

Eidgenössisches Departement für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation
Bundesamt für Strassen

Lärmschirme an Strassen – Akustische Quellenhöhe bei der Berechnung der Hinderniswirkung

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EMPA, Dübendorf
Kurt Heutschi

Forschungsauftrag Nr. 51/00
September 2001

Zusammenfassung/Résumé

Die Hinderniswirkung einer Lärmschutzwand ist in starkem Mass von der Quellenhöhe abhängig. Für eine zuverlässige Berechnung von Strassenverkehrslärmimmissionen ist deshalb eine genaue Kenntnis der effektiven Quellenhöhe eine Grundvoraussetzung. In den bisher in der Schweiz verwendeten Modellen wurde eine Quellenhöhe von 0.8 m angenommen. Da sich in den letzten Jahren eine Verlagerung der Strassenverkehrslärmemissionen vom Antriebs- zum Rollgeräusch eingestellt hat, ist anzunehmen, dass sich die Quellenhöhe entsprechend reduziert hat.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde die Frage der Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm messtechnisch im frei fliessenden Verkehr untersucht. Die Messidee sah vor, die Quellenhöhe indirekt, d.h. durch Auswertung der quellenhöhenabhängigen Wirkung eines Hindernisses zu bestimmen. Dazu wurden in fünf Messsituationen insgesamt 300 Fahrzeuge in den Kategorien Personen- und Lastwagen erfasst.

Das Messverfahren hat sich als praktikabel und relativ effizient bewährt. Im Mittel resultiert für Personenwagen eine Quellenhöhe von **0.4 m**, für Lastwagen liegt der Wert bei **0.5 m**. Die Reduktion gegenüber der bisher in den Modellen verwendeten Höhe entspricht rechnerisch einer erhöhten Hinderniswirkung von typisch 1 dB. Die gefundenen Quellenhöhen werden durch anderweitig gewonnene Untersuchungsergebnisse aus der Literatur gestützt.

L'effet d'écran d'une paroi antibruit dépend dans une large mesure de la hauteur de la source de bruit. C'est aussi pourquoi la connaissance précise de la hauteur effective de la source est une condition primordiale pour un calcul fiable des immissions de bruit du trafic routier. Dans les modèles utilisés jusqu'ici en Suisse, on admettait que la hauteur de la source était de 0.8 m. Du fait que ces dernières années on a assisté à un déplacement des émissions de bruit du bruit de moteur vers le bruit de roulement, on peut supposer que la hauteur de la source a diminué en conséquence.

Le présente étude est consacrée au problème de la mesure de la hauteur de la source du bruit du trafic routier sur les véhicules en mouvement. La solution développée consiste à mesurer indirectement la hauteur de la source par la détermination de l'effet d'écran d'un obstacle en fonction de sa hauteur. Pour cela on a procédé à la mesure, pour cinq situations de mesure différentes, de 300 véhicules des catégories voitures de tourisme et camions.

*La méthode de mesure s'est révélée appropriée et relativement pratique dans son exécution. En moyenne on obtient pour les voitures de tourisme une hauteur de source de **0.4 m** et pour les camions une valeur de **0.5 m**. La diminution par rapport aux hauteurs utilisées jusqu'ici dans les modèles de calcul correspond, par calcul, à une augmentation de 1 dB de l'effet d'écran. Les hauteurs de source déterminées par cette méthode ont été confirmées par les résultats obtenus par d'autres méthodes cités dans la littérature sur ce sujet.*

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Ausgangslage und Problemstellung.....	5
3. Gegenüberstellung der Hindernisformeln StL-86 und ISO 9613.....	6
4. Übersicht einiger in der Literatur publizierten Hindernisformeln.....	9
5. Aktueller Wissensstand zur Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm....	12
6. Diskussion der Problemstellung	13
7. Messungen.....	17
8. Auswertungen	34
9. Schlussfolgerungen	40
10. Literatur.....	41
11. Anhang Publikation inter-noise 2001	43

1. Einleitung

Der vorliegende Bericht zur akustischen Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm ist wie folgt aufgebaut:

Nach einer Einführung in die Problemstellung in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 eine Gegenüberstellung der bisher in der Schweiz angewendeten Hindernisformel aus StL-86 und der neuen Vorschrift nach ISO 9613-2 präsentiert. Die dabei zu Tage tretenden Unterschiede waren die Hauptmotivation und Ausgangspunkt für das vorliegende Forschungsprojekt. Im Verlauf des Projekts wurden verschiedene in der Literatur publizierte Hindernisformeln untersucht. Sie sind stichwortartig in Kapitel 4 beschrieben. Im Kapitel 5 wird in einer kurzen Übersicht der Wissensstand zur Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm dargestellt. Das Kapitel 6 beschreibt die theoretischen Überlegungen und Voruntersuchungen zu eigenen Messungen der Quellenhöhe. Die eigenen Messungen sind in Kapitel 7 beschrieben, wobei hier drei Kategorien zu unterscheiden sind. So werden vorbereitende Referenzmessungen mit einem Lautsprecher als Quelle und dann eine Testmessung an einem stehenden Personenwagen beschrieben. Anschliessend folgt der Katalog der Messserie an verschiedenen Standorten mit frei fliessendem Verkehr. Im Kapitel 8 werden die Detailauswertungen mit den erforderlichen Korrekturen und schliesslich die Extraktion der Quellenhöhe jedes gemessenen Fahrzeugs beschrieben. Im Kapitel 9 schliesslich werden die wesentlichen Erkenntnisse als Schlussfolgerungen zusammengefasst. Im Anhang ist eine eigene Publikation wiedergegeben, die auf einige in diesem Projekt gefundenen Ergebnisse eingeht.

2. Ausgangslage und Problemstellung

Die Lärmsanierung von stark frequentierten Strassen erfolgt häufig unter Einbezug von Schallschutzwänden. Durch Unterbrechung der direkten Sichtverbindung von der Quelle zum Empfangspunkt kann eine deutliche Reduktion der Schallimmissionen erreicht werden. Die Höhe der Quelle über Boden stellt dabei einen wesentlichen Einflussparameter dar, da sie direkt die Länge des Umwegs um das Hindernis herum beeinflusst.

Bisher wurde in der Schweiz zur Dimensionierung von Wandhöhen, bzw. zur Berechnung der akustischen Wirkung von Lärmschutzwänden auf eine Formel des an der EMPA entwickelten Strassenlärmmodells StL-86 [EMPA, 1986] abgestützt. Das Modell geht von einer Quellenhöhe von 0.8 m aus, wie dies in der Eidgenössischen Lärmschutzverordnung LSV [LSV, 1986] (Anhang 2, Ziffer 2) festgeschrieben ist.

In der Zwischenzeit ist mit der Einführung der internationalen Norm ISO 9613-2 [ISO 9613-2, 1996] ein modifizierter Ansatz für die Berechnung der akustischen Wirksamkeit von Lärmschirmen verfügbar geworden. Die Zuverlässigkeit dieses Ansatzes ist breit abgestützt und erlaubt eine präzise Prognose der Hinderniswirkung. In Erweiterung zu StL-86 gibt ISO 9613-2 explizit eine Formel zur Behandlung von zweifachen Hindernissen. Im Sinne einer internationalen Vereinheitlichung und Steigerung der Berechnungsqualität sollte angestrebt werden, die ISO 9613-2 Berechnung für Hindernisse auch in der Schweiz verbreitet anzuwenden. Vorerst bleibt allerdings die Frage der repräsentativen Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm offen. ISO 9613-2 macht dazu keine Angaben. Neuere Untersuchungen von Strassenverkehrslärmemissionen, z.B. [Heutschi, 1999] deuten darauf hin, dass das durch das Zusammenwirken von Reifen und Fahrbahn produzierte Rollgeräusch zumindest im oberen Geschwindigkeitsbereich eine dominante Rolle einnimmt. Dies lässt auch eine deutlich tiefere Quellenhöhe als die bisher angenommenen 0.8 m erwarten. Der Wechsel von der bisherigen Hindernisformel aus StL-86 zur neuen aus ISO 9613-2 lässt sich erst dann sinnvoll vornehmen, wenn neue Kenntnis betr. der Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm vorliegt. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, mittels Strassenverkehrslärmmessungen mit und ohne Lärmschutzwände Angaben bereitzustellen, anhand derer sich eine repräsentative Quellenhöhe ableiten lässt.

3. Gegenüberstellung der Hindernisformeln StL-86 und ISO 9613

StL-86

StL-86 basiert die Hindernisberechnung auf einer Formel von Reinhold. Die zentrale Grösse ist der Umweg w [m] um das Hindernis herum verglichen mit der Direktverbindung durch das Hindernis hindurch. Wenn die Sichtlinie durch das Hindernis knapp nicht unterbrochen wird, d.h. die Hinderniskante liegt knapp unterhalb der Sichtlinie, entsteht gleichwohl eine geringe abschirmende Wirkung. Dieser Fall wird durch einen negativen Wert für den Umweg w beschrieben.

Die Hinderniswirkung H [dB(A)], also die durch das Hindernis verursachte Pegelreduktion wird für Strassenverkehrslärm nach StL-86 angesetzt zu:

$$\begin{aligned} H &= 0 && \text{für } w < -0.0125 \\ H &= 10 \log(3+160w) && \text{für } -0.0125 \leq w < 0.025 \\ H &= 10 \log(5+80w) && \text{für } w \geq 0.025 \end{aligned}$$

Durch die Präsenz eines Hindernisses wird auch der Bodeneffekt beeinflusst, da die Schallausbreitung über das Hindernis auf einer anderen Höhe erfolgt. StL-86 löst dieses Problem, indem es zwei Bodeneffektanteile bestimmt: der erste Anteil wird berechnet von der Quelle zur Hinderniskante, der zweite Anteil ergibt sich für den Abschnitt Hinderniskante zum Empfänger. Die beiden Anteile werden dann addiert.

ISO 9613-2

ISO 9613-2 ist eine Anleitung zur Berechnung der Schallausbreitung im Freien für allgemeine Quellen. Demzufolge sind die Ausbreitungseffekte frequenzabhängig formuliert. Wie beim StL-86 ist die fundamentale Grösse zur Beschreibung des Hindernisses der Umweg. Für ein einfaches Hindernis berechnet sich die Hinderniswirkung zu:

$$D_z = 10 \log \left(3 + \frac{C_2 z K_{\text{met}}}{\lambda} \right) \text{ [dB]}$$

Wobei: $C_2 = 20^1$

λ : Wellenlänge des Schalls bei der betrachteten Oktavbandmittenfrequenz

z : Umweg

K_{met} : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen Effekte

Der Meteo-Korrekturfaktor K_{met} ist ≤ 1 , d.h. er reduziert die Hinderniswirkung (als Folge von Schallstrahlenkrümmungen). Er wird berechnet nach

$$K_{\text{met}} = \exp \left(- \frac{1}{2000} \sqrt{\frac{d_{\text{ss}} d_{\text{sr}} d}{2z}} \right) \text{ für } z > 0$$

wobei: d_{ss} : Abstand Quelle – Hinderniskante

d_{sr} : Abstand Hinderniskante – Empfänger

d : Abstand Quelle – Empfänger direkt

Für Quellen-Empfänger-Abstände unter 100 m kann $K_{\text{met}} = 1$ angenommen werden (bei einer Genauigkeit besser als 1 dB).

¹ bei separater Berücksichtigung der Bodenreflexion wird $C_2 = 40$.

Wenn ein Hindernis vorhanden ist, wird nach ISO 9613-2 der Bodeneffekt ignoriert, d.h. nicht mehr gesondert berechnet.

Vergleich StL-86 und ISO 9613-2

Beide Ansätze basieren auf dem Umweg w bzw. z als wesentlichem Situationsparameter. StL-86 formuliert die Hinderniswirkung direkt im A-Pegel, ISO 9613-2 weist diese frequenzabhängig aus. Für den Vergleich muss daher ein Strassenlärmspektrum angenommen werden. Dazu werden die Oktavbandpegel gemäss dem EMPA Quellenmodell 97 [Heutschi, 1999] verwendet (Tabelle 1). Diese stimmen sehr gut mit den in EN 1793-3 [SN EN 1793-3, 1997] vorgegebenen Werten überein.

	125	250	500	1 k	2 k	4 k
A-bewerteter Oktavbandpegel [dB]	-16	-12	-7	-4	-6	-13

Tabelle 1: Auf 0 dB normierte A-bewertete Oktavbandpegel von Strassenverkehrslärm gemäss dem neuen EMPA Modell.

Vergleich für eine Punktquelle

Die Abbildung 1 zeigt die berechnete Hinderniswirkung für eine Punktquelle mit einem Strassenlärmspektrum nach Tabelle 1 in Abhängigkeit des Umweges w bzw. z gemäss StL-86 und ISO 9613-2 ($C_2=20$). Luftdämpfung und Bodeneffekt sowie die Meteorokorrektur im Falle von ISO 9613-2 wurden ignoriert. Für Umwege (Schirmwerte) grösser ca. 0.025 m liefert StL-86 rund 2 dB(A) höhere Hinderniswirkungen.

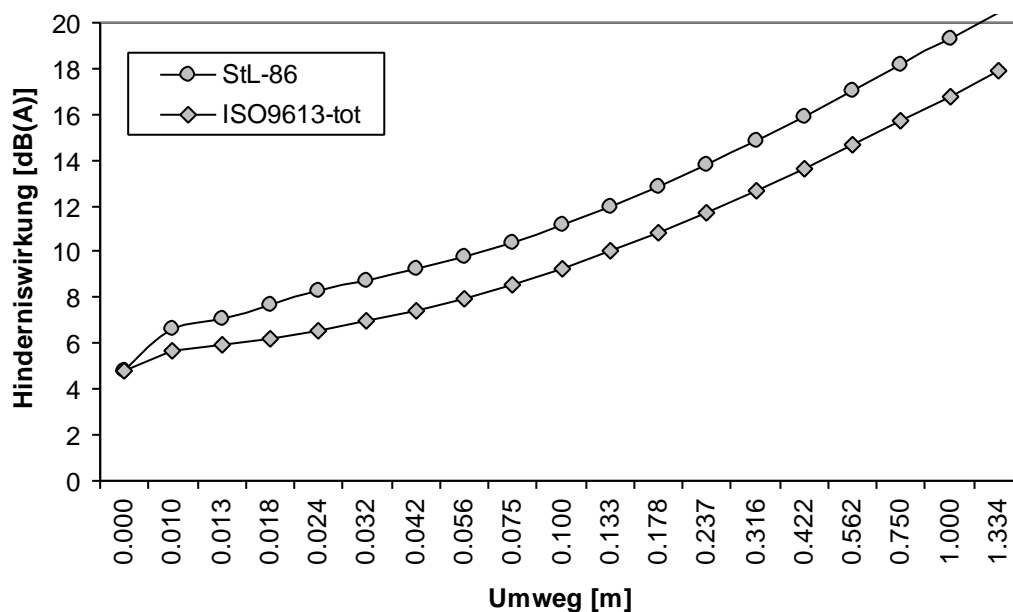


Abbildung 1: Berechnete Hinderniswirkung nach StL-86 bzw. ISO 9613-2 ($C_2=20$) für eine Punktquelle mit einem Strassenverkehrslärmspektrum in Funktion des Umweges w bzw. z

Vergleich für eine Linienquelle

In der Anwendung auf Strassenverkehrslärm interessiert die Hindernisberechnung vor allem für eine Linienquelle. Der Vergleich der Hindernisberechnung wurde deshalb auf die Prototypsituation einer langen geraden Strassen mit einer parallel dazu verlaufenden Lärmschutzwand ausgeweitet. Um die Situationsvielfalt etwas einzuschränken, wurde eine feste Geometrie wie folgt gewählt:

- Abstand Quelle – Empfänger = 50 m
- Abstand Quelle – Lärmschutzwand = 8 m
- Empfängerhöhe = 3 m

Als freier Parameter wurde die Höhe der Lärmschutzwand von 1.5 m bis 5 m variiert. Luftdämpfung und Bodeneffekt sowie die Meteokorrektur im Falle von ISO 9613-2 wurden ignoriert. Wenn die Quellenhöhe standardmässig auf 0.8 m angesetzt wird, zeigt sich ein Unterschied der berechneten Hinderniswirkung von 1.5 .. 2.2 dB(A), wobei jeweils StL-86 die höhere Hinderniswirkung ausweist. Es gibt mittlerweile starke Argumente dafür, dass die Quellenhöhe insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten wo das Reifengeräusch dominiert, reduziert werden sollte. Aus diesem Grund wurde die ISO 9613 Berechnung zusätzlich für eine Quellenhöhe von 0.2 m durchgeführt. Dabei reduzieren sich die Abweichungen zur StL-86 Rechnung. Für niedrige Schirme weist ISO 9613-2 eine 1 dB(A) höhere Hinderniswirkung aus, für hohe Schirme ergibt StL-86 eine 1.5 dB(A) höhere Hinderniswirkung (Abbildung 2).

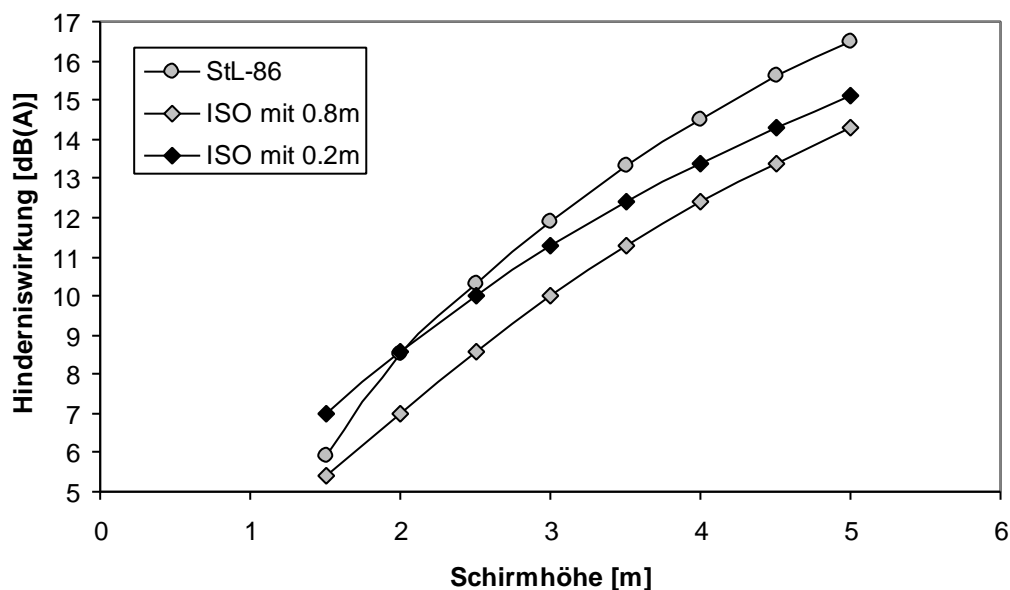


Abbildung 2: Hinderniswirkung für eine Linienquelle in Abhängigkeit der Höhe der Lärmschutzwand, berechnet nach StL-86, nach ISO9613-2 mit Quellenhöhe 0.8 m und nach ISO9613-2 mit Quellenhöhe 0.2 m. Die Lärmschutzwand verläuft im Abstand von 8 m parallel zur Linienquelle, der Empfänger liegt im Abstand von 50 m von der Quelle auf einer Höhe von 3 m.

Schlussfolgerungen

Die obigen Vergleiche der Hindernisformeln aus StL-86 bzw. ISO 9613-2 zeigen, dass bei gleicher Quellenhöhe StL-86 eine deutlich grössere Hinderniswirkung berechnet. Gleichzeitig erscheint die in StL-86 verwendete Quellenhöhe von 0.8 m eher zu hoch zu liegen. Die Annahme einer grösseren Quellenhöhe führt zu einer Verkleinerung der Hinderniswirkung. Es drängt sich daher die Vermutung auf, dass StL-86 aus Sicht der Hinderniswirkung mit einer etwas zu optimistischen Hindernisformel und gleichzeitig mit einer zu pessimistischen Quellenhöhe rechnet, sodass sich die Abweichungen zumindest teilweise aufheben.

4. Übersicht einiger in der Literatur publizierten Hinder- nisformeln

In der Literatur existiert eine grosse Zahl von Formeln zur Berechnung der Hinderniswirkung von Objekten. Diese sind zum Teil empirisch aus Messreihen abgeleitet worden, oder dann stellen sie Näherungen der exakten wellentheoretischen Lösung des Problems der Beugung an der Halbebene oder am Keil dar. Die folgende Zusammenstellung gibt einen kleinen Überblick über Hinder-
nisformeln, die nebst StL-86 und ISO 9613-2 verwendet werden.

Hinderniswirkung nach Maekawa

In der Berechnung der Hinderniswirkung von Schirmen sind die Experimente von Maekawa legendär. Er hat die sogenannte Fresnelzahl N als wichtigsten Einflussparameter erkannt und eingeführt:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

mit:

δ Weglängenunterschied Quelle-Empfänger mit und ohne Hindernis

λ Schallwellenlänge

In seiner ersten diesbezüglichen Publikation [Maekawa, 1968] gibt Maekawa den Zusammenhang zwischen der Hinderniswirkung und der Fresnelzahl N in Form eines Diagramms. Die ermittelte Hinderniswirkung gilt für den Fall einer Punktquelle ohne Bodenreflexion. Wenn eine Bodenreflexion zu berücksichtigen ist, werden zusätzliche Ausbreitungspfade entsprechend der Spiegelquelle bzw. dem Spiegelempfänger berechnet und die Ergebnisse energetisch aufsummiert.

Hinderniswirkung nach Kurze und Anderson

In der Publikation von Kurze und Anderson [Kurze, 1971] wird ein formelmässiger Zusammenhang des oben angesprochenen Maekawa-Diagramms angegeben. Für Punktquellen gilt:

$$\text{Hinderniswirkung} = 5 + 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) \text{ [dB] } \textit{ innerhalb der Schattenzone}$$

$$\text{Hinderniswirkung} = 5 + 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tan \sqrt{2\pi N}} \right) \text{ [dB] } \textit{ ausserhalb der Schattenzone}$$

N ist immer positiv zu verstehen, also auch ausserhalb der Schattenzone. Es wird darauf hingewiesen, dass sich durch das Vorhandensein eines Hindernisses der Bodeneffekt verändert. Dieser Umstand ist zusätzlich zu berücksichtigen.

Hinderniswirkung nach Pierce

Für eine Punktquelle als Anregung und ein einkantiges Hindernis, d.h. einen Schallschirm (siehe Abbildung 3) gibt Pierce [Pierce, 1991] eine aus einer wellentheoretischen Betrachtung des Beugungsphänomens abgeleitete Lösung an:

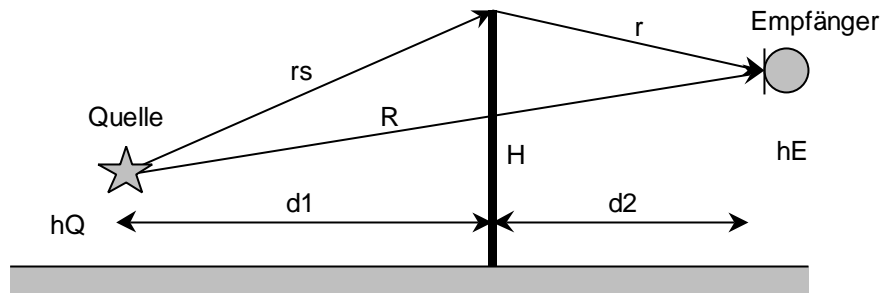


Abbildung 3: Situation zur Beugung am Schirm nach Pierce.

Die Reflexionen an der Bodenfläche werden ignoriert. Die Hinderniswirkung IL , d.h. die Pegelverminderung durch das Hindernis lässt sich dann angeben zu:

$$IL = -10 \log \left| H(X) - \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} A_D(X) e^{i(\pi/2)X^2} \right|^2$$

mit:

$H(X)$: Heaviside Einheitsschrittfunktion, = 0 wenn Empfänger im Schatten, = 1 sonst.

$$X = \sqrt{\frac{2k}{\pi}} (L-R)$$

k : Wellenzahl = $2\pi \frac{f}{c}$

f : Frequenz

c : Schallgeschwindigkeit

L : Umweg um das Hindernis = $rs + r$

R : Direktverbindung Quelle-Empfänger durch das Hindernis hindurch

$A_D(X)$: komplexwertiges Beugungsintegral = $f(X) - i g(X)$

$f(X), g(X)$: auxiliary Fresnel Funktionen

Der direkten Auswertung der Gleichung für die Hinderniswirkung steht entgegen, dass das Beugungsintegral $A_D(X)$ nicht ohne weiteres bestimmt werden kann. Es existieren allerdings Näherungsformeln für die Hilfsfunktionen $f(X)$ und $g(X)$ [NBS Handbook]:

$$f(X) \approx \frac{1 + 0.926X}{2 + 1.792X + 3.104X^2}$$

$$g(X) \approx \frac{1}{2 + 4.142X + 3.492X^2 + 6.67X^3}$$

Hinderniswirkung nach Menounou

Ausgehend von einer exakten analytischen Lösung [Kawai, 1977] wird im Beitrag von Menounou [Menounou, 2000] eine approximative Formel präsentiert, die numerisch einfach zu beherrschen ist und eine grössere Genauigkeit als die Maekawa-Formel verspricht. Die grössere Genauigkeit wird durch Verwendung von drei Parametern zur Beschreibung der Situation erreicht.

$$\text{Hinderniswirkung} = \text{ILs} + \text{ILb} + \text{ILsb} + \text{ILsp}$$

mit:

$$\text{ILs} = 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N1}}{\tanh \sqrt{2\pi N1}} \right) - 1$$

$$\text{ILb} = 20 \log \left(1 + \tanh \left(0.6 \log \left(\frac{N2}{N1} \right) \right) \right)$$

$$\text{ILsb} = \left(6 \tanh(\sqrt{N2}) - 2 - \text{ILb} \right) \left(1 - \tanh(\sqrt{10 N1}) \right)$$

$$\text{ILsp} = -10 \log \left(\frac{1}{\left(\frac{L}{R1} \right)^2 + \left(\frac{L}{R1} \right)} \right) \text{ für Kugelwellen}$$

$$N1 = 2 \frac{L-R1}{\lambda}$$

$$N1 = 2 \frac{L-R2}{\lambda}$$

L: Distanz Quelle - Hinderniskante - Empfänger

R1: Distanz Quelle - Empfänger

R2: Distanz Spiegelquelle – Empfänger, wobei die Quelle an der Hindernisfläche gespiegelt wird.

Hinderniswirkung nach der RLS-90

Die deutsche Richtlinie zur Berechnung von Strassenlärmimmissionen verwendet unten stehende Formel zur Berechnung der Hinderniswirkung. Dabei ist zu beachten, dass die Hinderniswirkung für ein A-bewertetes Strassenlärmspektrum gilt. Die Formel ist daher nicht allgemein verwendbar.

$$\text{Hinderniswirkung} = 10 \log (3 + 80 z K_w) \quad [\text{dB}]$$

mit:

z: Schirmwert = Differenz der Abstände Quelle – Empfänger mit und ohne Hindernis.

K_w : Witterungskorrektur = $\exp \left(-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{A B s}{2z}} \right)$ zur Berücksichtigung gekrümmter Ausbreitung.

A: Abstand Quelle – Hinderniskante

B: Abstand Hinderniskante – Empfänger

s: Abstand Quelle – Empfänger ohne Hindernis

Wenn ein Hindernis auftritt, wird die Bodendämpfung weggelassen!

5. Aktueller Wissensstand zur Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm

In der Literatur existieren relativ wenige nachvollziehbare Angaben zur Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm:

U.S. amerikanisches Strassenlärmmodell TNM:

Das in den USA verwendete Strassenlärmmodell TNM stellt die Emission von Strassenverkehrslärm als von zwei Subquellen ausgehend dar. Die eine Subquelle befindet sich auf Höhe 0.0 m, die andere Subquelle auf 1.5 m für Personenwagen und leichte Lastwagen bzw. auf 3.66 m für schwere Lastwagen. Diese Höhenangaben wurden mittels Messungen unter Verwendung eines Mikrophonarrays gefunden [Glegg, 1996].

Deutsches Strassenlärmmodell RLS-90:

Die deutsche Richtlinie für den Lärmschutz an Strassen [RLS-90] aus dem Jahre 1990 nimmt als Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm 0.5 m an.

Messungen zur Quellenhöhe von Lastwagen, Graf, 1997/1998:

Im Auftrag des BUWAL hat Sulzer Innotec 1997 Untersuchungen zur akustischen Quellenhöhe von Lastwagen mit einem Arraymikrophon durchgeführt [Graf, 1997], [Graf, 1998]. Die gefundene vertikale Verteilung der Quellenleistung lässt sich durch eine Quelle auf der Strassenoberfläche und eine Quelle auf 0.8 m über Boden nachbilden. Insbesondere zeigte sich, dass im normalen Fahrzeugmix besondere Quellen wie Kühlaggregate oder hochliegende Auspufföffnungen vernachlässigt werden können.

Britisches Strassenlärmmodell CRTN:

Das in Gross-Britannien verwendete Strassenlärmmodell Calculation of Road Traffic Noise [CRTN, 1988] aus dem Jahre 1988 verwendet als Quellenhöhe 0.5 m.

6. Diskussion der Problemstellung

Möglichkeiten zur messtechnischen Bestimmung der Quellenhöhe

Es sind verschiedene Methoden zur Bestimmung der repräsentativen Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm denkbar. Sie lassen sich in direkte und indirekte Methoden unterteilen.

Die direkten Methoden untersuchen unmittelbar die Quelle mit richtungs- bzw. ortempfindlichen Sensoren. Dazu kommen Mikrofonarrays mit entsprechenden Beamforming-Algorithmen [Pumphrey, 1993], akustische Holographie [Hald, 1989] oder Richtmikrophone, die unterschiedliche Raumwinkel abdecken in Frage.

Die indirekten Methoden beobachten nicht direkt die Quelle sondern nutzen einen Schallausbreitungseffekt aus der möglichst sensitiv hinsichtlich der Quellenhöhe ist. Hierbei bietet sich z.B. die Messung hinter einem Schirm (Hindernis) oder eine Messung knapp über Boden mit Auswertung der Bodeninterferenzen an.

Lösungsansatz

Für die vorliegende Untersuchung wird als Verfahren die Messung von Strassenverkehrslärm hinter einem Hindernis gewählt, da die dabei entstehende Information in direktem Zusammenhang mit der zentralen Frage der Berechnung der Hinderniswirkung steht. Insbesondere kann es interessieren, nicht nur die physikalisch richtige Quellenhöhe zu bestimmen, sondern auch jene Quellenhöhe zu suchen, die unter Verwendung der entsprechenden Hindernisformel die richtige, d.h. gemessene Einfügungsdämpfung liefert. Es ist davon auszugehen, dass die repräsentative Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm von der Geschwindigkeit, dem Belag und einer allfälligen Steigung abhängig ist. Überdies werden sich Personen- und Lastwagen unterscheiden. Die Messungen sollen auf einzelnen Vorbeifahrtpegeln basieren, d.h. sie betrachten also nur jeweils die Situation im Moment, da sich das Fahrzeug auf Höhe des Mikrophons befindet.

Als zentrale Frage stellt sich die Aufgabe, eine Geometrie zu finden, in der die Hinderniswirkung möglichst sensitiv auf die gesuchte Grösse der Quellenhöhe reagiert. Das bedeutet, dass sich eine kleine Änderung der Quellenhöhe in einem möglichst grossen Pegelunterschied am Mikrofon hinter dem Hindernis manifestieren soll. Gleichzeitig soll die Messsituation aber nicht eine zu exotische Konfiguration aufweisen, sodass eine gewisse Nähe zu realen Situationen gegeben ist. In der Folge wird von einer Situation mit Quelle, Lärmschutzwand und Empfangspunkt wie in Abbildung 4 gezeigt, ausgegangen.

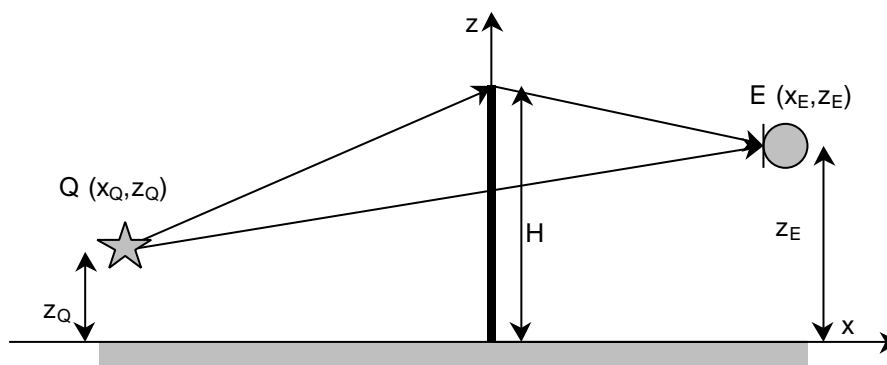


Abbildung 4: Prinzipielle Messsituation mit Quelle Q , Lärmschutzwand der Höhe H und Empfänger E .

Am Fusspunkt der Lärmschutzwand befindet sich der Ursprung des zweidimensionalen Koordinatensystems. Die Quelle ist durch die Koordinaten (x_Q, z_Q) , der Empfänger durch die Koordinaten (x_E, z_E) , die Lärmschutzwand durch die Höhe H definiert.

Ausgehend von der ISO 9613 Hindernisformel lässt sich die Hinderniswirkung D_z angeben zu

$$D_z = 10 \log \left(3 + \frac{20}{\lambda} \left(\sqrt{x_Q^2 + (H - z_Q)^2} + \sqrt{x_E^2 + (H - z_E)^2} - \sqrt{(x_E - x_Q)^2 + (z_E - z_Q)^2} \right) \right)$$

Es werden nun jene Geometrieparameter gesucht, für die die Sensitivität S

$$S = \frac{\delta D_z}{\delta x_Q}$$

maximiert wird. Um die Vielfalt der möglichen Situationen etwas einzuschränken, wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

$$\begin{aligned} 0.1 &< z_Q < 1.0^2 \\ -8.0 &< x_Q < -3.0 \\ 1.5 &< H < 5.0 \\ 0.5 &< z_E < 5.0 \\ 1.0 &< x_E < 10.0 \end{aligned}$$

Eine Optimierung innerhalb der obigen Schranken unter Annahme einer zu erwartenden Quellenhöhe z_Q von 0.5 m führt zu den in Tabelle 2 dargestellten Ergebnissen.

Frequenz [Hz]	x_Q [m]	H [m]	x_E [m]	z_E [m]	S [dB/dm]	D_z [dB]
250	-3.0	1.5	10.0	0.6	-0.33	7.8
500	-3.0	1.5	10.0	1.9	-0.46	7.6
1000	-3.0	1.5	10.0	2.8	-0.64	7.5
2000	-3.0	1.5	10.0	3.4	-0.90	7.4

Tabelle 2: Zusammenstellung der gemäss der ISO 9613-Hindernisformel optimalen Geometrieparameter x_Q (horizontaler Abstand Quelle-Wand), H (Wandhöhe), x_E (horizontaler Abstand Wand-Empfänger), z_E (Empfänger-/Mikrofonhöhe), der sich dabei ergebenden Sensitivität S der Hinderniswirkung für eine Höhenänderung des Quellenpunktes sowie der erwarteten Hinderniswirkung D_z bei einer Quellenhöhe von 0.5 m.

Aus

Tabelle 2 scheint sich als Strategie abzuzeichnen, dass die Quelle möglichst nahe und das Mikrofon möglichst weit weg von der Wand sein sollte. Die Wandhöhe sollte möglichst gering sein. Dabei ergeben sich abhängig von der Frequenz Sensitivitäten der Hinderniswirkung von 0.3 .. 0.9 dB pro 0.1 m Quellenhöhenänderung. Die Hinderniswirkung D_z beträgt rund 7.5 dB und liegt damit in einem realistischen und einer Messung zugänglichen Bereich. Für eine praktische Messung wäre ein kleinerer Mikrofonabstand und ein etwas grösserer Quellenabstand vorteilhaft. Der gewünschte grössere Quellenabstand liegt vor allem darin begründet, dass die Position der Quelle innerhalb der Fahrspur nicht so genau bekannt ist und relativ stark streuen kann. Die Wandhöhe

² Die Quellenhöhe ist nicht ein eigentlicher freier Parameter sondern die gesuchte Grösse. Es wird vorerst von einer zu erwartenden Höhe von 0.5 m ausgegangen.

von 1.5 m scheint eher etwas klein zu sein. In praktischen Fällen werden typisch Wandhöhen ab rund 2 m eingesetzt. Die

Tabelle 3 zeigt die optimalen Mikrofonhöhen und die Sensitivitäten bei einer Wandhöhe von 2.0 m, einem Quellenabstand von 6.0 m und einem Mikrofonabstand von 3.0 m

Frequenz [Hz]	x_Q [m]	H [m]	x_E [m]	z_E [m]	S [dB/dm]	D_z [dB]
250	-6.0	2.0	3.0	1.4	-0.15	7.7
500	-6.0	2.0	3.0	1.8	-0.22	7.7
1000	-6.0	2.0	3.0	2.1	-0.30	7.5
2000	-6.0	2.0	3.0	2.3	-0.43	7.4

Tabelle 3: Zusammenstellung der gemäss der ISO 9613-Hindernisformel optimalen und an praktische Randbedingungen angepassten Geometrieparameter und der sich dabei ergebenden Sensitivität S der Hinderniswirkung.

Wenn darauf verzichtet wird, mehrere Mikrophone für verschiedene Frequenzen einzurichten ergeben sich die Werte nach

Tabelle 4.

Frequenz [Hz]	x_Q [m]	H [m]	x_E [m]	z_E [m]	S [dB/dm]	D_z [dB]
250	-6.0	2.0	3.0	2.0	-0.13	5.9
500	-6.0	2.0	3.0	2.0	-0.21	6.8
1000	-6.0	2.0	3.0	2.0	-0.30	8.2
2000	-6.0	2.0	3.0	2.0	-0.39	10.1

Tabelle 4: Zusammenstellung der gemäss der ISO 9613-Hindernisformel optimalen und an praktische Randbedingungen angepassten Geometrieparameter und der sich dabei ergebenden Sensitivität S der Hinderniswirkung wenn für alle Frequenzen mit der gleichen Empfänger-/Mikrofonhöhe gearbeitet wird.

Der allgemeine Messaufbau befolgt die Vorgaben von ISO [ISO 10847]. Dabei wird die sogenannte *indirect measurement method* verwendet. Dazu werden zwei möglichst nahe beieinander liegende Querschnitte definiert, wobei der eine die zu untersuchende Wand enthält, der andere auf offener Strasse liegt. In beiden Querschnitten wird ein Probemikrofon an jenem Punkt installiert, für den die Hinderniswirkung bestimmt werden soll. Die Pegeldifferenz der beiden Messpunkte bezeichnet im Wesentlichen die Hinderniswirkung. Um zu korrigieren, dass sich die Emission des Fahrzeuges allenfalls von einem Querschnitt zu anderen verändert hat, wird zusätzlich je ein Referenzmikrofon installiert. Dieses Mikrofon wird im Querschnitt mit der Wand in der Ebene der Wand 1.5 m oberhalb der Wandkante installiert. Die analoge Geometrie gilt auch für das Referenzmikrofon im Querschnitt ohne Wand.

Die interessierende Hinderniswirkung IL ergibt sich dann zu

$$IL = L_{POW} - L_{PMW} - (L_{REFOW} - L_{REFMW}) \text{ [dB]}$$

mit:

L_{POW} : Pegel am Probemikrofon im Querschnitt ohne Wand

L_{PMW} : Pegel am Probemikrofon im Querschnitt mit Wand

L_{REFOW} : Pegel am Referenzmikrofon im Querschnitt ohne Wand

L_{REFMW} : Pegel am Referenzmikrofon im Querschnitt mit Wand

Der frequenzmässige Schwerpunkt von A-bewertetem Strassenverkehrslärm liegt im Bereich 500..1'000 Hz. Die Hinderniswirkung und die darauf basierende Quellenhöhe wird demzufolge nur in den beiden Oktaven 500 Hz und 1 kHz ausgewertet.

7. Messungen

Vorbereitende Lautsprecher-Referenzmessung vom 27.6.2000

Am 27.6.2000 wurde auf einem Parkplatz mit Asphaltbelag eine Referenzmessung an einer mobilen Lärmschutzwand mit einem Lautsprecher auf unterschiedlicher Höhe durchgeführt. Das Ziel bestand in der genauen Ermittlung der Hinderniswirkung für eine exakt definierte Geometrie. Damit sollte eine Kontroll- bzw. Kalibrationsmöglichkeit von Hindernisberechnungen bereitgestellt werden. Die Abbildung 5 zeigt die Situation im Schnitt.

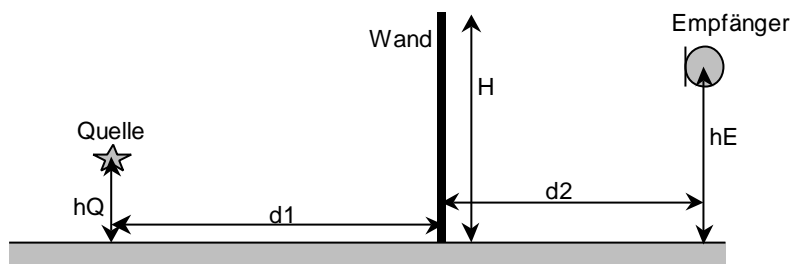


Abbildung 5: Situation der Lautsprecherreferenzmessung mit den Abmessungen $h_Q = 0.2 \dots 0.8 \text{ m}$, $d_1 = 6.0 \text{ m}$, $H = 2.04 \text{ m}$, $d_2 = 3.0 \text{ m}$, $h_E = 2.0 \text{ m}$.

Als Quelle wurde der Lautsprecher-Rundstrahler B&K 4295 ("Vase") verwendet. Der Schalldruck am Empfänger wurde mit dem Studiomikrofon B&K 4006 (S/N 1085366) auf HHB DAT G aufgezeichnet. Mit dem Korrelationsmesssystem MLSSA wurde jeweils die Impulsantwort von der Quelle zum Mikrofon bestimmt. Die Impulsantworten wurden oktavbandgefiltert (500 Hz und 1 kHz) quadriert und aufintegriert um den Energieinhalt zu ermitteln (MLSSA Macro: SLQ.mac, angepasstes MODEVAL). Es wurden die Quellenhöhen 0.2, 0.4, 0.6 und 0.8 m untersucht. Die Messungen wurden einmal mit und einmal ohne Wand durchgeführt. Aus den beiden Oktavwerten für 500 Hz und 1 kHz wurde durch energetische Mittelwertbildung die durchschnittliche Hinderniswirkung, d.h. der Pegelunterschied mit und ohne Wand bestimmt (Abbildung 6).

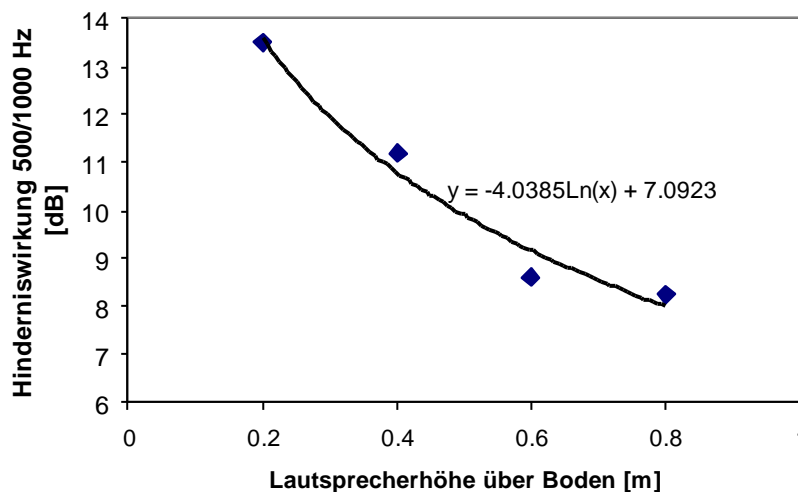


Abbildung 6: Gemessene Hinderniswirkung als Mittelwert in den Oktaven 500 und 1000 Hz bei der Lautsprecherreferenzmessung für unterschiedliche Quellenhöhen über Boden in der oben beschriebenen Situation.

Die Hinderniswirkung lässt sich in der beschriebenen Situation angeben zu

$$IL = 7.1 - 4.04 \ln(h) \text{ [dB]}$$

mit:

IL: Hinderniswirkung als Mittelwert der 500 und 1000 Hz Oktave in dB

Ln(h): natürlicher Logarithmus

h: Höhe der Quelle über Boden in m im Bereich zwischen 0.2 und 0.8 m.

Die Auflösung nach der Höhe h ergibt sich zu

$$h = \exp\left(\frac{7.1 - IL}{4.04}\right) \text{ [m]}$$

Auf dieses Ergebnis wird in Abschnitt 0 zurückgegriffen werden.

Referenzmessung an stehendem Personenwagen

In einem zweiten Durchgang wurde ein Personenwagen als Quelle verwendet (Opel Astra). Die Messungen wurden im Stillstand mit Drehzahlen von 4000 und 5000 U/min durchgeführt. Für die Hinderniswirkung wurde der Pegel am gleichen Messmikrofon einmal mit und einmal ohne Wand gemessen, wobei zusätzlich eine Quellenwertkorrektur anhand eines Referenzmikrophones 0.7 m oberhalb der Wandkante vorgenommen wurde. Damit wurden Unterschiede hinsichtlich des Emissionspegels zwischen den beiden Durchgängen mit und ohne Wand ausgeglichen. In den Oktaven 500 Hz und 1 kHz ergaben sich Hinderniswirkungen von 10.3 dB (500 Hz) bzw. 13.3 dB (1 kHz), entsprechend einem Mittelwert von 12.1 dB. Ein Vergleich mit der aus der Lautsprecherreferenzmessung gefundenen Beziehung zur Höhenabhängigkeit der Hinderniswirkung lässt auf eine repräsentative Quellenhöhe von 0.3 m schliessen. Es ist zu bemerken, dass der ruhende Personenwagen selbstverständlich kein Roll- und allfälliges aerodynamisches Geräusch aufweist und deshalb nicht in einem üblichen Betriebszustand ist.

Messungen am fliessenden Verkehr

Allgemeine Messanordnung für Messungen am fliessenden Verkehr

Für die Messungen am frei fliessenden Verkehr wurde eine allgemeine Messanordnung gemäss Abbildung 7 verwendet, wobei jeweils zwei eng benachbarte Querschnitte – einmal mit und einmal ohne Wand – untersucht wurden (Abbildung 8). Damit standen die Pegel-Zeitverläufe an insgesamt vier Mikrofonen für die Auswertung zur Verfügung.

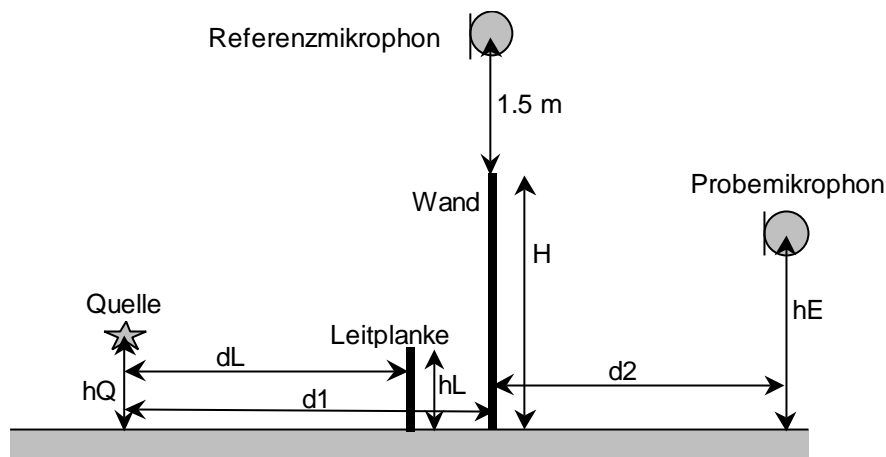


Abbildung 7: Allgemeine Messanordnung für die Untersuchungen der Hinderniswirkung am frei fließenden Verkehr.

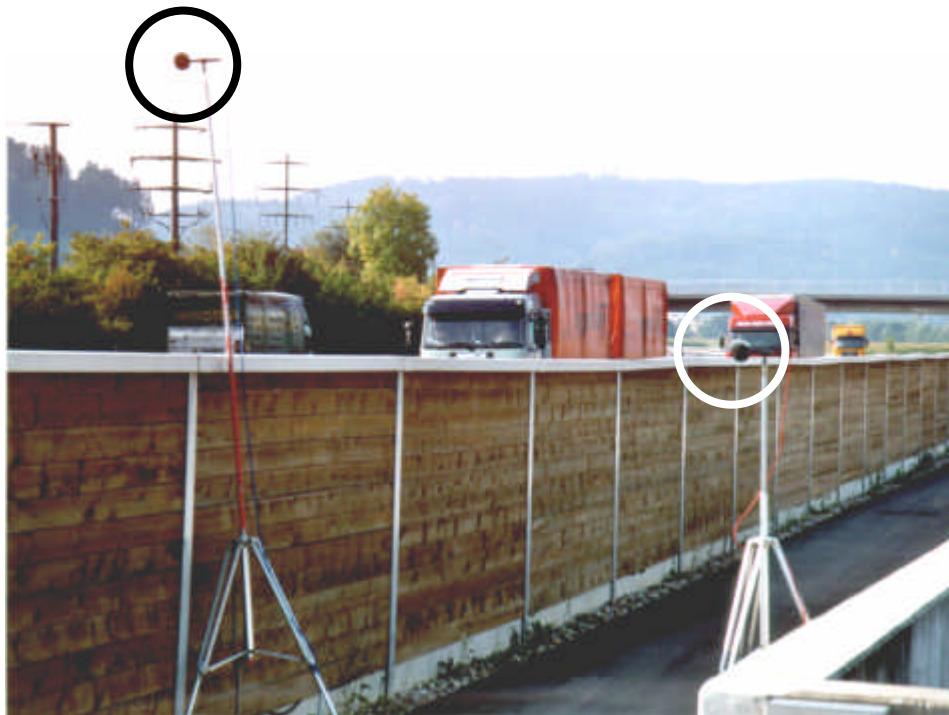


Abbildung 8: Beispiel einer Mikrofonanstellung (heller und dunkler Kreis) im Querschnitt mit Lärmschutzwand (Messung Dagmersellen).

Auswertestrategie der Messungen am fließenden Verkehr

Während den Messungen wurden die Mikrophonesignale auf digitale Tonbandgeräte (HHB-DAT) aufgezeichnet. Vor Ort wurden lediglich die Uhrzeiten mit sauberen, einzeln aufgetretenen Vorbeifahrten, getrennt nach Personen- und Lastwagen protokolliert. Im Labor wurden ab den Tonbandaufnahmen mit dem Terzbandanalysator Norsonic 840, (EMPA Nr. 3) die Zeitverläufe der Terzspektren (Kurzzeit-Leq) mit einer Auflösung von 10 ms erzeugt.

Die Auswertung der Hinderniswirkung wurde auf die Differenz der Vorbeifahrtpegel an den verschiedenen Mikrofonen zurückgeführt. Der Vorbeifahrtpegel entspricht im Prinzip jenem Pegel, den ein mit dem Fahrzeug mitgeführtes Mikrofon registrieren würde. Bei einer Messung an einem festen Punkt am Strassenrand produziert eine Fahrzeugvorbeifahrt einen Pegel-Zeitverlauf, der

einer Glockenkurve ähnlich ist. Der gesuchte Vorbeifahrtpegel entspricht dem Maximalwert der Glockenkurve. Da das Fahrzeuggeräusch einen stochastischen Charakter aufweist, gelingt die zuverlässige Pegelbestimmung nur durch Mittelung über ein gewisses Zeitfenster. Wenn dieses Zeitfenster zu kurz gewählt wird, ergibt sich eine grosse statistische Streuung der ermittelten Pegel. Wenn das Zeitfenster zu gross ist, wird der Vorbeifahrtpegel durch die Verschmierung über einen längeren Abschnitt der Vorbeifahrt systematisch unterschätzt. Anhand von ausführlichen Computersimulationen wurde als optimaler Wert für das Zeitfenster 100 ms gefunden. Die Pegelunterschätzung liegt damit unter 0.1 dB und die stochastische Unsicherheit der Pegelbestimmung ist im Frequenzband von 400 bis 1250 Hz mit 90% Wahrscheinlichkeit kleiner als 1 dB³.

Aus den Zeitreihen der Terzspektralen wurde mit einer eigens für diesen Zweck geschriebenen Nachbearbeitungssoftware (Abbildung 9) der Maximalpegel jedes Vorbeifahrereignisses bestimmt und daraus durch Integration über +/- 50 ms rund um den Maximalwert der Vorbeifahrtpegel in den Terzen von 400 bis 1250 Hz gefunden.

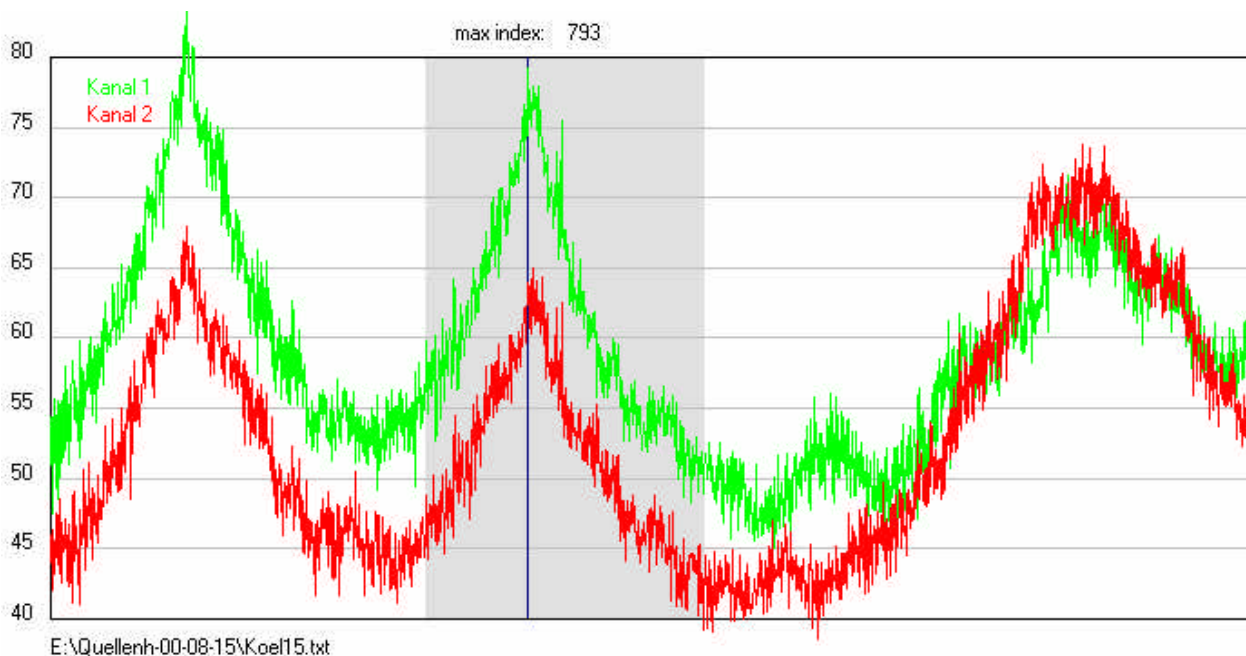


Abbildung 9: Beispiel eines gemessenen Pegel-Zeitverlaufs für das Referenzmikrophon über der Wand (Kanal 1) und das Probemikrophon hinter der Wand (Kanal 2). Im manuell zu definierenden grau hinterlegten Zeitabschnitt wird durch das Auswerteprogramm die Position des Pegelmaximums bestimmt (vertikale Linie) und dann durch Integration über +/- 50 ms der Vorbeifahrtpegel berechnet.

Die Zusammenstellungen auf den folgenden Seiten zeigen für die verschiedenen Messserien eine kurze Situationsbeschreibung und verschiedene Grafiken mit Vorauswertungen.

Die Grafik **Referenz mit und ohne Wand** zeigt den Vergleich der Pegel an den Referenzmikrophonen im Querschnitt mit und ohne Wand in einer XY-Darstellung. Die Punkte sollten theoretisch auf der eingezeichneten Diagonalen liegen. Abweichungen davon sind auf die variablen Emissionen der Fahrzeuge in den beiden Querschnitten zurückzuführen. Die Kontrolle zeigt, dass keine systematische Beeinflussung der Messung im Querschnitt mit Wand aufgetreten ist, d.h. die Höhe von 1.5 m oberhalb der Wandkante als Referenzmesspunkt ist ausreichend.

³ Die Abschätzung der Unsicherheit der Pegelbestimmung eines stochastischen Signals führt auf die Analyse der Chi-Quadrat Verteilung. Dazu ist die Anzahl Freiheitsgrade $n = 2BT$ der Messung zu bestimmen, wobei B der Bandbreite und T der Mittelungszeit entspricht.

Die Grafik **Pegeldifferenz Referenz – Probemikrophon ohne Wand** zeigt die Differenz der beiden Mikrofonpegel im Querschnitt ohne Wand. Durch den Vergleich mit der erwarteten geometrischen Verdünnung (das Probemikrophon ist weiter entfernt als das Referenzmikrophon) kann daraus auf eine allfällige zusätzliche Abschwächung des einen oder anderen Pfads geschlossen werden. So zeigt sich z.B. in dieser Grafik die abschirmende Hinderniswirkung durch die Leitplanke für das Probemikrophon.

Die Grafik **Hinderniswirkung: Probe ohne – Probe mit Wand** stellt die Pegeldifferenz der beiden Probemikrophone im Querschnitt ohne und mit Wand dar, wobei zusätzlich die Pegeldifferenz an den beiden Referenzmikrophonen gemäss Abschnitt 0 berücksichtigt wurde. Diese Grafik stellt die in der Folge weiterverwendete Hinderniswirkung dar.

Die Grafik **Hinderniswirkung: Referenz – Probe mit Wand –x.x** zeigt die Pegeldifferenz des Referenzmikrophons zum Probemikrophon im Querschnitt mit Wand, wobei zusätzlich die erwartete geometrische Verdünnung (x.x dB) berücksichtigt wurde. Diese Auswertung hat nur informativen Charakter und wird nicht weiter verwendet.

Messung an der Frankentalerstrasse in Zürich-Höngg

In der Nacht vom 22. auf den 23. Juli 2000 wurden Messungen an der Lärmschutzwand im Bereich des Rütihofs an der Frankentalerstrasse in Zürich-Höngg durchgeführt. Die Messungen beschränkten sich auf die Fahrtrichtung Frankental. Die Strecke weist ein leichtes Gefälle auf und ist mit einer Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h signalisiert. Mit je zwei Mikrofonen (B&K Studiomikrofon 4006) wurde in einem Querschnitt mit und in einem Querschnitt ohne Wand gemessen. Die beiden Querschnitte lagen rund 30 m voneinander entfernt. Die Wand liegt in einem Abstand von 7.90 m von der Mitte der untersuchten Fahrspur. Es wurde angenommen, dass die Fahrzeuge in der Mitte der Fahrspur verkehren und der Quellenort 0.50 m von der Fahrspurmitte aus gegen die Wand hin verschoben liegt. Damit ergibt sich ein Abstand vom Quellenpunkt zur Wand von 7.40 m. Die Mikrofonanordnungen waren in beiden Querschnitten identisch: das Probemikrofon wurde 2.00 m hinter der Wand auf gleicher Höhe wie die Wand (2.40 m) positioniert. Das Referenzmikrofon wurde in der Ebene der Wand auf einer Höhe von 3.90 m (entsprechend 1.50 m oberhalb der Wandkante) eingerichtet. Die Mikrophonesignale wurden direkt auf DAT aufgezeichnet. Zwischen 22.40 und 00.00 Uhr konnten 25 geeignete PW Einzelvorbeifahrten registriert werden.



Abbildung 10: Situation zur Messung an der Frankentalerstrasse in Zürich Höngg. A bezeichnet den Querschnitt ohne, B den Querschnitt mit Wand.

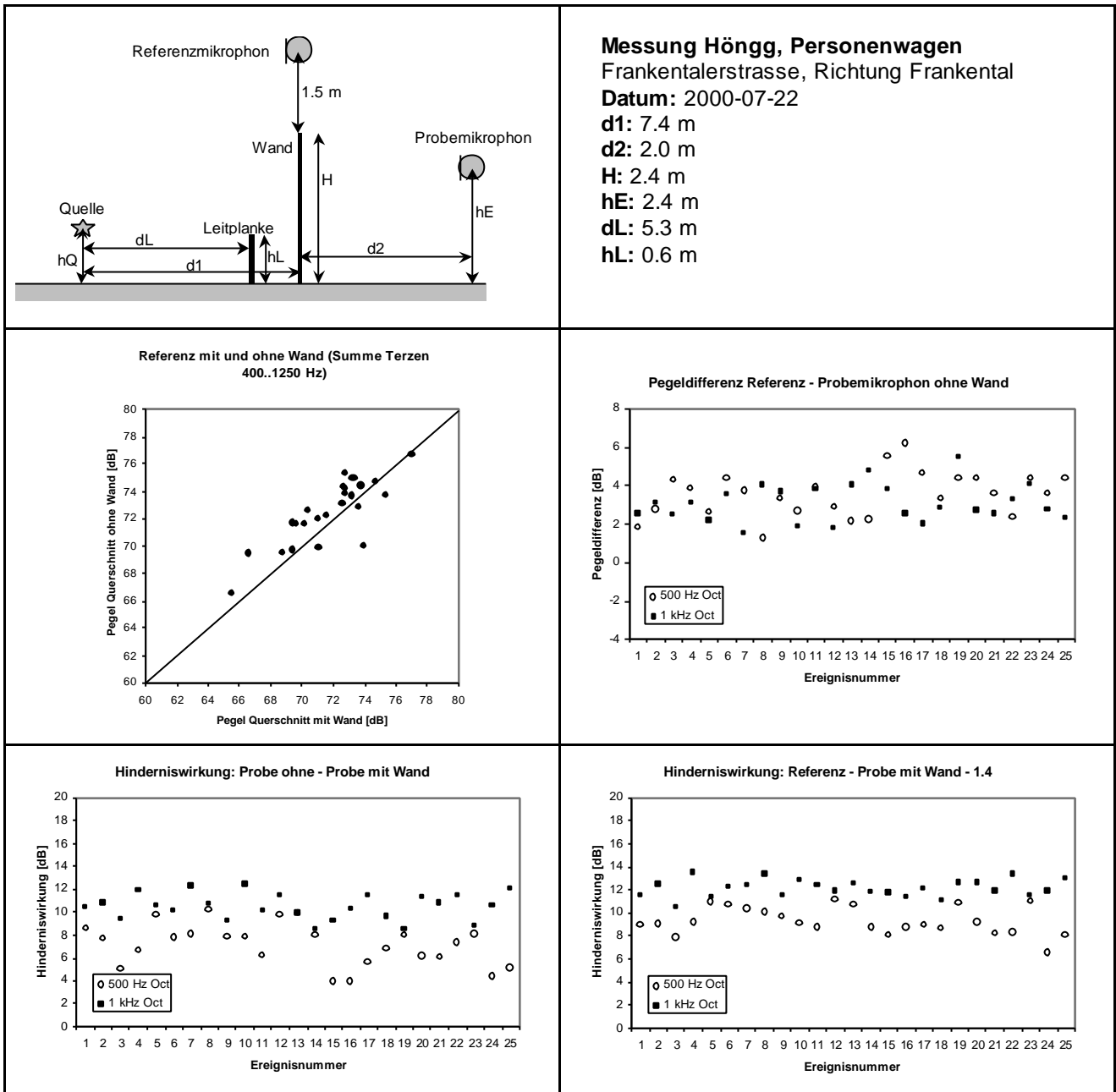


Abbildung 11: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hinderniswirkung Probe (ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	7.5	10.6

Messung an der Affolternstrasse in Regensdorf

Am 9. August 2000 wurden Messungen an einer provisorisch aus mehreren Elementen errichteten Lärmschutzwand an der Affolternstrasse in Regensdorf durchgeführt. Die Strecke ist mit einer Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h signalisiert. Mit je zwei Mikrofonen (B&K Studiomikrofon 4006) wurde in einem Querschnitt mit und in einem Querschnitt ohne Wand gemessen. Die beiden Querschnitte lagen rund 15 m voneinander entfernt. Die Wand liegt in einem Abstand von 4.20 m von der Mitte der untersuchten Fahrspur. Es wurde angenommen, dass die Fahrzeuge in der Mitte der Fahrspur verkehren und der Quellenort 0.50 m von der Fahrspurmitte aus gegen die Wand hin verschoben liegt. Damit ergibt sich ein Abstand vom Quellenpunkt zur Wand von 3.70 m. Die Mikrofonanordnungen waren in beiden Querschnitten identisch: das Probemikrofon wurde 3.00 m hinter der Wand auf gleicher Höhe wie die Wand (2.15 m) positioniert. Das Referenzmikrofon wurde in der Ebene der Wand auf einer Höhe von 3.65 m (entsprechend 1.50 m oberhalb der Wandkante) eingerichtet. Die Mikrofonensignale wurden direkt auf DAT aufgezeichnet. Zwischen 11.00 und 14.30 Uhr konnten 50 geeignete PW Einzelvorbeifahrten registriert werden.



Abbildung 12: Situation zur Messung an der Affolternstrasse in Regensdorf. A bezeichnet den Querschnitt ohne, B den Querschnitt mit Wand.

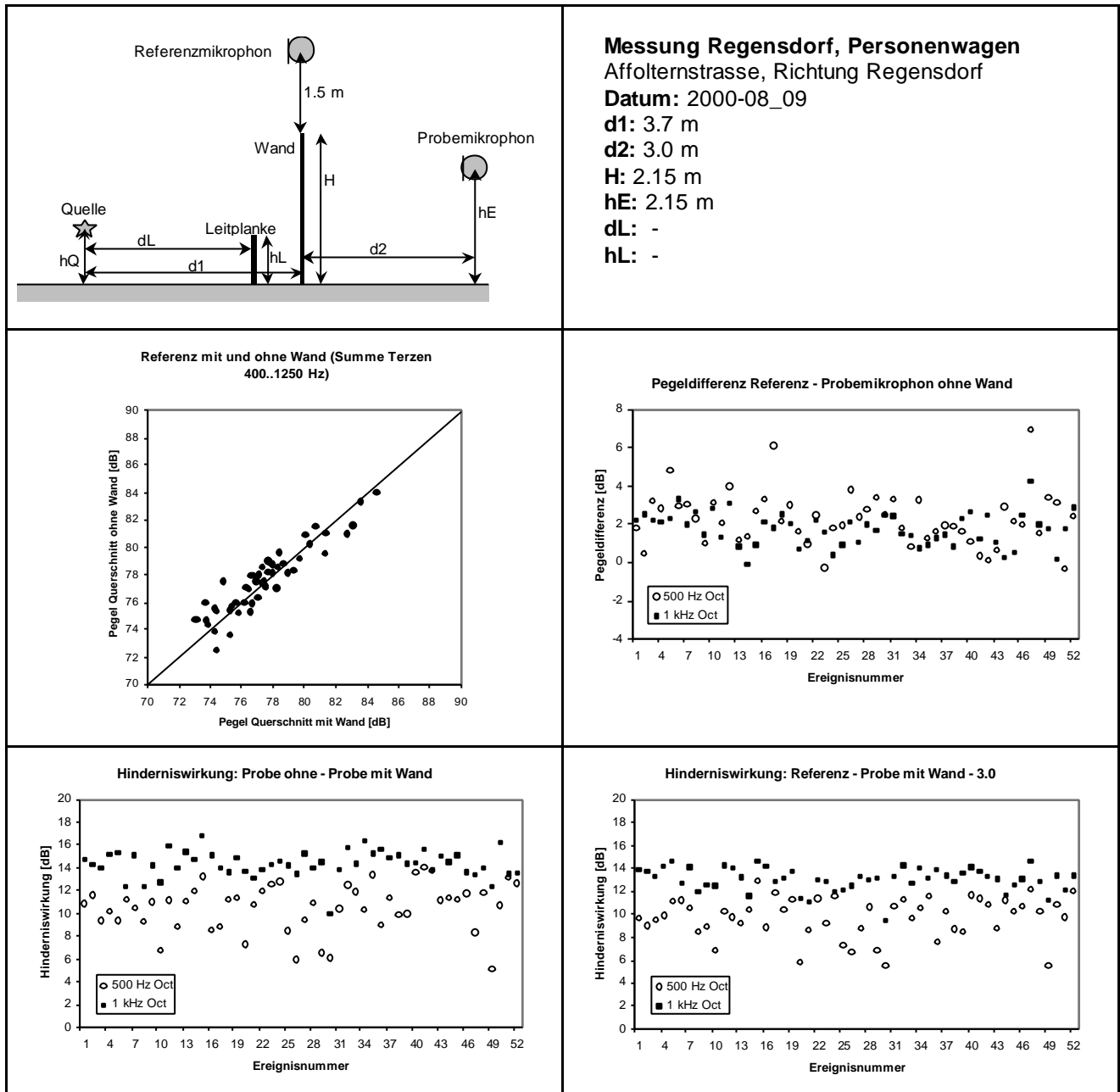


Abbildung 13: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hinderniswirkung Probe (ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	10.9	14.4

Messung an der Autobahn A1 bei Entfelden

In der Nacht vom 15. auf den 16. August 2000 wurden Messungen an der neu erstellten Lärm-schutzwand "Oberfeld" auf der Höhe Entfelden an der A1 durchgeführt. Mit je zwei Mikrophonen (B&K Studiomikrofon 4006) wurde in einem Querschnitt mit und in einem Querschnitt ohne Wand gemessen. Die beiden Querschnitte lagen rund 100 m voneinander entfernt. Die Wand liegt in einem Abstand von 6.05 m von der Mitte der Normalspur. Es wurde angenommen, dass die Fahrzeuge in der Mitte der Fahrspur verkehren und der Quellenort 0.50 m von der Fahrspurmitte aus gegen die Wand hin verschoben liegt. Damit ergibt sich ein Abstand vom Quellenpunkt zur Wand von 5.55 m. Die Mikrofonanordnungen waren in beiden Querschnitten identisch: das Probemikrofon wurde 2.00 m hinter der Wand auf gleicher Höhe wie die Wand (2.50 m) positioniert. Das Referenzmikrofon wurde in der Ebene der Wand auf einer Höhe von 4.00 m (entsprechend 1.50 m oberhalb der Wandkante) eingerichtet. Die Mikrophonsignale wurden direkt auf DAT aufgezeichnet. Zwischen 22 und 01.30 Uhr konnten 67 PW Einzelvorbeifahrten und 13 LKW Einzelvorbeifahrten registriert werden.

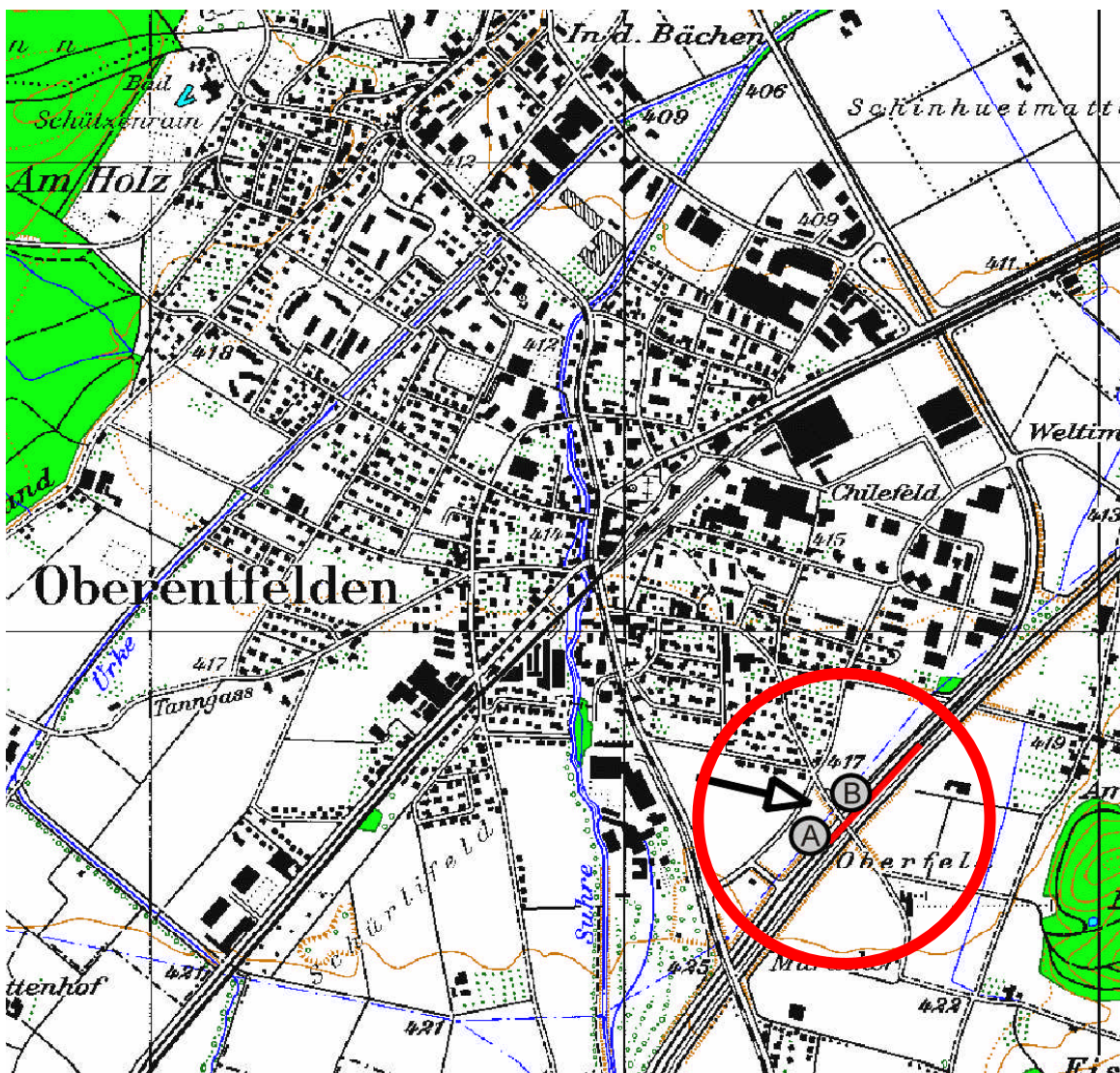


Abbildung 14: Situation zur Messung an der Autobahn A1 in Entfelden. A bezeichnet den Querschnitt ohne, B den Querschnitt mit Wand.

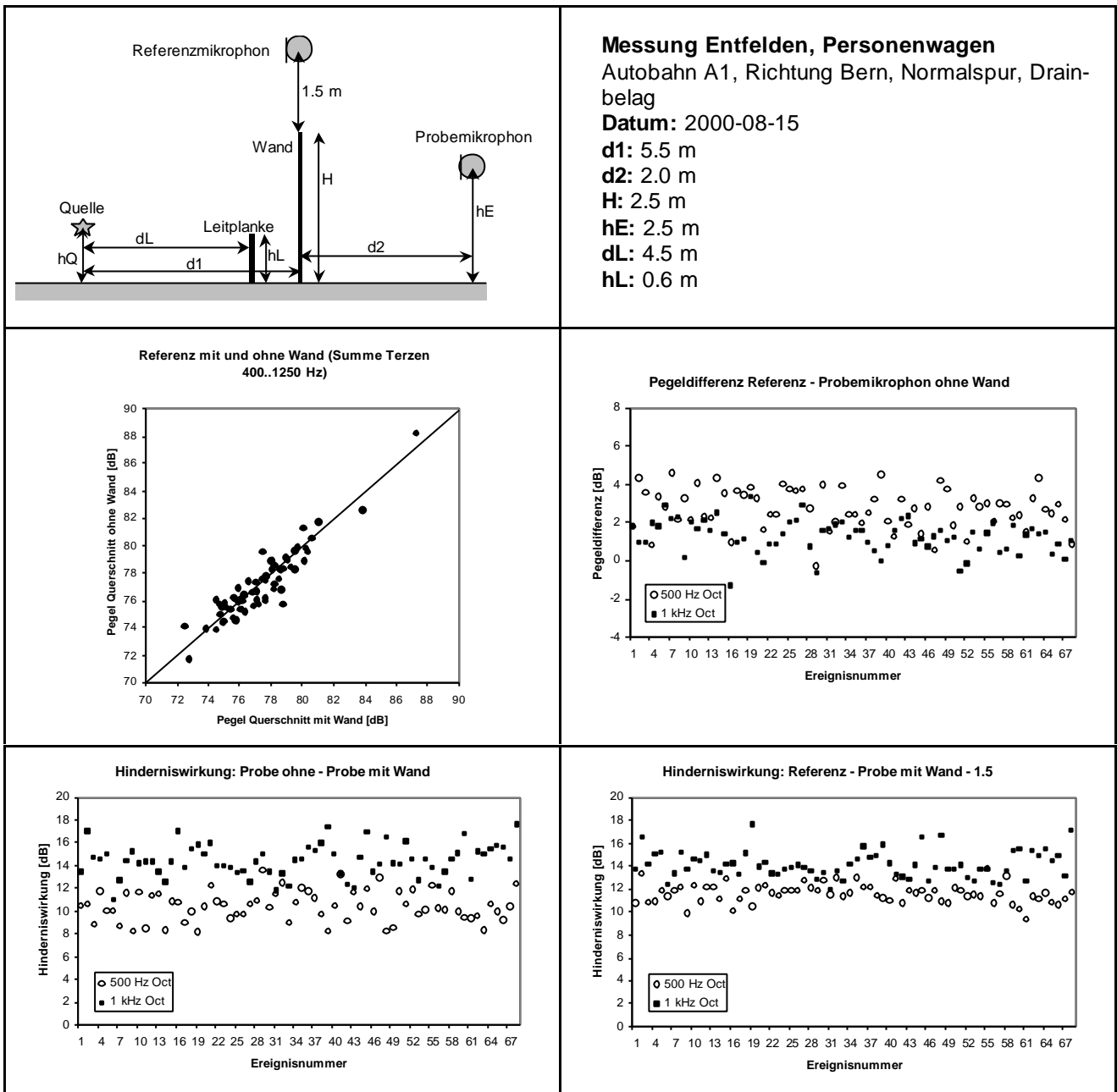


Abbildung 15: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hinderniswirkung Probe (ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	10.6	14.6

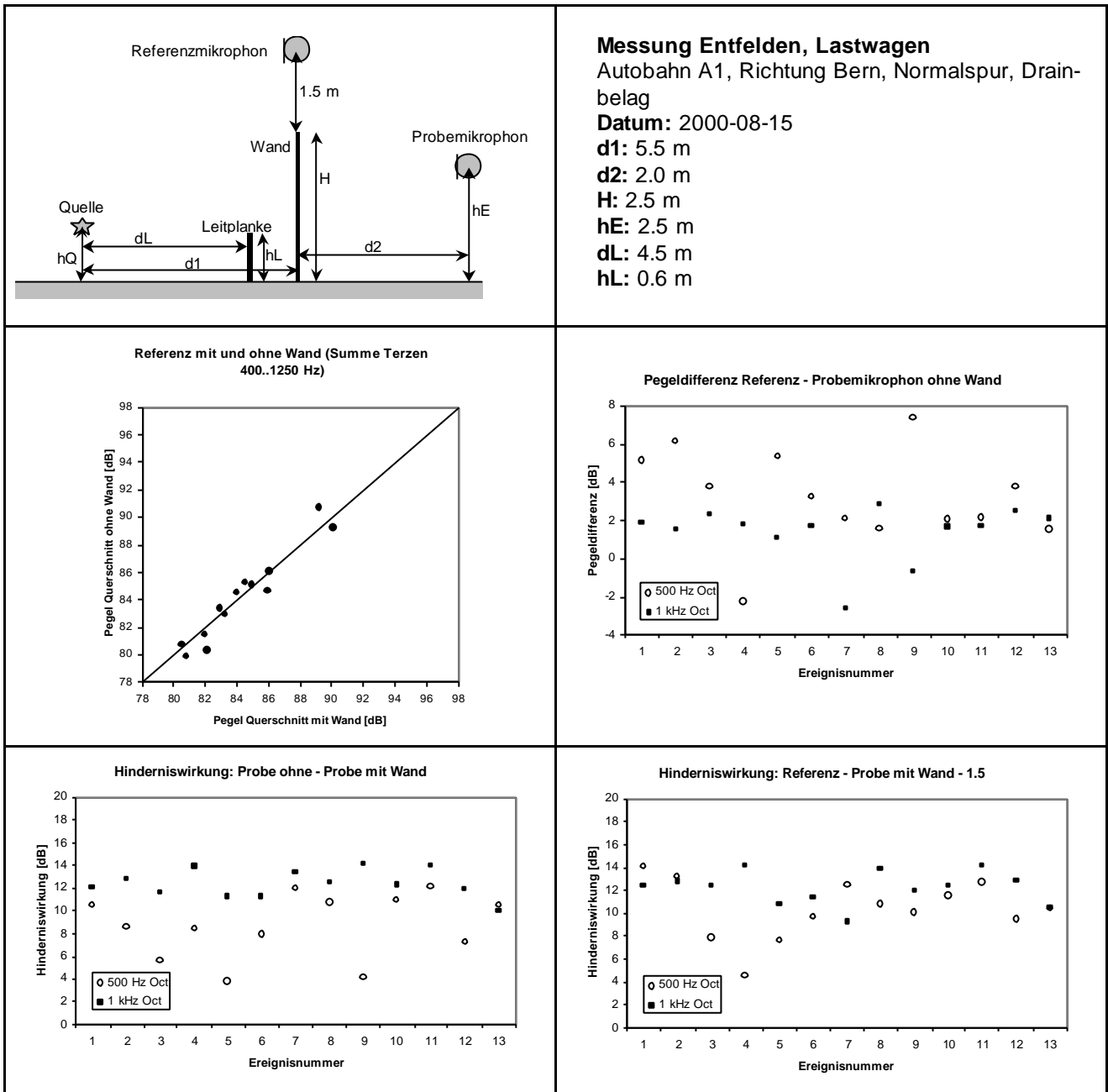


Abbildung 16: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hinderniswirkung Probe (ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	9.4	12.5

Messung I an der Autobahn A2 bei Dagmersellen

Am Abend des 14. September 2000 wurden Messungen an der zur Ara Oberes Wiggertal gehörenden Lärmschutzwand bei Dagmersellen an der A2, Richtung Basel durchgeführt. Mit je zwei Mikrofonen (B&K Studiomikrofon 4006) wurde in einem Querschnitt mit und in einem Querschnitt ohne Wand gemessen. Die beiden Querschnitte lagen rund 20 m voneinander entfernt. Die Wand liegt in einem Abstand von 8.80 m von der Mitte der Normalspur. Es wurde angenommen, dass die Fahrzeuge in der Mitte der Fahrspur verkehren und der Quellenort 0.50 m von der Fahrspurmitte aus gegen die Wand hin verschoben liegt. Damit ergibt sich ein Abstand vom Quellenpunkt zur Wand von 8.30 m. Die Mikrofonanordnungen waren in beiden Querschnitten identisch: das Probemikrofon wurde 3.00 m hinter der Wand auf gleicher Höhe wie die Wand (2.30 m) positioniert. Das Referenzmikrofon wurde in der Ebene der Wand auf einer Höhe von 3.80 m (entsprechend 1.50 m oberhalb der Wandkante) eingerichtet. Die Mikrophonesignale wurden direkt auf DAT aufgezeichnet. Zwischen 19.00 und 21.00 Uhr konnten 50 geeignete LKW Einzelvorbeifahrten registriert werden.

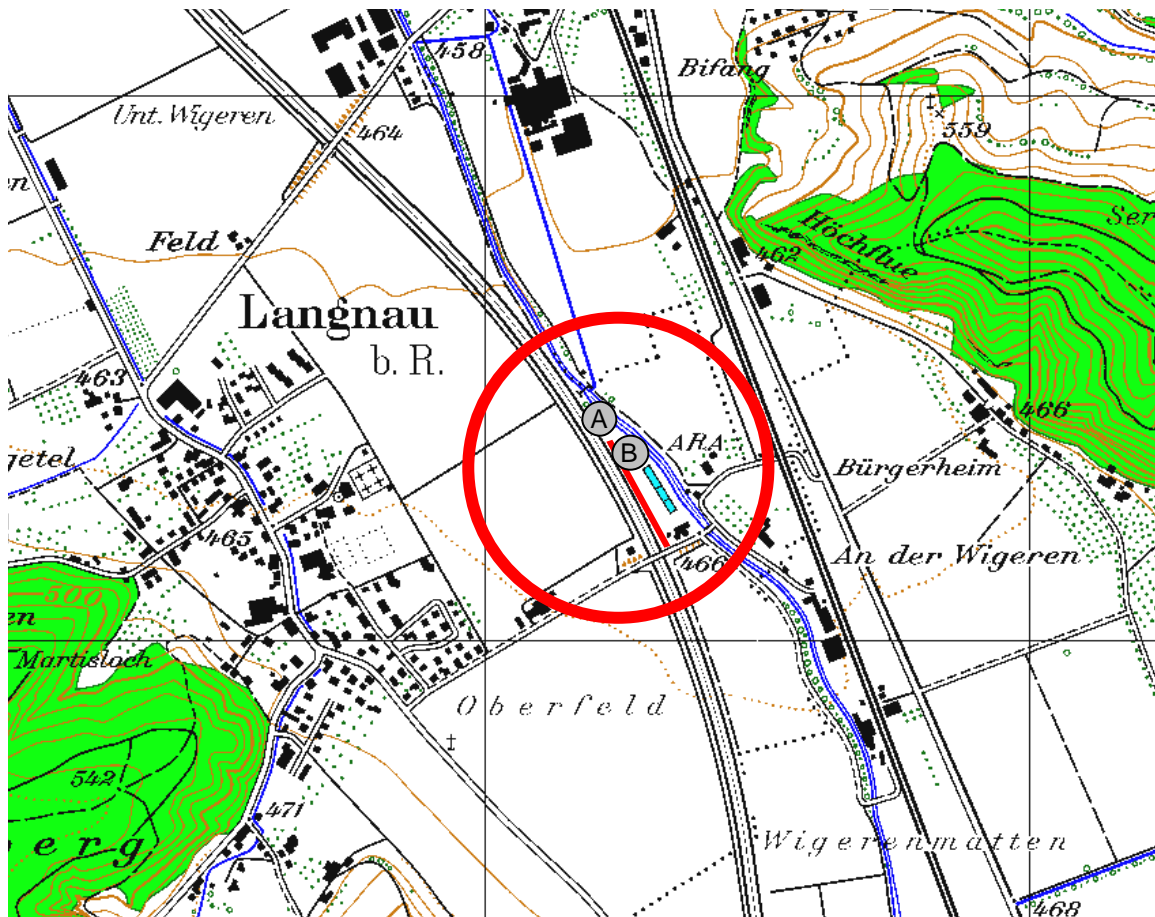


Abbildung 17: Situation zur Messung an der Autobahn A2 bei Dagmersellen. A bezeichnet den Querschnitt ohne, B, den Querschnitt mit Wand.

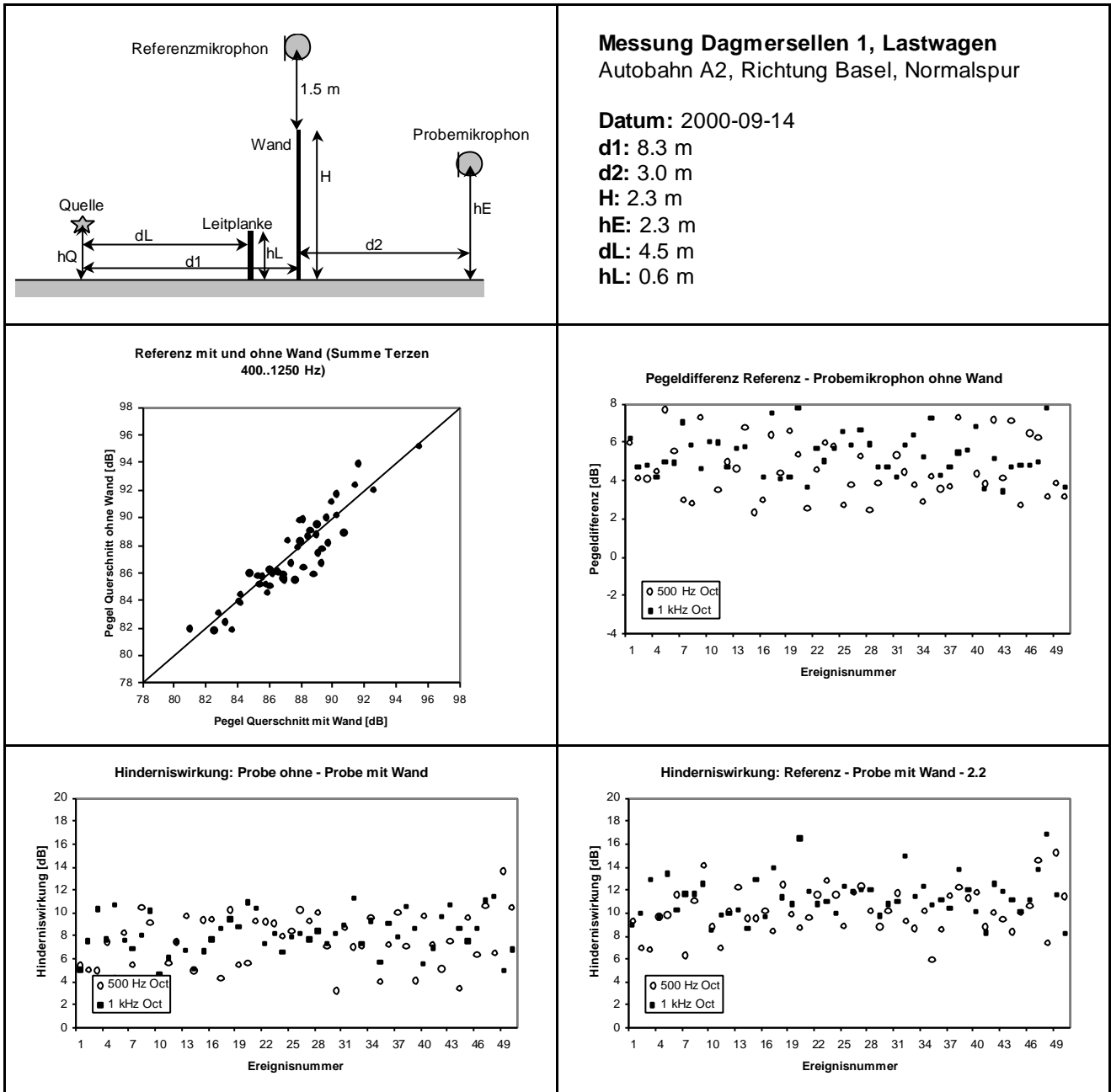


Abbildung 18: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hindernismwirkung Probe (ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	8.1	8.4

Messung II an der Autobahn A2 bei Dagmersellen

Am Abend des 26. September 2000 wurden Messungen an der zur Ara Oberes Wiggertal gehörenden Lärmschutzwand bei Dagmersellen an der A2, Richtung Basel durchgeführt. Mit je zwei Mikrofonen (B&K Studiomikrofon 4006) wurde in einem Querschnitt mit und in einem Querschnitt ohne Wand gemessen. Die beiden Querschnitte lagen rund 20 m voneinander entfernt. Die Wand liegt in einem Abstand von 8.80 m von der Mitte der Normalspur. Es wurde angenommen, dass die Fahrzeuge in der Mitte der Fahrspur verkehren und der Quellenort 0.50 m von der Fahrspurmitte aus gegen die Wand hin verschoben liegt. Damit ergibt sich ein Abstand vom Quellenpunkt zur Wand von 8.30 m. Die Mikrofonanordnungen waren in beiden Querschnitten identisch: das Probemikrofon wurde 2.00 m hinter der Wand auf gleicher Höhe wie die Wand (2.30 m) positioniert. Das Referenzmikrofon wurde in der Ebene der Wand auf einer Höhe von 3.80 m (entsprechend 1.50 m oberhalb der Wandkante) eingerichtet. Die Mikrophonsignale wurden direkt auf DAT aufgezeichnet. Zwischen 19.00 und 21.00 Uhr konnten 92 geeignete PW und 37 LKW Einzelvorbeifahrten registriert werden.

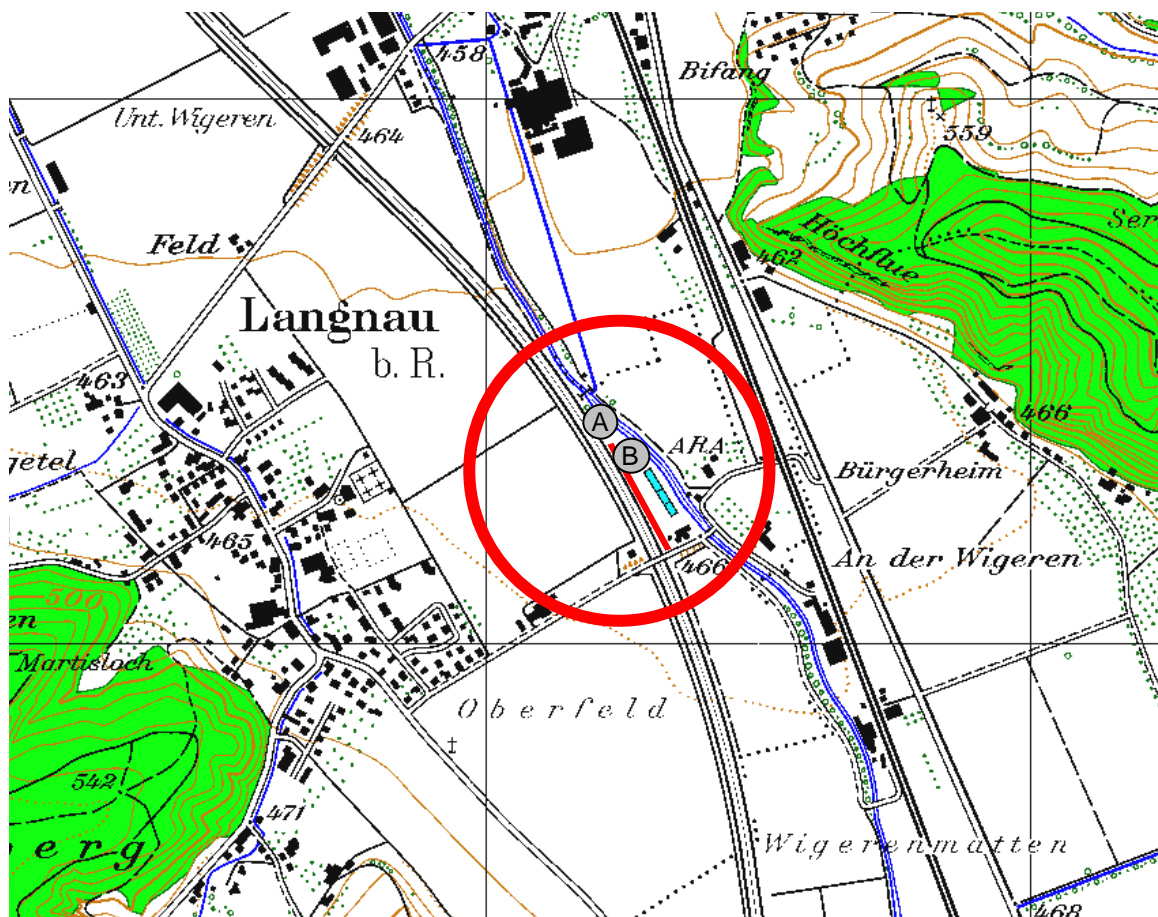


Abbildung 19: Situation zur Messung an der Autobahn A2 bei Dagmersellen. A bezeichnet den Querschnitt ohne, B den Querschnitt mit Wand.

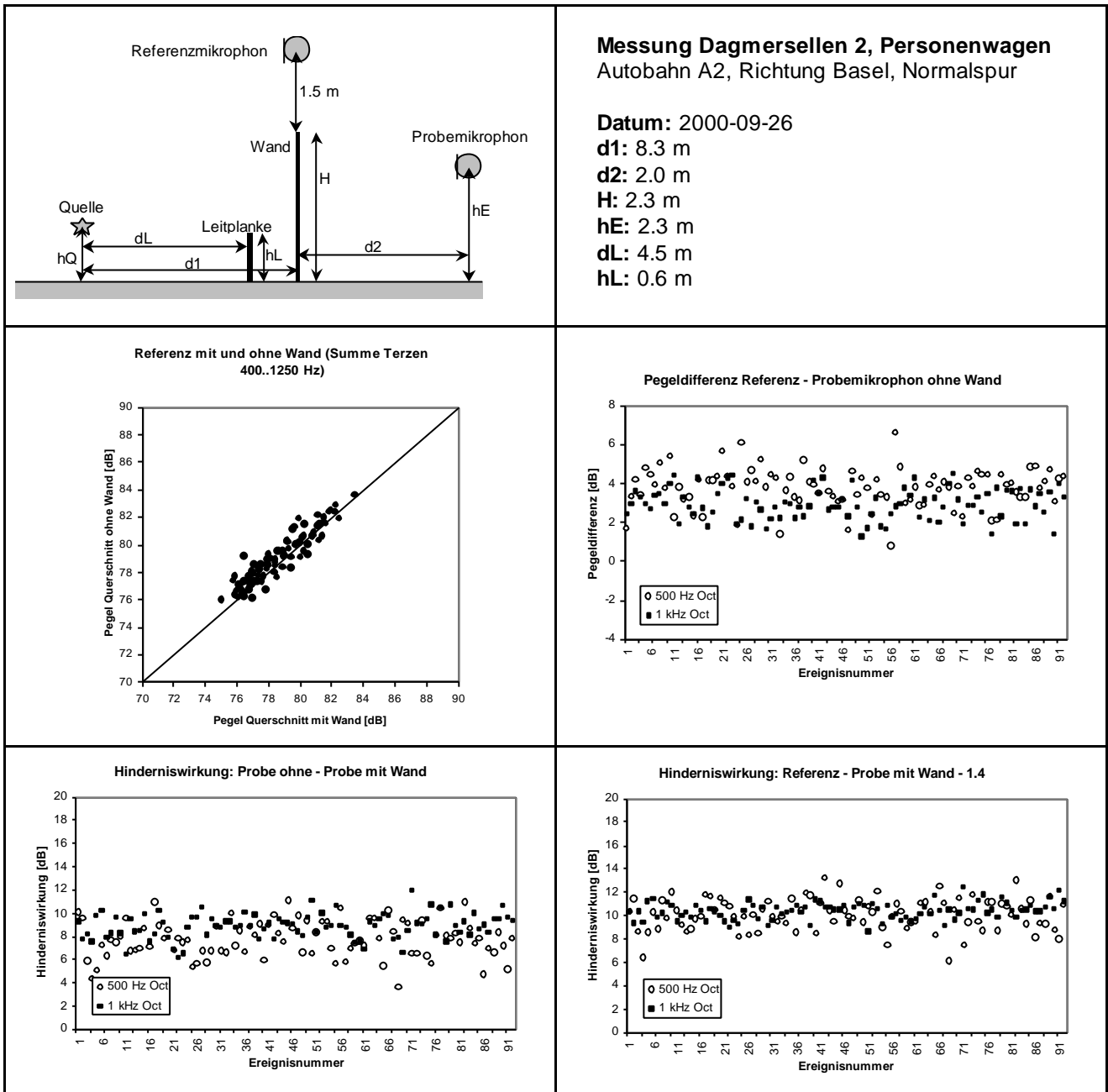


Abbildung 20: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hinderniswirkung Probe(ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	8.0	9.0

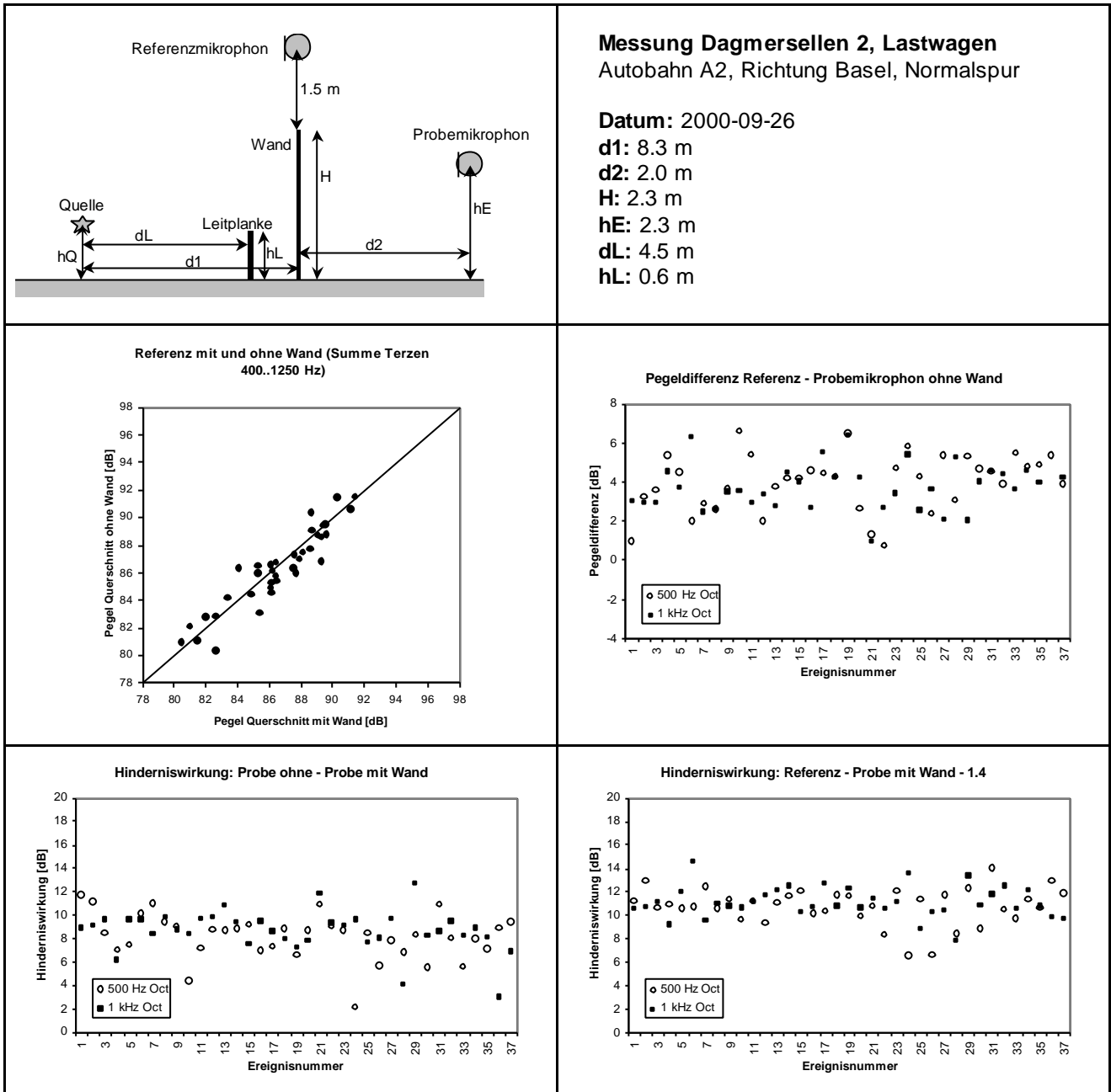


Abbildung 21: Zusammenstellung der Messergebnisse für die verschiedenen Mikrophone.

Auswertungen:

	500 Hz Oktave	1000 Hz Oktave
mittlere Hinderniswirkung Probe(ohne Wand) – Probe (mit Wand) [dB]	8.5	9.0

8. Auswertungen

Korrekturen für Situationen mit abschirmender Leitplanke

Die Mehrzahl der oben dargestellten Messungen weisen die Schwierigkeit auf, dass die Schallausbreitung von der Quelle zum Mikrophon im Fall ohne Wand durch die vorhandene Leitplanke beeinflusst wurde. Auch wenn die Sichtlinie Quelle-Mikrophonpunkt bei weitem nicht unterbrochen wird, können tiefe Frequenzen dadurch eine gewisse Abschirmung erfahren. Dieser Einfluss wird mit einer Fresnelzonenüberlegung [Ullrich, 1984] rechnerisch wie in der Folge dargestellt kompensiert. Man beachte, dass diese abschirmende Wirkung für die Messung hinter der Wand nicht von Bedeutung ist, da die Schallausbreitung über die Wandoberkante so hoch verläuft, dass kein Einfluss der Leitplanke vorhanden ist.

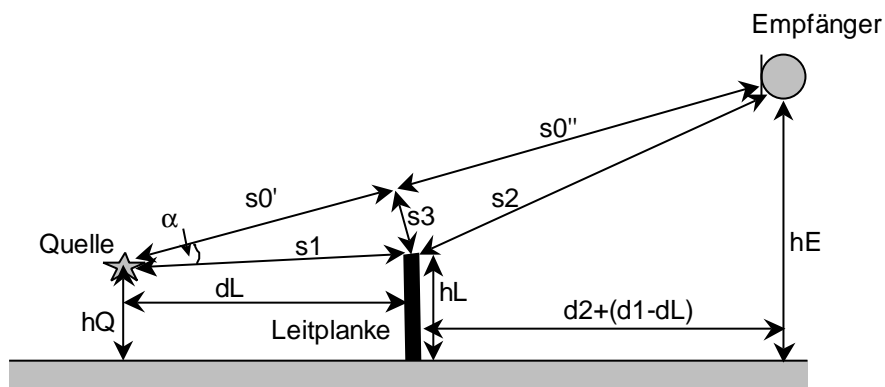


Abbildung 22: Situation mit den verwendeten Geometriegrößen zur Bestimmung des pegelmindernden Einflusses der Leitplanke.

In der Ebene, die senkrecht auf s_0' bzw. s_0'' (Abbildung 22) steht und durch den Kopfpunkt der Leitplanke geht, präsentiert sich die erste Fresnelzone als Kreis mit Radius r_1 wie in Abbildung 23 gezeigt. Der grau hinterlegte Bereich wird durch die Leitplanke abgedeckt.

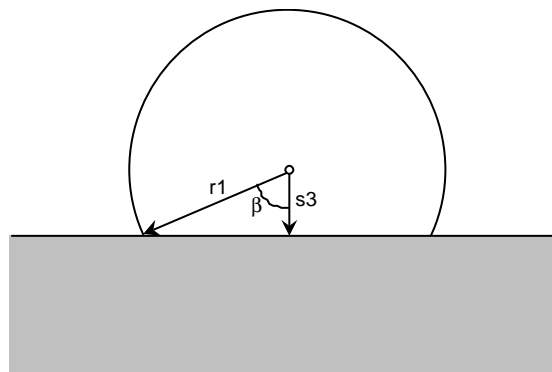


Abbildung 23: Fresnelzone in der Ebene durch den Leitplankekopf senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Der grau hinterlegte Bereich markiert die Leitplanke.

Es gelten mit Abbildung 22 und Abbildung 23 folgende Beziehungen:

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$$

wobei

$$\tan(\alpha_1) = \frac{hE - hQ}{d1 + d2}$$

$$\tan(\alpha_2) = \frac{hL - hQ}{dL}$$

$$s1 = \sqrt{dL^2 + (hL - hQ)^2}$$

$$\frac{s3}{s1} = \sin \alpha$$

$$s0' = \sqrt{s1^2 - s3^2}$$

$$s0'' = \sqrt{(d1 + d2)^2 + (hE - hQ)^2} - s0'$$

Der Radius $r1$ der ersten Fresnelzone ist für eine Wellenlänge λ gegeben durch die Bedingung

$$\sqrt{s0'^2 + r1^2} + \sqrt{s0''^2 + r1^2} = s0' + s0'' + \frac{\lambda}{2}$$

$$\cos \beta = \frac{s3}{r1}$$

Die von der Leitplanke abgedeckte Fläche A ist

$$A = \frac{1}{2} r1^2 (2\beta - \sin(2\beta))$$

Mit der Proportionalität des Schalldrucks zur Fläche wird die durch die Abdeckung verursachte Pegeländerung ΔL

$$\Delta L = 20 \log \left(1 - \frac{A}{\pi r1^2} \right) = 20 \log \left(1 - \frac{2\beta - \sin(2\beta)}{2\pi} \right)$$

Da die abschirmende Wirkung der Leitplanke sowohl für den Originalquellenpunkt als auch für den an der Strassenoberfläche gespiegelten Punkt gilt, wird für deren Berechnung als Approximation eine Quellenhöhe von 0.0 eingesetzt.

Für die gemessenen Situationen wurden die Korrekturwerte ΔL nach obiger Beziehung für die gemessenen Oktaven 500 und 1000 Hz ermittelt. Die Messwerte des Probemikrophons im Querschnitt ohne Wand wurden um den entsprechenden Beitrag erhöht um damit den Fall der ungestörten Ausbreitung zu modellieren.

Damit ergeben sich für die oben beschriebenen Messungen die in Tabelle 5 gezeigten Hinderniswirkungen.

Messung	PW/ LKW	d1	d2	H	hE	dL	hL	DL 500	DL 1k	IL 500	IL 1k	IL mitt.
2000-07-22-Höngg	PW	7.4	2.0	2.4	2.4	5.3	0.6	1.5	0.5	9.0	11.1	9.9
2000-08-09-Regensdorf	PW	3.7	3.0	2.15	2.15	-	-	0.0	0.0	10.9	14.4	12.3
2000-08-15-Entfelden	PW	5.5	2.0	2.5	2.5	4.5	0.6	0.7	0.0	11.3	14.6	12.6
2000-08-15-Entfelden	LKW	5.5	2.0	2.5	2.5	4.5	0.6	0.7	0.0	10.1	12.5	11.1
2000-09-14-Dagmersellen	LKW	8.3	3.0	2.3	2.3	4.5	0.6	2.2	1.2	10.3	9.6	9.9
2000-09-26-Dagmersellen	PW	8.3	2.0	2.3	2.3	4.5	0.6	1.8	0.7	9.8	9.7	9.7
2000-09-26-Dagmersellen	LKW	8.3	2.0	2.3	2.3	4.5	0.6	1.8	0.7	10.3	9.7	10.0

Tabelle 5: Zusammenstellung der Geometrieparameter der Messsituationen (d_1 , d_2 , H , h_E , d_L , h_L), der Direktschall-Leitplanken-Kompensationen (DL_{500} , DL_{1000}) und den daraus resultierenden Hinderniswirkungen (IL_{500} und IL_{1000} , bzw. $IL_{\text{mitt.}}$ als energetischer Mittelwert von 500 Hz und 1 kHz).

Kalibration der Hindernisformeln anhand der Lautsprecherreferenzmessung und Bestimmung der wahren Quellenhöhe

Aus den gemessenen und in Tabelle 5 ausgewiesenen Hinderniswirkungen soll auf die Quellenhöhe geschlossen werden. Dazu wurde in einem ersten Schritt untersucht, wie die oben vorgestellten Hindernisformeln die Lautsprecherreferenzmessung (siehe Abschnitt 7.1) nachbilden. Dazu wurde jeweils jene Quellenhöhe gesucht, die beim Einsetzen in die Hindernisformel die gemessene Hinderniswirkung lieferte, wobei wiederum der Mittelwert aus der 500 und 1000 Hz Oktave verwendet wurde. Alle Formeln wurden in der Originalform verwendet, d.h. ohne zusätzliche Berücksichtigung einer Bodenreflexion.

LS-Höhe bei Referenz- messung [m]	gemessene Hindernis- wirkung ⁴ [dB]	notwendige Quellenhöhen für eine der Messung entsprechenden Hinderniswirkung				
		Pierce [m]	Menounou [m]	Kurze-An- derson [m]	ISO9613 (C2 = 40) [m]	ISO9613 (C2 = 20) [m]
0.20	13.6	0.05	-0.55	-1.35	-1.15	-2.80
0.30	12.0	0.57	0.10	-0.65	-0.40	-1.60
0.40	10.8	0.92	0.55	-0.20	0.03	-0.90
0.50	9.9	1.17	0.85	0.13	0.33	-0.45
0.60	9.2	1.34	1.06	0.36	0.56	-0.15
0.70	8.5	1.52	1.28	0.60	0.76	0.15
0.80	8.0	1.65	1.44	0.74	0.90	0.38

Tabelle 6: Zusammenstellung der bei der Referenzlautsprechermessung gefundenen Hinderniswirkungen als Mittelwert der 500 und 1000 Hz Oktaven sowie die bei Verwendung der verschiedenen Hindernisformeln einzusetzenden Quellenhöhen für Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Hinderniswirkung.

Wie Tabelle 6 zeigt, kann keine Hindernisformel das Messergebnis der Lautsprecherreferenzmessung zufriedenstellend abbilden. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Anordnung der

⁴ entsprechend der Kurvenanpassung aus Abschnitt 0: $IL = 7.1 - 4.04 \ln(h)$.

Referenzlautsprechermessung wie auch der Messungen am frei fliessenden Verkehr nicht einer typischen Immissionssituation entspricht. Es lassen sich daher aus Tabelle 6 keine allgemeinen Schlüsse über die Qualität der Hindernisformeln ziehen.

Die Berechnung nach Pierce erscheint am besten geeignet, um die wahre Quellenhöhe zu ermitteln. Unter Berücksichtigung des Umstands, dass die Geometrie der Lautsprecherreferenzmessung vergleichbar ist mit den Messsituationen am frei fliessenden Verkehr, kann Tabelle 6 als Umsetzungsvorschrift wie folgt verwendet werden:

Für eine in einer bestimmten Situation gemessene Hinderniswirkung wird jene Quellenhöhe gesucht, die in die Hindernisformel nach Pierce eingesetzt den gleichen Wert ergibt. Diese so gefundene Quellenhöhe wird dann mit Tabelle 6 in die wahre Quellenhöhe übersetzt.

Mit einem Beispiel soll die Prozedur verdeutlicht werden:

In einer Situation mit $d_1 = 7.4$ m, $d_2 = 2.0$ m, $H = 2.4$ m und $h_E = 2.4$ m (siehe Abbildung 7) sei eine Hinderniswirkung von 9.9 dB (Mittelwert in den Oktaven 500 und 100 Hz) gemessen worden. Die Hindernisformel nach Pierce ergibt für diese Situation bei einer Quellenhöhe von 1.05 m den Wert der gemessenen Hinderniswirkung von 9.9 dB. Diese Quellenhöhe von 1.05 m wird in der Tabelle 6 in der Spalte Pierce gesucht und in die wahre Höhe (=LS-Höhe bei Referenzmessung) übersetzt. Dabei ergibt sich ein Wert zwischen 0.4 und 0.5 m.

Extraktion der Quellenhöhe anhand der Hindernisformel von Pierce

Gemäss der oben dargestellten Lautsprecherreferenzmessung lässt sich die nach Pierce bestimmte Quellenhöhe $h_{Q,Pierce}$ für eine gemessene Hinderniswirkung in die wahre Quellenhöhe $h_{Q,wahr}$ mit folgender Beziehung umrechnen:

$$h_{Q,wahr} = 0.186 e^{0.87 h_{Q,Pierce}}$$

Wenn diese Umrechnung auf jedes Einzelereignis, d.h. jede gemessene Fahrzeugvorbeifahrt angewendet wird, ergeben sich die in Abbildung 24 und Abbildung 25 gezeigten Resultate. Der Mittelwert der **Quellenhöhe für Personenwagen findet sich zu 0.40 m** bei einer Standardabweichung von 0.15 m. **Für Lastwagen liegt die mittlere Quellenhöhe bei 0.50 m** bei einer Standardabweichung von 0.26 m. Die Quellenhöhe für Personenwagen liegt erwartungsgemäss etwas tiefer als jene für Lastwagen. Die grössere Streuung bei Lastwagen ist auf den inhomogeneren Flottenmix in dieser Kategorie (z.B. Fahrzeuge mit hohem Auspuff oder Kühlaggregaten auf dem Dach) zurückzuführen. Statistisch gesehen liegt die Streuung des Mittelwerts für beide Kategorien deutlich unter 0.05 m, sodass die Stichprobe der Messungen als ausreichend gross beurteilt werden kann.

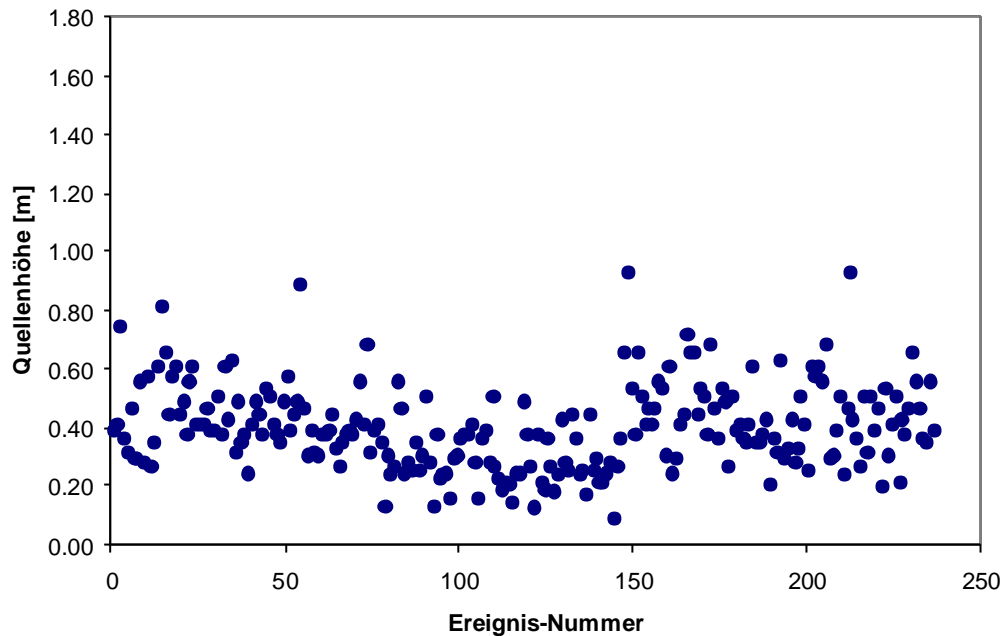


Abbildung 24: Mittels der Hindernisformel von Pierce ausgewertete Quellenhöhen für die gemessenen Hinderniswirkungen aller Personenvorbeifahrten. Die vereinzelt Punkte mit Quellenhöhen um 0.8 bis 0.9 m könnten durch Fahrzeuge mit hochliegenden Quellen im Zusammenhang mit Dachaufbauten (aerodynamische Strömungsgeräusche, flatternde Planen, etc.) verursacht sein.

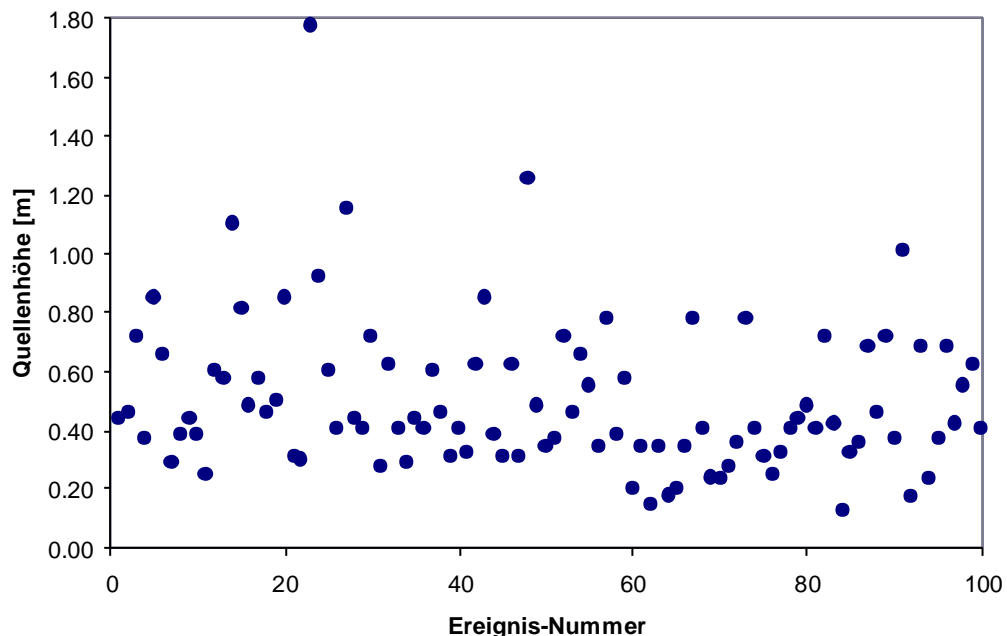


Abbildung 25: Mittels der Hindernisformel von Pierce ausgewertete Quellenhöhen für die gemessenen Hinderniswirkungen aller Lastwagenvorbeifahrten.

Die oben bestimmten Quellenhöhen ergeben sich aus dem Mittelwert der Höhen eines jeden Ereignisses. Es lässt sich natürlich auch eine Quellenhöhe pro Messsituation anhand der mittleren Hinderniswirkung bestimmen. Die Tabelle 7 zeigt die entsprechende Auswertung. Es zeigt sich,

dass die Quellenhöhen in allen Situationen ähnliche Werte aufweisen mit Ausnahme der Personenwagen an der Messstelle Entfelden. Die Messstelle weist als Besonderheit einen Drainbelag auf. Der Grund für die geringere gemessene Quellenhöhe bleibt aber unklar.

Messung	PW/ LKW	d1	d2	H	hE	dL	hL	IL _{mitt.}	h _{q,Pierce}	h _{Q,wahr}
2000-07-22-Höngg	PW	7.4	2.0	2.4	2.4	5.3	0.6	9.9	1.05	0.46
2000-08-09-Regensdorf	PW	3.7	3.0	2.15	2.15	-	-	12.3	1.00	0.44
2000-08-15-Entfelden	PW	5.5	2.0	2.5	2.5	4.5	0.6	12.6	0.60	0.31
2000-08-15-Entfelden	LKW	5.5	2.0	2.5	2.5	4.5	0.6	11.1	1.10	0.48
2000-09-14-Dagmersellen	LKW	8.3	3.0	2.3	2.3	4.5	0.6	9.9	1.05	0.46
2000-09-26-Dagmersellen	PW	8.3	2.0	2.3	2.3	4.5	0.6	9.7	0.90	0.41
2000-09-26-Dagmersellen	LKW	8.3	2.0	2.3	2.3	4.5	0.6	10.0	0.78	0.37

Tabelle 7: Zusammenstellung der Geometrieparameter der Messsituationen ($d1$, $d2$, H , hE , dL , hL), der gemessenen und korrigierten Hinderniswirkungen $IL_{mitt.}$ als Mittelwert der Oktavwerte 500 und 1000 Hz, der gemäss der Formel nach Pierce einzusetzenden Quellenhöhe $h_{q,Pierce}$ und daraus berechneter wahrer Quellenhöhe $h_{Q,wahr}$.

Fehlerbetrachtungen

Die Messungen und in den Auswertungen abgeleitete Ergebnisse sind mit einer Unsicherheit verbunden. Dabei ist zwischen zufälligen und systematischen Fehlern zu unterscheiden. Da eine Vielzahl von einzelnen Messungen durchgeführt wurde und die Aussage auf einem Mittelwert basiert, ist von einer gegenseitigen Kompensation der zufälligen Fehler auszugehen.

Die Auswertungen basieren im Wesentlichen auf Pegeldifferenzen. Durch diese Differenzbildung fallen mögliche systematische Fehler der elektrischen Messkette bzw. der Kalibration weg. Als mögliche wesentliche Fehlerquellen verbleiben damit die Unsicherheit der Kompensation der Leitplankenabschirmung durch die Fresnelzonenüberlegung und die Unsicherheit der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Lautsprecherreferenzmessung auf die Messsituationen am frei fliessenden Verkehr mittels der Hindernisformel von Pierce. Von diesen beiden Faktoren dürfte die Kompensation der Leitplankenabschirmung den grösseren möglichen Fehler verursachen. Im Mittel beträgt diese Kompensation gemäss Tabelle 5 1.0 dB. Die Sensitivität der ausgewerteten Quellenhöhe bezüglich dieser Korrektur ergibt sich zu 0.13 m pro dB.

In der Kategorie Personenwagen wurden 200, in der Kategorie Lastwagen 100 Fahrzeuge erfasst und ausgewertet. Die Streuung der ausgewerteten individuellen Quellenhöhen liegt in der kritischen Lastwagenkategorie bei 0.26 m, was auf eine Standardabweichung für den Mittelwert von 0.03 m schliessen lässt. Aus statistischer Sicht ist die Stichprobe damit gross genug.

Insgesamt lässt sich die Unsicherheit der ausgewiesenen mittleren Quellenhöhen zu +/- 0.1 m im Sinne einer Standardabweichung veranschlagen.

9. Schlussfolgerungen

Die Frage der Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm wurde messtechnisch im frei fließenden Verkehr untersucht. Das Messkonzept basierte auf der Tatsache, dass die durch eine Lärmschutzwand verursachte Hinderniswirkung in erheblichem Masse von der effektiven Quellenhöhe abhängig ist. Aus Messungen wurde die Hinderniswirkung für insgesamt 300 Fahrzeuge in fünf verschiedenen Situationen bestimmt. Durch den Vergleich der gemessenen Hinderniswirkungen mit den Ergebnissen einer rechnerischen Ermittlung nach Pierce konnte eine äquivalente Quellenhöhe für optimale Übereinstimmung gefunden werden. Anhand einer Referenzmessung mit einem Lautsprecher variabler Höhe über Boden wurde an einer Wand die für die Auswertung verwendete Hindernisformel nach Pierce kalibriert, sodass sich schliesslich für jedes Ereignis eine wahre Quellenhöhe bestimmen liess. Im Mittel resultierte für Personenwagen eine Quellenhöhe von 0.4 m, für Lastwagen liegt der Wert bei 0.5 m. Bei Lastwagen zeigte sich eine wesentlich grössere Streuung der Quellenhöhen. Dies ist auf die grössere Vielfalt der Fahrzeuge und unterschiedliche Quellenstärken und -verteilungen zurückzuführen (hoch/tiefliegende Auspuffe, allfällige Kühlaggregate auf dem Dach, flatternde Planen, etc.). Insgesamt scheinen die immer wieder gefürchteten hochliegenden Quellen bei Lastwagen im Mittel nur einer untergeordnete Rolle zu spielen.

Die gefundenen Werte der Quellenhöhen sind deutlich geringer als die bisher in der Schweiz verwendete Höhe von 0.8 m. Dieser Umstand ist plausibel, da sich die Fahrzeugemissionen in den letzten 10 Jahren mehr und mehr vom Antriebsgeräusch zum Rollgeräusch verlagert haben. Die Reduktion der Quellenhöhe um 0.3 bis 0.4 m entspricht einer rechnerischen Vergrösserung der Hinderniswirkung von typisch rund 1 dB und ist damit für zukünftige Berechnungen relevant. Wenn in einem künftigen Modell zur Berechnung von Strassenlärmimmissionen die ISO 9613-2 Hindernisformel verwendet wird, sollten gleichzeitig diese neuen Quellenhöhen zu Grunde gelegt werden. Die gefundenen Quellenhöhen werden durch anderweitig gewonnene Untersuchungsergebnisse aus der Literatur gestützt (siehe Kapitel 5).

10. Literatur

[CRTN, 1988] CRTN, Calculation of Road Traffic Noise, Department of Transport, UK (1988), siehe auch <http://www.npl.co.uk/npl/acoustics/techguides/crtn/>

[EMPA, 1986] Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm, Schriftenreihe Umweltschutz, BUWAL, Nr. 60.

[Glegg, 1996] Stuart A. L. Glegg, Robert K. Coulson, Internal Report, Center for Acoustics and Vibration, Boca Raton, Florida Atlantic University, 1996.

[Graf, 1997] H. Graf, Höhenverteilung Lastwagenlärm, Sulzer Innotec, interne Berichte 1997-99.

[Graf, 1998] H. R. Graf, Höhenverteilung von Lastwagenlärm, DAGA 1998, Seite 266-67 (1998).

[Hald, 1989] Jorgen Hald, STSF – a unique technique for scan-based Near-Field Acoustic Holography without restrictions on coherence, Brüel & Kjaer Technical Review, no. 1 (1989).

[Heutschi, 1999] K. Heutschi, Ein aktualisiertes Strassenlärm-Modell, SI+A, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 29, 1. Oktober 1999.

[ISO 10847] ISO 10847, Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types, 1997.

[ISO 9613-2, 1996] International Standard, Acoustics – Attenuation of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation.

[Kawai, 1977] T. Kawai, K. Fujimoto, T. Itow, Noise Propagation Around a Thin Half-Plane, Acoustica, vol. 38, S. 313-323 (1977).

[Kurze, 1971] U.J. Kurze, G. S. Anderson, Sound attenuation by barriers, Applied Acoustics, vol. 4, S. 35-53 (1971).

[LSV, 1986] Schweizerische Lärmschutzverordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986, bzw. 15. Juli 1997, 814.41.

[Maekawa, 1968] Z. Maekawa, Noise Reduction by Screens, Applied Acoustics, vol. 1, S. 157-173 (1968).

[Medwin, 1982] Herman Medwin et. al., Impulse studies of double diffraction: A discrete Huygens interpretation, J. of the Acoustical Society of America, vol. 72, p.1005-1013 (1982).

[Menounou, 2000] Penelope Menounou, A Correction to Maekawa's Curve for the Insertion Loss Behind Noise Barriers, Noise-Con 2000, Newport Beach, California (2000).

[NBS Handbook] NBS Handbook of Mathematical Functions.

[Pierce, 1991] Allan D. Pierce, Acoustics, published by the Acoustical Society of America (1991).

[Pumphrey, 1993] Hugh C. Pumphrey, Design of sparse arrays in one, two, and three dimensions, J. of the Acoustical Society of America, vol. 93, p.1620-1628 (1993).

[RLS-90] Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen, RLS-90, Geschäftsstelle der Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln (1990).

[SN EN 1793-3, 1997] Lärmschutzeinrichtungen an Strassen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum (1997).

[Ullrich, 1984] S. Ullrich, Schlussbericht zum Forschungsauftrag Reflexionen des Strassenverkehrslärms an Leit- und Schutzeinrichtungen, Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch-Gladbach 1984.

11. Anhang Publikation inter-noise 2001

inter-noise 2001



The 2001 International Congress and Exhibition
on Noise Control Engineering
The Hague, The Netherlands, 2001 August 27-30

New Swiss source model for road traffic noise

Kurt Heutschi, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, EMPA, CH-8600 Dübendorf, Switzerland (kurt.heutschi@empa.ch).

Abstract

The road traffic noise model that is used in Switzerland today was published in 1986. The source is described in terms of the L_{eq} at a reference distance with input parameters speed, number of vehicles, the portion of trucks and the grade of the road.

This paper presents a new source model that is based on the maximum pass-by level given separately for the motor and rolling noise of passenger cars and trucks. The emission values were measured in freely flowing traffic at a distance of 7.5 m. In order to assure a well defined ground reflection, situations were selected with an essentially hard ground. The emission values were split into the two components engine and tire noise using measurements of controlled pass-by events without engine noise and taking into account a priori knowledge of tire noise. This separation leads to elegant conclusions on the influences of pavement and grade of the road.

To complete the source model an investigation was undertaken concerning the representative source height. The height of traffic noise is of greatest importance in calculating the shielding effect of noise barriers. By measuring this shielding effect and comparing it with calculations the parameter source height was determined by best fit. For typical geometries the sensitivity of the shielding effect lies in the order of 0.3 dB per 10 cm change in source height. One problem that has to be dealt with is the presence of the ground reflection which smears the results to some extent.

Introduction

Models for the prediction of road traffic noise are logically divided into two parts, one for the source, the other for the propagation. The topic of this paper is a new description of the road traffic noise source. Older models often employed one all-encompassing formula to define the source strength. In the Swiss model stemming from 1986, for example, the source was defined in a single formula which involves the parameters average speed, percentage of trucks and traffic density. More recent source models utilise separate formulas for passenger cars and trucks. This approach is more versatile in that the two vehicle categories can be assigned their own speeds (on highways, trucks often drive at lower speeds than passenger cars). In updating the Swiss model it was decided to go one step further, namely to develop formulas which also distinguish between the components *motor noise* and *rolling noise*. This would permit a more realistic accounting for such factors as up- and downhill grades (mainly a function of motor noise) and road surface (mainly a function of rolling noise). As usual, the ensuing formulas were developed in terms of A-weighted levels. However, octave-band data were also obtained for each of the noise components. These may be employed in more advanced prediction methods which calculate sound propagation as a function of frequency.

Measurements of pass-by levels

Measurement setup

Various series of measurements were performed to determine the source strength of passenger cars and trucks. All the measurements were carried out under actual traffic conditions. In each case the microphone distance was chosen at 7.5 m from the centre of the driving lane and 1.2 m above ground. In order to minimise variations caused by the ground effect only situations were considered where the ground was acoustically hard between the vehicle and the measurement point. This was accomplished by positioning the microphone at the edge of the pavement and restricting the measurements to vehicles driving in the second lane. The speed of each vehicle was measured by radar. From each measured pass-by event, the maximum level was evaluated. As a consequence of the random character of the vehicle noise, a certain time averaging has to be applied. It was decided to use exponential averaging with the time constant FAST. It should be mentioned that the corresponding time smearing leads to a small systematic underestimation of the true maximum. In the case of tire noise the error depends on the distance of the axles and ranges up to approx. 0.5 dB at higher vehicle speeds. This was corrected for in the data analysis. An advantage of the source description in terms of the maximum pass-by level is its simplicity in measuring and the relation to the physics of the source. In contrast, an L_{eq} of a pass-by event incorporates an additional $10 \log(\text{vehicle speed})$ term, which has nothing to do with the source strength. Under the assumption of an omnidirectional source directivity in the horizontal plane the L_{max} and the L_{eq} can be calculated from each other.

Performed measurements at passenger cars

Measurement series were carried out on 7 horizontal asphalt roads. On the sections chosen the vehicles were driven at constant speed i.e., without acceleration. Approximately 60 pass-bys per road situation (total: 421) were analysed. As a first step, the data were classified into speed classes of 4 km/h and in each class the energetic averages computed (Table 1).

<i>speed [km/h]</i>	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	62
L_{max} [dB(A)]	61.4	65.7	65.6	67.6	67.1	68.7	68.1	70.4	71.6	72.6	74	75.1
<i>speed [km/h]</i>	68	72	76	80	84	88	92	96	100	104	108	112
L_{max} [dB(A)]	75.8	75.6	76.2	76.6	77.8	79	78.9	81.3	80	81.1	82.2	83.8

Table 1: Measured values of L_{max} at 7.5 m as a function of vehicle speed for passenger cars on horizontal roads.

It was assumed that the data could be approximated by the following general relationship:

$$L_{\max,7.5m} = A + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{B} \right)^C \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (1)$$

A regression analysis yielded the values $A = 61.9$, $B = 27.0$ and $C = 3.3$. However, it must be pointed out that the parameter C could not be determined precisely in this way because the error minimum was found to depend only weakly on the choice of the parameter C . In view of this finding it was considered more reasonable to select the value of C based on *a priori* knowledge. It is well established that at high speeds the noise is dominated by the rolling noise component. Therefore C was chosen to agree with the dependence found between rolling noise and speed. Many studies have addressed this question [1,2,3]. Almost all of these employ a relationship of the form $L_{\max, \text{rolling noise}} = x + 10 \log(v^C)$ with a medium value for C around 3.5. With a value of $C = 3.5$ the parameters A and B from eq. 1 were then optimised again to match the measurement data. This led to equation 2:

$$L_{\max,7.5\text{m}} = 62.6 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{30} \right)^{3.5} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (2)$$

Performed measurements at trucks

Measurements were again performed on a number of different horizontal roads with the microphone at 7.5 m from the driving lane and 1.2 m above the hard ground. In the case of trucks, however, the extra precaution was taken to make measurements on both sides of the trucks since the exhaust pipe is usually mounted unsymmetrically. The measurements encompassed a total of 5 different road situations and 1638 individual pass-bys, divided approximately equally between measurements on the left and the right side of the trucks. As with the passenger car data, the measured pass-by levels (L_{\max}) were first classified into speed classes of 4 km/h and in each class the energetic averages computed (Table 2).

<i>speed [km/h]</i>	40	44	48	52	56	60	62	68	72	76	80	84
L_{\max} [dB(A)]	79.1	81.4	80.9	82.2	82.7	83.2	85.4	85.3	84.5	85.5	86.5	88.2
<i>speed [km/h]</i>	88	92	96	100								
L_{\max} [dB(A)]	89.5	90.2	89.8	90.6								

Table 2: Measured values of L_{\max} at 7.5 m as a function of vehicle speed for trucks on horizontal roads.

Using the same reasoning as for the passenger cars the following relationship between L_{\max} and speed was found for trucks:

$$L_{\max,7.5\text{m}} = 76.8 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{41} \right)^{3.5} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (3)$$

Source model

Emission level for horizontal road

As mentioned above the basic concept of the new emission model involves a separation into the two components *motor noise* and *rolling noise*. The data basis consists of the presented measurements of the pass-by levels and controlled measurements of rolling noise of 15 passenger cars. Including results from the literature [4,5] regarding the speed dependence of rolling noise the following set of formulas was derived (see Figure 1):

passenger cars: $L_{\max,\text{rolling noise},7.5\text{m}} = 9.5 + 35 \log v \quad [\text{dB(A)}] \quad (4)$

$$L_{\max,\text{motor noise},7.5\text{m}} = 62.7 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{44} \right)^{3.5} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (5)$$

trucks: $L_{\max,\text{rolling noise},7.5\text{m}} = 18.5 + 35 \log v \quad [\text{dB(A)}] \quad (6)$

$$L_{\max,\text{motor noise},7.5\text{m}} = 76.9 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{56} \right)^{3.5} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (7)$$

The energetic sums of the rolling noise and motor noise components (eq. 4 and 5, eq. 6 and 7) correspond to the total noise (eq. 2,3) within 0.1 dB.

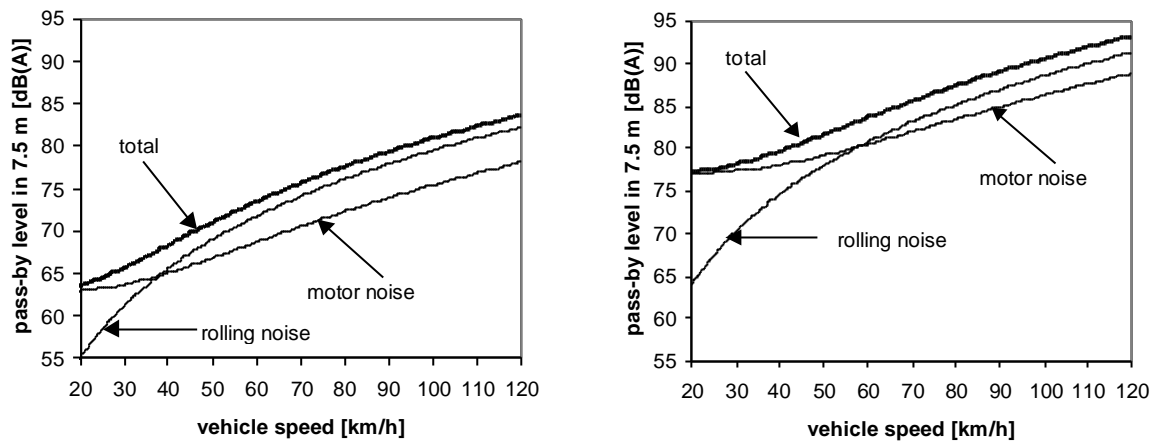


Figure 1: Pass-by levels of the rolling noise and motor noise components as a function of vehicle speed for passenger cars (left) and trucks (right).

Correction for uphill grade

A major advantage of splitting the pass-by level into the two components is the fact that parameters such as the up- or downhill grade of the road and the type of road surface can be included into the model more precisely. It is assumed that the grade of the road has an effect only on the motor noise component and the type of road surface only on the rolling noise component. From our own measurements (964 events for passenger cars and 306 events for trucks) performed for roads with different grades g it was found that the motor noise component should be increased by Δg according to eq. (8).

$$\Delta g = 0.8 g \text{ [dB]} \quad \text{for } g \text{ [%]} > 0 \quad (8)$$

For downhill grades, no correction is needed, i.e., the emission level corresponds to the case of the horizontal road. It should be noted that the change of vehicle speed in case of an up- or downhill grade has to be taken into account separately since the emission formulas are based on the actual vehicle speed.

Correction for different road surfaces

Within our study there were no measurements carried out to investigate the influence of different road surfaces. For this reason the model was completed by using data from the German model RLS-90 [6]. In RLS-90 the corrections for road surfaces (applied to the total emission level) are given for three different speed intervals. With the concept that the road surface has an influence only on the rolling noise a more elegant description is possible. The correction Δs is found as (table 3):

type of road surface	asphalt	concrete	pavement	porous asph.
correction Δs [dB(A)]	0	3	8	-5

Table 3: Correction Δs of the rolling noise component for different types of road surfaces.

Octave-band data

The above data are given in terms of A-weighted levels. It was found from spectral analysis that as a reasonable approximation the A-levels can be described as octave-band levels independent of vehicle speed as indicated in table 4.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
<i>rolling noise pass. cars</i>	-18	-12	-7.5	-2.5	-7.5	-18
<i>motor noise pass. cars</i>	-12	-12	-9	-5	-5	-10
<i>total noise trucks</i>	-18	-12	-5.5	-4	-7	-13

Table 4: A-weighted octave-band levels relative to the total A-level.

Emission values as sound power

Under the assumption that the vehicles can be regarded as omnidirectional point sources that emit into a half space, the L_{max} values from above can be transferred into sound power values. The sound power W in Watts emitted by a vehicle is given by

$$\text{passenger cars: } W = C_g \cdot 6.5 \cdot 10^{-4} \left(1 + \left(\frac{v}{44} \right)^{3.5} \right) + C_s \cdot 3.1 \cdot 10^{-9} \cdot v^{3.5} \quad [\text{W}] \quad (9)$$

$$\text{trucks: } W = C_g \cdot 1.7 \cdot 10^{-2} \left(1 + \left(\frac{v}{56} \right)^{3.5} \right) + C_s \cdot 2.5 \cdot 10^{-8} \cdot v^{3.5} \quad [\text{W}] \quad (10)$$

with:

v: vehicle speed in [km/h]

C_g: corr. for uphill grade = $10^{0.08g}$, with g: grade in [%]

C_s: corr. for road surface = 1.0 (asphalt), 2.0 (concrete), 6.3 (pavement), 0.3 (porous asphalt)

Investigation of the representative source height

The representative source height of traffic noise is of crucial importance in calculating the propagation to the receiver. Especially the shielding effect strongly depends on the exact geometry of the source. One can conceive of different methods to determine the source height of traffic noise. A direct approach would be to use a sensor that is sensitive to space or direction, e.g. a microphone array [7].

Another idea is to use an indirect method, namely to measure a propagation effect that is sensitive to the source height. In this sense the shielding effect of a noise screen is well suited. By investigating different values of the situation parameters (distance source-screen, height of the screen, distance screen-microphone, height of the microphone) the sensitivity of the screening effect relative to the source height was found to be in the order of 3 dB/m. The maximum sensitivity was found for a microphone position close to the screen (2...3 m) and a microphone height equal to the height of the screen.

For this configuration several measurements were carried out to determine the insertion loss of noise barriers according to ISO 10847 [8]. The measured values of insertion loss were then compared with calculated values according to ISO 9613-2 with the parameter C₂ = 40. The source height in the calculation was adapted for best match of the calculated and measured values. For this fitting procedure the octaves 500 Hz and 1 kHz were used. For passenger cars the source height turned out to be -0.2 m, for trucks the optimal height was -0.1 m. The minus sign means that the source is below the ground plane. The results indicate that the ISO 9613-2 formula underestimates the shielding effect and that the source height of trucks is only slightly higher than that for passenger cars. This is understandable considering that the measurements were performed mainly on roads with vehicle speeds greater than 80 km/h where rolling noise dominates the emission. In one situation additional measurements were carried out with a loudspeaker as the source, placed at different heights. By comparing these measurement results with the ISO 9613-2 calculation it was

found that the above mentioned -0.2 m and -0.1 m correspond to a real height of 0.4 m. The results for the source height are preliminary and have to be confirmed by additional measurements.

Conclusions

A new traffic noise source model has been presented. It describes the maximum pass-by level at a distance of 7.5 m. The emission levels as a function of vehicle speed are given separately for passenger cars and trucks and are split into the two components motor and rolling noise. For uphill grades and non-standard road surfaces corrections are given that should be applied to the motor noise and rolling noise component respectively. Preliminary results concerning the representative height of the traffic noise source lead to a value of approximately 0.4 m.

References

1. H. Steven, Einfluss der Fahrweise auf die Geräuschemission eines Kraftfahrzeuges. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 1983.
2. S. Ullrich, Lärmindernde Strassendecken: Akustische Untersuchungen. Internationaler Erfahrungsaustausch über lärmindernde Strassendecken, Bergisch Gladbach, 1987.
3. L. Ahsberg, The Influence of Tyre/Road Noise on Heavy Vehicle Noise During Type Approval Testing, International Tire/Road Noise Conference 1990, Introc 90.
4. S. Ullrich, Massnahmen zur Rollgeräuschkinderung an Reifen und Fahrbahnen. Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik – Gesundheits – Ingenieur, 1986, p.23-28.
5. H. W. Stumpf, Linking Evaluation of Heavy Truck Tyre Noise, Measured by ISO 362 with Scale Factors Sound Intensity, Proceedings of the International Tire/Road Noise Conference 1990, Introc 90.
6. Richtlinie für den Lärmschutz an Strassen, RLS-90. Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn, 1990.
7. H. R. Graf, Höhenverteilung von Lastwagenlärm, Fortschritte der Akustik, DAGA 1998, p.266-267.
8. ISO 10847, Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types, 1997.