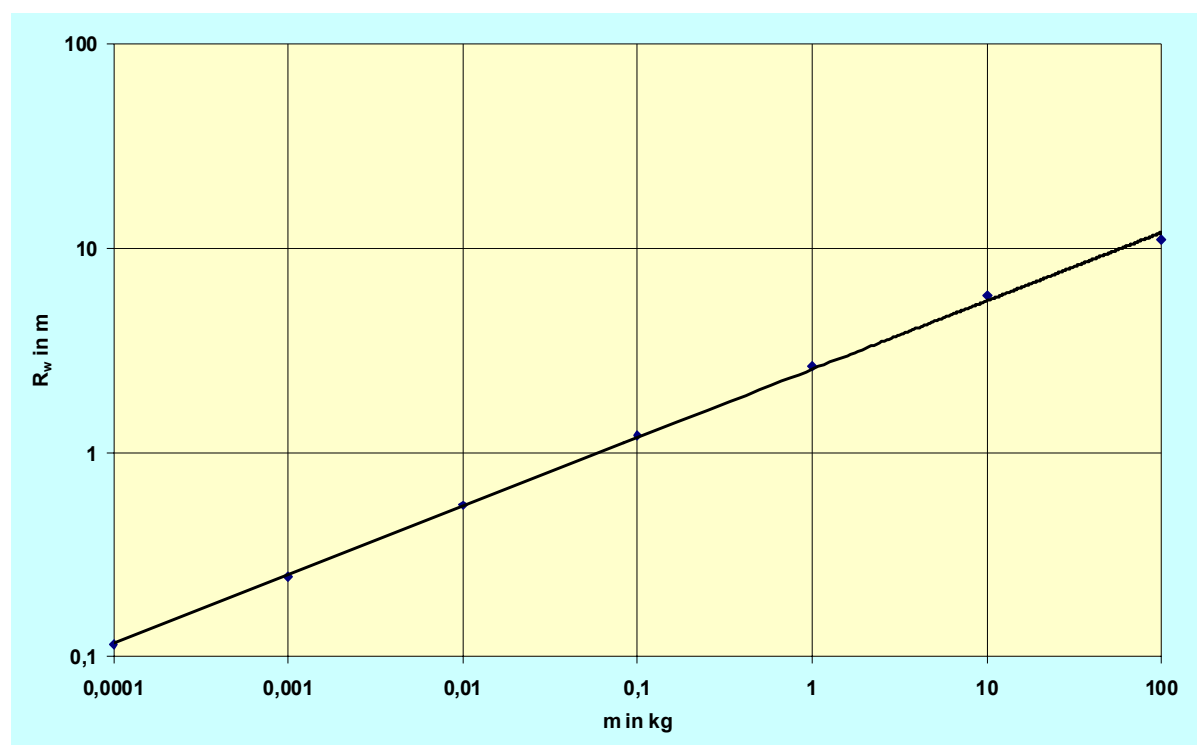


Abb. 3: *Weber-Radius R_w als Funktion der Sprengstoffmasse m [2]*

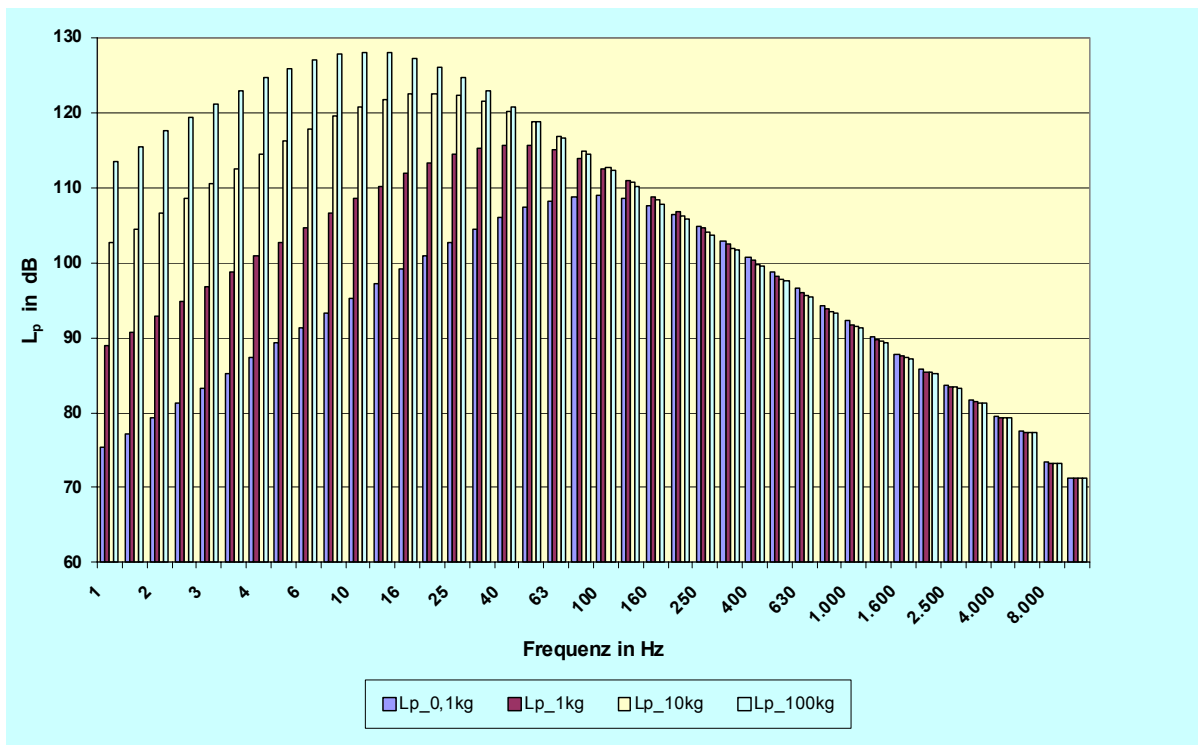


Abb. 4: Berechnete Terzspektren der Schallemission für die Sprengstoffmassen 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg

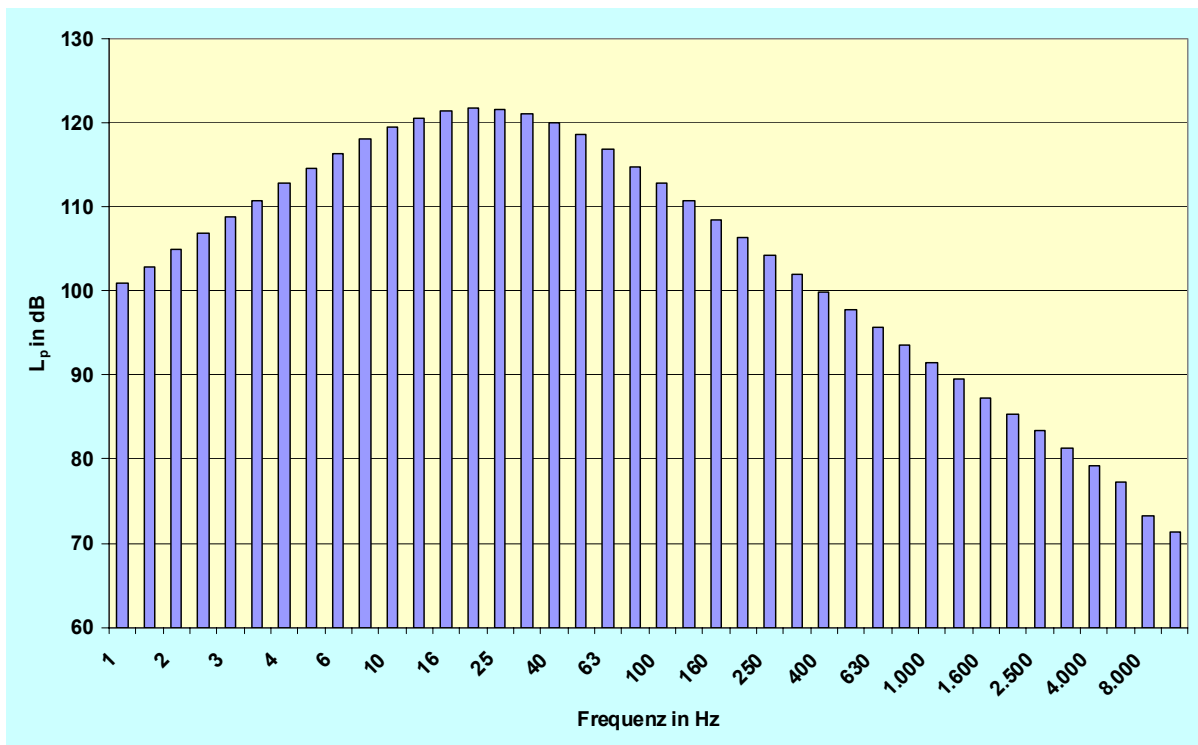


Abb. 5: Berechnetes Terzspektrum der Schallemission für den Mündungsknall beim Panzer Leopard 2

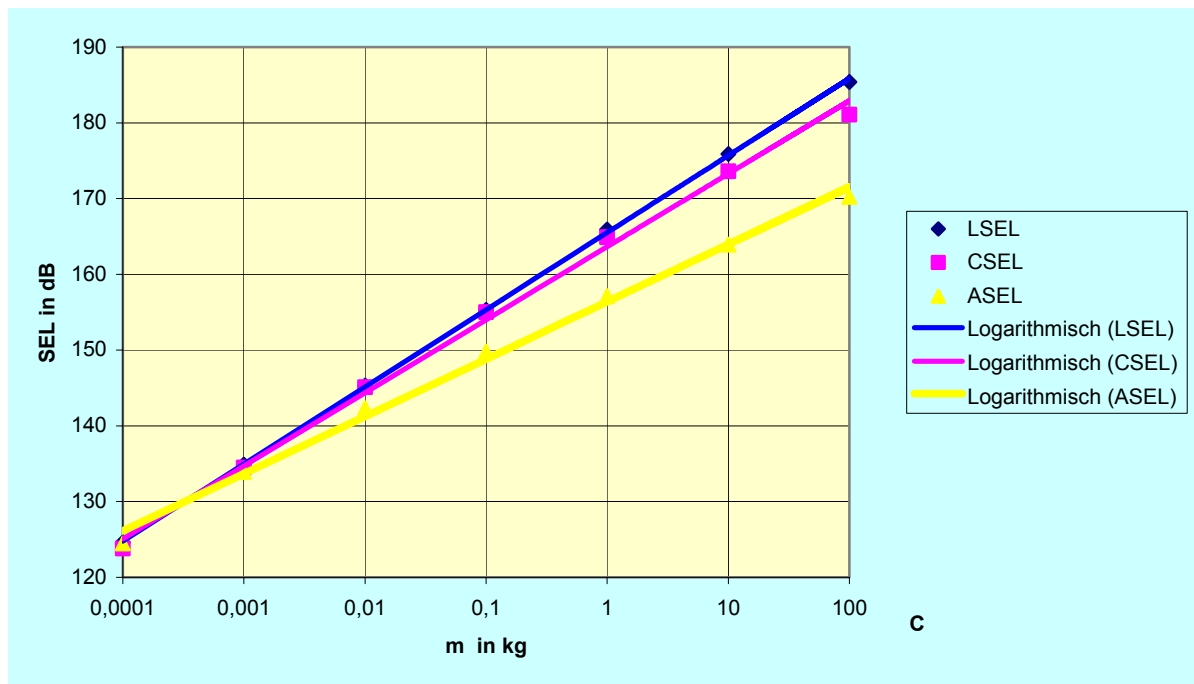


Abb. 6: *1 m-Schallexpositionspegel SEL für die Frequenzbewertungen linear, C und A in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m [2], [3]*

Aus Abbildung 6 lassen sich folgende Näherungsbeziehungen für die Abschätzung der Emissions-Schallexpositionspegel in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse herleiten:

- (3) $LSEL = 10,2 \cdot \lg m + 165,5 \quad \text{dB}$
- (4) $CSEL = 9,64 \cdot \lg m + 163,6 \quad \text{dB(C)}$
- (5) $ASEL = 7,57 \cdot \lg m + 156,4 \quad \text{dB(A)}$

3.2 Sprengungen

3.2.1 Analyse der Schallimmissionen an den Messpunkten

Im Folgenden werden zunächst die mittleren Terzspektren für die Messpunkte MP-9, MP-12 und MP-6 (Abb. 7 bis Abb. 9) für die verschiedenen Sprengstoffmassen dargestellt. Die Reihenfolge der Messpunkte entspricht den Abständen 2.720 m, 4.000 m und 4.820 m vom Sprengplatz.

Ein Vergleich der Spektren an den verschiedenen Messpunkten zeigt zunächst, dass die Drift der Schwerpunktfrequenz mit zunehmender Sprengstoffmasse hin zu niedrigeren Frequenzen nicht so wie im Emissionsspektrum (Abb. 4) erkennbar ist. Deutlich ist nur die Pegelzunahme im unteren Frequenzbereich mit Zunahme der Ladungsmenge und mit zunehmender Entfernung. Am MP-9 sind die Schallexpositionspegel für die Sprengstoffmasse 10 kg in den Terzen zwischen 1600 Hz und 40 Hz kleiner als bei Ladungsmengen von 5 kg und 1 kg. Insbesondere am MP-6 aber auch am MP-12 deutet sich im Terzspektrum ein sekundäres Minimum im Bereich um etwa 80 Hz an. Dieser als "ground dip" bezeichnete Pegelabfall entsteht durch destruktive Interferenz zwischen der über die Atmosphäre direkt in das Mikrophon einfallenden Schallwelle mit der am Erdboden reflektierten Schallwelle (Abb. 10). Am MP-9 treten für die Sprengstoffmasse 25 kg schwache Verstärkungseffekte infolge konstruktiver Interferenz auf. Am MP-6 ist der ground dip deutlicher als am MP-12 ausgeprägt.

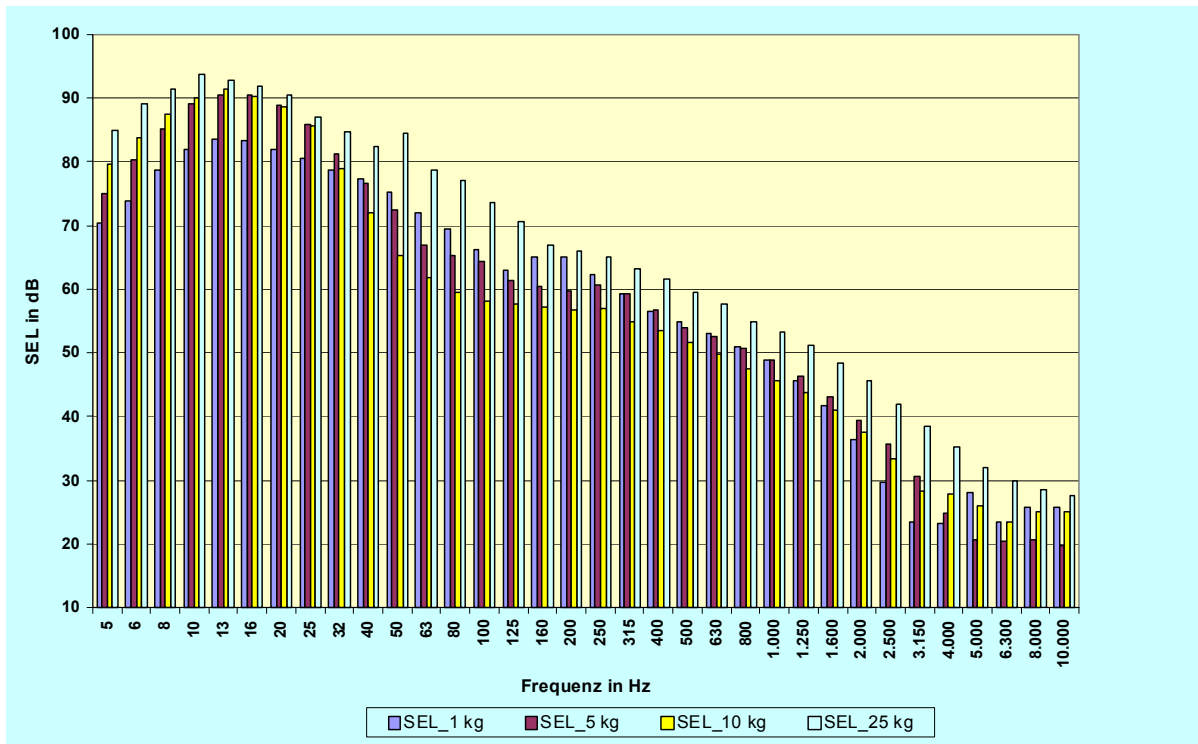


Abb. 7: Mittleres Terzspektrum des Schallexpositionspegels SEL am MP-9 für die Sprengstoffmassen m 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg

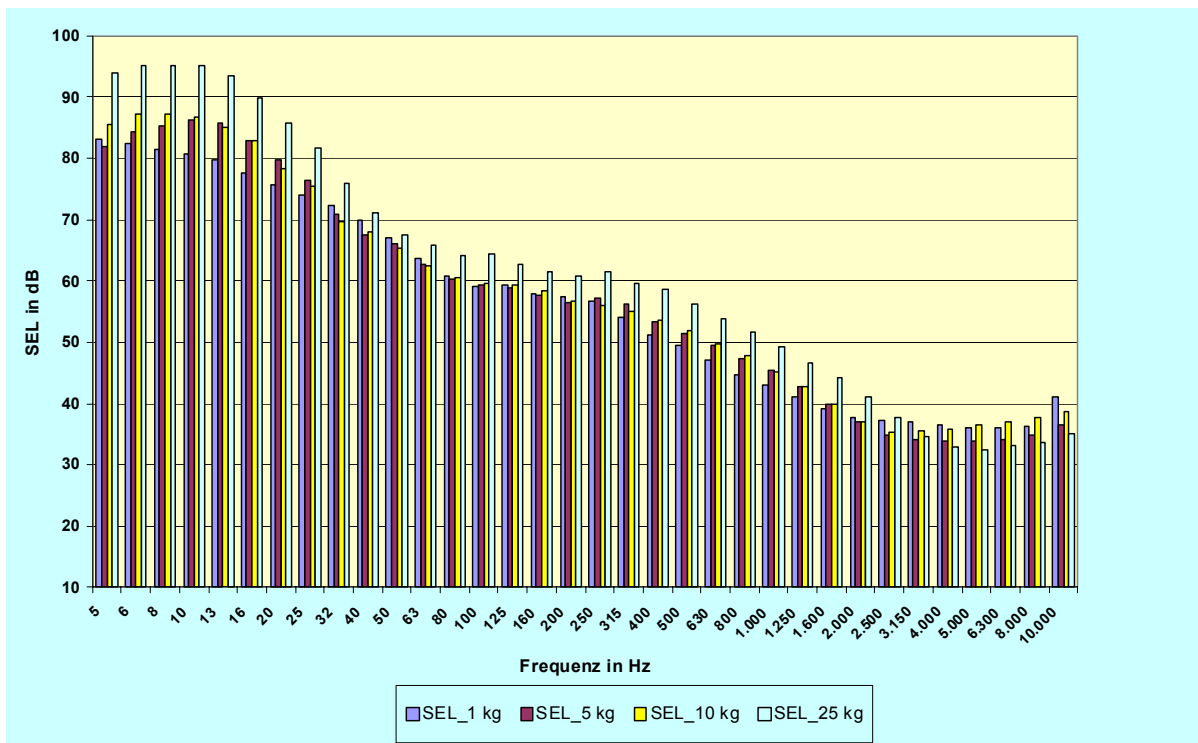


Abb. 8: Mittleres Terzspektrum des Schallexpositionspegels SEL am MP-12 für die Sprengstoffmassen m 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg

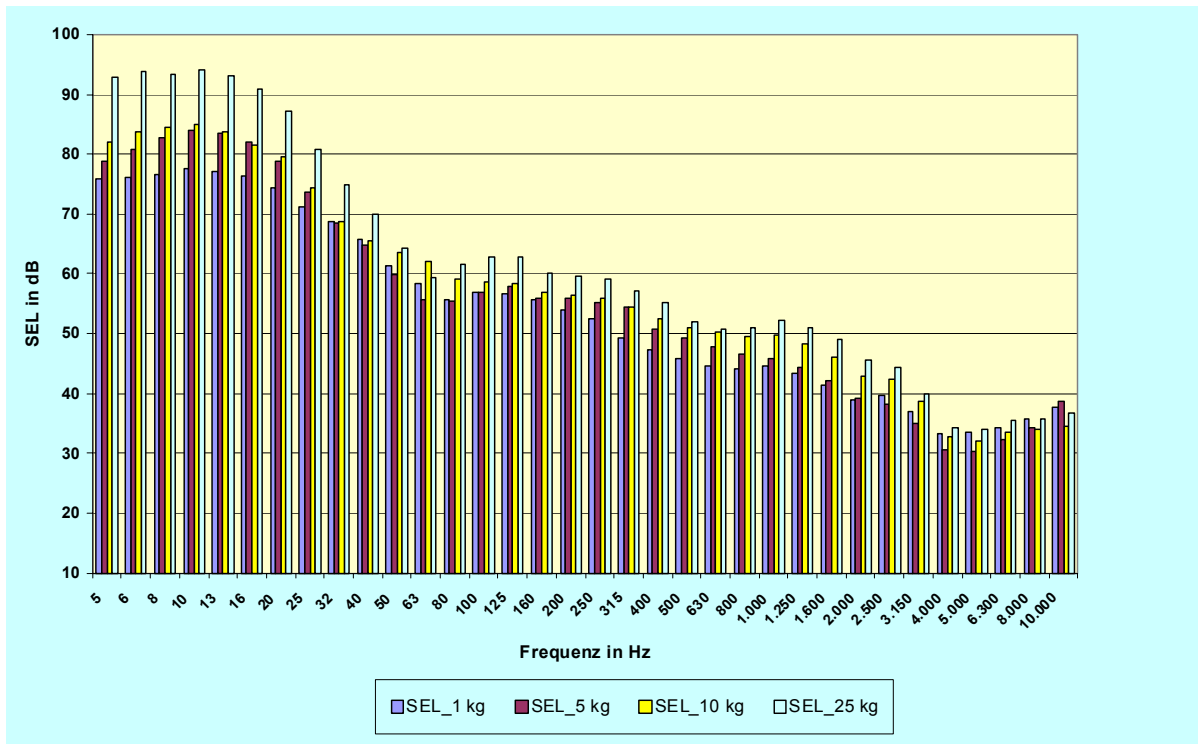


Abb. 9: Mittleres Terzspektrum des Schallexpositionspegels SEL am MP-6 für die Sprengstoffmassen m 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg

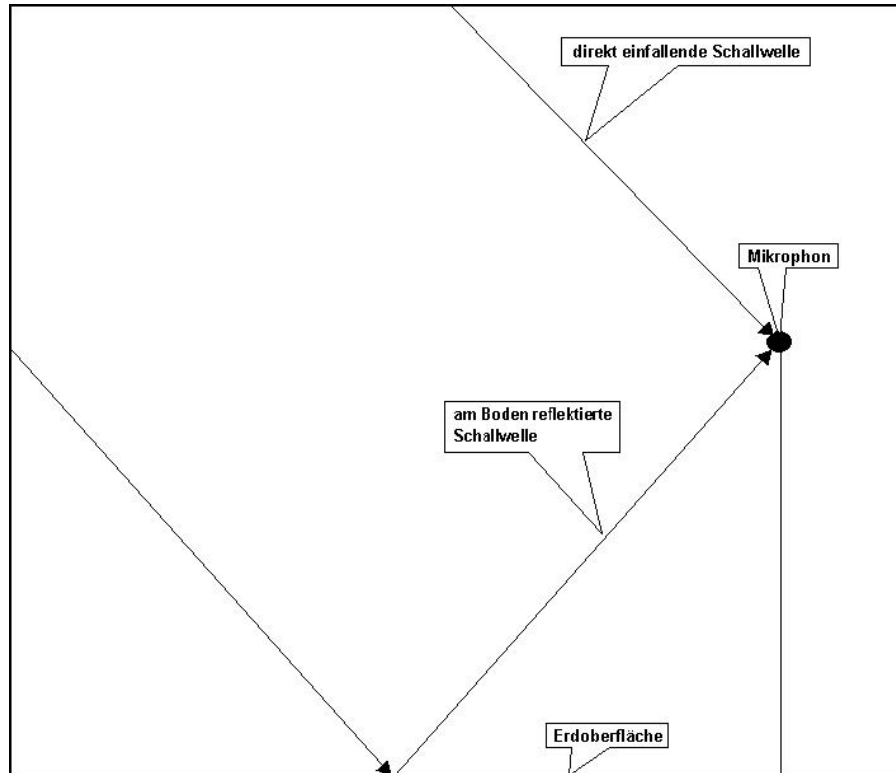


Abb. 10: Schematische Darstellung für die Entstehung des ground dip

Die Ursache ist wahrscheinlich in den veränderten Reflexionseigenschaften des Erdbodens zu suchen. Während sich der MP-12 auf einer Weide mit einheitlichen Bodenverhältnissen befand, befand sich der MP-6 ca. 25 m von dem Flüsschen Stremme entfernt (Abb. 2). Die Lage des ground dips ist von der Mikrofonhöhe abhängig. Je höher das Mikrofon um so weiter verlagert er sich in Richtung tiefe Frequenzen [4]. Daraus ergibt sich, dass das gemessene Spektrum wesentlich von den konkreten Verhältnissen wie Mikrofonhöhe und Reflexionseigenschaften des Erdbodens am Immissionsort abhängt.

Die Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL von der Sprengstoffmasse wird in den folgenden Abbildungen 11 bis 13 für die verschiedenen Entfernungen vom Sprengplatz analysiert. Aus den Darstellungen ergeben sich folgende Regressionsbeziehungen:

$$(9) \quad \begin{aligned} \text{CSEL(MP-9)} &= 5,0 \cdot \lg m + 87,07 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,46 \\ s_R &= 2,77 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(10) \quad \begin{aligned} \text{CSEL(MP-12)} &= 6,03 \cdot \lg m + 78,3 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,40 \\ s_R &= 3,84 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(11) \quad \begin{aligned} \text{CSEL(MP-6)} &= 8,0 \cdot \lg m + 75,21 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,55 \\ s_R &= 3,76 \text{ dB} \end{aligned}$$

Es bedeuten:

m Sprengstoffmasse in kg
r Korrelationskoeffizient
s_R Reststreuung

$$(12) \quad s_R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\text{CSEL}_{\text{ber}} - \text{CSEL}_{\text{mes}})^2}$$

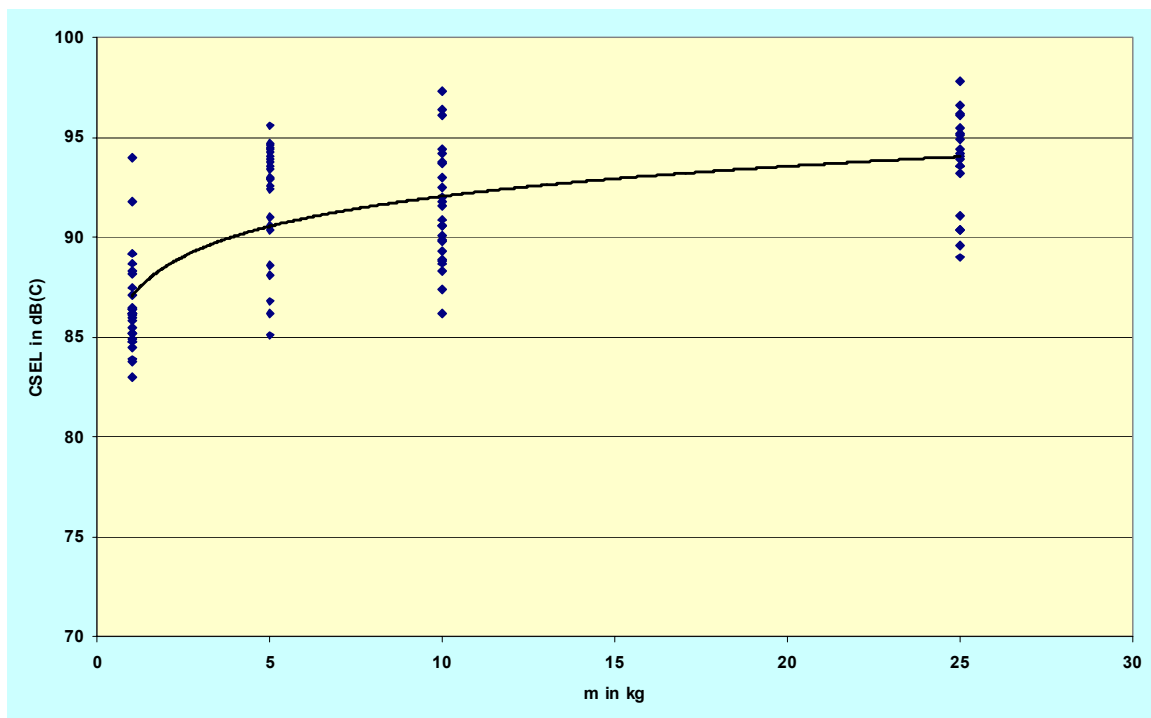


Abb. 11: Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL am Messpunkt MP-9 von der Sprengstoffmasse m

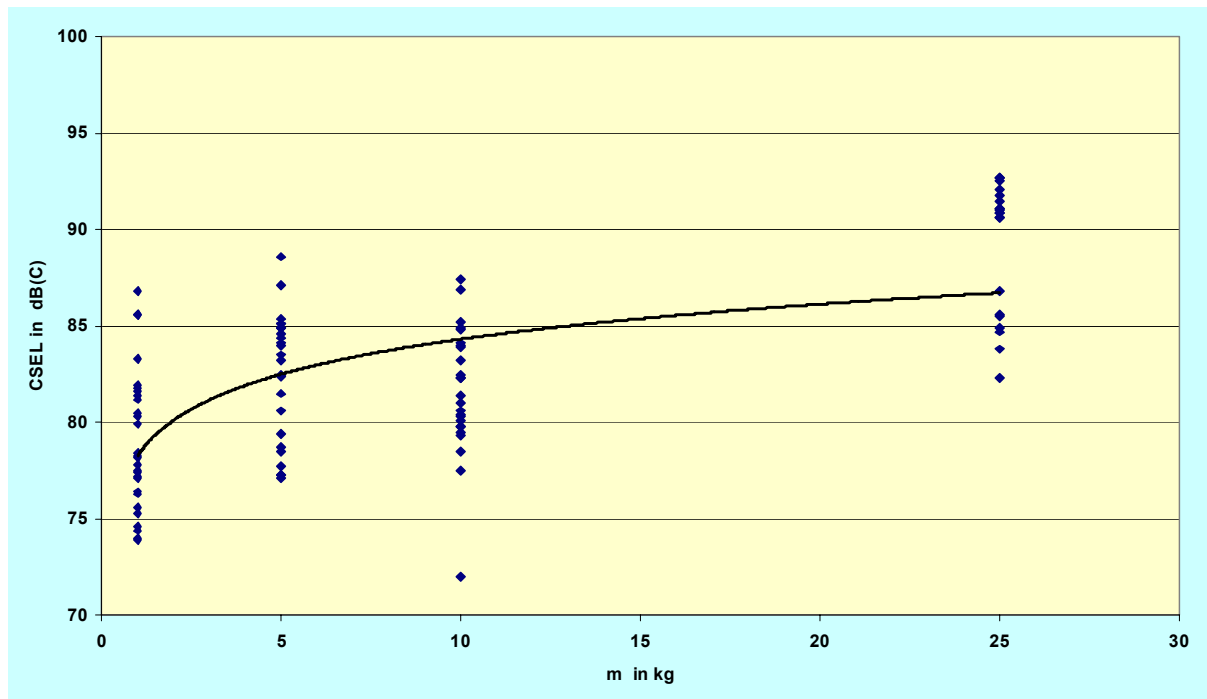


Abb. 12: *Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL am Messpunkt MP-12 von der Sprengstoffmasse m*

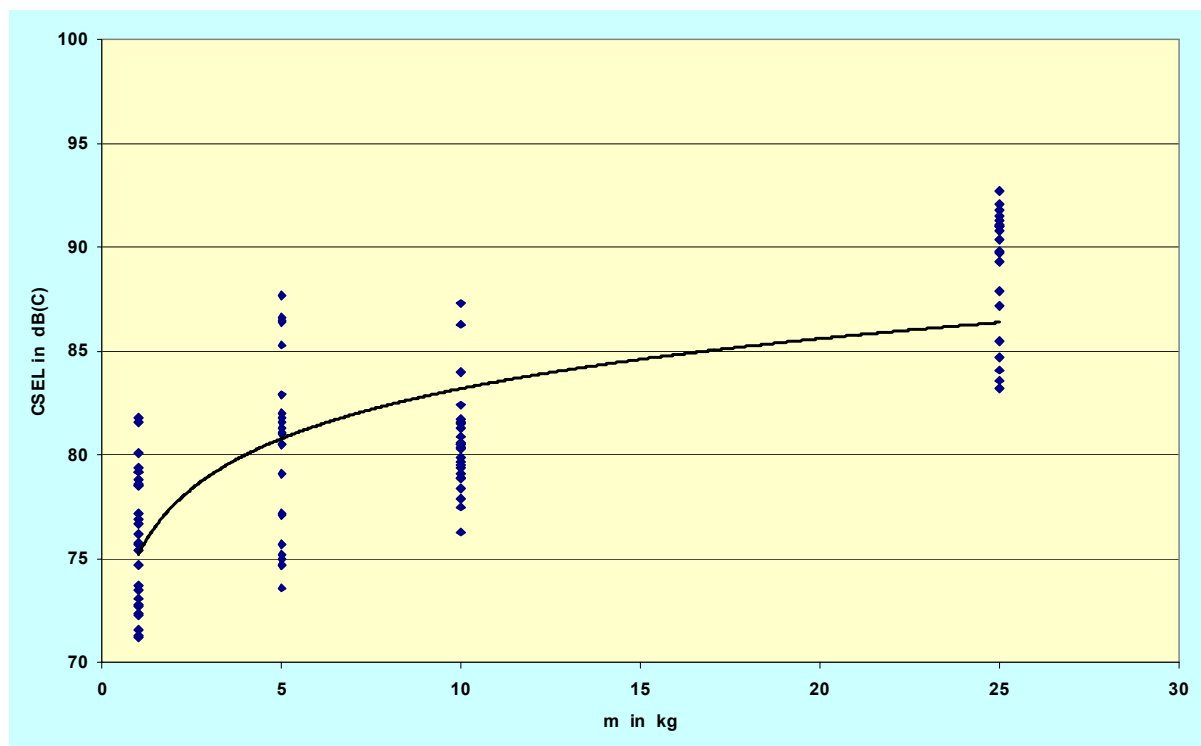


Abb. 13: *Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL am Messpunkt MP-6 von der Sprengstoffmasse m*

Die Abbildungen 11 bis 13 zeigen die große Schwankungsbreite der gemessenen Schall-expositions-pegel bei gleicher Sprengstoffmasse an allen Messpunkten. Ursache dafür sind offensichtlich die stark variierenden atmosphärischen Schallausbreitungsverhältnisse, die dazu führen, dass bei sonst unveränderten Bedingungen wie Emissions- und Immissionsort sowie Bebauung, Bewuchs- und Bodenverhältnisse, Sprengungen mit einer Sprengstoffmasse von 1 kg vergleichbare Schallexpo-sitionspegel verursachen wie Sprengungen mit einer Ladungsmenge von 25 kg. Eine Analyse der Einzelwerte zeigte, dass die fünf kleinsten CSEL-Werte für die Sprengstoffmasse von 25 kg am 31.07.2001 im Zeitraum von 11:28 Uhr bis 11:32 Uhr gemessen wurden. Während dieser Periode wurde eine Windrichtung von 084° und eine Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe von 1,6 m/s bestimmt. Die fünf höchsten Schallexpositionspegel für eine Sprengstoffmasse von 1 kg wurden am 01.08.2001 im Zeitraum von 13:30 Uhr bis 13:50 Uhr gemessen. In diesem Zeitraum wurden mittlere Windrichtungen zwischen 294° bis 315° und mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 4,0 m/s und 5,1 m/s festgestellt. Dies sind nach [5] Mitwindbedingungen, während die Messungen am Vortag bei Nichtmitwindbedingungen erfolgten.

In Tabelle 5 wird die Differenz zwischen den C-bewerteten und den A-bewerteten Schallexpositions-pegeln gezeigt. Nach DIN 45680 [6] befinden sich die vorherrschenden Energieanteile eines Geräusches im Frequenzbereich unter 90 Hz, wenn diese Differenz größer als 20 dB ist. Dies trifft an allen Immissionsorten für die hier betrachteten Ladungsmengen zu. Die mit der Sprengstoffmasse wachsende Differenz ist ein Zeichen für die im unteren Teil des Spektrums zunehmenden Energieanteile.

Tab. 5: *Differenz (CSEL - ASEL) in dB an den Messpunkten in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m*

$\begin{array}{c} m \\ \text{MP} \end{array}$	1 kg	5 kg	10 kg	25 kg
9	23,6	29,2	31,9	26,4
12	21,8	23,7	23,1	24,8
6	20,8	18,5	20,7	27,3

Bei den Emissionspegeln nimmt die Differenz (CSEL - ASEL) mit Zunahme der Sprengstoffmasse ebenfalls zu. Sie erreicht jedoch nur einen Höchstwert von 10,2 dB (Tab. 4).

3.2.2 Analyse der Schallimmissionen für verschiedene Sprengstoffmassen und der Schallausbreitung zwischen den Messpunkten

Im Folgenden werden zunächst die Mittelwerte der Schallexpositionspegel an den einzelnen Messpunkten für die betrachteten Ladungsmengen dargestellt (Tab. 6).

Tab. 6: *Mittlere Schallexpositionspegel CSEL in dB(C) an den Messpunkten in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m*

$\begin{array}{c} m \\ \text{MP} \end{array}$	1 kg	5 kg	10 kg	25 kg
9	86,6	91,8	91,1	93,8
12	79,5	82,2	81,4	89,3
6	76,6	80,4	80,7	89,0

Ein Vergleich mit der nach Gleichung (4) theoretisch zu erwartenden Pegeländerung mit der Zunahme der Sprengstoffmasse zeigt erhebliche Abweichungen. So wurde z. B. unter den realen Ausbreitungsbedingungen bei Zunahme der Sprengstoffmasse von 5 kg auf 10 kg an den Messpunkten MP-9 und MP-12 eine Abnahme des mittleren Schallexpositionspegels festgestellt. Nach Gleichung (4) wäre eine Zunahme um ca. 3 dB zu erwarten gewesen.

Neben den Schallexpositionspegeln CSEL wurden auch die maximalen Schalldruckpegel mit der Zeitbewertung F erfasst (L_{CFmax}). Aus diesen Werten wurde für alle erfassten Messungen die Differenz

$$\Delta L_{\max} = L_{CF\max} - CSEL$$

gebildet. Während die $L_{CF\max}$ - und CSEL-Werte symmetrisch und annähernd normalverteilt sind, weist die Verteilung der Differenzen $\Delta L_{\max}$ eine starke Asymmetrie auf (Abb. 14).

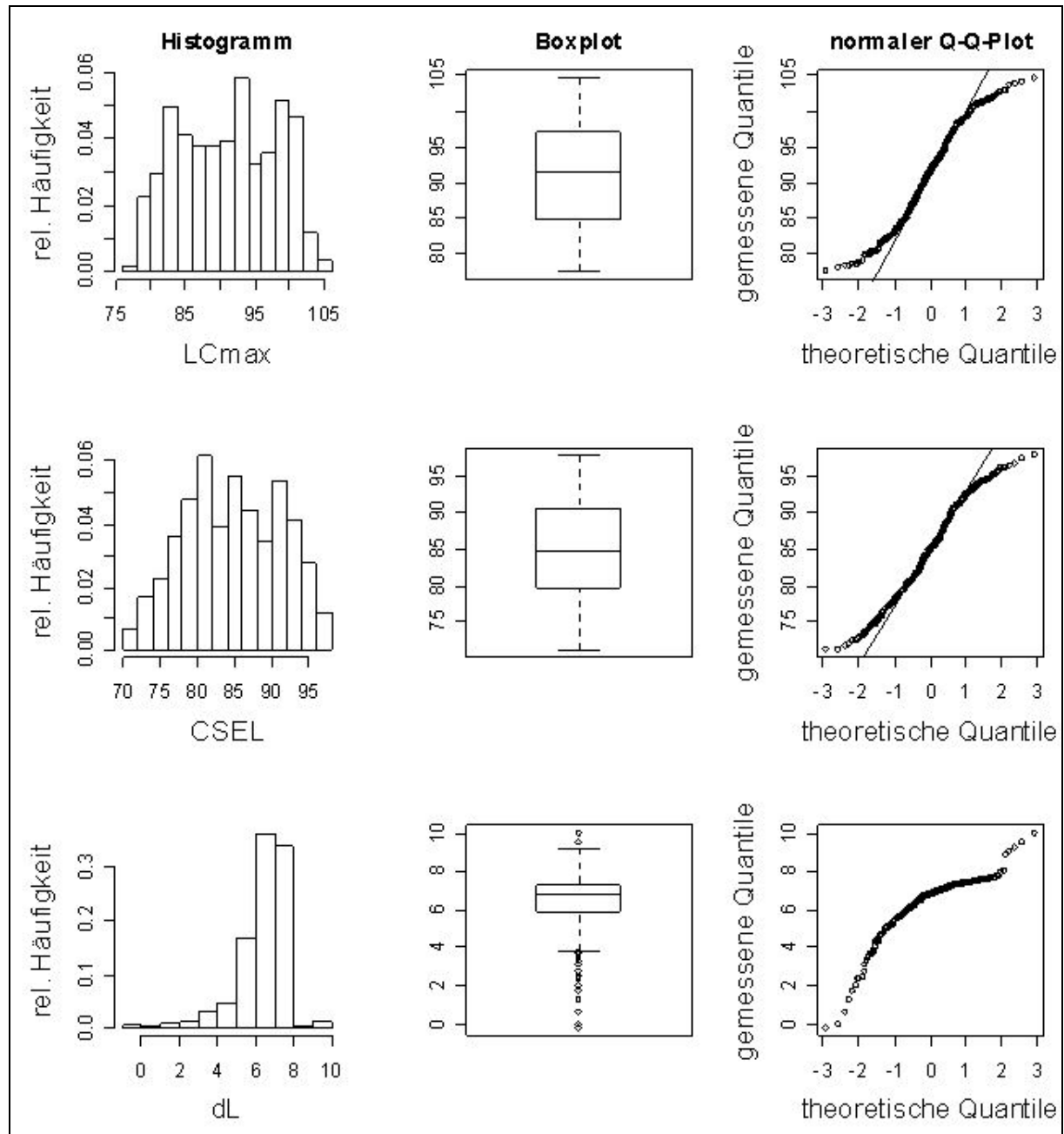


Abb. 14: Histogramm, Boxplot und Q-Q-Plot für $L_{CF\max}$, CSEL und dL

Aus diesem Grund wurde der Modalwert (Modus) als Größe für den wahrscheinlichsten Wert gewählt. Der Achsenabschnitt der Geraden in Abbildung 15 bestimmt sich damit zu:

$$\Delta L_{\max} = 7,3 \text{ dB}$$

Dieser Wert weicht von dem nach DIN 45641 [7] theoretisch zu erwartenden Wert von $\Delta L_{\max} = 9 \text{ dB}$ ab. Die Bundeswehr gibt einen Differenzwert von $\Delta L_{\max} = 8 \text{ dB}$ an [8]. Die Ursachen für diese Differenz können Reflexionen und Nachhall sein.

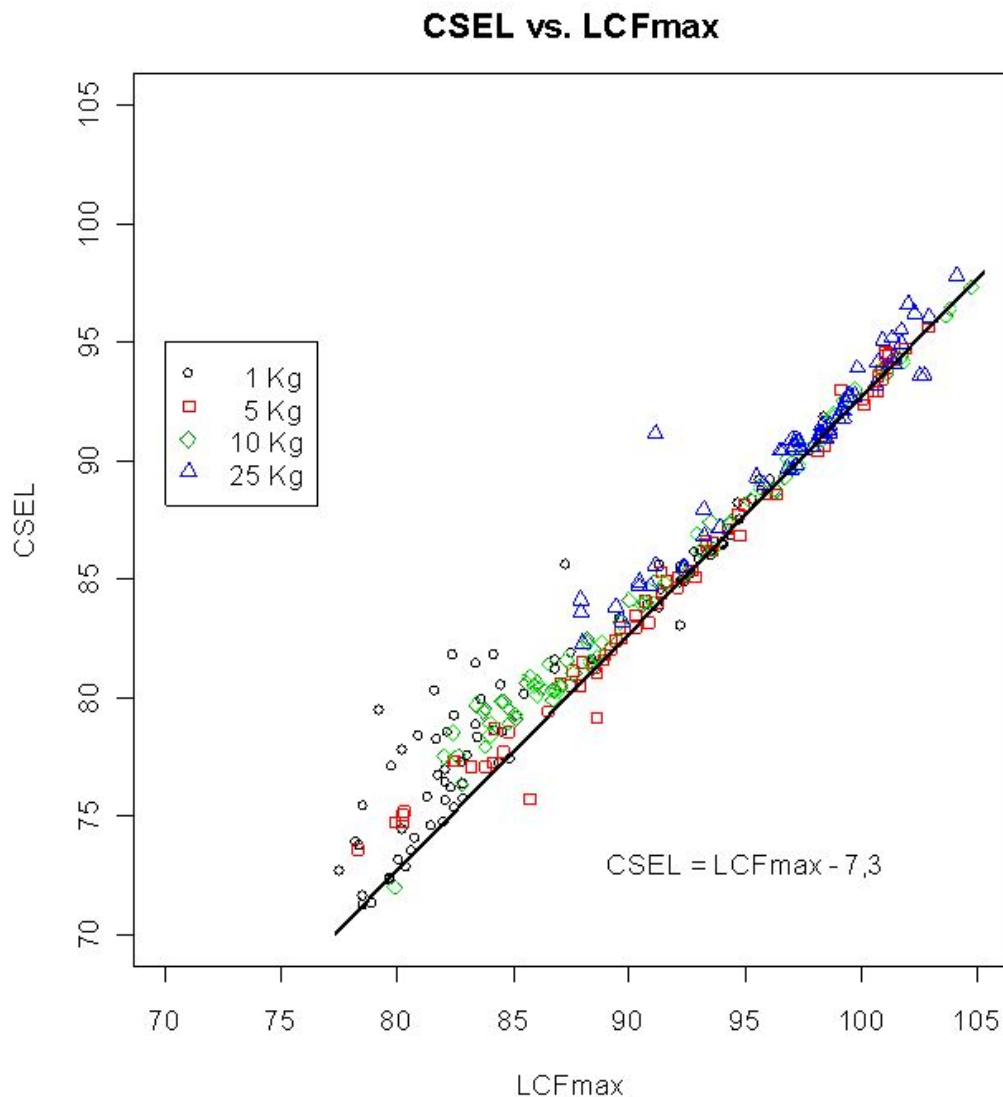


Abb. 15: *Zusammenhang zwischen dem maximalen Schalldruckpegel $L_{CF\max}$ und dem Schallexpositionspegel CSEL*

Im Weiteren wird für die betrachteten Ladungsmengen die Schallausbreitung zwischen den einzelnen Messpunkten analysiert (Abb. 16 bis Abb. 19). Hier ergibt sich bezüglich der Streuung der Messwerte ein ähnliches Bild wie auch in Abbildung 11 bis 13. So werden bei gleicher Sprengstoffmasse in einer Entfernung vom Sprengplatz von 4820 m (MP-6) vergleichbare Schallexpositionspegel gemessen wie in einer Entfernung 2720 m (MP-9).

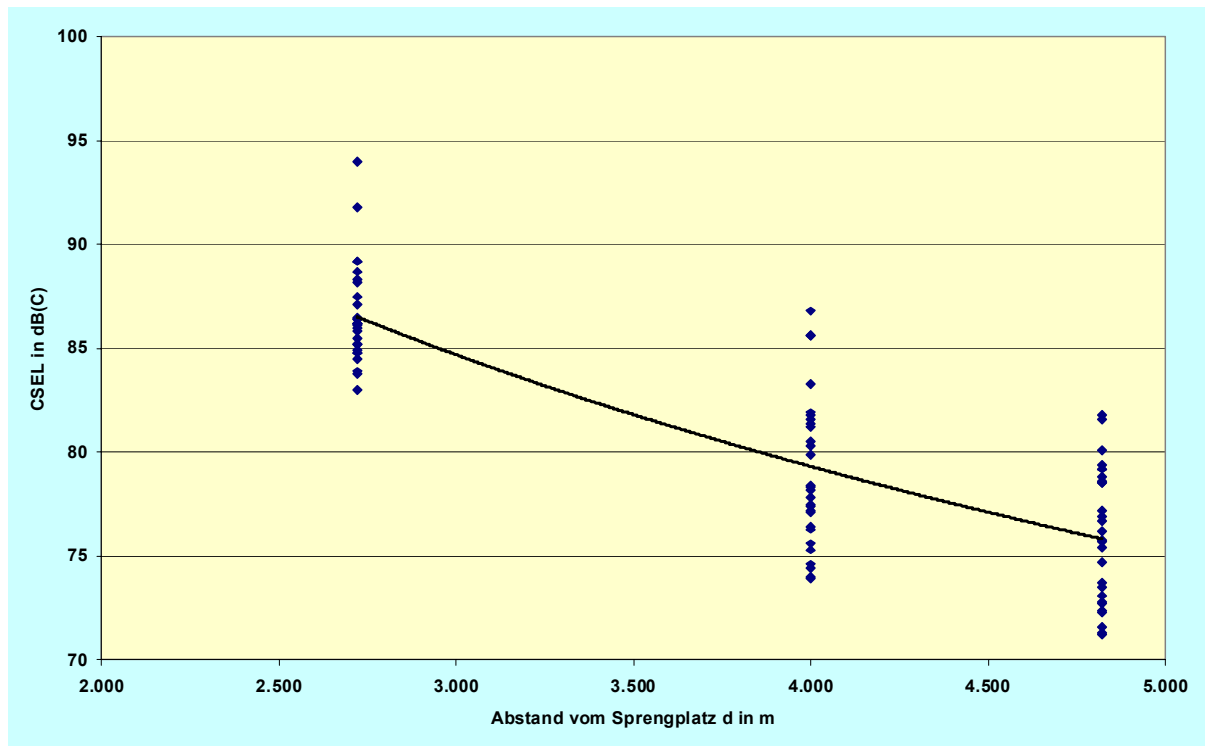


Abb. 16: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 1 \text{ kg}$

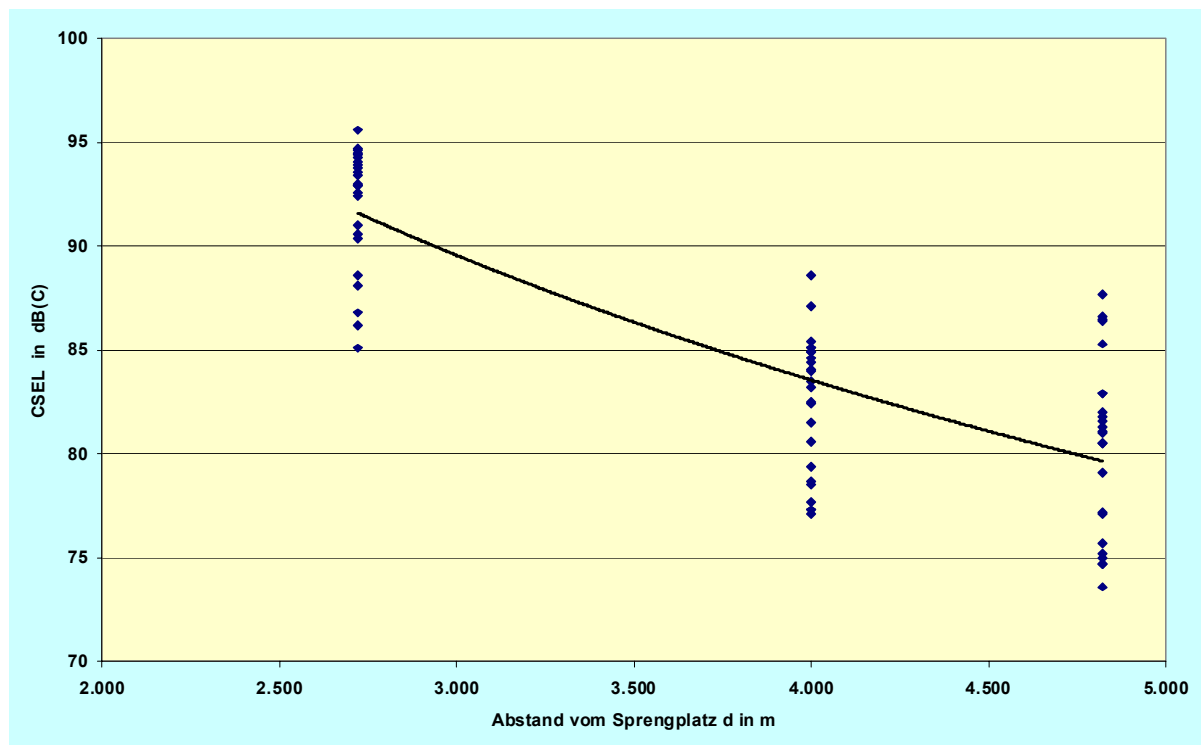


Abb. 17: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 5 \text{ kg}$

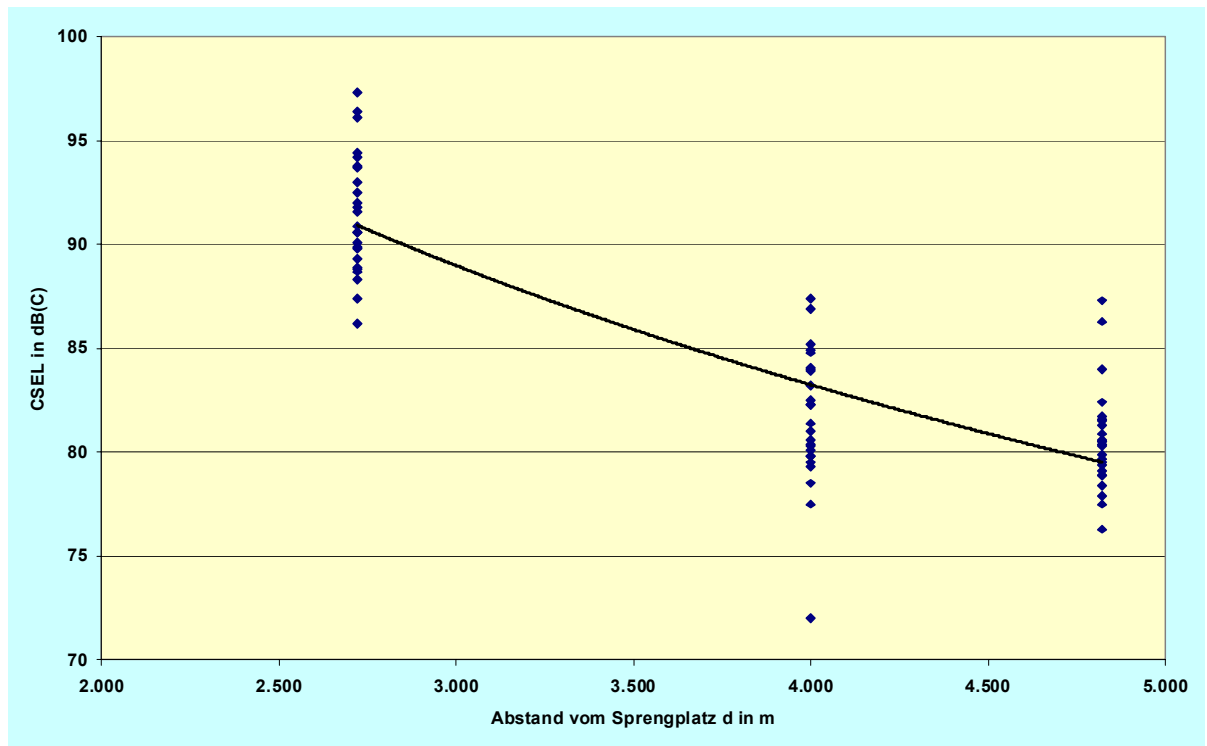


Abb. 18: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 10$ kg

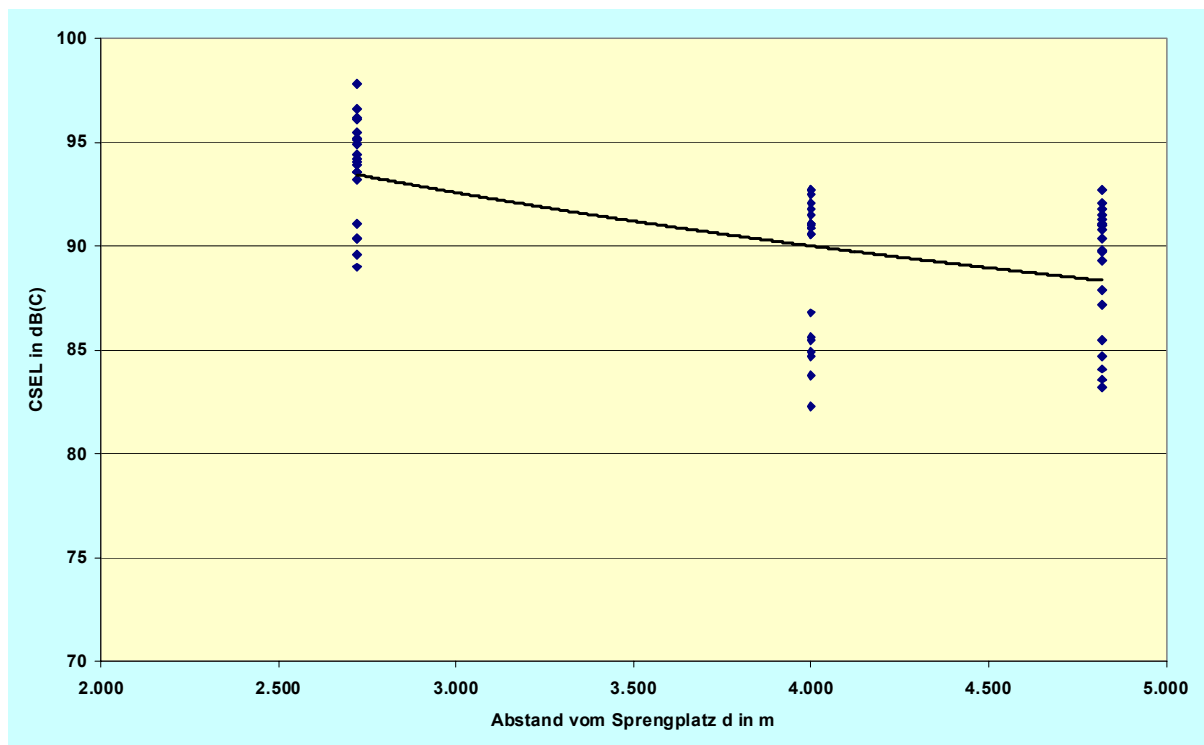


Abb. 19: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 25$ kg

Nach einer Regressionsanalyse ergeben sich aus den vorstehenden Abbildungen folgende Beziehungen für die Schallausbreitung zwischen den Messpunkten MP-9 bis MP-6:

$$(13) \quad \begin{aligned} \text{CSEL}_{1\text{kg}} &= -43,05 \cdot \lg d + 234,4 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,68 \\ s_R &= 3,08 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(14) \quad \begin{aligned} \text{CSEL}_{5\text{kg}} &= -48,08 \cdot \lg d + 256,7 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,67 \\ s_R &= 3,62 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(15) \quad \begin{aligned} \text{CSEL}_{10\text{kg}} &= -45,93 \cdot \lg d + 248,7 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,71 \\ s_R &= 3,08 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(17) \quad \begin{aligned} \text{CSEL}_{25\text{kg}} &= -20,57 \cdot \lg d + 164,1 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,33 \\ s_R &= 3,04 \text{ dB} \end{aligned}$$

Wird der Schallexpositionspegel als Funktion der Sprengstoffmasse und der Entfernung analysiert, ergibt sich folgender allgemeingültigerer Zusammenhang:

$$(18) \quad \begin{aligned} \text{CSEL} &= 6,3 \cdot \lg m - 40,4 \cdot \lg d + 224,5 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,68 \\ s_R &= 3,61 \text{ dB} \end{aligned}$$

Mit Gleichung (18) können nun die zu erwartenden Schallexpositionspegel für die verschiedenen Ladungsmengen und Entfernungsbereiche unabhängig von der Windrichtung abgeschätzt werden.

Wird der Einfluss der Windrichtung berücksichtigt, kann der Schallexpositionspegel für Mitwindbedingungen nach Gleichung (19) und für Nichtmitwindbedingungen nach Gleichung (20) näherungsweise berechnet werden.

$$(19) \quad \begin{aligned} \text{CSEL} &= 8,5 \cdot \lg m - 37,4 \cdot \lg d + 215,1 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,82 \\ s_R &= 3,37 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(20) \quad \begin{aligned} \text{CSEL} &= 8,5 \cdot \lg m - 42,1 \cdot \lg d + 227,4 && \text{dB(C)} \\ r^2 &= 0,73 \\ s_R &= 3,70 \text{ dB} \end{aligned}$$

Zunächst wird auf der Grundlage der Gleichungen (13) bis (17) mittlere Schallausbreitungsdämpfung betrachtet (Tab. 7).

Tab. 7: *Vergleich der nach den Gleichungen (13 bis 17) berechneten Schallausbreitungsdämpfung in dB zwischen den Messpunkten für die verschiedenen Ladungsmengen mit der rein geometrischen Ausbreitungsdämpfung*

MP	Geometrische Ausbreitungsdämpfung	m			
		1 kg	5 kg	10 kg	25 kg
MP 9 - 12	- 3,3	- 7,2	- 8,1	- 7,7	- 3,4
MP 12 - 6	- 1,6	- 3,5	- 3,9	- 3,7	-1,7

Hier fällt auf, dass bei einer Sprengstoffmasse von 25 kg die tatsächliche Dämpfung zwischen den Messpunkten nur geringfügig größer als die geometrische ist.

Um nun die Schallausbreitungsverhältnisse zwischen den Messpunkten im Detail zu untersuchen, wird der Ausgangsdatensatz nach der Windrichtung in Mitwind- und Nichtmitwindverhältnisse nach [5] unterteilt. Für die Sprengstoffmassen 1 kg, 5 kg und 25 kg wird für jeden Messpunkt der mittlere Schallexpositionspegel CSEL und die Streuung s bestimmt (Tab. 8). Hierbei ist zu beachten, dass durch die vergleichsweise geringe Anzahl von Messwerten in den einzelnen Klassen die folgenden Betrachtungen nur orientierenden Charakter haben.

Tab. 8: *Mittelwerte und Streuungen s des Schallexpositionspegels CSEL in dB(C) an den Messpunkten bei verschiedenen Sprengstoffmassen für Mitwind- und Nichtmitwindbedingungen*

CSEL	Mitwind			Nichtmitwind		
	MP-9	MP-12	MP-6	MP-9	MP-12	MP-6
CSEL_{1kg}	86,9	80,2	77,2	85,6	75,4	72,6
s	2,71	3,24	2,78	0,63	1,71	1,59
CSEL_{5kg}	93,6	84,7	83,9	90,8	78,0	78,0
s	1,13	2,21	2,82	3,37	3,06	3,32
CSEL_{25kg}	96,0	92,1	91,6	93,2	88,4	88,3
s	1,77	0,81	1,04	2,30	3,46	3,12

Die mittlere Differenz zwischen Mitwind- und Nichtmitwindverhältnissen beträgt 4,0 dB. Die Streuung ist bei Nichtmitwindbedingungen in der Regel größer als bei Mitwindbedingungen. Eine Ausnahme bildet die Serie mit der Sprengstoffmasse von $m = 1$ kg.

Im nächsten Schritt wird die mittlere Schallausbreitungsdämpfung zwischen den Messpunkten dargestellt (Tab. 9).

Tab. 9: *Vergleich der gemessenen Schallausbreitungsdämpfung in dB zwischen den Messpunkten bei Mitwindbedingungen und bei Nichtmitwindbedingungen*

MP \ m	Geometrische Ausbreitungsdämpfung	Mitwind			Nichtmitwind		
		1 kg	5 kg	25 kg	1 kg	5 kg	25 kg
MP 9 – 12	- 3,3	- 6,7	- 8,9	- 3,9	- 10,2	- 12,8	- 4,8
MP 12 – 6	- 1,6	- 3,0	- 0,8	- 0,5	- 2,8	0,0	+ 0,1

Wie bereits aus Tabelle 7 bekannt, zeigt sich auch hier, dass in beiden Windrichtungsgruppen mit zunehmender Sprengstoffmasse die Dämpfung geringer wird. Dieses kann durch den höheren Energieanteil im tieffrequenten Bereich des Spektrums erklärt werden. Hervorzuheben ist, dass die tatsächliche Dämpfung bei den Sprengstoffmassen von 5 und 25 kg zwischen den Messpunkten MP-12 und MP-6 kleiner als die geometrische Dämpfung und z. T. sogar positiv ist. Wird der Anteil der geometrischen Ausbreitungsdämpfung zwischen den Messpunkten an dem Gesamtwert der Dämpfung berücksichtigt, ergibt sich das in Tabelle 10 dargestellt Bild. In Tabelle 11 werden diese Werte auf eine einheitliche Bezugsentfernung von 100 m umgerechnet.

Tab. 10: *Schalldämpfung in dB zwischen den Messpunkten infolge Boden- und Meteorologiedämpfung sowie durch Luftabsorption*

MP \ m	Mitwind			Nichtmitwind		
	1 kg	5 kg	25 kg	1 kg	5 kg	25 kg
MP 9 – 12	- 3,4	- 5,6	- 0,6	- 6,9	- 9,5	- 1,5
MP 12 – 6	- 1,4	+ 0,8	+ 0,9	- 1,2	+ 1,6	+ 1,7

Tab. 11: *Schalldämpfung in dB zwischen den Messpunkten infolge Boden- und Meteorologiedämpfung sowie durch Luftabsorption für eine Bezugsentfernung von 100 m*

MP \ m	Mitwind			Nichtmitwind		
	1 kg	5 kg	25 kg	1 kg	5 kg	25 kg
MP 9 - 12	- 0,13	- 0,21	- 0,02	- 0,25	- 0,35	- 0,06
MP 12 - 6	- 0,17	+ 0,10	+ 0,11	- 0,15	+ 0,20	+ 0,21

Auffällig in Tabelle 11 sind die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Streckenabschnitten MP-9 – 12 einerseits und MP-12 – 6 andererseits. Die Ursachen dafür sind sicherlich in den Bewuchs- und Bebauungsverhältnissen zu suchen. Zwischen den Messpunkten MP-9 und MP-12 befinden sich ein ca. 375 m breiter Kiefernwald und ein ca. 250 m breiter Streifen mit Bebauung. Das Gelände fällt in Schallausbreitungsrichtung von ca. 41 m über NN auf ca. 25 m über NN am MP-12 ab. Der zweite Streckenabschnitt zwischen den Messpunkten MP-12 und MP-6 ist nahezu ebenes Weideland, das mit einzelnen lockeren Büschen und Bäumen bewachsen ist. Besonders beachtenswert sind die positiven Dämpfungswerte zwischen MP-12 und MP-6. Sie sind ein Zeichen dafür, dass bei Mitwind, wahrscheinlich in Verbindung mit einem positiven Krümmungsradius des Schallstrahls, Schallenergie aus höheren Luftschichten nach unten transportiert worden ist. Die Ursache für die positiven Dämpfungswerte bei Nichtmitwindbedingungen sind weitgehend unklar.

Abschließend zu dieser Problematik wird auf Abbildung 20 verwiesen. Sie zeigt beispielhaft die Pegel-Zeit-Verläufe jeweils bei Mitwind- und bei Nichtmitwindbedingungen bei gleicher Sprengstoffmasse. Neben dem bei Mitwindbedingungen höherem Mittelungspegel zeigt diese Abbildung deutliche Unterschiede im Pegel-Zeit-Verlauf zwischen den Messpunkten obwohl jeweils derselbe Schallimpuls erfasst wurde. Weiterhin zeigt sich auch hier, dass die Standardabweichung bei Mitwindbedingungen nicht generell kleiner als bei Nichtmitwindbedingungen ist. Dieses ist offensichtlich auf den Einfluss der instabilen atmosphärischen Bedingungen auf dem Ausbreitungsweg zurückzuführen.

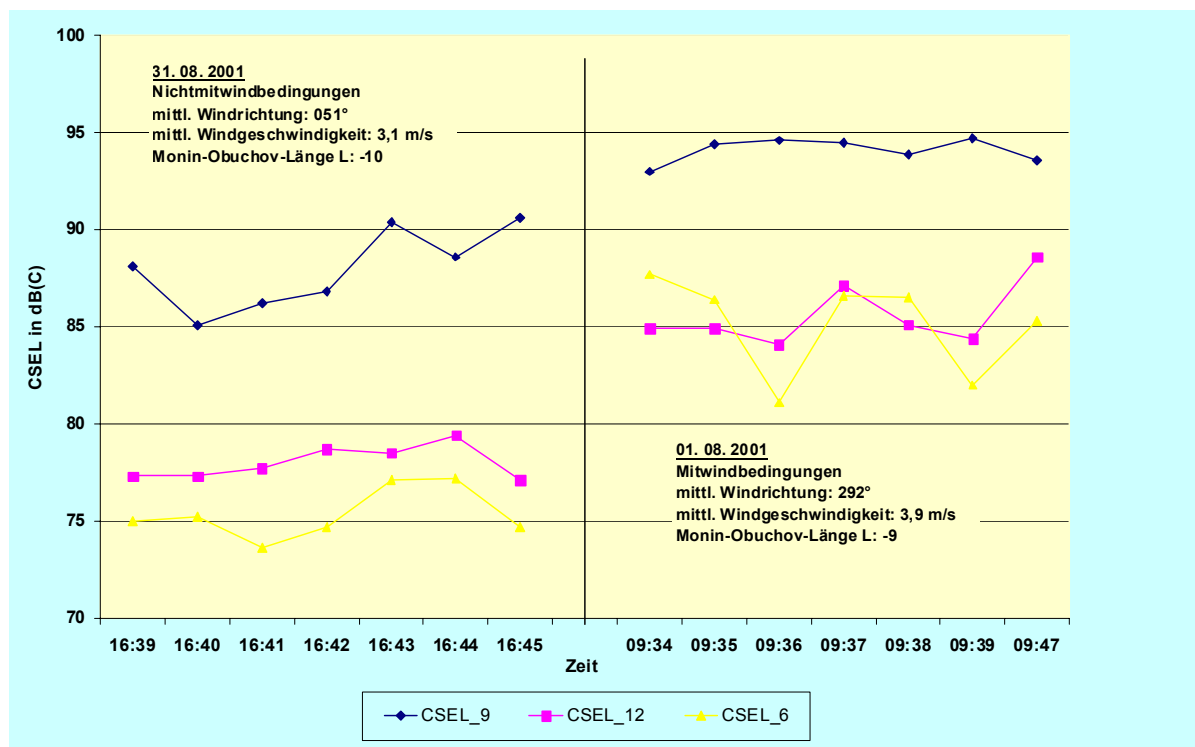


Abb. 20: *Zeitverläufe synchron gemessener Schall-expositionspegel an den Messpunkten MP-9, MP-12 und MP-6 bei gleicher Sprengstoffmasse*

3.3 Messungen zur Bestimmung der Dämmwirkung von Gebäuden

Im Zusammenhang mit der Ausweisung von Baugebieten im Umfeld von Truppenübungsplätzen kann es erforderlich werden, zur Vermeidung von erheblichen Belästigungen die Innenraumpegel zu ermitteln. In der klassischen Bauakustik werden die Dämmmaße von Bauteilen in der Regel erst ab 125 Hz angegeben. Die vorstehenden Untersuchungen zeigen, dass bei Geräuschen von Truppenübungsplätzen der Hauptanteil der Schallenergie im Frequenzbereich unter 100 Hz anzutreffen ist. Für diesen Frequenzbereich ist es praktisch kaum möglich Dämmkurven für die verschiedenen Bauteile anzugeben, weil die Wellenlängen von der gleichen Größenordnung oder größer als die Bauteile selbst sind. Hinzu kommen die Besonderheiten der Anregung durch die starke Impulshaltigkeit der Schieß- und Sprengeräusche und die Abhängigkeit der Übertragung in den Innenraum vom Einfallswinkel der Schallwelle. Ausführliche Untersuchungen zu dieser Problematik wurden u. a. von MAYSENHÖLDER und SCHOLL [9] durchgeführt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse synchroner Messungen, die beim Schießen mit dem Panzer Leopard 2 innerhalb und außerhalb von Gebäuden gewonnen wurden, angegeben. Die Innenraummessungen erfolgten in Anlehnung an [10], [11], [12] in der Raummitte in einer Höhe von 1,20 m. Messgrößen waren der Maximalpegel L_{CFmax} und der Schallexpositionspegel CSEL jeweils mit der Frequenzbewertung C. Aus beiden Größen wurden die Pegeldifferenzen zwischen dem Außen- und dem Innenwert gebildet (Tab. 12). Die Zuordnung der Emissionsorten und Messpunkte und ihre geographische Lage ist Tabelle 1 bzw. Abbildung 1 zu entnehmen.

Tab. 12: *Mittlere Pegeldifferenzen (Außen - Innen) des Maximalpegels ΔL_{CFmax} und des Schallexpositionspegels $\Delta CSEL$*

MP	Raum	ΔL_{CFmax}	$\Delta CSEL$	Schalleinfall
1	Wohnzimmer	15,1	13,2	direkt
1	Kinderzimmer	11,3	7,5	direkt
3	Kinderzimmer	22,6	22,5	streifend
4	Küche	8,8	7,6	direkt
4	Wohnzimmer	14,6/ 10,8	15/ 8,8	streifend/ direkt

Tab. 13: *Angaben zu den Gebäuden und den Räumen in denen die Messungen durchgeführt wurden*

MP Raumbezeichnung	Bauweise Baumaterial	Hausseite Schalleinfall	Grundfläche in m ²	Fensterfläche in m ²	Fuß- boden
1	leicht massiv ohne Keller Liaplan		87		
Wohnzimmer unten Kinderzimmer oben	Trockenbau	Westgiebel direkt	38	5,2	Fliesen
		Westgiebel direkt	16	2	Auslegware
3	leicht massiv mit Keller Porenbeton Trockenbau		102		
Kinderzimmer oben		Nordgiebel streifend	13,5	2	Auslegware
4	leicht massiv mit Keller Porenbeton		123		
Küche unten		Nordfront Streifend	10	2,4	Fliesen
Wohnzimmer unten		Westgiebel mit Erker direkt	30	Südfenster 5,2 Erker 3,9	Wandfliesen Parkett mit dickem Teppich

Bei den Messungen konnte nicht festgestellt werden, auf welchem Übertragungsweg welche Geräuschanteile in das Gebäudeinnere gelangt sind. Übertragungswege können sowohl Fenster als auch Türen oder das Dach und die Decke oder auch die Wände sein. Die in Tabelle 12 angegebenen Werte sind deshalb keine Schalldämmmaße für bestimmte Bauteile sondern sie zeigen nur welche Pegeldifferenzen unter den gegebenen Bedingungen ermittelt worden sind. Eine Übertragung auf andere Standorte ist nur sehr bedingt möglich.

Wie Tabelle 12 zeigt, sind die Pegeldifferenzen bei den Maximalpegeln in der Regel etwas größer als bei den CSEL. Auffällig ist, dass am gleichen Gebäude (MP-1) erhebliche Unterschiede bei den Pegeldifferenzen zwischen dem Wohnzimmer und dem Kinderzimmer festgestellt wurden. Die Ursache könnte darin zu suchen sein, dass im Obergeschoss der Giebel als Trockenbauwand ausgeführt wurde. Die geringen Pegeldifferenzen in der Küche und in der 2. Serie im Wohnzimmer des MP-4 können durch einen Türspalt von 1 cm bis 2 cm Breite verursacht worden sein. Wegen der Durchführung der Kabel konnten diese Türen nicht ganz geschlossen werden.

Insgesamt wurde eine große Spannweite der Pegeldifferenzen festgestellt. Sie reicht bei den Maximalpegeln von 11,3 dB(C) bis 22,6 dB(C). Werden die Messergebnisse aus der Küche des MP-4 berücksichtigt, liegt der niedrigste Wert des ΔL_{CFmax} bei 8,8 dB(C). Bei den $\Delta CSEL$ -Werten reicht die Spannweite von 7,5 dB(C) bis 22,5 dB(C).

3.4 Meteorologische Messungen

Bei allen Messkampagnen wurden vom Landesumweltamt neben den akustischen auch meteorologische Messungen an einem 10 m Mast durchgeführt. Seine Standorte sind den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen. Es wurden folgende Größen gemessen:

- am Boden $z = 0$ m: Luftdruck,
- Höhe $z_1 = 2$ m: Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit,
- Höhe $z_2 = 10$ m: Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Lufttemperatur.

Bei einer Abtastrate der Messfühler von drei Sekunden wurden zyklische Mittelwerte gebildet. Die Mittelungszeit betrug im November 2000 und im Juli/August 2001 jeweils zehn Minuten. Im August 2003 wurde eine Mittelungszeit von einer Minute gewählt. Im November 2000 erfolgten zusätzlich zu den Messungen am Mast auch Messungen durch die Bundeswehr mit Hilfe von Radiosonden-aufstiegen. Messgrößen waren dabei die Temperatur, die Windrichtung und -geschwindigkeit sowie die relative Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Höhen.

Als Maßzahl zur Bestimmung der Stabilitätsverhältnisse wurde die Monin-Obuchov-Länge L verwendet [13]:

$$(21) \quad L = - \frac{v_*^3}{\kappa \cdot \frac{g}{\theta_0} \cdot \frac{q}{c_p \cdot \rho}}$$

Es bedeuten:

v_*	Schubspannungsgeschwindigkeit
κ	von Karman-Konstante
g	Erdbeschleunigung
θ_0	potentielle Temperatur
q	fühlbarer Wärmestrom
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck
ρ	Luftdichte

Für $L > 0$ ist die Atmosphäre bei einem nach unten gerichteten fühlbaren Wärmestrom stabil. Bei einem nach oben gerichteten fühlbaren Wärmestrom wird $L < 0$ und es herrscht eine labile Schichtung vor. Eine neutrale oder indifferente Schichtung ist vorhanden, wenn $|L| \rightarrow \infty$ strebt.

Die Wetterlage im Messgebiet wurde während der drei Messperioden durch geringe horizontale Luftdruckgradienten am Boden geprägt. Daraus resultierten geringe Windgeschwindigkeiten in Bodennähe in Verbindung mit einer sehr variablen Windrichtung. Unter diesen Bedingungen können sich besonders in den Sommermonaten labile Verhältnisse mit hochreichenden vertikalen Konvektionszellen ausbilden. Die damit in Verbindung stehenden atmosphärischen Inhomogenitäten sind von der Größenordnung bzw. größer als die Wellenlänge des tieffrequenten Anteils der Spektren der Schallimpulse. Tabelle 14 zeigt den Zusammenhang zwischen den Ausbreitungsklassen der TA Luft, der Monin-Obuchov-Länge L und der Standardabweichung der Windrichtung σ_{dd} in Bodennähe.

Tab. 14: *Zusammenhang zwischen der Monin-Obuchov-Länge L, den Ausbreitungsklassen der TA Luft und der Standardabweichung der Windrichtung σ_{dd} in Grad [14], [16]*

Ausbreitungsklassen der TA Luft	I sehr stabil	II stabil	III/1 indiffe- rent	III/2 indiffe- rent	IV labil	V sehr labil
Monin-Obuchov-Länge	13	44	99999	- 45	- 19	- 7
σ_{dd}	2,5	5	10	15	20	25

Aus dieser Tabelle ist deutlich die Zunahme der Variabilität der Windrichtung in Verbindung mit einer zunehmenden Labilisierung erkennbar.

3.5 Zusammenfassung der akustischen und meteorologischen Messungen sowie ihre Interpretation

Im Folgenden werden die meteorologischen Messwerte über die jeweiligen Zeiträume der akustischen Messserien gemittelt. Dabei wirkt sich der Umstand etwas störend aus, dass im Jahr 2001 bei den meteorologischen Messungen eine Mittelungszeit von zehn Minuten gewählt wurde. Deshalb ist in einigen Fällen der Mittelungszeitraum der meteorologischen Messungen geringfügig größer als der der akustischen Messungen. In Tabelle 15 werden die Mittelwerte der meteorologischen Kenngrößen, daraus abgeleitete Parameter sowie die mittleren Schallexpositionspegel und ihre Standardabweichungen zusammengeführt. Die Daten sind chronologisch geordnet. Als Zeit wird jeweils das Ende des Mittelungsintervalls angegeben. Zur Erleichterung der Zuordnung zu den akustischen Messungen wird auch die Sprengstoffmasse genannt.

Die effektive Schallgeschwindigkeit über Grund kann nach Gleichung (22) berechnet werden:

$$(22) \quad c = A \cdot \sqrt{T} + v \cdot \cos \varphi$$

Es bedeuten:

A = 20,07 Konstante
T Lufttemperatur in K
v horizontale Windgeschwindigkeit in m/s
 φ Differenz zwischen der Mitwindrichtung und der Schallausbreitungsrichtung

Unter Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes nach GAUSS ergibt sich für die Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit σ_c folgende Beziehung:

$$(23) \quad \sigma_c = \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot T} \cdot \sigma_T^2 + \cos^2 \varphi \cdot \sigma_v^2 + v^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \sigma_\varphi^2}$$

Es bedeuten:

σ_T Standardabweichung der Lufttemperatur
 σ_v Standardabweichung der Windgeschwindigkeit
 σ_φ Standardabweichung der Differenz der Mitwindrichtung und Schallausbreitungsrichtung

Tab. 15: Mittelwerte meteorologischer Parameter für die Zeitintervalle der akustischen Messserien sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der Schallexpositionspegel an den einzelnen Messpunkten

Datum	Zeit	M	t(z ₂)	v(z ₂)	dd(z ₂)	L	σ_c	MP-9 CSEL _m σ_{SEL}	MP-12 CSEL _m σ_{SEL}	MP-6 CSEL _m σ_{SEL}
31.07.2001	09:49	25	17,6	0,9	209	-40	0,37	95,4 1,51	91,7 0,83	91,4 0,77
31.07.2001	10:39	25	18,9	0,6	196	-1	0,52	94,7 1,11	91,3 0,74	90,5 1,03
31.07.2001	11:39	25	20,2	1,7	086	-3	0,92	91,2 2,04	84,8 1,44	85,2 1,80
31.07.2001	12:39	10	20,9	1,7	108	-3	0,87	89,6 1,51	79,8 3,82	80,7 1,71
31.07.2001	14:39	10	23,7	1,6	106	-2	0,68	89,7 0,80	81,0 0,92	81,4 0,36
31.07.2001	15:29	10	23,8	2,2	050	-5	0,89	90,4 2,63	79,7 1,68	79,3 1,62
31.07.2001	16:49	5	23,8	3,7	041	-35	0,84	88,0 2,08	78,0 0,87	75,4 1,33
01.08.2001	09:49	5	17,3	3,9	297	-13	1,02	94,1 0,63	85,6 1,64	85,1 2,53
01.08.2001	13:39	1	20,5	5,1	312	-25	1,12	88,2 3,87	78,9 2,63	78,9 1,40
01.08.2001	14:19	1	20,7	4,4	302	-19	1,08	85,5 1,90	80,5 0,63	78,1 3,05
01.08.2001	14:49	1	20,7	4,0	294	-25	1,06	86,4 2,04	83,0 3,05	76,5 2,68
05.08.2003	16:24	10	28,1	2,2	103	-6	0,89	94,7 1,78	85,1 1,44	81,3 3,78
05.08.2003	17:25	5	28,6	1,0	240	-1	0,50	93,3 1,25	83,1 2,83	80,7 2,10
05.08.2003	18:27	1	27,8	2,5	123	-299	0,55	86,1 0,74	75,4 1,53	72,9 1,50

Aus dieser Tabelle ergibt sich aus der Monin-Obuchov-Länge L zunächst, dass in fast allen Messperioden labile bis stark labile atmosphärische Verhältnisse vorherrschend waren. Unter diesen Bedingungen kommt es zur Ausbildung hochreichender vertikaler Konvektionszellen, die räumlich und zeitlich stochastisch verteilt sind. Die horizontalen Abmessungen der Konvektionszellen sind von der Größenordnung und größer als die Wellenlänge im tieffrequenten Bereich des Spektrums der Schallimpulse. Sie beeinflussen in nicht vorhersehbarer Weise die Ausbreitung der Schallimpulse. Dadurch kommt es zu vergleichsweise großen Streuungen der Schallpegel und es muss die Frage nach der Repräsentativität der Messergebnisse, die unter solchen Bedingungen gewonnen wurden, gestellt werden. Selbst bei scheinbar vergleichbaren äußeren meteorologischen Bedingungen wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit sind die tatsächlichen Schallausbreitungsbedingungen nicht reproduzierbar und es können zwischen den Messserien erhebliche Differenzen auftreten.

Ein Hinweis auf diese Verhältnisse sind die z. T. erheblichen Standardabweichungen der Schallexpositionspegel in Tabelle 15. Weiterhin soll auf die beiden Messungen am 31.07.2001 um 14:39 Uhr und am 05.08.2003 um 16:24 Uhr aufmerksam gemacht werden. Bei vergleichbaren äußeren Bedingungen wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, gleicher Sprengstoffmasse, gleicher Lage des Emissionsortes und gleichen Immissionsorten wurde an den Messpunkten MP-9 und MP-12 eine Differenz der Mittelungspegel von mehr als 5 dB festgestellt. In der Periode am 05.08.2003 18:27 Uhr erfolgte der Übergang von der labilen Schichtung am Tage zur stabilen Schichtung nachts.

Die für die Berechnung der Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit erforderlichen Eingangsparameter wurden auf der Grundlage des Grenzschichtmodells der TA Luft [17] bzw. der Angaben in [18] unter Verwendung der universellen Funktion in der Formulierung nach [17] berechnet.

Um nun eine Beziehung zwischen den akustischen Messergebnissen und den meteorologischen Messgrößen herzustellen, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei wurde die berechnete Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit als Einflussgröße und die gemessene Standardabweichung der Schallexpositionspegel als Zielgröße verwendet. Diese Analyse erfolgte für jeden Messpunkt. Beispielhaft werden im Folgenden die Ergebnisse vom Messpunkt MP-6 dargestellt.

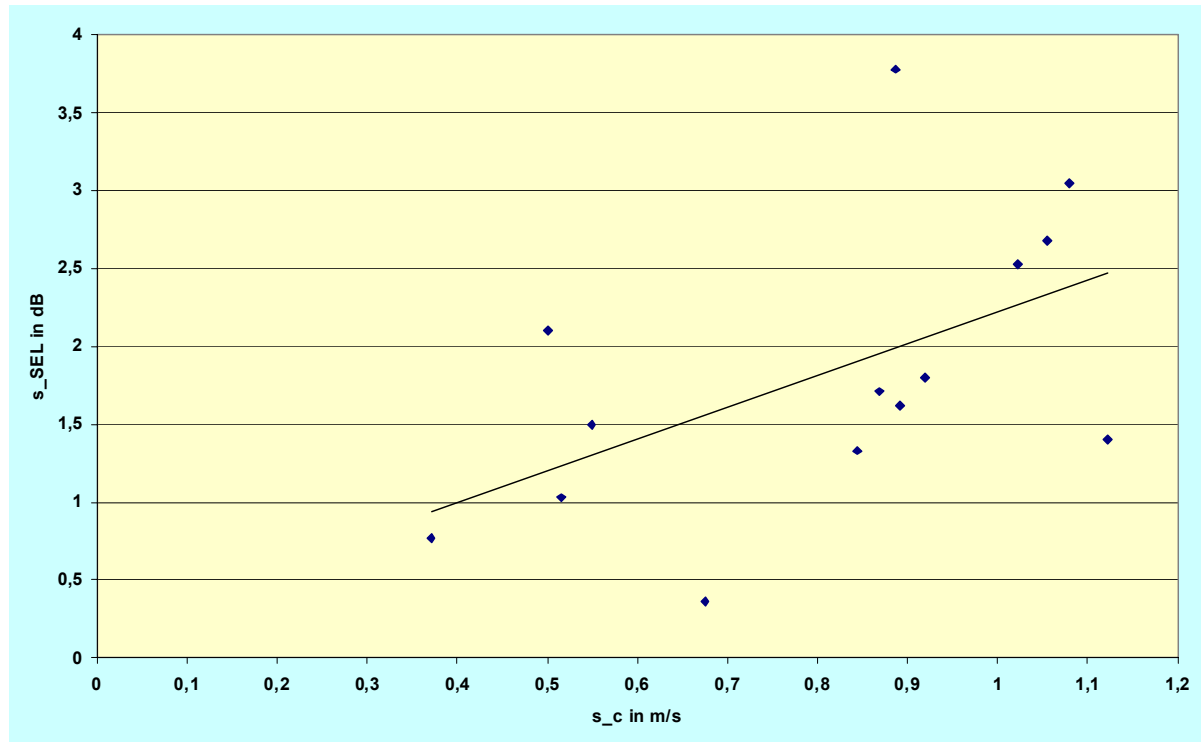


Abb. 21: *Abhängigkeit der gemessenen Standardabweichung des Schallexpositionspegels von der berechneten Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit*

Diese Abbildung lässt einen gewissen lockeren Zusammenhang zwischen den beiden Kenngrößen vermuten. Die Regressionsanalyse ergibt folgende Ergebnisse:

$$(24) \quad \begin{aligned} \sigma_{SEL} &= 2,04 \cdot \sigma_c + 0,2 \text{ dB(C)} \\ r^2 &= 0,29 \\ s_R &= 0,88 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$(25) \quad \sigma_{SEL} \approx 2,04 \cdot \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot T} \cdot \sigma_T^2 + \cos^2 \varphi \cdot \sigma_v^2 + v^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \sigma_\varphi^2} + 0,2 \text{ dB}$$

Für die beiden anderen Messpunkte wurden vergleichbare Kennwerte ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß schwankt zwischen 0,30 am MP-9 und 0,07 am MP-12. Wegen dieser vergleichsweise geringen Bestimmtheitsmaße hat das obige Ergebnis nur einen orientierenden Charakter. Eine Verbesserung ist mit einer Vergrößerung der Zahl der Messwerte zu erwarten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass während der Messungen vorzugsweise labile atmosphärische Verhältnisse herrschten. Zur Verallgemeinerung der Aussagen sind auch Messungen bei stabilen Schichtungsverhältnissen erforderlich.

Trotz dieser Einschränkungen können auf der Grundlage der Näherungsgleichung (25) vorsichtige Schlussfolgerungen über den Einfluss meteorologischer Parameter auf die Standardabweichung der Schallexpositionspegel hochenergetischer Schallimpulse gezogen werden.

Die Analyse der vorliegenden Daten zeigte, dass der Anteil der thermischen Fluktuationen an der Standardabweichung der Schallexpositionspegel in der Regel geringer war als der Anteil der beiden übrigen Terme. Insbesondere bei einer indifferenten Schichtung wird σ_T etwa von der Größenordnung 10^{-3} bis 10^{-4} und in manchen Fällen noch kleiner. Theoretisch strebt dieser Wert dann gegen Null. Bei Mitwind- und bei Gegenwindbedingungen wird die Standardabweichung des Schallexpositionspegels hauptsächlich durch die Fluktuationen der Windgeschwindigkeit bestimmt, während der Betrag der Windgeschwindigkeit und die Schwankungen der Windrichtung im Prinzip keinen Einfluss haben. Der Einfluss dieser beiden Parameter auf die Schwankung der Schallexpositionspegel erreicht bei einer Windrichtung senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung ein Maximum. Dies bedeutet, dass bei sonst gleichen äußeren Bedingungen wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit aber an einem anderen Immissionsort mit einer anderen Schallausbreitungsrichtung auch andere Standardabweichungen des Schallexpositionspegels zu erwarten sind.

Gleichung (25) macht den Zusammenhang zwischen den Schwankungen meteorologischer Parameter auf dem Schallausbreitungsweg und den Schwankungen der Schallexpositionspegel deutlich. Zur Verbesserung der Qualität ist noch ein gewisser Forschungsbedarf erforderlich. Zum einen müsste die Zahl der Messwerte erhöht werden und die Betrachtungen müssen auch auf stabile Schichtungsverhältnisse der Atmosphäre ausgedehnt werden. Des Weiteren sollte die Betrachtung auch auf Schallimpulse mit einer anderen Frequenzcharakteristik, wie z.B. bei Handfeuerwaffen erweitert werden. Zur Ermittlung der Standardabweichung prognostizierter Schallexpositionspegel auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchung können klimatologische Angaben des Deutschen Wetterdienstes über die Tagesgänge der Stabilitätsverhältnisse, der Windgeschwindigkeit in Bodennähe und über Häufigkeitsverteilung der Windrichtung herangezogen werden.

Dieses Beispiel zeigt aber auch, dass es bei labilen atmosphärischen Verhältnissen und großräumigen Einwirkungsbereichen, wie z.B. an Truppenübungsplätzen nur bedingt möglich ist, für alle Ausbreitungswege durch Messung an einem Punkt die konkreten Ausbreitungsverhältnisse hinreichend genau zu bestimmen. Vielmehr ist es erforderlich, die mögliche Schwankungsbreite der Schallpegel, die sich aus den allgemeinen atmosphärischen Verhältnissen ergeben, zu ermitteln. Auf dieser Basis kann eine obere Vertrauensgrenze bestimmt werden, die eine höhere Aussagekraft als ein Mittelungspegel hat.

4 Schlussfolgerungen

- (1) Die Schallimmissionen im Umfeld von Truppenübungsplätzen sind in aller Regel stark impulshaltig und werden durch hohe Energieanteile im Spektralbereich unter 100 Hz charakterisiert.
- (2) In diesem Spektralbereich wird die Schallenergie während der Messungen über große Entfernungen kaum abgebaut.
- (3) In einem Abstand zwischen 4.000 m und 4.820 m vom Sprengplatz wurden bei Sprengstoffmassen von 5 kg und 25 kg positive Dämpfungswerte ermittelt.
- (4) Durch die Überlagerung der direkt einfallenden mit der am Boden reflektierten Schallwelle kommt es zur Ausbildung eines ground dip. Das gemessene Spektrum ist deshalb wesentlich von den Verhältnissen wie Höhe des Mikrophons und Reflexionseigenschaften des Erdbodens am Immissionsort abhängig.
- (5) Die Maximalpegel $L_{CF \max}$ und Schallexpositionspegel CSEL sind annähernd normal verteilt. Die Differenz zwischen beiden weicht von der Normalverteilung ab. Der Modalwert (wahrscheinlichster Wert) der Differenz beträgt 7,3 dB. Der theoretisch zu erwartende Wert liegt bei 9 dB. Die Ursache für den geringeren Wert der messtechnisch ermittelten Differenz können Reflexion und Nachhall sein.
- (6) Die Differenz zwischen den C- und A-bewerteten Pegeln ist an allen Messpunkten größer als 20 dB. Sie nimmt in der Regel mit zunehmender Sprengstoffmasse zu.

- (7) Es wurde die C-bewertete Differenz der Maximalpegel und Schallexpositionspegel aus synchronen Messungen außerhalb und innerhalb von Wohngebäuden in leicht massiv Bauweise ermittelt. Die Messungen erfolgten an drei Gebäuden in insgesamt fünf unterschiedlichen Räumen.
Die mittlere Differenz des Schallexpositionspegels betrug 12 dB und die des Maximalpegels 14 dB. Die Spannweite der Pegeldifferenzen war sehr groß. Beim CSEL wurden Pegeldifferenzen zwischen 7,5 dB und 22,5 dB ermittelt.
- (8) Die Pegeldifferenzen außen – innen waren auch innerhalb eines Gebäudes unterschiedlich. Für ein Zimmer wurde ein Differenzwert von 13,2 dB und gleichzeitig wurde für einen anderen Raum nur eine Differenz von 7,5 dB festgestellt.
- (9) Es werden Näherungsgleichungen zur Berechnung der Schallexpositionspegel in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse und der Entfernung sowohl für Mitwind- als auch für Nichtmitwindbedingungen angegeben.
- (10) Die Spannweite der gemessenen Schallexpositionspegel ist bei gleicher Ladungsmenge an den einzelnen Messpunkten in der Regel größer als 10 dB.
- (11) Aus den zu den akustischen Messungen synchron durchgeführten meteorologischen Messungen folgt, dass in der Regel labile bis stark labile Schichtungsverhältnisse vorherrschten.
- (12) Die bei diesen Schichtungsverhältnissen auftretenden vertikalen Konvektionszellen beeinflussen die Schallausbreitung in nicht vorhersehbarer Art und Weise.
- (13) Es wurde ein Zusammenhang hergestellt zwischen der Standardabweichung der Schallexpositionspegel und den Standardabweichungen der Lufttemperatur, der horizontalen Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. Diese drei atmosphärischen Parameter können unter Anwendung des Grenzschichtmodells der TA Luft aus aktuellen Messwerten bzw. aus klimatologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes ermittelt werden.
- (14) Wegen der stochastischen Verteilung der Konvektionszellen sind bei labilen atmosphärischen Schichtungsverhältnissen akustische Messungen, die sich über einen großen Einwirkungsbereich (z.B. Truppenübungsplätze, Flugplätze oder auch weitläufige Industrieanlagen) erstrecken, mit großen Unsicherheiten bezüglich ihrer Repräsentanz verbunden.

Verzeichnisse

Quellen

- [1] VDI 3745, Beurteilung von Schießgeräuschimmissionen, Mai 1993; Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf (1993)
- [2] Hirsch, K.-W.: Source Data For Shooting Noise; Internoise '98; Christchurch New Zealand (1998)
- [3] Hirsch, K.-W.: An Overview on Military Weapon Noise: Its Physics and Annoyance: Internoise 2003, Seoul, Korea (2003)
- [4] Hirsch, K.-W.: On the influence of local ground reflections on sound from distant blasts at large distances. Noise Control Engineering 46 (5) (1998)
- [5] DIN 45645-1, Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Juli 1996, Beuth Verlag GmbH, Berlin (1996)
- [6] DIN 45680, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, März 1997, Beuth Verlag GmbH, Berlin (1997)
- [7] DIN 45641, Mittelung von Schallpegeln, Juni 1990, Beuth Verlag GmbH, Berlin (1990)

- [8] Bundeswehr: Vorläufige Bestimmung zur Ermittlung und Beurteilung von Geräuschimmissionen durch Schießen mit großkalibrigen Waffen und durch Sprengungen (Nur für den Dienstgebrauch); Stand: 26.04.1995
- [9] Maysenhölder, W.; Scholl, W.: Untersuchungen zur Dämmwirkung von Bauteilen bei tiefen Frequenzen und Impulsanregung. Umwelt-Bundesamt Forschungsbericht 10504512, Berlin (1990)
- [10] Buchta, E.: Erprobung geeigneter Lärmschutzfenster gegen Schießlärm für Wohngebäude in Randgemeinden des Truppenübungsplatzes Bergen. Im Auftrag der Staatlichen Bauleitung Bergen (1987)
- [11] Buchta, E.: Erprobung passiver Schallschutzmaßnahmen gegen Geschossknall am Haus "Königskrug" von der Außenfeuerstellung 12 des Tr. Üb. Pl. Munster. Im Auftrag des Stadthochbauamtes Munster, August 1990
- [12] Buchta, E.: Pilotprojekt für passive Schallschutzmaßnahmen am Truppenübungsplatz Grafenwöhr. Im Auftrag des Bundesministeriums für Finanzen
- [13] Монин, А.С.; Обухов, А. М.: Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы; Труды Геофизического института No. 24 (151) 1954 – Изд. А. Н. СССР
- [14] Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes – Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). Vom 24. Juli 2002
- [15] VDI 3783 Blatt 8-E, November 2001; Umweltmeteorologie Messwerterfassung Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2001)
- [16] Plate, E. J. (Hrsg.): Engineering meteorology; Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam – Oxford – New York (1982)
- [17] Janicke, L.; Janicke, W.: Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle. Berichte zur Umweltphysik, Oktober (2000), ISSN 1439-8222; www.janicke.de
- [18] Ламли, Дж.; Пановский, Г. А.: Структура атмосферной турбулентности. Издательство " Мир ", Москва (1966)

Abkürzungen

A = 20,07	Konstante
ASEL	Schallexpositionspegel mit Frequenzbewertung A
c	Schallgeschwindigkeit
c _p	spezifische Wärme bei konstantem Druck
CSEL	Schallexpositionspegel mit Frequenzbewertung C
CSEL _{ber}	berechneter Schallexpositionspegel
CSEL _m	Mittelwert des Schallexpositionspegels
CSEL _{mes}	gemessener Schallexpositionspegel
CSEL _{1kg}	Schallexpositionspegel für die Sprengstoffmasse m = 1 kg
CSEL _{5kg}	Schallexpositionspegel für die Sprengstoffmasse m = 5 kg
CSEL _{10kg}	Schallexpositionspegel für die Sprengstoffmasse m = 10 kg
CSEL _{25kg}	Schallexpositionspegel für die Sprengstoffmasse m = 25 kg
dd(z ₂)	Windrichtung in 10 m Höhe in Grad
dB	Dezibel
dB(A)	Dezibel mit Frequenzbewertung A
dB(C)	Dezibel mit Frequenzbewertung C
ΔL _{CFmax}	Pegeldifferenz des Maximalpegels L _{CFmax} außerhalb und innerhalb eines Gebäudes
ΔCSEL	Pegeldifferenz des Schallexpositionspegels CSEL außerhalb und innerhalb eines Gebäudes
EO	Emissionsort
φ	Differenz zwischen der Mitwindrichtung und der Schallausbreitungsrichtung
g	Erdbeschleunigung
IO	Immissionsort
j	imaginäre Einheit
κ	von Karman-Konstante

L_{CFmax}	Maximaler Schalldruckpegel mit Frequenzbewertung C und Zeitbewertung F
LSEL	linearer Schallexpositionspegel
m	Sprengstoffmasse
MP	Messpunkt
PETN	Kurzbezeichnung für den Sprengstoff Pentaerythritetranitrat (Nitropenta)
$p(\omega)$	Schalldruck
q	fühlbarer Wärmestrom
r	Korrelationskoeffizient
R_W	Weber-Radius
ρ	Luftdichte
SEL	Schallexpositionspegel
s_R	Reststreuung
s	Streuung
σ_{dd}	Standardabweichung der Windrichtung
σ_{SEL}	Standardabweichung des Schallexpositionspegels
σ_c	Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit
σ_{dd}	Standardabweichung der Windrichtung
σ_T	Standardabweichung der Temperatur
σ_v	Standardabweichung der Windgeschwindigkeit
σ_φ	Standardabweichung der Differenz zwischen der Windrichtung und der Schallausbreitungsrichtung
T	Lufttemperatur in K
$t(z_2)$	Lufttemperatur in 10 m Höhe in °C
$v(z_2)$	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in m/s
v_*	Schubspannungsgeschwindigkeit
Θ_0	potentielle Temperatur
ω	Kreisfrequenz
z_1	Höhe 2 m
z_2	Höhe 10 m

Abbildungen

- Abbildung 1: Lage der Feuerstellungen EO und der Immissionsmesspunkte beim Panzerschießen
- Abbildung 2: Lage des Sprengplatzes C1 und der Messpunkte während der Sprengungen
- Abbildung 3: Weber-Radius R_W als Funktion der Sprengstoffmasse m [2]
- Abbildung 4: Berechnete Terzspektren der Schallemission für die Sprengstoffmassen 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg
- Abbildung 5: Berechnetes Terzspektrum der Schallemission für den Mündungsknall beim Panzer Leopard 2
- Abbildung 6: 1 m-Schallexpositionspegel für die Frequenzbewertungen linear, C und A in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m [2], [3]
- Abbildung 7: Mittleres Terzspektrum des Schallexpositionspegels SEL am MP-9 für die Sprengstoffmassen m 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg
- Abbildung 8: Mittleres Terzspektrum des Schallexpositionspegels SEL am MP-12 für die Sprengstoffmassen m 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg
- Abbildung 9: Mittleres Terzspektrum des Schallexpositionspegels SEL am MP-6 für die Sprengstoffmassen m 1 kg, 5 kg, 10 kg und 25 kg
- Abbildung 10: Schematische Darstellung für die Entstehung des ground dip
- Abbildung 11: Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL am Messpunkt MP-9 von der Sprengstoffmasse m
- Abbildung 12: Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL am Messpunkt MP-12 von der Sprengstoffmasse m
- Abbildung 13: Abhängigkeit des Schallexpositionspegels CSEL am Messpunkt MP-6 von der Sprengstoffmasse m
- Abbildung 14: Histogramm, Boxplot und Q-Q-Plot für L_{CFmax} , CSEL und dL
- Abbildung 15: Zusammenhang zwischen dem maximalen Schalldruckpegel L_{CFmax} und dem Schallexpositionspegel CSEL

- Abbildung 16: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 1$ kg
 Abbildung 17: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 5$ kg
 Abbildung 18: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 10$ kg
 Abbildung 19: Schallausbreitung zwischen den Messpunkten, Sprengstoffmasse $m = 25$ kg
 Abbildung 20: Zeitverläufe synchron gemessener Schallexpositionspegel an den Messpunkten MP-9, MP-12 und MP-6 bei gleicher Sprengstoffmasse
 Abbildung 21: Abhängigkeit der gemessenen Standardabweichung des Schallexpositionspegels von der berechneten Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit

Tabellen

- Tabelle 1: Zuordnung der Feuerstellungen und der Immissionsmesspunkte beim Panzerschießen
 Tabelle 2: Beschreibung der Messpunkte während der Sprengungen
 Tabelle 3: Anzahl der Einzelschallereignisse, die je Sprengstoffmasse an den Messpunkten ausgewertet wurden
 Tabelle 4: Differenz $\Delta L(C - A)$ zwischen der C- und der A-Bewertung für die Emissionspegel in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m
 Tabelle 5: Differenz (CSEL - ASEL) in dB an den Messpunkten in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m
 Tabelle 6: Mittlere Schallexpositionspegel CSEL in dB(C) an den Messpunkten in Abhängigkeit von der Sprengstoffmasse m
 Tabelle 7: Vergleich der nach den Gleichungen (13 bis 17) berechneten Schallausbreitungsdämpfung in dB zwischen den Messpunkten für die verschiedenen Ladungsmengen mit der rein geometrischen Ausbreitungsdämpfung
 Tabelle 8: Mittelwerte und Streuungen s des Schallexpositionspegels CSEL in dB(C) an den Messpunkten bei verschiedenen Sprengstoffmassen für Mitwind- und Nichtmitwindbedingungen
 Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Schallausbreitungsdämpfung in dB zwischen den Messpunkten bei Mitwindbedingungen und bei Nichtmitwindbedingungen
 Tabelle 10: Schalldämpfung in dB zwischen den Messpunkten infolge Boden- und Meteorologiedämpfung sowie durch Luftabsorption
 Tabelle 11: Schalldämpfung in dB zwischen den Messpunkten infolge Boden- und Meteorologiedämpfung sowie durch Luftabsorption für eine Bezugsentfernung von 100 m
 Tabelle 12: Mittlere Pegeldifferenzen (Außen - Innen) des Maximalpegels ΔL_{CFmax} und des Schallexpositionspegels $\Delta CSEL$
 Tabelle 13: Angaben zu den Gebäuden und den Räumen in denen die Messungen durchgeführt wurden
 Tabelle 14: Zusammenhang zwischen der Monin-Obuchov-Länge L , den Ausbreitungsklassen der TA Luft und der Standardabweichung der Windrichtung σ_{dd} in Grad [14], [16]
 Tabelle 15: Mittelwerte meteorologischer Parameter für die Zeitintervalle der akustischen Messserien sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der Schallexpositionspegel an den einzelnen Messpunkten

**Ministerium für Ländliche Entwicklung,
Umwelt und Verbraucherschutz
des Landes Brandenburg**

Landesumweltamt Brandenburg
Referat Umweltinformation/Öffentlichkeitsarbeit

Berliner Straße 21-25
14467 Potsdam
Tel: (03 31) 23 23 259
Fax: (03 31) 29 21 08
E-Mail: info@lua.brandenburg.de
www.brandenburg.de/lua