

Bestimmung der vertikalen Richt- charakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 176

bast

Bestimmung der vertikalen Richt- charakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw

von

Christan Schulze
Jörn Hübelt

Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH
Dresden

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 176

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 02.274/2006/LRB:
Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw

Projektbetreuung
Wolfram Bartolomaeus

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86509-879-5

Bergisch Gladbach, Januar 2009

Kurzfassung – Abstract

Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallausbreitung von Pkw, Transportern und Lkw

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die messtechnische Bestimmung der spektralen horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung von Fahrzeugen verschiedenen Typs während der Vorbeifahrt mit Hilfe eines Mikrofonarray-Messsystems. Diese Informationen sind wesentlich für die Schallausbreitung sowie die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen. Neben der gesamten Schallabstrahlung sollte der spektrale Gehalt des emittierten Schalls ermittelt werden.

Grundlage des angewendeten Messverfahrens ist die Ausnutzung der steuerbaren Richtwerkeigenschaft eines Mikrofonarrays. Durch Fokussierung des Mikrofonarrays auf das zu untersuchende Fahrzeug während der Vorbeifahrt können Störquellen ausgeblendet werden. Die ermittelten Schalldruckkartierungen ermöglichen die Berechnung der Richtcharakteristik und eine Abschätzung der Schalleistung des Fahrzeugs.

Die Richtcharakteristik des eingesetzten Mikrofonarrays wurde im Hinblick auf die Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs optimiert. Da für die Untersuchungen ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung notwendig ist, wurde ein Linienarray gewählt. Gegenüber einem zweidimensionalen Mikrofonarray erhöhen sich bei gleicher Mikrofonanzahl die örtliche Auflösung und die Nebenkeulenunterdrückung.

Unter Einsatz des optimierten Linienarrays erfolgten Messungen im fließenden Verkehr bei kontrollierter Vorbeifahrt eines Pkw, eines Kleintransporters und eines Lkw mit ausgewählten Geschwindigkeiten. Die horizontale Richtcharakteristik wurde durch Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Durch wiederholte Vorbeifahrt bei gleicher Geschwindigkeit mit variierter Höhe des vertikal positionierten Mikrofonarrays konnte die mittlere vertikale Richtcharakteristik ermittelt werden. Für die Abschätzung der Schalleistung wurde das Hüllflächen-Verfahren an die näherungsweise Schalleistungsbestimmung bewegter Quellen mit Mikrofonarray angepasst.

Determination of the vertical directional characteristic of the sound propagation of passenger cars, vans and trucks

Aim of this work was the determination of the spectral horizontal and vertical directional characteristic as well as the sound power of different vehicles during pass-by using a measuring system with a microphone array. This information is essential for sound propagation and the efficiency of noise control systems. Due to the frequency dependence of the sound diffraction and the sound reflection, not only the overall sound propagation, but also the spectral components of the emitted sound should be determined.

Basis of the applied measuring technique is the directional characteristic of the microphone array. By focusing the microphone array on the vehicle to be investigated during pass-by, present disturbing sound sources can be suppressed. The resulting sound pressure mappings allow the calculation of the directional characteristic and the evaluation of the sound power of the vehicle.

With respect to the localization of the vehicle during pass-by, the directional characteristic of the microphone array used was optimized. The investigation requires the sound localization in horizontal or vertical direction only. Therefore a one-dimensional line array was chosen. Compared to a two-dimensional microphone array with the same number of microphones, the spatial resolution and the side lobe suppression can be increased.

Using the optimized microphone array, in-situ measurements were carried out during controlled pass-by of a passenger car, a van and a truck at selected velocities. The horizontal directional characteristic was determined by localization of the vehicle at different points in time. By repeated pass-by with constant velocity but changed height of the vertically positioned microphone array, the average vertical directional characteristic was investigated. To evaluate the sound power, the standardized survey method using an enveloping measuring surface was adapted to the approximate determination of the sound power of moving sound sources using a microphone array.

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Grundlagen	7
2.1	Kennwerte von Schallquellen	7
2.2	Eigenschaften von Mikrofonarrays	9
2.2.1	Prinzipielle Funktionsweise	9
2.2.2	Richtcharakteristik	9
2.2.3	Qualitätskriterien	11
2.2.4	Optimierung	12
3	Bestimmung der Richtcharakteristik	17
3.1	Einzelmikrofon-Verfahren	17
3.2	Mikrofonarray-Verfahren	17
4	Bestimmung der Schallleistung	19
4.1	Hüllflächen-Verfahren	19
4.2	Mikrofonarray-Verfahren	19
5	Akustische Messungen	22
5.1	Messaufbau	22
5.2	Durchführung und Ergebnisse	25
5.3	Einzelergebnisse Schallabstrahlung	42
6	Auswertung	51
7	Zusammenfassung	57
8	Ausblick	59
	Literatur	60

1 Einleitung

Die Berechnung der Schallausbreitung des fließenden Verkehrs erfolgt bisher durch Modellierung der einzelnen Fahrzeuge als punkt- oder linienförmige Schallquelle mit kugelförmiger bzw. zylindrischer Richtcharakteristik. Gerade die horizontale Schallausbreitung sowie die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen werden jedoch von der gerichteten Schallabstrahlung der vorbeifahrenden Fahrzeuge bestimmt. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Schallbeugung und -reflexion spielt besonders der spektrale Gehalt des emittierten Schalls eine wesentliche Rolle bei der Schallausbreitung.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die messtechnische Bestimmung der spektralen horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung von Fahrzeugen verschiedenen Typs während der Vorbeifahrt mit Hilfe eines Mikrofonarray-Messsystems.

Als Mikrofonarray bezeichnet man eine Anordnung von mindestens zwei Mikrofonen. Anwendung finden Mikrofonarrays in den verschiedensten Bereichen der Akustik. Sie dienen vor allem der Lokalisation, Trennung und Analyse von Schallquellen. Die dadurch gewonnenen Informationen sind Voraussetzung für die Lärminderung von Maschinen, die Analyse der Geräuschenstehung bei der Umströmung von Objekten, die Suche von akustischen Leckagen oder akustisches Design. Auch in der Sprachverarbeitung lassen sich Anwendungen finden, wie z. B. die Sprecherlokalisierung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands von Sprachsignalen als wichtiger Bestandteil der Mensch-Maschine-Kommunikation.

Grundlage des angewendeten Messverfahrens ist die Ausnutzung der steuerbaren Richtwirkungseigenschaft eines Mikrofonarrays, die durch die Anwendung nachgeschalteter Signalverarbeitung auf die einzelnen Mikrofonsignale erzielt wird. Durch Fokussierung des Mikrofonarrays auf das zu untersuchende Fahrzeug während der Vorbeifahrt können die Schallemission unter verschiedenen horizontalen und vertikalen Winkeln bestimmt sowie auftretende Störquellen ausgeblendet werden. Die ermittelten Schalldruckkartierungen ermöglichen anschließend die Berechnung der Richtcharakteristik und eine Abschätzung der Schalleistung des Fahrzeugs.

Der vorliegende Bericht gliedert sich in fünf Abschnitte.

Zu Beginn werden die Eigenschaften des Mikrofonarrays im Hinblick auf die Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs optimiert. Für die Untersuchungen soll dabei ein Linienarray eingesetzt werden, da für die Ermittlung der horizontalen bzw. vertikalen Richtcharakteristik ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung notwendig ist.

Im zweiten Teil wird das eingesetzte Verfahren zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik durch Messung mit einem Mikrofonarray-Messsystem dargestellt.

Der dritte Teil beinhaltet einen Vergleich des normten Hüllflächen-Verfahrens, das für stationäre Quellen angewendet wird, mit einer Methode, die in der Literatur zur Abschätzung der Schalleistung von Schallquellen anhand von ermittelten Schalldruckkartierungen aus Mikrofonarray-Messungen eingesetzt wird. Aufgrund der Vor- und Nachteile beider Vorgehensweisen wird innerhalb der vorliegenden Untersuchungen eine Anpassung des Hüllflächen-Verfahrens an die näherungsweise Bestimmung der Schalleistung bewegter Quellen mit Mikrofonarray vorgenommen.

Das vierte Kapitel beschreibt die messtechnischen Untersuchungen zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Schallabstrahlung von Pkw, Kleintransportern und Lkw. Die Messungen am Pkw und am Kleintransporter erfolgten bei kontrollierter Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h. Die Untersuchungen am Lkw wurden bei 50 km/h und 80 km/h durchgeführt.

Der abschließende Teil des Berichts umfasst die Darstellung der berechneten horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung der Fahrzeuge. Es erfolgten ein Vergleich sowie eine Analyse und Interpretation der Ergebnisse.

2 Grundlagen

2.1 Kennwerte von Schallquellen

Der komplexe Richtungsfaktor $\underline{\Gamma}$ einer Schallquelle beschreibt mit

$$\underline{\Gamma} = \frac{\underline{p}(r, \varphi, \theta)}{\underline{p}_0(r, \varphi_0, \theta_0)} \quad (2.1)$$

das Verhältnis des komplexen Schalldruckes in einer bestimmten Richtung zum komplexen Schall-

druck in der Bezugsrichtung (vgl. Bild 2.1). Der Abstand r von der Schallquelle ist dabei für Zähler und Nenner gleich groß und befindet sich mit

$$kr \gg 1 \rightarrow r \gg \frac{c}{2\pi f} \quad (2.2)$$

im Fernfeld der Schallquelle. Bei einer Frequenz von $f = 315$ Hz und einer Schallgeschwindigkeit von $c = 343$ m/s entspricht dies $r_{min} \gg 0,2$ m.

Die Bezugsrichtung entspricht in der Regel einer Symmetrieachse des Strahlers oder der Richtung der maximalen Schallabstrahlung. Die Berechnung des Richtungsfaktors erfolgt meist über

$$\Gamma = \frac{\bar{p}(r, \varphi, \theta)}{\bar{p}_{max}(r, \varphi_0, \theta_0)} \quad (2.3)$$

Für einen Kugelstrahler nullter Ordnung (Monopol) beträgt der Richtungsfaktor $\Gamma = 1$ aufgrund gleichförmiger Schallabstrahlung in alle Raumrichtungen. Ein Kugelstrahler erster Ordnung (Dipol) besitzt dagegen eine achtförmige Abstrahlcharakteristik mit $\Gamma = \cos \varphi$.

Der Richtungsgrad Γ^2 einer Schallquelle entspricht dem quadratischen Richtungsfaktor.

Das Richtungsmaß D einer Schallquelle ergibt sich nach

$$\begin{aligned} D &= 20 \cdot \lg(\Gamma) \text{ dB} \\ &= 20 \cdot \lg\left(\frac{p(r, \varphi, \theta)}{p_0(r, \varphi_0, \theta_0)}\right) \text{ dB} \\ &= L_p(r, \varphi, \theta) - L_p(r, \varphi_0, \theta_0) \end{aligned} \quad (2.4)$$

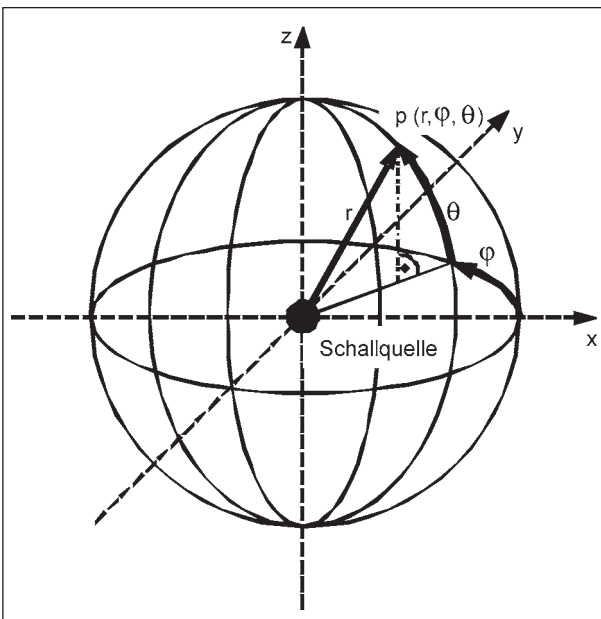


Bild 2.1: Geometrische Beschreibung des Richtungsfaktors

Die grafischen Darstellungen des Richtungsfaktors, des Richtungsgrades und des Richtungsmaßes erfolgen meist in Form eines Polarkoordinatendiagramms und werden als Richtdiagramm oder Richtcharakteristik bezeichnet.

Die Konturen für Γ mit

$$\theta = \theta_0 = 0^\circ \cap 0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ \quad (2.5)$$

bzw.

$$\varphi = \varphi_0 = \text{const.} \cap 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \quad (2.6)$$

beschreiben die horizontale bzw. vertikale Richtcharakteristik einer Schallquelle.

Die Schallleistung P einer Schallquelle ergibt sich durch Integration der Schallintensität \vec{I} auf einer die Schallquelle umschließenden Hüllfläche S zu

$$P = \iint_S \vec{I} d\vec{S} \quad (2.7)$$

Für die ebene Schallwelle bzw. näherungsweise das Fernfeld eines Kugelstrahlers erhält man aufgrund der Phasengleichlage zwischen Schalldruck und Schallschnelle mit Hilfe der Schallkennimpedanz Z_0 und dem quadratischen Effektivwertes des Schalldrucks \bar{p}^2

$$P = \iint_S \frac{\bar{p}^2}{Z_0} dS \quad (2.8)$$

S beschreibt die von der ebenen Schallwelle durchsetzte ebene Fläche bzw. die Oberfläche der Hüllkugel, die den Kugelstrahler im Fernfeld umgibt.

Unter Berücksichtigung der definierten Bezugsschallleistung $P_0 = 10^{-12}$ W ergibt sich der dazugehörige Schallleistungspegel L_W nach

$$L_W = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) \text{ dB} \quad (2.9)$$

Im Freifeld der Schallquelle kann der Schallleistungspegel aus dem auf der Hüllfläche vorhandenen mittleren Schalldruck L_{pm} nach

$$L_W = L_{pm} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) \text{ dB} \quad (2.10)$$

mit

$$L_{pm} = 10 \cdot \lg\left(\frac{\bar{p}^2}{\bar{p}_0^2}\right) \text{ dB} \quad (2.11)$$

ermittelt werden ($S_0 = 1 \text{ m}^2$; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$).

2.2 Eigenschaften von Mikrofonarrays

2.2.1 Prinzipielle Funktionsweise

Die Anwendung eines Mikrofonarrays zur Schallquellenortung beruht auf der Ausnutzung dessen Richtwirkungseigenschaft. Die prinzipielle Funktionsweise lässt sich mit der eines Hohlspiegels vergleichen. Der Hohlspiegel kann mechanisch auf einen beliebigen Fokuspunkt ausgerichtet werden (s. Bild 2.2).

Dieser Fokuspunkt entspricht dem ersten Brennpunkt des Hohlspiegels F_1 . Die emittierten Schallwellen einer in F_1 befindlichen Quelle werden an der Spiegeloberfläche in den zweiten Brennpunkt des Spiegels F_2 reflektiert und summieren sich dort

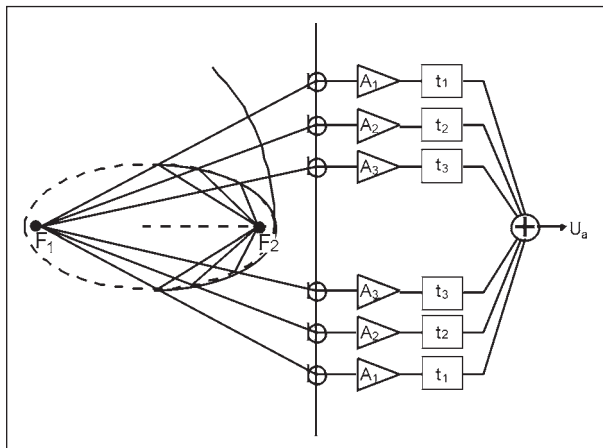


Bild 2.2: Vergleich der Funktionsweise von elliptischem Hohlspiegel und Mikrofonarray mit nachgeschalteter Signalverarbeitung: zentrierte Ausrichtung des Hohlspiegels \equiv symmetrische Amplituden- und Phasenkorrektur der Mikrofonsignale

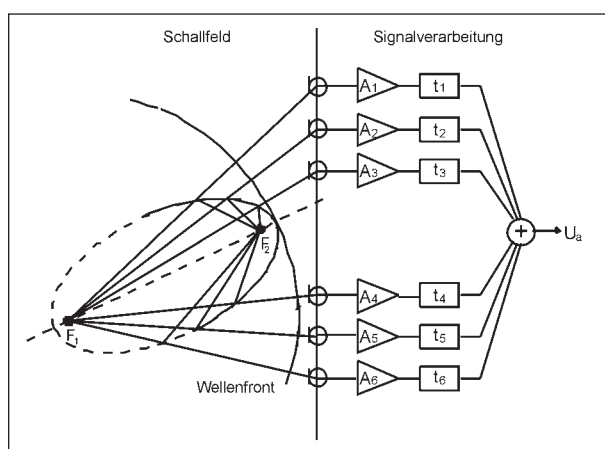


Bild 2.3: Vergleich der Funktionsweise von elliptischem Hohlspiegel und Mikrofonarray mit nachgeschalteter Signalverarbeitung: Neufokussierung durch mechanisches Schwenken des Hohlspiegels \equiv Änderung der Amplituden- und Phasenkorrektur der Mikrofonsignale

auf. Da durch eine definierte Form des Spiegels gleiche Laufzeiten der Einzelschallwellen erreicht werden, erfolgt die Addition der Schalldrücke phasenrichtig. Aus anderen Punkten einfallende Schallwellen werden an F_2 vorbei reflektiert und somit vom Hohlspiegel nicht „gesehen“. Dadurch entsteht eine Richtcharakteristik.

Man unterscheidet zwei Hauptklassen von Hohlspiegeln. Befindet sich die interessierende Schallquelle im Fernfeld, werden parabolische Hohlspiegel verwendet. Deren erster Brennpunkt liegt im Unendlichen, wodurch parallel einfallende Strahlen (ebene Wellen) einer bestimmten Fokusrichtung gebündelt werden (z. B. Satellitenantennen). In Nahfeldapplikationen hingegen kommen elliptische Hohlspiegel zum Einsatz, deren erster Brennpunkt sich in unmittelbarer Nähe zum Hohlspiegel befindet. Der Fokus liegt damit in einem von der Ausrichtung des Hohlspiegels abhängigen einzelnen Punkt.

Um die Wirkungsweise eines Hohlspiegels zu erzielen, ist es notwendig, die Ausgänge der in einer Ebene befindlichen Arraymikrofone durch eine nachgeschaltete Signalverarbeitung zu verbinden. Um eine phasenrichtige Addition der einzelnen an den Mikrofonen gemessenen Schalldruck-Zeit-Funktionen zu gewährleisten, müssen diese in Amplitude und Phase korrigiert werden. Dies geschieht durch Berechnung der Weglängen und der daraus resultierenden Amplituden- und Laufzeitunterschiede in Abhängigkeit vom jeweiligen Fokuspunkt (vgl. Bild 2.2). Diese Verfahrensweise, die im Zeitbereich als „Delay & Sum Beamforming“ bezeichnet wird, kann auch im Frequenzbereich durchgeführt werden.

Durch Variation der Amplituden- und Phasenkorrekturglieder kann das Mikrofonarray auf jeden beliebigen Punkt fokussiert werden (vgl. Bild 2.3).

Somit ist es möglich, einen beliebigen Raum vor dem Array mit einer einzelnen Messung ohne zusätzliche mechanische Drehung des Arrays zu scannen. Den beiden Hohlspiegelklassen entsprechend existieren zwei Formen des Beamforming-Algorithmus für das Fern- und das Nahfeld.

2.2.2 Richtcharakteristik

Ein geeigneter Ausgangspunkt für theoretische Untersuchungen der Eigenschaften von Mikrofonarrays ist das Arraypattern. Es bildet die Gesamtwirkung verschiedener Einflussgrößen auf die Qualität des Mikrofonarrays zur Schallquellenlokalisation ab und wird auch in der Literatur als Grundlage von

Optimierungen verwendet (HALD, 2002; HOPPERSTAD, 1999). Das Arraypattern ist vergleichbar mit der Richtcharakteristik eines spezifischen Mikrofonarrays in einem bestimmten Abstand zur Schallquelle. Für den Fall, dass das Schallfeld von einer einzelnen Quelle bestimmt wird, stellt das Arraypattern die Übertragungsfunktion zwischen dem Spektrum des Beamformer-Ausgangs und dem Spektrum des emittierten Quellsignals im Arraymittelpunkt dar.

Wie der Beamforming-Algorithmus kann das Arraypattern sowohl für das Fernfeld als auch für das Nahfeld angegeben werden. Im Fernfeld lässt sich das Arraypattern relativ einfach funktional beschreiben. In (HALD 2002) ist dieser Zusammenhang, wie in vielen anderen Literaturstellen, mit

$$W(\vec{K}) = \sum_M w_m \exp(j\vec{K}\vec{x}_m) \tag{2.12}$$

angegeben.

Die enthaltene vektorielle Wellenzahl \vec{K} ergibt sich dabei aus der Differenz der einfallenden Wellenzahlen \vec{k} und \vec{k}^0 aus Fokus- und Quellrichtung zu

$$\vec{K} = \vec{k} - \vec{k}^0. \tag{2.13}$$

Für die Beträge der Wellenzahlen \vec{k} und \vec{k}^0 gilt:

$$|\vec{k}| = |\vec{k}^0| = k = \frac{\omega}{c}. \tag{2.14}$$

Bild 2.4 veranschaulicht die geometrischen Zusammenhänge. \vec{x}_m ist der Vektor vom als Ursprung des Koordinatensystems definierten Mittelpunkt des Mi-

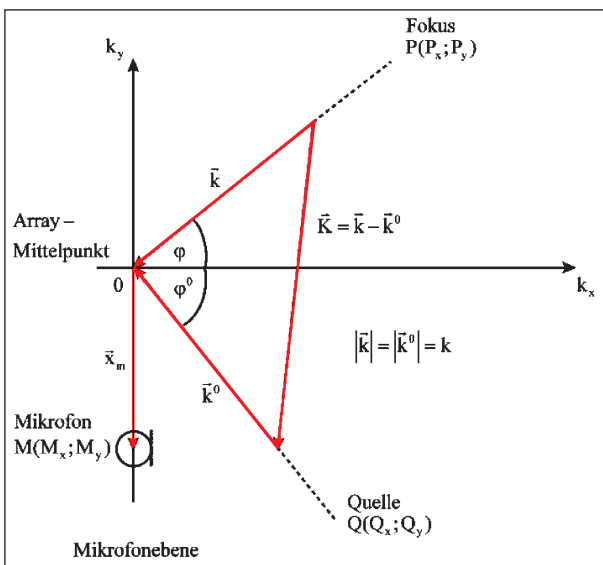


Bild 2.4: Darstellung der Einflussparameter auf das Arraypattern im Fernfeld

krofonarrays zum m -ten Mikrofon ($m = 1, \dots, M$). Die Größen w_m sind Wichtungsfaktoren für die einzelnen Mikrofone. Sie können, wie die englische Bezeichnung „shading factors“ besagt, ebenfalls dazu verwendet werden, einzelne Mikrofone zu deaktivieren. Die Wichtungsfaktoren stellen die Grundlage für unterschiedliche signalverarbeitende Algorithmen zur Optimierung der Leistungsfähigkeit von Mikrofonarrays zur Schallquellenlokalisierung dar.

Somit ist das Arraypattern im Fernfeld abhängig von

- der Mikrofonanzahl,
- der Mikrofonanordnung,
- der Mikrofonichtung,
- der Fokusrichtung,
- der Quellrichtung und
- der Frequenz (Wellenzahl).

Im Nahfeld ergibt sich das Arraypattern nach (ARNOLD, 2002) zu

$$W(k, \vec{x}, \vec{x}^0) = \sum_M w_m \frac{r^0 r_m}{r r_m^0} \exp\{-jk((r_m^0 - r_m) - (r^0 - r))\}. \tag{2.15}$$

Die Radien r^0 und r_m^0 beschreiben dabei jeweils den Abstand zwischen Schallquelle und Arraymittelpunkt bzw. m -tem Mikrofon. r und r_m geben analog dazu die Entfernungen zwischen Fokuspunkt und Arraymittelpunkt bzw. m -tem Mikrofon an.

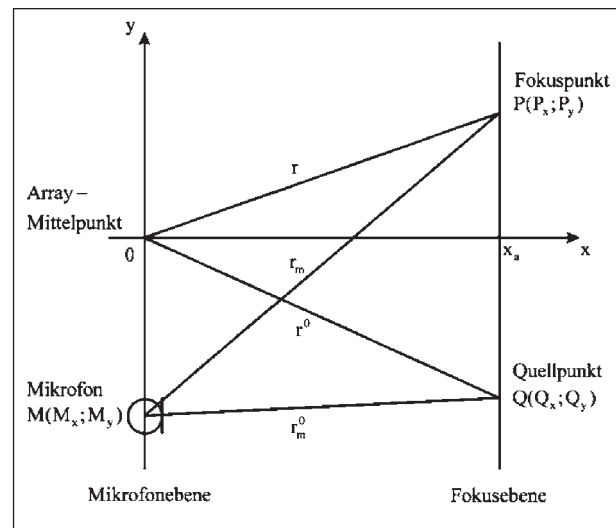


Bild 2.5: Darstellung der Einflussparameter auf das Arraypattern im Nahfeld

Die Bedeutung dieser Größenbezeichnungen soll durch Bild 2.5 verdeutlicht werden.

Im Nahfeld hängt das Arraypattern damit sowohl von den Einflussgrößen des Fernfeldpatterns als auch von

- der Fokuspunktentfernung und
- der Quellentfernung

ab. Somit ist nicht nur die Richtung von Fokus- und Quellpunkt, sondern auch deren genaue Position von Wichtigkeit.

Die wichtigsten Bestandteile eines Arraypatterns sind in Bild 2.6 zusammengefasst dargestellt.

Die im Zentrum dargestellte Hauptkeule beschreibt die Hauptempfangsrichtung des Arrays. Zu beiden Seiten der Hauptkeule befinden sich geminderte

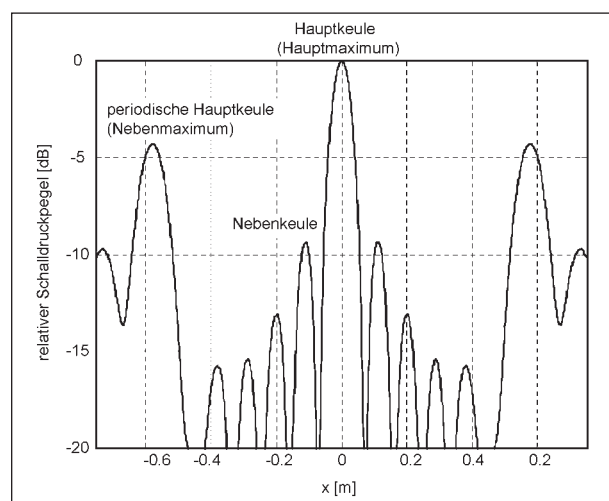


Bild 2.6: Wesentliche Bestandteile eines Arraypatterns

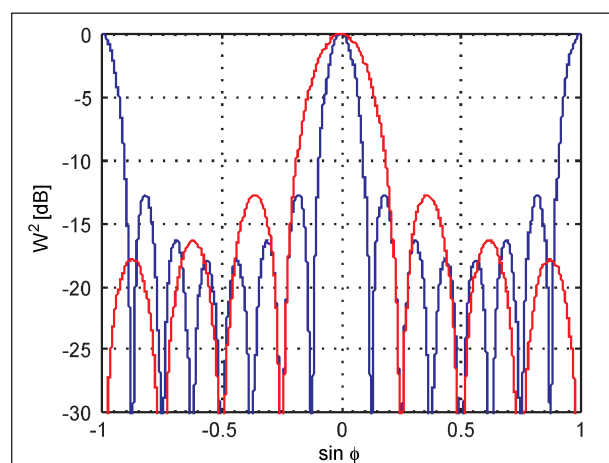


Bild 2.7: Arraypattern eines 8-elementigen, äquidistanten Linienarrays der Breite 0,5 m für die Frequenzen $f_1 = 1.600$ Hz (blau) und $f_2 = 800$ Hz (rot) in Abhängigkeit vom Fokuswinkel φ

Nebenkeulen. Diese zeigen die Fähigkeit des Arrays auf, aus anderen Richtungen einfallende Signale zu unterdrücken. Die an den Seiten der Abbildung dargestellten periodischen Nebenmaxima sind örtliche Aliasingeffekte, die aus der Unterabtastung der empfangenen Schallwelle resultieren. Die Folge ist eine nicht eindeutige Lokalisation der Schalleinfallrichtung. Dies kann im Lokalisationsergebnis zum Auftreten von Artefakten, so genannten „Geisterbildern“, führen. Die Stärke der Amplitudenminderung der Nebenkeulen sowie deren Anzahl zwischen Hauptkeule und Nebenmaximum werden neben der Form des Arrays besonders durch die Mikrofonanzahl bestimmt. Je größer die Mikrofonanzahl bei konstanter Arraybreite, desto größer ist die Anzahl der gedämpften Nebenkeulen. Damit verbessert sich die Richtcharakteristik des Arrays. Für das Beispiel eines M-elementigen äquidistanten Linienarrays entspricht jede M-te Richtkeule einer periodischen Hauptkeule (vgl. Bild 2.7).

2.2.3 Qualitätskriterien

Untersuchungen in (SCHULZE, 2005) haben gezeigt, dass sich die Eigenschaften des Arraypatterns in den Ergebnissen praktischer Messungen wiederfinden lassen. Im Hinblick auf eine Optimierung der Arrayeigenschaften ist es daher notwendig, Qualitätskriterien zu definieren.

Ein wesentliches Qualitätskriterium ist die Hauptkeulenbreite (HKB) des Arraypatterns. Diese steht in direktem Zusammenhang mit der maximal erreichbaren Auflösung einer detektierten Quelle und somit der Trennbarkeit benachbarter Quellen. Je geringer die Hauptkeulenbreite ist, desto feiner kann eine einzelne Quelle aufgelöst werden. Folglich verringert sich der notwendige Mindestabstand zweier benachbarter Quellen, um zu gewährleisten, dass diese noch getrennt lokalisiert werden können. Von den verschiedenen, in der Literatur existierenden Beschreibungen der HKB (z. B. JOHNSON, 1993; MUELLER, 2002) wird meist die so genannte FWHM („full width, half maximum“) verwendet. Sie ist definiert als der Bereich der Hauptkeule, in dem das Maximum des quadratischen Arraypatterns auf die Hälfte abgefallen ist. Im Pegelmaß bedeutet dies einen Abfall um 3 dB. Diese Definition der HKB entspricht dem minimalen Abstand für die örtliche Trennung zweier inkohärenter Quellen gleicher Quellstärke.

Gegenüber einem Schalleinfallswinkel $\varphi = 0^\circ$ nimmt die HKB bei größer werdendem Fokuswinkel zu.

Eine nicht mittig vor dem Mikrofonarray befindliche Quelle wird damit verzerrt abgebildet. Für eine ebenfalls gebräuchliche Definition der HKB, der so genannten doppelten PZD („peak to zero distance), zeigte (CHRISTENSEN, 2004), dass sich die Zunahme der HKB näherungsweise über

$$\frac{R_y(\varphi)}{R_y(\varphi=0^\circ)} = \frac{1}{\cos^3 \varphi} \quad (2.16)$$

beschreiben lässt (vgl. Bild 2.8). Eine maximale Verlagerung der Schallquelle von etwa $\pm 30^\circ$ aus der Arraynormalen durch den Arraymittelpunkt heraus gewährleistet eine Verzerrung der Schallquelle um weniger als 50 %. Der maximale theoretische Öffnungswinkel beträgt $\pm 90^\circ$.

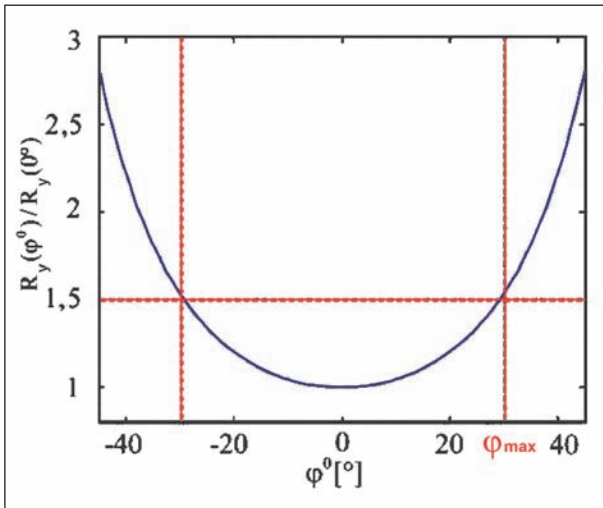


Bild 2.8: Abhängigkeit der Hauptkeulenbreite PZD vom Fokuswinkel φ (Normierung auf PZD für senkrechten Schalleinfall $\varphi = 0^\circ$)

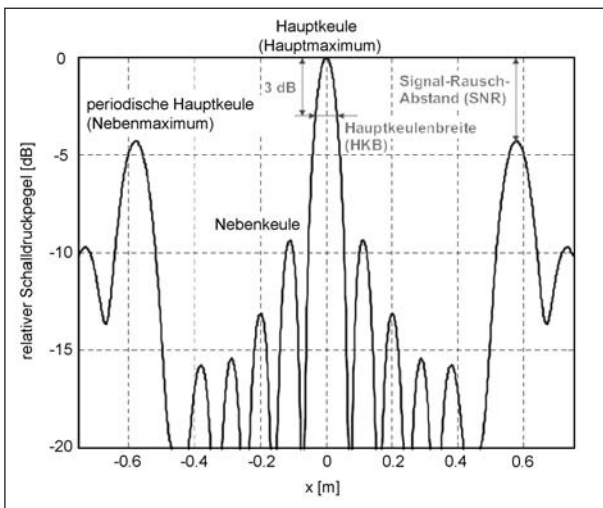


Bild 2.9: Qualitätskriterien zur Bewertung eines Arraypatterns einer spezifischen Mikrofonanordnung

Ein weiteres, ebenfalls in der Literatur häufig verwendetes Qualitätskriterium ist der Signal-Rausch-Abstand (SNR, als Abkürzung für die englische Bezeichnung „signal-to-noise ratio“). Dieser ist definiert als die Pegeldifferenz zwischen der Hauptkeule und der höchsten auftretenden Nebenkeule des Arraypatterns (siehe z. B. HALD, 2002).

Der SNR ist somit ein Maß für die Stärke der örtlichen Aliasingeffekte und die damit verbundenen Artefakte im Lokalisationsergebnis, die durch örtliche Unterabtastung der einfallenden Schallwelle entstehen. Je größer der SNR ist, desto stärker werden die „Geisterquellen“ unterdrückt. Die aufgeführten Qualitätskriterien sind in Bild 2.9 zusammenfassend dargestellt.

2.2.4 Optimierung

Unabhängig von der Art des Schallfeldes lassen sich die Einflussgrößen auf das Arraypattern in zwei Gruppen unterteilen: in hardwarebedingte und anwendungsbedingte Parameter.

Den hardwarebedingten Parametern lässt sich dabei die Mikrofonanzahl zuordnen. Sie wird bestimmt durch die Kanalanzahl und die Bandbreite des Datenbusses der nachgeschalteten Signalverarbeitungstechnik, mit der parallel an den einzelnen Mikrofonen Schalldruck-Zeit-Signale diskretisiert und aufgezeichnet werden müssen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine Mikrofonanzahl von 32 festgelegt.

Zu den anwendungsbedingten Größen gehört erstens der Arbeitsfrequenzbereich des Mikrofonarrays, der durch die Eigenschaften der zu lokalisierenden Quellen festgelegt wird. Die spektrale Charakteristik und die damit verbundene Bandbreite der Schallquelle bestimmen die Grenzfrequenzen der zu detektierenden Schallwellen und die daraus resultierende Mindestgröße des Mikrofonarrays. Bezug nehmend auf den energetischen Schwerpunkt des Standardisierten Verkehrslärmspektrums (DIN EN 1793-3, 1997) wurden ein Analyse-Frequenzbereich von 315 Hz bis 3.150 Hz und eine Arraybreite von 2,6 m festgelegt. Zweitens werden durch die Abmaße des zu untersuchenden Objektes Größe und Entfernung der wählbaren Analyseebene und somit die Fokuspunktkoordinaten bestimmt. Innerhalb der vorliegenden Untersuchungen wurde der Arrayabstand im Hinblick auf die Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik auf 25 m festgelegt. Die horizontale Ausdehnung der Scanebene betrug innerhalb der Optimierung

± 285 m. Dies entspricht einem horizontalen Schalleinfallswinkel von $\pm 85^\circ$. Letztlich bleiben die Mikrofonanordnung und die dazugehörigen Wichtungsfaktoren als freie Parameter für die Optimierung der Arrayeigenschaften übrig.

Die Richtcharakteristik des Arrays kann durch die Wahl zusätzlicher signalverarbeitender Algorithmen verbessert werden. Im vorliegenden Anwendungsfall der Lokalisation breitbandiger Schallquellen ist die Anwendung der Frequenzbandmittelung sinnvoll. Dieser Algorithmus beruht auf der Tatsache, dass die Nebenkeulen und periodischen Hauptkeulen des Arraypatterns bei verschiedenen Frequenzen verschiedene Positionen besitzen, die Hauptkeule jedoch stets am selben Ort bleibt (SCHULZE, 2004-01). Die Frequenzbandmittelung entspricht der energetischen Addition der Arraypattern über

ein gewähltes Frequenzband, wodurch die örtlichen Aliasingeffekte gemindert und das Arraypattern geglättet werden. Dies führt zu einer Vergrößerung des SNR und somit zu einer Verbesserung des Lokalisationsergebnisses.

Bild 2.10 zeigt das Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays der Arraybreite 2,6 m für die Einzelfrequenz von 3.150 Hz im Array-Quell-Abstand von 25 m und einem horizontalen Schalleinfallswinkel von $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$). Die beidseitig der Hauptkeule auftretenden Nebenkeulen des Arraypatterns sind dabei besonders in Bild 2.11 deutlich zu erkennen. Im Vergleich dazu zeigen Bild 2.12 und Bild 2.13 das geglättete und im SNR verbesserte Arraypattern nach Anwendung der Frequenzbandmittelung im Terzband 3.150 Hz. Die HKB ändert sich dage-

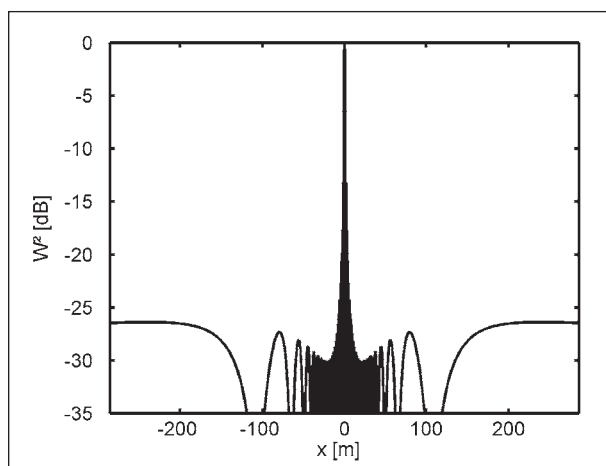


Bild 2.10: Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays: Arraybreite 2,6 m, Einzelfrequenz 3.150 Hz, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

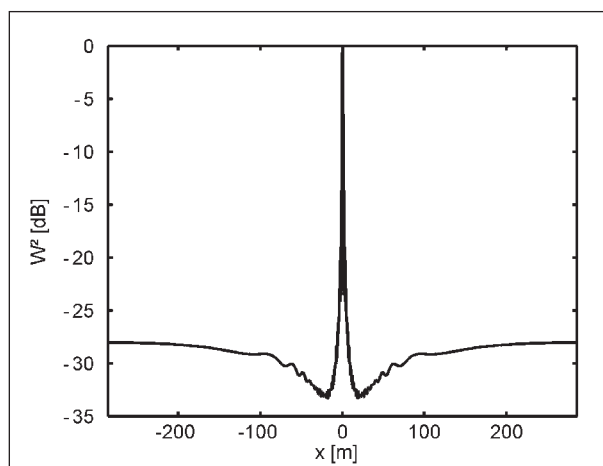


Bild 2.12: Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays: Arraybreite 2,6 m, Terzband 3.150 Hz, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

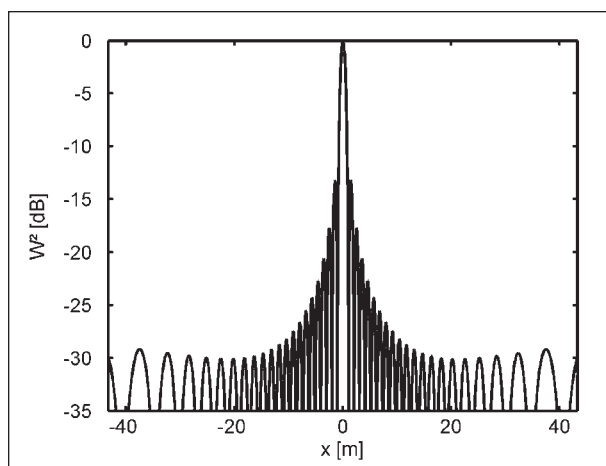


Bild 2.11: Detailansicht Bild 2.10, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

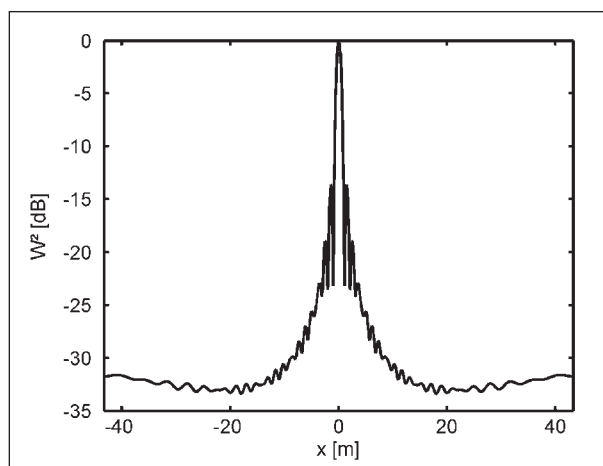


Bild 2.13: Detailansicht Bild 2.12, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

gen nicht und beträgt in beiden Fällen 0,90 m. Durch Vergrößerung der Bandbreite (z. B. Oktavband) kann das Arraypattern weiter verbessert werden.

Als Optimierungsverfahren wurde die in (SCHULZE, 2004-02) vorgestellte „numerische Synthese“ angewendet. Das Grundprinzip der numerischen Synthese basiert auf der Vorgabe eines definierten Parametersatzes und einer gewählten Mikrofonanordnung. Der Parametersatz setzt sich dabei aus den oben angegebenen hardware- und anwendungsbedingten Größen zusammen. Für eine gegebene Mikrofonanordnung wird das Arraypattern über Gleichung (2.12) oder (2.15) auf dem definierten Analyseraster im gewünschten Frequenzbereich berechnet. Daraus werden die in Kapitel 2.2.3 aufgeführten spezifischen Qualitätskriterien bestimmt. Das Problem der parallelen Optimierung von mehreren Qualitätskriterien ist durch die Einführung einer, über einen vorgegebenen Frequenzbereich F zu minimierenden, frequenzabhängigen Hauptkostenfunktion $C_{Haupt}(f)$ gelöst

$$\sum_F C_{Haupt}(f) \rightarrow Min. \tag{2.17}$$

Die Hauptkostenfunktion ermöglicht es, die ermittelten arrayspezifischen Kenngrößen zu einer Steuergröße zusammenzufassen und eine Gesamtaussage über die Qualität der Mikrofonanordnung zu treffen. Die Verknüpfung erfolgt dabei durch eine in Gleichung (2.18) dargestellte Linearkombination von N mit c_n gewichteten Teilkostenfunktionen C_n , die den N einzelnen frequenzabhängigen Qualitätskriterien $\chi_n(f)$ zugeordnet sind.

$$C_{Haupt}(f) = \sum_N c_n C_n(x_n(f)) \tag{2.18}$$

Der Flussplan, der sich daraus ergebenden Optimierungsstrategie ist in Bild 2.14 dargestellt.

Bild 2.15 und Bild 2.16 zeigen das Arraypattern des in Bild 2.17 enthaltenen optimierten 32-elementigen Linienarrays für das Terzband von 3.150 Hz. Die HKB und der SNR nehmen dabei Werte von 1,29 m bzw. 18,8 dB an. Der SNR ist damit um 6,8 dB höher als der zu erwartende mittlere SNR von 12 dB eines zufälligen Flächenarrays mit der Mikrofonanzahl nach (MUELLER, 2002, STEINBERG, 1976):

$$E[SNR]_{Flächenarray} = 10 \lg M - 3 \text{ dB}. \tag{2.19}$$

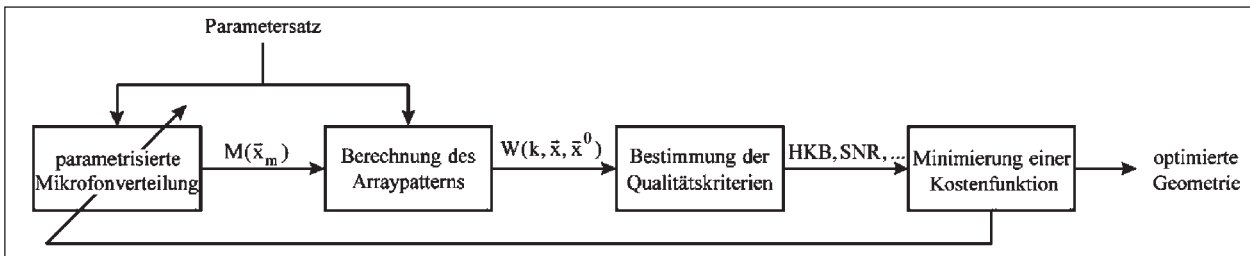


Bild 2.14: Flussplan der numerischen Synthese mit durch Rückkopplung gesteuerter Geometriegeneration, basierend auf der Minimierung einer Kostenfunktion

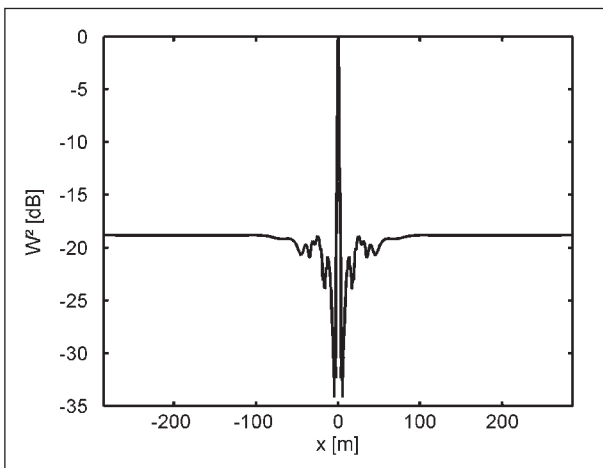


Bild 2.15: Arraypattern des optimierten 32-elementigen Linienarrays: Terzband 3.150 Hz, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

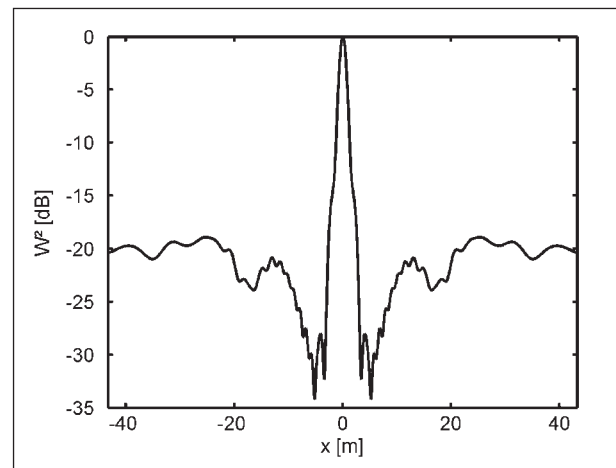


Bild 2.16: Detailansicht Bild 2.15, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

Innerhalb dieser Untersuchungen wurde eine weitere Optimierung des Arraypatterns durch Variation der Wichtungsfaktoren der Mikrofone vorgenommen. Dies ermöglicht eine zusätzliche Vergrößerung des SNR.

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 angesprochen, entsprechen die an den Mikrofonen gemessenen Schalldrücke für einen festen Zeitpunkt den örtlichen Abtastwerten der einfallenden Schallwelle. Die Fernfeldbeschreibung des Arraypatterns in Gleichung (2.12) kann bei genauerer Betrachtung als örtliche Fourier-Transformation der so genannten Apertur des Mikrofonarrays (der Mikrofonanordnung) interpretiert werden. Die Wichtungsfaktoren der einzelnen Mikrofone entsprechen dabei einer örtlichen Fensterfunktion. Analog zur Fensterung eines Zeitsignals führt die Multiplikation von Apertur und örtli-

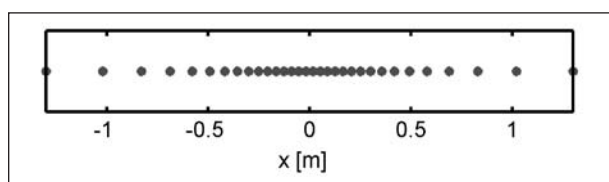


Bild 2.17: Mikrofonanordnung des optimierten 32-elementigen Linienarrays, Kriterium der Optimierung: möglichst großer SNR des Arraypatterns bei geringer HKB

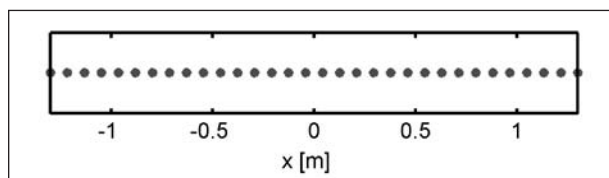


Bild 2.18: Mikrofonanordnung des verwendeten 32-elementigen äquidistanten Linienarrays

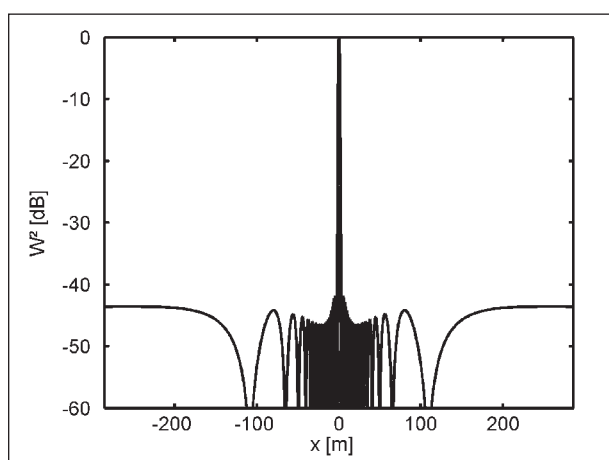


Bild 2.19: Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays: Arraybreite 2,6 m, Einzelfrequenz 3.150 Hz, mit Hamming-Fenster, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

cher Fensterfunktion im Originalbereich zur Faltung der Einzel-Transformierten von Apertur und Fensterfunktion im Bildbereich der Fourier-Transformation. Für den speziellen Fall eines unitär gewichteten äquidistanten Linienarrays mit

$$w_m = 1 \quad \forall m; m = 1..M \quad (2.20)$$

entspricht das Arraypattern im Fernfeld somit einer Spaltfunktion (vgl. Nahfeld-Arraypattern Bild 2.11). Als besonderer Nachteil der Spaltfunktion sind die unmittelbar der Hauptkeule benachbarten amplitudenstarken ersten Nebenkeulen anzusehen. Diese verfälschen bei Vorhandensein mehrerer eng benachbarter Schallquellen besonders den Ort und den Absolutpegel der Einzelquellen. Durch Anwendung eines Hamming- oder von Hann-Fensters können die Nebenkeulen der Spaltfunktion um ein Vielfaches gemindert und der Einfluss der Fensterfunktion auf das Lokalisationsergebnis stark verringert werden. Im Gegenzug vergrößert sich die HKB dabei um etwa 50 %.

Bild 2.19 bis Bild 2.22 zeigen diesen Sachverhalt deutlich am Beispiel des Arraypatterns des 32-elementigen, 2,6 m breiten äquidistanten Linienarrays (vgl. Bild 2.18) für die Einzelfrequenz bzw. das Terzband von 3.150 Hz bei einem Array-Quell-Abstand von 25 m. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Amplitudenänderung der ersten Nebenkeulen gelegt werden. Durch die Anwendung der Hamming-Fensterung auf das Arraypattern des äquidistanten Linienarrays vergrößert sich die Unterdrückung dieser Nebenkeulen von 13,6 dB auf 51,5 dB. Dies hat eine Vergrößerung des SNR von 13,6 dB auf 44,3 dB zur Folge. Verglichen mit dem Arraypattern des unitär gewichteten optimierten Linienarrays aus Bild 2.17 ergibt sich ein theoretischer

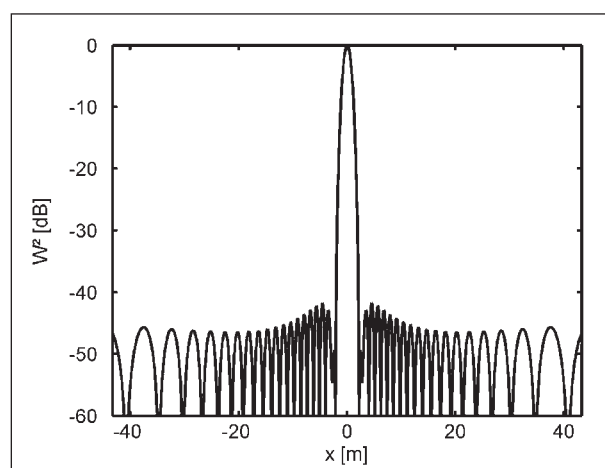


Bild 2.20: Detailansicht Bild 2.19, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

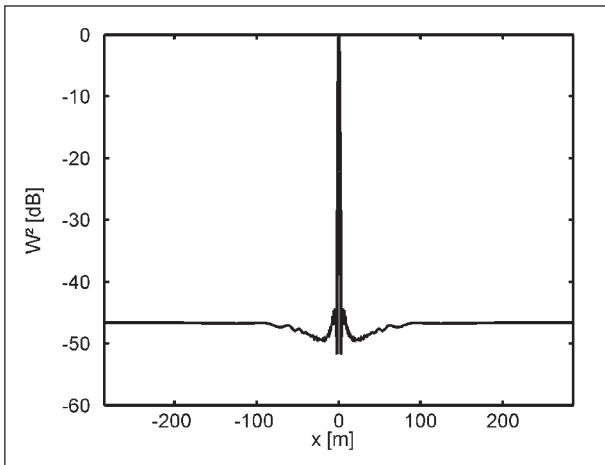


Bild 2.21: Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays: Arraybreite 2,6 m, Terzband 3.150 Hz, mit Hamming-Fenster, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

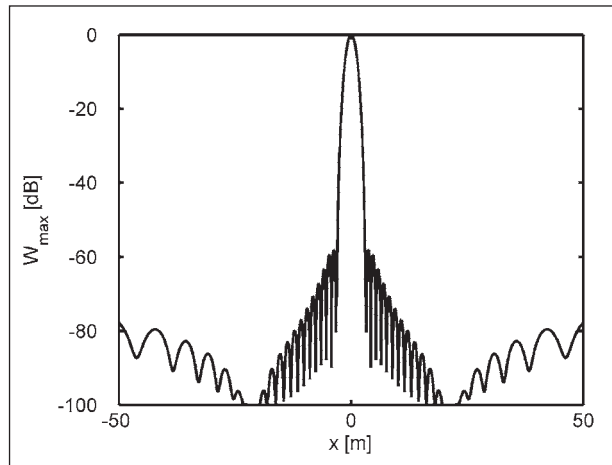


Bild 2.24: Detailansicht Bild 2.23, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

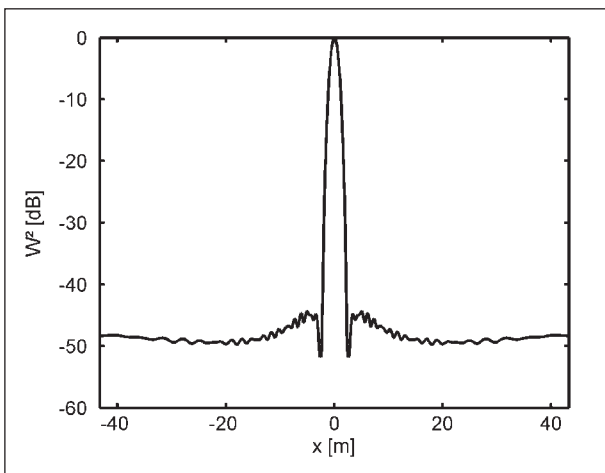


Bild 2.22: Detailansicht Bild 2.21, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

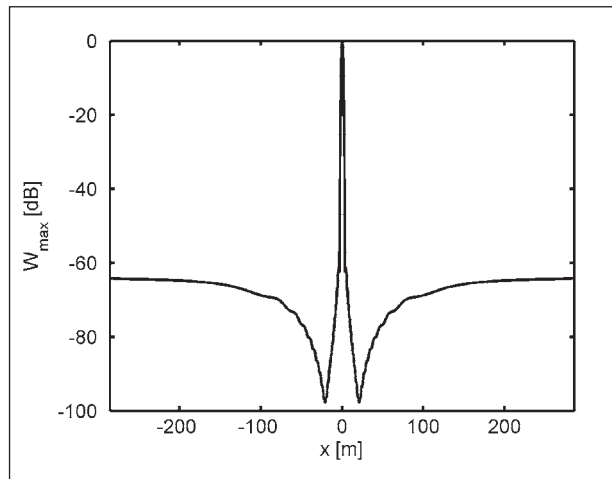


Bild 2.25: Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays: Arraybreite 2,6 m, Terzband 3.150 Hz, mit Blackman-Fenster, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

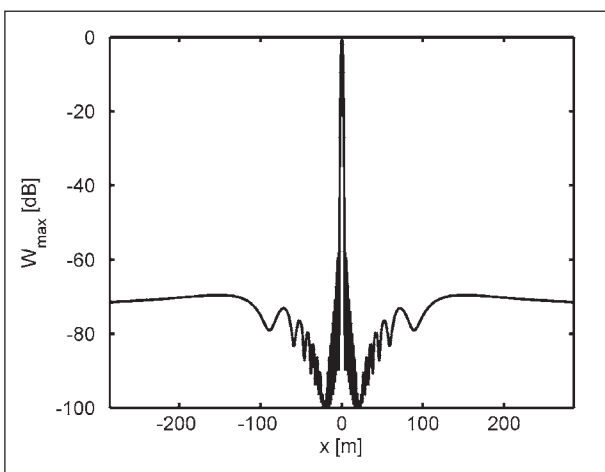


Bild 2.23: Arraypattern eines 32-elementigen äquidistanten Linienarrays: Arraybreite 2,6 m, Einzelfrequenz 3.150 Hz, mit Blackman-Fenster, Array-Quell-Abstand 25 m, horizontaler Schalleinfallswinkel $-85^\circ \leq \varphi \leq 85^\circ$ ($-285 \text{ m} \leq x \leq +285 \text{ m}$)

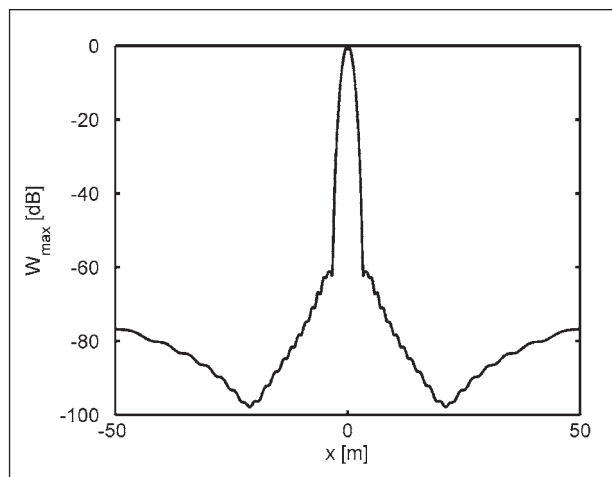


Bild 2.26: Detailansicht Bild 2.25, horizontaler Schalleinfallswinkel $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($-43,3 \text{ m} \leq x \leq +43,3 \text{ m}$)

scher Zuwachs des SNR um 30,7 dB. Die HKB vergrößert sich dabei von 0,90 m auf 1,35 m.

Durch Anwendung einer Blackman-Fensterung kann der SNR der Arraypatterns auf nahezu 60 dB maximiert werden. Dies hat jedoch eine Verschlechterung der HKB auf ca. 1,80 m zur Folge. Gegenüber der unitären Mikrofonanordnung halbiert sich die örtliche Auflösung damit in etwa. Dies ist für die Bestimmung der Richtcharakteristik jedoch von untergeordneter Bedeutung.

3 Bestimmung der Richtcharakteristik

3.1 Einzelmikrofon-Verfahren

Bezug nehmend auf die in Kapitel 2.1 definierten Kennwerte von Schallquellen lassen sich die horizontale bzw. vertikale Richtcharakteristik einer stationären Schallquelle durch Einzelmikrofon-Messung des Schalldruckes entlang einer gewählten Kreisbahn um die Schallquelle und Anwendung von Gleichung (2.4) ermitteln (vgl. Bild 3.1).

3.2 Mikrofonarray-Verfahren

Innerhalb der vorliegenden Untersuchungen soll zur Bestimmung der gerichteten Schallabstrahlung von Fahrzeugen ein Mikrofonarray mit steuerbarer Richtcharakteristik eingesetzt werden. Durch Lokalisation des Fahrzeugs während der Vorbeifahrt ist es möglich, den vom Fahrzeug am Immissionsort hervorgerufenen Schalldruck für beliebige horizontale Schalleinfallswinkel zu bestimmen (vgl. Bild 3.2). Daraus lässt sich anschließend die horizontale Richtcharakteristik berechnen. Entgegen der Anwendung des in Kapitel 3.1 beschriebenen Einzelmikrofon-Verfahrens bei stationärer Quelle wird in diesem Fall die Schallquelle um den stationären Empfänger bewegt.

Die Ermittlung der Schalldruckkartierung erfolgt durch Anwendung des Nahfeld-Beamforming-Algorithmus. Das in Kapitel 2.2.1 anhand eines elliptischen Hohlspiegels beschriebene Prinzip dieses Algorithmus soll dazu durch mathematische Zusammenhänge spezifiziert werden.

Gegeben ist der in Bild 3.3 dargestellte geometrische Sachverhalt. Ein im Quellpunkt ausgesendetes Schalldruck-Zeit-Signal ist definiert durch $p(t)$.

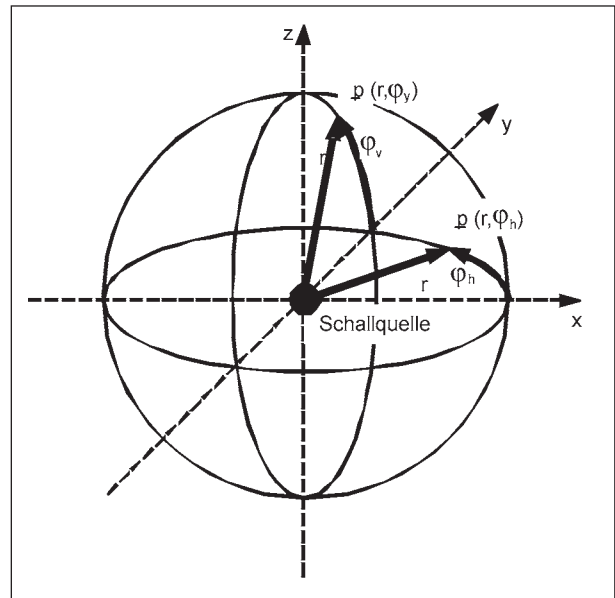


Bild 3.1: Bestimmung der horizontalen (φ_h) und vertikalen (φ_v) Richtcharakteristik einer Schallquelle mit Einzelmikrofon

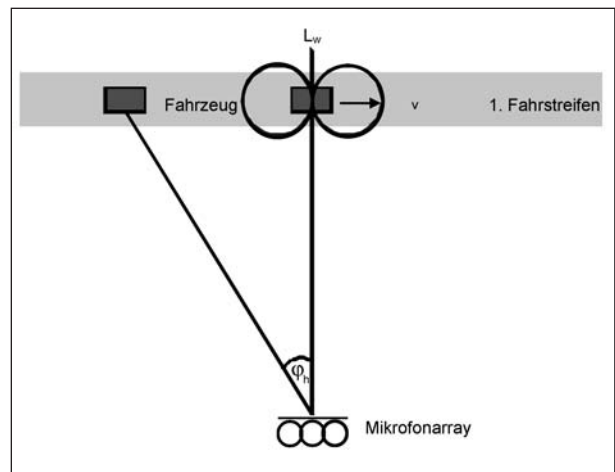


Bild 3.2: Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik mit Mikrofonarray

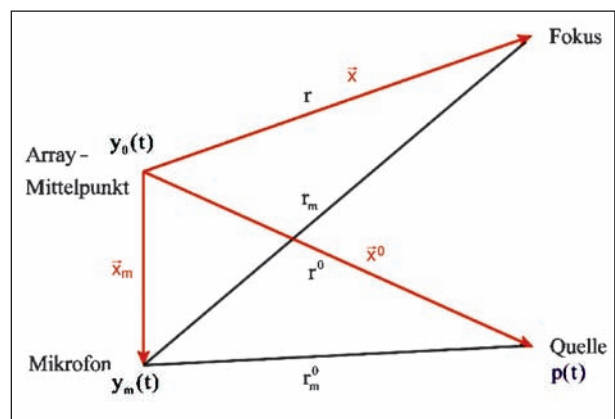


Bild 3.3: Geometrie zur Herleitung des Nahfeld-Beamforming-Algorithmus

Der mit $1/r$ abfallende Schalldruck berechnet sich somit im Zentrum des Mikrofonarrays zu

$$y_0(t) = \frac{p\left(t - \frac{1}{c}|\vec{x}_m - \vec{x}^0|\right)}{|\vec{x}_m - \vec{x}^0|}. \quad (3.1)$$

Die Variable c sei dabei die Schallgeschwindigkeit. Analog dazu ergibt sich der Schalldruck am m -ten Mikrofon zu

$$y_m(t) = \frac{p\left(t - \frac{1}{c}|\vec{x}_m - \vec{x}^0|\right)}{|\vec{x}_m - \vec{x}^0|}. \quad (3.2)$$

Wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, beinhaltet der Beamforming-Algorithmus die in Gleichung (3.3) enthaltene Addition aller über einen Fokuspunkt in Amplitude und Phase korrigierten gewichteten Mikrofon-signale. Damit berechnet sich der Ausgang des Beamformers $z(t)$ über

$$z(t) = \sum_{m=1}^M w_m \Delta A_m y_m(t - \Delta t_m), \quad (3.3)$$

wobei

$$\Delta A_m = \frac{|\vec{x}_m - \vec{x}|}{|\vec{x}|} \quad (3.4)$$

und

$$\Delta t_m = \frac{1}{c} (|\vec{x}| - |\vec{x}_m - \vec{x}|). \quad (3.5)$$

Fällt der Fokuspunkt mit dem Ort der tatsächlichen Quelle zusammen ($\vec{x} = \vec{x}^0$), ergibt sich durch eine optimale Phasenkorrektur am Ausgang des Beamformers ein Maximum zu

$$z(t) = y_0(t) \sum_{m=1}^M w_m. \quad (3.6)$$

Das im Signal-Rausch-Abstand verbesserte Quell-signal $y_0(t)$ erhält man durch Normierung auf die Summe der Wichtungsfaktoren, welche für den Fall einer unitären Wichtung (vgl. Gleichung (2.20)) der Mikrofonanzahl M entspricht.

Der normierte Ausgang des Beamformers entspricht damit dem Schalldruck, der durch eine im Fokuspunkt befindliche Quelle an einem virtuellen Mikrofon im Arraymittelpunkt hervorgerufen wird.

Die Anwendung des Beamforming-Algorithmus im Zeitbereich nach Gleichung (3.3) führt bei der Lokalisation eines Fahrzeugs mit hoher Geschwindigkeit zu einer fehlerhaften Bestimmung des emittierten Schalldruckpegels. Aufgrund des Dopplereffekts kommt es mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit zur Verschiebung der Energie eines gewählten Frequenzbands in benachbarte Frequenzbänder.

Durch Anwendung eines speziellen Pass-by-Algorithmus kann dieser Effekt vermieden werden. Dabei wird der herkömmliche Beamforming-Algorithmus so modifiziert, dass die Scanebene während der Fahrzeug-Vorbeifahrt mit der Fahrzeuggeschwindigkeit mitgeführt wird. Die Scanebene ist damit „fest“ mit dem Fahrzeug verbunden (vgl. Bild 3.4, ZHENG, 2006). In (PALLAS, 2004) wird diese Methode ebenfalls eingesetzt.

Grundvoraussetzung für die Mitführung der Scanebene ist einzig und allein die Kenntnis der Fahrzeuggeschwindigkeit, die bei gleichförmiger Bewegung mit Hilfe von zwei Laser-Reflexions-Lichtschranken, deren Position bekannt ist, einfach ermittelt werden kann.

Die Gleichungen (3.4) und (3.5) ändern sich schließlich wie folgt zu

$$\Delta A_m = \frac{|\vec{x}_m - \vec{x}(t)|}{|\vec{x}(t)|} \quad (3.7)$$

und

$$\Delta t_m = \frac{1}{c} (|\vec{x}(t)| - |\vec{x}_m - \vec{x}(t)|). \quad (3.8)$$

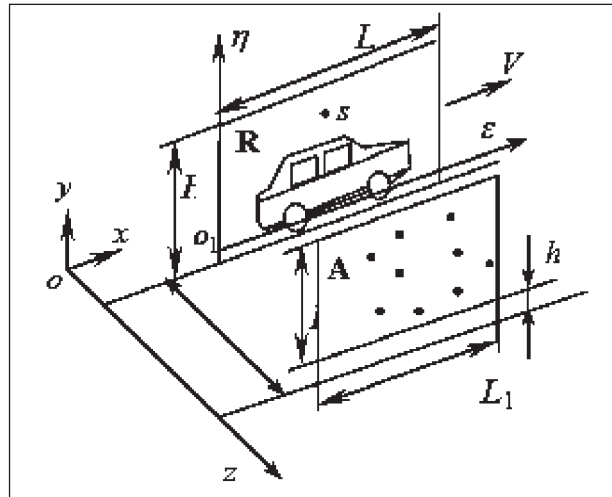


Bild 3.4: Pass-by-Algorithmus zur Lokalisation bewegter Schallquellen hoher Geschwindigkeit (ZHENG, 2006)

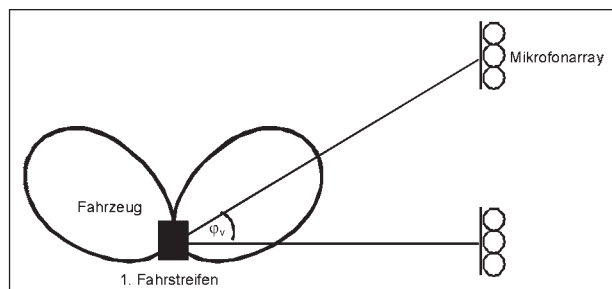


Bild 3.5: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik mit Mikrofonarray

Durch Lokalisierung des Fahrzeugs während der Vorbeifahrt unter einem definierten Bereich des horizontalen Schalleinfallswinkels und Wiederholung der Vorbeifahrt bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit mit variiert Höhe des Mikrofonarrays ist es möglich, die vertikale Richtcharakteristik des Fahrzeugs zu bestimmen. Dieser Sachverhalt ist in Bild 3.5 dargestellt.

4 Bestimmung der Schalleistung

4.1 Hüllflächen-Verfahren

Die Normreihe DIN EN ISO 3744-3746 beschäftigt sich mit der Bestimmung der Schalleistung von quasi-stationären Schallquellen auf der Basis des Hüllflächen-Verfahrens. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, lässt sich die Schalleistung durch Messung des mittleren Schalldrucks L_{pm} ermitteln, der auf der Hüllfläche vorhanden ist, die die Schallquelle umschließt. In Abhängigkeit von der Genauigkeitsklasse besitzt die Hüllfläche eine Vollkugel-, Halbkugel- oder Quaderform, auf der die Messpunkte zur Bestimmung des Schalldruckpegels regelmäßig angeordnet sind.

Der praktisch bedeutendste Fall entspricht der Bestimmung der Schallabstrahlung einer Schallquelle über reflektierendem Grund. Dabei wird als Hüllfläche eine Halbkugel mit

$$S = 2\pi r^2 \quad (4.1)$$

bzw. ein Quader ohne Bodenfläche mit

$$S = 4(ab + ac + bc) \quad (4.2)$$

angesetzt (vgl. Bild 4.1). Der einzuhaltende Messabstand d aller Punkte auf der Messfläche von

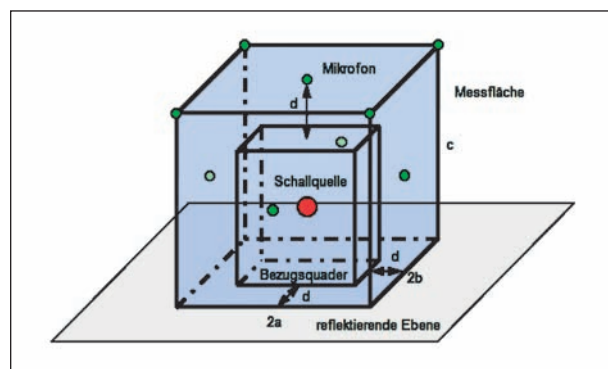


Bild 4.1: Bestimmung der Schalleistung einer Schallquelle über reflektierendem Grund nach dem Hüllflächen-Verfahren, Genauigkeitsklasse 2 (DIN EN ISO 3744)

einem die Schallquelle begrenzenden virtuellen Bezugsquader beträgt typischerweise 1 m, jedoch mindestens 0,25 m.

Mit Hilfe des Hüllflächen-Verfahrens lässt sich der Schalleistungspegel der Schallquelle mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit bestimmen. Neben dem hohen zeitlichen Messaufwand kann diese Methode aufgrund des nicht-stationären vorbeifahrenden Fahrzeugs jedoch nicht angewendet werden.

4.2 Mikrofonarray-Verfahren

Ziel dieses Kapitels ist die Ermittlung eines geeigneten Mikrofonarray-Verfahrens zur Bestimmung der Schalleistung einer Schallquelle anhand einer einzelnen Schalldruckkartierung. Der Vorteil eines solchen Verfahrens besteht neben dem geringen zeitlichen Messaufwand in der möglichen Untersuchung von nicht-stationären – z. B. impulsartigen oder bewegten – Quellen. Allerdings gestattet eine solche Methode nur eine Abschätzung der Schalleistung, da die Messung des Schalldruckpegels nur innerhalb eines Teils der gesamten Hüllfläche (vgl. Bild 4.2) durchgeführt wird. Für die Ermittlung der Schalleistung müssen somit Annahmen für die Schallabstrahlung durch die verbleibende Hüllfläche gemacht werden.

(HALD, 2005) schlägt ein Verfahren vor, das die Integration über die Schalldruckkartierung als Grundlage für die Bestimmung der Schalleistung der Schallquelle verwendet.

Der Autor leitet das Verfahren anhand einer Monopolquelle her, die sich auf der Arraynormalen im Abstand L vor dem Mikrofonarray befindet. L soll

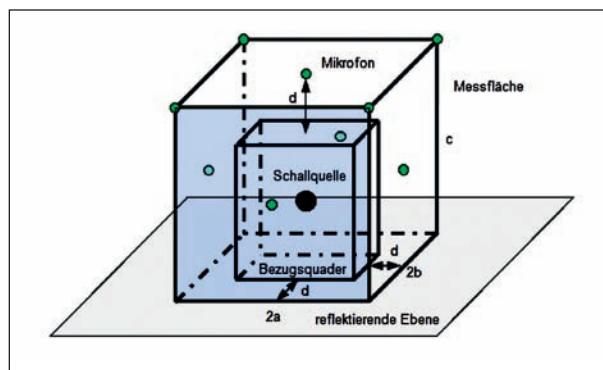


Bild 4.2: Abschätzung der Schalleistung einer Schallquelle über reflektierendem Grund mit Mikrofonarray durch Messung des Schalldruckpegels innerhalb eines Teils der Hüllfläche (blau gekennzeichnet)

dabei so groß sein, dass die in der Ebene des Mikrofonarrays einfallende Schallwelle als ebene Schallwelle mit der Amplitude Y_0 angesehen werden kann. Aufgrund der kugelförmigen Richtcharakteristik des Monopols kann die Schalleistung P über

$$P = 4\pi L^2 \cdot I \quad (4.3)$$

angegeben werden. I entspricht dabei dem Effektivwert der Schallintensität im Arraymittelpunkt mit

$$I = \frac{|Y_0|^2}{2\rho c}. \quad (4.4)$$

ρ ist die Dichte des Ausbreitungsmediums.

Der Autor führt nun einen Skalierungsfaktor α ein, um die Schallintensität I aus der ermittelten Schalldruckkartierung zu berechnen. Er definiert α in der Weise, dass das Ergebnis der Integration über den skalierten quadratischen Ausgang des Beamformers der halben vom Monopol abgestrahlten Schalleistung entspricht:

$$\frac{1}{2}P = \frac{1}{M^2} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \alpha |\underline{Z}(\omega)|^2 R dR d\varphi. \quad (4.5)$$

Bezug nehmend auf Kapitel 2.2.2 ergibt sich das Spektrum des Beamformer-Ausgangs $\underline{Z}(\omega)$ bei der Lokalisation eines Monopols aus der Multiplikation des Arraypatterns $\underline{W}(k, \vec{x}, \vec{x}_0)$ mit dem Quellspektrum $\underline{Y}_0(\omega)$ im Arraymittelpunkt zu

$$\underline{Z}(\omega) = \underline{W}(k, \vec{x}, \vec{x}_0) \cdot \underline{Y}_0(\omega). \quad (4.6)$$

Aus Gleichung (4.5) und (4.6) folgt:

$$\frac{1}{2}P = \frac{2\pi\alpha|\underline{Y}_0(\omega)|^2}{M^2} \int_0^{R_1} |\underline{W}(k, \vec{x}, \vec{x}_0)|^2 R dR. \quad (4.7)$$

Die Integration erfolgt über die Fläche der Hauptkeule mit dem Radius R_1 , die den Hauptanteil der emittierten Schalleistung widerspiegelt. Der Radius R_1 der Hauptkeule ist jedoch von der Anordnung der Mikrofone abhängig. Für die näherungsweise Angabe einer von der Mikrofonanordnung unabhängigen Form der Hauptkeule leitet der Autor das Arraypattern einer kontinuierlichen kreisförmigen Apertur mit dem Durchmesser D her. Mit Hilfe der ersten Nullstelle der Besselfunktion ersten Grades lässt sich der Radius R_1 der Hauptkeule näherungsweise durch

$$R_1 \approx 1,22 \cdot \frac{L\lambda}{D} \quad (4.8)$$

berechnen. Durch Gleichsetzen von Gleichung (4.3) und (4.7) ergibt sich der Skalierungsfaktor zu

$$\alpha \approx \frac{2,94}{\rho c} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2. \quad (4.9)$$

Die Bestimmung der Schalleistung im Fernfeld über Gleichung (4.5) und (4.9) ist damit unabhängig vom Abstand zwischen Mikrofonarray und Monopolstrahler.

Simulationsberechnungen des Autors an Modellpunktstrahlern haben gezeigt, dass die Werte der über das Mikrofonarray-Verfahren bestimmten Schalleistung des Monopolstrahlers im Frequenzbereich von 1 kHz bis 8 kHz um maximal 0,6 dB von der tatsächlichen Schalleistung der Schallquelle abweichen, wenn ein Mindestabstand zwischen Mikrofonarray und Schallquelle von der 0,6-fachen Ausdehnung des Mikrofonarrays eingehalten wird. Die Integration über die Schalldruckkartierung erfolgte dabei über einen Dynamikbereich von 10 dB.

Unterhalb einer Frequenz von 1 kHz nimmt die Abweichung von der tatsächlichen Schalleistung jedoch stark zu. Die Ursache dafür ist eine bei der Herleitung des Skalierungsfaktors für den Winkel zwischen Arraynormalen und Quellrichtung festgelegte Näherung

$$\sin\varphi \approx \tan\varphi, \quad (4.10)$$

die nur für geringe Werte von φ erfüllt ist. Die zu tiefen Frequenzen ansteigende HKB der abgebildeten Schallquelle führt bei der Integration über die Schalldruckkartierung in Bereiche, in denen diese Bedingung nicht mehr eingehalten werden kann. Bei Messabständen, die kleiner als die Ausdehnung des Mikrofonarrays sind, steigen die Abweichungen ebenfalls stark an, da dann die Bedingung der am Mikrofonarray eintreffenden ebenen Schallwelle nicht mehr gewährleistet ist.

Innerhalb von (SCHMANTECK, 2007) fanden rechnerische und messtechnische Untersuchungen zur praktischen Einsetzbarkeit des beschriebenen Mikrofonarray-Verfahrens im Vergleich zum Hüllflächen-Verfahren zur Bestimmung der Schalleistung von Punktstrahlern statt. Dabei konnte neben den oben beschriebenen Bedingungen die Aussage des Autors verifiziert werden, dass das Verfahren nach HALD ebenfalls für zwei inkohärente Punkt-Schallquellen angewendet werden kann. Die Lokalisation von teilweise kohärenten Schallquellen führt jedoch im Vergleich zum Hüllflächen-Verfahren zu deutlichen Abweichungen (vgl. Bild 4.3). Diese sind darauf zurückzuführen, dass mit Hilfe des Mikrofonarrays nur ein Teil der gesamten Hüllfläche vermes-

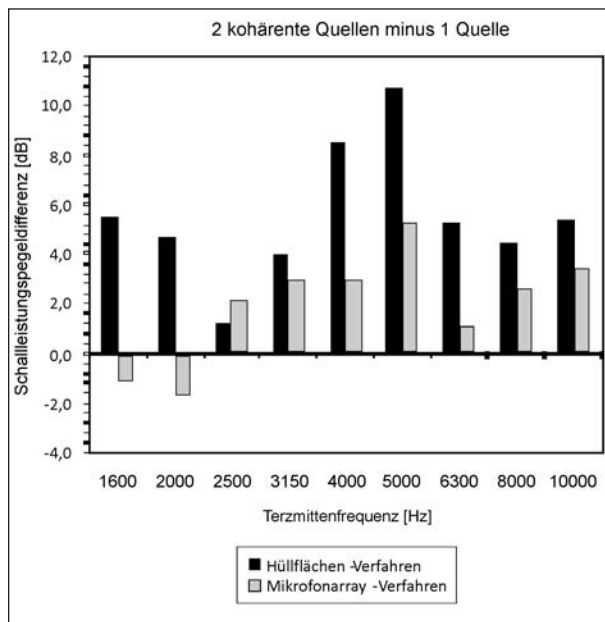


Bild 4.3: Differenz des spektralen Schalleistungspegels zwischen zwei teilweise kohärenten Punktstrahlern und einem einzelnen Punktstrahler für das Hüllflächen-Verfahren (Genauigkeitsklasse 3) und das Mikrofonarray-Verfahren nach HALD, Arrayabstand 2 m

sen wird und die Gesamt-Abstrahlung der Schallquellen nicht mehr durch eine kugelförmige Richtcharakteristik beschreibbar ist.

Aufgrund der beschriebenen Vor- und Nachteile des Mikrofonarray- und des Hüllflächen-Verfahrens wird innerhalb der vorliegenden Untersuchungen eine Anpassung des Hüllflächen-Verfahrens für die Bestimmung der Schalleistung bewegter Quellen mit Mikrofonarray vorgenommen.

In einem ersten Schritt erfolgt wie beim Einsatz des genormten Hüllflächen-Verfahrens für stationäre Quellen die Definition von Bezugs- und Messquader um das zu untersuchende Fahrzeug. Der Messabstand entspricht dabei dem Abstand zwischen dem Mikrofonarray und der rechten Fahrzeugseite. Im zweiten Schritt wird der mittlere auf der Messfläche vorhandene Schalldruckpegel L_{pm} ermittelt. Wie im Falle der messtechnischen Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik geschieht dies durch Lokalisierung des Fahrzeugs während der Vorbeifahrt in einem definierten Bereich des horizontalen Schalleinfallswinkels mit Hilfe des vertikalen Linienarrays. Die konstante Geschwindigkeit gewährleistet dabei die „Abtastung“ eines Segments der Messfläche in äquidistantem Punktabstand. Durch Wiederholung der Vorbeifahrt bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit mit variiert Höhe des Mikrofonarrays ist es möglich, den mittleren Schalldruck-

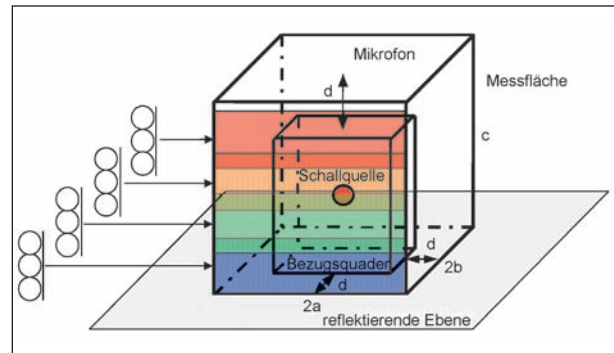


Bild 4.4: Abschätzung der Schalleistung für Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt durch Messung des mittleren Schalldruckpegels mit vertikalem Mikrofonarray innerhalb verschiedener Bereiche der Hüllfläche (farblich gekennzeichnet)

pegel innerhalb verschiedener Segmente der Messfläche zu bestimmen. Dieser Sachverhalt ist in Bild 4.4 dargestellt.

Unter Berücksichtigung der Größe der Messfläche wird schließlich nach Gl. (2.10) die Schalleistung bestimmt. Wie bereits zu Beginn des Kapitels 4.2 beschrieben, gestattet auch diese Methode nur eine Abschätzung der Schalleistung, da die Ermittlung des Schalldruckpegels nur innerhalb eines Teils der gesamten Hüllfläche (vgl. Bild 4.4) durchgeführt wird. Für die Berechnung der Schalleistung wurden daher innerhalb der vorliegenden Untersuchungen folgende Annahmen für die Schallabstrahlung durch die verbleibende Hüllfläche getroffen:

- Die links- und die rechtsseitige Schallabstrahlung des Fahrzeugs ist symmetrisch,
- die front- und die rückseitige mittlere Schallabstrahlung ist, wie die horizontale Richtcharakteristik in Kapitel 5.2 zeigt, stärker als die mittlere seitliche Schallabstrahlung; da keine Messwerte des Schalldruckpegels auf front- und rückseitiger Messfläche vorliegen, wurde die mittlere front- und rückseitige Schallabstrahlung gleich der mittleren seitlichen Schallemission gesetzt,
- die dachseitige mittlere Schallabstrahlung ist sehr gering, wie die vertikale Richtcharakteristik in Kapitel 5.2 zeigt, und damit vernachlässigbar; um der stärkeren mittleren front- und rückseitigen Schallabstrahlung entgegenzuwirken, wurde die mittlere dachseitige Schallabstrahlung ebenfalls der mittleren seitlichen Schallemission gesetzt.
- => Die Annahmen beschreiben damit eine allseitig konstant abstrahlende Schallquelle.

Die betrachtete Messfläche S ergibt sich damit nach Gleichung (4.2). Die Abmaße des Bezugsquaders entsprechen den geometrischen Ausdehnungen Länge, Breite und Höhe des zu untersuchenden Fahrzeugs.

5 Akustische Messungen

5.1 Messaufbau

Die messtechnischen Untersuchungen zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung von Fahrzeugen wurden am 16.07.2007 bzw. 17.01.2008 an der neu gebauten Ortsumgehung zwischen Kamenz und Elstra, Richtung Elstra (Höhe Prititz), durchgeführt. Während der Messungen betrug die Lufttemperatur im Durchschnitt $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ bzw. $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Luftfeuchte lag bei 38% bzw. 90% . Der Fahrbahnbelag war trocken und es regnete nicht. Die



Bild 5.1: Versuchsstrecke, Blick Richtung Kamenz (Norden)



Bild 5.2: Versuchsstrecke, Blick Richtung Elstra (Süden)

durchschnittliche Windgeschwindigkeit betrug 1 km/h bzw. 4 km/h .

Bei der Versuchsstrecke handelt es sich um einen asphaltierten, zweispurigen, geradlinigen und ebenen Streckenabschnitt von ca. 350 m Länge. An beide Seiten der Fahrbahn grenzen Weidelandflächen, wodurch freie Schallfeldbedingungen vorhanden sind. Bild 5.1 und Bild 5.2 zeigen den Blick vom Mittelpunkt der Versuchsstrecke in nördlicher und südlicher Richtung.

Während der messtechnischen Untersuchungen waren die ca. 400 m entfernten Windgeneratoren außer Betrieb. Das Rauschen der ca. 30 m von der Mitte der rechten Fahrspur entfernten Baumreihe lag deutlich unter dem emittierten Fahrzeuggeräusch.

Bild 5.3 und Bild 5.4 zeigen das konstruierte optimierte Linienarray in horizontaler und vertikaler Ausrichtung. Es wurde im Abstand von 20 m bzw. $4,75\text{ m}$ zur rechten Außenseite der untersuchten Fahrzeuge positioniert. Der Arraymittelpunkt befand sich während der Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik im Bereich von -60° bis $+60^{\circ}$ in einer Höhe von 4 m über Fahrbahnniveau. Bei



Bild 5.3: Messaufbau zur Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik von Fahrzeugen

Annahme einer Quellhöhe von 0,5 m (HEUTSCHI, 2005) entspricht dies einem vertikalen Schalleinfallswinkel von $+10^\circ$.

Die Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik erfolgte durch Positionierung des Mikrofonarrays in einer Höhe von 1,3 m bis 4,2 m. Dies entspricht einem vertikalen Schalleinfallswinkel im Bereich von $+10^\circ$ bis $+38^\circ$ (Quellhöhe 0,5 m). Eine Detailansicht des konstruierten optimierten Linienarrays in vertikaler Ausrichtung ist in Bild 5.5 zu sehen.

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Richtcharakteristik und der Schalleistung von Fahrzeugen fanden bei kontrollierter Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit im fließenden Verkehr statt (vgl. Bild 5.6). Da die Verkehrslast der Versuchsstrecke gering war, konnten die akustischen Messungen nahezu ohne akustische Störschallquellen durchgeführt werden.

Bei den Testfahrzeugen handelte es sich um

- einen Pkw vom Typ Saab 9-5 (vgl. Bild 5.8),
- einen Kleintransporter vom Typ Mercedes Sprinter (vgl. Bild 5.9) sowie



Bild 5.4: Messaufbau zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik von Fahrzeugen

- einen fünfsichtigen Lkw vom Typ MAN TGA 18.480 (vgl. Bild 5.10).

Die konstanten Geschwindigkeiten von ca. 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h wurden dabei mit Hilfe von zwei Laser-Reflexions-Lichtschranken registriert, die sich im Abstand von ca. 100 m zueinander befanden. Aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen Geschwindigkeitsbegrenzung (Limiter) fanden die Untersuchungen am Lkw nur bei 50 km/h und 80 km/h statt. Jede einzelne Messung



Bild 5.5: Detailansicht 32-kanaliges Mikrofonarray



Bild 5.6: Kontrollierte Vorbeifahrt des Testfahrzeugs

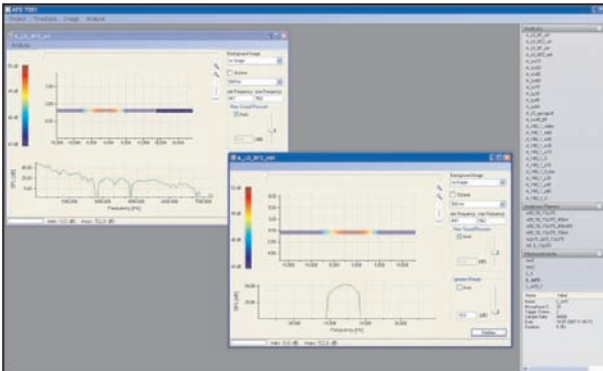


Bild 5.7: Eingesetzte Analysesoftware AFD 7001 des Messsystems AcoustiCam™ der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH



Bild 5.8: Untersuchter Pkw vom Typ Saab 9-5



Bild 5.9: Untersuchter Kleintransporter vom Typ Mercedes Sprinter



Bild 5.10: Untersuchter Lkw vom Typ MAN TGA 18.480



Bild 5.11: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik des Lkw



Bild 5.12: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik des Pkw

setzte sich aus je fünf Vorbeifahrten zusammen. In Bild 5.11 bis Bild 5.13 ist beispielhaft eine kontrollierte Vorbeifahrt der Fahrzeuge abgebildet.

Zur Berechnung und Auswertung der Messergebnisse diente die Analyse-Software AFD 7001 des Messsystems AcoustiCam™ der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH (vgl. Bild 5.7).



Bild 5.12: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik des Kleintransporters

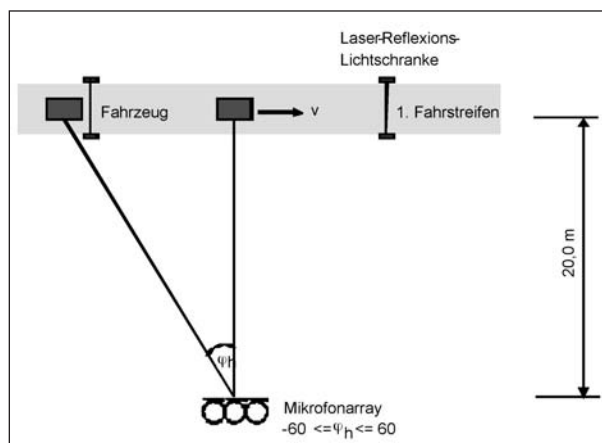


Bild 5.14: Messtechnische Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik (Draufsicht)

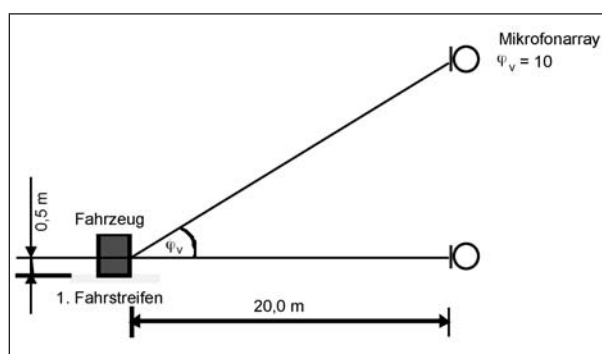


Bild 5.15: Messtechnische Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik (Seitensicht)

5.2 Durchführung und Ergebnisse

a) Horizontale Richtcharakteristik

Zu Beginn wurde die horizontale Schallabstrahlung der Fahrzeuge durch Messung des Schallimmissionspegels unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von -60° bis $+60^\circ$ in Schritten von 15° bestimmt. Die Scanebene befand sich dabei in der Ebene der dem Mikrofonarray zugewandten rechten Fahrzeugseite (vgl. Bild 5.14 und Bild 5.15). Für die Berechnung der auf einen horizontalen Schalleinfallswinkel von $\varphi_{h0} = 0^\circ$ bezogenen horizontalen Richtcharakteristik gemäß Gleichung (2.4) wurde der gemessene Schalldruckpegel auf eine konstante Entfernung von $r = m$ korrigiert.

Bild 5.16 bis Bild 5.21 zeigen die Lokalisierungsergebnisse an den drei Fahrzeugtypen bei kontrollierter Vorbeifahrt mit der jeweils maximalen untersuchten Geschwindigkeit unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von 0° . Diese Ergebnisse verdeutlichen zum einen die Eigenschaft der Vergrößerung der örtlichen Auflösung mit steigender Frequenz. Wird der Pkw bis zu einer Frequenz von 1.250 Hz noch als einzelne Punktschallquelle abgebildet, können oberhalb dieser Frequenz die Vor-

der- und Hinterreifen des Fahrzeugs als Ort der dominierenden Schallabstrahlung lokalisiert werden. Vergleichbare Aussagen können für die beiden anderen Fahrzeugtypen getroffen werden. Mit größer werdendem Schalleinfallswinkel nimmt die örtliche Auflösung aufgrund der in Bild 2.8 dargestellten Verzerrungseigenschaften des Mikrofonarrays ab, sodass die Fahrzeuge wiederum als einzelne Punktschallquelle lokalisiert werden. Zum anderen ist erkennbar, dass unterhalb von 500 Hz seitlich der Fahrzeugschallquelle verstärkt Nebenkeulen auftreten. Wie bereits anhand von Bild 2.13 erläutert, sind diese eng der Hauptkeule benachbarten Nebenkeulen ein typisches Merkmal der Richtcharakteristik einer äquidistanten Mikrofonanordnung. Daraus lässt sich schließen, dass die zur Reduktion dieser Nebenkeulen angewendete Mikrofonwichtung (vgl. Bild 2.22) bei Frequenzen unterhalb von 500 Hz nicht mehr wirksam ist. Für das eingesetzte Mikrofonarray ist die Arraybreite in diesem Fall kleiner als die dreifache Wellenlänge der einfallenden Schallwelle. Für den Fall des Pkw ist die Amplitude der Nebenkeulen bei einer Frequenz von

315 Hz sogar größer als die eigentliche Quellamplitude.

Die ermittelte horizontale Richtcharakteristik der Fahrzeuge als Gesamtpegel innerhalb des Frequenzbereichs von 315 Hz bis 3.150 Hz und als Terzbandpegel ist für den Pkw in Bild 5.22 bis Bild 5.30, für den Kleintransporter in Bild 5.34 bis Bild 5.42 und für den Lkw in Bild 5.46 bis Bild 5.51 in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel dargestellt. Die den Ergebnissen der horizontalen Richtcharakteristik vorausgehenden korrigierten örtlichen Schalldruckpegelverläufe in Abhängigkeit von der Frequenz sind in Kapitel 5.3 aufgeführt. Allein die Spektren des abstandskorrigierten Schallimmissionspegels sind für die verschiedenen Einfallswinkel in Bild 5.31 bis Bild 5.33, Bild 5.43 bis

Bild 5.45 und Bild 5.52 bis Bild 5.53 den Ergebnissen der horizontalen Richtcharakteristik beigelegt. Sie zeigen den energetischen spektralen Schwerpunkt der Schallabstrahlung der Fahrzeuge für die verschiedenen Geschwindigkeiten. Für den Pkw bzw. den Kleintransporter liegt der spektrale Schwerpunkt unabhängig von der untersuchten Geschwindigkeit im Frequenzbereich von 1.000 Hz bis 1.600 Hz bzw. 630 Hz bis 1.000 Hz (vgl. DIN EN 1793-3, Standardisiertes Verkehrslärmspektrum). Beim Lkw kommt es durch die Änderung der Geschwindigkeit von 80 km/h auf 50 km/h zu einer Verschiebung des spektralen Schwerpunkts von 630 Hz bis 1.000 Hz um eine Terz auf 500 Hz bis 800 Hz. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die verschiedenen Fahrzeuge und Geschwindigkeiten erfolgt in Kapitel 6.

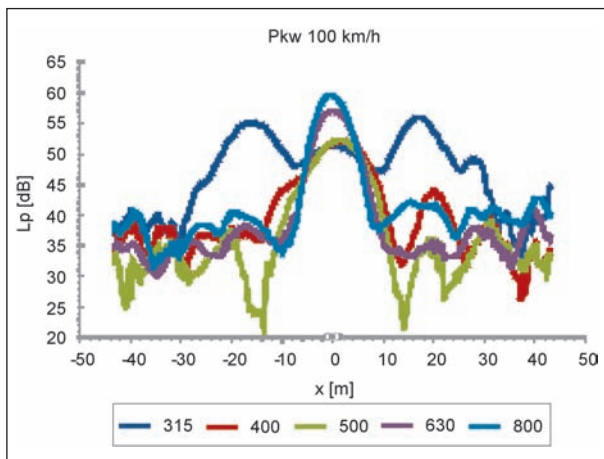


Bild 5.16: Lokalisationsergebnisse am Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h unter horizontalem Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

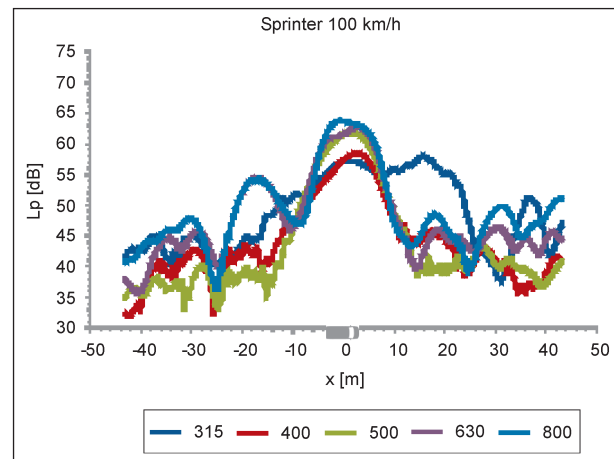


Bild 5.18: Lokalisationsergebnisse am Kleintransporter während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h unter horizontalem Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

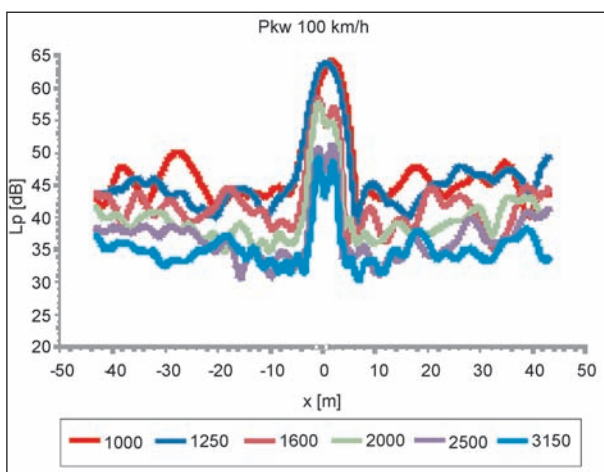


Bild 5.17: Lokalisationsergebnisse am Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h unter horizontalem Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

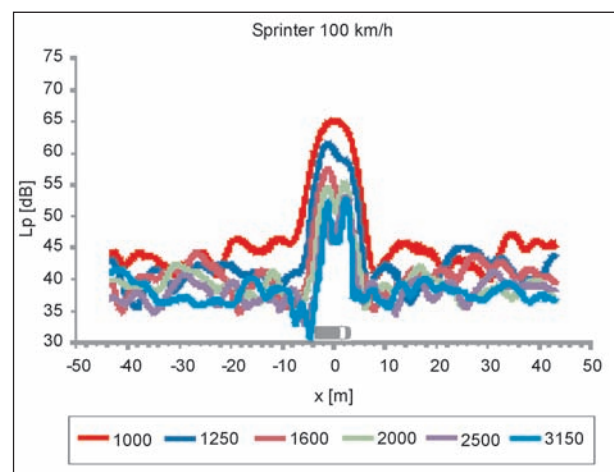


Bild 5.19: Lokalisationsergebnisse am Kleintransporter während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h unter horizontalem Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

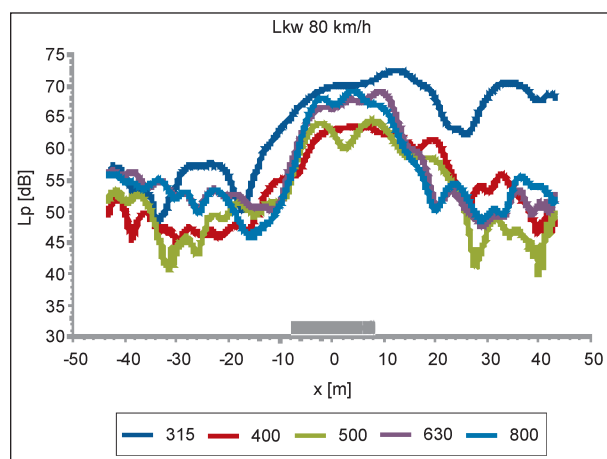


Bild 5.20: Lokalisationsergebnisse am Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h unter horizontalem Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

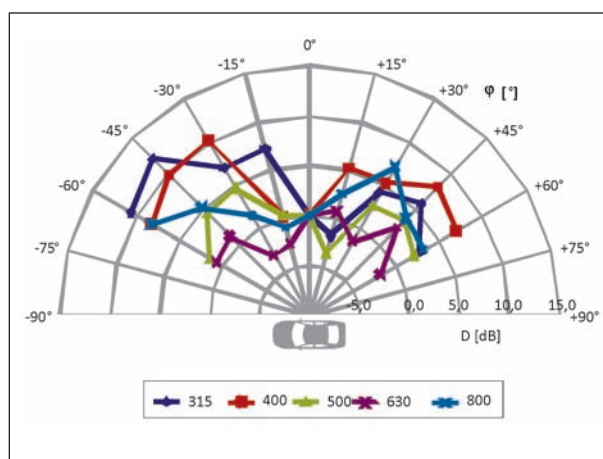


Bild 5.23: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

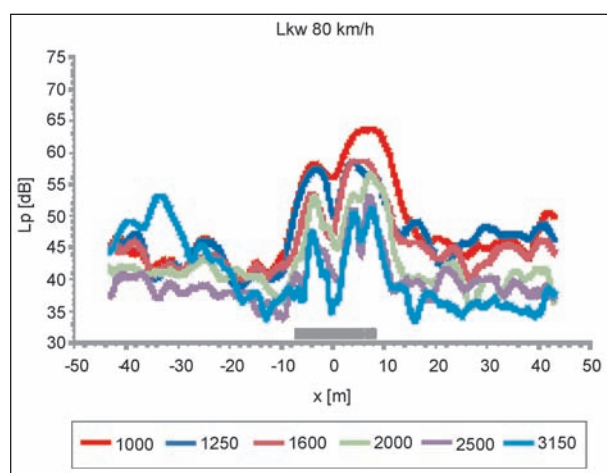


Bild 5.21: Lokalisationsergebnisse am Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h unter horizontalem Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

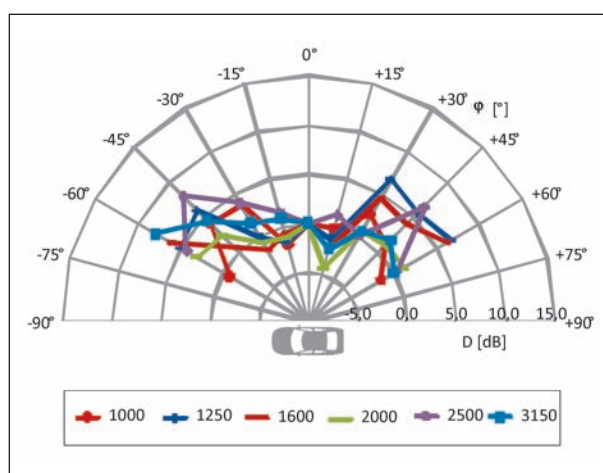


Bild 5.24: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

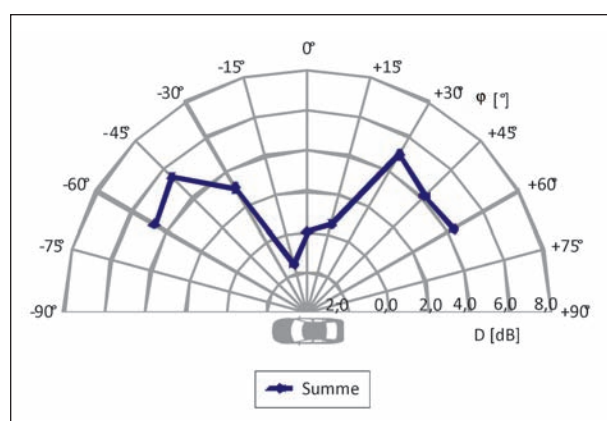


Bild 5.22: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

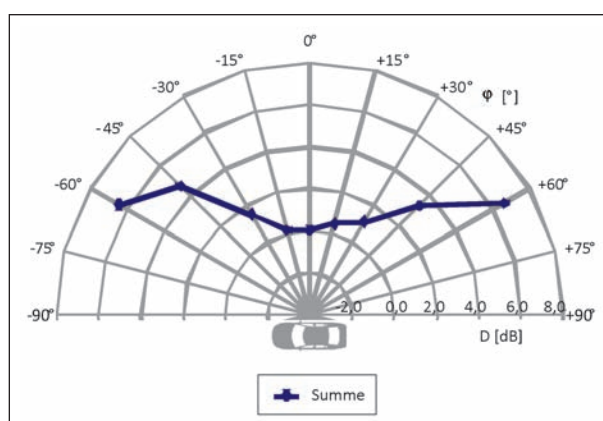


Bild 5.25: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

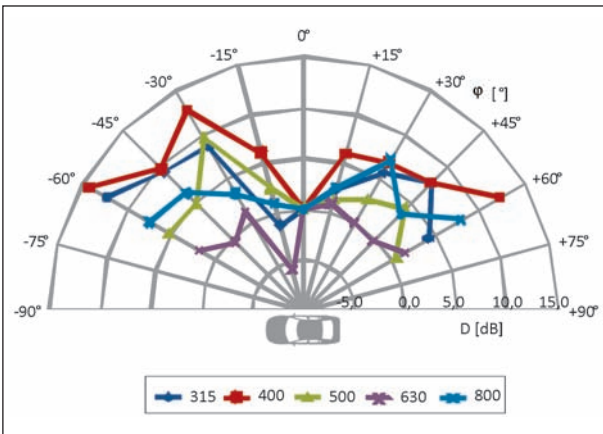


Bild 5.26: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

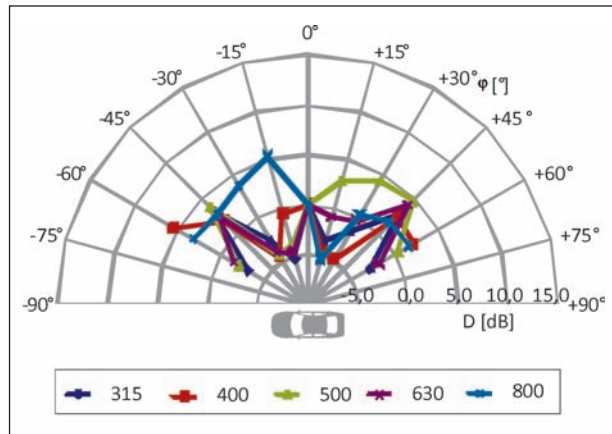


Bild 5.29: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

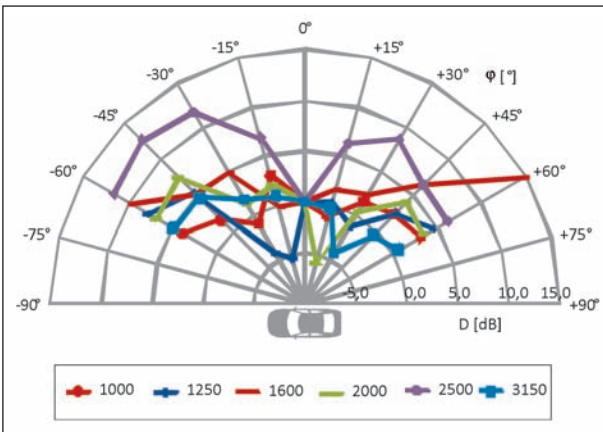


Bild 5.27: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

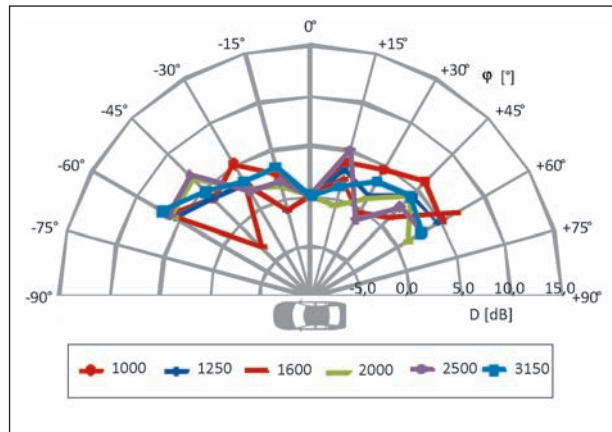


Bild 5.30: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

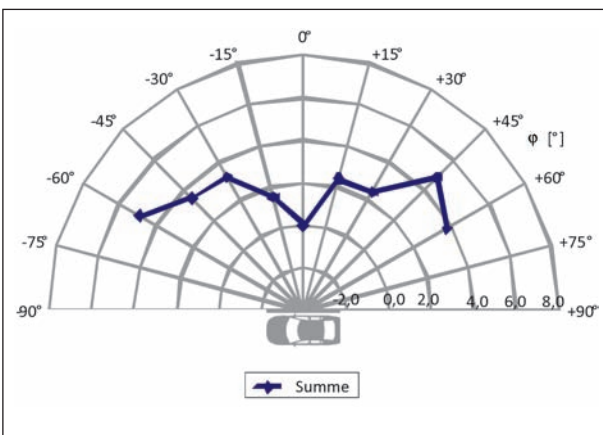


Bild 5.28: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

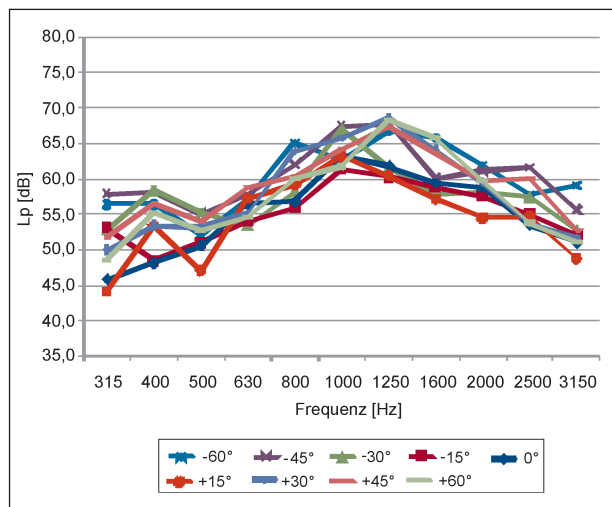


Bild 5.31: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

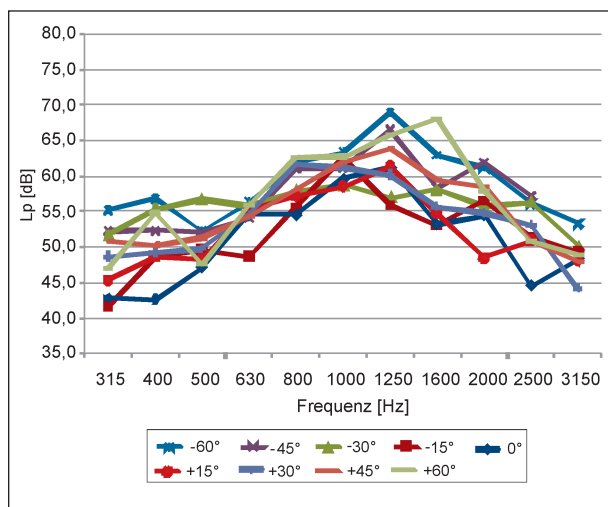


Bild 5.32: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

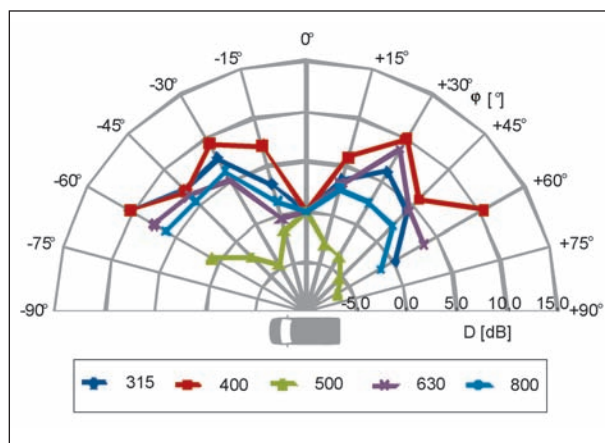


Bild 5.35: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

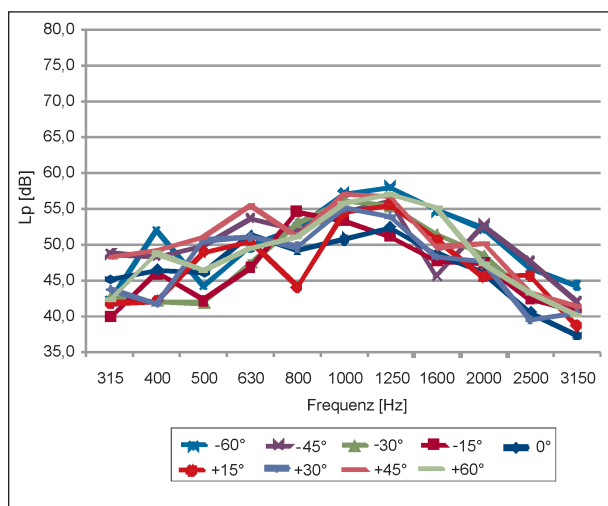


Bild 5.33: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

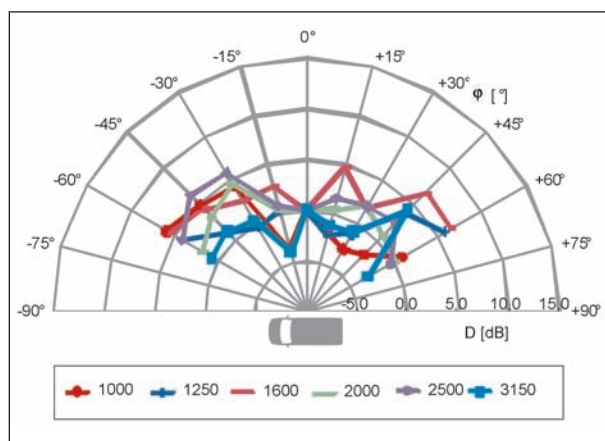


Bild 5.36: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

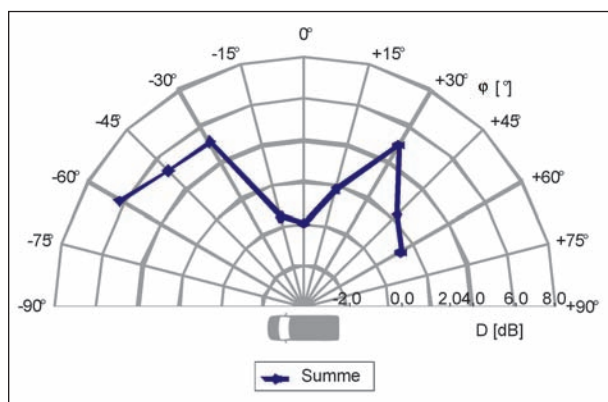


Bild 5.34: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

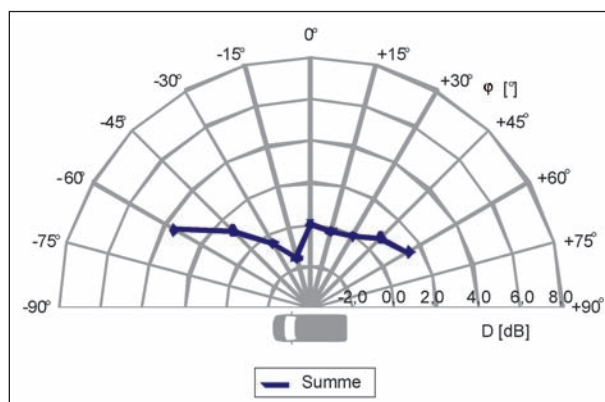


Bild 5.37: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

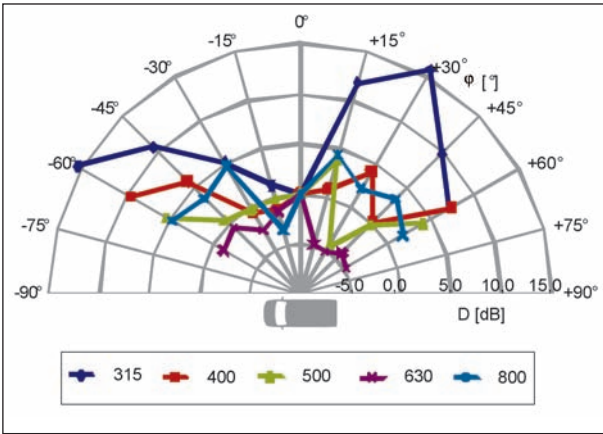


Bild 5.38: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

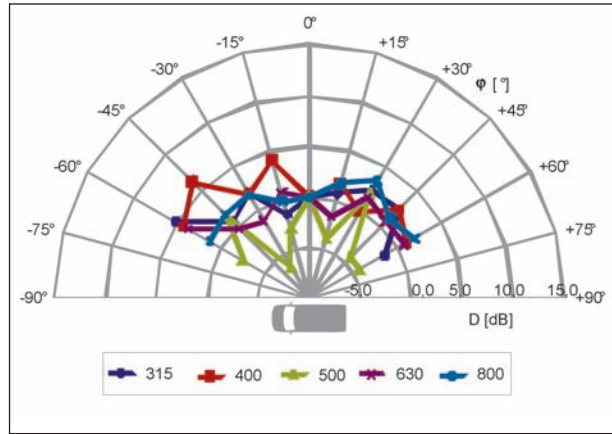


Bild 5.41: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

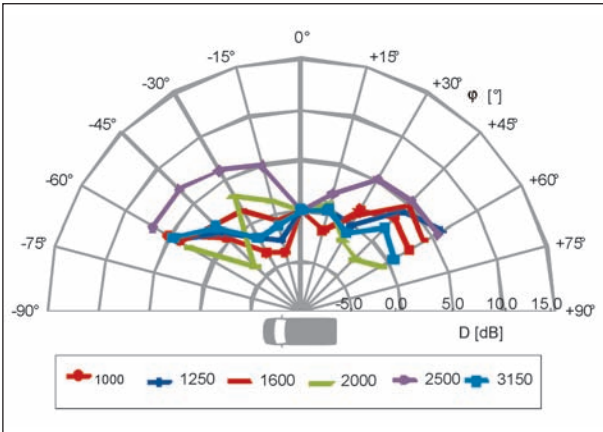


Bild 5.39: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

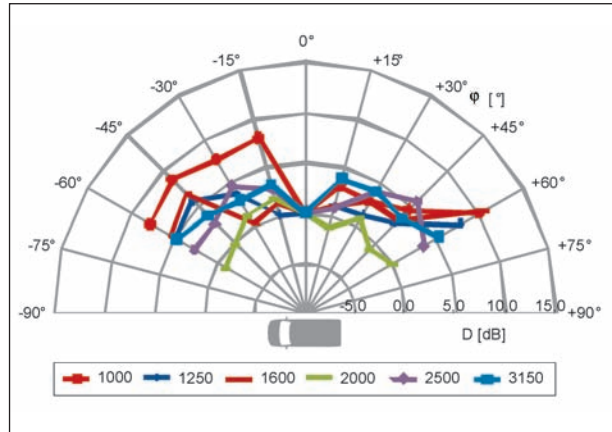


Bild 5.42: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

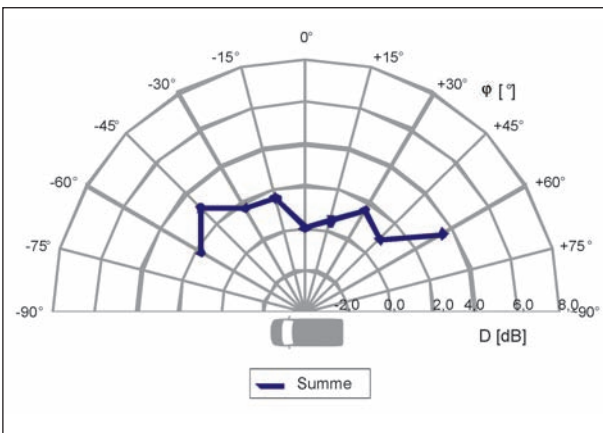


Bild 5.40: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

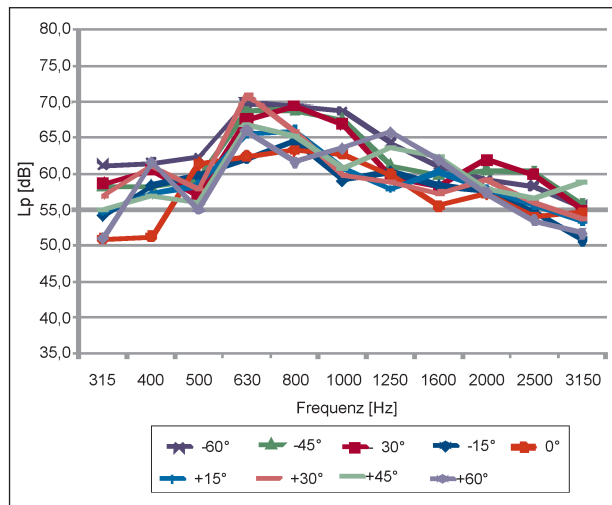


Bild 5.43: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmit-frequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

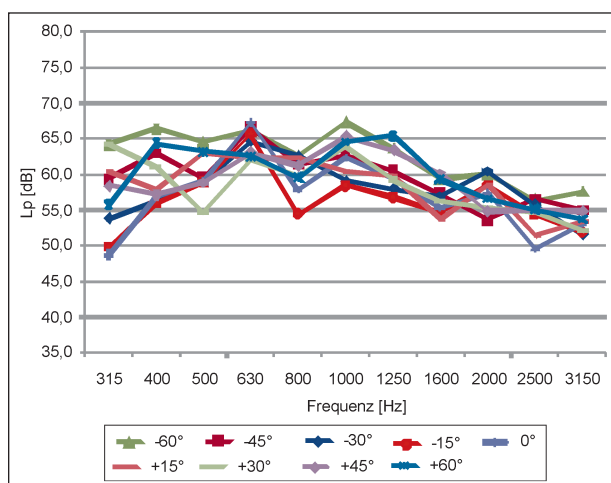


Bild 5.44: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittelfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

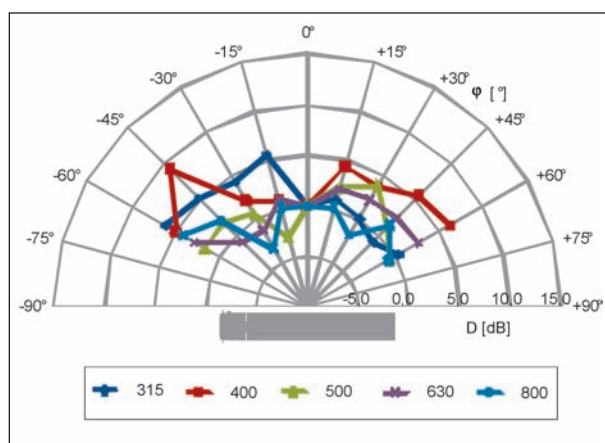


Bild 5.47: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

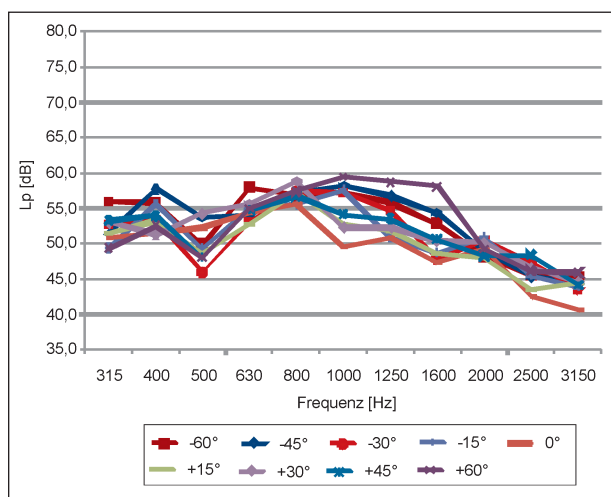


Bild 5.45: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittelfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

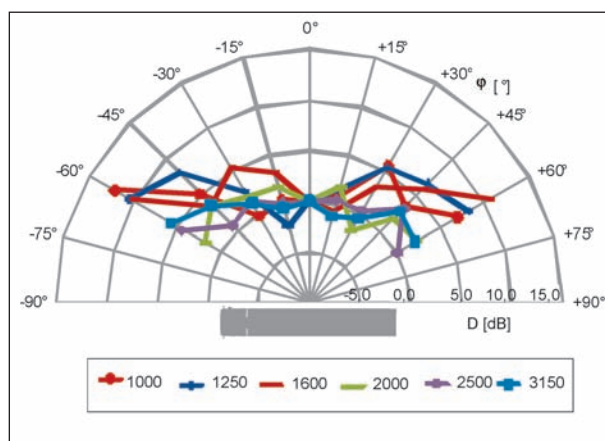


Bild 5.48: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

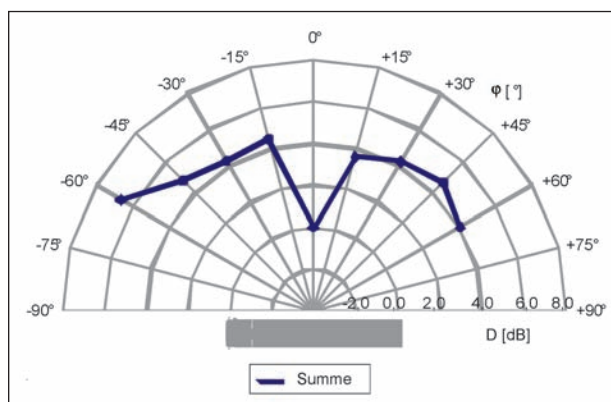


Bild 5.46: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

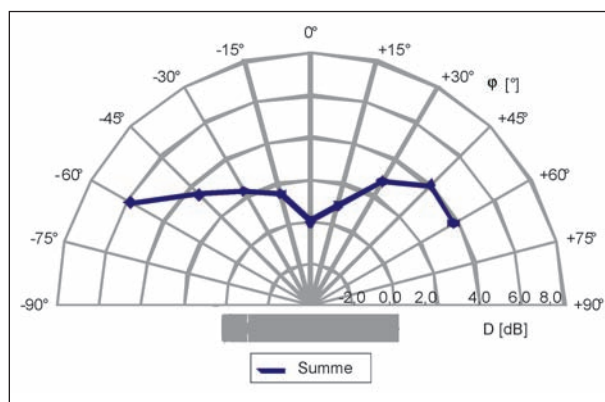


Bild 5.49: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

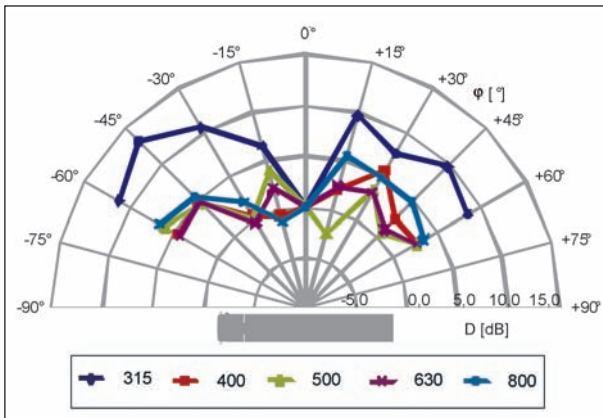


Bild 5.50: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

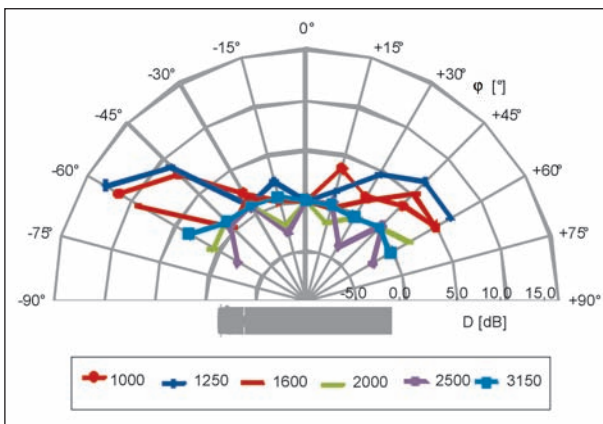


Bild 5.51: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = 0^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis .3.150 Hz

b) Vertikale Richtcharakteristik

Im zweiten Teil der Untersuchungen wurde die mittlere vertikale Schallabstrahlung der Fahrzeuge durch Messung des Schallimmissionspegels unter einem vertikalen Schalleinfallswinkel von $+10^\circ$ bis $+38^\circ$ in Schritten von ca. 10° bestimmt. Die Beobachtungsdauer entsprach dabei dem Zeitintervall, das im folgenden Kapitel des Berichts für die Bestimmung der Schalleistung durch die Ausdehnung der Messfläche definiert wird (vgl. Bild 4.4). Die Scanebene befand sich dabei wiederum in der Ebene der dem Mikrofonarray zugewandten rechten Fahrzeugseite (vgl. Bild 5.54 und Bild 5.55). Für die Berechnung der auf einen vertikalen Schalleinfallswinkel von $\varphi_{v0} = 10^\circ$ bezogenen vertikalen Richtcharakteristik gemäß Gleichung (2.4) wurde der gemessene Schalldruckpegel auf eine konstante Entfernung von $r = 4,75$ m korrigiert.

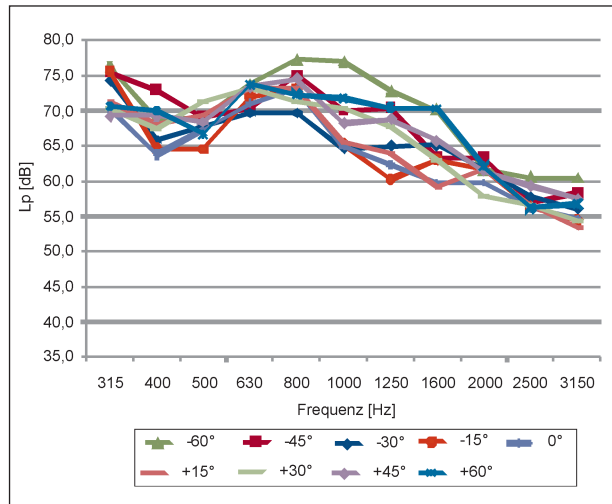


Bild 5.52: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

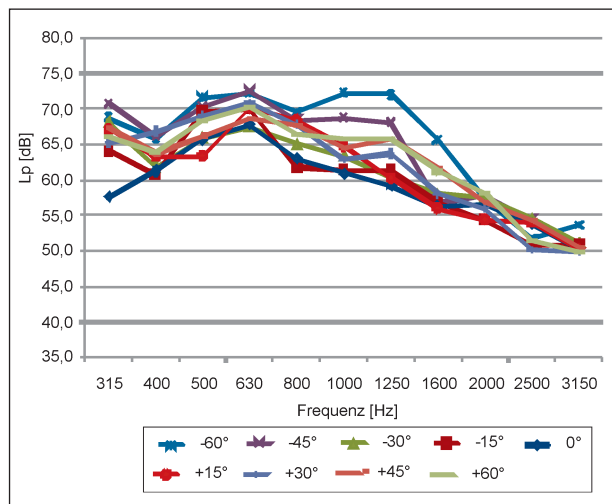


Bild 5.53: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, horizontaler Schalleinfallswinkel -60° bis $+60^\circ$

Die ermittelte vertikale Richtcharakteristik der Fahrzeuge als Gesamtpegel innerhalb des Frequenzbereichs von 315 Hz bis 3.150 Hz und als Terzbandpegel ist für den Pkw in Bild 5.56 bis Bild 5.64, für den Kleintransporter in Bild 5.68 bis Bild 5.76 und für den Lkw in Bild 5.80 bis Bild 5.85 in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel dargestellt. Die den Ergebnissen der vertikalen Richtcharakteristik vorausgehenden abstandskorrigierten örtlichen Schalldruckpegelverläufe in Abhängigkeit von der Frequenz befinden sich wiederum in Kapitel 5.3 dieses Berichts. Die Spektren des korrigierten Schallimmissionspegels für die verschiedenen Einfallswinkel sind in Bild 5.65 bis Bild 5.67, Bild 5.77

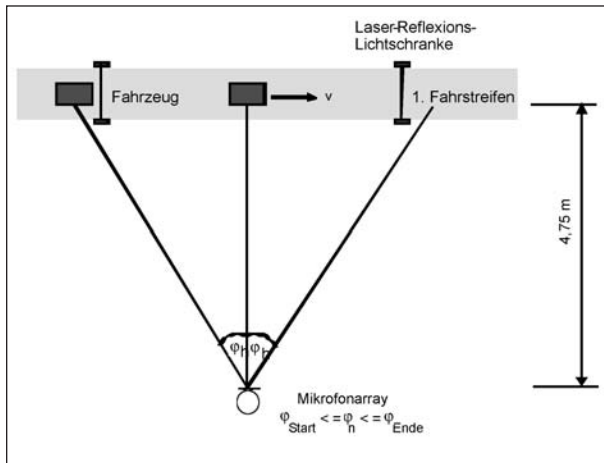


Bild 5.54: Messtechnische Bestimmung der mittleren vertikalen Richtcharakteristik (Draufsicht) über definierten Beobachtungszeitraum

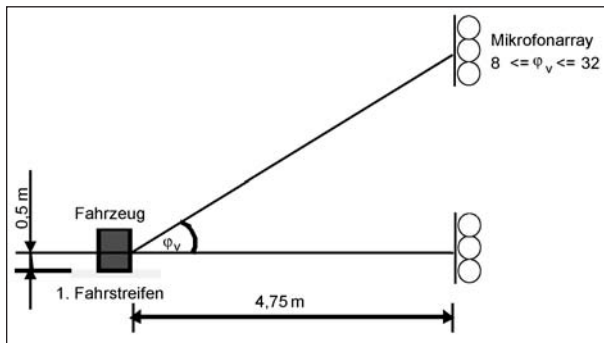


Bild 5.55: Messtechnische Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik (Seitenansicht)

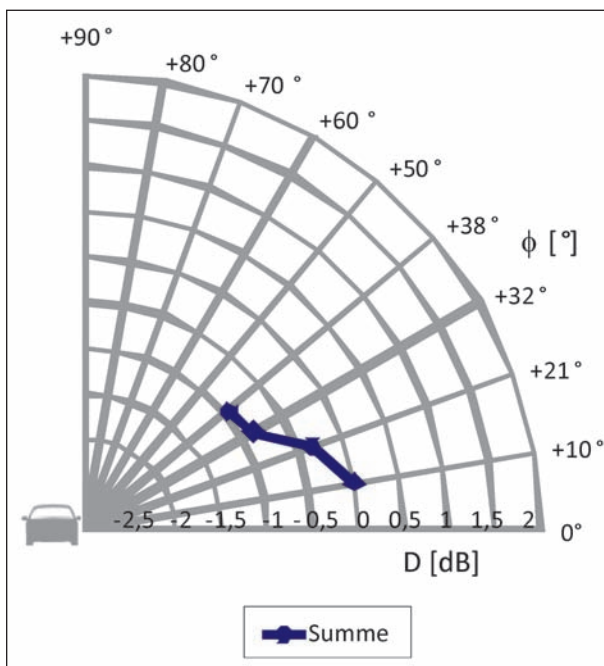


Bild 5.56: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

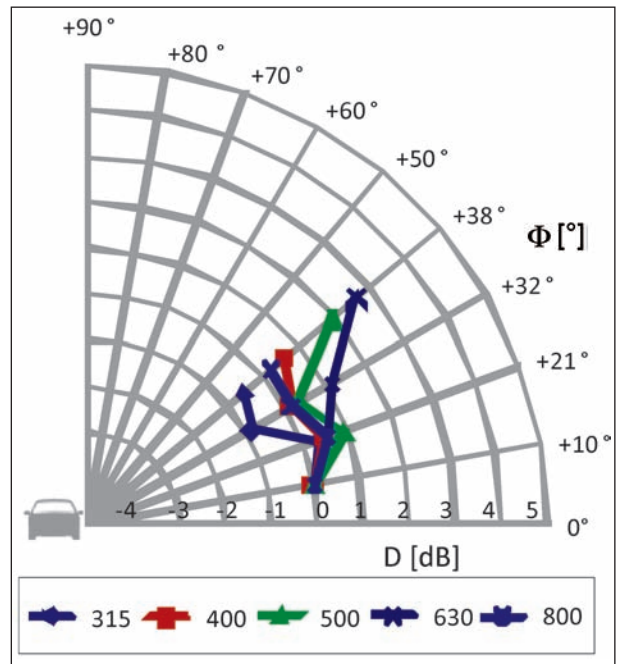


Bild 5.57: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

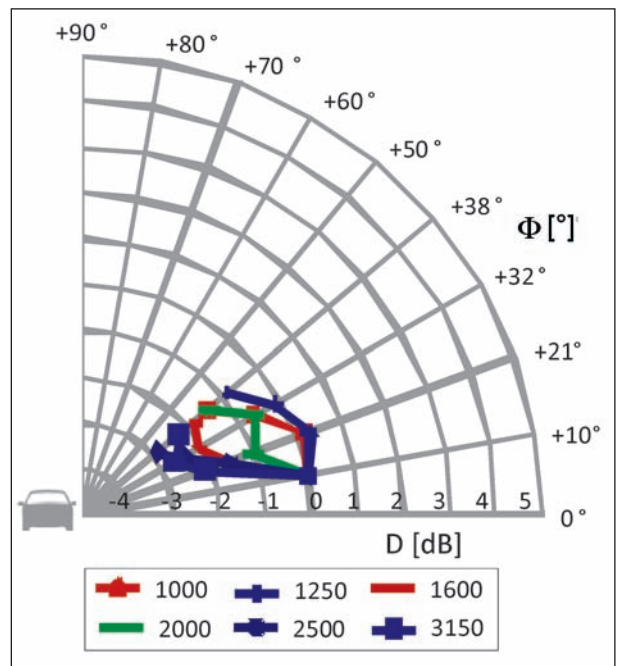


Bild 5.58: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

bis Bild 5.79 und Bild 5.86 bis Bild 5.87 den Ergebnissen der vertikalen Richtcharakteristik beigefügt. Der daraus erkennbare spektrale Schwerpunkt der vertikalen Schallabstrahlung der verschiedenen Fahrzeuge bei der Vorbeifahrt ist dem der horizon-

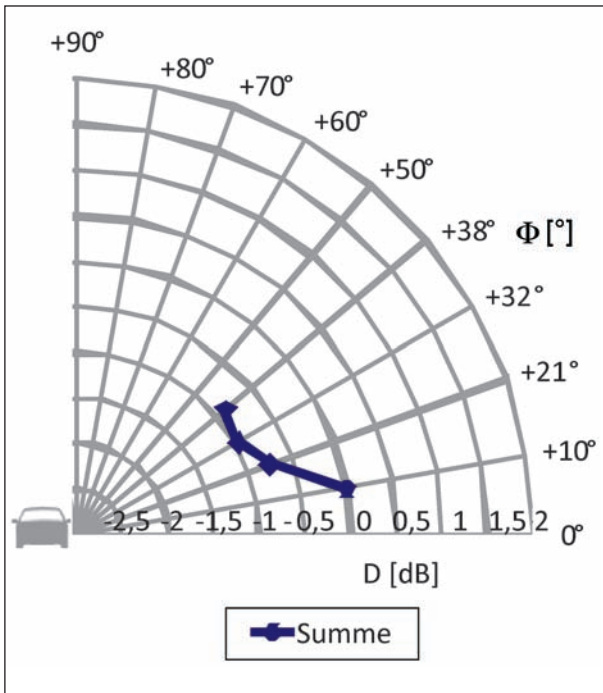


Bild 5.59: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

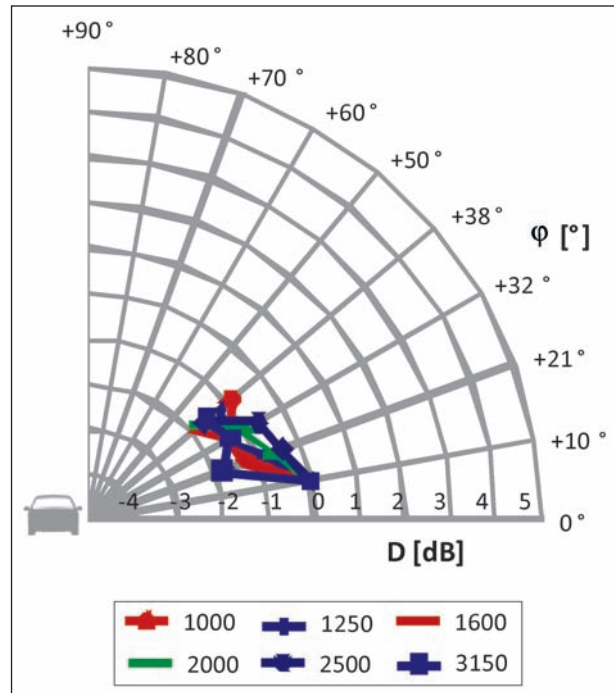


Bild 5.61: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

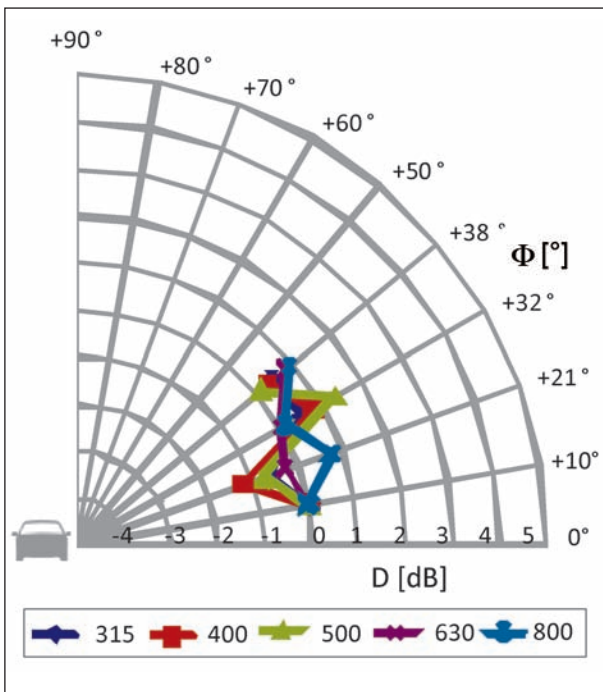


Bild 5.60: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

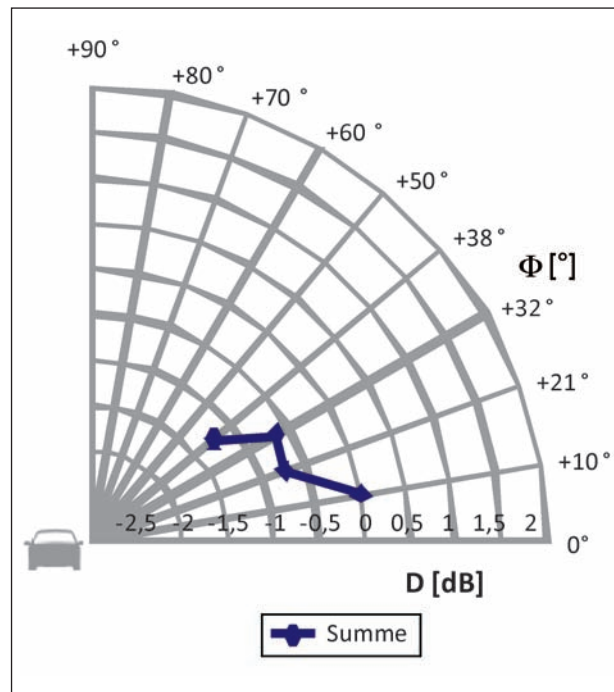


Bild 5.62: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

talen Schallabstrahlung gleich. Für den Lkw ist ebenfalls die beschriebene Verschiebung des spektralen Schwerpunkts bei Änderung der Geschwindigkeit

von 80 km/h auf 50 km/h zu erkennen. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die verschiedenen Fahrzeuge und Geschwindigkeiten erfolgt in Kap. 6.

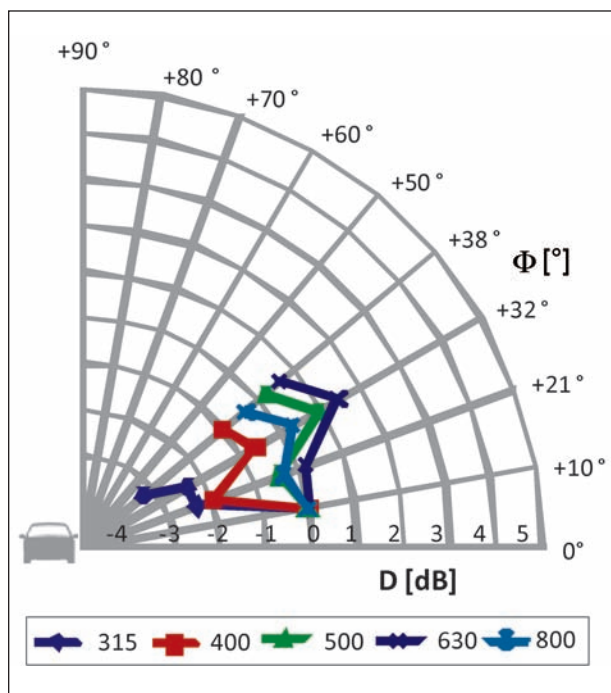


Bild 5.63: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

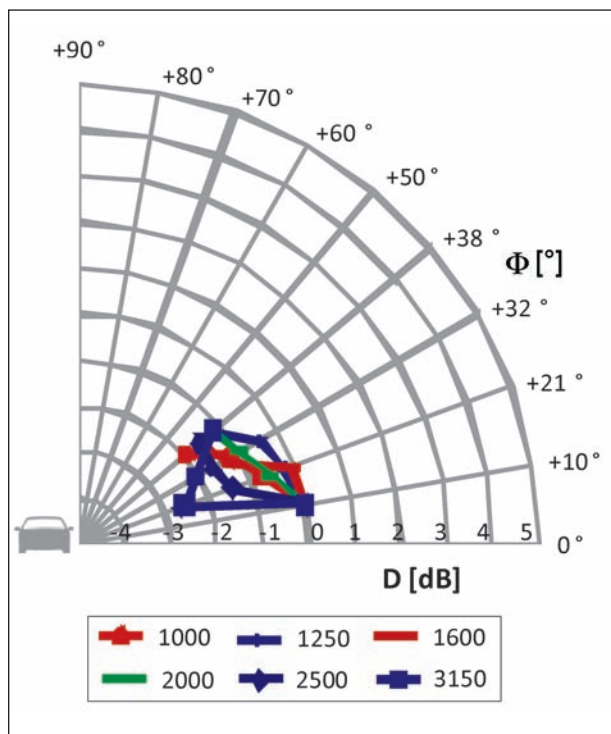


Bild 5.64: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

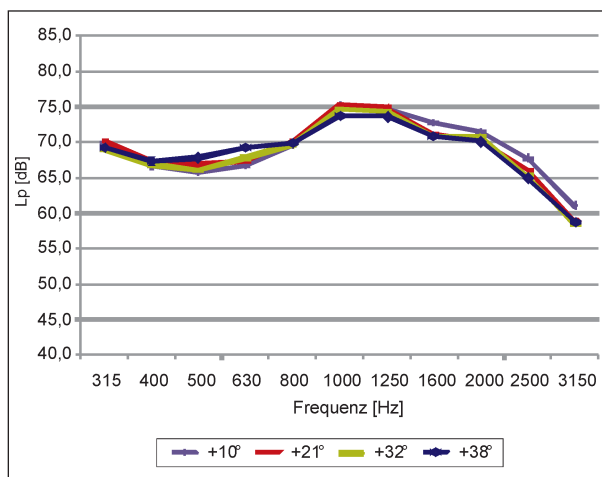


Bild 5.65: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

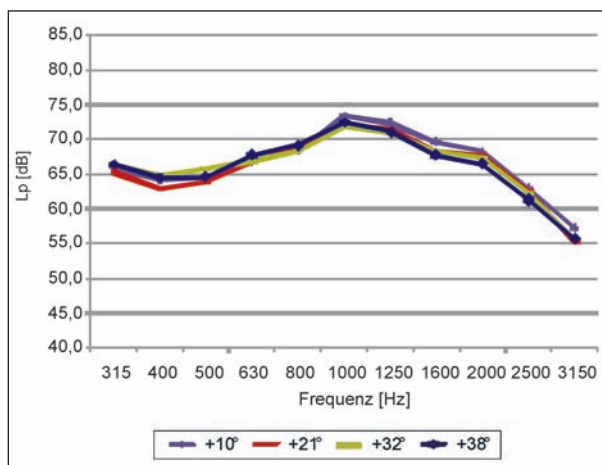


Bild 5.66: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

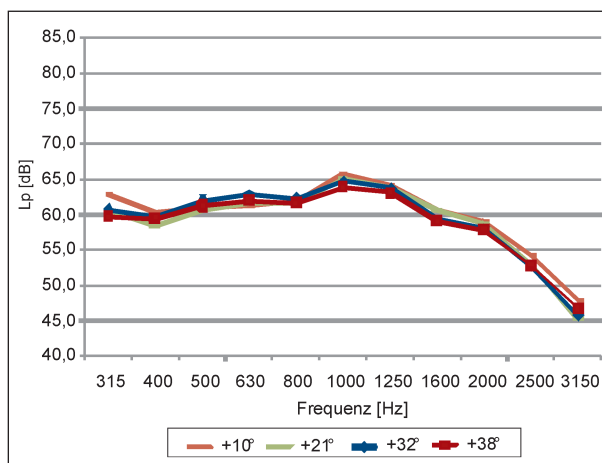


Bild 5.67: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

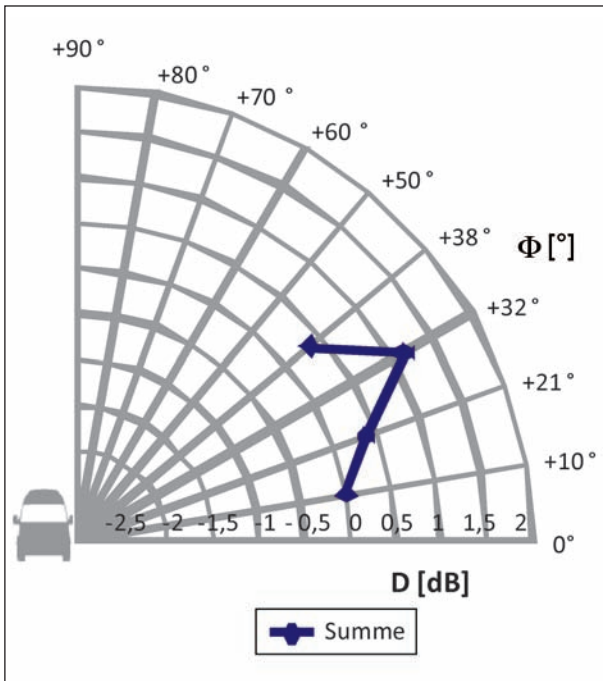


Bild 5.68: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

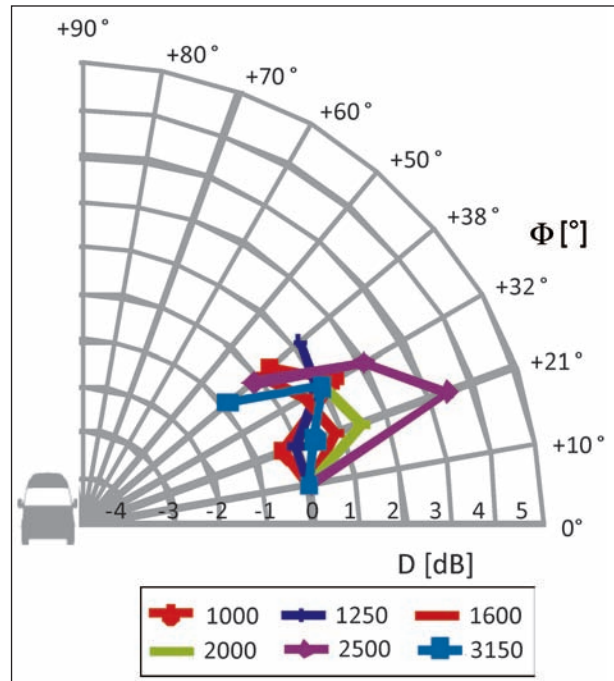


Bild 5.70: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

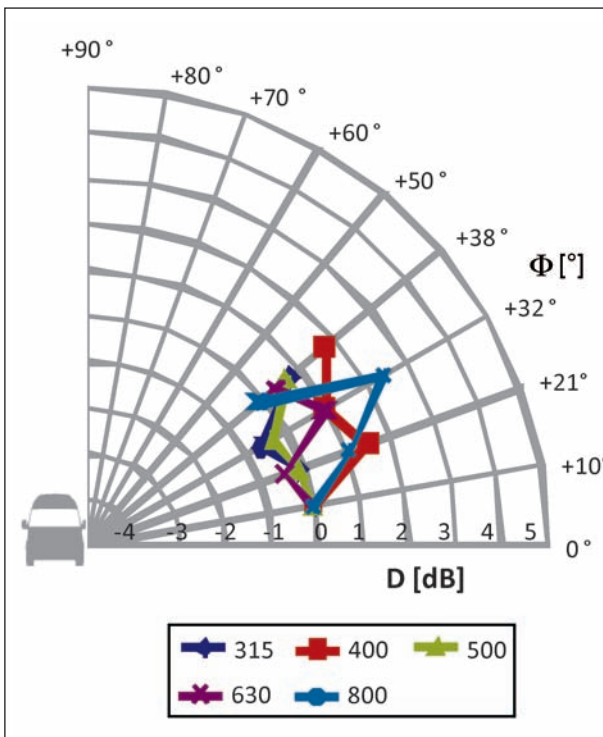


Bild 5.69: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

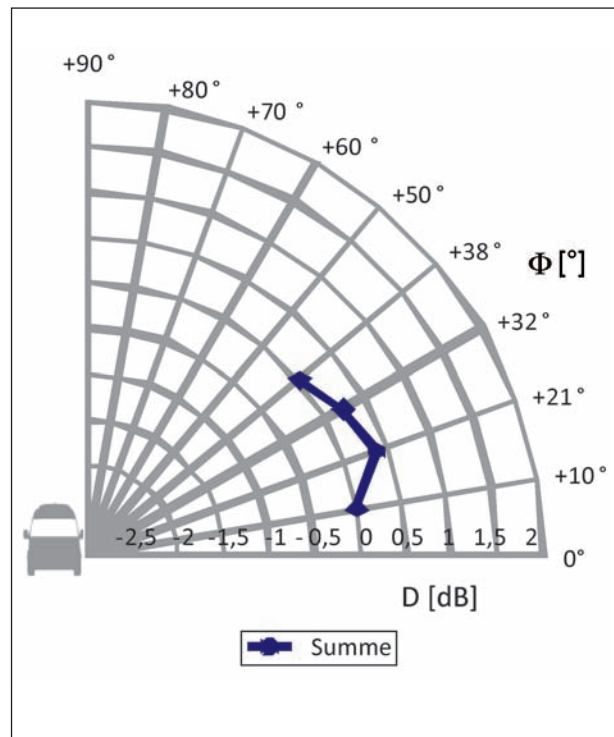


Bild 5.71: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

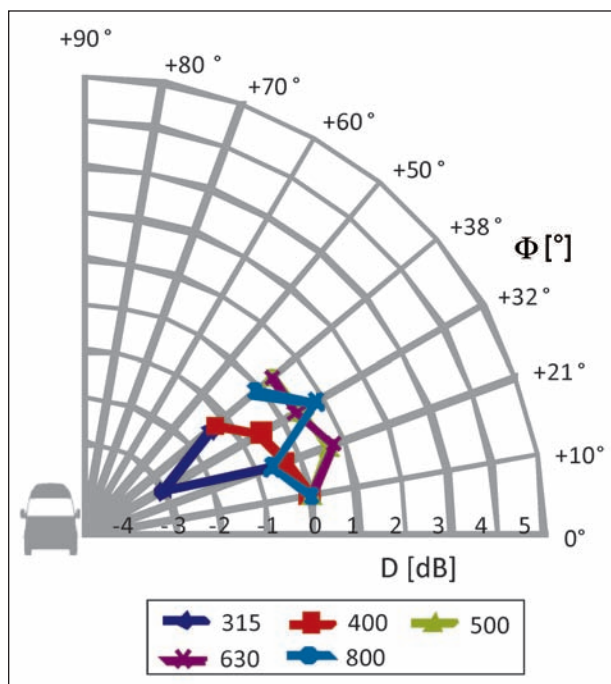


Bild 5.72: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

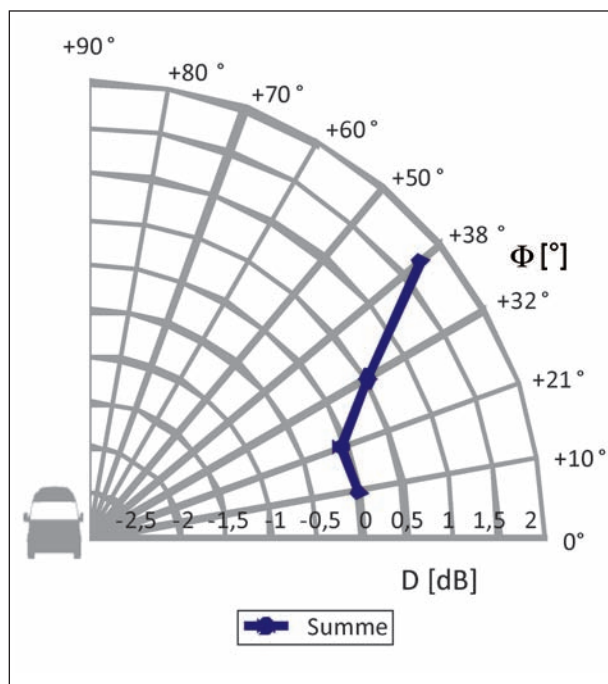


Bild 5.74: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

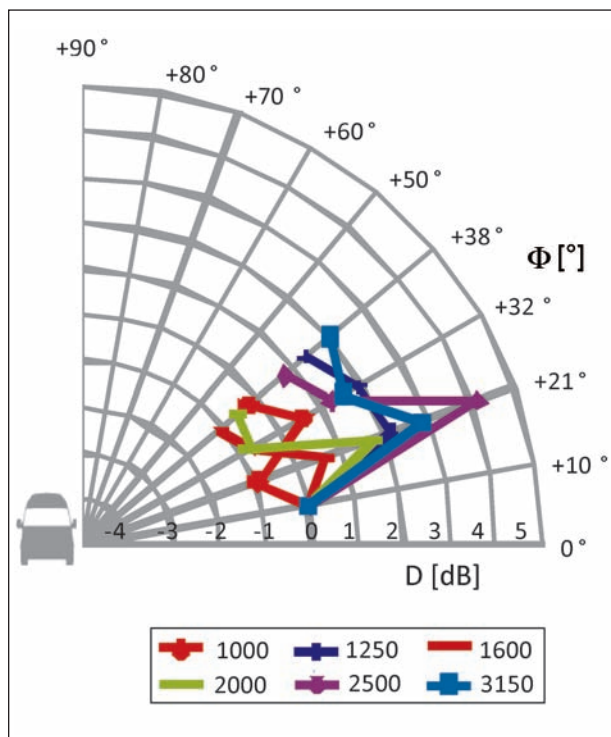


Bild 5.73: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

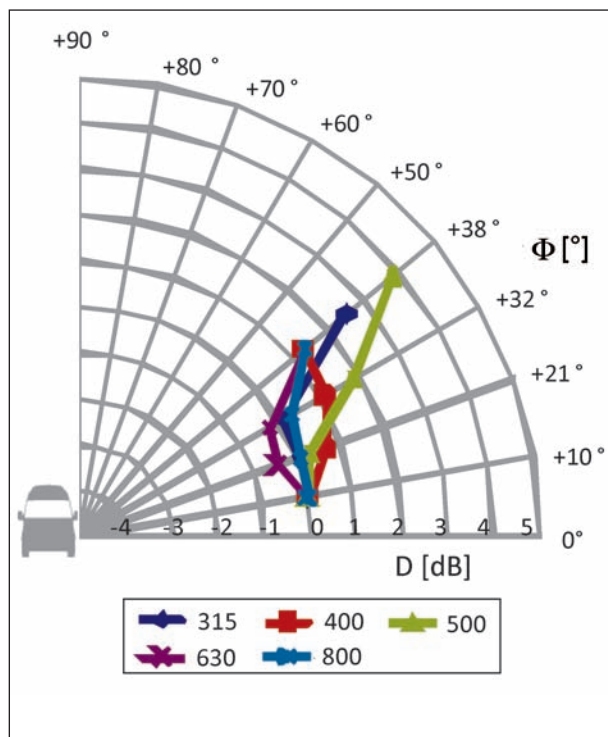


Bild 5.75: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

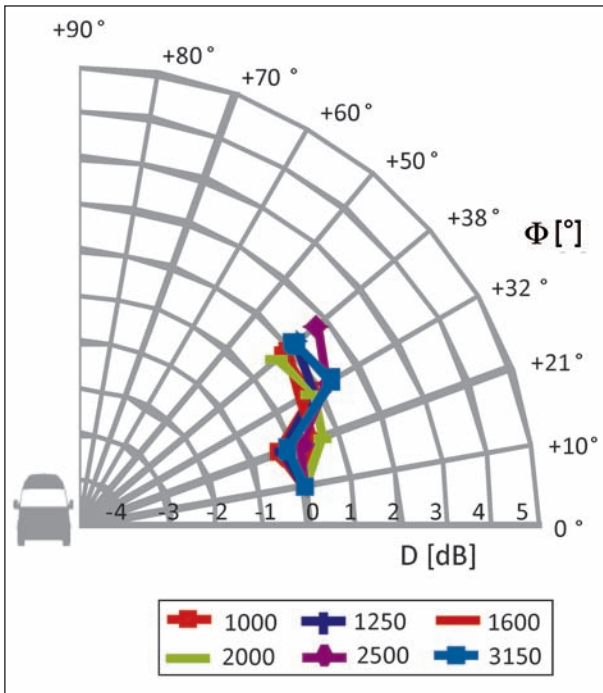


Bild 5.76: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

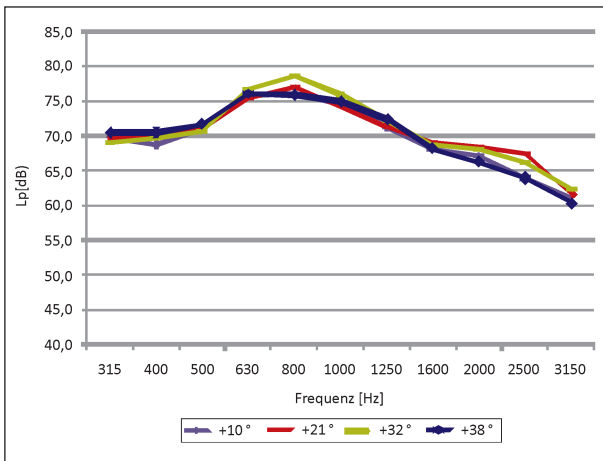


Bild 5.77: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmit-tenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

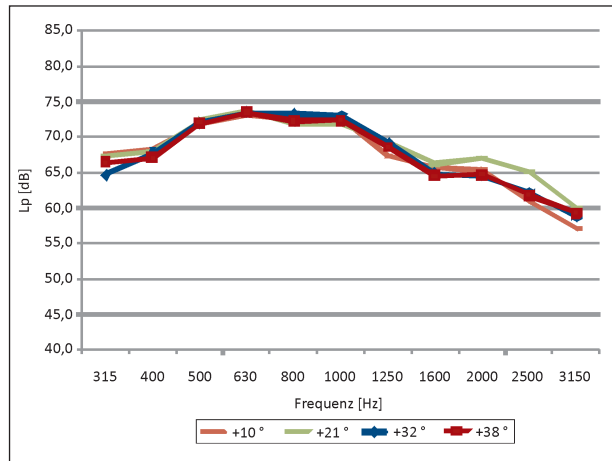


Bild 5.78: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmit-tenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

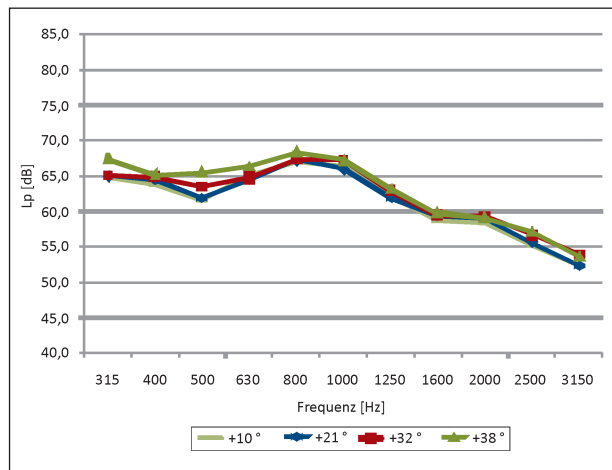


Bild 5.79: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmit-tenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

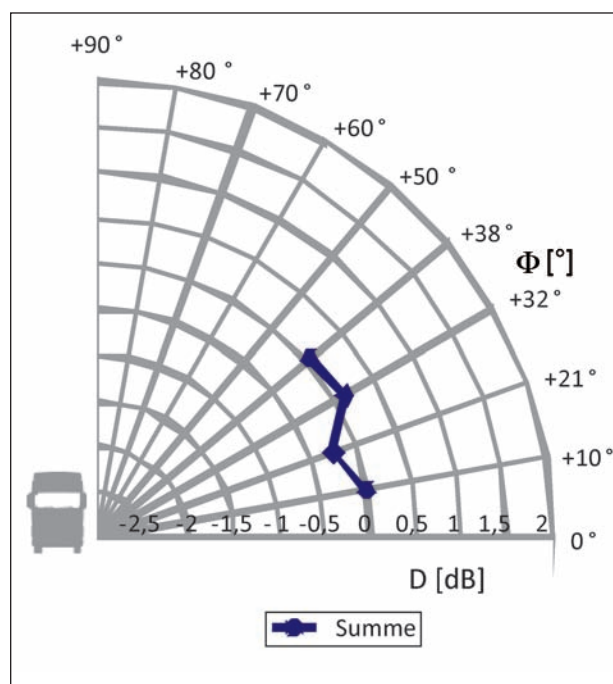


Bild 5.80: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

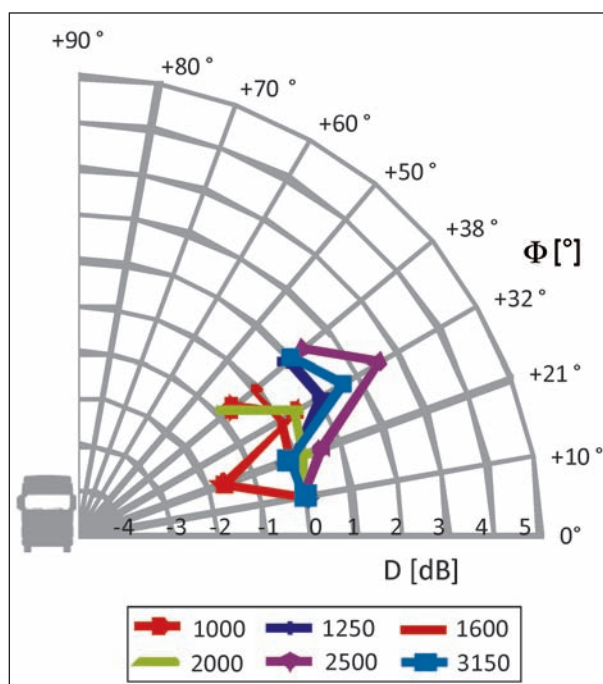


Bild 5.82: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3.150 Hz

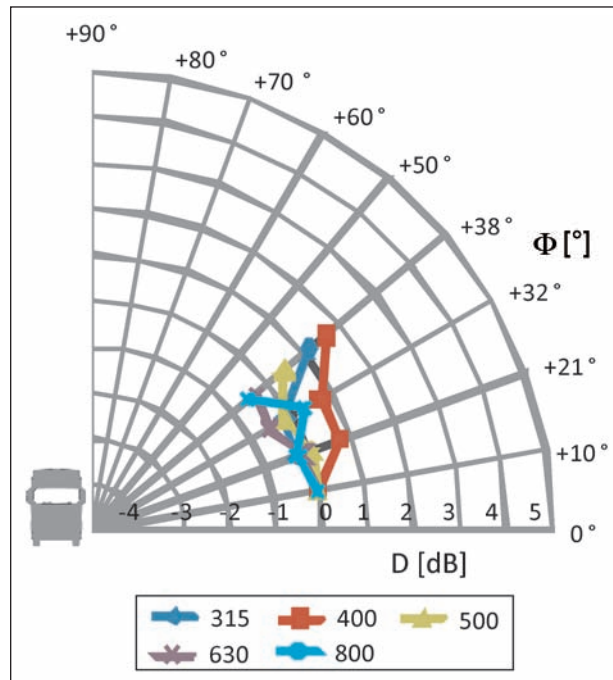


Bild 5.81: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

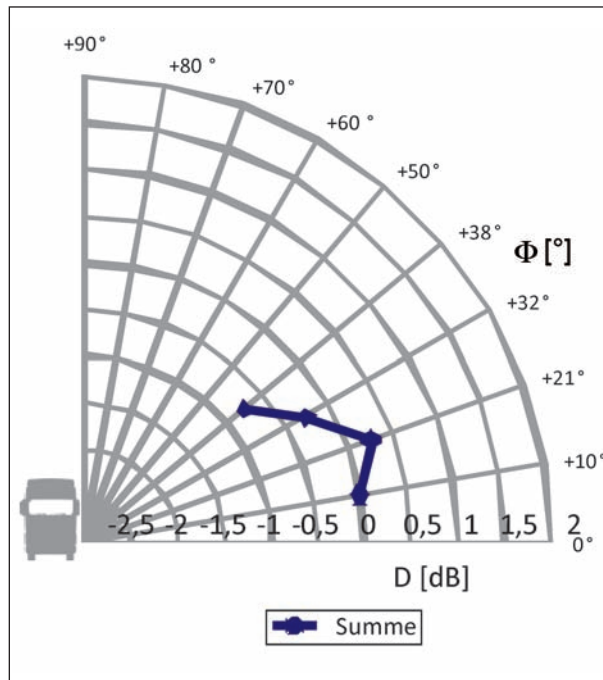


Bild 5.83: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\varphi = +10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

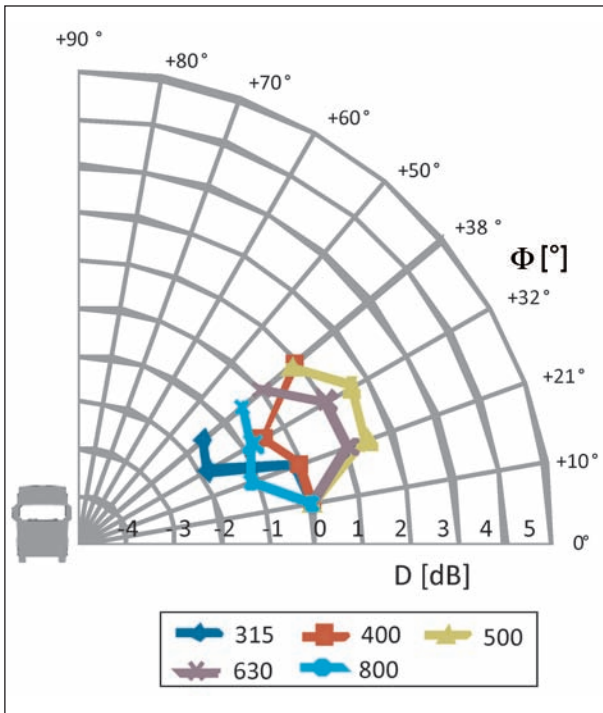


Bild 5.84: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Terzpegel 315 Hz bis 800 Hz

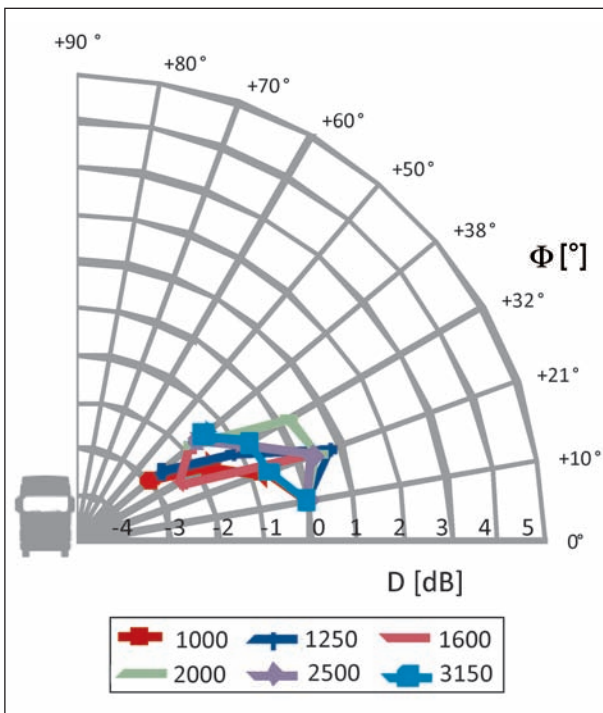


Bild 5.85: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = +10^\circ$, Terzpegel 1.000 Hz bis 3..150 Hz

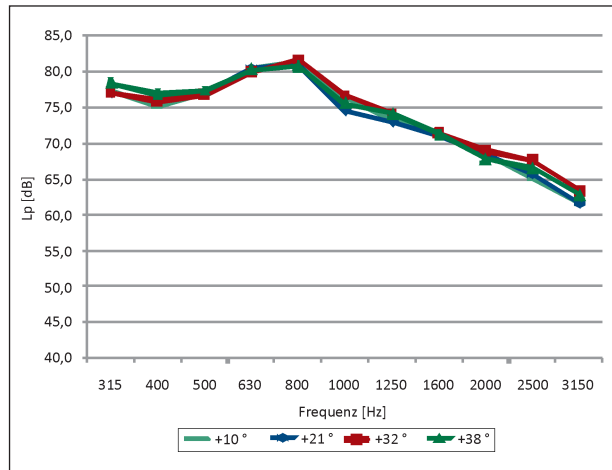


Bild 5.86: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

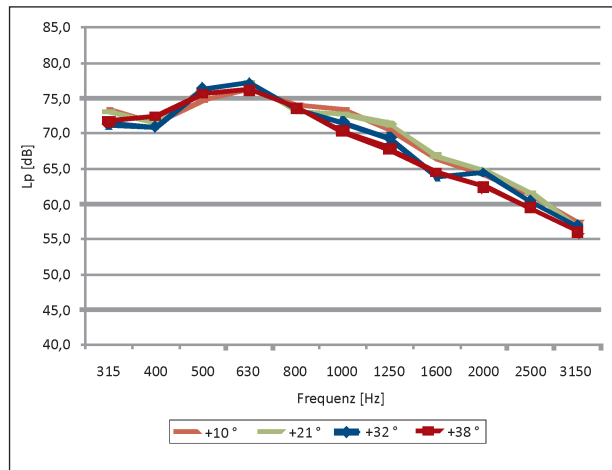


Bild 5.87: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz, vertikaler Schalleinfallswinkel $+10^\circ$ bis $+38^\circ$

c) Schalleistung

Im dritten Teil der messtechnischen Untersuchungen wurde die Schalleistung der Fahrzeuge bestimmt. Die Ergebnisse des unkorrigierten spektralen Immissionschalldruckpegels, der für die Berechnung der vertikalen Richtcharakteristik herangezogen wurde, dienen dabei der Bestimmung des mittleren Schalldruckpegels auf der Messfläche (vgl. Bild 4.4, Bild 5.54 und Bild 5.55). Die Beobachtungsdauer des Fahrzeugs wurde so gewählt, dass sich die Fahrzeugmitte zu Beginn des Beobachtungsintervalls an der Position $-\left(\frac{L}{2} + d\right)$ befindet und zum Ende des Beobachtungsintervalls die Position $+\left(\frac{L}{2} + d\right)$ erreicht (vgl. Bild 4.4). L und d beschreiben dabei die Länge des Fahrzeugs sowie

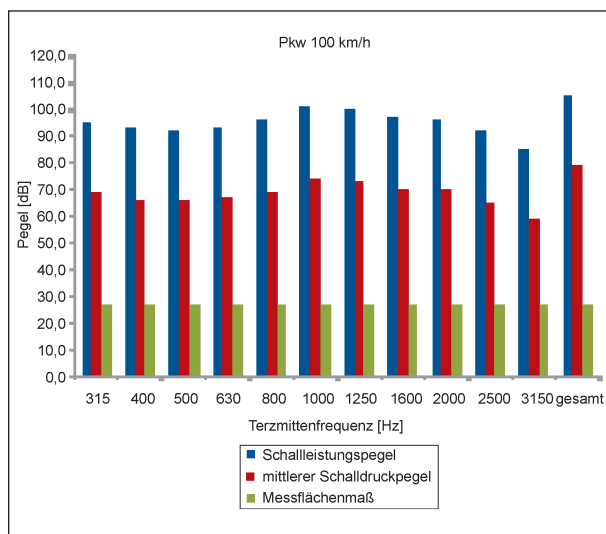


Bild 5.88: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

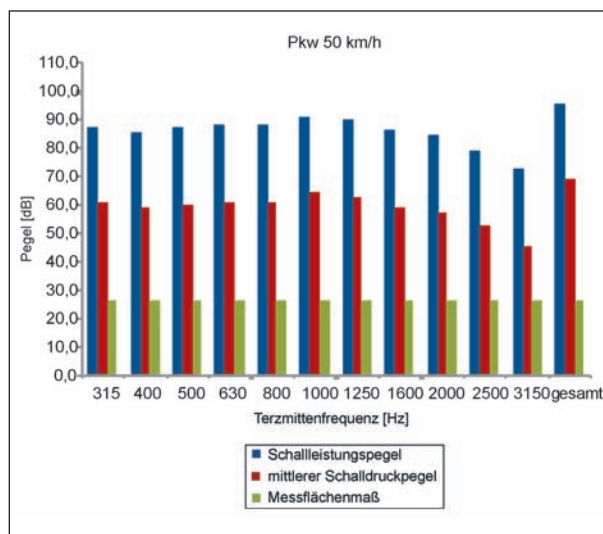


Bild 5.90: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

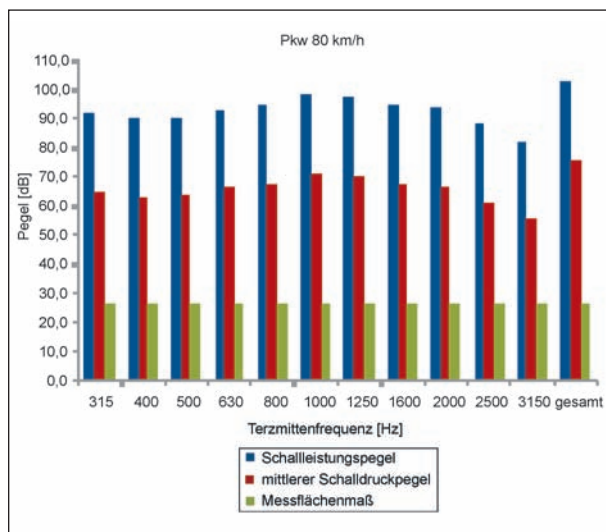


Bild 5.89: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

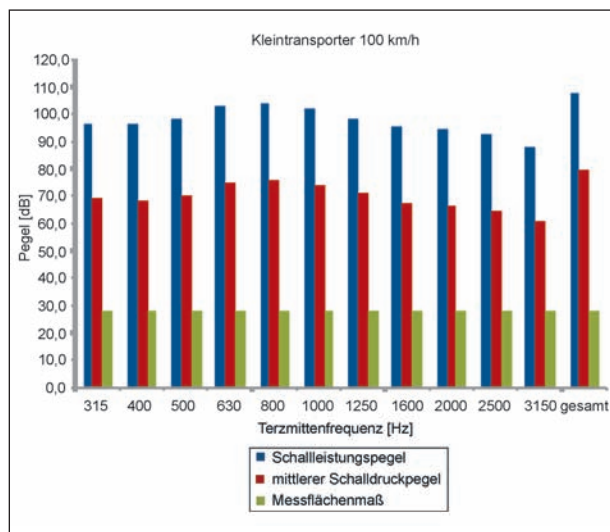


Bild 5.91: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

den Messabstand zwischen Mikrofonarray und Messfläche. Dies entspricht einem Bereich des horizontalen Schalleinfallswinkels von $-45^\circ \leq \varphi_h + 45^\circ$.

Der mittlere Schalldruckpegel, das Messflächenmaß und der resultierende spektrale Schalleistungspegel der Fahrzeuge innerhalb der Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz sowie im gesamten Frequenzbereich sind für die verschiedenen Fahrzeuge und Geschwindigkeiten in Bild 5.88 bis Bild 5.95 dargestellt. Die Ergebnisse besitzen wie-

derum den typischen Verlauf des Standardisierten Verkehrslärmspektrums. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse für die verschiedenen Fahrzeuge und Geschwindigkeiten erfolgt in Kapitel 6.

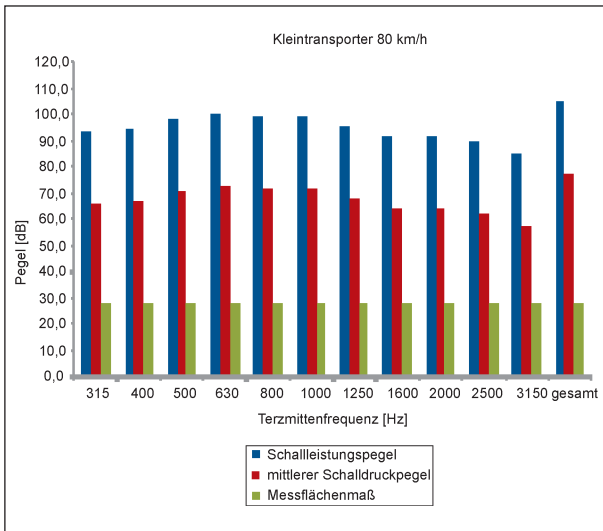


Bild 5.92: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

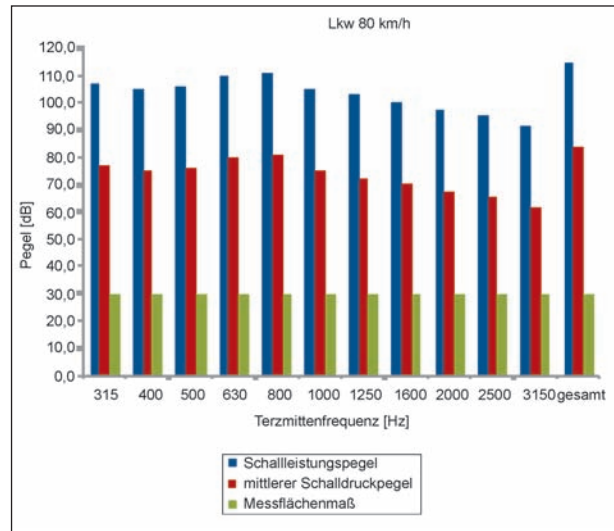


Bild 5.94: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

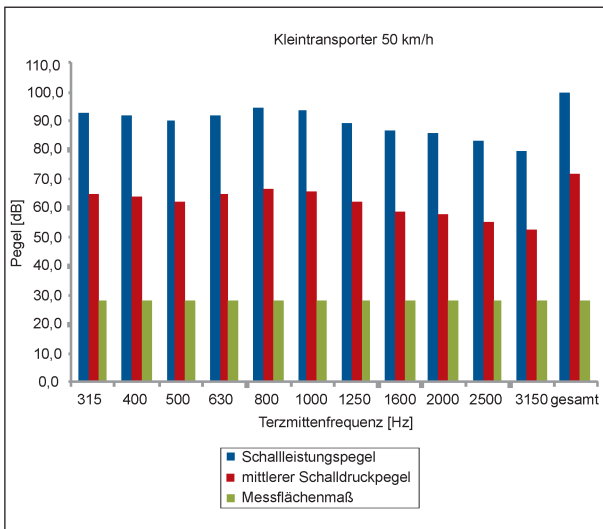


Bild 5.93: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

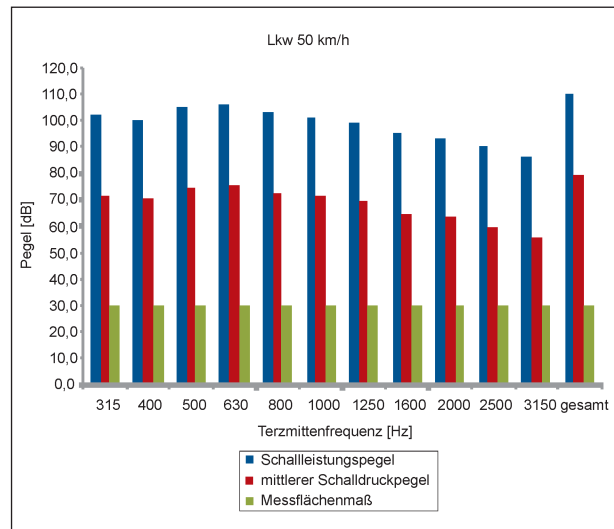


Bild 5.95: Mittlerer Schalldruckpegel, Messflächenmaß und Schalleistungspegel des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Terzpegel und Gesamtpegel von 315 Hz bis 3.150 Hz

5.3 Einzelergebnisse Schallabstrahlung

Im Folgenden sind die Einzelergebnisse der horizontalen und vertikalen Schallabstrahlung aufgeführt.

Horizontale Schallabstrahlung, Pkw, $v = 100 \text{ km/h}$

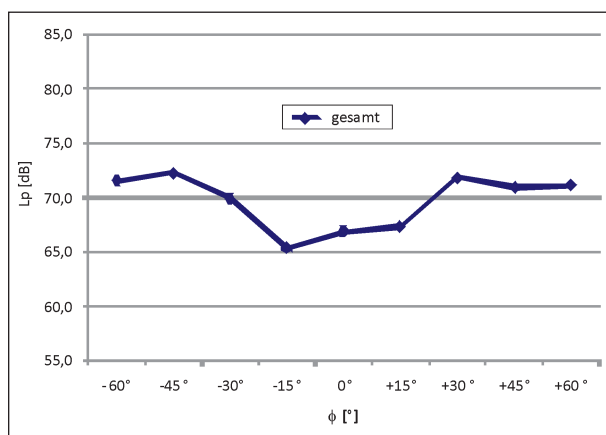


Bild 5.96: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

Horizontale Schallabstrahlung, Pkw, $v = 80 \text{ km/h}$

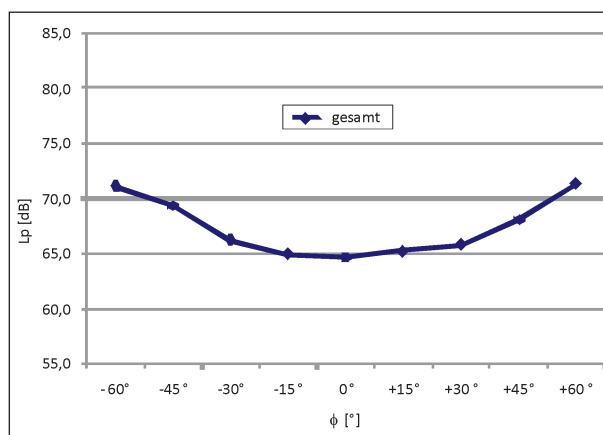


Bild 5.99: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

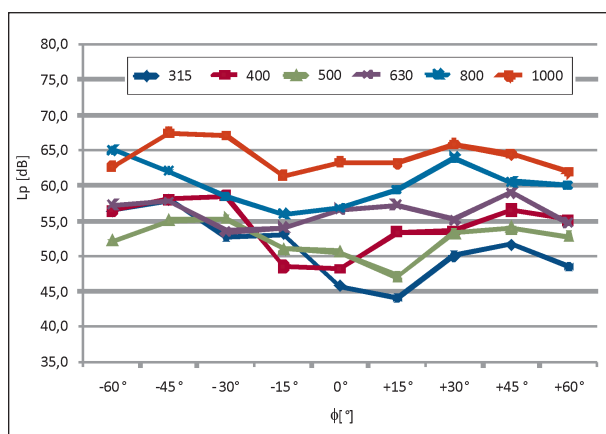


Bild 5.97: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

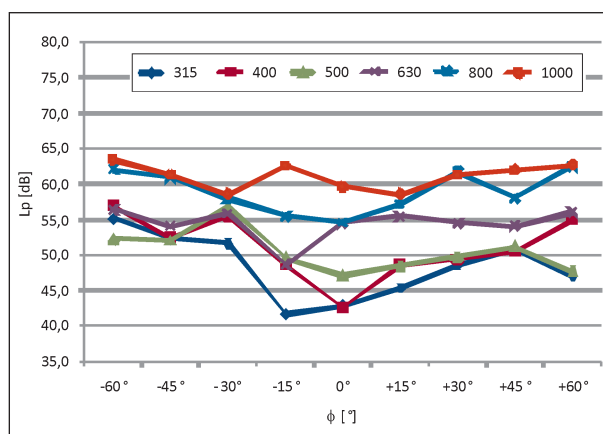


Bild 5.100: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

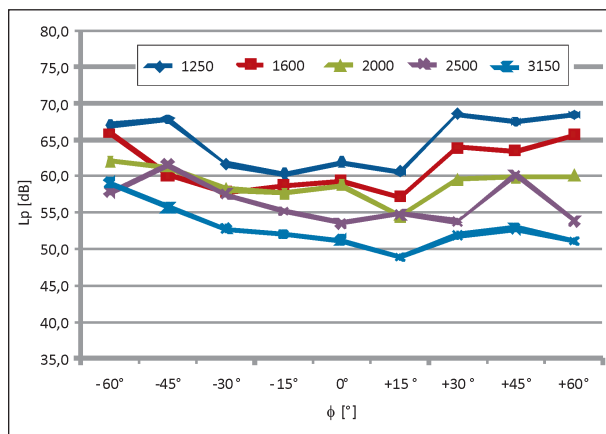


Bild 5.98: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

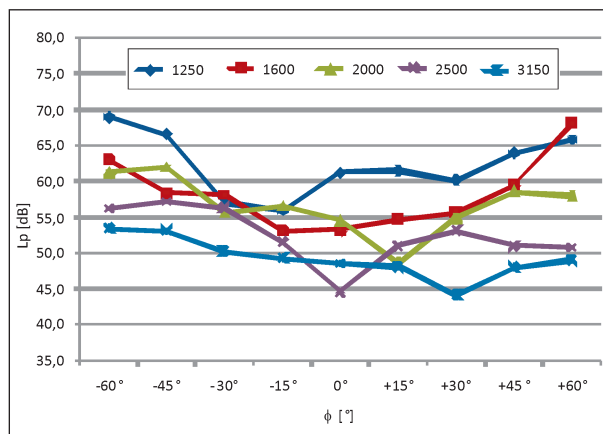


Bild 5.101: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

**Horizontale Schallabstrahlung, Pkw,
v = 50 km/h**

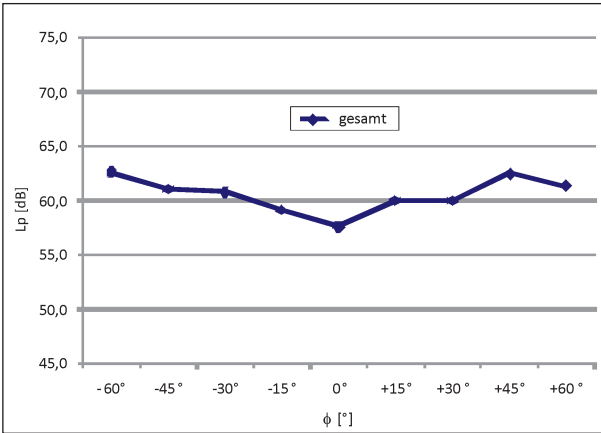


Bild 5.102: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

Horizontale Schallabstrahlung, Kleintransporter, v = 100 km/h

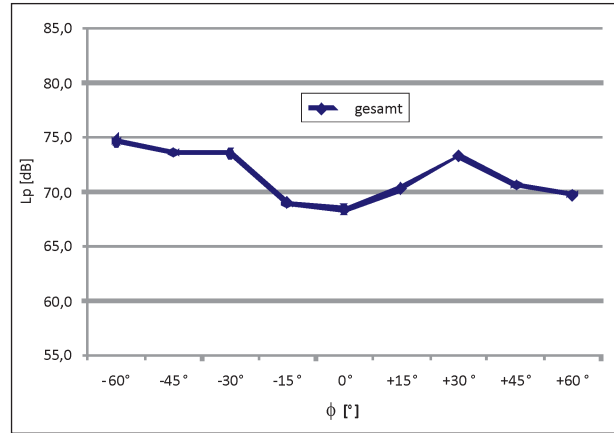


Bild 5.105: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 bis 3.150 Hz

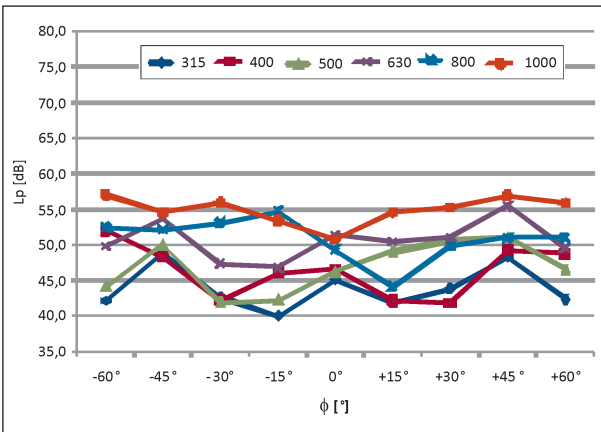


Bild 5.103: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

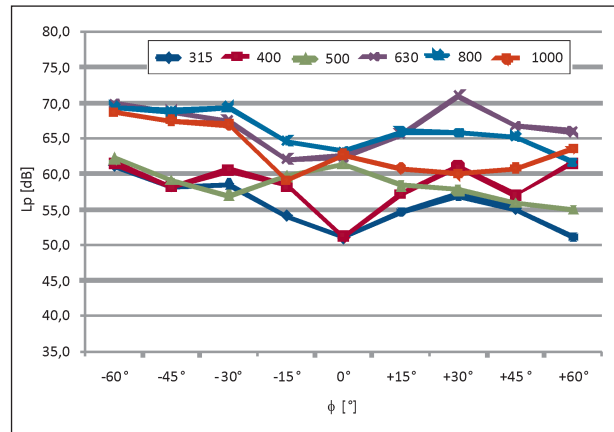


Bild 5.106: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

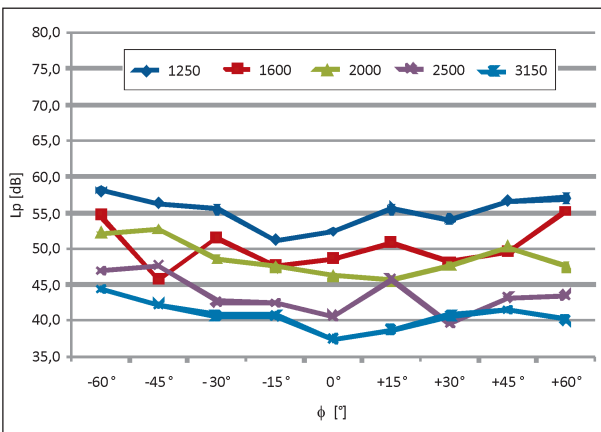


Bild 5.104: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

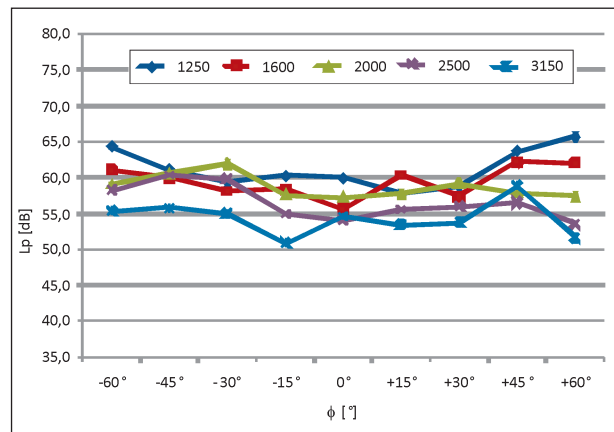


Bild 5.107: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

Horizontale Schallabstrahlung, Kleintransporter, $v = 80$ km/h

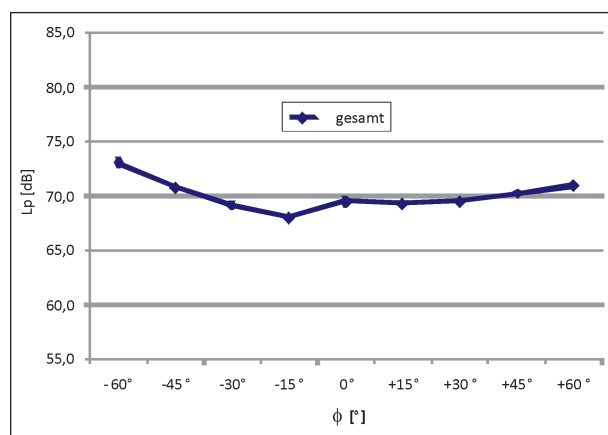


Bild 5.108: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 bis 3.150 Hz

Horizontale Schallabstrahlung, Kleintransporter, $v = 50$ km/h

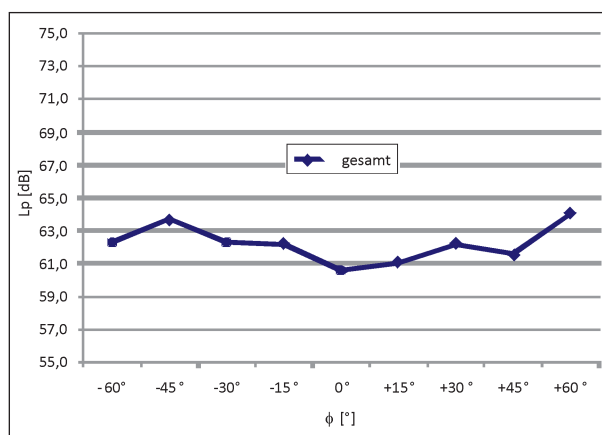


Bild 5.111: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 bis 3.150 Hz

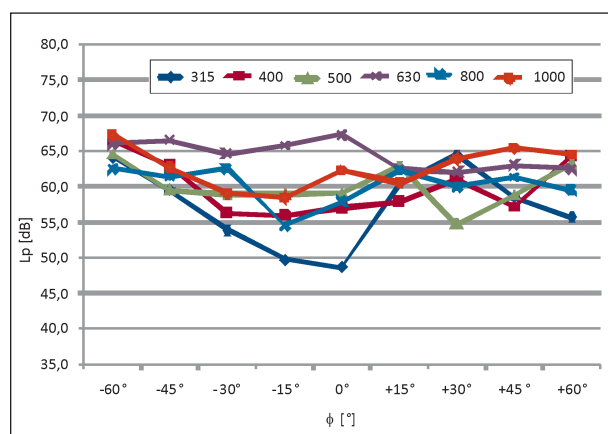


Bild 5.109: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

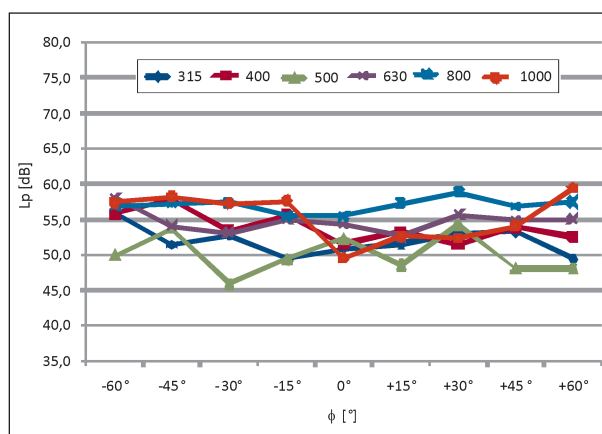


Bild 5.112: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

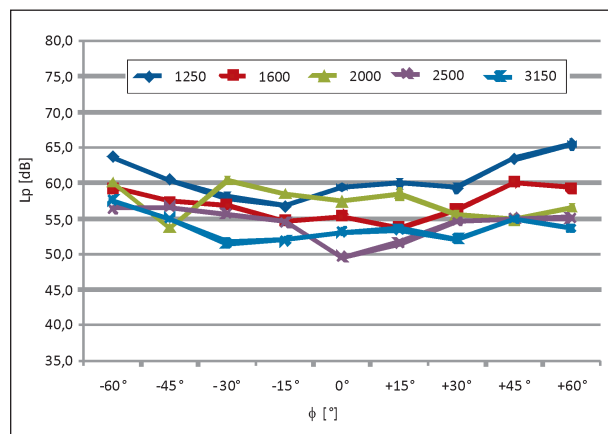


Bild 5.110: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 bis 3.150 Hz

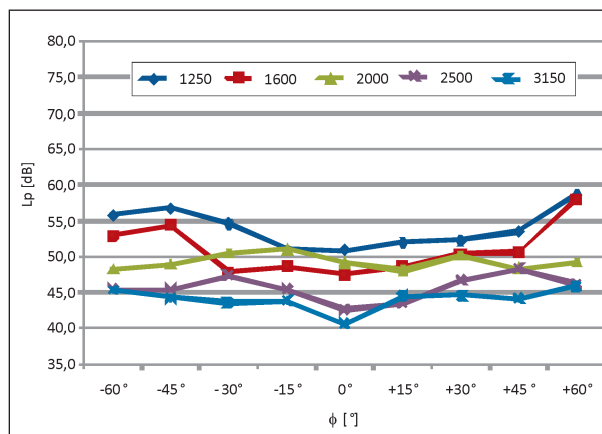


Bild 5.113: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 bis 3.150 Hz

**Horizontale Schallabstrahlung,
Lkw, v = 80 km/h**

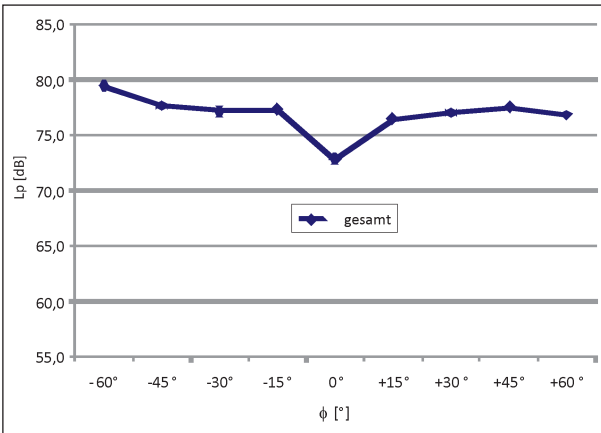


Bild 5.114: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

**Horizontale Schallabstrahlung,
Lkw, v = 50 km/h**

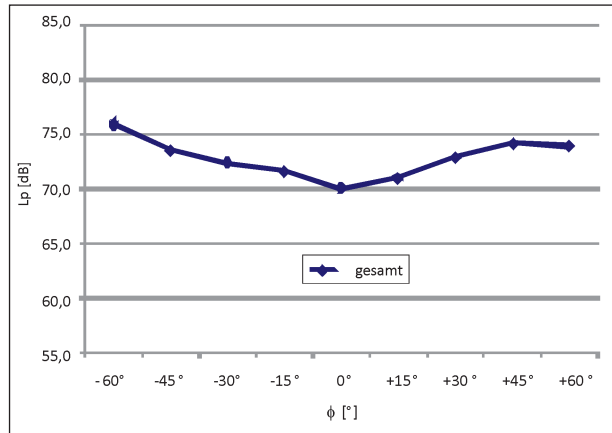


Bild 5.117: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

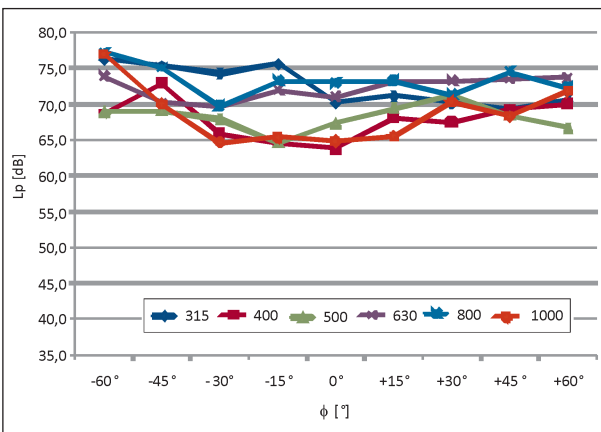


Bild 5.115: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

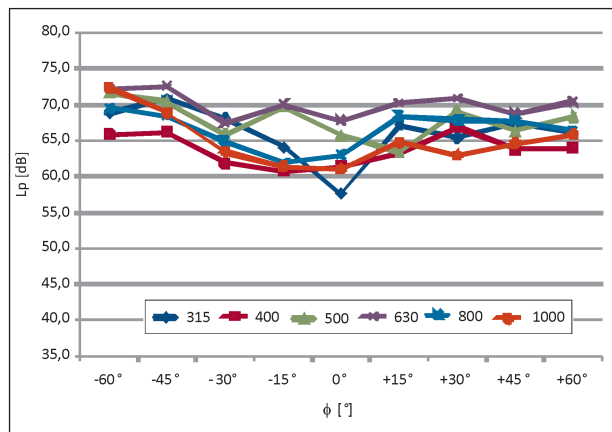


Bild 5.118: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

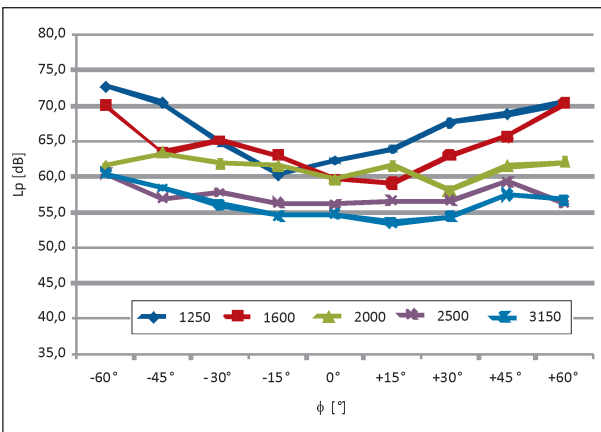


Bild 5.116: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

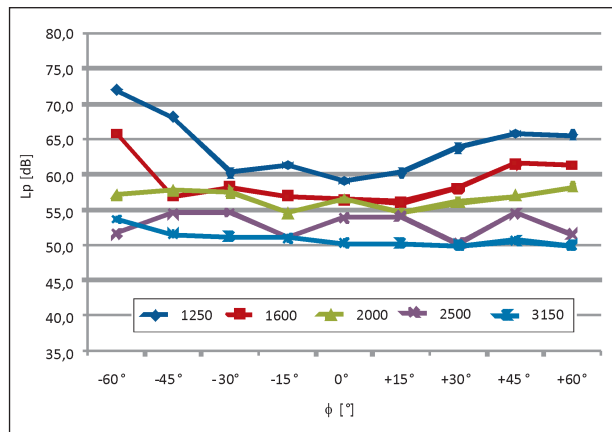


Bild 5.119: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 20 m in Abhängigkeit vom horizontalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

Vertikale Schallabstrahlung, Pkw, $v = 100$ km/h

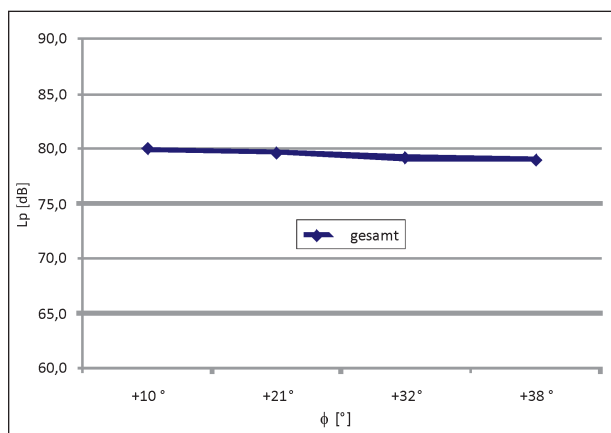


Bild 5.120: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

Vertikale Schallabstrahlung, Pkw, $v = 80$ km/h

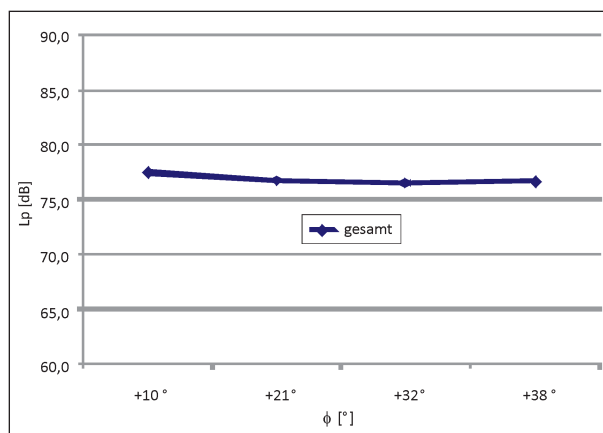


Bild 5.123: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

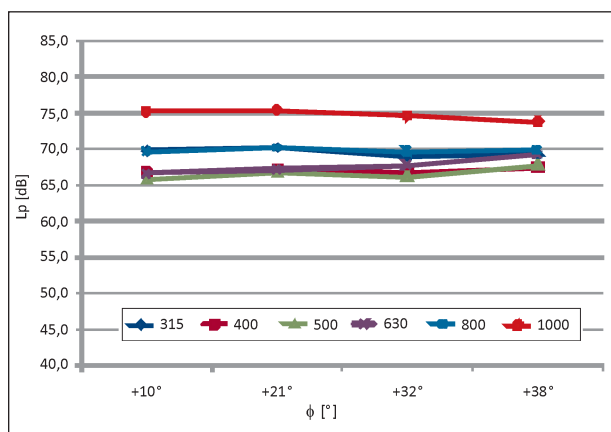


Bild 5.121: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

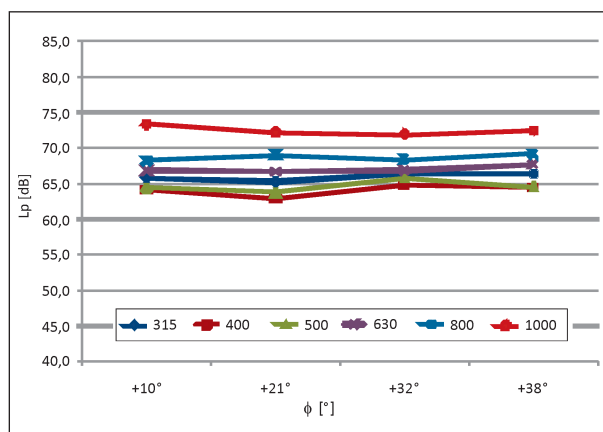


Bild 5.124: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

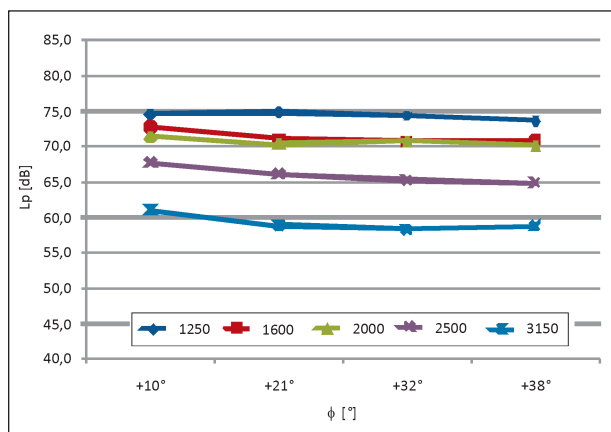


Bild 5.122: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

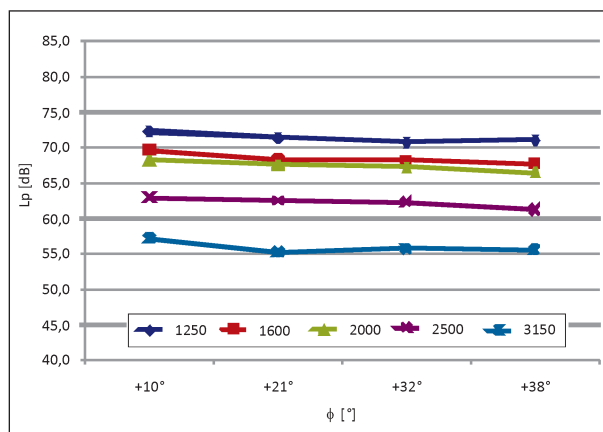


Bild 5.125: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

**Vertikale Schallabstrahlung,
Pkw, v = 50 km/h**

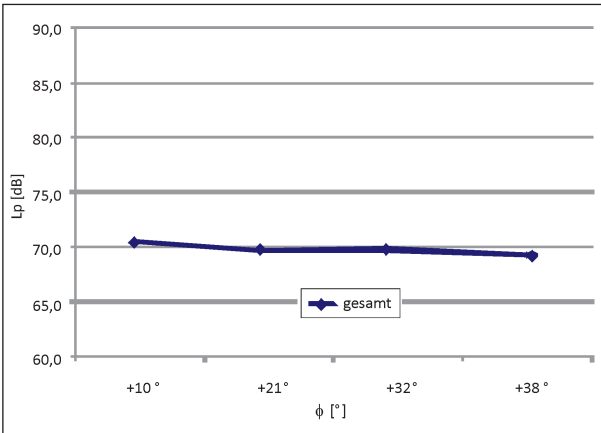


Bild 5.126: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

**Vertikale Schallabstrahlung,
Kleintransporter, v = 100 km/h**

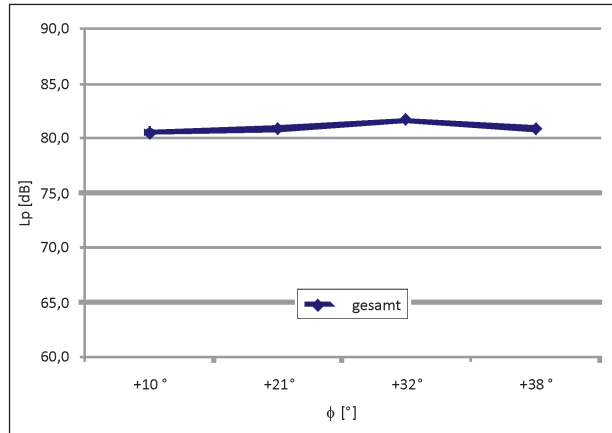


Bild 5.129: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 bis 3.150 Hz

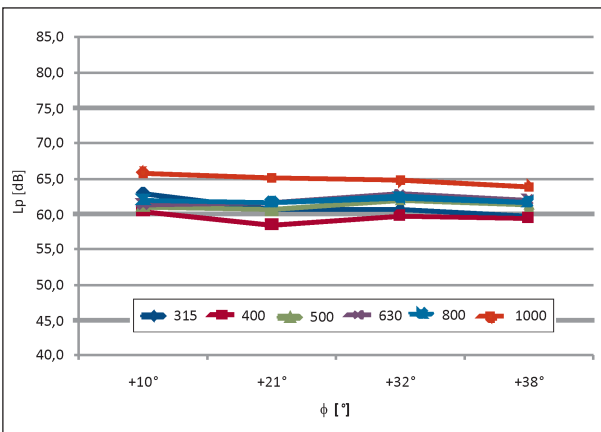


Bild 5.127: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

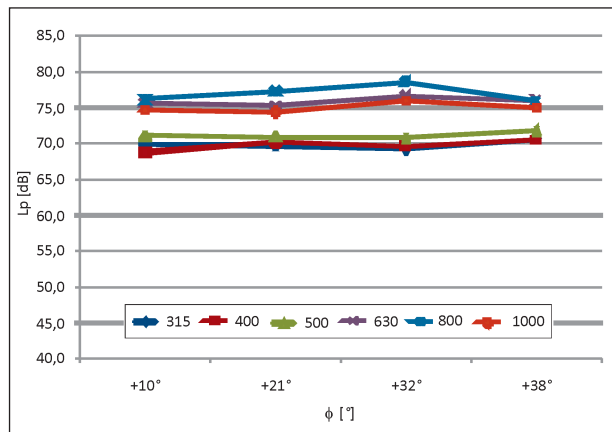


Bild 5.130: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

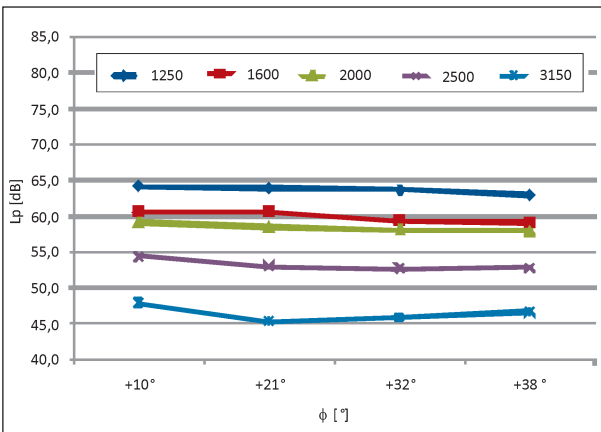


Bild 5.128: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

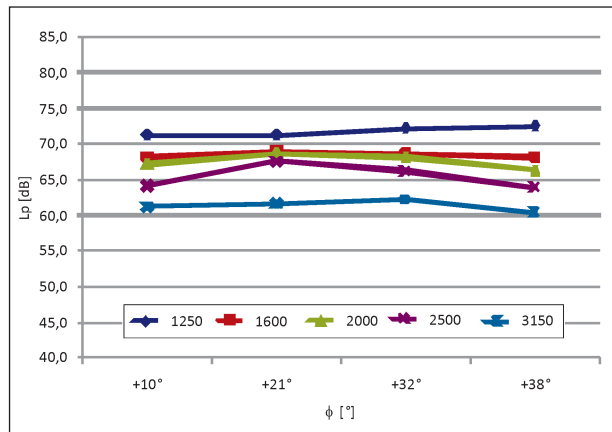


Bild 5.131: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw mit 100 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

Vertikale Schallabstrahlung, Kleintransporter, $v = 80$ km/h

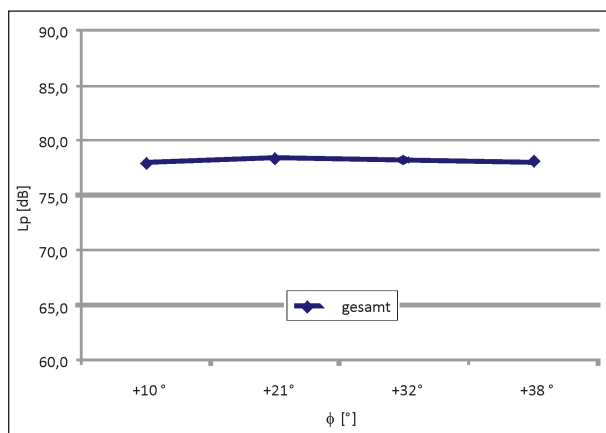


Bild 5.132: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 bis 3.150 Hz

Vertikale Schallabstrahlung, Kleintransporter, $v = 50$ km/h

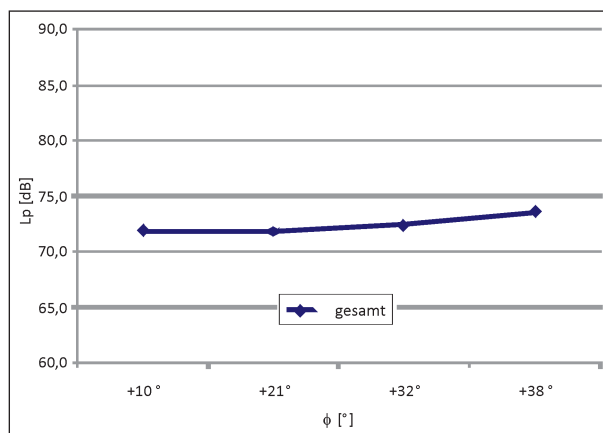


Bild 5.135: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 bis 3.150 Hz

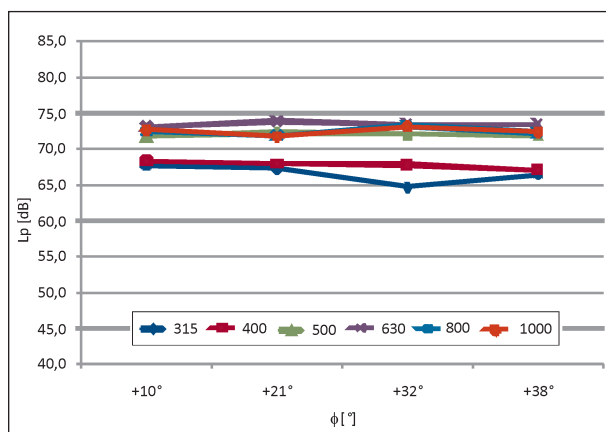


Bild 5.133: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel Hz bis 1.000 Hz

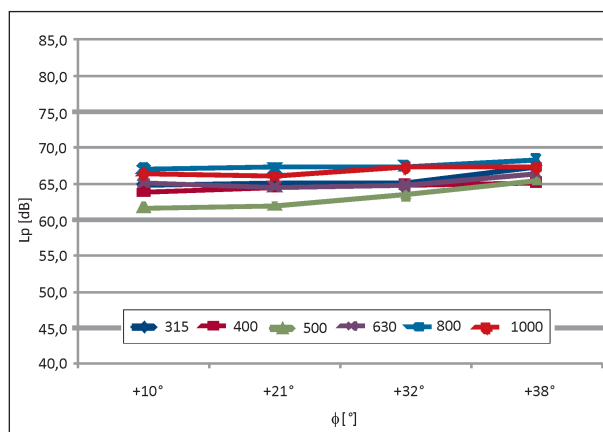


Bild 5.136: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

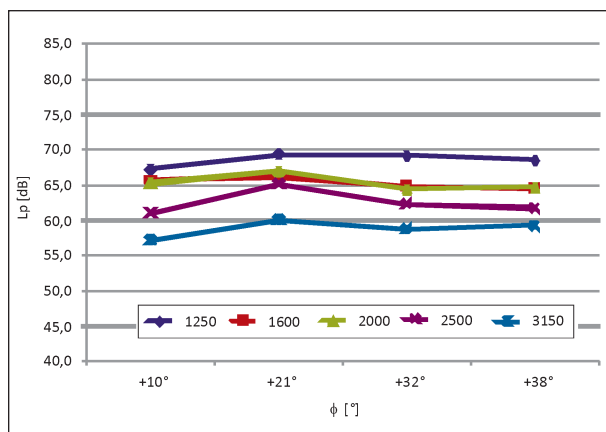


Bild 5.134: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 bis 3.150 Hz

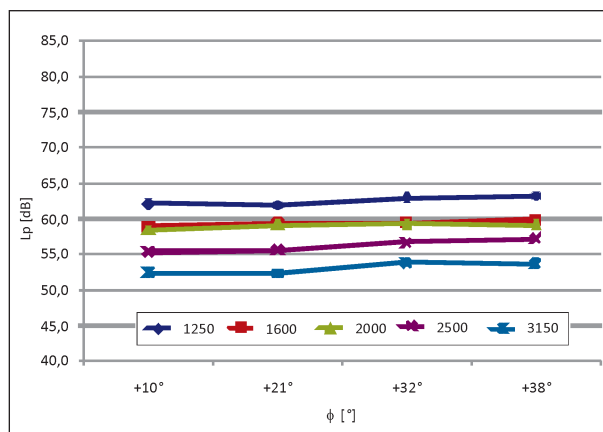


Bild 5.137: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Kleintransporters mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 bis 3.150 Hz

**Vertikale Schallabstrahlung,
Lkw, v = 80 km/h**

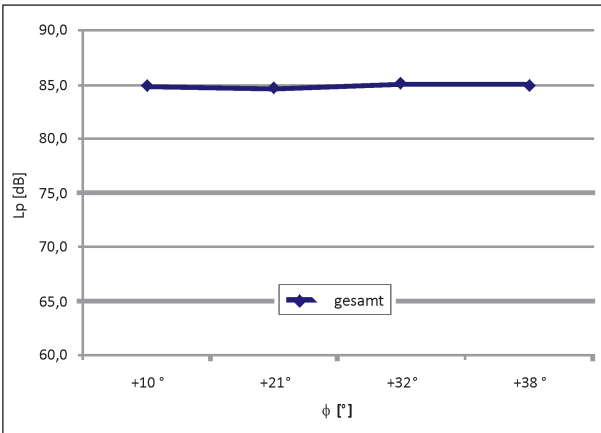


Bild 5.138: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

**Vertikale Schallabstrahlung,
Lkw, v = 50 km/h**

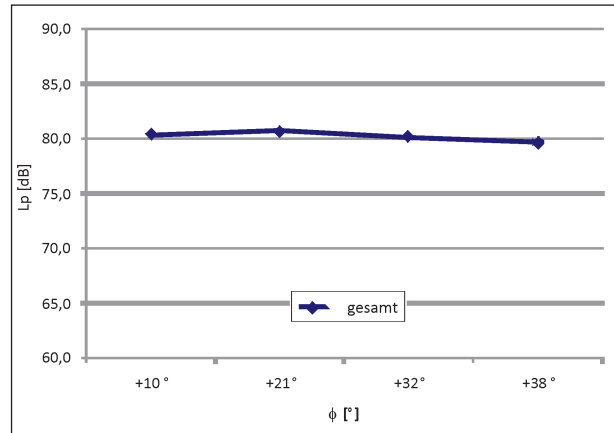


Bild 5.141: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

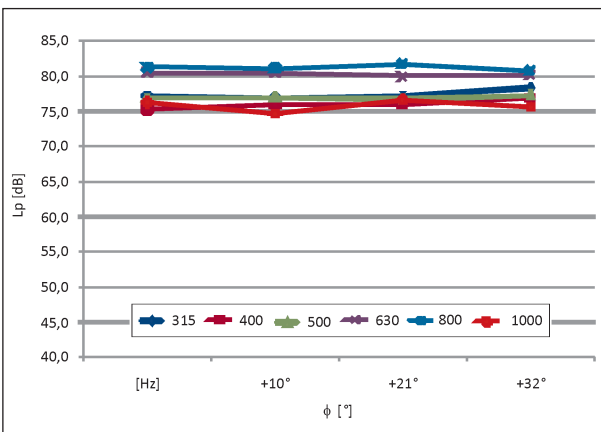


Bild 5.139: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

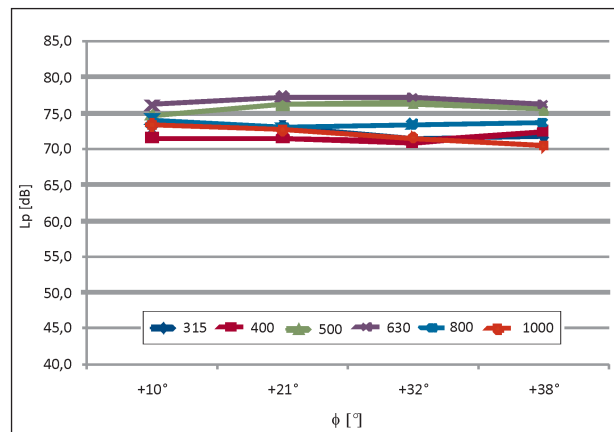


Bild 5.142: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 315 Hz bis 1.000 Hz

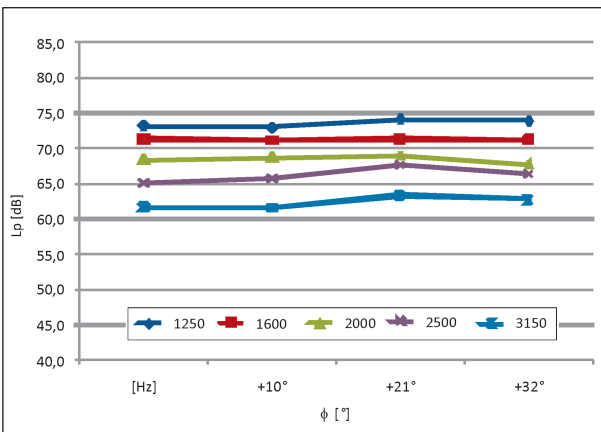


Bild 5.140: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 80 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

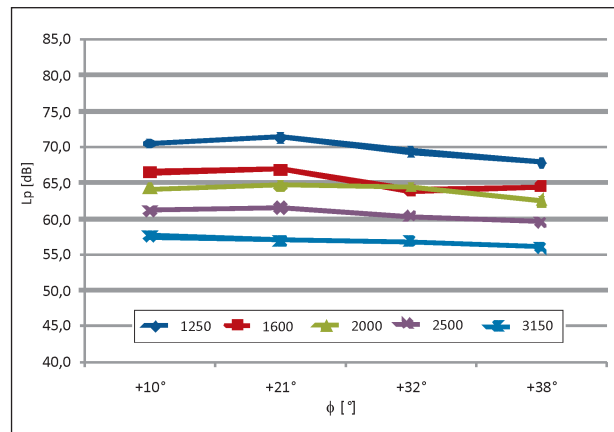


Bild 5.143: Bestimmter Schalldruckpegel während kontrollierter Vorbeifahrt des Lkw mit 50 km/h im Abstand von 4,75 m in Abhängigkeit vom vertikalen Schalleinfallswinkel, Terzpegel 1.250 Hz bis 3.150 Hz

6 Auswertung

a) Horizontale Richtcharakteristik

Der Gesamtpegel der horizontalen Richtcharakteristik der verschiedenen Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h ist in Bild 6.1 bis Bild 6.6 zusammengefasst dargestellt. Bild 6.1 bis Bild 6.3 zeigen dabei die Ergebnisse eines spezifischen Fahrzeugs für die verschiedenen Geschwindigkeiten. Bild 6.4 bis Bild 6.6 beinhalten die horizontale Richtcharakteristik aller untersuchten Fahrzeuge für eine spezifische Geschwindigkeit.

Die Ergebnisse zeigen eine maximale horizontale Schallabstrahlung der Fahrzeuge im Bereich von -60° bis -45° und $+30^\circ$ bis $+60^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung tritt unter einem horizontalen Winkel von -15° bis 0° und somit seitlich des Fahrzeugs auf. In (SANDBERG, 2002) sind amerikanische (1974), spanische (1999) und französische (1986, 1987) Untersuchungen zusammengefasst, in denen vergleichbare Ergebnisse für die horizontale Richtwirkung ermittelt wurden.

Des Weiteren zeigt Bild 6.19 die in (JONASSON, 2001) aus einer Vielzahl von Messdaten bestimmte mittlere horizontale Richtwirkung eines Pkw nach NORD 2000 im Vergleich zu den vorliegenden Messergebnissen des Pkw. Die mittlere Richtcharakteristik nach NORD 2000 fügt sich dabei sehr gut in die ermittelten Messergebnisse ein. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die in (JONASSON, 2001) angegebene Richtwirkung mit

$$D = -5 + 7|\cos(90^\circ - \varphi)| \text{ dB} \quad (6.1)$$

auf einen horizontalen Schalleinfallswinkel von $\pm 45^\circ$ bezieht. Zum Vergleich der Richtwirkung mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen wurde Gleichung (6.1) über

$$D = 7|\cos(90^\circ - \varphi)| \text{ dB} \quad (6.2)$$

an den Bezugswinkel von 0° angepasst.

Es ist zu erkennen, dass die mittlere horizontale Richtcharakteristik des Pkw nach NORD 2000 einen zum horizontalen Winkel von 0° symmetrischen Verlauf aufweist. Die Messergebnisse zeigten, dass die horizontale Richtcharakteristik im gesamten Frequenzbereich von 315 Hz bis 3.150 Hz durch die Richtcharakteristik der die Schallemission dominierenden Terzbänder bestimmt wird. Wie bereits in Kapitel 5.2 beschrieben liegt der spektrale

Schwerpunkt der horizontalen Richtcharakteristik für den Pkw im Bereich von 1.000 Hz bis 1.600 Hz. Durch die Lokalisationsergebnisse in Bild 5.17 konnte gezeigt werden, dass in diesem Frequenzbereich das Reifen-Fahrbahn-Geräusch des Pkw die Motoren- und Getriebegeräusche sowie die aerodynamischen Schallquellen (= Hauptursachen der Schallabstrahlung eines vorbeifahrenden Fahrzeugs nach SANDBERG, 2002) dominiert. Dabei entsteht beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt sowohl vor als auch hinter dem Reifen Schall, dessen Amplitude mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Daraus resultiert eine symmetrische Schallabstrahlung des Pkw. Begünstigt durch den Horneffekt, wurde für den Pkw unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von -60° bis -30° bzw. $+30^\circ$ bis $+60^\circ$ eine maximale horizontale Richtwirkung von bis zu +6 dB ermittelt.

Für den Kleintransporter und den Lkw ist die auf den Winkel von 0° bezogene Symmetrie der horizontalen Richtcharakteristik weniger stark ausgeprägt. So dominiert z. B. außerhalb des Bereiches von -30° bis $+30^\circ$ die frontseitige Schallabstrahlung beider Fahrzeuge gegenüber der Schallemission unter positivem Winkel. Ursache dafür können, neben verstärkt auftretenden Motorengeräuschen, aerodynamische Geräusche sein, die besonders im Bereich des Übergangs zwischen Frontscheibe und Dach der Fahrzeuge auftreten. Auch in den bereits angeführten, in (SANDBERG, 2002) gegenübergestellten Untersuchungen zur horizontalen Richtwirkung von Fahrzeugen wurde die frontseitige Schallabstrahlung gegenüber der rückseitigen Emission als stärker bestimmt.

b) Vertikale Richtcharakteristik

Der Gesamtpegel der vertikalen Richtcharakteristik der verschiedenen Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h ist in Bild 6.7 bis Bild 6.12 zusammengefasst dargestellt. Bild 6.7 bis Bild 6.9 zeigen wie im Fall der horizontalen Richtwirkung die Ergebnisse eines spezifischen Fahrzeugs für die verschiedenen Geschwindigkeiten. Bild 6.10 bis Bild 6.12 beinhalten die vertikale Richtcharakteristik aller untersuchten Fahrzeuge für eine spezifische Geschwindigkeit.

Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale vertikale Schallabstrahlung für die verschiedenen Fahrzeuge in unterschiedlichen Bereichen auftritt. Für den Pkw beträgt der Winkel maximaler vertikaler Schallabstrahlung im untersuchten Bereich ge-

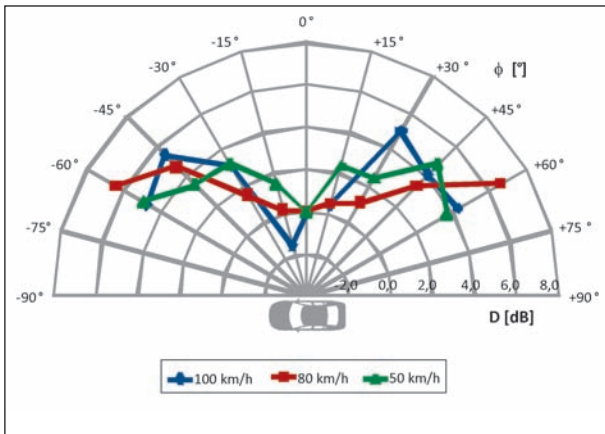


Bild 6.1: Horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

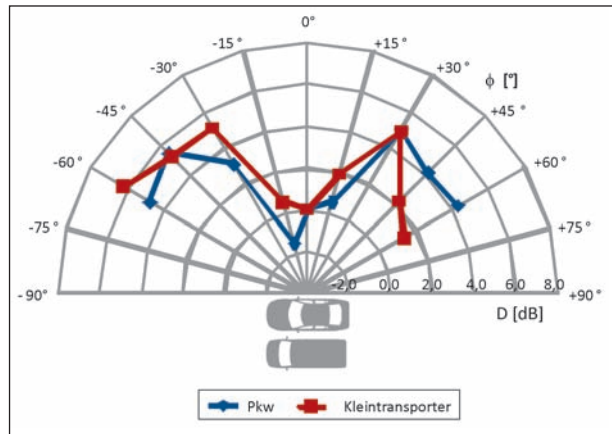


Bild 6.4: Horizontale Richtcharakteristik der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

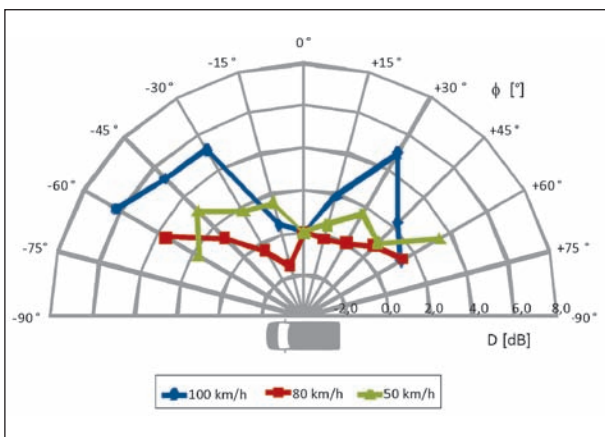


Bild 6.2: Horizontale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontr. Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

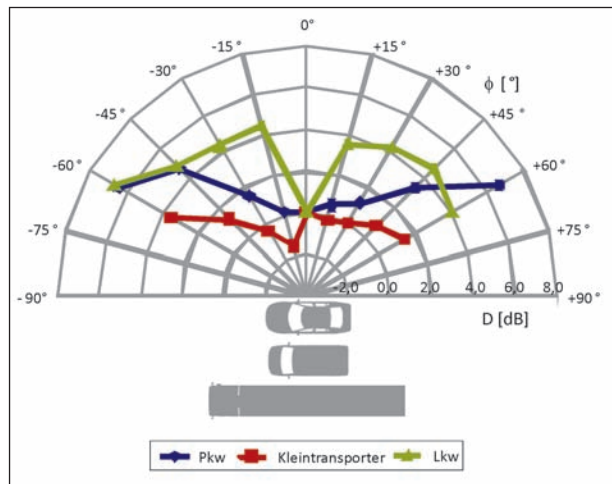


Bild 6.5: Horizontale Richtcharakteristik der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

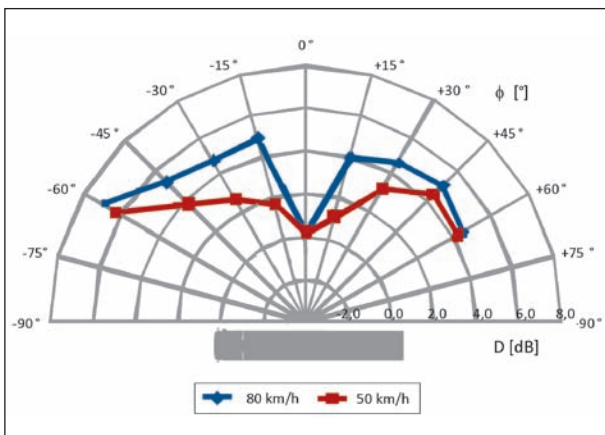


Bild 6.3: Horizontale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

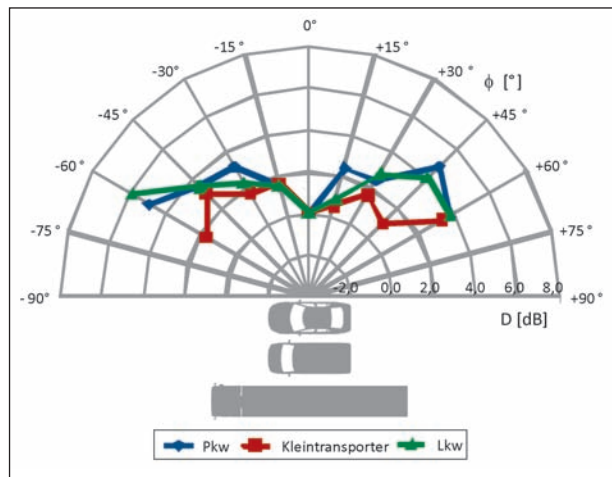


Bild 6.6: Horizontale Richtcharakteristik der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

schwindigkeitsunabhängig $+10^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung tritt unter einem vertikalen Winkel von $+32^\circ$ bis $+38^\circ$ auf. In (SANDBERG, 2002) sind die Ergebnisse von Untersuchungen zur verti-

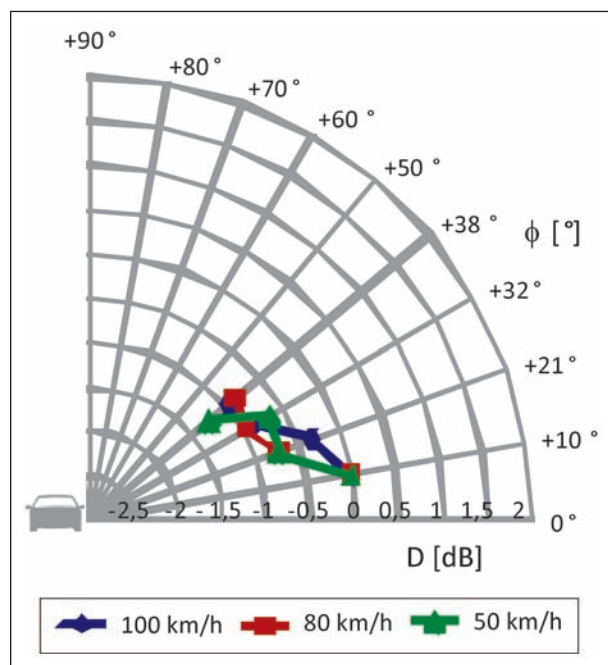


Bild 6.7: Vertikale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

kalen Richtcharakteristik des Pkw dargestellt (Farina-Studie). Daraus lässt sich erkennen, dass die stärkste vertikale Schallabstrahlung unter einem Winkel von 0° auftritt. Zu größeren Einfallswinkeln hin nimmt die Schallabstrahlung wie im Falle der vorliegenden Messergebnisse ab. Unter einem

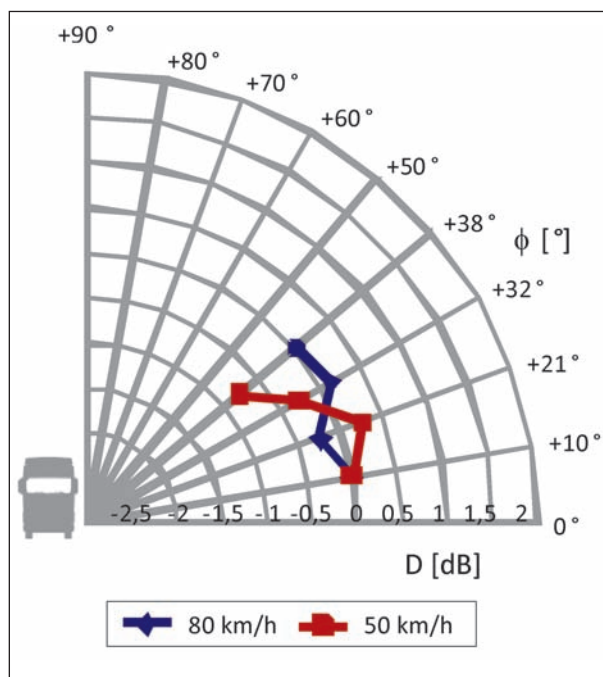


Bild 6.9: Vertikale Richtcharakteristik des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

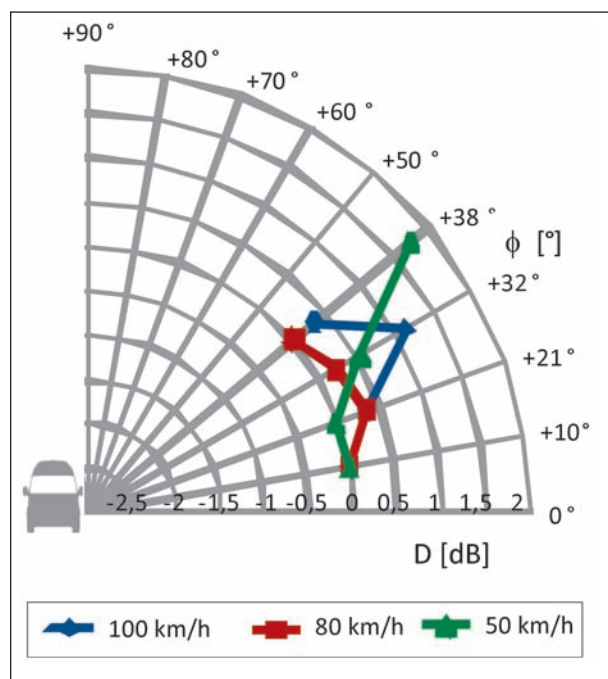


Bild 6.8: Vertikale Richtcharakteristik des Kleintransporters während kontr. Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

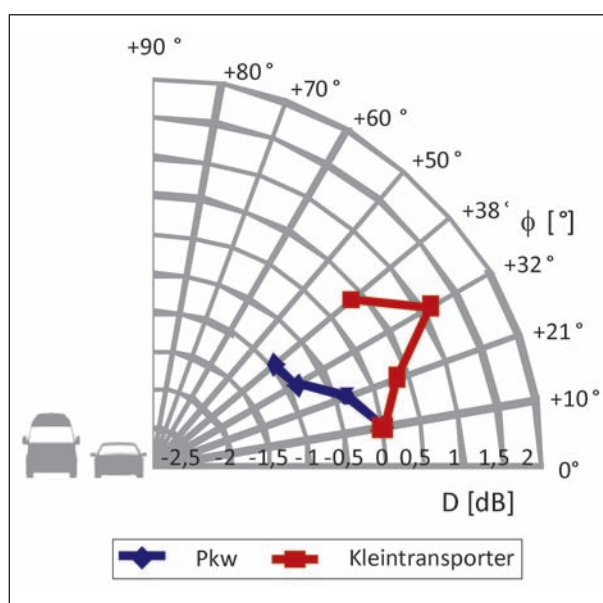


Bild 6.10: Vertikale Richtcharakteristik der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

Winkel von 40° beträgt die auf 0° bezogene Pegeldifferenz etwa -1,5 dB und liegt damit im Durchschnitt 0,5 dB unter den Ergebnissen in Bild 6.7. In NORD 2000 werden aufgrund nicht ausreichender Messdaten bisher keine Angaben zu einer mittleren vertikalen Richtcharakteristik gemacht.

Für den Kleintransporter und den Lkw variiert der Winkel maximaler vertikaler Schallabstrahlung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit zwischen +21° bis +38° bzw. +21° bis +32°. Die geringste Schallabstrahlung findet beim Kleintransporter geschwindig-

keitsunabhängig unter +10°, beim Lkw unter +21° bzw. +38° statt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der einzelnen Vorbeifahrten am Kleintransporter und am Lkw zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik gegenüber den Messungen zur horizontalen Richtwirkung unter den verschiedenen vertikalen Schalleinfallswinkeln in der Amplitude um bis zu 1,5 dB voneinander abweichen. Es wird vermutet, dass die einzelnen Fahrzeugzustände (Drehzahl, Gang) zwischen den Vorbeifahrten im fließenden Verkehr nicht konstant gehalten wurden. Für zukünftige Untersuchungen wird daher empfohlen die vertikale Schallabstrahlung unter den verschiedenen Winkeln nicht durch mehrere Vorbeifahrten zu realisieren, sondern eine Mikrofonanordnung über die gesamte Höhe zu verwenden und für die verschiedenen Winkel unterschiedliche Bereiche der Mikrofonanordnung auszuwerten. Bei Anwendung eines äquidistanten Liniennarrays hätte dies außerdem den Vorteil, die Anzahl der betrachteten vertikalen Schalleinfallswinkel ohne zusätzlichen Messaufwand deutlich zu erhöhen.

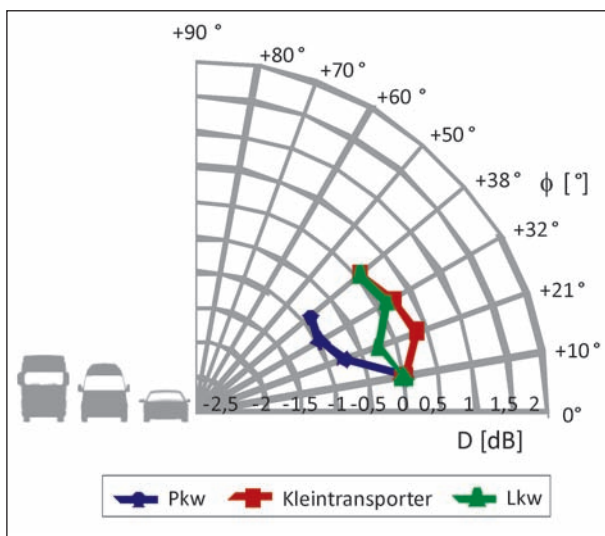


Bild 6.11: Vertikale Richtcharakteristik der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

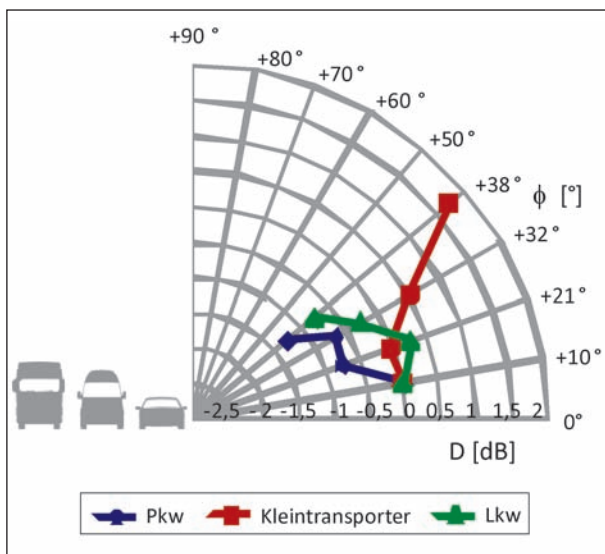


Bild 6.12: Vertikale Richtcharakteristik der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Bezugsrichtung vertikaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 10^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

c) Schalleistung

Der Gesamtpegel der Schalleistung der verschiedenen Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h sowie die einzelnen Terzpegel innerhalb des Frequenzbereichs von 315 Hz bis 3.150 Hz sind in Bild 6.13 bis Bild 6.18 zusammengefasst dargestellt. Bild 6.13 bis Bild 6.15 zeigen dabei wiederum die Ergebnisse eines spezifischen Fahrzeugs für die verschiedenen Geschwindigkeiten. Bild 6.16 bis Bild 6.18 beinhalten

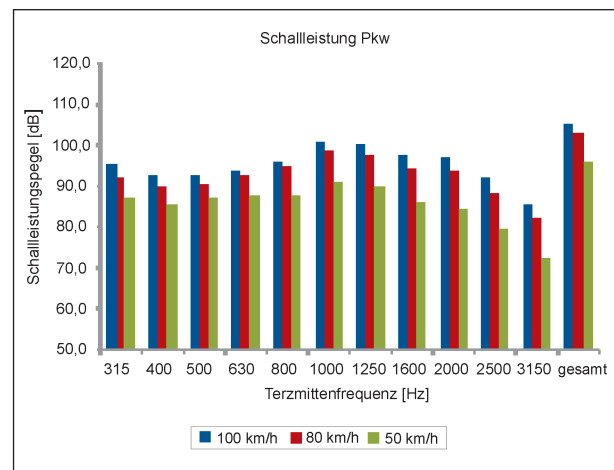


Bild 6.13: Schalleistungspegel des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

die Schalleistungspegel aller untersuchten Fahrzeuge für eine spezifische Geschwindigkeit.

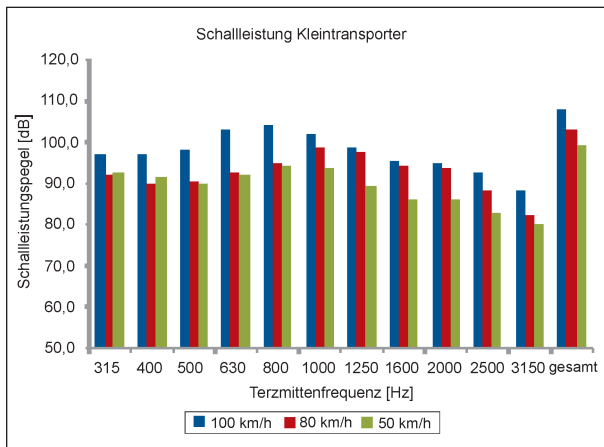


Bild 6.14: Schalleistungspegel des Kleintransporters während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

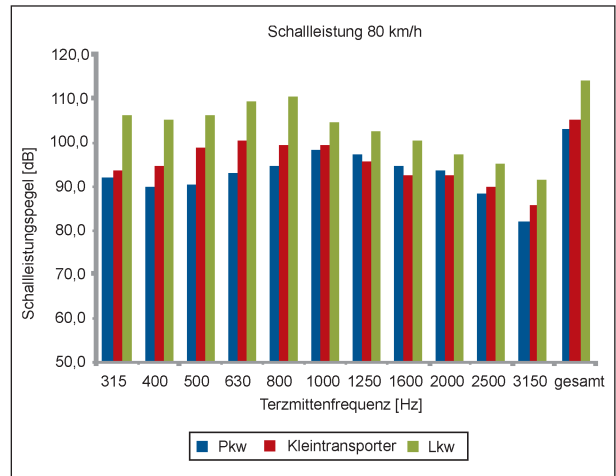


Bild 6.17: Schalleistungspegel der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h, Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

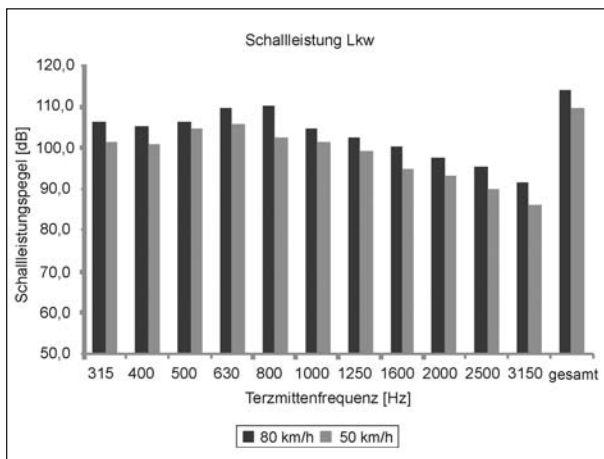


Bild 6.15: Schalleistungspegel des Lkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

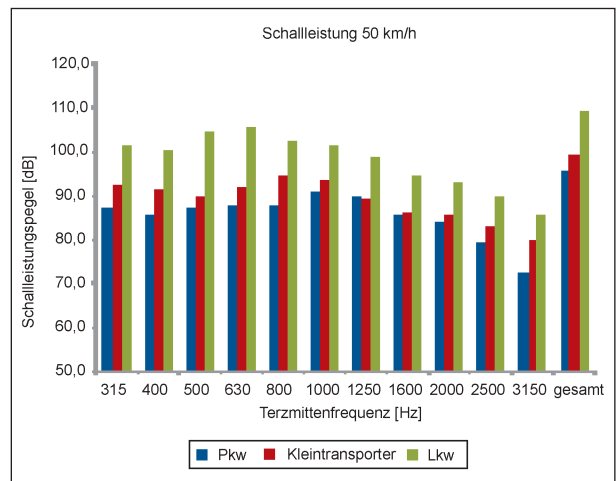


Bild 6.18: Schalleistungspegel der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h, Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

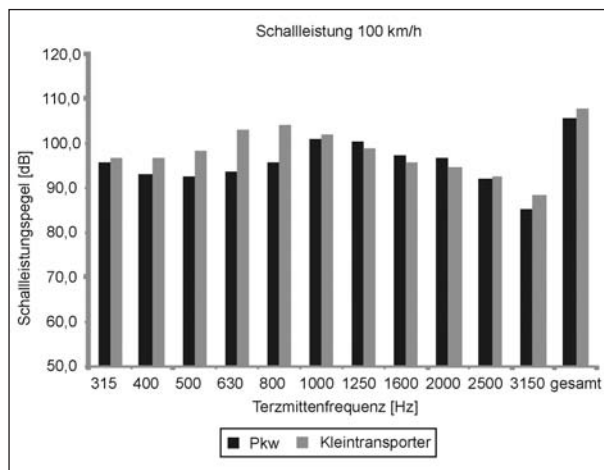


Bild 6.16: Schalleistungspegel der Fahrzeuge während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

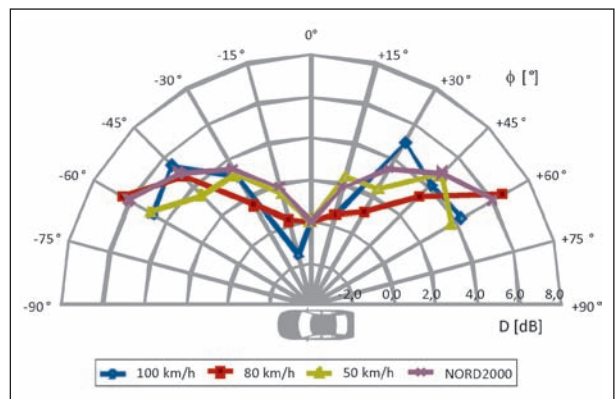


Bild 6.19: Gemessene horizontale Richtcharakteristik des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/ und 50 km/h im Vergleich zur Modellierung der horizontalen Richtwirkung eines Pkw in NORD 2000, Bezugsrichtung horizontaler Schalleinfallswinkel von $\phi = 0^\circ$, Gesamtpegel 315 Hz bis 3.150 Hz

Die Ergebnisse zeigen wiederum den für die verschiedenen Fahrzeuge typischen spektralen Verlauf. Dabei steigt die Schalleistung mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit an, da das Reifen-Fahrbahn-Geräusch als dominante Schallquelle ebenfalls mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs zunimmt. Der Gesamt-Schalleistungspegel des Kleintransporters liegt mit durchschnittlich 2,7 dB über dem des Pkw. Die Pegeldifferenz zwischen Lkw und Pkw beträgt im Mittel 12,3 dB.

Bild 6.20 und Bild 6.21 zeigen beispielhaft die innerhalb der Untersuchungen ermittelten Spektren des Schalleistungspegels des Pkw bei kontrollierter Vorbeifahrt im Vergleich zu Ergebnissen aus (JONASSON, 2001) in Form von Absolut- und Differenzspektren. Daraus ist erkennbar, dass die er-

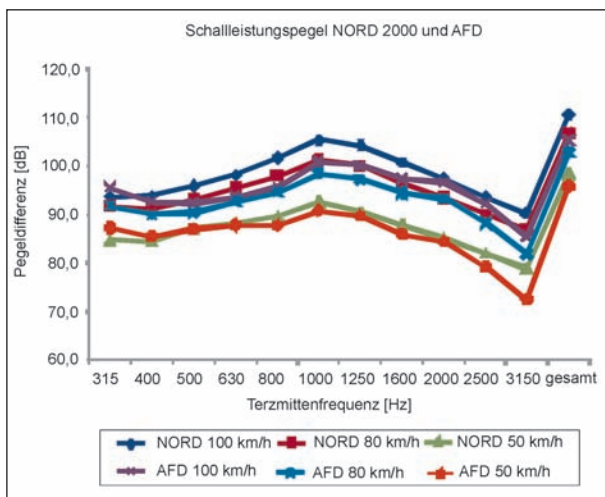


Bild 6.20: Spektraler Schalleistungspegel des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Vergleich der Messergebnisse der vorliegenden Untersuchungen mit Ergebnissen nach NORD 2000

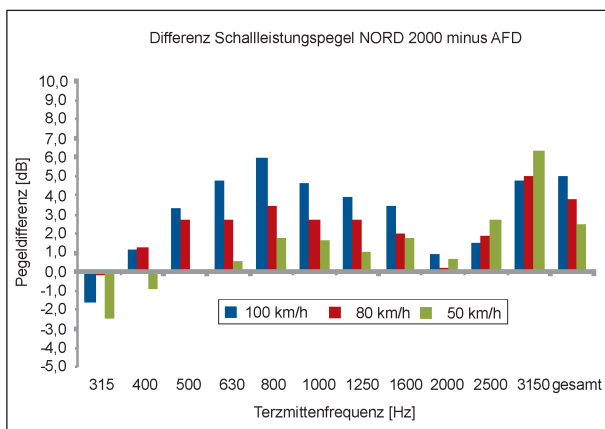


Bild 6.21: Schalleistungspegel des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 100 km/h, 80 km/h und 50 km/h, Vergleich der Messergebnisse der vorliegenden Untersuchungen mit Ergebnissen nach NORD 2000

mittelten Gesamt-Schalleistungspegel um 2,5 dB bis 5 dB unter denen nach NORD 2000 liegen. Die Pegeldifferenz nimmt dabei mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit zu. Bei Betrachtung der spektralen Pegelunterschiede lässt sich erkennen, dass die größten Pegelunterschiede im spektralen Schwerpunkt des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs auftreten. Dies zeigt, dass die in Kapitel 4.2 getroffene Annahme, dass der mittlere Schalldruckpegel durch front- und rückseitige Schallabstrahlung gleich dem mittleren Schalldruckpegel durch seitliche Schallabstrahlung ist, zu einer deutlichen Unterschätzung der gesamten Schalleistung des Fahrzeugs führt. Auch durch die zweite Festlegung, dass die vernachlässigbare mittlere dachseitige Schallabstrahlung gleich der mittleren seitlichen Schallemission ist (was der Beschreibung einer allseitig konstant abstrahlenden Schallquelle entspricht), kann der Unterschätzung der Gesamtschalleistung aufgrund der energetisch vermindert einbezogenen stärkeren front- und rückseitigen Schallabstrahlung nicht entgegengewirkt werden.

Bild 6.22 stellt das in Bild 6.21 enthaltene Differenzspektrum des Schalleistungspegels zwischen NORD 2000 und den vorliegenden Untersuchungen einem Differenzspektrum des mittleren Schalldruckpegels gegenüber, der der Berechnung der Schalleistung zugrunde liegt. Dabei wurde der mittlere Schalldruckpegel zum einen mit einem einzelnen Mikrofon im Mittelpunkt des Mikrofonarrays, zum anderen durch Quelllokalisierung mit Mikrofonarray ermittelt. Es ist erkennbar, dass die Differenz des mittleren Schalldruckpegels nahezu linear mit

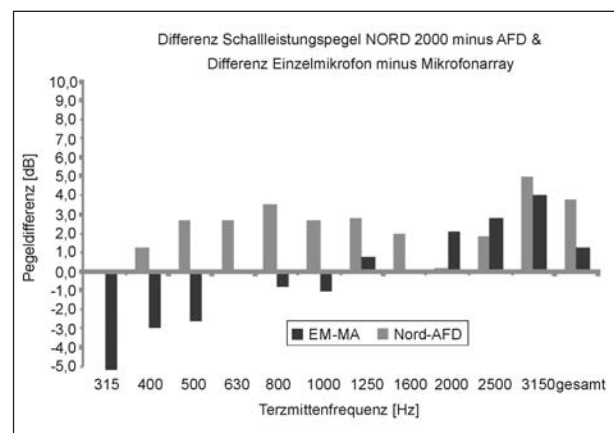


Bild 6.22: Differenz des Schalleistungspegels des Pkw während kontrollierter Vorbeifahrt mit 80 km/h zwischen NORD 2000 und vorliegenden Messergebnissen im Vergleich zur Differenz des mittleren Schalldruckpegels bestimmt durch einzelnes Mikrofon (EM) im Arraymittelpunkt und Mikrofonarray (MA), Terzbänder von 315 Hz bis 3.150 Hz

dem Logarithmus der Frequenz ansteigt. Eine vergleichbare Tendenz wurde in (SCHULZE, 2008) zwischen Ergebnissen von Messungen an Fahrzeugen mit Einzelmikrofon und mit Mikrofonarray ermittelt. Oberhalb von 2.500 Hz ist die Differenz des mittleren Schalldruckpegels etwa gleich dem Unterschied der Schalleistung zwischen NORD 2000 und den vorliegenden Untersuchungen. Eine Ursache für die Pegeldifferenzen konnte innerhalb des Projekts jedoch nicht gefunden werden. Die hochfrequenten Abweichungen allein mit dem Einfluss von Störschallquellen auf das Ergebnis des Einzelmikrofons zu begründen erscheint nicht gerechtfertigt. Die Darstellung der Differenzen wirft zumindest die Frage auf, ob das eingesetzte Mikrofonarray zur Bestimmung von absoluten Leistungsgrößen an vorbeifahrenden Fahrzeugen geeignet ist.

7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die messtechnische Bestimmung der spektralen horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung von Pkw, Kleintransporter und Lkw während der Vorbeifahrt mit Hilfe eines Mikrofonarray-Messsystems. Diese Informationen spielen eine wesentliche Rolle für die Schallausbreitung sowie die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Schallbeugung und -reflexion sollte neben der gesamten Schallabstrahlung besonders der spektrale Gehalt des emittierten Schalls bestimmt werden.

Grundlage des angewendeten Verfahrens ist die Ausnutzung der steuerbaren Richtwerkeigenschaften eines Mikrofonarrays, die durch die Anwendung nachgeschalteter Signalverarbeitung auf die einzelnen Mikrofonsignale erzielt wird. Durch Fokussierung des Mikrofonarrays auf das zu untersuchende Fahrzeug während der Vorbeifahrt können die Schallemission unter verschiedenen horizontalen und vertikalen Winkeln bestimmt sowie auftretende Störquellen ausgeblendet werden. Die ermittelten Schalldruckkartierungen ermöglichen anschließend die Berechnung der Richtcharakteristik und eine Abschätzung der Schalleistung des Fahrzeugs.

In einem ersten Schritt wurde daher die Richtcharakteristik des eingesetzten Mikrofonarrays im Hinblick auf die Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs im Frequenzbereich von 315 Hz bis 3.150 Hz

optimiert. Die Frequenzbandgrenzen resultieren dabei aus dem energetischen Schwerpunkt des Standardisierten Verkehrslärmspektrums. Für die Untersuchungen wurde ein Linienarray gewählt, da für die Ermittlung der horizontalen bzw. vertikalen Richtcharakteristik ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung notwendig ist. Die Anforderungen an die Richtcharakteristik des Mikrofonarrays entsprechen neben einer hohen örtlichen Auflösung besonders einer starken Nebenkeulenunterdrückung (SNR) des Arraypatterns, um nicht-physikalische Geisterquellen im Bereich des zu lokalisierenden Objekts zu vermeiden. Beide Anforderungen erhöhen sich bei Anwendung eines Linienarrays gegenüber einem zweidimensionalen Mikrofonarray mit gleicher Mikrofonanzahl. Das Ergebnis einer ersten numerischen Optimierung war ein 32-elementiges horizontales Linienarray der Breite 2,6 m, dessen Arraypattern für die maximal zu untersuchende Terzmittenfrequenz von 3.150 Hz einen SNR von 18,8 dB aufweist. Die Anwendung einer Hamming-Wichtungsfunktion auf eine äquidistante Mikrofonanordnung ermöglichte die Vergrößerung des theoretischen SNR auf ca. 44 dB.

Unter Einsatz des konstruierten optimierten Linienarrays fanden messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen spektralen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung statt. Bei der Versuchsstrecke handelte es sich um einen asphaltierten, zweispurigen, geradlinigen und ebenen Streckenabschnitt von ca. 350 m Länge auf einem neu gebauten Autobahnzubringer im Raum Sachsen. An beide Seiten der Fahrbahn grenzten Weidelandflächen, wodurch freie Schallfeldbedingungen vorhanden waren. Die Messungen erfolgten im fließenden Verkehr bei kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw und des Kleintransporters mit konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h. Die Untersuchungen am fünfachsigen Lkw wurden bei kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 km/h und 80 km/h durchgeführt.

Die Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik erfolgte durch Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitpunkten mit einem horizontal ausgerichteten Linienarray. Als Bezugswinkel wurde ein horizontaler Schalleinfallswinkel von 0° gewählt. Durch Lokalisierung des Fahrzeugs während der Vorbeifahrt in einem definierten Bereich des horizontalen Schalleinfallswinkels und Wiederholung der Vorbeifahrt bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit mit variierter Höhe eines

vertikal positionierten Mikrofonarrays konnte die mittlere vertikale Richtcharakteristik des Fahrzeugs ermittelt werden. Als Bezugswinkel wurde ein vertikaler Schalleinfallswinkel von 10° festgelegt. Für die näherungsweise Bestimmung der Schalleistung der Fahrzeuge wurde innerhalb der vorliegenden Untersuchungen eine Anpassung des Hüllflächen-Verfahrens an die näherungsweise Bestimmung der Schalleistung bewegter Quellen mit Mikrofonarray vorgenommen.

Die Ergebnisse der horizontalen Richtcharakteristik zeigen eine maximale horizontale Schallabstrahlung der Fahrzeuge im Bereich von -60° bis -45° und $+30^\circ$ bis $+60^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung tritt unter einem horizontalen Winkel von -15° bis 0° und somit seitlich des Fahrzeugs auf. In (SANDBERG, 2002) sind verschiedene Untersuchungen zusammengefasst, in denen vergleichbare Ergebnisse für die horizontale Richtwirkung ermittelt wurden. Auch die mittlere, durch eine Kosinusfunktion modellierte horizontale Richtcharakteristik des Pkw nach NORD 2000, die einen zum horizontalen Winkel von 0° symmetrischen Verlauf aufweist, fügt sich sehr gut in die ermittelte Richtcharakteristik des Pkw ein. Des Weiteren zeigen die Messergebnisse, dass die horizontale Richtcharakteristik im gesamten Frequenzbereich von 315 Hz bis 3.150 Hz durch die Richtcharakteristik der die Schallemission dominierenden Terzbänder bestimmt wird. Für den Pkw bzw. den Kleintransporter liegt der spektrale Schwerpunkt unabhängig von der untersuchten Geschwindigkeit im Frequenzbereich von 1.000 Hz bis 1.600 Hz bzw. 630 Hz bis 1.000 Hz. Beim Lkw kommt es durch die Änderung der Geschwindigkeit von 80 km/h auf 50 km/h zu einer Verschiebung des spektralen Schwerpunkts von 630 Hz bis 1.000 Hz auf 500 Hz bis 800 Hz. Durch Lokalisation des Pkw mit dem Mikrofonarray konnte gezeigt werden, dass im Frequenzbereich von 1.000 Hz bis 1.600 Hz das Reifen-Fahrbahn-Geräusch des Pkw die Motoren- und Getriebe-geräusche sowie die aerodynamischen Schallquellen (= Hauptursachen der Schallabstrahlung eines vorbeifahrenden Fahrzeugs nach SANDBERG, 2002) dominiert. Dabei entsteht beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt sowohl vor als auch hinter dem Reifen Schall, dessen Amplitude mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Daraus resultiert eine symmetrische Schallabstrahlung des Pkw. Begünstigt durch den Horneffekt wurde für den Pkw unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von -60° bis -30° bzw. $+30^\circ$ bis $+60^\circ$ eine maximale horizon-

tale Richtwirkung von bis zu +6 dB ermittelt. Für den Kleintransporter und den Lkw ist die auf den Winkel von 0° bezogene Symmetrie der horizontalen Richtcharakteristik weniger stark ausgeprägt. So dominiert z. B. außerhalb des Bereiches von -30° bis $+30^\circ$ die frontseitige Schallabstrahlung beider Fahrzeuge gegenüber der Schallemission unter positivem Winkel. Ursache dafür können, neben verstärkt auftretenden Motorengeräuschen, aerodynamische Geräusche sein, die besonders im Bereich des Übergangs zwischen Frontscheibe und Dach der Fahrzeuge auftreten. Auch in den gegenübergestellten Untersuchungen zur horizontalen Richtwirkung von Fahrzeugen in (SANDBERG, 2002) wurde die frontseitige Schallabstrahlung gegenüber der rückseitigen Emission als stärker bestimmt.

Die Ergebnisse der vertikalen Richtcharakteristik zeigen, dass die maximale vertikale Schallabstrahlung für die verschiedenen Fahrzeuge in unterschiedlichen Bereichen auftritt. Für den Pkw beträgt der Winkel maximaler vertikaler Schallabstrahlung im untersuchten Bereich geschwindigkeitsunabhängig $+10^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung tritt unter einem vertikalen Winkel von $+32^\circ$ bis $+38^\circ$ auf. In (SANDBERG, 2002) dargestellte Ergebnisse einer Studie zeigen, dass die stärkste vertikale Schallabstrahlung unter einem Winkel von 0° auftritt. Zu größeren Einfallswinkeln hin nimmt die Schallabstrahlung wie im Falle der vorliegenden Messergebnisse ab. Unter einem Winkel von 40° beträgt die auf 0° bezogene Pegeldifferenz etwa -1,5 dB und liegt damit im Durchschnitt 0,5 dB unter den auf einen Winkel von $+10^\circ$ bezogenen Messergebnissen. In NORD 2000 werden aufgrund nicht ausreichender Messdaten bisher keine Angaben zu einer mittleren vertikalen Richtcharakteristik gemacht.

Für den Kleintransporter und den Lkw variiert der Winkel maximaler vertikaler Schallabstrahlung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit zwischen $+21^\circ$ bis $+38^\circ$ bzw. $+21^\circ$ bis $+32^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung findet beim Kleintransporter geschwindigkeitsunabhängig unter $+10^\circ$, beim Lkw unter $+21^\circ$ bzw. $+38^\circ$ statt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der einzelnen Vorbeifahrten am Kleintransporter und am Lkw zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik gegenüber den Messungen zur horizontalen Richtwirkung unter den verschiedenen vertikalen Schalleinfallswinkeln in der Amplitude um bis zu 1,5 dB voneinander abweichen. Es wird vermutet, dass die einzelnen

Fahrzeugzustände (Drehzahl, Gang) zwischen den Vorbeifahrten im fließenden Verkehr nicht konstant gehalten wurden. Für zukünftige Untersuchungen wird daher empfohlen die vertikale Schallabstrahlung unter den verschiedenen Winkeln nicht durch mehrere Vorbeifahrten zu realisieren, sondern eine Mikrofonanordnung über die gesamte Höhe zu verwenden und für die verschiedenen Winkel unterschiedliche Bereiche der Mikrofonanordnung auszuwerten. Bei Anwendung eines äquidistanten Liniennarrays hätte dies außerdem den Vorteil, die Anzahl der betrachteten vertikalen Schalleinfallswinkel ohne zusätzlichen Messaufwand deutlich zu erhöhen.

Die Ergebnisse der Schalleistung der Fahrzeuge zeigen wiederum den für die verschiedenen Fahrzeuge typischen spektralen Verlauf. Die Schalleistung steigt dabei mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit an, da das Reifen-Fahrbahn-Geräusch als dominante Schallquelle ebenfalls mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs zunimmt. Der Gesamt-Schalleistungspegel des Kleintransporters liegt mit durchschnittlich 2,7 dB über dem des Pkw. Die Pegeldifferenz zwischen Lkw und Pkw beträgt im Mittel 12,3 dB. Vergleiche mit Schalleistungsangaben von Pkw aus (JONASSON, 2001) ergaben, dass die ermittelten Gesamt-Schalleistungspegel um 2,5 dB bis 5 dB unter denen nach NORD 2000 liegen. Die Pegeldifferenz nimmt dabei mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit zu. Bei Betrachtung der spektralen Pegelunterschiede lässt sich erkennen, dass die größten Pegelunterschiede im spektralen Schwerpunkt des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs auftreten. Dies zeigt, dass die zur näherungsweisen Bestimmung der Schalleistung mit Mikrofonarray getroffene Annahme, dass der mittlere Schalldruckpegel durch front- und rückseitige Schallabstrahlung gleich dem mittleren Schalldruckpegel durch seitliche Schallabstrahlung ist, zu einer deutlichen Unterschätzung der gesamten Schalleistung des Fahrzeugs führt. Auch durch die zweite Festlegung, dass die vernachlässigbare mittlere dachseitige Schallabstrahlung gleich der mittleren seitlichen Schallemission ist (was der Beschreibung einer allseitig konstant abstrahlenden Schallquelle entspricht), kann der Unterschätzung der Gesamtschalleistung aufgrund der energetisch vermindert einbezogenen stärkeren front- und rückseitigen Schallabstrahlung nicht entgegengewirkt werden. In einem zweiten Vergleich des mittleren Schalldruckpegels, der zum einen mit einem einzelnen Mikrofon im Mittelpunkt des Mikrofonarrays,

zum anderen durch Quelllokalisierung mit Mikrofonarray ermittelt wurde, zeigte sich eine frequenzabhängige Pegeldifferenz. Oberhalb von 2.500 Hz entsprechen die Werte dieser linear mit dem Logarithmus der Frequenz ansteigenden Differenz des mittleren Schalldruckpegels etwa dem Unterschied der Schalleistung zwischen NORD 2000 und den vorliegenden Untersuchungen. Eine Ursache für die Pegeldifferenzen konnte innerhalb der Untersuchungen jedoch nicht gefunden werden.

8 Ausblick

Eine Gegenüberstellung der vorliegenden Ergebnisse der durchgeführten messtechnischen Untersuchungen und mit denen in der Literatur hat gezeigt, dass die ermittelte horizontale Richtcharakteristik des Pkw sowohl im Verlauf als auch in der Amplitude sehr gut mit der mittleren horizontalen Richtcharakteristik nach NORD 2000 übereinstimmt. Angaben zur horizontalen Richtwirkung des Kleintransporters und des Lkw konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Die ermittelten Ergebnisse bewegen sich jedoch in einem mit der Richtwirkung des Pkw vergleichbaren Wertebereich und erscheinen plausibel.

Die Ergebnisse der vertikalen Richtcharakteristik zeigten, dass die maximale vertikale Schallabstrahlung für die verschiedenen Fahrzeuge in unterschiedlichen Bereichen auftritt. Für den Pkw konnten in der Literatur eine vergleichbare vertikale Hauptschallabstrahlrichtung unter kleinem Winkel sowie eine äquivalente absolute Schallabstrahlung zu größeren Winkeln ermittelt werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Ergebnisse der einzelnen Vorbeifahrten am Kleintransporter und am Lkw zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik gegenüber den Messungen zur horizontalen Richtwirkung unter den verschiedenen vertikalen Schalleinfallswinkeln in der Amplitude um bis zu 1,5 dB voneinander abweichen. Ursache dafür können die einzelnen Fahrzeugzustände sein (Drehzahl, Gang), die zwischen den Vorbeifahrten im fließenden Verkehr nicht konstant gehalten wurden. Für zukünftige Untersuchungen wird daher empfohlen die vertikale Schallabstrahlung unter den verschiedenen Winkeln nicht durch mehrere Vorbeifahrten zu realisieren, sondern eine Mikrofonanordnung über die gesamte Höhe zu verwenden und für die verschiedenen Winkel unterschiedliche Bereiche der Mikrofonanordnung auszuwerten. Bei Anwen-

dung eines äquidistanten Linienarrays hätte dies außerdem den Vorteil, die Anzahl der betrachteten vertikalen Schalleinfallswinkel ohne zusätzlichen Messaufwand deutlich zu erhöhen.

Die Ergebnisse der Schalleistung der Fahrzeuge ergaben den für die verschiedenen Fahrzeuge typischen spektralen Verlauf, wobei die Schalleistung mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit ansteigt. Eine Gegenüberstellung der vorliegenden Messergebnisse und der mittleren Schalleistungsangaben von Pkw in NORD 2000 zeigte besonders im spektralen Schwerpunkt des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs deutliche Pegelunterschiede. Grund dafür ist die getroffene Annahme, dass der mittlere Schalldruckpegel durch front- und rückseitige Schallabstrahlung gleich dem mittleren Schalldruckpegel durch seitliche Schallabstrahlung ist. Für zukünftige messtechnische Untersuchungen wird daher empfohlen, die front- und rückseitige Schallabstrahlung mit Hilfe eines horizontalen Linienarrays zu erfassen, unter dem das Fahrzeug hindurch fährt. Dies ermöglicht ebenfalls die Bestimmung des mittleren dachseitigen Schalldruckpegels und damit bei gleichzeitiger Messung der vertikalen Schallabstrahlung mit bereits beschriebener vergrößerter Mikrofonanordnung die Bestimmung der allseitigen Schallabstrahlung des Fahrzeugs durch eine einzelne Vorbeifahrt.

Für die Bestimmung der Ursachen der linear mit dem Logarithmus der Frequenz ansteigenden Differenz des mit Einzelmikrofon und Mikrofonarray bestimmten Schallimmissionspegels scheinen weitere Untersuchungen sinnvoll. Eine Möglichkeit besteht dabei in der Anwendung spezieller Verfahren zur Ermittlung des absoluten Schallimmissionspegels, z. B. Inverses Beamforming. Dabei wird durch iterative Lösung aus der von der Richtcharakteristik des Mikrofonarrays abhängigen Schalldruckverteilung eine Quellverteilung mit absoluten Quellstärken ermittelt. Diese ermöglicht anschließend die Berechnung des absoluten Immissionschalldruckpegels.

Literatur

- ARNOLD, D., NISHIDA, T., CATTAFESTA, L., SHEPLAK, M.: MEMS-based acoustic array technology. Proceedings of 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, Januar 2002
- CHRISTENSEN, J., HALD, J.: Beamforming. Technical Review, Brüel & Kjaer, No.1, 2004
- DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen, Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum. November 1997
- DIN EN ISO 3744: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächen-Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:1994). November 1995
- DIN EN ISO 3745: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume (ISO 3745:2003). Mai 2004
- DIN EN ISO 3746: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächen-Verfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:1995). Dezember 1995
- HALD, J., CHRISTENSEN, J.: A class of broadband phased array geometries designed for easy construction. Proceedings of InterNoise 2002, Dearborn, MI, USA, August 2002
- HALD, J.: An Integrated NAH/Beamforming Solution for Efficient Broad-Band Noise Source Location. Proceedings of SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition, May 2005, Grand Traverse, MI, USA
- HEUTSCHI, K.: SonRoad: Neues Schweizer Straßenlärmmodell. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 52 (2005), Nr. 6, November 2005
- HOPPERSTAD, J., HOLM, S.: Optimization of sparse arrays by an improved simulated annealing algorithm. Proceedings of International Workshop on Sampling Theory and Applications, Loen, Norwegen, August 1999, S. 91-95

- JOHNSON, D., DUDGEON, D.: Array signal processing: concepts and techniques. Prentice Hall, New Jersey, 1993
- JONASSON, H., STOREHEIER, S.: Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Road Traffic Noise. SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2001, Borås 2001
- MUELLER, T.: Aeroacoustic measurements. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- PALLAS, M. A.: Acoustic behaviour of the noise sources of a truck. Proceedings of Inter-Noise 2004, Prague, Czech Republic, August 2004
- SANDBERG, U., EJSMONT, J.: Tyre/Road Noise Reference Book. Informex, Sweden, 2002
- SCHMANTECK, M.: Bestimmung der Schallleistung anhand von Mikrofonarraymessungen. Diplomarbeit, HTWM, 2007
- SCHULZE, C., ZEIBIG, A., RICHTER, D.: Basic investigations of microphone arrays. Proceedings of Joint Congress CFA/DAGA 2004, Strasbourg, Frankreich, März 2004
- SCHULZE, C., SARRADJ, E., ZEIBIG, A.: Characteristics of microphone arrays. Proceedings of Inter-Noise 2004, Prague, Czech Republic, August 2004
- SCHULZE, C., SARRADJ, E., ZEIBIG, A.: Unterschiedliche Mikrofonanordnungen bei praktischen Arraymessungen. Proceedings of DAGA 2005, München, März 2005
- SCHULZE, C., HÜBELT, J.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 02.272/2006/LRB: Bestimmung der Einfügungsdämpfung an verkürzten Lärmschutzwänden. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2008
- STEINBERG, B.: Principles of aperture and array system design. John Wiley & Sons, New York, 1976
- ZHENG, S., LIAN, X., LUO, Y., XU, F., YANG, D., LI, K.: Generation method of two-dimensional random array for locating noise sources on moving vehicles. Proceedings of Inter-Noise 2006, Honolulu, Hawaii, USA, Dezember 2006

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2004

- V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00
- V 111: Autobahnverzeichnis 2004 (erschienen 2005)
Kühnen € 21,50
- V 112: Einsatzkriterien für Betonschutzwände (vergriffen)
Steinauer, Kathmann, Mayer, Becher € 21,50
- V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden
Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Acken € 15,00
- V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing
Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00
- V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50
- V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/Ingenieurarbeitsplatz
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00
- V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarer Säugetiere
Surkus, Tegethof € 13,50
- V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

2005

- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum – Band 1 bis Band 5
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović, Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50
- V 125: PM₁₀-Emissionen an Außerortsstraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen
Düring, Bösinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 24,50

V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation
Boltze, Reusswig € 17,00

V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst
Badelt, Breitenstein € 13,50

V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02
Steven € 12,00

V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50

V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme
Boltze, Breser € 15,50

2006

V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge
Hübelt, Schmid € 17,50

V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50

V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00

V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00

V 137: PM_x-Belastungen an BAB
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00

V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O₃)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50

V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00

V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 15,50

V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003
Lensing € 15,00

V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen
Fischer, Brannolte € 17,50

V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50

V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50

V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50

V 146: Prüfung von Sensoren für Glättmeldeanlagen
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50

V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00

V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50

V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50

V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

2007

V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO
Böhl, Mausa, Kloppe, Brückner € 16,50

V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer
Gerlach, Oderwald € 15,50

V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen
Lemke € 13,50

V 154: Autobahnverzeichnis 2006
Kühnen € 22,00

V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht
Bartolomaeus € 12,50

V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen
Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler € 13,00

V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317
Klöckner, Fleisch, Balzer-Hebborn, Ellmers, Friedrich, Kübler, Lukas € 14,50

V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen
Wirtz € 13,50

V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50

V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 25,50

V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe
Listl, Otto, Zackor € 14,50

V 162: Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation – dWiSta
Grahl, Sander € 14,50

V 163: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrshängigen Steuerungen
Brilon, Wietholt, Wu € 17,50

V 164: Straßenverkehrszählung 2005 – Ergebnisse
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,00

2008

V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-Emissionen von Straßen
Quass, John, Beyer, Lindermann, Kühlbusch, Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler € 14,50

V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 26,00

V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung
Kocher, Brose, Siebertz € 14,50

V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit
Frost, Schulze € 15,50

V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen
Wermuth, Wulff € 15,50

V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen
Roos, Zimmermann, Riffel, Cypra € 16,50

V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)
Weinert, Vengels € 17,50

V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50

V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offenporiger Straßenbeläge
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00

V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, Becker, Richter, Schmidt € 29,00

V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50

2009

V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw
Schulze, Hübelt € 13,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.