

# Zur Wahl des maßgeblichen Immissionsortes unter Berücksichtigung der Phänomene der Bodenreflexion

Berthold M. Vogelsang<sup>1</sup>, Karl-Willhem Hirsch<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>NLÖ, Hannover; <sup>2</sup>Institut für Lärmschutz, Düsseldorf

## Einleitung

Bei der Berechnung und bei der Messung von Immissionspegeln wird großer Wert auf „Genauigkeit“ und „Zuverlässigkeit“ im Sinne von Fehlergrenzen und Vertrauensbereich eines Mittelwertes gelegt. Die Statistik drängt sich bei all diesen Betrachtungen manchmal so weit in den Vordergrund, dass systematische Einflüsse der Emissions- bzw. Immissionsituation und der Schallausbreitung häufig nicht mehr betrachtet werden. Gleichzeitig ist es heute durch moderne Signalverarbeitung ohne erheblichen Aufwand möglich, nicht nur Einzahlpegel und deren Mittelwerte zu betrachten, sondern auch Frequenzbandanalysen durchzuführen und Einzelereignisse bzw. Teilabschnitte innerhalb der Erhebungszeit auf Besonderheiten zu untersuchen und sie dann zu interpretieren und zu bewerten.

Der durch die Frequenzbandanalyse einzelner Messwerte erhoffte Gewinn an Zuverlässigkeit für den Mittelwert wird häufig nicht erreicht, weil sich z. B. Terzpegel in Frequenzbereichen ganz anders verhalten als der Einzahlwert und weil Einflüsse verschiedenen physikalischer Phänomene, die im Einzahlwert eher unauffällig zur Unsicherheit beitragen, hier unerwartet großen Einfluss auf das Spektrum haben. Die spektralen Analysen werden heute, weit mehr als früher, auch für die Abschätzung bzw. die Auslegung der passiven Lärmschutzmaßnahmen (Fenster, Schallschirme) verwendet. Es ist also auch aus dieser Sicht erforderlich Terzspektren sachgerecht zu interpretieren.

Eines dieser Phänomene ist die Bodenreflexion, deren Zusammenspiel mit den Schallausbreitungsbedingungen - dazu gehören die Einflüsse von Wind, Windgradienten, Bodenbeschaffenheit in Abhängigkeit von der Witterung und geometrische Randbedingungen wie Quell- und Empfängerhöhe über Boden - einen erheblichen Einfluss auf das Empfangsspektrum hat. In diesem Beitrag wird insbesondere auf den die Wirkung dieses Zusammenspiels bei unterschiedlicher Wahl der Empfängerhöhe diskutiert.

## Das Phänomen Bodenreflexion

Die übliche, einfache Betrachtungsweise einer Reflexion bemüht das Bild der ebenen Wellen und ihre Signalprägung bei Überlagerung von reflektierten und direkten Signalanteilen im Empfänger (s. /1/, S. 194f). Reale Mess-Signale erfüllen die aus diesem Bild abgeleiteten Erwartungen nicht, kommen ihnen häufig noch nicht einmal nahe. Die Schlussfolgerung, die Widersprüche und Unwägbarkeiten der Schallausbreitung im Freien seien die Ursache für die mangelnde Übereinstimmung, ist in den meisten Fällen unrichtig. Richtiger ist vielmehr, dass das Bild ebener Wellen nicht zutrifft, weil es die Regeln der Reflexion von Kugelwellen sind, die die Empfangssignale prägen (s. /1/ S. 199 Abb. 7.7).

Das häufig zu hörende Argument, in größeren Abständen sind die Wellenfronten selbst von Kugelwellen so schwach gekrümmt, dass sie als ebene Wellen angesehen werden können, ist dabei wenig hilfreich, denn selbst quellseitig ideal ebene Wellenfronten werden durch die Brechung in der Atmosphäre gekrümmt. Es ist also naheliegender, die Bodenreflexion im Freien eher im Bild der Reflexion von Kugelschallwellen zu beschreiben und zu verstehen.

Ein anderes häufig zu hörendes Argument ist, dass viele Geräuschquellen so groß sind im Vergleich zur Wellenlänge, dass sie als nicht-kohärente Quellen zu betrachten sind. Die Schlussfolgerung daraus jedoch, dass dann auch die Empfangssignale inkohärent sind, ist dann nicht zutreffend, wenn es wie hier um die kohä-

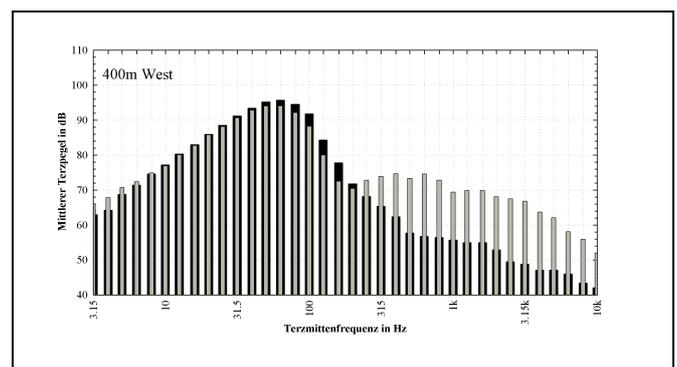
rente Superposition von Bodenreflexion und Direktschall geht. Die Kohärenz hängt also nicht an der Quelle, sondern am Empfänger. Bisher berücksichtigt nur die ISO 17201 /2/ den Einfluss des Bodens hinreichend und auch nur bei Emissionsbestimmung.

Der hohe analytische und numerische Aufwand der Berechnung der Reflexion von Kugelwellen an realen Böden, die durch eine frequenzabhängige komplexe Admittanzfunktion beschrieben werden müssen, tritt erst langsam mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechner in den Hintergrund. Die Anwendung dieser Konzepte bei der Interpretation von Messergebnissen ist deshalb wohl noch nicht durchgängig. Dies gilt auch für die Interpretation von Korrekturstermen für die Bodenreflexion, z.B. das  $A_{GR}$  in der DIN/ISO 9613-2. Diese Korrektur ist nur dann nicht nachweisbar falsch, wenn die Randbedingungen, Langzeitmittelwert (keine Einzelereignisse), A-Bewertung (Vernachlässigung tiefer Frequenzanteile), bodennahe Quellen (und Empfänger) und Mitwind-Kondition (Brechung des Schalls zum Boden hin) erfüllt ist.

Schon kleinste Laufzeitunterschiede - einerseits durch die frequenzabhängige Phasendrehung bei der Bodenreflexion und andererseits durch unterschiedliche effektive Schallgeschwindigkeiten entlang der Laufpfade der beteiligten Schalle (streckenweise nahe am Boden beim reflektierter Schall und in einer größerer Höhe beim Direktschall) - können zu einer signifikanten Auslöschung des Schalldrucks in einem großen Frequenzbereich führen. Gerade bei flachen Einfallswinkel hängt die Phasendrehung während der Reflexion stark vom Einfallswinkel ab. Da dieser effektive Einfallswinkel wiederum von der Brechung in der Atmosphäre abhängt (in der Tendenz bei Mitwind größere Einfallswinkel als bei Gegenwind), lassen sich unterschiedliche Spektren und auch Einzahlpegel im Nahbereich der Quellen schon alleine durch diesen Effekt erklären.

Häufig wird in diesem Zusammenhang von „Bodenabsorption“ gesprochen. Es soll hier betont werden, dass der Übergang akustischer Energie aus dem Schallfeld in den Boden nur in beschränkten Frequenzbereichen typisch 20 % überschreitet, sonst aber typisch im Bereich von Prozenten bleibt. Die häufig zu beobachtende aber auch die durch die ISO 9613 prognostizierte Pegelminderung ist eine lokale, durch Superposition erzwungene Minderung des Schalldruckpegels, keineswegs aber eine Absorption. Die Unabhängig des Einflusses der Bodenreflexion auf das Empfangsspektrum z. B. von der Entfernung wird in /3/ belegt.

Abb. 1: Knallterzspektren für 2 Quellhöhen



## Der Einfluss der Empfangshöhe auf die Immissionspegel

### Beispiel Einzelereignis

Dieser Effekt soll zunächst an einem einfachen Beispiel dargelegt werden. Abb. 1 zeigt ein in 400 m Abstand und zwei Empfangshöhen (0 m, schwarze Balken, 5 m graue Balken) aufgenommene gemittelte Spektrum über drei Sprengung (vgl. /4/). Die Schallausbreitung erfolgte bei Schwachwind über einem im Mittel ebenen, mit Gräsern bewachsenen Heideboden.

Die Terzspektren des Schalldrucks in beiden Höhen unterscheiden sich stark. Es wird deutlich, dass je nach Frequenzbewertung sich auch unterschiedliche Einzahlpegel ergeben. Das Quellspektrum ist bei Sprengungen bekannt. Es kann deshalb auch das Spektrum mit hoher Zuverlässigkeit angegeben werden, welches ohne Einfluss des Boden gemessen worden wäre.

Aus Abb. 1 können folgende Schlüsse gezogen werden: Im tiefen Frequenzbereich herrscht durchweg Druckverdopplung, ab einer Terzmittenfrequenz von 100 Hz kann von Auslöschung gesprochen werden. Die Signalauslöschung am Boden ist ausgeprägter als in 5 m Höhe. Beide Signale messen aber viel kleinere Werte im Vergleich zu einem Freifeldpegel.

Die in Abb. 1 dargestellte Messung ist über eine längere Tageszeit reproduzierbar, wenn man Reproduzierbarkeit angemessen interpretiert: In den Terzen, wo Druckverdopplung vorherrscht, variieren die Pegel um 1 bis 2 dB. Im Bereich der Auslöschung ist die Varianz entscheidend größer. Dort spielen kleinste Änderungen der Ausbreitungsbedingungen eine große Rolle.

### Beispiel Langzeitmessung

Exemplarisch für eine Langzeitmessung werden hier die Messergebnisse an einem Windpark vorgestellt.

Abb. 2: Terzimmisionsspektren eines Windparks für 2 Höhen

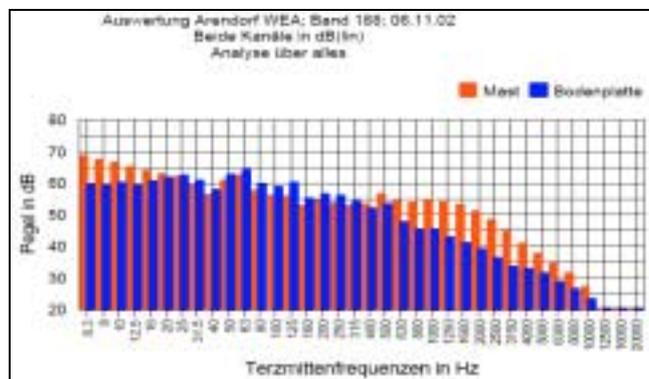


Abb. 2 zeigt die über eine Erhebungszeit von einem Monat, in einem Abstand von ca. 1000 m gemessenen Terzspektren des Schalldrucks. Wie in Abbildung wurde in 0 m Höhe (hier aber über einer „schallharten“ Platte) gemessen (gestrichelte Kurve). Die Vergleichsmessung erfolgte hier allerdings in 10 m Höhe. Prinzipiell ändert sich an der Interpretation der Spektren nichts. Wieder werden am Boden im mittleren und hohen Frequenzbereich niedrigere Pegel gemessen. Den Einbruch im Spektrum in 10 m Höhe würde man als „Bodendip“ bezeichnen. Dies ist in soweit keine zuverlässige Aussage, weil man das Quellspektrum der Windenergieanlage nicht kennt und deshalb nicht nachweisen kann, dass auch dort, wo der „Bodendip“ zu höheren Frequenzen scheinbar aufhört, keine Druckverdopplung vorliegt. Zwei Aussagen lassen sich aber ableiten. Die Bodenplatte hat keinen Einfluss auf die Superposition am Boden. Die Langzeit-Mittelung führt zu einer Verflachung des Effekts, hebt ihn aber keineswegs auf.

## Zur Maßgeblichkeit eines Immissionspegel

Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Empfangshöhe spektral gravierend und für den Einzahlpegel signifikant sein kann. Letzteres hängt vom Quellspektrum und von der Frequenzbewertung ab. Die Pegel ändern sich systematisch mit der Empfangshöhe, vgl. auch /3/. Welcher Pegel ist aber nun maßgeblich. Dies müsste eigentlich dort definiert sein, wo Vergleiche dieses Pegels zur Ableitung einer Beurteilung der Lärmsituation beschrieben sind. Die Vergleichswerte, Anhaltswerte, Richtwerte o.ä., sind glatte Zahlen und ein grobes Maß, werden aber meistens im Zehntel-dB-Bereich belastet, eine im Lichte der obigen Ergebnisse mutige Vorgehensweise.

Es wird zwar viel Wert darauf gelegt, dass ein Schallpegelmessgerät der Klasse 1, geeicht natürlich, zu verwenden ist, aber wo der „hinzuhalten“ ist, um einen maßgeblichen Pegel zu ermitteln, ist bei weitem nicht so klar. Die Ergebnisse hier legen nahe, dass eine nicht klar vorgeschriebenen Wahl des Immissionsorts einen viel größeren Beitrag zur Unsicherheit des Pegels beiträgt als Unsicherheiten in der Messkette.

Betrachtet man die häufig bei der Prognose von Beurteilungspegeln heranzuziehende DIN/ISO 9613, gehört zu Maßgeblichkeit die Berücksichtigung des Bodeneffektes. Prognose und damit die Maßgeblichkeit hängt also an der Höhe des Ortes. Neben der Höhe beeinflussen auch andere, semi-geometrische Bedingungen den Immissionspegel. Über die Empfindlichkeit eines Immissionspegels von der Geometrie wird z. B. in /5/ berichtet. Diese Empfindlichkeiten gehen letztlich in die Unsicherheit eines maßgeblichen Prognosepegels ein, ohne dass die Möglichkeit besteht, je nach Anwendung, je nach Situation, anders korrigierend einzugreifen, als es die ISO/DIN 9613 nach Maßgabe empirischen Vorauswissens unter pauschalen Randbedingungen zulässt.

Es wäre nach heutigem Wissenstand mehr möglich. Es könnten maßgebliche Immissionspegel mit kleinerer Unsicherheit prognostiziert werden, wenn man den maßgeblichen Immissionspegel als Freifeldpegel definiert. Dieser wäre dann ein sachgerechteres und aussagekräftigeres Maß in Lärmkarten als der jetzt in einer pauschal definierten Höhe und unter dem Eindruck der Annahme, der Immissionspegel hänge nur marginal von der Höhe ab, berechnete Pegel. Der so bestimmte maßgebliche Freifeldpegel mag dann nicht mehr maßgeblich für die Belästigung sein, er ist aber maßgeblich für die Immission, also das Potential der Geräusche, belästigend zu sein.

## Verweise

/1/ Müller, Gerhard; Möser Michael (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin: Springer, 3. Aufl. 2004.

/2/ ISO 17201-1: Noise from shooting ranges – Part 1: Sound source energy determination of muzzle blast.

/3/ Hirsch, K.-W.: “On the influence of local ground reflections on sound levels from distant blasts at large distances”, Noise Control Engineering Journal, 46(1998)5, S. 215-226

/4/ Buchta, E.: „On the Influence of Source Height on the Sound Propagation over Flat Terrain”, DAGA 2004, Straßburg

/5/ Hirsch, K.-W.: “Zur Berücksichtigung der Bodenreflexion bei der Quellmessung von Mündungsknallen”, Fortschritte der Akustik, DAGA 2003, Aachen