



Akustisches Kolloqium, Sommer 2004

Physikalische und lärmakustische Aspekte des Schießlärms

Karl-Wilhelm Hirsch

- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung



Schall und Lärm

Klarstellung: die physikalisch-akustische und die lärm-akustische Seite

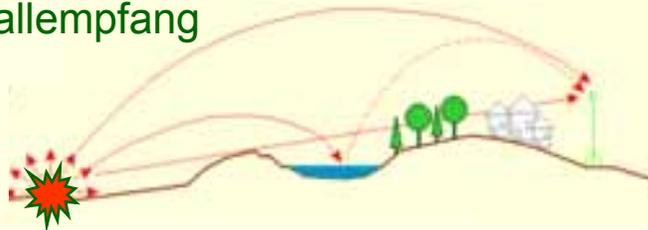
Wenn Sie den Leuten sagen, dass die Knalle von einem Feuerwerk stammen, öffnen sie die Fenster, um vielleicht einen Blick darauf zu erhaschen.

Wenn Sie den Leuten sagen, dass draußen Waffen schießen, schließen sie die Fenster und sind enttäuscht, dass sie trotzdem immer noch hörbar sind.

➔ **Jedoch:** Am Ohr gibt es keine physikalischen Unterschiede zwischen beiden Knallarten.

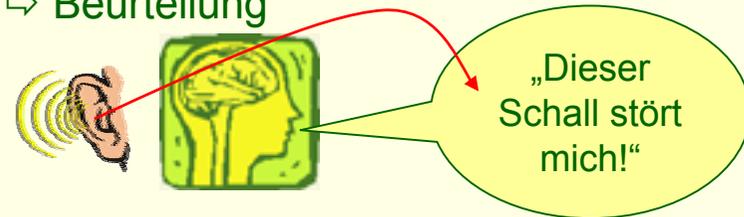
➔ **Deshalb:** Die Worte 'militärisch' und 'Waffe' gehören auf die lärm-akustische Seite.

- ➔ Schallabstrahlung
- ➔ Schallausbreitung
- ➔ Schallempfang



physikalisch-akustische Seite
Schall

- ➔ Gestörtheit
- ➔ Belästigung
- ➔ Beurteilung



lärm-akustische Seite
Lärm



‘Sicherheitshinweis’

keep it simple but ... stay on the right side

- ⇒ Geht es um Lärm, wird die physikalisch-akustische Seite meistens auf das Notwendigste (manchmal auf noch weniger) beschränkt, um möglichst einfach eine Beurteilung durchführen zu können.
- ⇒ Die ISO 9613, beispielsweise, beschreibt nur die Ausbreitungsdämpfung von A-bewerteten Mitwind-Pegeln. Sie beschränkt sich also von vorneherein auf ‘das Hörbare’ und das bei guten Schallausbreitungsbedingungen. Die ISO 9613 ist nicht übertragbar auf andere Bewertungen oder andere Ausbreitungsbedingungen?!

Wir werden der Versuchung widerstehen,
scheinbar naheliegende, zweckorientierte Vereinfachungen einzuführen.

Wir bleiben auf der physikalischen Seite solange es irgend geht,
weil die hochenergetischen Knalle in vieler Hinsicht
ziemlich besondere Schalle sind, die “acoustical correctness” verdienen.



- ⇒ Einführung
- ⇒  **Waffen**
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung



Waffen und ihre Schalle

schon hier wird es ziemlich undurchsichtig ...



- ⇒ **Mündungsknall**
entsteht durch die überschallige Ausdehnung der Treibladungsgase
- ⇒ **Geschosschall**
entsteht entlang der Flugbahn, oftmals ein Geschosknall von den Teilen der Flugbahn, wo das Geschoss mit lokaler Überschallgeschwindigkeit fliegt
- ⇒ **Explosionsknall**
entsteht durch die Explosion der Wirkladung des Geschosses im Ziel (oder sonstwo), aber auch beim Zünden von Granaten und Bomben u.ä.

Das WinLarm-Modul Weaponer erlaubt einen Einblick in die Vielzahl ziviler und militärischer Waffen



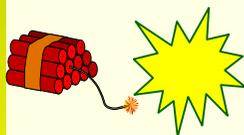
Weaponer



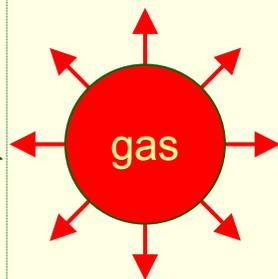
- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 -  Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung



Spreng-
ladungen
erzeugen
bei der
Zündung
zunächst
heiße
Gase.

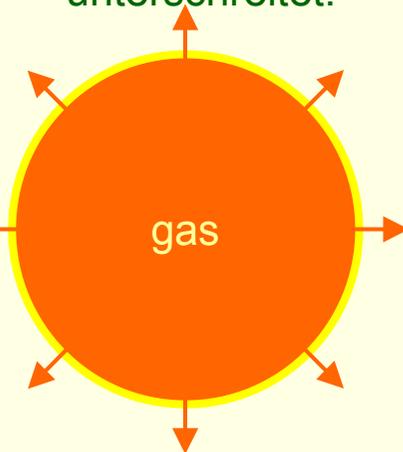


Die Gas-
blase expan-
diert mit
Überschall-
geschwindig-
keit. Es wird
kein Schall
abgestrahlt.



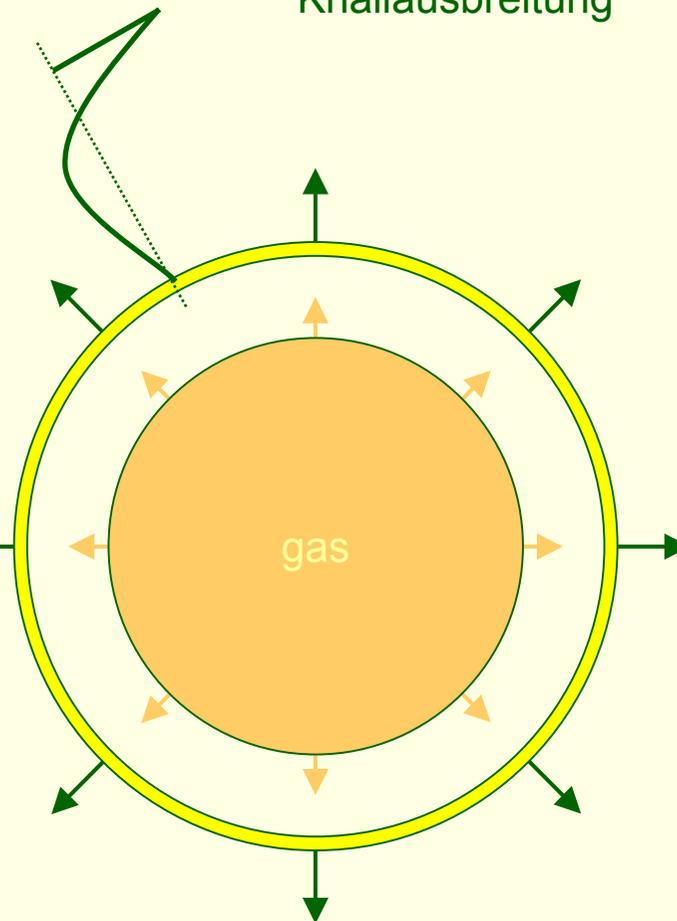
$$V_{\text{gas}} \gg C$$

Der Augenblick,
in dem die Aus-
dehnungsge-
schwindigkeit
die Schallge-
schwindigkeit
unterschreitet.

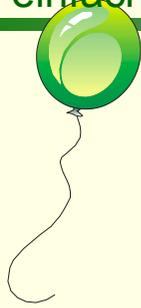


$$V_{\text{gas}} = C$$

Knallausbreitung



$$V_{\text{gas}} < C$$



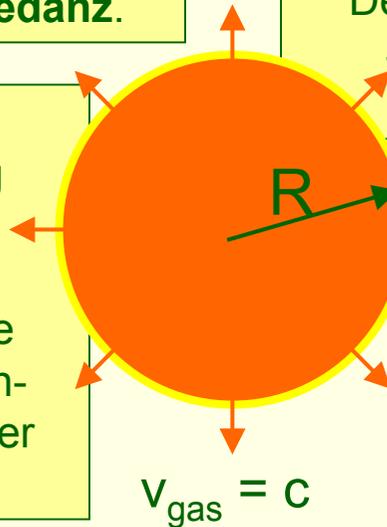
Ein einfaches akustisches Modell

Weber, 1939

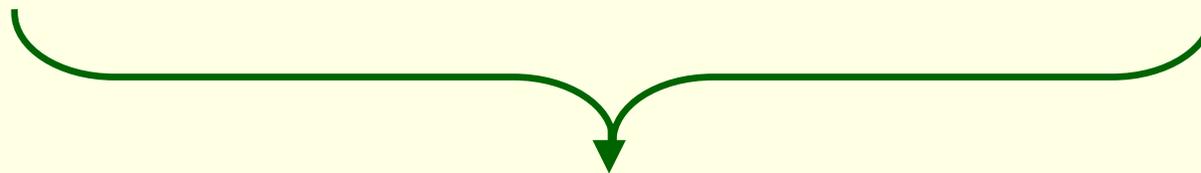
Die Gasblase ist eine Kugel, die sich im Volumenmod ausdehnt. Deshalb kennen wir die **Strahlungsimpedanz**.

Die Ausdehnungsgeschwindigkeit ist gleich der Schallgeschwindigkeit. Deshalb kennen wir die Startbedingung für die **Schallschnelle**.

Die Geometrie ist durch den **Radius** der Kugel vollständig bestimmt. Es gibt also nur einen freien Parameter, der mit der Größe der Sprengladung zusammenhängen wird (eigentlich mit der primären Gasenergie).



Der Schall wird offensichtlich in ruhender Luft unter Normalbedingungen erzeugt. Deshalb machen wir eine einfache Annahme: Es gelten die Gesetze des **idealen Gases**.



Das ist alles, was wir benötigen, um ein Fourier-Spektrum des Knalls abzuleiten.



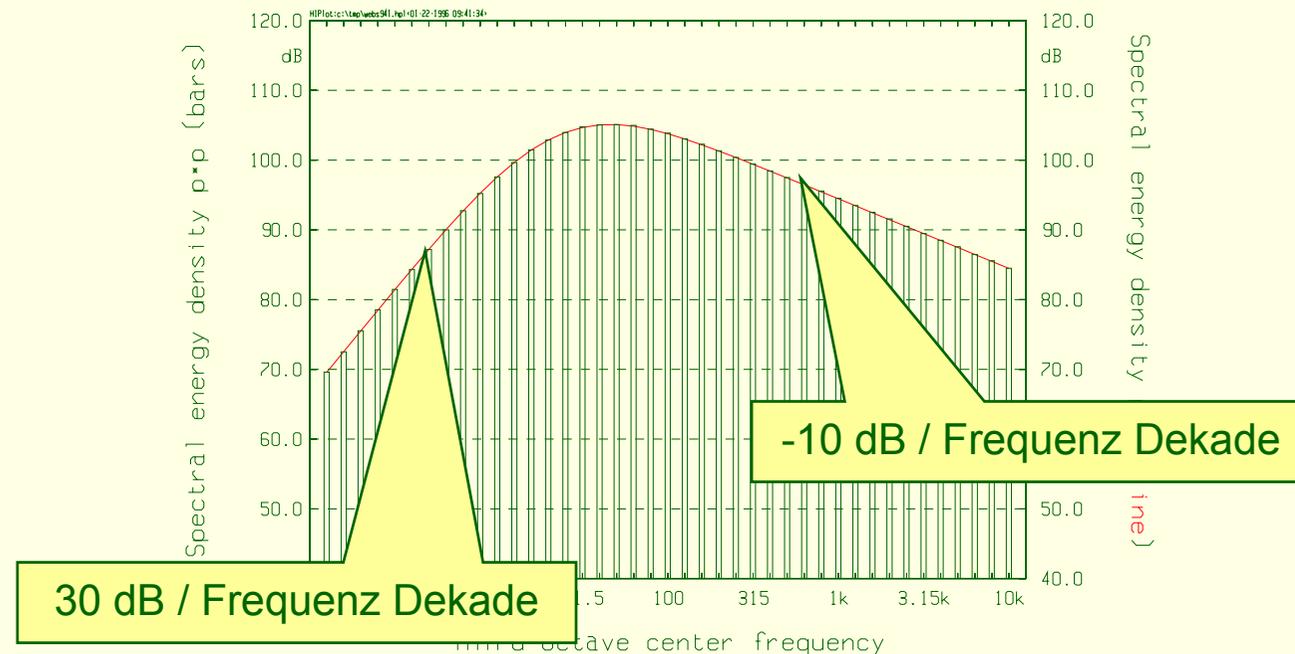
Das Weber Spektrum

veröffentlicht in „Akustische Zeitschrift“ 1939

Weber entwickelte 1939 dieses Modell, um die Knalle von Funkenstrecken zu beschreiben. Wir werden sein Modell für Explosionen anwenden, denn das idealisierte Bild eines Funkenknalls unterscheidet sich in erster Näherung nicht von dem einer Explosion in Luft.

In der Akustik verwendet man Terzspektren statt Fourier-Spektren.

(Das Terzspektrum ist stets nur die halbe Wahrheit und ein weiteres Beispiel für eine akustische Falle, wie oben erwähnt. Aber seien Sie versichert, wir fallen nicht hinein.)





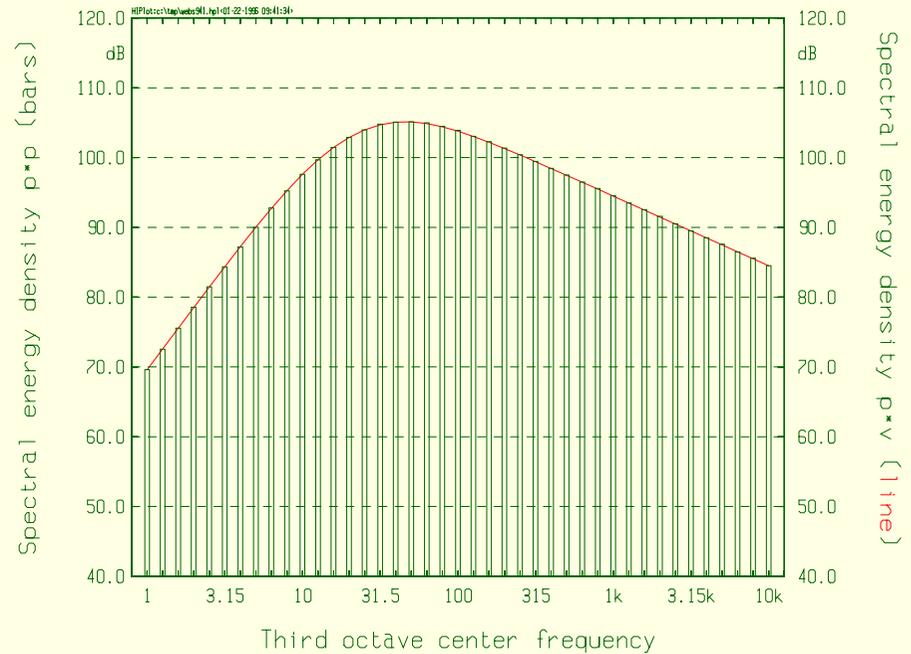
Das Weber Spektrum

veröffentlicht in „Akustische Zeitschrift“ 1939

Weber-Spektrum
$$p(\omega) = \frac{P_W}{\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + j \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \right]$$

$$\alpha = \frac{3c}{R_W} \left[1 + \left(\frac{c}{\omega R_W} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

P_W 14,4 kPa
 R_W Weber-Radius
 ω Kreisfrequenz
 c Schallgeschwindigkeit





Eigenschaften des Weber Modells

nicht vollständige Aufzählung

- ⇒ Eine Verdopplung der Sprengstoffmasse bedeutet eine Verdopplung der primären Energie, erzeugt das doppelte Gasvolumen und vergrößert den Weber-Radius um den Faktor $\sqrt[3]{2}$.
- ⇒ Die Schallschnelle auf der strahlenden Oberfläche der Kugel ist stets c und hängt nicht vom Radius ab. Also hängt auch der Schalldruck dort nicht vom Radius und damit von der Sprengstoffmasse ab (Weber nahm 14,4 kPa an). Deshalb ist die Energieflussdichte auf der Kugel eine Konstante.
- ⇒ Aber die gesamte akustische Energie, die abgestrahlt wird, ist das Integral der Energieflussdichte über die Kugeloberfläche.
- ⇒ Bei gleichem Abstand von der Quelle ist die Schallintensität einer größeren Ladung höher.
- ⇒ Wegen der Strahlungsimpedanz der Kugel wird das Weber-Spektrum für größere Ladungen zu tieferen Frequenzen verschoben.
- ⇒ Die Form des Spektrums bleibt für alle Ladungen erhalten.

50 g TNT Sprengung in 250 m Abstand

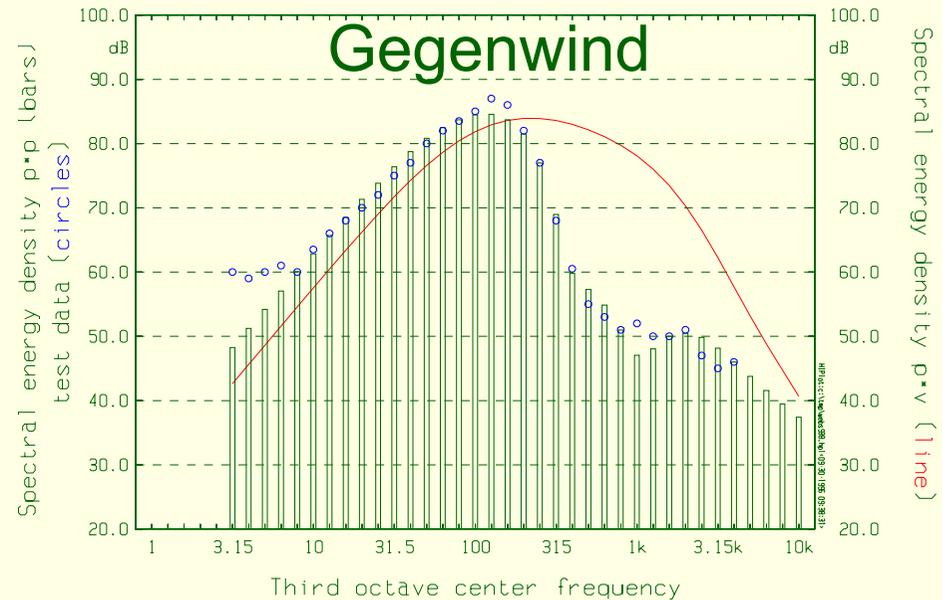
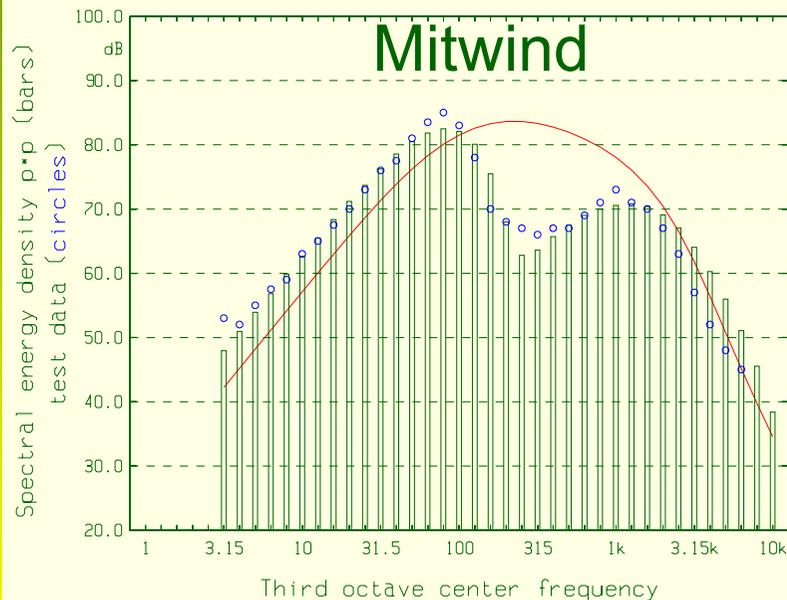
nicht zu klein und nicht zu groß ...



- Die blauen Kreise kennzeichnen das Quadrat des gemessenen Schalldrucks.

- Die rote Linie kennzeichnet das Weberspektrum (korrigiert um die Luftabsorption). Das Weberspektrum ist ein Maß für die akustische Energie am Empfänger.

Übersehen Sie für den Moment die Säulen.



Die 'blauen' Messwerte folgen in keiner Weise der 'roten' Theorie.

Würden wir uns auf A-Pegel beschränken, was wir nicht tun werden, würden wir schließen: das Modell überschätzt die Pegel gewaltig und sagt mit- wie gegenwind den gleichen Pegel voraus:
Das Modell ist also akustisch "ziemlicher Unfug"!



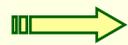
“Acoustical correctness” über männliche und weibliche Messgrößen



Schalldruck kann sich nicht alleine ausbreiten:

Er braucht einen “weiblichen” Partner: die Schallschnelle.

In der EU ist neuerdings verordnet, dass zur ‘politischen Korrektheit’ auch die ‘gender correctness’ gehört und überall beachtet werden muss.



Es gibt keinen Erhaltungssatz für den Schalldruck oder das Quadrat des Schalldrucks oder für die Intensität oder für die Schalleistung. Einen Erhaltungssatz gibt es nur für die akustische Energie.



Wir sollten nicht in die Falle stolpern, dass der sogenannte “energie-äquivalente” Pegel die akustische Energie angibt. Der ist nur ein Maß für die Signalenergie.



Es gibt keine ebenen Wellen dort draußen. Die Bodenreflektion unterscheidet sich signifikant für Kugelwellen!



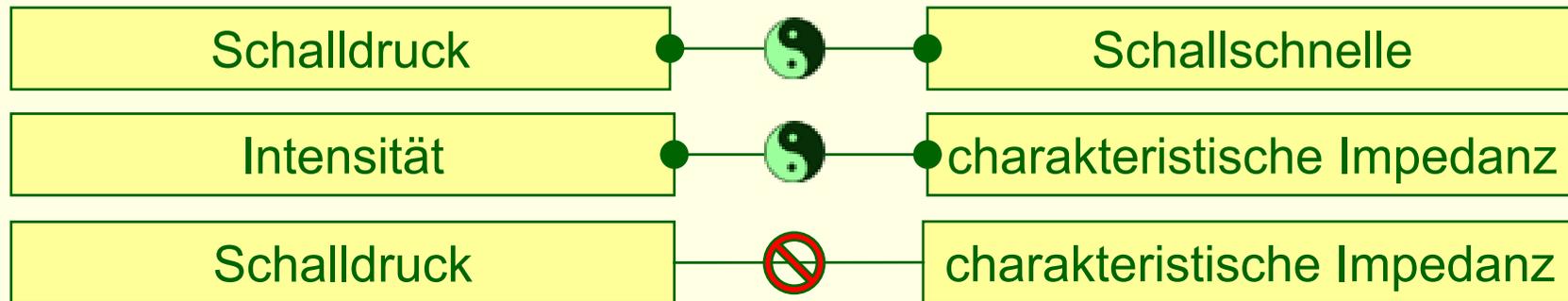
Bei Messungen im Freien gibt es beinahe nie Freifeldbedingungen, weil der Boden immer irgendwie ins Spiel kommt.

“Acoustical correctness”

Folgerungen



- ⇒ Schalldruck ist nur eine Hälfte der akustischen Welt.
- ⇒ Deshalb messen Mikrophone nur die halbe Wahrheit.
(Das gilt leider auch für Bruel & Kjaer Mikrophone :-)
- ⇒ Um eine **akustischen Welle** vollständig zu beschreiben, braucht man zwei ‘gepaarte’ Messgrößen (Observable) an einem Ort, zum Beispiel



- ⇒ Um ein **akustisches Feld** vollständig zu beschreiben, muss man alle Wellen kennen, die den Ort des Empfängers passieren, um die Messwerte an einer bestimmten Stelle zu verstehen.





Wellen am Empfänger

Überlagerung der direkten und der reflektierten Welle

E ist die Energie, die den Empfänger passiert.

$$\text{Energieflussdichte} := \frac{E}{\text{Empfangsfläche}} = \frac{E_d + E_r}{\text{Empfangsfläche}}$$

$$\frac{E_i}{\text{Empfangsfläche}} = \frac{\iint_{\text{Fläche, Ereignis}} p_i \underline{v}_i dA dt}{\text{Empfangsfläche}}, \quad dA \parallel \underline{v}_i$$

beachten Sie, dass

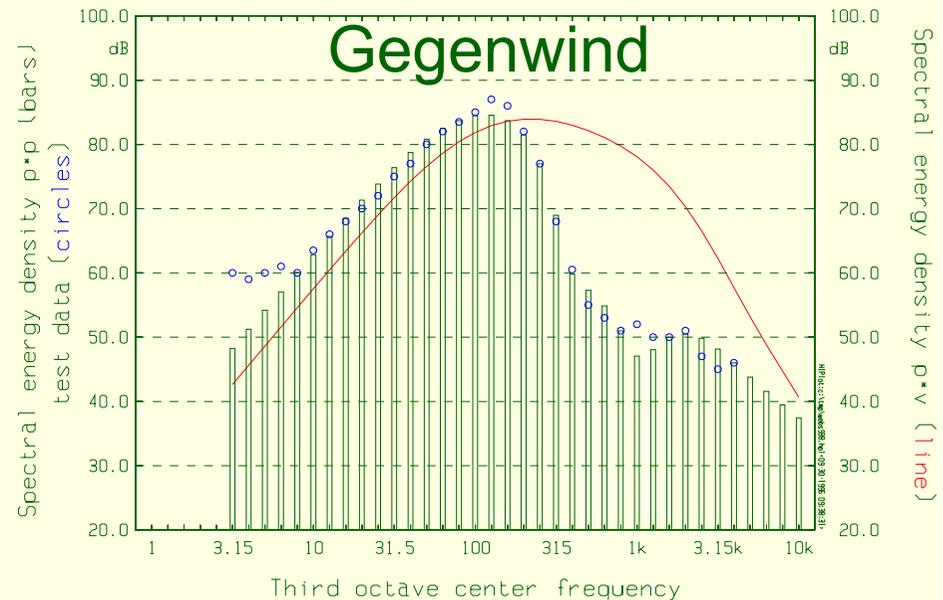
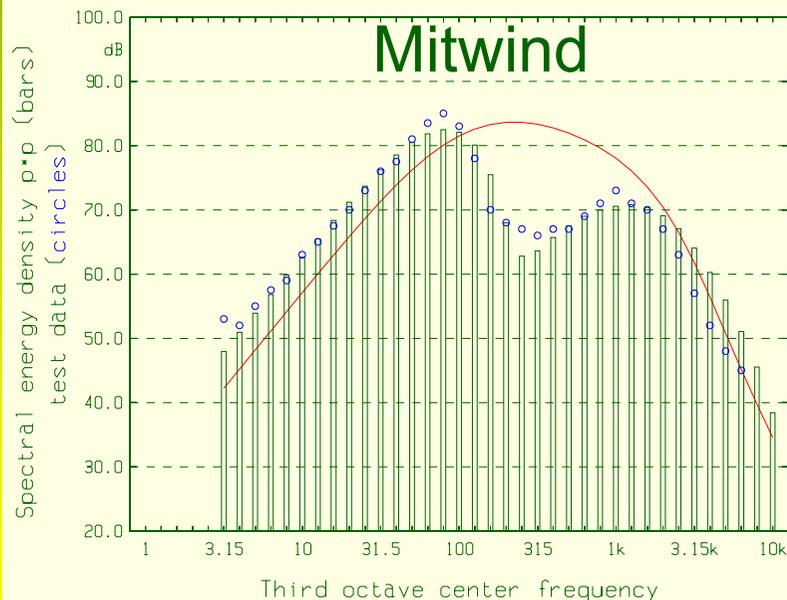
$$\begin{aligned} p &= p_d + p_r \\ \underline{v} &= \underline{v}_d + \underline{v}_r \end{aligned} \Rightarrow \underline{I} = p \underline{v} = (p_d + p_r)(\underline{v}_d + \underline{v}_r), \quad \frac{E}{\text{Empfangsfläche}} \neq \iint_{\text{Fläche, Ereignis}} p_i \underline{v}_i dA dt$$



50 g TNT Sprengung in 250 m Abstand noch einmal

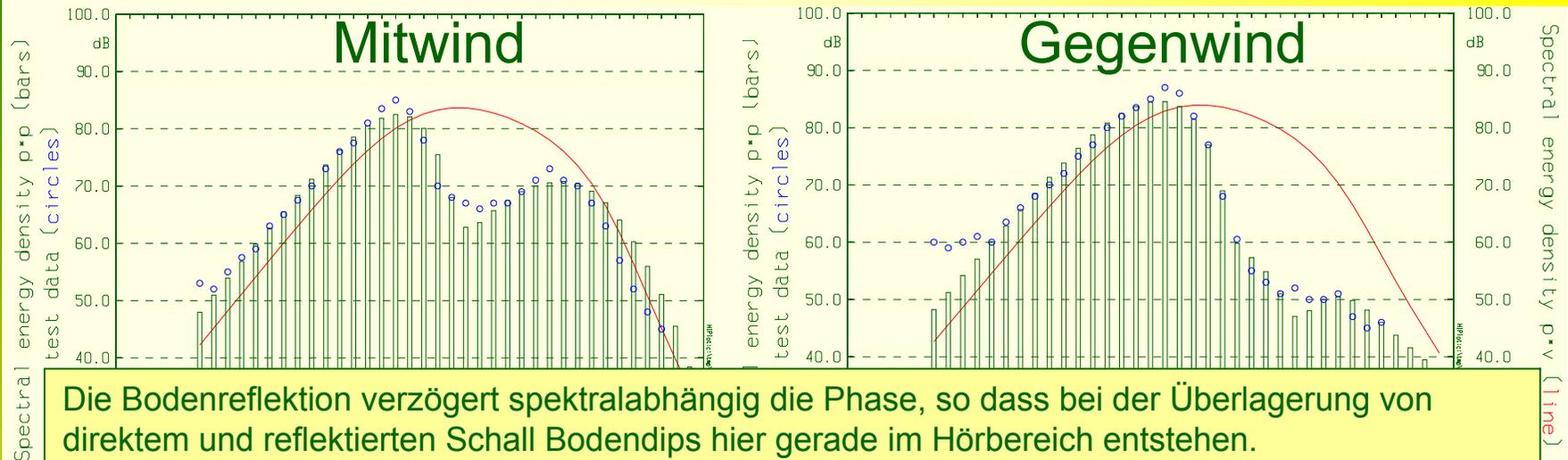


- Die blauen Kreise kennzeichnen das Quadrat des gemessenen Schalldrucks.
- Die Säulen kennzeichnen das Quadrat des Schalldrucks, wenn die Superposition von direkten und dem an der komplexen Bodenimpedanz reflektierten Schall für Kugelwellen berechnet wird.
- Die rote Linie kennzeichnet das Weber-Spektrum (korrigiert um die Luftabsorption). Das Weber-Spektrum ist ein Maß für die akustische Energie am Empfänger.



Das Weber-Modell sagt die Messwerte voraus,
wenn wir "akustisch korrekt" bleiben.

50 g TNT Sprengung in 250 m Abstand und noch einmal



Die Bodenreflektion verzögert spektralabhängig die Phase, so dass bei der Überlagerung von direktem und reflektierten Schall Bodendips hier gerade im Hörbereich entstehen.
Die Energie ist nicht vom Boden "absorbiert", sondern ist in der Schnelle gespeichert.

Die Krümmung der Schallstrahlen infolge von Windschichtungen durch Mit- oder Gegenwindausbreitung ist nicht berücksichtigt, wohl aber die unterschiedlichen Laufzeiten beider Schalle. **Der Schlüsselparameter zur Beschreibung des Bodendips ist aber der Einfallswinkel** bei der Reflexion, denn die Phasenverschiebung ändert sich dramatisch gerade im Bereich flacher Einfallswinkel.

Die Energie am Empfänger ist für Mitwind und Gegenwind gleich groß! (rote Linie)

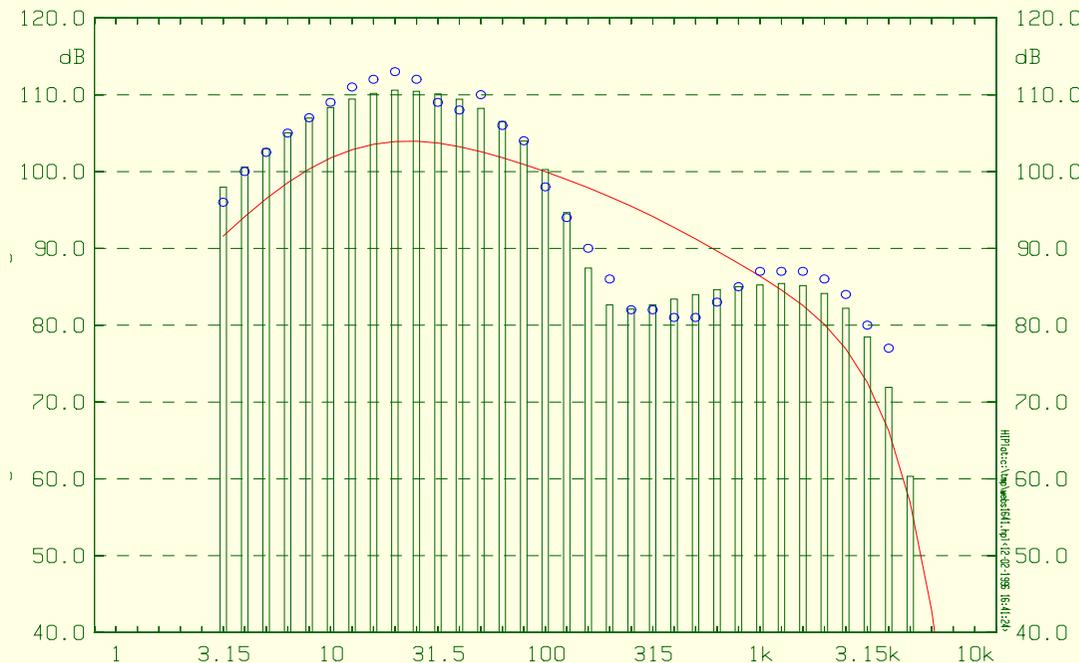
Würden wir uns auf A-Pegel beschränken, was wir nicht tun werden, würden wir schließen, das Weber-Modell prognostiziert das korrekte Quellspektrum, aber seien wir vorsichtig bei der Anwendung der ISO 9613, da könnte "ziemlicher Unfug" herauskommen!



Das Weber-Modell für eine große Explosion

16,5 kg TNT, 825 m Abstand, 1,5 m Messhöhe

- Die blauen Kreise kennzeichnen das Quadrat des gemessenen Schalldrucks.
- Die Säulen kennzeichnen das Quadrat des Schalldrucks, wenn die Superposition von direktem und an der komplexen Bodenimpedanz reflektierten Schall für Kugelwellen berechnet wird.
- Die rote Linie kennzeichnet das Weber-Spektrum (korrigiert um die Luftabsorption). Das Weber-Spektrum ist ein Maß für die akustische Energie am Empfänger.



Das einfache Modell beschreibt nicht nur Knalle kleiner Explosionen, sondern auch die von großen Sprengungen.

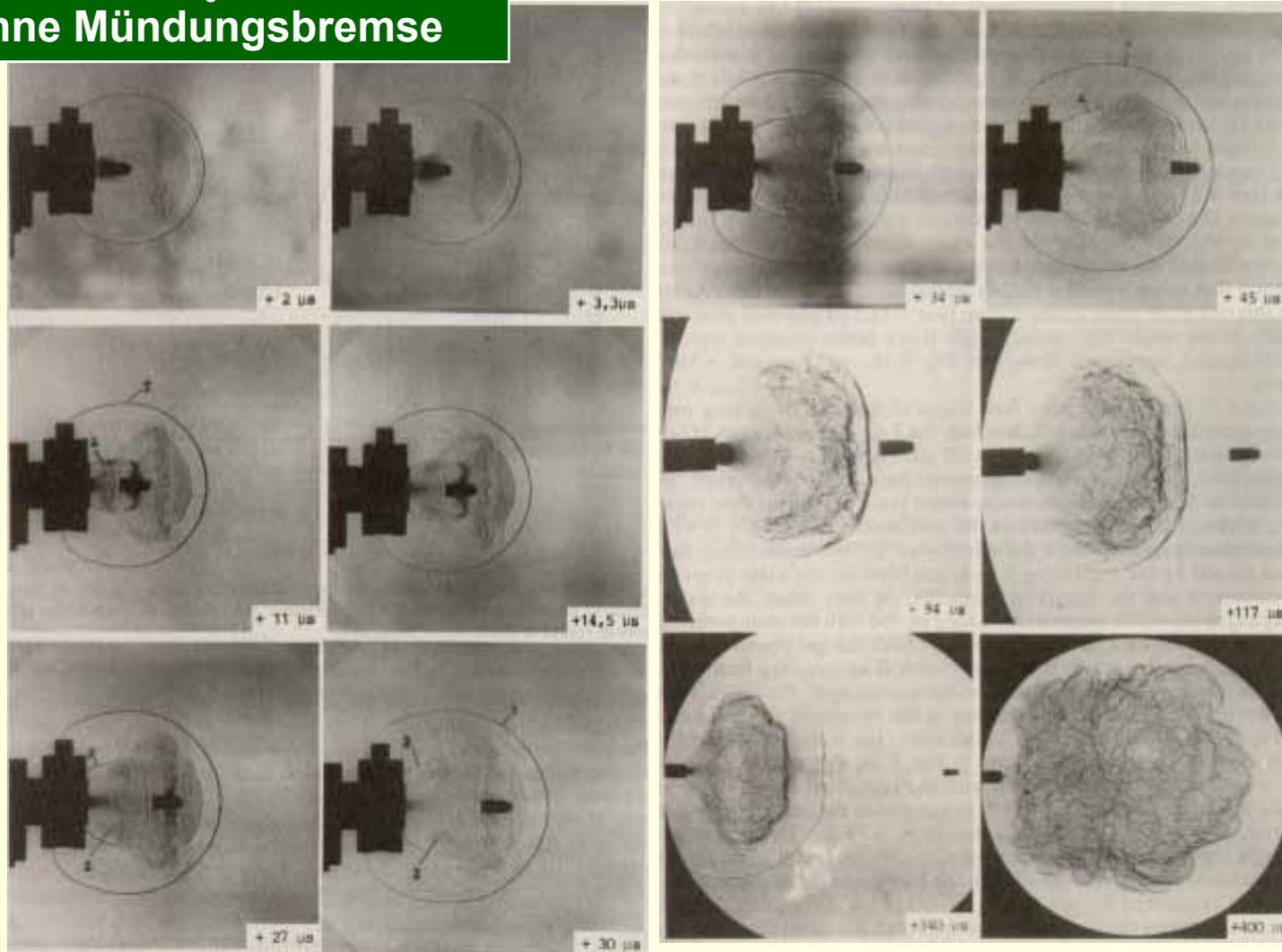


- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 -  Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung



G3 Mündungsknall
cal. 7.62, $v_0 = 780$ m/s
ohne Mündungsbremse

Schauen Sie genau hin
und behalten Sie Ihr Lächeln ...

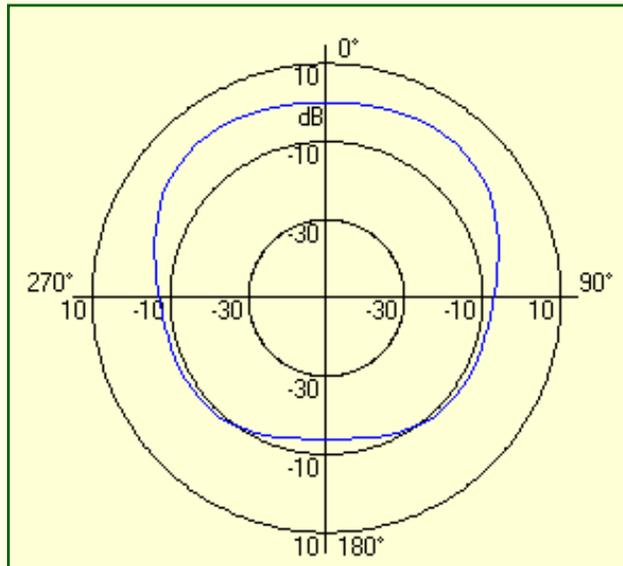


From „Gun Muzzle Blast and Flash“, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 139



Richtcharakteristik

105 mm Kanone



- ⇒ Der Mündungsknall ist stark gerichtet.
- ⇒ Grobe Regel:
Je länger der Lauf, um so stärker (bei gleichem Kaliber).
- ⇒ Die Pegel hinter der Waffe können 20 dB niedriger sein als in Schussrichtung.

Alle Modelle zur Prognose von Schießlärm müssen sorgfältig die Schießrichtung im Vergleich zur Richtung vom Quellort zum Empfangsort berücksichtigen und die Richtcharakteristik beachten.

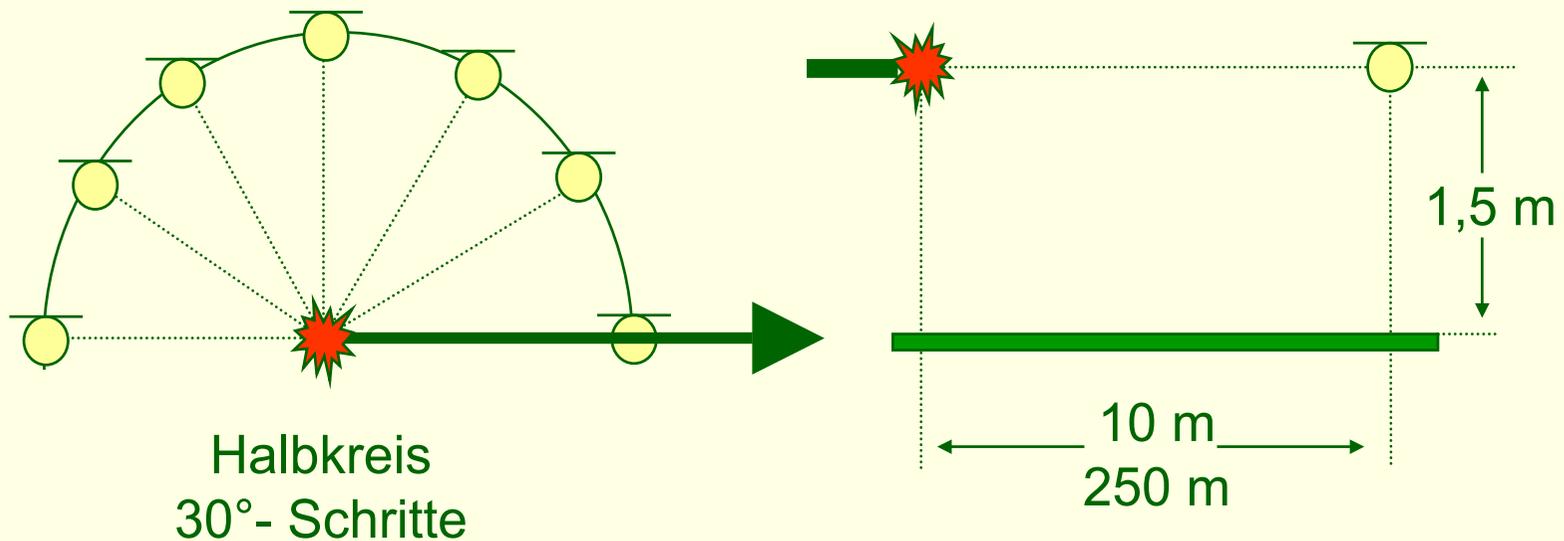
Messung nach dem Entwurf der ISO 17201

eine Rotationssymmetrie um den Lauf wird vorausgesetzt



Typischer Aufbau für eine Quellmessung:

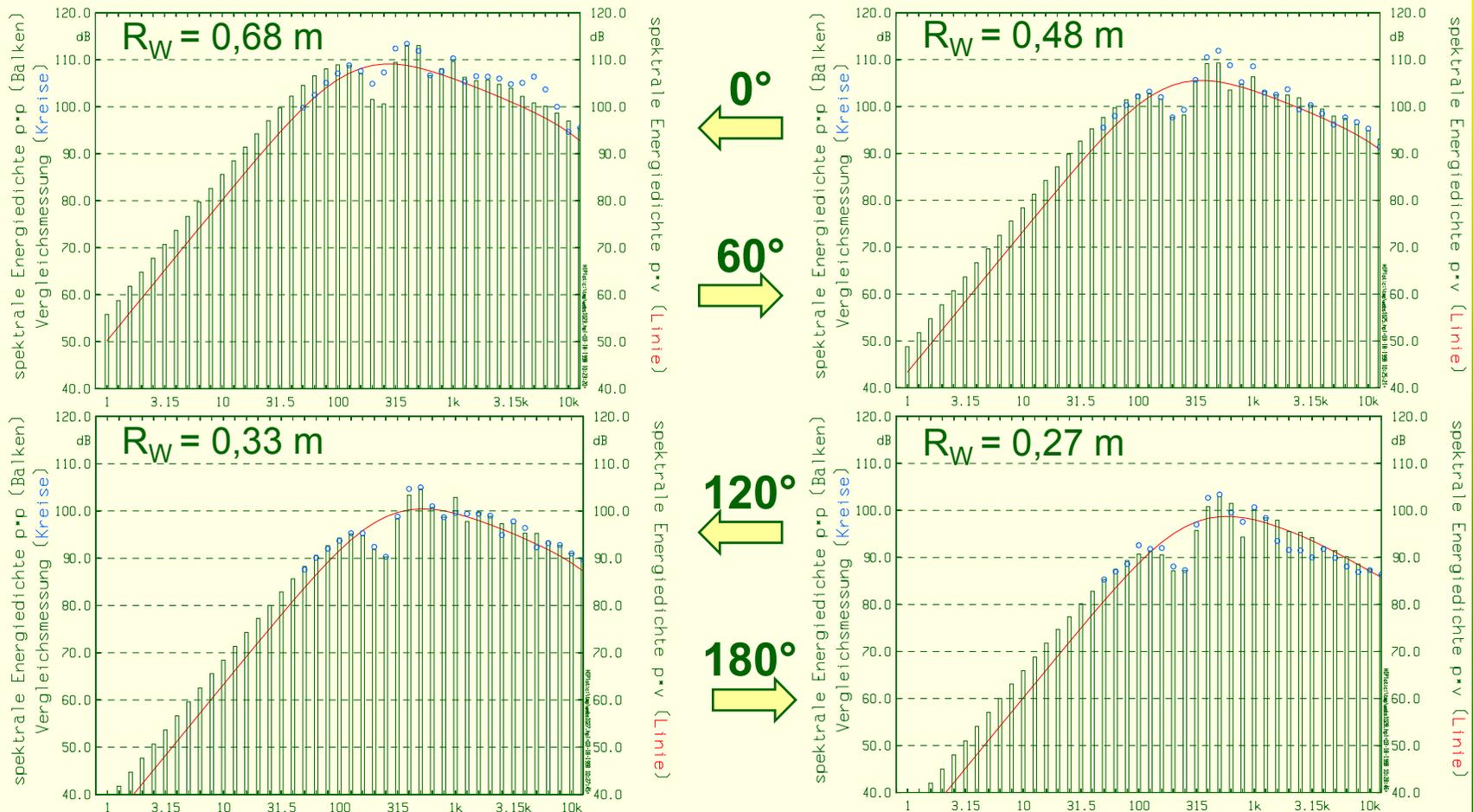
- für kleine Waffen, Radius 10 m
- für große Waffen, Radius 250 m
- ebene, grasbewachsene Fläche ohne Hindernisse



Das Weber-Modell und die Richtcharakteristik

das ist so schlecht nicht...

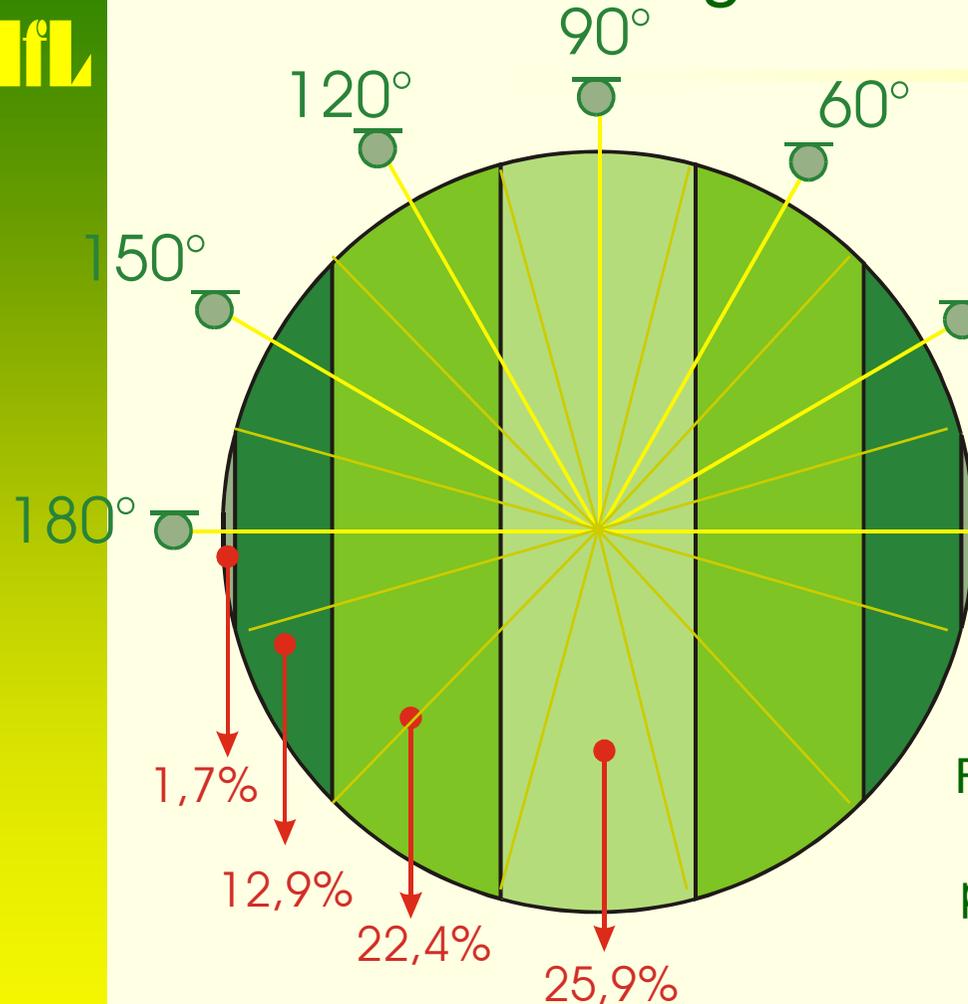
Obwohl die Gaswolke sicher keine Kugel ist, scheint der gerichtete Mündungsknall von Kugeln mit richtungsabhängigem Radius zu stammen.



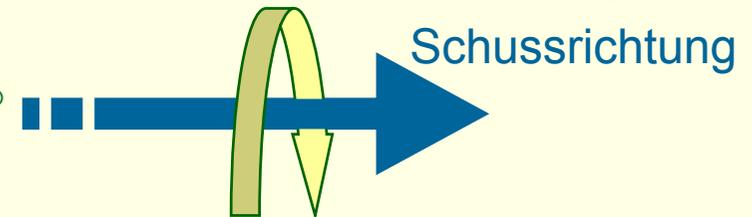
Spektren einer Winchester .300, Abstand 7,8 m, Quell- und Mikrofonhöhe 1,5 m

Berechnung der akustischen Gesamtenergie

nicht alle Winkel haben das gleiche Gewicht



Die Messungen unter den verschiedenen Winkeln repräsentieren die Energieflussdichte durch Kugelscheiben mit unterschiedlichem Flächenbeitrag.



Rotationssymmetrie um die Schussrichtung

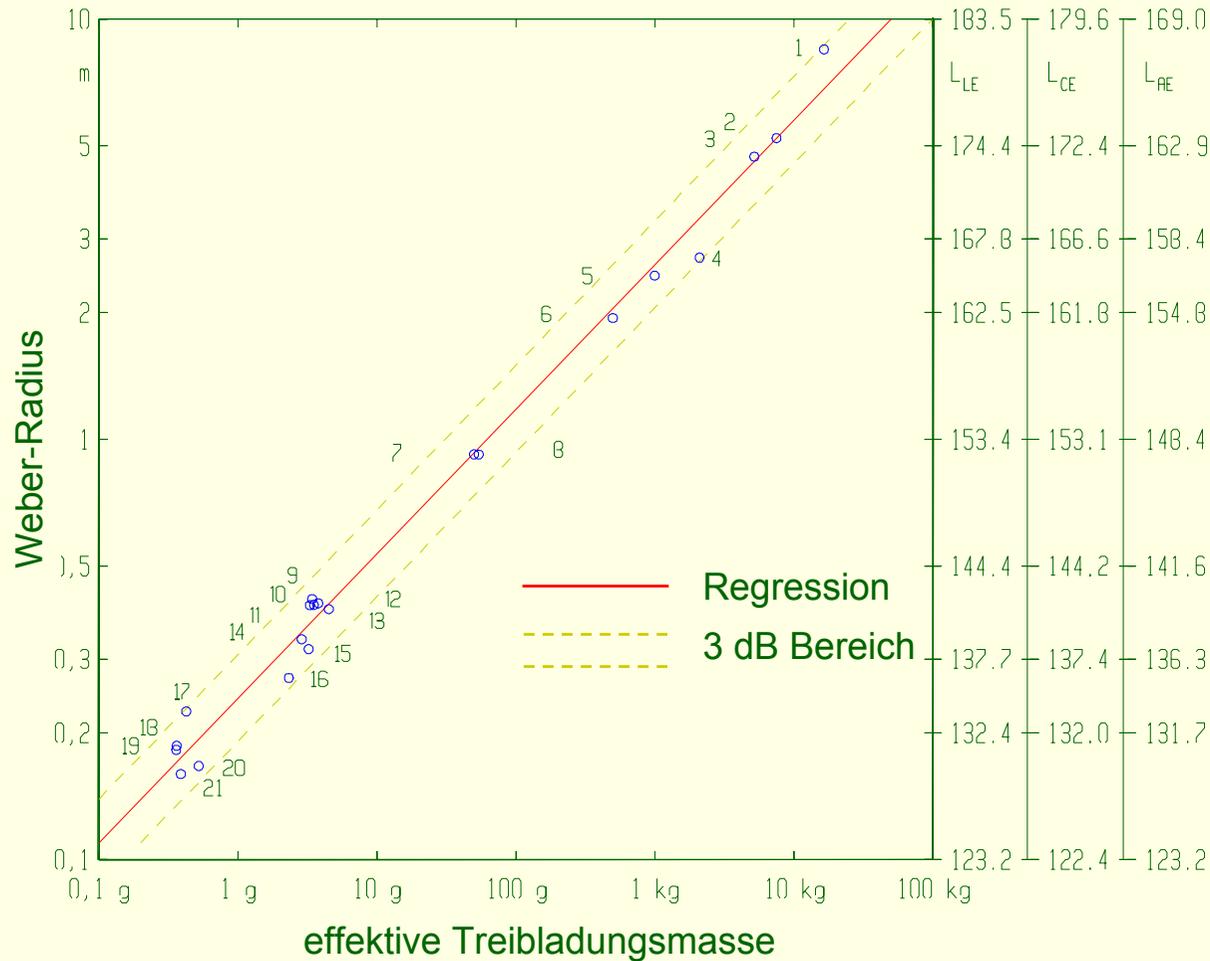
Flächenabhängige Gewichtungsfaktoren korrigieren die Beiträge von den Messpositionen in unterschiedlichen Winkeln.

Diese Gewichtung wurde oftmals nicht beachtet, wenn man versuchte, die Schallenergie mit der Treibladungsenergie zu korrelieren.



Weber-Radius gegen Treibladungsmasse

effektive Masse für Haubitzen, Kanonen und Gewehre



- 1 = 16,5 kg TNT Sprengung
- 2 = 120 mm KPz Leopard 2
- 3 = 105 mm KPz Leopard 1
- 4 = 155 mm Haubitze (5GB)
- 5 = 1 kg TNT Sprengung
- 6 = 500 g PETN Sprengung
- 7 = DM54 Sprengung
- 8 = 20 mm SPz Marder
- 9 = .300 Winch. Hohlspitz
- 10 = .300 Winch. Vollmantel
- 11 = Mauser SR93 Gewehr
- 12 = .300 Mag. Gewehr
- 13 = 6,5x68 Gewehr
- 14 = PSG 1 Gewehr
- 15 = .243 Winch. Gewehr
- 16 = 5,6x50 Gewehr
- 17 = Pistole SIG
- 18 = Pistole P1
- 19 = 9 mm Signalpistole
- 20 = M-Pistole MP5
- 21 = .22 Hornet Gewehr

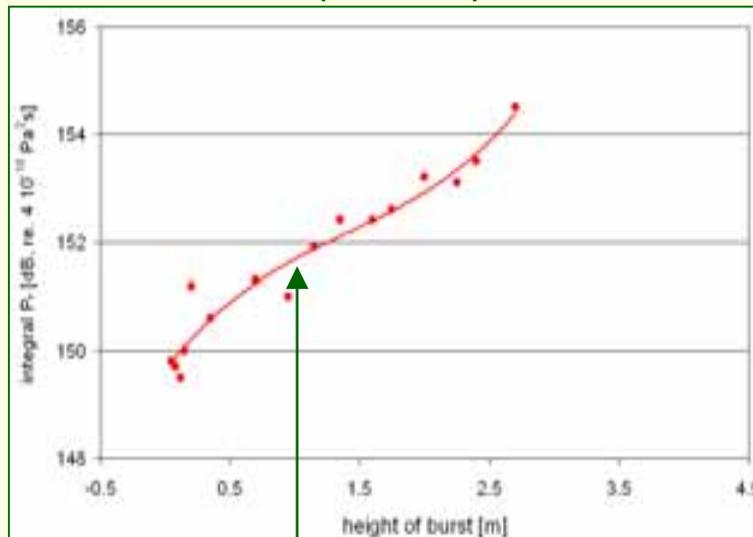


Nicht-lineare Energieeffekte

äquivalenter Pegel in 1 m Höhe und 1 m Abstand

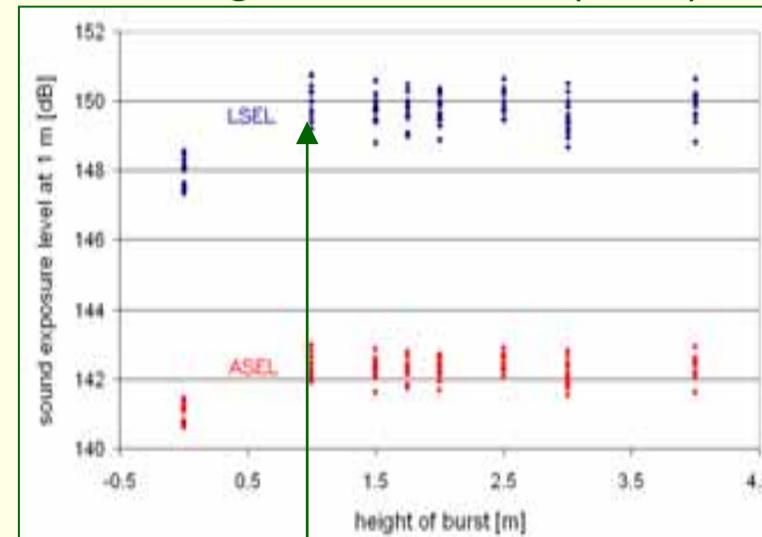
Die Messwerte für 1 m Sprenghöhe stimmen sehr gut überein.

Laborwerte (PETN)



151,8 dB

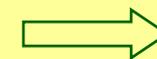
Messungen im Freien (TNT)



150,0 dB

spezifische Energie von TNT 4310 J/g

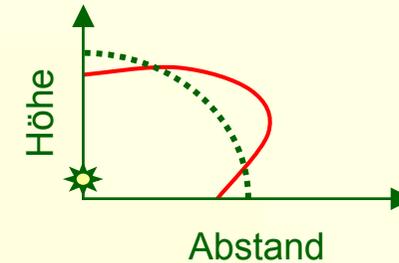
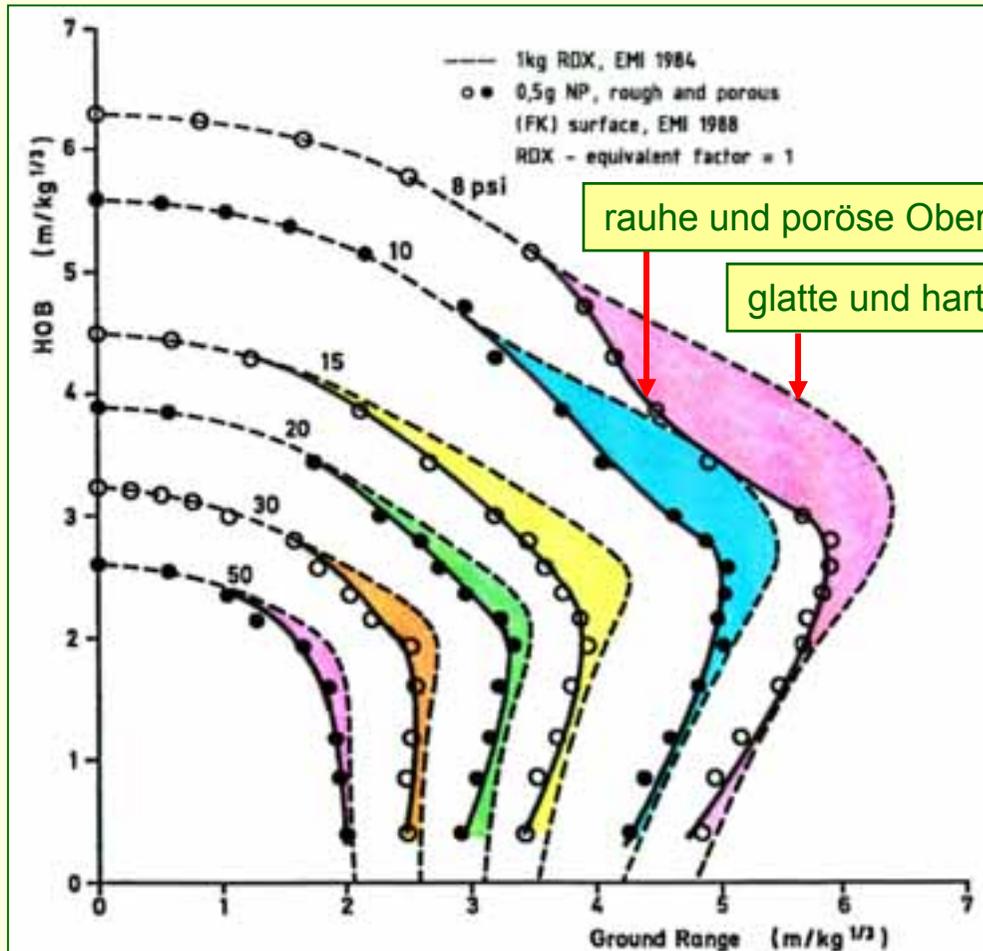
spezifische Energie von PETN 5860 J/g



1,3 dB

Bei Explosionen über Gras geschieht nichts

die Bodeneigenschaften bestimmen den ‚Height of Burst Gain‘



rauhe und poröse Oberfläche

glatte und harte Oberfläche

Der Einfluss des Bodens ist signifikant, insbesondere dort im Schalldruckfeld, wo die Verstärkung stark war über weicheren und rauhen Oberflächen.



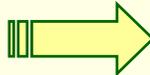
Weber-Modell

eine einfache Beschreibung für Mündungsknalle und Sprengungen

Das Weber-Modell

- ⇒ ist ein einfaches Modell mit nur einem freien Parameter, dem Weber-Radius.
- ⇒ prognostiziert hinreichend zuverlässig die Signale für Mündungsknall und Explosionen.
- ⇒ stellt ein Fourier-Spektrum zur Verfügung. Daraus können alle akustischen Messgrößen (frequenzbewertet und/oder zeitbewertet) abgeleitet werden.
- ⇒ ist für die Lärmprognose gut genug.
(Ups, wir schauen auf die andere lärmakustische Seite. Aber an dieser Stelle sei dies erlaubt.)

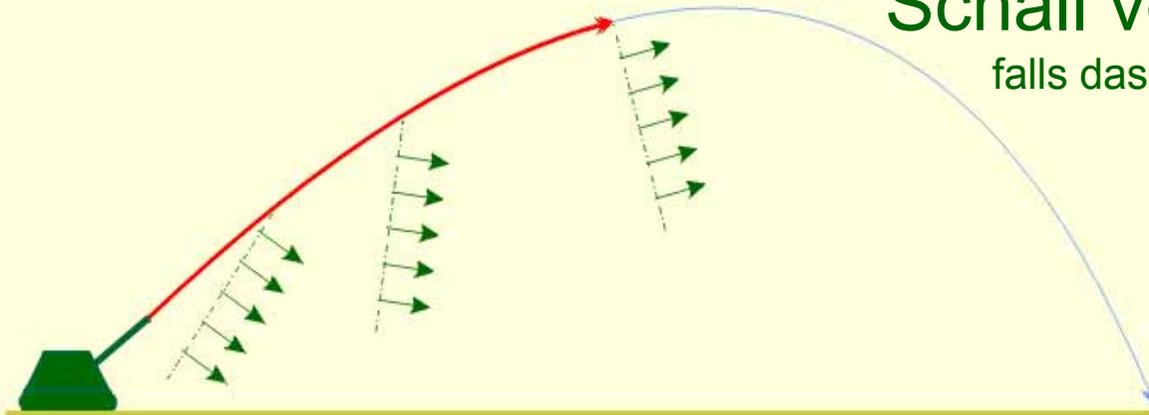


- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ⇒  Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung



Schall von der Flugbahn

falls das Geschoss überschallig fliegt

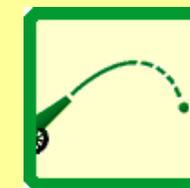


Geschossknalle von ballistischen Flugbahnen scheinen komplex zu sein. Und in der Tat, das ist schon eine Herausforderung.

Die WinLarm Suite hält ein kleines Hilfsprogramm bereit, den so genannten ‚Shooter‘, um das erste Problem aufzuzeigen: **die Flugbahn selbst.**

Der ‚Shooter‘ berechnet alle notwendigen Parameter der Flugbahn, einschließlich der lokalen Geschwindigkeit, Anstellwinkel und den Energieverlust pro Meter.

WinLarm's kleines Hilfsprogramm, um die Flugbahnen zu berechnen



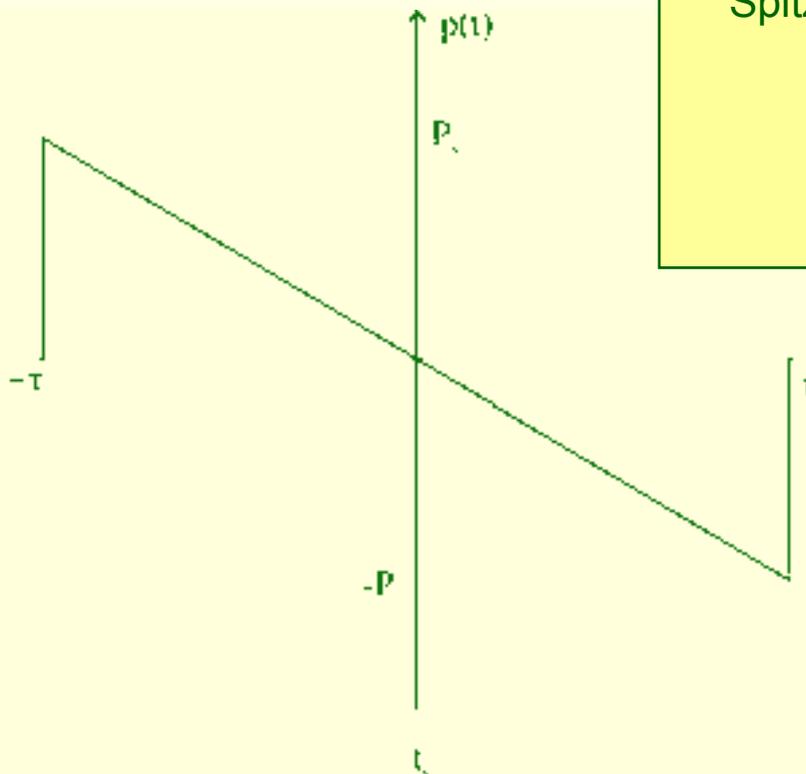
Shooter



Nicht-akustisches Modell

(Witham, 1952 - 1953)

Die Signalform des Geschossknalls ist eine sogenannte N-Welle.



$$\text{Spitzendruck } P_c(O) = 0,53 P_{atm} \frac{(M^2 - 1)^{1/8}}{O^{3/4}} \left[\frac{d}{l^{1/4}} \right]$$

$$\text{Dauer } t_c(O) = \frac{1.82}{c_0} \frac{M}{(M^2 - 1)^{3/8}} O^{1/4} \left[\frac{d}{l^{1/4}} \right]$$

P_c	Spitzendruck
P_{atm}	Umgebungsdruck
O	rechtwinkliger Abstand zur Flugbahn
M	Machzahl
d	Geschossdurchmesser
l	Geschosslänge
c_0	Schallgeschwindigkeit



Das Modell ist in ISO 17201, Teil 4 (Entwurf) definiert.

Quellpegel

$$L_E^D(r) = L_0 + 10 \lg \left(\frac{d_b^3}{l_b^{3/4} r_0^{9/4}} \right) + 10 \lg \left(\frac{M^{9/4}}{(M^2 - 1)^{3/4}} \right) - A_{nlin} - A_{geo}$$

Nicht-Linearitätskorrektur

$$A_{nlin} = 5 \lg \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{(M^2 - 1)}{r_0 k}} \ln \left(\frac{r + \frac{M^2 - 1}{2k} + \sqrt{r^2 + r \cdot \frac{(M^2 - 1)}{k}}}{r_0 + \frac{M^2 - 1}{2k} + \sqrt{r_0^2 + r_0 \cdot \frac{(M^2 - 1)}{k}}} \right) \right)$$

geometrische Dämpfung

$$A_{geo} = 10 \lg \frac{r^2 k + r(M^2 - 1)}{r_0^2 k + r_0(M^2 - 1)}$$



Müssen wir das wirklich anwenden...

oder gibt es einen einfacheren Weg, ein Weber-Modell des Geschossknalls o.ä.?

Einschränkungen des Schalldruckmodells

- ⇒ Das Modell behandelt nur gerade Flugbahnen.
- ⇒ Das Modell kann Übergänge in den Unterschall-Bereich nicht beschreiben.

Wenn man bedenkt, dass bei Haubitzenschüssen die Geschwindigkeit stets am Ende unterschallig wird, müssen wir ballistische Flugbahnen mit dem Übergang beschreiben können.

Können wir ein einfacheres Modell benutzen?

Können wir ein Modell nach dem Energiekonzept anstelle eines Schalldruckmodells ableiten, ohne die “acoustical correctness” zu verletzen?

Ja, das geht!

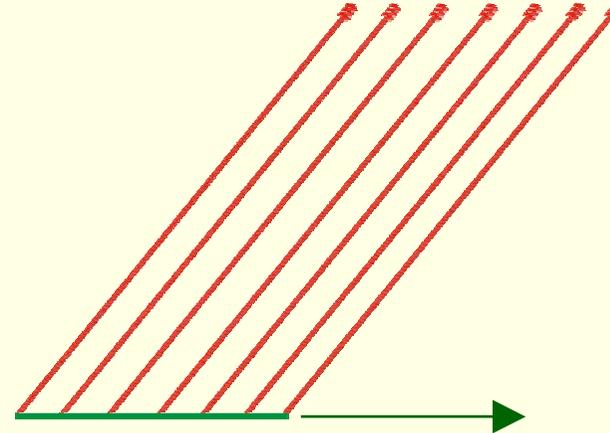


Unzutreffende Allgemeinplätze

Falsche Bilder führen zu falschen Modellen

Unwahr ist,

⇒ dass das Geschossknallfeld eines Gewehrschusses im einfachsten Falle so aussieht:



⇒ dass für den Geschossknall $1/r$ oder $10 \lg(r/r_0)$ gilt.
Gilt aber für Raketen näherungsweise.

⇒ dass Abweichungen von $1/r$ bzw. $10 \lg(r/r_0)$ auf nicht-lineare Effekte zurückgehen.

⇒ dass Pistolen und Flinten (Schrot) keinen Geschossknall erzeugen.

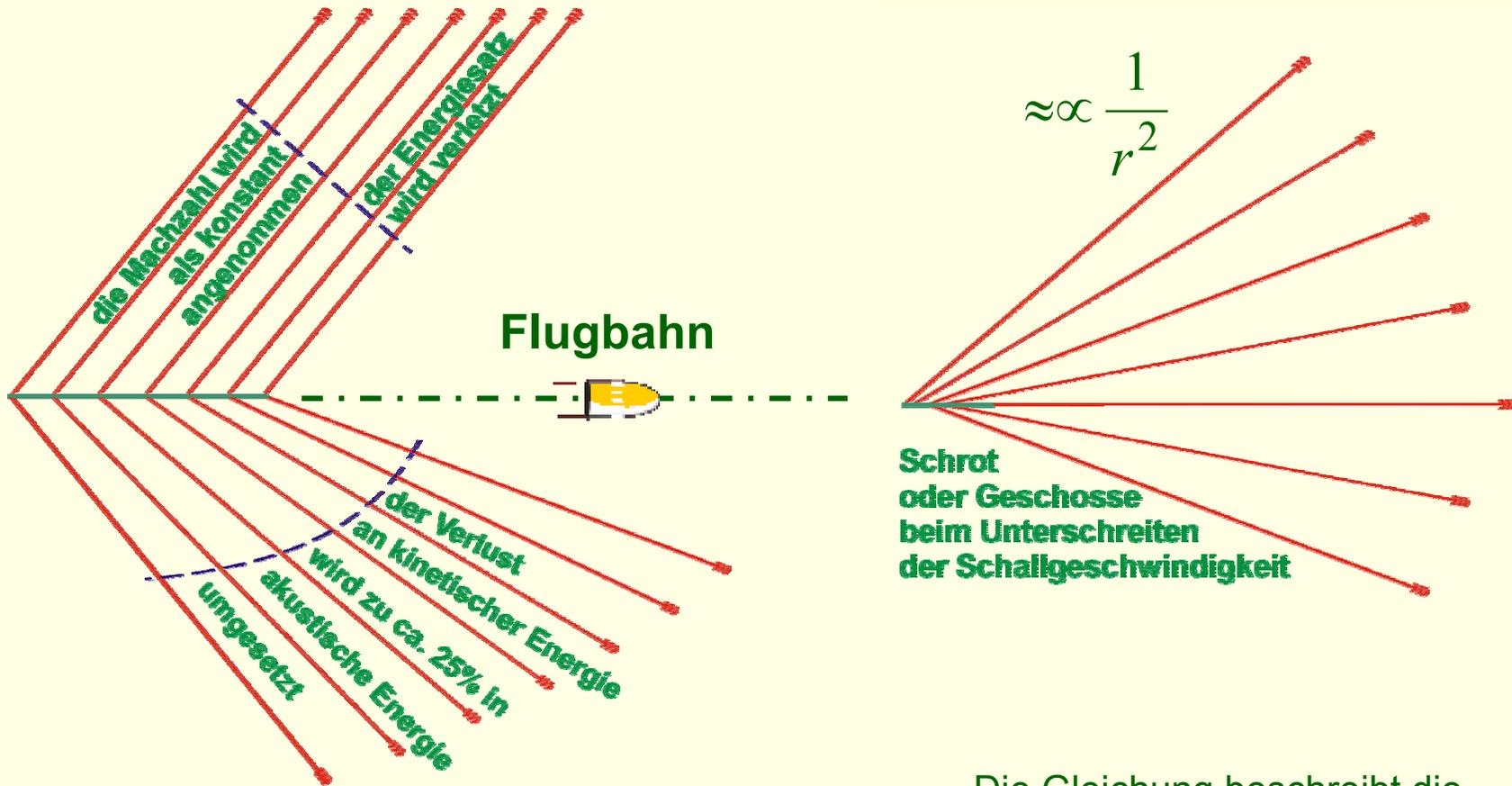
⇒ dass Pegel von rasanten Geschossen höher sind als Pegel von langsamen Geschossen.

⇒ dass Geschossknall nie in Schussrichtung auftreten kann.



Die Energie des Geschosknalls

von ballistischen Flugbahnen



$$2\pi l^2 \left[\sin^2 \theta_S \left(\frac{\cos \theta_S}{2} + \frac{r_S}{l} \right) + \frac{r_S^2}{l^2} \sin \left(\theta_S - \frac{\varepsilon_S}{2} \right) \sin \varepsilon_S \right]$$

Die Gleichung beschreibt die geometrische Ausbreitungsdämpfung.

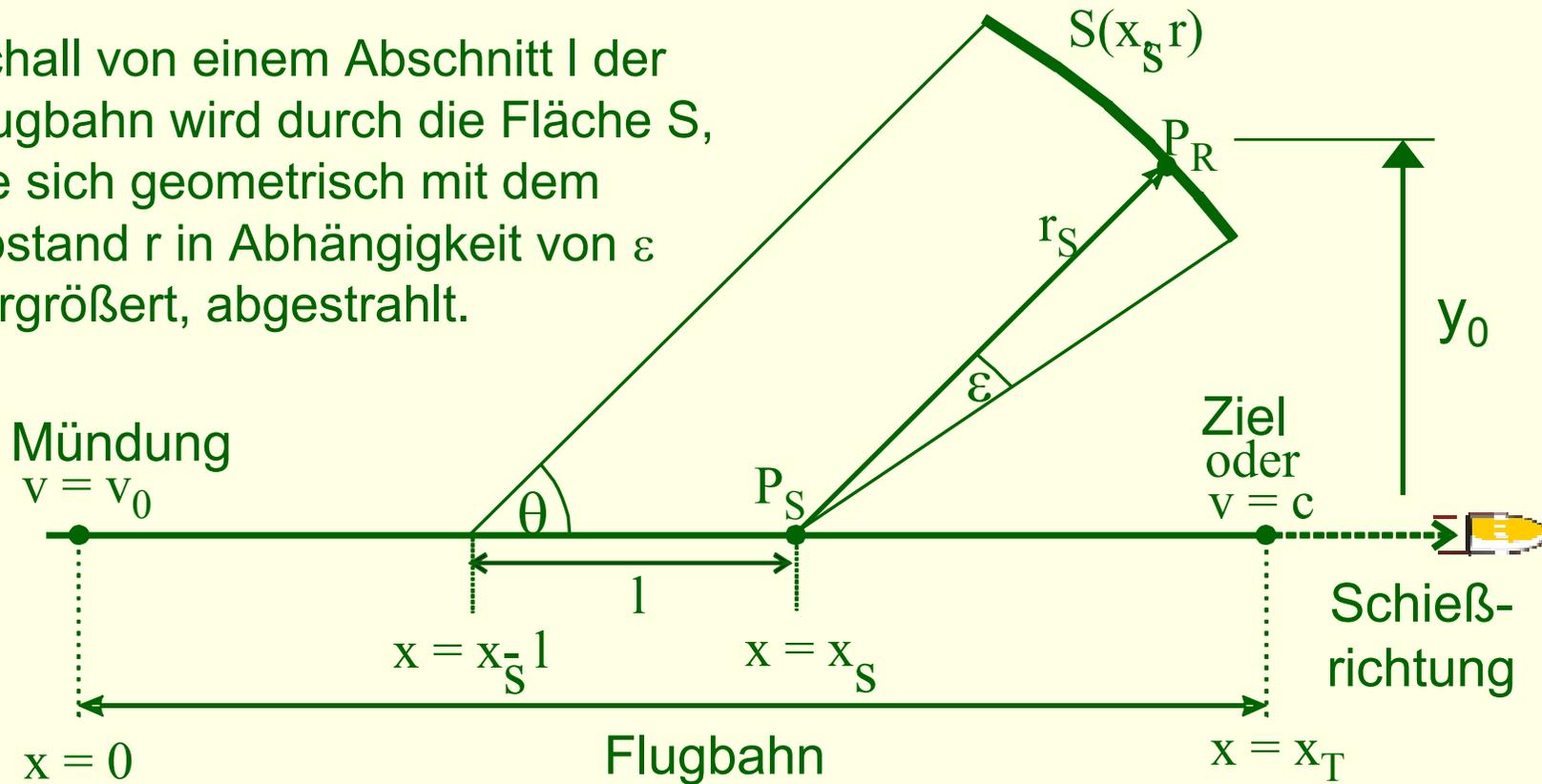
(Einfacher geht es leider nicht.)



Die Geometrie

so ist es halt ...

Schall von einem Abschnitt I der Flugbahn wird durch die Fläche S , die sich geometrisch mit dem Abstand r in Abhängigkeit von ε vergrößert, abgestrahlt.



$$(x_0 - x_S)^2 (v_0 + \kappa x_S + c)(v_0 + \kappa x_S - c) = c^2 y_0^2$$

$$x < x_S < x_0 \quad \text{and} \quad x_S < \left| \frac{c - v_0}{\kappa} \right|$$



Dieses Modell ist in ISO 17201, Teil 2 (Entwurf) definiert.

$$L_E^E(r_S) = 10 \lg \left[\frac{\rho c}{p_0^2} \left[2\pi l^2 \sin^2 \theta_S \left(\frac{\cos \theta_S}{2} + \frac{r_S}{l} \right) + \frac{r_S^2}{l^2} \sin \left(\theta_S - \frac{\varepsilon_S}{2} \right) \sin \varepsilon_S \right] f_{ac} e l \right]$$

kinetischer Energieverlust entlang des Abschnitts I der Flugbahn

akustischer Wirkungsgrad $\approx 0,25$

f_{ac} $e l$

geometrische Ausbreitungsdämpfung

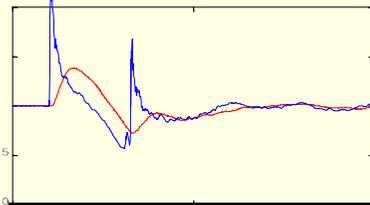
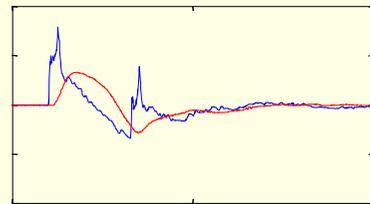
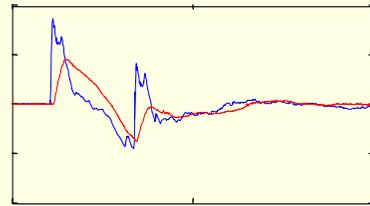
θ_S ist 90° minus Machwinkel zu Beginn des Abschnitts I

ε_S ist die Differenz zwischen dem Machwinkel zu Beginn und zum Ende des Abschnitts



Geschossknall eines Haubitzenschusses

gemessen 5 m über dem Boden und auf dem Boden



4 ms

Schalldruckzeitverlauf



331 Hz

1 kHz

80 dB

Terzspektrum

Flugbahnhöhe 8 m am Quellpunkt, Messhöhe: 5 m (blau), auf dem Boden (rot),
Machzahl = 1,51, Ausbreitungsweg 100 m, Gegenwindbedingungen



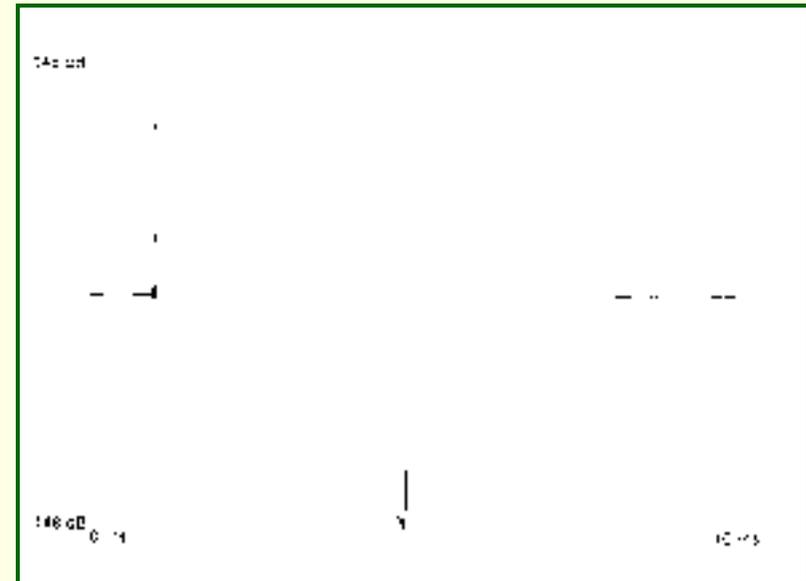
Messsignale auf dem Boden

"acoustical correctness" verhilft wieder zum Verständnis

gemessenes Schalldrucksignal



berechnetes Schalldrucksignal



Bei der Berechnung wird das direkte und das am Boden reflektierte Signal überlagert.

Weil es sich um eine zylindrische Wellenfront handelt, wird bei der Bodenreflektion die Kugelwellenreflektion und eine angepasste komplexe Bodenimpedanz verwendet.

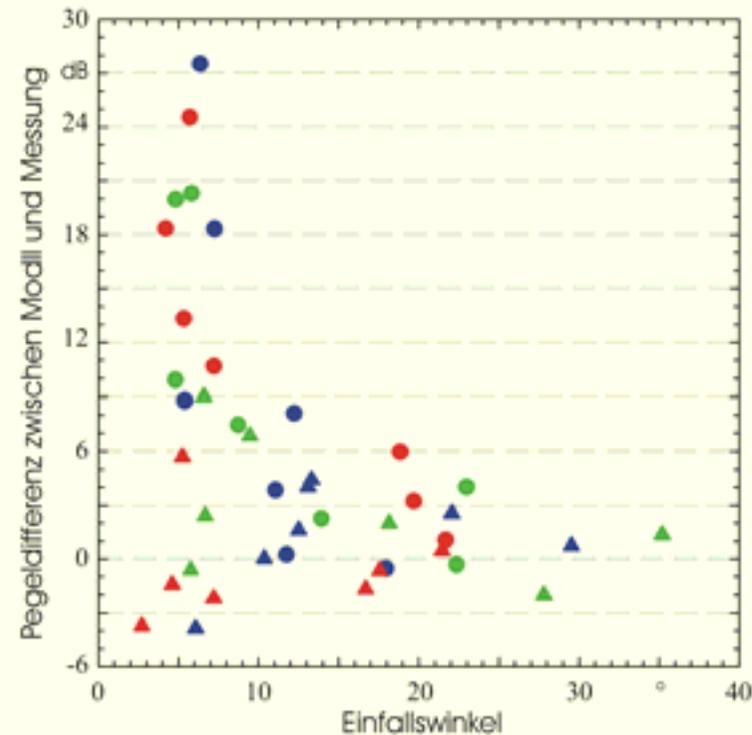
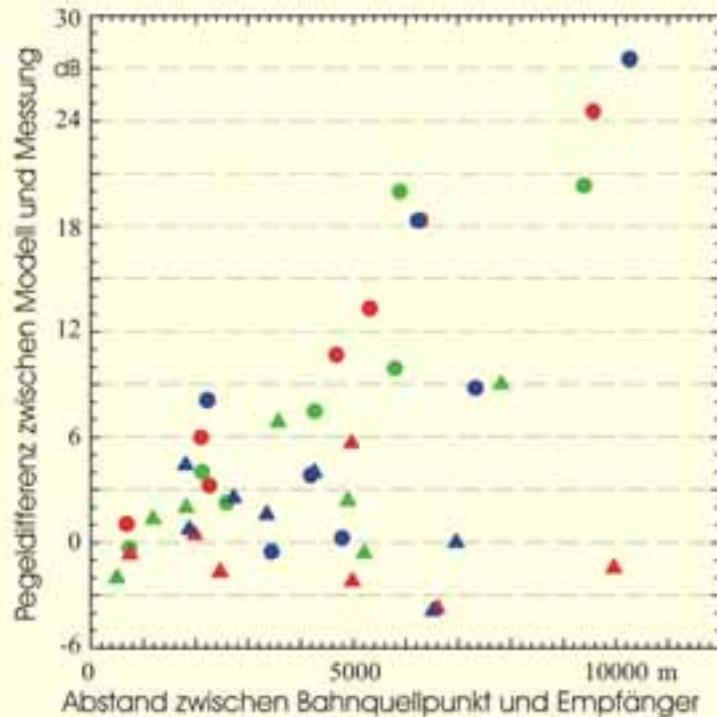
Messung und Rechnung stimmen überein,
wenn eine N-Welle als Signalform angenommen wird.





Validierung im Feld

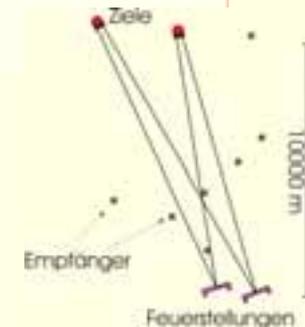
noch nicht gesicherte Erkenntnisse



Das Modell berücksichtigt noch keine Bodenreflektion.

Es ist offensichtlich, dass die Streuung mit der Laufstrecke zunimmt.

Es ist aber auch offensichtlich, dass das Modell für größere Einfallswinkel deutlich näher liegt.





⇒ Einführung

⇒ Waffen

⇒ Knallquellen

↳ Explosion in Luft

↳ Mündungsknall

↳ Geschossknall

 **Ausbreitung über große Entfernungen**

⇒ Knalle am Empfangsort

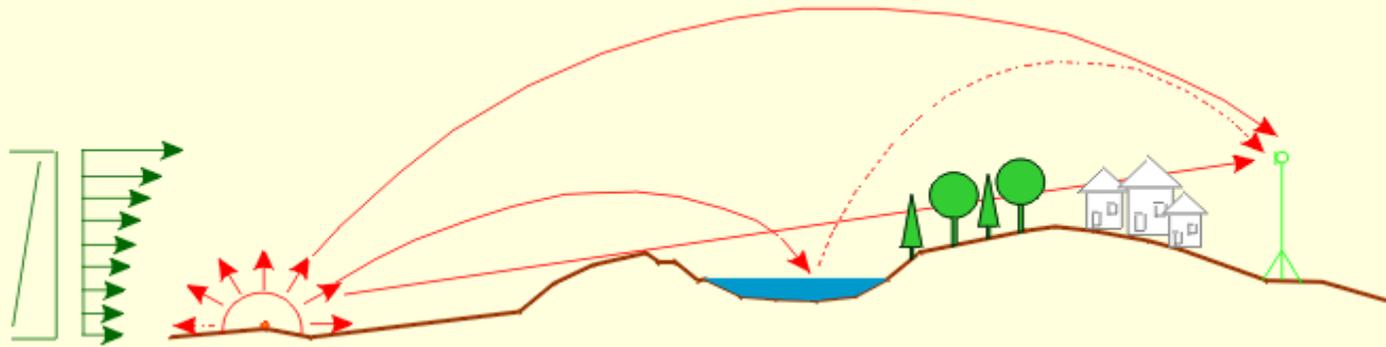
⇒ Gehör und Belästigung

⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland

⇒ Zusammenfassung

Einflüsse auf dem Ausbreitungsweg

die meisten Einflüsse sind nur pauschal bekannt



Die typische Entfernung für eine Prognose liegt zwischen 1 km und 20 km.

Phänomene

- ⇒ geometrische Ausbreitungsdämpfung
- ⇒ Luftabsorption
- ⇒ Bodenreflektion
- ⇒ gekrümmte Strahlen wegen Wind- bzw. Temperaturgradienten
- ⇒ Bebauungsdämpfung
- ⇒ Dämpfung durch Vegetation
- ⇒ Geländeschirmung

Wetter

eine nicht enden könnende Geschichte in der Akustik im Freien

Beobachtungen

- ⇒ Das momentane Wetter hat einen drastischen Einfluss auf die Schallausbreitung.
- ⇒ ‚Momentan‘ heißt hier ‚minütlich‘.
- ⇒ Immissionspegel schwanken bei Mitwindbedingungen in der Regel in einem Bereich von bis zu 10 dB von Schuss zu Schuss für Schüsse im Minutentakt.
- ⇒ Bei Gegenwindbedingungen ist die Schwankungsbreite deutlich größer.

Mittelung

Die Lösung dieses Problems ist die Mittelung einer Serie von Schüssen so lange, bis der gewünschte Vertrauensbereich des Mittelwertes erreicht ist.

Diese Mittelung ist eine Mittelung über Wettersituationen, die nach Wettermessungen ununterscheidbar sind.

Die Pegelmittelung muss sorgfältig geprüft werden.

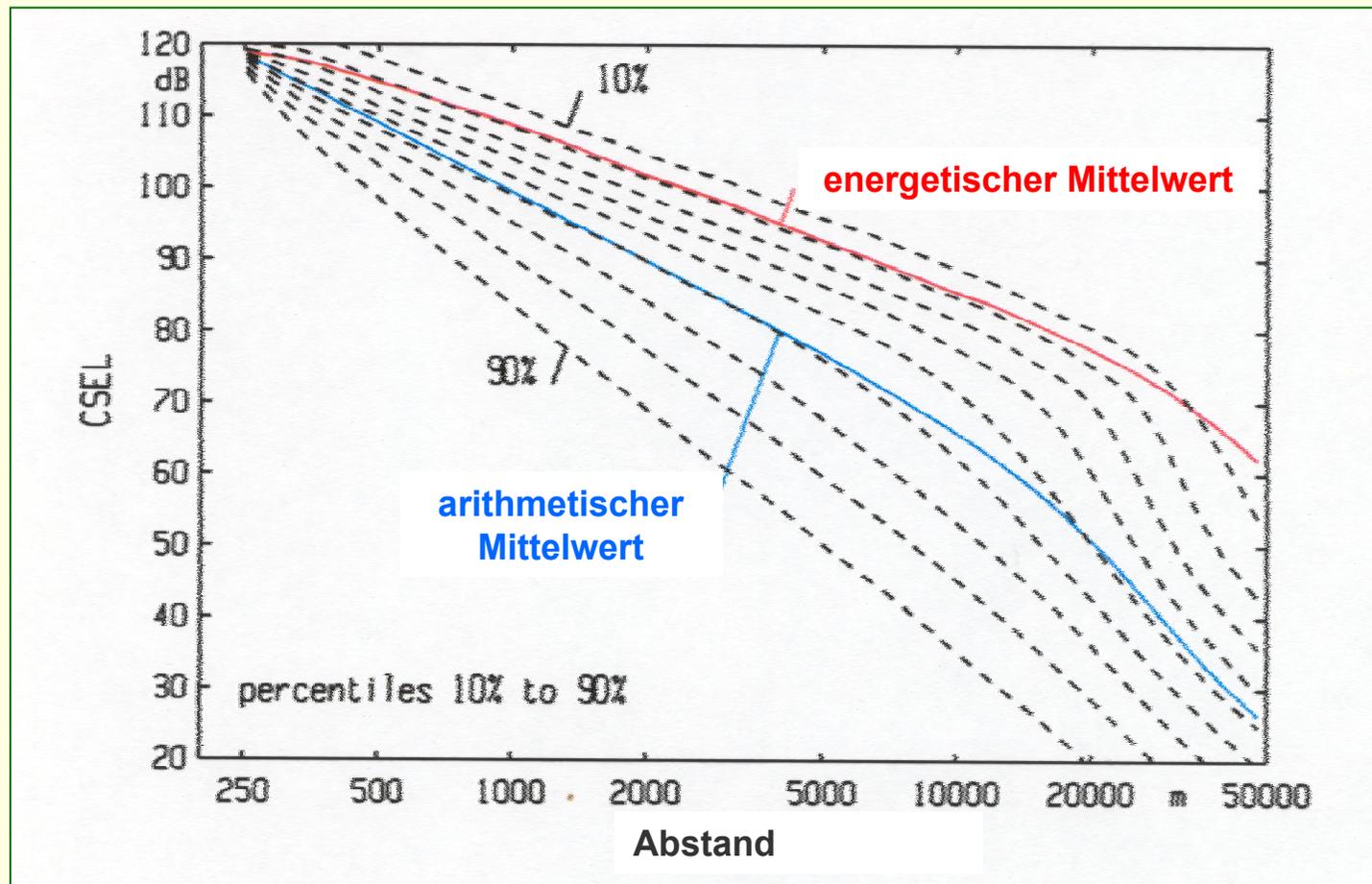




Erwartungswerte

seien Sie nicht überrascht

**In 90% aller Fälle liegen die gemessenen Pegel
signifikant unter dem energetischen Mittelwert**



Die Analyse basiert auf mehr als 3.000 Schüssen.
Die Messungen dazu stammen von Schomer, CERL, USA, in den 1980'ern



- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
-  **Knalle am Empfangsort**
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung



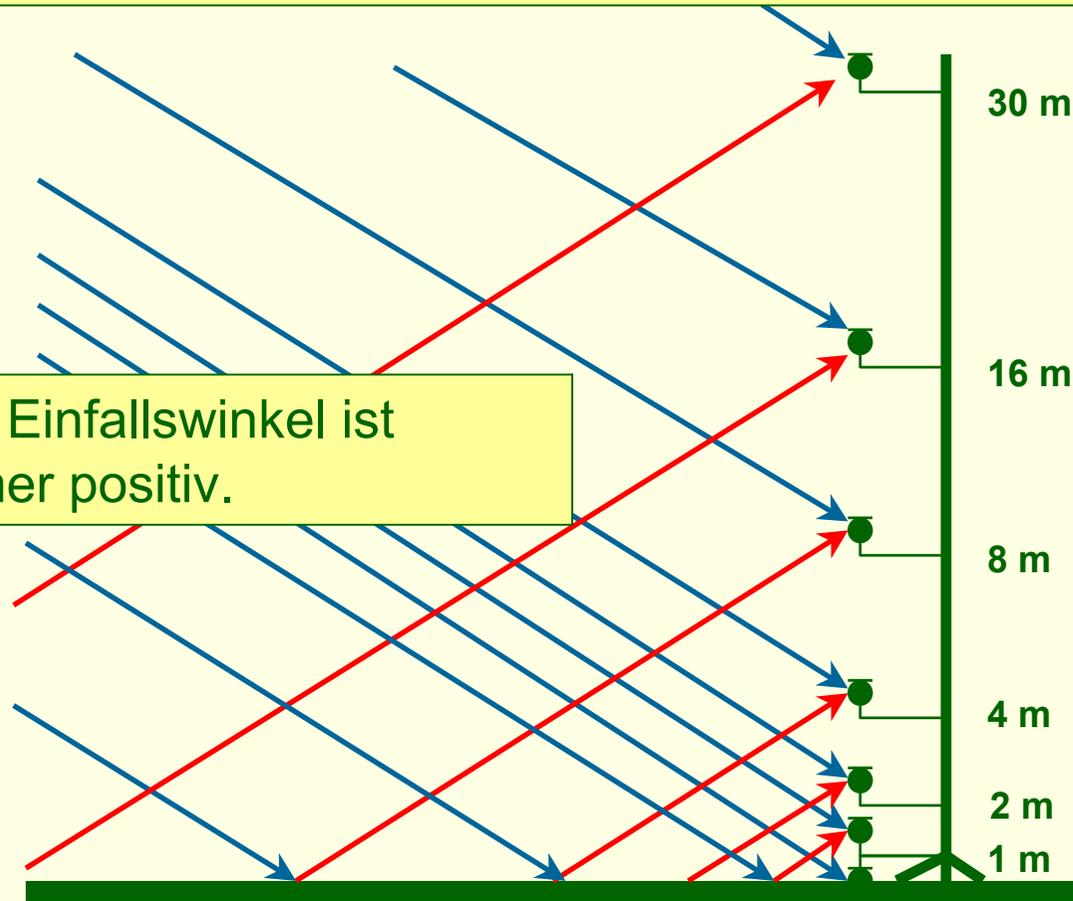
Kohärenz am Empfangsort

mal wieder "acoustical correctness"

Es gibt bei Knallen häufig Kohärenz zwischen dem Direktschall und der Bodenreflektion.

Die Messung erzwingt diese Kohärenz, die Kohärenz der Quelle ist unbeachtlich.

Der Einfallswinkel ist immer positiv.



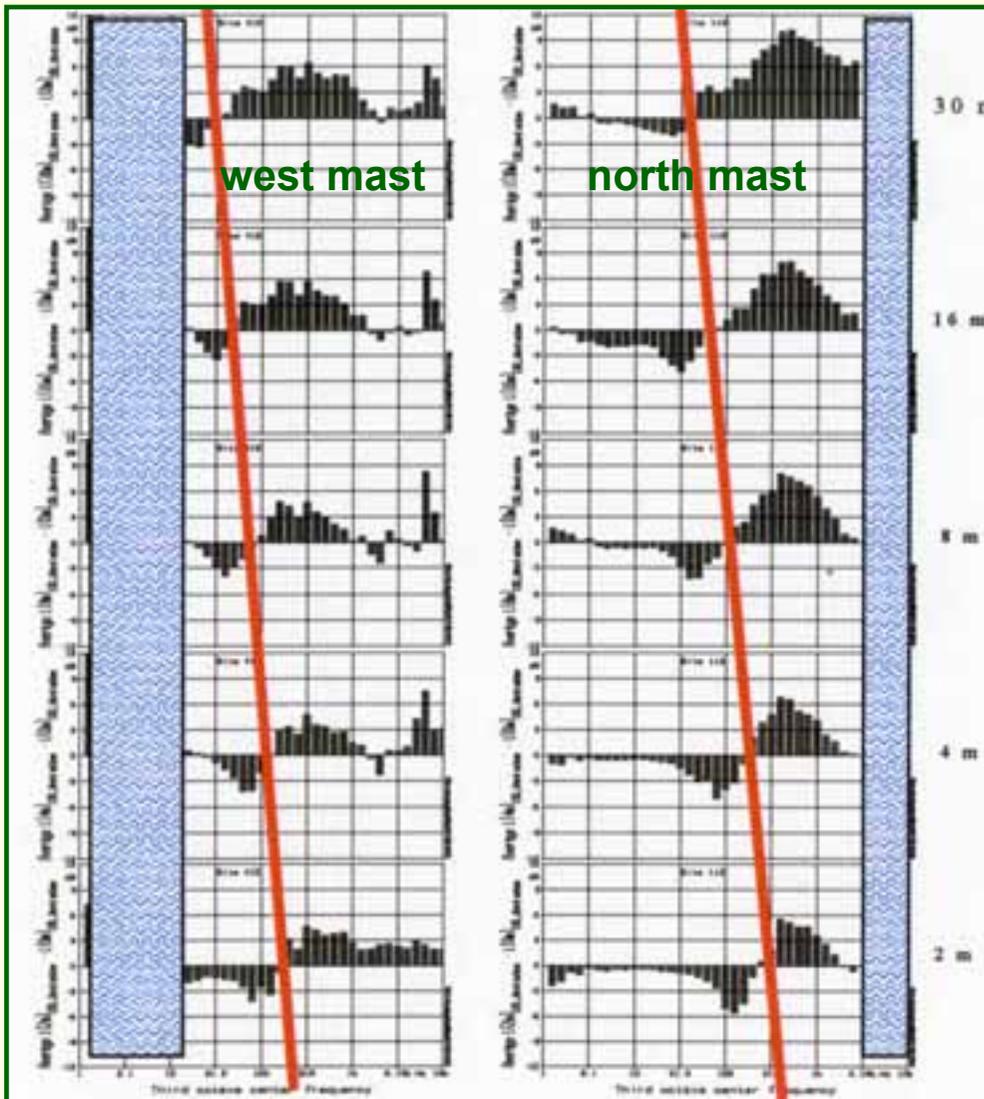
Es gibt meistens Schalldruckverdopplung oder -auslöschung oder irgend etwas dazwischen irgendwo im Spektrum.



Messungen in verschiedenen Höhen

als Differenz zur Messung auf dem Boden

Ergebnisse der „Norwegian Trials“



Beobachtungen

Der Bodendip wandert durch das Spektrum.

Die mittleren Frequenzen haben höhere Pegel in größeren Höhen.

Die tiefen Frequenzen haben höhere Pegel nahe am Boden.

Die Bereiche verschieben sich mit der Höhe.



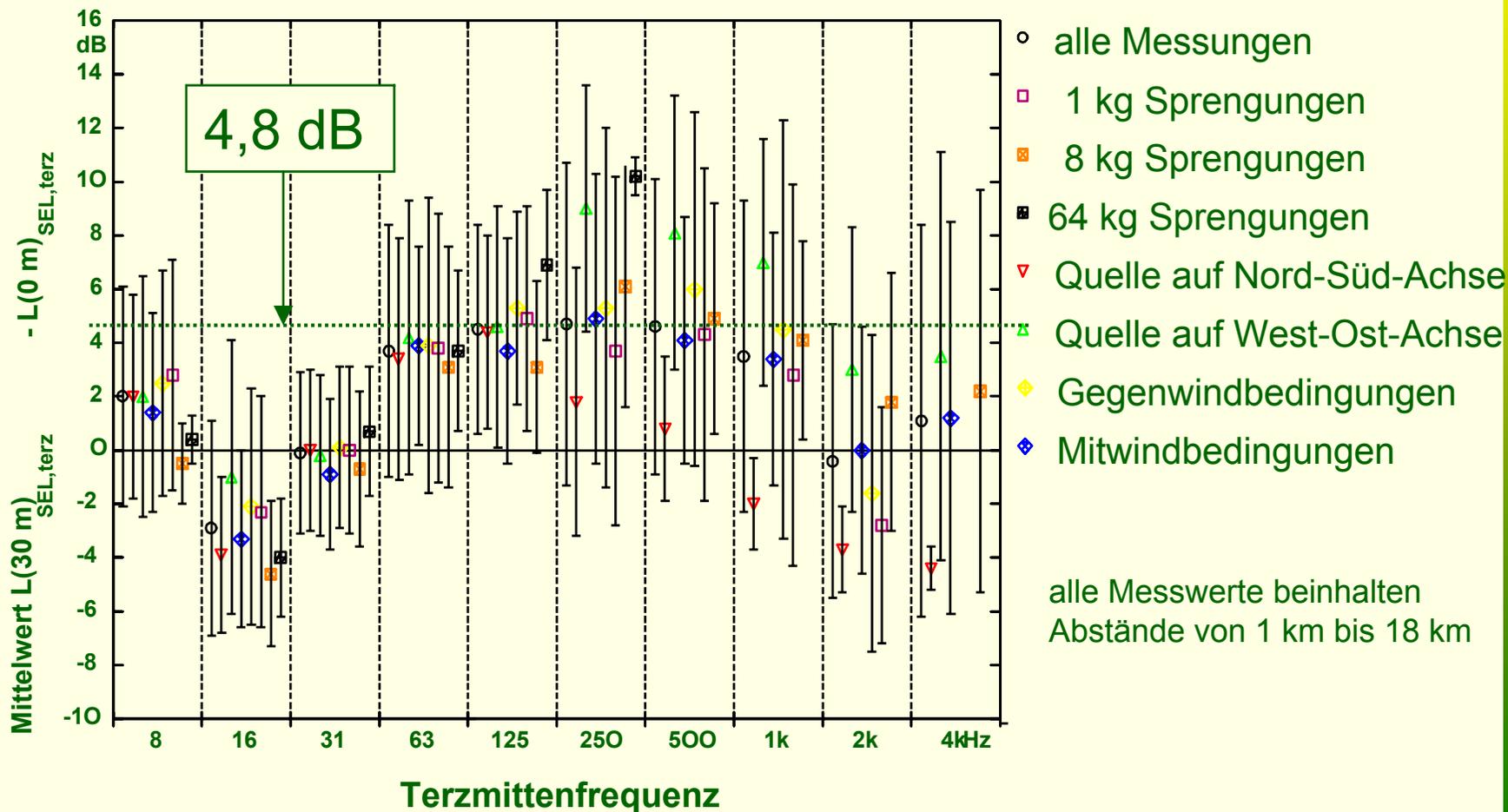
unbrauchbare Ergebnisse



Messungen in verschiedenen Höhen

Differenz zwischen 30 m und 0 m Messhöhe

Ergebnisse der „Norwegian Trials“



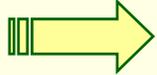


Der Empfangsort kann den Pegel bestimmen

beachtlich bei jeder Messung

- Der Pegel ist signifikant abhängig von der Messhöhe. Dies gilt insbesondere für Terzpegel.
- Die Bodenimpedanz am Empfangsort hat einen signifikanten Einfluss auf den Pegel.
- Die Mittelwerte von Terzpegeln können sich um mehr als 10 dB unterscheiden.
- Dieser Einfluss ist unabhängig vom Abstand, von der Quellstärke und vom Wetter.
- Die Gegebenheiten am Empfangsort bestimmen diese Effekte.



- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
-  **Gehör und Belästigung**
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland
- ⇒ Zusammenfassung

Die Demut vor der Natur weicht der Mehrheitsmeinung.
Die Messung wird von Multiple-Choice-Statistik abgelöst.
Die Klarheit weicht der Vielschichtigkeit.



Lärmakustik

von Reiz und Empfindung

Bewertungen verbinden die physikalisch-akustische Seite mit der lärm-akustischen Seite.

Tun sie das wirklich?

Vor langer, langer Zeit gab es Bewertungskurven, die für bestimmte Geräuscharten gemacht und mit Messvorschriften verbunden waren. Dann hat man diese Bewertungen objektiviert und im Hinblick auf das menschliche Hörvermögen ohne Bezug zur Geräuschart definiert. Elektrische Filter, die diese Bewertungen abbildeten, bereiteten den Weg für die bis zu einer famosen Genauigkeit messenden Schallpegelmesser von heute.

Es gibt die A-, B-, C-, D-Frequenzbewertung in Verbindung mit der Fast-, Slow- oder Impulse-Zeitbewertung oder den LEQ- und SEL-Pegeln. (Ein Vortrag für sich!)

Heute sieht es so aus, als ob die A-Bewertung den Wettlauf um die Gunst des Reizes gewonnen hat. Zumindest führt die EU für alle Lärmarten den $L_{A,DEN}$ als Prognosegröße ein. (Vermutlich war keine größere Gedächtnisleistung bei den Bürokraten einforderbar). Jedenfalls wird die Welt des Lärms damit im Wesentlichen auf die 1.000 Hz-Komponente reduziert.

Nun, weder die Natur noch unsere Ohren noch unsere Empfindungen werden gehorchen.

Ohne Bezug zur Geräuschart und damit ohne Bezug zur Empfindung müssen nun Beurteilungsverfahren entwickelt werden, die die Störwirkung wieder im Hinblick auf das Geräusch berücksichtigen.

(Typisch Physiker! Sie dürfen das auch anders sehen! :-)



Die A-Bewertung ist falsch für tiefe Frequenzen.

Nicht nur die Ohren erfassen Lärm. Auch führen tiefe Frequenzen zu klirrenden Gläsern und sonstigem Sekundärschall.

Die A-Bewertung ist falsch für geringe Pegel.

Die Bewertungskurve ist eben die Umkehrung der 40 phon Kurve.

Die A-Bewertung ist falsch für hohe Pegel.

siehe oben.

Die A-Bewertung ist falsch für hohe Frequenzen.

In Verbindung mit Ultraschall sind die Ergebnisse manchmal abenteuerlich.

Technisch gesehen könnten wir heute in Schallpegelmessern intelligente Bewertungen einbauen, z.B. die Lautheit, z.B. die Gewichtung nach Hörkurven, z.B. eine MP3-gehörrichtige Bewertung.

Ich kann mich hier aber nur auf das beschränken, was vorliegt und das sind Versuche, die Beurteilung von Schießlärm an gängigen Bewertungen festzumachen.

Die Objektivierung der Belästigung durch Lärm

Ich bewege mich auf dünnem Eis...



Straßenverkehrslärm

Wenn man anerkennt, dass die Belästigung durch Straßenverkehrslärm durch den Langzeit-ASEL objektiv angegeben werden kann, kann die Belästigung durch andere Lärmarten bzw. Geräusche darauf bezogen werden.

Vergleich mit anderen Lärmarten

Dies geht z. B. durch „Paarvergleichstests“: Eine KFZ-Vorbeifahrt wird mit einem Einzelereignis der anderen Lärmart verglichen und festgestellt, wann Testpersonen beide Geräusche als gleich belästigend einstufen.

Zu- und Abschläge

Diese Tests ergeben entweder konstante oder pegelabhängige Zu- oder Abschläge, die dann mit dem ‚physikalischen‘ ASEL der anderen Lärmart zu verrechnen sind, um eine belästigungsrichtige, nämlich straßenverkehrs-äquivalente Maßzahl, den so genannten Beurteilungspegel, zu erhalten.

Vergleich mit Richtwerten

Dieser Beurteilungspegel wiederum kann dann lärmart-unabhängig mit Richtwerten o.ä. verglichen werden wie der ASEL des Straßenverkehrs selber.



Rechnen Sie nicht mit Beurteilungspegeln

das kleine Einmaleins des Lärms - das Eis bricht

• Kann man Belästigungen addieren, in dem man ihre Beurteilungspegel (energetisch) addiert?

• Im Allgemeinen nicht, weil es verschiedene Richtwerte für einige Lärmarten gibt (zumindest in Deutschland und in vielen Ländern der EU).

• Kann man Konflikte (Differenz zwischen dem Beurteilungspegel und dem Richtwert) (energetisch oder arithmetisch) addieren?

• Schon eher. Aber durchweg anerkannt ist das nicht.



Der Beurteilungspegel...

kleine Waffen

In der neuen **ISO 1996** wird dem Schießlärm kleiner Waffen (Kaliber < 20 mm) ein Zuschlag von **12 dB** zugemessen.

Dieser Zuschlag gilt für den ASEL des Einzelereignisses. Er gilt immer und überall und hängt nur von der Quelle ab. Andere am Ohr gleich ‚klingende‘ Geräusche (denken Sie z. B. an das Feuerwerk) bekommen einen anderen Zuschlag.

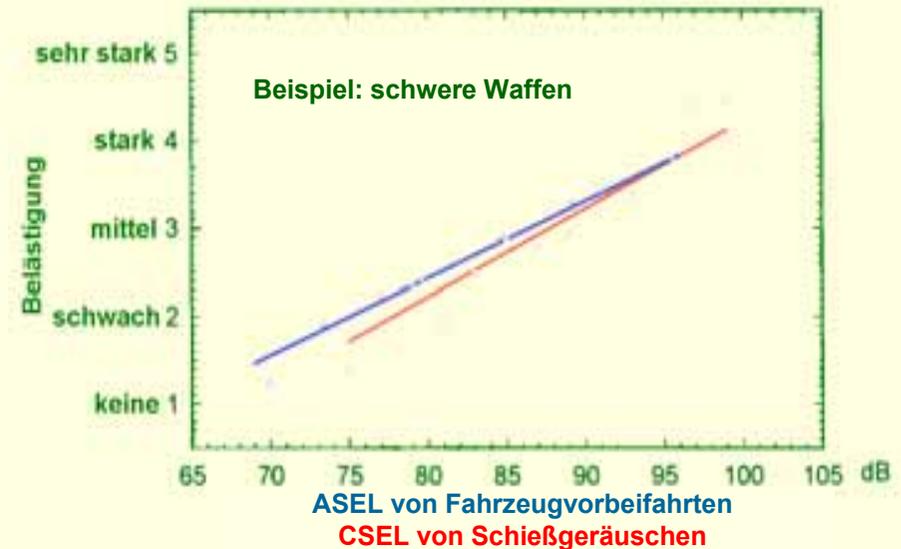
In der deutschen Richtlinie **VDI 3745** beträgt der Zuschlag **16 dB**.

In Deutschland ist in der TA Lärm vorgeschrieben, Schießlärm von kleinen Waffen nach der VDI 3745 zu beurteilen. Auch hier gilt also, kommt der Knall nicht vom Schießen, wird er anders beurteilt.



Der Beurteilungspegel... große Waffen

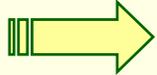
Sozialwissenschaftliche Untersuchungen haben in Deutschland ergeben, dass der Langzeit-CSEL von Schießgeräuschen schwerer Waffen mit dem Langzeit-ASEL des Straßenverkehrslärm direkt korreliert.



Deshalb wurde in einer vom Bundesministerium der Verteidigung herauszugebenden Vorschrift (TA Schießlärm) festgelegt, dass dieser Schießlärm C-bewertet zu messen bzw. zu prognostizieren ist und diese Pegelwerte direkt als Beurteilungspegel zu verwenden sind. Allerdings werden gleichzeitig andere Richtwerte vorgegeben.

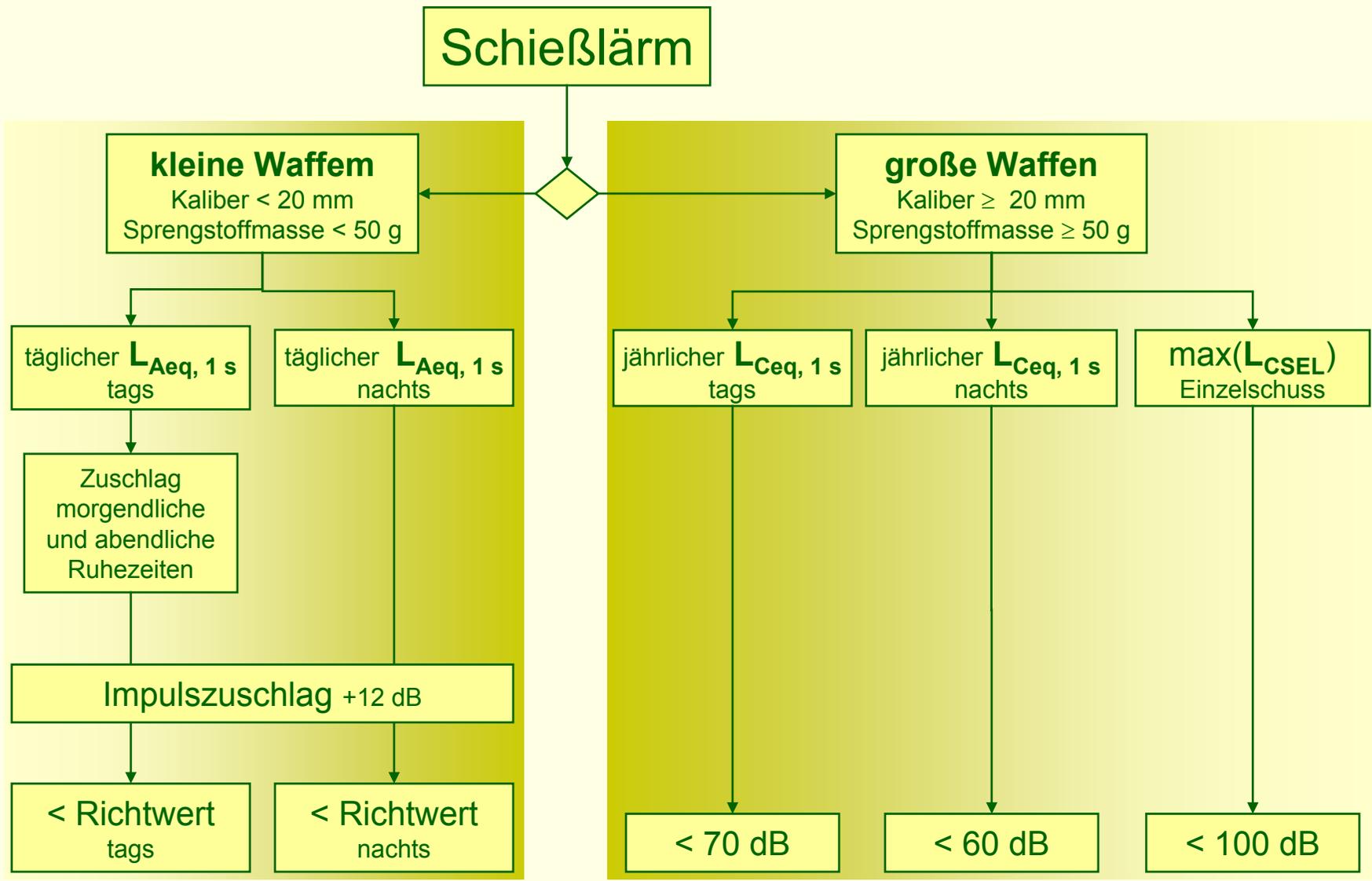
Dieses Beurteilungsverfahren kommt also ohne Zuschläge aus.



- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
-  **Beurteilung von Schießlärm in Deutschland**
- ⇒ Zusammenfassung

Beurteilung von Schießlärm in Deutschland

nur scheinbar eindeutig





- ⇒ Einführung
- ⇒ Waffen
- ⇒ Knallquellen
 - ↳ Explosion in Luft
 - ↳ Mündungsknall
 - ↳ Geschossknall
- ⇒ Ausbreitung über große Entfernungen
- ⇒ Knalle am Empfangsort
- ⇒ Gehör und Belästigung
- ⇒ Beurteilung von Schießlärm in Deutschland

 **Zusammenfassung**



Zusammenfassung

- ➡ Waffenknalle sind besondere Schalle.
Sie zeichnen sich durch die hohe Energie, die Impulshaltigkeit, die tiefen Frequenzen, die starke Richtcharakteristik und den große Einwirkungsbereich aus.
- ➡ Es zahlt sich aus, so lange wie möglich auf der physikalisch-akustischen Seite zu bleiben, wenn man einfache Modelle der Knallquellen entwickelt.
- ➡ Der Schlüssel zum Verständnis der Knalle ist die Verwendung der Kugelwellenreflektion an komplexen Bodenimpedanzen und natürlich die konsequente Beachtung der Regeln der “acoustical correctness”.
- ➡ Das Weber-Modell für den Mündungs- bzw. den Sprengknall und das Energiemodell des Geschosknalles können die Grundlagen für ein Vorhersagemodell für Schallpegel sein, die hinreichend zuverlässig mit der Belästigungsreaktion von Anwohnern korrelieren.
- ➡ Die Ausweitung von Schallausbreitungsmodellen auf große Entfernungen fügen noch einmal große Unsicherheiten der Pegelvorhersage hinzu.
- ➡ Für Waffenknalle schwerer Waffen ist der C-bewertete Langzeitmittelungspegel ein zuverlässiger Prediktor für die Belästigung der Anwohner.