

Nr.42

Untersuchung zur Schall-
ausbreitung im Freien

- Ziele, Physik der Schall-
ausbreitung, Vorgehens-
weise, Ergebnisse -

Herausgeber:

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
D-4300 Essen 1

1983

ISSN 0720-8499

Untersuchung zur Schallausbreitung im Freien
- Ziele, Physik der Schallausbreitung,
Vorgehensweise, Ergebnisse -

M. Klein

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Stellen der Bundeswehr Dank sagen, die die Durchführung dieser Untersuchung auf dem Gelände der Erpst.91 ermöglicht haben.

Insbesondere danke ich den Herren der Erprobungsstelle für ihre großzügige, kameradschaftliche Unterstützung bei den Feldmessungen sowie für die Überlassung sämtlicher meteorologischer Meßdaten.

Bestand-Nr. 23222

Standort-Nr. 0-07 KVEIN

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Summary

Einleitung

1. Untersuchungsziel
2. Einfluß der Übertragungsmedien auf die freie Schallausbreitung
3. Methodik
 - 3.1. Meßorte
 - 3.2. Meßhöhe
 - 3.3. Schallhindernisse
 - 3.4. Abfragesystem
 - 3.4.1. Kennzeichnungszeit
 - 3.4.2. Meßdauer
 - 3.4.3. Meßwerte
 - 3.4.3.1. Pegelmeßwerte
 - 3.4.3.2. Meteorologische Meßwerte
 - 3.5. Meßeinrichtung
 - 3.5.1. Schallquelle
 - 3.5.2. Meßeinrichtung zur Erfassung und Verarbeitung der Schallpegeldata
 - 3.5.3. Meteorologische Meßeinrichtung
 - 3.6. Meßgelände
4. Untersuchungsergebnisse
 - 4.1. Bezugspegel
 - 4.2. Akustische "Symmetrie" des Geländes
 - 4.3. Verteilung der Momentanpegel
 - 4.4. Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel aus sämtlichen Einzelmessungen
 - 4.5. Einfluß von Meteorologie und Boden auf die Schallausbreitung
 - 4.6. Korrelation des energieäquivalenten Dauerschallpegels mit den Prozentpegeln

5. Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den anderen
Prognosemodellen
 - 5.1 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den
Voraussagen des CONCAWE-Modells
 - 5.2 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den
Voraussagen der VDI-Richtlinie 2714
6. Schlußbetrachtung
Schrifttum
Tabellen- und Bildanhang

V e r w e n d e t e F o r m e l z e i c h e n

S	:	Punktschallquelle
I	:	Spiegelschallquelle
h_s	:	Höhe der Schallquelle über dem Erdboden
h_r	:	Höhe des Schallempfängers über dem Erdboden
p	:	Schalldruck
p_0	:	Schalldruck in der Bezugsentfernung 1 m
k	:	$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ =Wellenzahl
R_p	:	Komplexer Reflexionskoeffizient bei der Reflexion eines Schallstrahls am Erdboden
ψ	:	Reflexionswinkel des Schallstrahls am Erdboden
$Z_1 = \rho \cdot c$:	Akustische Impedanz der Luft
Z_2	:	Akustische Impedanz des Erdbodens am Ort der Reflexion
ρ	:	Dichte der Luft
c	:	Geschwindigkeit des Schalls in Luft
θ	:	Abstrahlwinkel (Elevationswinkel) des Schallstrahls von der Schallquelle
I_n	:	Schallintensität
β	:	Windgeschwindigkeitsgradient
γ	:	1) Temperaturgradient 2) Dämpfungsfunktion
α	:	$\alpha = \frac{c_0}{2T_0} \cdot \gamma$ Der durch den Temperaturgradienten verursachte Schallgeschwindigkeitsgradient
ϕ	:	Winkel zwischen Windrichtung und der durch die Verbindungsline Schallquelle/Mikrofon gegebenen Richtung
R	:	1) Spannweite (Range) zwischen höchstem und niedrigstem Einzelwert eines Meßwertkollektivs 2) Entfernung von der Quelle bis zur Schattengrenze

UNTERSUCHUNG ZUR SCHALLAUSBREITUNG IM FREIEN

- ZIELE, PHYSIK DER SCHALLAUSBREITUNG,
VORGEHENSWEISE, ERGEBNISSE -

M. Klein

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die bei freier Schallausbreitung über offenem Heidegelände von einer Punktschallquelle erzeugten Schallpegel wurden in ca. 1200 zwanzigminütigen Einzelmessungen über Entfernungen von 25 m bis 1600 m und im Frequenzbereich 180 Hz bis 2800 Hz in Abhängigkeit von den Transmissionsbedingungen untersucht.

Da die durch Meteorologie und Bodenzustände bedingten zufälligen Schwankungen der Transmission ihrerseits zufällige Pegelschwankungen verursachen, werden die Schallpegel als Zufallsgrößen behandelt und durch Summenhäufigkeitsverteilungen und Kenngrößen derselben dargestellt. Art und Umfang der auf die Transmission einwirkenden Größen werden mit dem Ziel, prognosefähige Aussagen zu gewinnen, analysiert und quantifiziert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden mit Meßergebnissen anderer Autoren und den Prognosemodellen des CONCAWE und der VDI-Richtlinie 2714 verglichen. Es werden Vorschläge zur Verbesserung dieser Prognosemodelle vorgestellt.

S u m m a r y

Sound propagation over open ground (heath) generated by a point source was measured in nearly 1200 individual trials each lasting 20 minutes. The sound levels were determined for various propagation conditions over distances of up to 1600 m and in the frequency range of 180 cs to 2.8 kcs. Since the random fluctuations of transmission caused by meteorological and ground conditions are in turn manifested in random sound level fluctuations, the sound levels are treated as random variables and presented by their cumulative frequency distributions and the parameters of these distributions respectively. Type and extent of the parameters affecting the sound transmission are analyzed and quantified with the aim of obtaining generally valid results which can be used to derive mathematical prediction models. The results of this study are compared with the CONCAWE prediction model as well as with the model described in the VDI-Guideline 2714. Recommendations for the improvement of the prediction models are put forth.

E i n l e i t u n g

Das von einer Schallquelle abgestrahlte Geräusch erfährt auf seinem Ausbreitungsweg vielfältige Veränderungen seiner kennzeichnenden Eigenschaften. Dies führt dazu, daß sein Pegel mit wachsender Entfernung zur Quelle abnimmt und dessen zeitliche Schwankungen selbst bei konstantem Quellgeräusch zunehmen. Die Größe der Pegelabnahme hängt von der Frequenz bzw. Frequenzzusammensetzung des Geräusches ab. Die Ursache dieser Veränderungen liegt in der Rückwirkung der für den Transport von Schallenergie notwendigen Übertragungsmedien Luft und Boden auf den Energiefluß. So führen örtliche und zeitliche Dichteschwankungen der Luft im Transmissionsraum, die durch Windgeschwindigkeits-, Windrichtungs- und Temperaturänderungen bedingt sind, zu zeitlichen und örtlichen Schwankungen des Schallpegels. Vorgänge der Molekularabsorption haben frequenz- und laufwegabhängige Dämpfungen des Schallpegels zur Folge. Die Reflexion einer Schallwelle am Erdboden bewirkt eine Richtungs-, Amplituden- und Phasenänderung der Schallwelle, die am Empfängerort den Pegel beeinflussen.

Mißt man den Schallpegel in größeren Entfernungen zur Quelle, so stellt man selbst bei konstantem Quellgeräusch schon in 400 m Schwankungen der Momentanwerte von mehr als 10 dB und in 800 m von mehr als 30 dB fest. Sogar die Schwankungsbreite von 20-Minuten-Mittelungspegeln beträgt noch mehr als 10 dB in 400 m Entfernung und mehr als 20 dB in 800 m.

Derartig große Schwankungsbreiten machen eine im Bereich des Umweltschutzes häufig zu treffende Entscheidung auf Einhaltung oder Überschreitung eines vorgegebenen Richtwertes für den Schallpegel immer dann zu einer Zufallsentscheidung, wenn sie auf Grund weniger Momentanwertmessungen oder einer Kurzzeitmessung über einige Minuten Meßdauer gefällt wird und der Richtwert innerhalb des Bereiches der Pegelschwankungen liegt. Daher sind gesicherte Kenntnisse über die absolute Lage und Breite des Schwankungsbereiches nicht nur bei der Prüfung auf Einhaltung eines Festwertes, sondern auch zur Beurteilung der Geräuscheinwirkung auf den Menschen von Interesse.

1. U n t e r s u c h u n g s z i e l

Es ist das Ziel dieser Untersuchung, die bei der freien Schallausbreitung eines konstanten Geräusches einer Punktschallquelle auftretenden Schallpegel entfernungs- und frequenzabhängig durch ihre gemessenen Summenhäufigkeitsverteilungen, deren Kenngrößen sowie durch Mittelungspegel zu beschreiben.

Die Ergebnisse sollen daraufhin untersucht werden, ob eine Zuordnung zu ausgewählten meteorologischen Zuständen möglich ist. Hieraus ergeben sich folgende Anforderungen:

1. Um prüfen zu können, ob bestimmte Schallpegel meteorologischen Zuständen zugeordnet werden können, müssen meteorologische Messungen gleichzeitig mit den Schallpegelmessungen erfolgen.
2. Es ist anzustreben, daß der Einfluß der meteorologischen Zustände und der Bodenzustände auf die Schallpegelverteilungen nach Maßgabe der natürlichen Auftretenshäufigkeit dieser Zustände erfaßt und durch das Probenahmesystem nicht verzerrt dargestellt wird.
3. Es sollen Angaben zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Meßorte unter sonst gleichbleibenden Randbedingungen erarbeitet werden.

Diese Untersuchung soll durch ihre realen Meßergebnisse das vorhandene Wissen über die entfernungsabhängige Schallpegelabnahme erweitern und die Diskussion über die Anwendbarkeit von Schallpegelprognosemodellen anregen. Sie ist als Ergänzung zu bestehenden Rechenmodellen und Verfahren gedacht, die häufig in der Praxis die tatsächlichen Gegebenheiten zu ungenau quantifizieren.

2. Einfluß der Übertragungs- medien auf die freie Schall- ausbreitung

Im folgenden Kapitel werden die physikalischen Vorgänge bei der Ausbreitung von Schallwellen in Luft und Boden dargestellt. Der Einfluß einzelner Ausbreitungsrandbedingungen, wie die Bodenimpedanz, der Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradient sowie der Windrichtung auf die Pegelabnahme und das Spektrum des Schalls werden an Beispielen erläutert. Die bei der Anwendung von Schallausbreitungs-Rechenmodellen in der Realität der Messung auftretenden Probleme werden aufgezeigt und aus ihnen die in dieser Untersuchung verwendete Methode abgeleitet.

Die Schallausbreitung oberhalb der Erdoberfläche ist stark durch meteorologische Bedingungen sowie den Erdboden selbst beeinflusst. Um diese Einflüsse mathematisch beschreiben und damit Schallpegelverteilungen vorausberechnen zu können, wurden bis jetzt zahlreiche Schallausbreitungsmodelle erarbeitet - häufig in Anlehnung an die von SOMMERFELD [1] im Jahre 1909 dargestellte Theorie der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. In der Akustik gehen die wesentlichen Arbeiten hierzu auf RUDNICK [2] (1947), WENZEL [3] (1974), DONATO [4] (1976) bis hin zu EMBLETON, PIERCY und OLSON [5] (1976) zurück.

Betrachtet man die Abbildung 1, in der eine Punktschallquelle S mit ihrer Spiegelschallquelle I in der Höhe h_s über bzw. unter der reflektierenden, ebenen Erdoberfläche sowie der direkte und reflektierte Strahlengang bis zum Empfänger R in der Höhe h_r und der Entfernung d dargestellt sind, so läßt sich nach LAWHEAD und RUDNICK [6] sowie INGARD [7] die Amplitude p des Schalldrucks am Empfängerort wie folgt ausdrücken:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{r_1} \exp(-jkr_1) + \frac{R_p}{r_2} \exp(-jkr_2) + (1-R_p) \frac{F}{r_2} \exp(-jkr_2) \quad (1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{Wellenzahl}), \quad F \hat{=} \text{Amplitudenfunktion}$$

r_1, r_2 : s. Abb. 1

Hierbei ist p_0 die Amplitude des Schalldrucks in der Bezugsentfernung bei Abwesenheit der Erdoberfläche und R_p der komplexe Reflexionskoeffizient einer ebenen Schallwelle beim Auftreffen auf eine örtlich rückwirkende Stelle der Erdoberfläche, der sich nach (2) ergibt.

$$R_p = \frac{\sin \psi - z_1/z_2}{\sin \psi + z_1/z_2} \quad (2)$$

mit $z_1 = \rho \cdot c$: Luftimpedanz; z_2 : Impedanz des Erdbodens

ψ : Reflexionswinkel des Schallstrahls am Erdboden

Die Gleichung 1 stellt die WEYL-van der POL'sche Lösung der Wellengleichung für Kugelwellen dar und beschreibt mathematisch die verschiedenen möglichen Schallwellen auf ihrem Ausbreitungsweg. Hierbei kennzeichnet der erste Summand die Abnahme des Schalldrucks mit der Entfernung für den direkten Strahl. Die Abnahme bzw. Dämpfung ist umgekehrt proportional zur Entfernung r zwischen Schallquelle und Schallempfänger. Da sie dem Betrage nach nur von der Entfernung abhängig ist, wird sie als geometrische oder sphärische Ausbreitungsdämpfung bezeichnet. Ihre Wirkung - auch als Verdünnungseffekt bezeichnet - besteht in einer Abnahme des Schalldrucks um die Hälfte und somit des Pegels um 6 dB je Entfernungsverdoppelung.

Der zweite Summand gibt die Ausbreitungsbedingungen für den am Erdboden reflektierten Strahl an, der sich nach einer Phasenverschiebung infolge des Weglängenunterschiedes gegenüber dem direkten Strahl auf dem Ausbreitungsweg einerseits sowie infolge der Phasenverschiebung und des Amplitudensprungs bei der Reflexion andererseits am Empfängerort R mit dem direkten Strahl kohärent überlagert.

Der dritte Summand beschreibt die Ausbreitung einer Boden- und einer Oberflächenwelle. In Abbildung 2 ist die Pegelabnahme mit der Entfernung von der Schallquelle bei Berücksichtigung des direkten und reflektierten Strahls nach Gleichung 1 für Abstrahlwinkel zwischen 0° und 90° dargestellt. Für aufwärtsgerichtete Strahlen ($\vartheta = 90^\circ$) erkennt man die sphärische Ausbreitung; d.h., jede Ent-

fernungsverdoppelung bedingt eine konstante Pegelabnahme um 6 dB. Mit kleiner werdendem Abstrahlwinkel bewirkt der zunehmende Einfluß der Bodenimpedanz eine weitere Pegelabnahme gegenüber der sphärischen Pegelabnahme (gestrichelte Kurve). Es kommt zur Bildung von Schattenzonen infolge Bodenabsorption. Diese durch Bodenabsorption entstandenen Schattenzonen müssen von den bei Schallausbreitung gegen die Windrichtung auftretenden Schattenzonen unterschieden werden.

Die Bodenabsorptionen sind stark von der Sender-Empfängergeometrie, dem Einfallswinkel, der Frequenz sowie der Bodenimpedanz abhängig und können Werte bis zu mehr als 40 dB erreichen. Sie berechnen sich nach [5] zu:

$$\Delta L_{\text{Boden}} = 20 \log_{10} \left(2 \sin \psi \frac{Z_2}{Z_1} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

In Abbildung 3 ist ihr Einfluß für Entfernungen im Bereich 31,2 m bis 4 km und für Frequenzen von 50 Hz bis 4000 Hz dargestellt. Es ist ein deutliches Dämpfungsmaximum im Frequenzbereich 200 Hz bis 500 Hz erkennbar, das mit zunehmender Entfernung wächst. Für kurze Entfernungen treten zu höheren Frequenzen hin mehrere Maxima auf, die auf Interferenzen zwischen direktem und reflektiertem Strahl zurückzuführen sind, wenn deren Phasenunterschiede Vielfache von $\lambda/2$ betragen. Außerdem tritt bei niedrigen Frequenzen eine Pegelerhöhung gegenüber den bei sphärischer Ausbreitung zu erwartenden Pegeln auf, die durch die in diesem Frequenzbereich noch vorhandene Gleichphasigkeit von direktem und reflektiertem Strahl am Empfängerort verursacht wird.

Berücksichtigt man alle vier Wellentypen, ohne daß hier näher auf die komplizierte Theorie der Bodenwelle und der Oberflächenwelle eingegangen wird, so verdeutlicht die Abbildung 4 für eine vorgegebene Sender-Empfängergeometrie deren Einfluß auf die Schallausbreitung. Man erkennt in der Abbildung den leicht pegelerhöhenden Einfluß der Bodenwelle für den Frequenzbereich bis 500 Hz. Auffällig ist die Auswirkung der Oberflächenwelle bei größeren Entfernun-

gen (ab 500 m, siehe untere Kurven). Hierbei werden die Pegel im Frequenzbereich oberhalb 500 Hz durch die im Bild nicht berücksichtigte Molekularabsorption so stark gedämpft, daß infolge der ebenfalls im mittleren Frequenzbereich (200 Hz bis 500 Hz) wirksamen Dämpfung durch Bodenabsorption der A-bewertete Pegel durch den Einfluß der Oberflächenwelle im Frequenzbereich 50 Hz bis 200 Hz bestimmt wird und in diesem Frequenzbereich sogar negative Zusatzdämpfungen auftreten können.

Betrachtet man zusätzlich zu den o.g. Abhängigkeiten der Schallausbreitung die meteorologischen Einflüsse auf den Strahlenverlauf, so ist festzustellen, daß entgegen dem in Abbildung 1 angenommenen geradlinigen Verlauf die Schallstrahlen in Anwesenheit von Temperatur und Windschichtung auf gekrümmten Bahnen verlaufen (Abbildung 5).

Da die Schallgeschwindigkeit einerseits temperaturabhängig ist und sich andererseits die in Ausbreitungsrichtung liegende Vektorkomponente der Windgeschwindigkeit der Schallausbreitungsgeschwindigkeit überlagert, die Schallstrahlen aber nach dem FERMAT'schen Prinzip auf dem zeitlich kürzesten Ausbreitungsweg verlaufen, nehmen sie bei Vorhandensein von Temperaturschichtung in der Luft sowie bei Wind gekrümmte Bahnen ein. Diese Bahnen sind Kreisbögen bei linear mit der Höhe zunehmender Temperatur (Temperaturinversion), die zur Erde hin gekrümmt sind und nicht von der horizontalen Abstrahlungsrichtung abhängen. Bei negativen vertikalen Temperaturgradienten sind die Strahlen aufwärts gekrümmt, es kommt zur Bildung von Schattenzonen.

Ebenso sind die Bahnen bei Ausbreitung mit dem Wind zur Erdoberfläche hin gekrümmt und bei Ausbreitung gegen den Wind von der Erdoberfläche weg gekrümmt, so daß sich eine Schattenzone bildet.

Die Einflüsse von Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradient auf den Verlauf der Schallstrahlen überlagern sich vektoriell. In den Abbildungen 6 und 7 sind ausgewählte Beispiele zur Veranschaulichung meteorologischer Einflüsse auf die Schallausbreitung dargestellt. In Abbildung 6 ist im Entfernungsbereich 6 km bis 8 km eine Pegelerhöhung von ca. 10 dB über die geometrische Ausbreitungsdämpfung hinaus erkennbar, die auf der Basis einer gemessenen Inversi-

onswetterlage berechnet und mit Hilfe eines strahlenakustischen Berechnungsverfahrens unter Berücksichtigung der Reflexionen am Erdboden für ein Fluglärmereignis ermittelt wurde. Der in der Abbildung erkennbare Pegelanstieg stimmt gut mit Beobachtungen großer akustischer Reichweite überein.

Ebenfalls am Beispiel Fluglärm sind in der Abbildung 7 für Entfernungen von 110 m und 615 m Meßergebnisse für verschiedene meteorologische Situationen dargestellt. Man erkennt, daß Mitwind und Calmenpegel sich im Frequenzbereich 50 Hz bis ca 315 Hz sowohl für 110 m als auch für 615 m kaum voneinander unterscheiden. Erst zu größeren Frequenzen hin und mit wachsender Entfernung treten größere Pegeldifferenzen zwischen ihnen auf. Gegenwind- und Mitwindpegel unterscheiden sich bei einer Entfernung von 110 m im unteren Frequenzbereich ebenfalls nur sehr wenig voneinander. Zu höheren Frequenzen hin und mit wachsender Entfernung von der Schallquelle findet man deutlich niedrigere Gegenwindpegel, deren Dämpfungsmaximum jedoch weniger stark ausgeprägt ist als dies beim Calmenpegel zutrifft.

Neben der Vielfalt meteorologischer Abhängigkeiten ergeben sich für den Fall, daß Schallstrahlen infolge Temperaturinversion bzw. bei positiven Windgeschwindigkeitsgradienten in Mitwindrichtung zur Erdoberfläche hin gebrochen werden, im Vergleich zu der vereinfachten Darstellung der Abbildung 1, welche nur auf kurze Distanz annähernd gilt, eine Reihe weiterer möglicher Schallstrahlen wie in Abbildung 8 dargestellt. Je mehr Schallstrahlen zur Erdoberfläche hin gebrochen werden und je geringer Empfänger- und Senderhöhe sind, desto höher ist die Anzahl der Strahlen, die den Empfänger erreichen.

Je nach Anzahl der Reflexionen am Erdboden, die ein Schallstrahl auf seinem Weg von der Quelle zum Empfänger erfährt, weisen die einzelnen Strahlen unterschiedliche Intensitäten auf, da diese von der Anzahl der Reflexionen sowie dem Einfallswinkel abhängen.

Amplitude und Phase bei der Reflexion sowie Weglängenunterschiede sind ausschlaggebend für die Intensität am Ort des Empfängers. Ordnet man die Strahlen nach Gruppen annähernd gleicher Zenithöhe und

summiert in der Umgebung des Empfängers ihre Intensität auf, so erhält man Gleichung 4.

$$\sum_n I_n = I_1 \left(1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} \dots\right) = \frac{\pi^2}{6} I_1 \approx 1,64 I_1 \quad (4)$$

I_1 : Intensität des direkten Strahls

Die in Gleichung 4 angegebenen Indizes bezeichnen die Strahlen-
gruppe nach Abbildung 8.

Voraussetzung für die Gültigkeit der Gleichung 4 ist ideale Reflexion am Erdboden: $R_p = 1$; sie ist also im Sinne einer Maximalabschätzung zu interpretieren. Bezüglich des Pegels am Empfängerort ergeben sich nach (4) demnach bis zu maximal 2,2 dB höhere Pegel bei Berücksichtigung der höheren Strahlengruppen als lediglich bei Einbezug der ersten Gruppe.

Alle hier genannten Einflußgrößen können in einem Schallausbreitungs-Rechenprogramm berücksichtigt werden, wenn durch Messungen oder im Falle der Prognose durch Festlegung folgende Randbedingungen bestimmbar sind:

1. Pegel und Frequenzzusammensetzung des Sendesignals
2. Sender und Empfängerhöhe
3. Quellenart
4. Entfernung zwischen Sender und Empfänger
5. Daten für relative Luftfeuchte im gesamten Ausbreitungsraum
6. Vertikales Temperaturprofil bis zur Zenithöhe des Strahls
7. Vertikales Windgeschwindigkeitsprofil im gesamten Ausbreitungsraum bis zur Zenithöhe des Strahls
8. Vertikales Windrichtungsprofil bis zur Zenithöhe des Strahls
9. Kenntnis der komplexen Bodenimpedanz im gesamten abgestrahlten Frequenzbereich
10. Kenntnis von Schallhindernissen, Topographie usw.

Obige Randbedingungen müssen für jeden Anwendungsfall eines Programms durch Messungen bzw. Festlegung bestimmt werden. Aller-

dings ist der Umfang des für eine Berechnung erforderlichen Satzes an Eingangsrandbedingungen für verschiedene Programme unterschiedlich.

Besondere Schwierigkeiten liegen bei der meßtechnischen Bestimmung der Randbedingungen vor, wenn Angaben des Temperaturgradienten, des Windgeschwindigkeitsgradienten und der Windrichtung an einer oder mehreren Stellen des Ausbreitungsraumes in größeren Höhen erforderlich sind. Da man hierbei selten auf stationäre Einrichtungen wie Masten oder Türme zurückgreifen kann, sind Ballonsonden (Fesselballone) erforderlich. Ist jedoch ein kompletter Satz relevanter Randbedingungen für ein Rechenprogramm bekannt, so können mit dessen Hilfe für alle Punkte des untersuchten Ausbreitungsraums die Schallpegel berechnet werden.

Mißt man an diesen Punkten die Schallpegel unmittelbar mit einem Schallpegelmesser und vergleicht sie mit den Rechenergebnissen, so findet man zwischen ihnen Unterschiede, deren Größe vom zufälligen Zustand der einzelnen Randbedingungen abhängt. Diese Unterschiede sind für kurze Entfernungen und zeitlich stabile Zustände gering und können bei größeren Entfernungen sowie zeitlich und örtlich schwankenden Zuständen beträchtliche Ausmaße annehmen. Da die örtlich und zeitlich schwankenden (meteorologischen) Zustände zufällig schwanken, sind auch die durch sie verursachten Pegelschwankungen von zufälliger Art. In Entfernungen von 800 m und 1600 m von einer konstant emittierenden Schallquelle sind zeitliche Schwankungen des Momentanpegels von 20 dB bzw. 30 dB nicht ungewöhnlich für bestimmte meteorologische Zustände. Da auch die Pegeländerungsgeschwindigkeit Werte von mehr als 10 dB je Sekunde annehmen kann, ist hieraus zu schließen, daß auch die für die Schallausbreitung wesentlichen meteorologischen Zustände in Wirklichkeit starken und zeitlich schnellen Änderungen unterliegen. Wenn es aber das Ziel der Rechenmodelle darstellt, die Unterschiede zwischen Rechenergebnis und Messung des Schallpegels zu minimisieren, dann müssen örtliche und zeitliche Schwankungen der Schallausbreitungs-Randbedingungen im Rechengang mitberücksichtigt werden.

In den bekannten Modellannahmen wird jedoch nur von langsam veränderlichen oder zeitlich konstanten Randbedingungen ausgegangen.

Folgerichtig stimmen demnach Rechnung und Messung auch bei stabilen, langsam veränderlichen Randbedingungen wie z.B. bei leichter Mitwindwetterlage in der Nacht besser überein als bei den häufig schnell veränderlichen Randbedingungen wie Turbulenzen des Windes während der Tageszeit.

Will man diese Ungenauigkeit der Rechenverfahren verringern, so muß deren Ähnlichkeitsgrad zwischen dem der Rechnung zugrunde liegenden, vereinfachten Ausbreitungsmodell und der Realität vergrößert werden. Dies bedingt nicht nur größeren mathematischen Aufwand, sondern erfordert einen gegenüber dem schon jetzt nötigen meßtechnischen Aufwand zur Bestimmung der meteorologischen Zustände nochmals erheblich erhöhten Aufwand. Die in diesem Fall notwendige Erfassung der Zeitabhängigkeit aller wesentlichen Einflußparameter an gegebenenfalls vielen Raumpunkten ist einerseits aus Kostengründen nicht vertretbar und stößt andererseits bei den heutigen meteorologischen Meßgeräten an deren Grenze der Zeitauflösung.

3. M e t h o d i k

Da die Schallausbreitungs-Rechenmodelle - wie oben dargelegt - die Frage " Warum geschieht was?" nur für eine eingeschränkte Anzahl von Zuständen der Übertragungsmedien hinreichend genau beantworten können, soll in dieser Untersuchung allein die Frage "Was geschieht?" einer Antwort näher gebracht werden.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, daß das, "Was", d.h., welche Schallpegelverteilungen treten bei der freien Schallausbreitung an welchem Ort auf, unmittelbar durch eine genaue Messung bestimmt werden kann und die Frage des "Warum?", also die nicht oder nur lückenhaft beantwortbare Frage nach der Quantisierung und Vollständigkeit der Randbedingungen bei dieser Feststellung, keine Rolle spielt.

Vielmehr ist auf diese Art sichergestellt, daß der Einfluß aller meteorologischer Zustände auf die Schallpegelverteilungen wirklichkeitsgetreu erfaßt wird, wenn das Abfragesystem geeignet ist,

die diesen Zuständen zugeordneten Schallpegel entsprechend der natürlichen Auftretenshäufigkeit der Zustände zu erfassen.

Die Schallpegel selber werden daher aufgrund der im Detail nicht nachweisbaren Ursache - Wirkungsrelation - also des "Warum" im folgenden als Zufallsgrößen behandelt.

Infolge der realen Messung zeitlicher Schallpegelverläufe in dieser Untersuchung ist es möglich, Angaben zur Struktur der Pegelverteilungen zu machen. So können beispielsweise die folgenden Kennzeichnungen für alle Meßentfernungen angegeben werden:

1. größte und kleinste Augenblickswerte aller gemessenen Pegel
2. Schätzer für seltene hohe und seltene niedrige Pegel
3. Gemessene Summenhäufigkeitsverteilungen von Mittelungspegeln und Prozentpegeln
4. Kennwerte dieser Summenhäufigkeitsverteilungen.

3.1. Meßorte

Dem Ziel dieser Untersuchung entsprechend wurden die Meßorte bis zur größtmöglichen Entfernung von der Schallquelle angeordnet. Diese Grenze lag bei 1600 Metern und ergab sich einerseits aus der maximal abstrahlbaren Schalleistung der Schallquelle und andererseits aus dem am entferntest gelegenen Meßort noch zu fordernden Mindeststörabstand gegenüber dem dort vorhandenen Hintergrundgeräusch. Die Unterteilung der maximalen Meßentfernung ergab sich aus zweierlei Gründen.

1. Bedingt durch die gerätetechnisch vorgegebene Anzahl von 10 Meßkanälen konnte jeder der beiden von der Quelle ausgehenden Meßstrahlen nur an fünf Stellen mit einem Meßort belegt werden.
2. Da die sphärische Ausbreitungsdämpfung 6 dB je Entfernungsverdoppelung beträgt, erlaubt eine Unterteilung des Meßstrahls in Entfernungsverdoppelungen einen einfachen Vergleich der Pegelabweichungen von dieser Gesetzmäßigkeit.

Somit ergibt sich die Anordnung der Meßorte auf einen Meßstrahl bei den Entfernungen 100 m, 200 m, 400 m, 800 m und 1600 m.

Die Anordnung aller 10 möglichen Meßorte auf einer 3200 m langen Geraden, in deren Mitte die Schallquelle lag, ermöglichte es, simultan bei Mitwind auch die Gegenwindsituation in ihrer Auswirkung auf den Schallpegel zu messen.

3.2. Meßhöhe

Da die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Orte wesentlich von der Übertragbarkeit der Zustände des Bodens (Bodenimpedanzen) bestimmt ist, wurde für die Meßhöhe von Sender und Empfänger eine solche Höhe gewählt, die diesen Einfluß gering hält. Mit einer Sender- und Empfängerhöhe von 10 m ergeben sich für den reflektierten Schallstrahl Einfallswinkel in einem Bereich, der vermutlich nur geringe Zusatzdämpfungen zur Folge hat und damit die Übertragbarkeit verbessert bzw. sicherstellt. Dieser Punkt soll später mit Hilfe der tatsächlichen Ergebnisse untersucht werden. Darüber hinaus entspricht eine Quellenhöhe von 10 m in vielen Fällen der Höhe realer Schallquellen, so daß die Ergebnisse an andere Untersuchungsergebnisse angepaßt werden können.

3.3. Schallhindernisse

Zur Durchführung der Messungen wurde ein solches Meßgelände gesucht, welches weitgehend frei von erkennbaren akustischen Hindernissen war. Die Bestimmung des Einflusses von akustischen Hindernissen auf die freie Schallausbreitung ist aus vielen Untersuchungen bekannt, so daß sie hier nicht weiter untersucht werden soll.

Die Hindernisfreiheit wurde durch die Auswahl eines ebenen und nur minimal mit Büschen und Bäumen bestandenen Heidegeländes sichergestellt. Ob dieser augenscheinliche Sachverhalt tatsächlich die hieraus abgeleiteten akustischen Folgerungen rechtfertigt, ist im Verlauf der Untersuchungen durch Messungen nachzuprüfen.

3.4. Abfragesystem

Es ist das Ziel dieser Untersuchung, das bei freier Schallausbreitung auftretende Kollektiv aller möglichen Schallpegelrealisationen quantitativ und strukturell so zu beschreiben, daß sich der Einfluß aller real existierenden Zustände der Übertragungsmedien wirklichkeitsgetreu und vollständig im Kollektiv widerspiegelt.

Bei Verwendung eines vollständigen und richtigen Meßverfahrens ist diese Forderung gleichbedeutend mit der Beschreibung der Zufallsvariablen Schallpegel in allen ihren Realisationen während der Kennzeichnungszeit. Da die Kennzeichnungszeit - hier der Zeitraum eines Jahres mit der Untergruppe "alle Werktage von 6⁰⁰ bis 22⁰⁰" - schon allein aus Kostengründen einen viel zu langen Erhebungszeitraum darstellt, kam eine Erfassung der Grundgesamtheit aller Schallpegelrealisationen nicht in Frage. Die Anzahl der Messungen mußte daher durch ein entsprechendes zeitliches Abfragesystem auf das notwendige und mögliche Maß reduziert werden; d.h., die Grundgesamtheit muß aus zeitrepräsentativen Stichproben geschätzt werden.

Sind wie hier vor Untersuchungsbeginn keine Strukturkenntnisse über das Zeitverhalten von Pegelverläufen wie Tages- oder Jahresgang vorhanden, so liegt eine repräsentative Stichprobe mit Sicherheit dann vor, wenn allen möglichen Meßzeitpunkten bei der Auswahl der tatsächlichen Stichprobe gleichgroße Auswahlwahrscheinlichkeit eingeräumt wird.

Bei anderer Vorgehensweise ist nicht auszuschließen, daß sich durch eine Beschränkung der möglichen Meßtermine ein systematischer Abfragefehler durch die Anordnung der Stichprobenelemente ergibt.

Unveränderbare, äußere Randbedingungen erzwangen jedoch bei dieser Untersuchung eine Stichprobenanordnung, die bezüglich der Kennzeichnungszeit nicht mehr rein zufällig war.

Es konnten zwar verteilt über die Kennzeichnungszeit jeweils 14tägige Meßperioden in den Monaten März, Juni, August und Oktober verwirklicht werden, jedoch waren diese Zeiten vor Untersuchungsbeginn

fest durch die Mitbenutzungsmöglichkeiten des Untersuchungsgeländes vorgegeben, da dessen Besitzer das Gelände zu allen anderen Zeiten zu eigenen Untersuchungen verfügbar haben mußte. Die schließlich getroffene Auswahl der einzelnen Meßtermine ist in Abbildung 10 dargestellt. Weitere Einschränkungen in der freien Wahl des Meßtermins liegen in den erforderlichen Funktionsprüfungen der Meßeinrichtung vor Beginn und am Ende einer jeden 20minütigen Einzelmessung begründet sowie in der Zeit, die zum Ausdruck, zur Berechnung und Prüfung der Zwischenergebnisse erforderlich ist. Ferner müssen die Ausfallzeiten durch Regen, notwendige Reparatur und akustische Störungen hingenommen werden. Die Summe dieser Zeiten betrug durchschnittlich 20 Minuten je Einzelmessung, so daß der Tageszeitraum 6⁰⁰ bis 22⁰⁰ günstigstenfalls mit 24 Einzelmessungen belegt werden konnte. Diese maximal mögliche Anzahl von Einzelmessungen pro Tag konnte bei den tatsächlichen Messungen mit minimal 16 %, maximal 83 % und durchschnittlich 45 % erreicht werden.

Die Frage, ob sich durch diese äußeren Zwänge die eigentlich angestrebte Repräsentanz der Untersuchungsergebnisse verschlechtert hat, kann - wenn überhaupt - nur durch zusätzliche Untersuchungen geklärt werden.

3.4.1. Kennzeichnungszeit

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Randbedingungen auf den Schallpegelverlauf vollständig zu erfassen muß die Kennzeichnungszeit dem Zeitverhalten dieser Randbedingungen angepaßt sein. Da sie zwar innerhalb eines Jahres - beispielweise zu verschiedenen Jahreszeiten - starken zufälligen Änderungen unterworfen sind, sich jedoch von einem Jahr zum anderen nur geringfügig im Vergleich zu den innerhalb eines Jahres auftretenden Schwankungen ändern, wurde ein Jahr gewählt.

Innerhalb dieses Zeitraumes wurde wiederum nur der Tageszeitraum von 6⁰⁰ bis 22⁰⁰ Uhr in Anlehnung an bestehende Beurteilungszeiten ausgewählt. Die Gründe hierfür liegen zum einen in der eingangs erwähnten Tatsache, daß für den Nachtzeitraum, der im allgemeinen

durch stabilere Ausbreitungsverhältnisse gekennzeichnet ist, größeres Vorwissen als für den Tageszeitraum vorliegt und zum anderen in den großen technischen, personellen und organisatorischen Schwierigkeiten von Nachtmessungen.

3.4.2. Meßdauer

Die eigentliche Meßdauer wurde zu 20 Minuten festgelegt, weil davon ausgegangen wird, daß die Auftretensdauer der voneinander unterscheidbaren meteorologischen Zustände oder Kategorien größer als 20 Minuten ist, und andererseits eine Meßdauer von 20 Minuten ausreichend zur Messung der die jeweilige Situation kennzeichnenden Kurzzeitfluktuationen ist. Eine kürzere Meßdauer verbot sich aus Gründen der Zuordbarkeit zu zeitsynchron erhobenen meteorologischen Meßwerten, da diese als kürzeste Mittelungszeit 10 Minuten aufwiesen.

3.4.3. Meßwerte

Über die Meßdauer von 20 Minuten wurden je Einzelmessung und Meßort die aus Abbildung 11 ersichtlichen Pegel- und Zusatzmeßwerte erhoben. Die Pegelmeßwerte wurden durch äquidistante Abfrage der Meßgröße "Schalldruckpegel-Verlauf $L_F(t)$ im 0,5-Sekunden-Takt über diejenigen Zeiten gebildet, während derer das zu untersuchende Quellengeräusch pegelbestimmend war. Ferner wurden meteorologische Zusatzmeßwerte für jede Einzelmessung erhoben, die als 10-Minuten-Mittelwerte vorliegen.

3.4.3.1. Pegelmeßwerte

a) $L_{Okt, Fm, T}$ als energieäquivalenter Dauerschallpegel zur Kennzeichnung der mittleren Intensität der Meßgröße während der Meßdauer. Zur Kennzeichnung der Geräuschquelle im Spektralbereich und als Unterscheidungsmerkmal für eine spätere Prüfung auf Frequenzabhängigkeit der Ergebnisse wurden vier verschiedene, jeweils oktavbreite Quellensignale bei den Oktavmittenfrequenzen 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz verwendet. Diese spektrale Beschränkung der Meßgröße ist durch den Index Oktav des Pegelmeßwertes ausgedrückt.

b) $L_{\text{Okt},F,x,T}$ als x-Prozentpegel der Verteilung der Meßgröße in der Meßdauer. Der Zahlenwert x gibt den prozentualen Anteil der Meßdauer an, in dem die Meßgröße den x-Prozentpegel erreicht oder überschritten hat. Der Prozentpegel dient zur Kennzeichnung seltener bis häufiger Ereignisse und variiert von $x = 1, 10, 50, 90$ bis 99% .

3.4.3.2. Normierungspegel

Der Normierungspegel errechnet sich aus dem im Nahbereich (25 m) der Quelle gemessenen, konstanten Quellenpegel unter Abzug der für den jeweiligen Meßort und die jeweilige Frequenz gültigen sphärischen Ausbreitungsdämpfung und der nach [9] ermittelten Dämpfung durch Molekularabsorption.

Durch Subtraktion der nach a) und b) gemessenen Pegel von dem jeweiligen Normierungspegel wurden die Pegeldifferenzen bzw. Zusatzdämpfungen gegenüber dem Normierungspegel bestimmt, die auf boden- und witterungsbedingten Dämpfungseinfluß allein zurückzuführen sind.

Die so berechneten Zusatzdämpfungen $L_{\text{Okt},F_m,T}$ und $L_{\text{Okt},F,x,T}$ sind demnach von der Quellstärke unabhängig und stellen die Stichprobenelemente dar, aus denen die später behandelten Summenhäufigkeitsverteilungen gebildet werden.

3.4.3.3. Meteorologische Meßwerte

Die im folgenden aufgeführten meteorologischen Meßwerte liegen jeweils als arithmetisches Mittel über eine Meßdauer von 10 Minuten vor.

- a) Temperatur in Grad Celsius gemessen in 2, 16, 48 und 80 m Höhe
- b) Windgeschwindigkeit in m/s, gemessen in 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 85 m Höhe.
- c) Windrichtung in Grad gemessen in 16 m Höhe über Grund.

d) Relative Luftfeuchtigkeit in %, in 2 m Höhe über Grund.

3.5. Meßeinrichtung

3.5.1. Schallquelle

Um das Modell einer Punktschallquelle möglichst gut anzunähern, wurde als Schallquelle eine Ikosaeder-Anordnung aus 21 Lautsprechern der Type Isophon PSL 245/35 mit je 25 Watt maximaler Belastbarkeit verwendet. Der Durchmesser der unbeschriebenen Kugel betrug 0,94 m. Die Quelle wurde an ihrem Mast über Seilzug und Kurbelgetriebe in 10 m Höhe über Geländeniveau aufgestellt (s. Abbildung 11). Die Erzeugung des in die Quelle eingespeisten elektrischen Signals kann der Abbildung 12 entnommen werden.

Das Signal wurde von einem programmierbaren Meßsender durch oktavbreite, frequenzlineare und schrittweise Wobbelung kontinuierlich während der Gesamtdauer einer Messung erzeugt. Die Amplitude dieses Signals war während der gesamten Meßdauer konstant und weist folgende Vorzüge auf:

1. Im Gegensatz zu einem Rauschsignal können die nachgeschalteten Leistungsverstärker und Lautsprecher voll angesteuert werden, da die Aussteuerung nicht auf die Spitzenwerte der Rauschspannung bezogen werden muß; d.h., die effektiv abgestrahlte Leistung bei Verwendung eines solchen Signals ist größer als die eines Rauschens. Damit ergeben sich im Vergleich zu diesem größere Meßentfernungen bei gleichem Störabstand. Infolge der frequenzlinearen Wobbelung werden innerhalb einer Oktave sämtliche Frequenzen gleich häufig angeregt. Es tritt also keine Bevorzugung bestimmter Frequenzen innerhalb einer Oktave auf.
2. Durch zusätzliche Verwendung von Oktavfiltern auf der Empfängerseite läßt sich auch noch der Störabstand an den einzelnen Meßpunkten deutlich verbessern, da die außerhalb des Filterbereichs liegenden Spektralbereiche des Umgebungsräusches durch das Filter bedämpft werden.

3. Da in der Realität fast immer von breitbandiger Anregung ausgegangen werden kann, wurde das verwendete Ausgangssignal auf Oktavbreite festgelegt. Die in dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse beziehen sich also immer auf eine zeitliche und spektrale Mittelung von Schallpegeln. Sie sind leichter zu verallgemeinern als Aussagen bei diskreten Frequenzen. Bei Verwendung von schmalbandigen oder monofrequenten Quellensignalen treten die in Abbildung 3 dargestellten, stark frequenzabhängigen Zusatzdämpfungen des Schallpegels auf, die auf den Einfluß der Bodenimpedanz zurückzuführen sind. Die mit solchen Quellen zu erzielenden Ergebnisse sind schwierig zu verallgemeinern, da sie sich nur auf die während der Untersuchung vorhandenen Bodenzustände und Sender-Empfängergeometrien beziehen, die nicht direkt auf andere Situationen übertragbar sind. Durch die Verwendung oktavbreiter Anregungssignale, die die in der Realität vorhandenen Geräusche besser annähern als monofrequente Signale, wird die frequenzselektive Zusatzdämpfung infolge Bodenabsorption als pegelbestimmender Einfluß durch die damit verbundene "Mittelung" im Frequenzbereich spürbar reduziert und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Orte verbessert.
4. Das in dieser Untersuchung benutzte Anregungssignal reduziert gegenüber einem frequenzselektiven Meßverfahren - jeweils gleiche Mittelungszeiten vorausgesetzt - den Zeitaufwand und damit die Kosten desselben erheblich.

3.5.2. Meßeinrichtung zur Erfassung und Verarbeitung der Schallpegeldaten

An allen einzelnen Meßpunkten wurden 10 m hohe Mikrofonmasten errichtet, an denen mittels Seilzug und Kurbeltrieb die Meßmikrofone für die Dauer der Messung auf 10 m Höhe justiert und die Normalen auf die Mikrofonmembran zur Quelle hin ausgerichtet wurden. Über Verlängerungskabel wurden die Mikrofone mit der am Mastfuß befindlichen Meßeinrichtung nach Abb. 13 verbunden.

Hier wurden die Mikrofonsignale in einem Präzisionsschallpegelmessers mit eingeschleiftem Oktavfilter verstärkt und als Wechelspannungssignal über eine FM-Funktelemetriestrecke bzw. über Kabel zum Meßfahrzeug übertragen. Durch die Verwendung der in Abb. 13 genannten Präzisionsschallpegelmessers und den bei jeder Einzelmessung individuell eingestellten Meßbereich ergibt sich eine Dynamik von mehr als 35 dB bezüglich des übertragbaren Meßsignals (Wechelspannungsausgangssignal der Schallpegelmessers bei eingeschleiftem Oktavfilter) an dieser Stelle der Meßwerterfassung für sämtliche Meßorte und alle Frequenzen. Die nachgeschaltete FM-Funktelemetriestrecke weist über den insgesamt ausnutzbaren Frequenzbereich eine Dynamik auf, die größer als die der Schallpegelmessers ist und mehr als 45 dB beträgt.

Die über Funk bzw. Kabel übertragenen Meßsignale wurden im Meßfahrzeug gemeinschaftlich ausgewertet, s. Abb. 14. Ausgenommen hiervon war lediglich der Meßpunkt 1600 m, dessen Meßsignale infolge mangelnder Reichweite der Funkstrecke auf Tonband aufgezeichnet und anschließend im Labor ausgewertet wurden.

Bei der Auswertung im Meßfahrzeug gelangte das Meßsignal eines jeden Meßortes über einen Präzisionsmeßverstärker Typ 2607 des Herstellers BRUEL & KJAER mit 50 dB Dynamik als pegelproportionale Spannung an je einen Eingang eines mehrkanaligen A/D-Wandlers. Der Wandler wies eine Dynamik von mehr als 60 dB auf und wurde vom nachgeschalteten Prozeßrechner so angesteuert, daß der Schallpegel eines jeden Meßkanals alle 500 ms abgefragt wurde.

Je Kanal und 20 Minuten Messung wurde vom Rechner ein Protokoll (s. Abb. 10) ausgedruckt, welches neben Identifikationsmerkmalen eine einfache grafische Darstellung der Pegelverteilung (Verteilung der 0,5-Sekunden-Stichproben) sowie hieraus berechneter Taktzahl, Meßzeit, Standardabweichung der Stichproben und den energieäquivalenten Dauerschallpegel aufweist. Zeitsynchron hierzu wurde ein Lochstreifen gestanzt, der alle o.g. Daten enthielt und der Weiterverarbeitung im Prozeßrechner diente.

Die Auswahl der Meßeinrichtung und die Beschränkung auf den Über-

tragungsfrequenzbereich 180 Hz bis 2800 Hz stellen sicher, daß der maximale Fehler der Meßkette vom Mikrofon bis zum Ausdruck der Schallpegel $\pm 1,5$ dB beträgt. Die Reproduzierbarkeit, d.h. Abweichung der Meßergebnisse aller Kanäle untereinander und zu beliebigen Zeiten bei gleicher Betönung wiederholt gemessen, kann mit 99 %iger Sicherheit zu kleiner 1 dB innerhalb des genannten Dynamikbereiches angenommen werden.

Zusätzlich zur Dynamik des Meßsystems ist an den einzelnen Meßpunkten der Störabstand des Meßsignals am Mikrofonort zu beachten. Er wird durch unerwünschte Umgebungsgeräusche sowie durch Geräusche des Windes am Mikrofon bestimmt. Während Umgebungsgeräusche im Verlauf der Messung durch simultanes Abhören und zeitsynchrones Ausblenden aller Meßkanäle als Störfaktoren ausgeschaltet werden konnten, muß das Windgeräusch als nicht zu unterschreitende, weil nicht zu eliminierende Grenze, bei der Auswertung der Pegelverteilungen beachtet werden. Die Größe seines Einflusses ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Die dort angenommene Windgeschwindigkeit von 5,65 m/s ist sehr hoch angesetzt und wurde bei den tatsächlichen Messungen nur in 15 % aller Fälle erreicht oder überschritten. In 55 % aller Fälle lagen die Windgeschwindigkeiten zwischen 3 m/s und 5 m/s und in 28 % unterhalb von 3 m/s; d.h. in 85 % aller Fälle ist von einem günstigeren Störabstand als dem in Tab. 1 genannten auszugehen.

Bezüglich der Meßergebnisse bleibt festzustellen, daß bis zu Entfernungen von 400 m keine Meßfehler durch mangelnden Störabstand zu erwarten sind. Für die Meßpunkte in 800 m Abstand von der Quelle wird der Störabstand durch die niedrigsten gemessenen Momentanpegel in der Praxis gerade ausgeschöpft. Betrachtet man jedoch die Pegelverteilungen für den 1600-m-Meßpunkt, so ist bei dieser Entfernung der Störabstand bereits zu schlecht geworden, um auch die niedrigsten gemessenen Momentanpegel der Verteilungen noch als fehlerfrei anzusehen. Deshalb wurde bei der Auswertung dieser Meßpunkte besonders auf die Ausblendung von Windgeräuschen geachtet. Dennoch müssen die unteren Pegelklassen, insbesondere der L_{99} -Ver-

teilungen mit Skepsis betrachtet werden. Diese Ergebnisse werden daher auch nur der Vollständigkeit halber und als Anhaltspunkt mit eingeschränkter Genauigkeit in den Auswertungen angegeben.

3.5.3. Meteorologische Meßeinrichtung

Im Gelände befand sich in unmittelbarer Nachbarschaft des 800-m-Meßpunktes eine stationäre, automatische meteorologische Meßstation, deren Daten unverändert in diese Untersuchung übernommen und nicht modifiziert werden konnten. Es handelte sich um einen 85 m hohen Stahlgitterturm, an dem in den Höhen 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 und 80 m Windgeschwindigkeitsmeßgeräte sowie in den Höhen 2, 16, 48 und 80 m Temperaturmeßgeräte angebracht waren. Diese Meßsonden wurden kontinuierlich abgefragt und ihre Meßergebnisse zu 10-Minuten-Mittelwerten zusammengefaßt; d.h., zeitparallel zu den akustischen Messungen liegen für die genannten Parameter 10-Minuten-Mittelwerte vor. Messungen der Windrichtung in 10 m Höhe und der relativen Luftfeuchtigkeit liegen ebenfalls als 10-Minuten-Mittelwerte vor. Sie wurden jedoch in einer ca. 10 km abseits gelegenen Meßstation ermittelt, die sich auf dem gleichen Gelände befand. Nach Aussage der zuständigen Meteorologen sind diese Werte jedoch auf den Meßort übertragbar.

3.6. Meßgelände

Die Messungen fanden in ebenem Heidegelände statt. Es handelte sich um Sandboden, der spärlich mit kurzem Gras und Heidekraut bewachsen war. Die größten Geländeunebenheiten auf dem 3,2 km langen Meßstrahl betragen ca. ± 4 m. Im Gelände befanden sich in geringerem Umfang niedrige Büsche und vereinzelt Bäume. Von seltenen Ausnahmen abgesehen herrschte kein Kraftfahrzeugverkehr und nur gelegentlich Luftverkehr. Richtungsabhängigkeiten bei der Schallausbreitung, deren Ursache auf Inhomogenitäten des Geländes zurückzuführen wären, konnten nicht nachgewiesen werden. Auf diesen Punkt wird bei den Calmen-Meßergebnissen in Kap. 4 noch näher eingegangen. Die Auswahl dieses Geländes ergab sich aus folgenden Randbedingungen:

- 1) geeignete Abmessungen
- 2) ebenes Gelände
- 3) kein akustisch störender Bewuchs
- 4) keine Schallhindernisse durch Bebauung
- 5) keine Richtungsabhängigkeiten
- 6) möglichst niedriger Hintergrundpegel
- 7) gute Zugänglichkeit der Meßpunkte
- 8) keine Beeinträchtigung Unbeteiligter durch den Lärm der Quelle
- 9) Möglichkeiten, bis zu Höhen von 85 m (80 m) zeitsynchron zu den akustischen Messungen meteorologische Messungen durchzuführen.

4. U n t e r s u c h u n g s e r g e b n i s s e

In einer Meßanordnung nach Abb. 15 waren Schallpegelmesser bei jeweiliger Verdoppelung des Abstandes zur Quelle auf einem 2 x 1600 m langen Meßstrahl im Gelände errichtet, in dessen Mitte sich eine Punktschallquelle befand. Quellen- und Empfängerhöhe betragen einheitlich und ständig 10 m. Die zur Abstrahlung verwendeten Meßsignale waren oktavbreit gewobbelte Töne konstanter frequenzunabhängiger Amplitude bei den Oktavmittenfrequenzen 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz. Die Abstrahldauer eines solchen Signals betrug in allen Meßreihen 20 Minuten. An zwei der insgesamt 19 über obigen Zeitraum verteilten Meßtagen wurde im gleichen Gelände ein anderer Meßort gewählt. Insgesamt liegen je Oktavmittenfrequenz und Entfernung (mit Ausnahme der 100 und 1600 m Meßpunkte) ca. 80 Einzelmessungen der Schallpegelverteilungen über jeweils 20 Minuten vor. Die Gesamtzahl aller 20-Minuten-Einzelmessungen beträgt $N = 1196$ und teilt sich nach Tabelle 2 auf die verschiedenen Meßpunkte auf.

Tabelle 2: Aufteilung aller Einzelmessungen nach Frequenz und Entfernung

Entfernung	Anzahl der 20-Minuten-Messungen			
	Frequenz			
	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
100 m	41	37	36	42
200 m	87	82	81	87
400 m	85	79	79	85
800 m	74	67	68	69
1600 m	30	30	21	16

Im Verlauf jeder Einzelmessung wurde die Verteilung aller Momentanwerte des Schallpegels unter den realen Randbedingungen der Messung wie Temperatur, Windverhältnisse, Regen etc. bestimmt. Die aus diesen Verteilungen berechneten Prozentpegel und energetischen Mittelungspegel stellen die Daten dieser Untersuchung dar.

Um den numerischen Vergleich mit Ergebnissen anderer Untersuchungen zu ermöglichen, wurden alle Einzeldaten normiert. Dies geschah durch Bildung der Pegeldifferenz zwischen dem jeweiligen Pegel der 20-Minutenmessung und dem Normierungspegel. Letzterer ergibt sich aus der Subtraktion der sphärischen Ausbreitungsdämpfung sowie der zum Zeitpunkt der Messung aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit bestimmten Zusatzdämpfung infolge Molekularabsorption von dem in 25 m Entfernung gemessenen Quellenpegel. Hierbei wird in Übereinstimmung mit ähnlichen Untersuchungen davon ausgegangen, daß die sphärische Ausbreitungsdämpfung als physikalische Gesetzmäßigkeit keinen zeitlichen Schwankungen unterliegt und die Molekularabsorption für den Zeitraum der Messung deswegen als konstant anzusehen ist, weil die sie bestimmenden Größen Lufttemperatur und Luftfeuchte als sehr langsam veränderliche Größen gegenüber einer Meßdauer von 20 Minuten anzusehen sind und im gesamten Ausbreitungsraum, d.h. an allen Meßpunkten, gleiche Zahlenwerte aufweisen.

Kann zusätzlich erwiesen werden, daß die im Nahbereich der Quelle gemessene Emission zeitlich konstant ist, so stellen die normierten Pegeldifferenzen Größen dar, die nicht mehr von der Quellstärke, der geometrischen Ausbreitungsdämpfung und der Dämpfung

durch Molekularabsorption abhängen, sie wären sogar zu allen Zeiten und an allen Orten Null, wenn in der Realität außer den genannten keine zusätzlichen Dämpfungen auf dem Ausbreitungsweg des Schalls vorhanden wären.

Tatsächlich jedoch bewirken Schwankungen meteorologischer Parameter und Reflexionen des Schalls am Erdboden Störungen der freien Schallausbreitung. Dies hat systematische Verschiebungen und zufällige Schwankungen obiger Pegeldifferenzen zur Folge. Die Pegeldifferenzen werden daher im folgenden als Zufallsgrößen aufgefaßt und durch Kenngrößen ihrer Verteilungen charakterisiert. Es wird im einzelnen untersucht, ob systematische Einflüsse bestimmter Ausbreitungsparameter auf die gemessenen Pegeldifferenzen nachweisbar sind, wie groß sie sind und welches Streuungsmaß ihnen zugeordnet werden kann. Die Ergebnisse werden schließlich mit Prognoseaussagen anderer Modelle verglichen.

Zuvor sind jedoch die Randbedingungen der Untersuchung wie die Konstanz der Quellenstärke im Nahbereich und evtl. vorhandene Richtungsabhängigkeiten der Schallausbreitung zu prüfen. Die sogenannte akustische Symmetrie kann durch akustisch wirksame, in verschiedenen Ausbreitungsrichtungen unterschiedliche Topographie gestört sein und damit je nach Ausbreitungsrichtung ungewollte systematische Verschiebungen der gemessenen Pegel zur Folge haben. Dieser Punkt wird daher in Abschnitt 4.2 geprüft.

4.1. Bezugspegel

Als Bezugsentfernung wurden 25 m als der vierte Teil der kürzesten Meßentfernung willkürlich festgelegt. Hierbei wurde von der Annahme ausgegangen, daß sich dieser Punkt im freien Schallfeld und nicht im unmittelbaren Nahfeld der Kugelschallquelle befindet und die dort in Quellenhöhe gemessenen Pegel keinen witterungsbedingten Schwankungen unterliegen. Beide Bedingungen wurden eingehend überprüft. Hierzu wurden in 12,5 m und 25 m Entfernung zur Quelle auf zwei Kreisen in Winkelabständen von 45° für sämtliche verwendeten Frequenzbereiche Meßpunkte errichtet und für jedes der acht Punktepaare die Differenzen der Schallpegel bei 12,5 m und 25 m ermittelt. Bei wiederholten Messungen lagen die Pegeldifferenzen zwischen 5,6

und 6,3 dB mit dem Mittelwert 5,9 dB. Hieraus wird geschlossen, daß sich der 25-m-Punkt im freien Schallfeld einer Kugelschallquelle befindet. Die in 25 m festgestellten Pegel $L_{\text{Okt}, 25 \text{ m}}$ wurden wiederholt innerhalb vieler Monate gemessen und weisen zeitlich bedingte Schwankungen von wenigen zehntel dB auf. Daher wurden sie als zeitinvariante Bezugspegel zur Bildung der in 3.4.3.1 angegebenen Schallpegeldifferenzen herangezogen. Die Bezugspegel weisen, nach Frequenzen geordnet, folgende Werte auf:

250	Hz, 25 m	= 93,7 dB
500	Hz, 25 m	= 87,5 dB
1	kHz, 25 m	= 83,7 dB
2	kHz, 25 m	= 82,1 dB

4.2. Akustische "Symmetrie" des Geländes

Zur Beurteilung des Geländes im Hinblick auf Freiheit von akustischen Hindernissen sollen für eine Situation minimaler Windgeschwindigkeit für beide Meßstrahlen die folgenden Meßergebnisse herangezogen werden:

Tabelle 3: Pegelvergleich zwischen beiden Meßstrahlen bei 500 Hz und umlaufenden Winden von 0,8 m/s Windgeschwindigkeit

	200 m	400 m	800 m
L_m Strahl 3 dB	66,5	60,4	55,2
L_m Strahl 1 dB	66,9	60,6	55,3
ΔL Strahl 1/3 dB	-0,4	-0,2	-0,1

Unter der Voraussetzung, daß

- 1) das verwendete Meßsystem vor und nach jeder Messung zur Vermeidung von systematischen Verschiebungen (offset) kalibriert wurde und einen Gesamtfehler unterhalb von 1 dB aufwies sowie,
- 2) die meteorologische Situation zur Zeit der Messung in ihrer Wirkung auf den Verlauf der Schallstrahlen nicht richtungsspezifisch war, weil umlaufende Winde mit minimaler (0,8 m/s) Windgeschwindigkeit herrschten,

sind die geringen gemessenen Pegeldifferenzen von 0,4 dB, 0,2 dB und 0,1 dB zwischen den verschiedenen Meßstrahlen nur noch dadurch zu begründen, daß das Meßgelände in akustischer Hinsicht in den beiden Meßrichtungen symmetrisch war.

Messungen bei den anderen Frequenzen und ähnlichen Situationen ergaben ebenfalls geringe Pegeldifferenzen zwischen den beiden Meßstrahlen:

- 1) 250 Hz : $\Delta L_{200m} = 1,3 \text{ dB}$; $\Delta L_{400m} = 2,3 \text{ dB}$; $\Delta L_{800m} = 2,7 \text{ dB}$
- 2) 1000 Hz : $\Delta L_{200m} = 0,6 \text{ dB}$; $\Delta L_{400m} = 2,6 \text{ dB}$; $\Delta L_{800m} = 1,0 \text{ dB}$
- 3) 2000 Hz : $\Delta L_{200m} = 1,2 \text{ dB}$; $\Delta L_{400m} = 1,2 \text{ dB}$; $\Delta L_{800m} = 0,6 \text{ dB}$

In allen drei Situationen lagen Querwinde mit Windgeschwindigkeiten zwischen 1,0 m/s und 1,9 m/s vor. Die gegenüber dem ersten Beispiel größeren Pegeldifferenzen sind sichtlich auf die höheren Windgeschwindigkeiten zurückzuführen.

In einer weiteren Prüfung wurden das Kollektiv aller beobachteten Mitwindpegel in der einen Meßrichtung mit dem Kollektiv der anderen Meßrichtung verglichen. Auch dieser Vergleich erbrachte keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Meßrichtungen. Somit wird auch hierdurch die These der vorhandenen akustischen Symmetrie zusätzlich gestützt.

4.3. Verteilungen der Momentanpegel

Um dem Leser einen Einblick in die Vielfalt der Auswirkungen meteorologischer Zustände auf die Verteilung von Schallpegeln unter Freifeldbedingungen zu ermöglichen, werden im folgenden einige Beispiele von Einzelmessungen diskutiert. Jede Einzelmessung erstreckt sich über eine Meßdauer von 20 Minuten. Entsprechend dem verwendeten Abfragetakt von 0,5 s ergeben sich also je Einzelmessung 2400 Momentanwerte. Die Verteilungen dieser Momentanwerte sind in den folgenden Abbildungen dargestellt und durch Kennwerte wie arithmetischer Mittelwert, energieäquivalenter Dauerschallpegel, Standardabweichung und Spannweite charakterisiert.

Als erstes Beispiel sind in Abb. 16 für den Fall einer Querwind-situation die Momentanpegelverteilungen für die Entfernungen 100 bis 800 m für beide Meßstrahlen dargestellt. Der Wind wehte im 10-Minutenmittel unter einer Richtung von 77° relativ zur Richtung des Meßstrahls mit 2,4 m/s.

Die hier dargestellte Situation läßt folgende Schlußfolgerungen zu:

1. Der Zustand des Übertragungsmediums, der hier durch Querwind mit 2,4 m/s Windgeschwindigkeit, Temperaturgradient $0,6^\circ\text{C/m}$, Windgeschwindigkeitsgradient 1,7 1/s gekennzeichnet ist, bewirkt im gesamten Ausbreitungsraum bis hin zu 800 m Quellenentfernung in beiden Richtungen nur geringfügige Zusatzdämpfungen des Schallpegels gegenüber dem Normierungspegel. Diese Zusatzdämpfungen liegen zwischen +1,5 dB und -1,9 dB. Somit handelt es sich hier um einen Fall minimaler Zusatzdämpfung bzw. hoher Immissionspegel.
2. Diese Situation hoher Pegel ist gleichzeitig gekennzeichnet durch geringe Standardabweichung der Momentanpegel an allen Meßpunkten ($\sigma = 0,5 \dots 1,3$ dB), die nur leicht mit der Entfernung von der Quelle zunimmt.
3. Bei für die Schallausbreitung so günstigen Bedingungen wie hier kann der Normierungspegel durchaus geringfügig (1,9 dB) überschritten werden (hierzu siehe Kapitel 2).
4. Die Spannweite der Momentanpegel nimmt mit der Entfernung zu: von 1 dB bei 100 m bis zu 12 dB bei 800 m.
5. Die vorliegende Querwindsituation bewirkt erwartungsgemäß keine großen Pegelunterschiede in den beiden Ausbreitungsrichtungen.

Als zweites Beispiel ist in Abb. 17 eine typische Mitwind- und Gegenwindsituation dargestellt. Der Wind hatte im 10-Minuten-Mittel eine Geschwindigkeit von 1,6 m/s und wehte unter 14° zur Richtung des Meßstrahls. Aufgrund der Anordnung der Quelle in der Mitte des Meßstrahls konnten gleichzeitig Mit- und Gegenwindpegelverteilungen gemessen werden. Im einzelnen erlaubt dies Beispiel folgende

Feststellungen:

1. In Mitwindrichtung liegen die über 20 Minuten gemessenen energieäquivalenten Dauerschallpegel nur geringfügig (0...3 dB) unterhalb des Normierungspegels des jeweiligen Meßortes (100 m bis 800 m).
2. Die zugehörigen Standardabweichungen der Momentanpegel nehmen ständig aber langsam mit der Entfernung zu (0,97 dB bei 100 m bis auf 2,25 dB bei 800 m).
3. Die Spannweite der Momentanpegelverteilungen wächst mit der Entfernung von 5 dB bei 100 m auf 13 dB bei 800 m an.
4. In Gegenwindrichtung nimmt die Zusatzdämpfung mit der Entfernung stetig zu und weist bei 1600 m den beachtlichen Wert von 19 dB auf.
5. Verbunden mit der Zunahme der Dämpfung ist eine Zunahme der Standardabweichung mit der Entfernung, die bei 800 m fast den doppelten Wert wie die zugehörige Standardabweichung der Mitwindverteilung aufweist.
6. Die Differenz zwischen Mit- und Gegenwindpegeln gleicher Entfernung nimmt mit wachsender Entfernung zu und erreicht oberhalb von 400 m den Wert von 11,5 dB. Diese Tendenz legt, wenn sie im Wiederholungsfalle bestätigt werden kann, die Vermutung nahe, daß die Windrichtung - evtl. der Vektorwind - als empfindlicher Schichtungsparameter verwendet werden kann.
7. Bei einer Spannweite von 18 dB der Gegenwindpegel in 800 m, die ein Maß für die Größe der zufallsbedingten Änderungen darstellt, erklärt sich die Notwendigkeit vieler Wiederholungsmessungen oder empfindlicherer Schichtungsparameter aus sich selbst, wenn Stabilität der Lageparameter (Quantile) der Summenhäufigkeitsverteilungen gefordert wird.

Die Zusammenstellung ausgewählter Momentanpegelverteilungen der Abbildung 18 soll eine Vorstellung von der Vielfalt möglicher Vertei-

lungsformen vermitteln. Alle abgebildeten Verteilungen wurden am gleichen Tag gemessen. Die in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeiten wechselten im Laufe des Tages von Windstille (0 m/s in allen Höhen zwischen 1 m und 80 m) über minimale Windgeschwindigkeiten von 0,4 m/s bei umlaufenden Winden bis hin zu leichtem Mit- bzw. Gegenwind von 0,9 ... 1,7 m/s Windgeschwindigkeit. Die Temperatur in Bodennähe sank im Laufe der Messungen langsam von 13°C auf 9°C ab. Die Temperaturen in 16 und 48 m Höhe fielen ebenso von 13°C auf 10°C im Laufe der Zeit, so daß insgesamt ein geringer positiver Temperaturgradient die Messungen kennzeichnet.

Als erste Verteilung ist im Diagramm a) die Pegelverteilung bei Windstille dargestellt. Da Windstille als günstige Ausbreitungssituation zu betrachten ist, liegen die Momentanpegel erwartungsgemäß in der Nähe des Normierungspegels und weisen die relativ geringe Standardabweichung von 2 dB auf. Der energieäquivalente Dauerschallpegel von 55,3 dB dieser Messung weicht nur um 0,7 dB vom Normierungspegel 56,0 dB ab. Die Windsituation war durch Windstille im gesamten Bereich der Meßhöhe der Windgeschwindigkeit gekennzeichnet.

Die in Diagramm b) dargestellte Situation wurde 90 Minuten später gemessen und ist meteorologisch durch umlaufende Winde bei einer Windgeschwindigkeit von 0,4 m/s in 8 m Höhe und 1 m/s in 80 m Höhe gekennzeichnet. Der Temperaturgradient war leicht negativ (12,7°C in 2 m Höhe, 11,8°C in 80 m Höhe). Trotz nur geringfügig gegenüber der vorherigen Situation geänderten meteorologischen Randbedingungen weist das Diagramm b) sehr deutliche Unterschiede auf.

1. Die Verteilung fällt nicht rechts und links eines Maximums stetig ab, sondern zeigt in einem 6 dB breiten Bereich eher das Bild einer Gleichverteilung.
2. 87 % aller Momentanpegel liegen bis zu 8 dB oberhalb des Normierungspegels. Es handelt sich also um eine noch ausbreitungsgünstigere Situation als die vorangegangene Windstillensituation des Bildes a).

3. Der über 20 Minuten gemessene energieäquivalente Dauerschallpegel liegt 4,1 dB höher als der Normierungspegel. Zur näherungsweisen Erklärung dieses überraschend hohen Pegels, der keineswegs auf eine technisch fehlerhafte Messung zurückzuführen ist, kann man nur vermuten, daß sich hier direkter und reflektierter Schallstrahl unter teilweiser Addition ihrer Pegel kohärent überlagert haben. Da diese Pegelerhöhung zur Erklärung aber betragsmäßig nicht hinreichend ist, sei auf die zusätzliche Möglichkeit der Überlagerung von mehreren Schallstrahlen, wie in Kapitel 2 näher erläutert, hingewiesen.

Wenn auch die hier vorgestellte Pegelverteilung im Kollektiv aller gemessenen Verteilungen nur selten auftritt, sollte dennoch festgehalten werden, daß durchaus höhere Pegel als der Normierungspegel in der Realität vorkommen können.

In den Diagrammen c1) bis c3) sind schließlich 3 weitere außergewöhnliche Pegelverteilungen dargestellt, die zeitlich unmittelbar hintereinander gemessen wurden. Es herrschte während der Messungen leichter Mitwind bzw. Gegenwind der von 1,7 m/s auf 0,9 m/s während der Meßzeit absank. Die 3 oberen Diagramme zeigen das übliche Bild von nahe am Normierungspegel liegenden Mitwindverteilungen. Die in der unteren Reihe dargestellten Bilder geben die zeitgleich zu den oberen Mitwindverteilungen gemessenen Gegenwindverteilungen wieder. Sie sind durch folgende Auffälligkeiten charakterisiert.

1. Die Spannweite dieser Verteilungen liegt zwischen 22 und 24 dB und ist somit von beträchtlichem Ausmaß.
2. Es handelt sich um deutlich zweigipflige Verteilungen, bei denen der Abstand zwischen den relativen Maxima 18 dB beträgt und deren Standardabweichung mit 6 bis 8 dB mehr als doppelt so groß ist wie der Mittelwert der Standardabweichungen aller insgesamt gemessenen Gegenwindverteilungen.

Diese auffällige Zweigipfligkeit drängt dem Betrachter die Suche nach offensichtlich im Änderungsbereich der meteorologischen Parameter liegenden Ursachen auf.

Untersucht man jedoch die gemessenen meteorologischen Daten, bei denen es sich jeweils um 8 Meßwerte der Windgeschwindigkeit in 8-80 m Höhe, 4 Temperaturwerte in 2 bis 80 m Höhe und eine Windrichtungsangabe als 10-Minuten-Mittelwert, also um insgesamt 13 Meßwerte je 3 mal 20 Minuten Meßzeit handelt, so weisen diese Meßwerte nicht nur minimale Änderungen untereinander, sondern auch im zeitlichen Zusammenhang aller Meßwerte des vorangegangenen und nachfolgenden Zeitraumes auf; d.h. die gemessenen meteorologischen Randbedingungen erlauben keine Erklärung für das Auftreten zweier um 18 dB auseinanderliegender relativer Verteilungsmaxima. Da aber andererseits der Einflußbereich auf die Lage der Pegelverteilungen bei bekannten Schallausbreitungs-Prognosemodellen wie der VDI 2714 [8] und dem CONCAWE Modell [9] infolge des Einwirkens aller unterschiedlichen meteorologischen Zustände kleiner ist, als der hier bei einer einzigen, im Sinne der dort möglichen Klassierungen gemessenen meteorologischen Situationen, wirft gerade dieses Beispiel deutliche Zweifel hinsichtlich der Anwendbarkeit solcher Modelle im Einzelfall auf. Dies gilt umso mehr, wenn man bedenkt, daß die im Beispiel dargestellte zweigipflige Verteilung sich aus Momentanwerten zusammensetzt, die nach wiederholter Beobachtung während der Messungen im zeitlichen Abstand von wenigen Sekunden gemessen mal dem einen oder anderen Gipfel zuzuordnen sind. Dies bedeutet, daß die Änderungsgeschwindigkeit der Pegel nicht mit der Änderungsgeschwindigkeit der gemessenen meteorologischen Parameter korreliert ist. Oder anders ausgedrückt: Die hier sowie in Ausbreitungsmodellen zur Klassierung herangezogenen meteorologischen Parameter sind im vorliegenden Fall selbst dann nicht zur Ursachenanalyse geeignet, wenn zwei so deutlich unterscheidbare Pegelzustände auftreten. Es wird daher vermutet, daß zeitlich schnell veränderliche meteorologische Zustände wie Turbulenzen und jeweils kleine Änderungen langsam veränderlicher meteorologischer Größen in ihrem gleichzeitigen Zusammenwirken die Ursache für die hier vorliegenden Pegelverteilungen darstellen. Da das meteorologische Meßsystem diese kurzzeitigen Vorgänge nicht nachvollziehen kann und bei vertretbarem technischen Aufwand dies auch in Zukunft nicht der Fall sein wird, wird hier nicht nur die eine Grenze der Anwendung von Prognosemodellen [14] bei zeitlich kürzeren Aussagen deutlich, sondern auch die Frage aufgeworfen, ob es nicht in Kenntnis dieser Grenzen sinnvoll ist, die Prognosen auf die Abschätzung der Grenz-

zustände hoher und niedriger Pegel allein abzustellen und auf Erklärungsversuche für dazwischen liegende Pegelbereiche zu verzichten.

Ein anschauliches Beispiel der Beschränkung auf zwei Prognoseausagen vermittelt die Abb. 19. In dieser Abbildung sind Verteilungen sämtlicher, in dieser Untersuchung gemessener Momentanpegel für den willkürlich herausgegriffenen Meßpunkt 800 m und 2 kHz dargestellt. Zur Kennzeichnung von Zuständen hoher Immissionspegel wurden die Momentanwerte für alle Mitwindsituationen bei $\pm 45^\circ$ breiten Sektoren für die Schwankung der Windrichtung und zur Kennzeichnung niedriger Pegel, die Verteilung der Momentanwerte der Gegenwindrichtung ($\pm 45^\circ$) herangezogen. Zusätzlich ist in die Abb. 20 die Verteilung sämtlicher, gemessener Momentanpegel eingezeichnet. Die dargestellten Verteilungen sind durch Addition aller gemessenen Momentanpegel bei Verwendung eines einzigen Schichtungsparameters (Gegenwind/Mitwind) zustande gekommen. Sie enthalten also anteilig Ergebnisse aus den Monaten März, April, Juni, August und Oktober sowie Meßzeitpunkte während der Tageszeit zwischen 6.30 Uhr und 21.00 Uhr. Mit Ausnahme des Unterscheidungsparameters Mitwind/Gegenwind enthalten die Verteilungen den Einfluß aller restlichen meteorologischen Einwirkungen auf den Schallpegel in dem Maße, wie diese zufällig während der Messungen angetroffen wurden. Infolge der von außen vorgegebenen Randbedingungen des Meßablaufs - es fehlen die Wintermonate, die Zugänglichkeit des Meßgeländes wurde zeitlich fest vorgegeben - bedeuten die Angaben der Abb. zwar nicht, daß die Verteilungen nach Lage und Form den Einfluß aller möglichen meteorologischen und sonstigen Randbedingungen auf die Verteilung der Schallpegel repräsentativ, also entsprechend ihrer natürlichen Auftretungswahrscheinlichkeit richtig widerspiegeln müssen. Ob sich die Lage und Form der Häufigkeitsverteilungen bei nachweislich zufälliger Anordnung der Meßzeitpunkte im gesamten Jahresablauf vielleicht noch um einige Zehntel dB oder sogar mehr verschieben würde, kann an dieser Stelle nicht verbindlich geklärt werden und könnte zum Ausgangspunkt weiterer Untersuchungen gemacht werden. Es gibt jedoch gute Gründe davon auszugehen, daß keine erheblichen Einflüsse zusätzlich zu erwarten sind, da bei Unterscheidung in Mitwind-, Gegenwind- und Querwind die Häufigkeit der Mitwind und Gegenwindsituation zusammen 51 % aller Situationen ab-

deckt und dieser Anteil annähernd dem mit 47 % ausgewiesenen auf den Meßort bezogenen 10-Jahresmittel der Windrichtung für diesen Ort entspricht. Da das Gelände als akustisch symmetrisch nachgewiesen wurde und immer aufgrund der Anordnung der Meßpunkte gleichzeitig Mit- und Gegenwindsituationen gemessen wurden, können auch diese Situationen zu einem 180° breitem Sektor zusammengefaßt werden. Aus den gleichen Gründen zusammengefaßte Querwindsituationen waren mit 49 % an den Messungen und mit 52 % an dem 10-Jahresmittel beteiligt. Infolge der damit zulässigen Einteilung in zwei Windrichtungssektoren von je zwei $\pm 45^\circ$ breiten, einander gegenüberliegenden Sektoren der Windrose spielen evtl. vorhandene leichte Vorzugsrichtungen des Windes im Ergebnis keine große Rolle mehr.

Betrachtet man in Kenntnis dieser Vorbehalte die Abb. 19, stellt man folgende Zusammenhänge fest:

1. alle drei Verteilungen können rein phänomenologisch sehr gut durch Normalverteilungen angenähert werden; d.h. jede Verteilung kann näherungsweise vollständig durch zwei Parameter (μ, σ) beschrieben werden.
2. Hinsichtlich ihrer Schwerpunktslage sind insbesondere Mit- und Gegenwindverteilung signifikant unterscheidbar ($\Delta L=4,5$ dB).
3. Die Gegenwindverteilung enthält an ihrem unteren Rand einen 7 dB breiten Bereich, innerhalb dessen alle niedrigsten gemessenen Momentanpegel liegen (5,6 % aller Gegenwindpegel).
4. Die höchsten Mitwindpegel können noch geringfügig von den höchsten Pegeln der Gesamtverteilung - also Querwindpegeln - überschritten werden.
5. Die Gesamtspannweite aller Momentanpegel beträgt 46 dB, die der Mitwindpegel 34 dB und die der Gegenwindpegel 38 dB. Die Spannweiten, innerhalb derer 99 % aller Momentanpegel beobachtet wurden, betragen für die Gesamtverteilung 28 dB, für die Mitwindverteilung 20 dB und für die Gegenwindverteilung 22 dB. Die Spannweiten der Momentanpegelverteilungen können im Einzelfall jedoch wesentlich kleiner ausfallen.

6. Mit- und Gegenwindverteilung überlappen sich. Hierbei ragen ca. 25 % der Mitwindverteilung und ca. 33 % der Gegenwindverteilung in den Bereich der jeweils anderen Verteilung hinein. Dieser relativ große Überlappungsbereich macht deutlich, daß eine saubere Trennung des Einflusses meteorologischer Parameter auf die Pegel nicht durch Augenblicksmessungen oder wenige Einzelmessungen, sondern nur noch durch ein Kollektiv erfolgen kann, das sich aus vielen Wiederholungsmessungen zusammensetzt.
7. Der Prozentsatz aller Momentanpegel, die den Normierungspegel überschreiten, beträgt immerhin noch ca. 10 % und ist damit nicht mehr vernachlässigbar. Oder anders ausgedrückt: Der Normierungspegel stellt diejenige Pegelgröße dar, unterhalb derer nach den hier vorliegenden Meßergebnissen rund 90 % aller Pegel erwartet werden dürfen. Damit kann also eine Schallausbreitungsprognose auf der Basis der sphärischen Ausbreitungsdämpfung und der Molekularabsorption allein gerechnet durchaus als eine legitime Abschätzung nach oben hin bezeichnet werden. Die an diesem Beispiel erläuterten Tatbestände gelten in analoger Form auch für die restlichen untersuchten Frequenzbereiche.

Als Abschluß dieses Abschnittes sind in Tabelle 4 die arithmetischen Mittelwerte der Standardabweichungen und Spannweiten für die Verteilungen der Momentanwerte aller Einzelmessungen nach Quellenentfernung, Frequenz sowie Mit- und Gegenwind zusammengetragen.

Aus der Tabelle ist die Zunahme von Standardabweichung und Spannweite mit wachsender Quellentfernung ersichtlich. Ebenfalls erkennt man die bei gleicher Entfernung größere Standardabweichung der Gegenwindpegel gegenüber den Mitwindpegeln im Entfernungsbereich bis 400 m. Von da ab deutet sich zu größeren Entfernungen hin ein Sättigungseffekt an, der eine weitere Zunahme von Standardabweichung und Spannweite begrenzt und den Unterschied von Gegenwind- und Mitwindstandardabweichung aufhebt. Die Ergebnisse für die Entfernung 1600 m sind hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt und dürfen in ihrer Qualität nicht mit den Ergebnissen der anderen Entfernungen gleichgesetzt werden, da sie sich aus sehr viel weniger Einzelmessungen zusammensetzen. Insbesondere sind die bei Gegenwind gemessenen Standardabweichungen und Spannweiten deutlich zu niedrig-

eindeutig eine Folge des bei den niedrigen Gegenwindpegeln zu geringen Störabstandes gegenüber dem Hintergrundgeräusch.

4.4. Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel aus sämtlichen Einzelmessungen

Aus den im vorigen Abschnitt beschriebenen Momentanpegelverteilungen wurden für jede Einzelmessung die Prozentpegel $L_{1,20}$; $L_{10,20}$; $L_{50,20}$; $L_{90,20}$ und $L_{99,20}$ errechnet. Die Summenhäufigkeitsverteilungen dieser Prozentpegel, die aus sämtlichen Einzelmessungen gebildet wurden, sind in den Abbildungen 20 und 21 nach Entfernungen und Frequenzen geordnet. Sie erlauben einen Gesamtüberblick über das Kollektiv der bei allen Messungen angetroffenen Schallpegel und deren prozentualer Anteile am Gesamtgeschehen. So fällt als erstes die für alle Frequenzen erkennbare Zunahme der Spannweite aller Summenhäufigkeitsverteilungen mit der Entfernung auf, die schon im vorigen Abschnitt anhand von Einzelbeispielen erwähnt wurde und die aus der Abnahme der Neigung der Verteilungen mit wachsender Entfernung ersichtlich ist. Des weiteren kann ein zusätzliches Abknicken der Verteilungen in deren unterem Pegelbereich beobachtet werden, das für die Entfernung 400 m nur schwach ausgeprägt ist, jedoch mit wachsender Entfernung stärker wird. Dieses Abknicken erklärt sich durch den mit der Entfernung zunehmenden Pegelunterschied zwischen Mit- und Gegenwindpegeln. Infolge des Abknickens ergeben sich für gleich weite Interdezilbereiche unterhalb des 0,5-Quantils größere Pegeldifferenzen als oberhalb desselben. Auch die hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung aller beobachteten Momentanwerte der Pegel bei 800 m und 2 kHz der Abb. 19 entnommene Aussage, daß nur ca. 10 % aller Meßwerte oberhalb des Normierungspegels anzutreffen sind, kann am entsprechenden Diagramm der Abb. 21 bestätigt werden. Hier liegt das 0,5-Quantil der Summenhäufigkeitsverteilungen der L_{10} aller 20-Minuten-Messungen deckungsgleich mit dem Normierungspegel. Als Folge des schon erwähnten Abknickens stellt das 0,5-Quantil eine Abschätzung des Mittelwertes zu höheren Pegeln dar. Die Abbildungen 20 und 21 zeigen, daß unabhängig von Entfernung und Frequenz der L_{10} derjenige Pegel ist, der den Normierungspegel im Mittel am besten trifft; d.h., das 0,5-Quantil sämtlicher L_{10} -Summenhäufigkeitsverteilungen liegt im Bereich von 0 dB (Normierungspegel) bis ± 2 dB. Damit liegt

der niedrigere Mittelwert geringfügig unterhalb bzw. oberhalb des Normierungspegels.

Zieht man zur Beschreibung seltener Spitzenpegel den L_1 und von dessen Summenhäufigkeitsverteilung wiederum das 0,9-Quantil heran, so ist dies eine anschauliche Schranke unterhalb derer in 90 % aller beobachteten Fälle 99 % aller gemessenen Pegel liegen. Die zugehörigen Werte entnimmt man den Abbildungen 20 und 21 als Schnittpunkt zwischen der 90-%-Linie und der jeweiligen Summenhäufigkeitsverteilung der $L_{1,20}$ bei der gewünschten Entfernung und Frequenz. Man stellt hierbei folgendes fest:

1. Aufgrund der mit der Entfernung anwachsenden Spannweite aller Verteilungen nimmt auch der Wert des 0,9-Quantils des $L_{1,20}$ mit der Entfernung zu. Er beträgt bei 100 m maximal 5 dB und bei 1600 m maximal 10,5 dB.
2. Bei gleicher Entfernung nimmt der Wert des 0,9-Quantils des $L_{1,20}$ mit steigender Frequenz zu; bei 800 m. z.B. von ca. 6 dB bei 250 Hz auf ca. 9 dB bei 2 kHz.
3. Diese Zunahme der Dämpfung mit abnehmender Frequenz ist nicht durch den Vorgang der Dämpfung durch Molekularabsorption bedingt, da dieser durch die Normierung bereits eliminiert ist. Es liegt die Vermutung nahe, daß diese Frequenzabhängigkeit auf das Vorhandensein von Zusatzdämpfungen infolge Bodenabsorption zurückzuführen ist.

Verwendet man analog zur Kennzeichnung seltener niedriger Pegel die Summenhäufigkeitsverteilung der L_{99} und hier wiederum das 0,1-Quantil, so stellt dies einen Pegelwert dar, der in 90 % aller beobachteten Fälle von 99 % aller gemessenen Pegel nicht mehr unterschritten wird. Auch bezüglich dieses Wertes beobachtet man eine entfernungsabhängige betragsmäßige Zunahme desselben von maximal 7,2 dB bei 100 m und 22 dB bei 800 m. Der Wert von 24 dB bei 1600 m ist sicherlich aus vorgenannten Gründen infolge zu geringen Störabstandes zu klein.

Die Zunahme der Zusatzdämpfung des 0,9-Quantils der $L_{1,20}$ zu niedrigeren Frequenzen hin tritt beim 0,1-Quantil der $L_{99,20}$ sogar

noch deutlicher zutage (14 dB Dämpfung bei 2 kHz und 22 dB Dämpfung bei 250 Hz) als bei ersterem. Durch Bildung der Pegeldifferenz beider Quantile ($L_{1,20,0,9} - L_{99,20,0,1}$) erhält man ein Maß für die Spannweite, in der je Entfernung und Frequenz ca. 98 % sämtlicher beobachteter Pegel anzutreffen sind, welches nur in 10 % über- bzw. unterschritten wird.

Alle hier diskutierten Ergebnisse sind zahlenmäßig in den Tabellen 5 bis 8 wiedergegeben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Messungen wurden bei den Einzelmessungen neben den Prozentpegeln auch die üblicherweise benutzten energieäquivalenten Dauerschallpegel ermittelt.

Während die Prozentpegel charakteristische Aussagen zur Struktur von Pegelverläufen ermöglichen, also beispielweise Auftretenshäufigkeiten und Pegelhöhen seltener Pegelspitzen oder die Abschätzung des noch vorhandenen Hintergrundgeräusches erlauben - wird in vielen Richtlinien der energieäquivalente Dauerschallpegel als mittleres Maß für Lärmbelastungen verwendet. Die Summenhäufigkeitsverteilungen dieser Pegel sind in den Abbildungen 22 und 23 graphisch dargestellt. Ein Vergleich mit den Summenhäufigkeitsverteilungen der L_{10} und L_{50} der Abbildungen 20 und 21 bestätigt, daß sie erwartungsgemäß leicht oberhalb vom L_{50} und stets deutlich unterhalb des L_{10} verlaufen. Das 0,5-Quantil, also der Wert der Summenhäufigkeitsverteilungen der L_{Fm} , der gleichhäufig als über- bzw. unterschritten beobachtet wurde, liegt bei allen Frequenzen für die Entfernungen 100 m, 200 m und 400 m geringfügig unter dem Normierungspegel (0 bis -1,7 dB) und bei 800 m zwischen 2,2 dB und 3,6 dB unter diesem. Sein Pegelabstand zum entsprechenden 0,5-Quantil der L_{10} -Verteilungen beträgt bei allen Frequenzen und den Entfernungen 400 m, 800 m und 1600 m 2,5 bis 3,5 dB. Dieser von Entfernung und Frequenz unabhängige Pegelabstand in den Schwerpunktslagen des 0,5-Quantils der Verteilungen macht deutlich, daß die vorhandenen Einflüsse von Frequenz und Entfernung sich in den Verteilungsrändern und weniger im mittleren Bereich ausprägen.

In den Kurvenverläufen der Abbildungen 22 und 23 ist jeweils der arithmetische Mittelwert eingezeichnet, der infolge des schon früher erläuterten Abknickens geringfügig unter dem 0,5-Quantil liegt.

Dieser Wert ist bekanntlich ein stabiler Schätzer für die Lokation von Verteilungen und soll hier näher betrachtet werden.

Geht man davon aus, daß die Verläufe der Abbildungen 22 und 23 aus sämtlichen Messungen entstanden sind, demzufolge sämtliche Einflüsse nicht nur meteorologischer Art widerspiegeln, und sie sich ferner aus annähernd gleich vielen Mitwind-, Gegenwind- und Querwind-situationen zusammensetzen, so können diese Mittelwerte in den Fällen zur Prognose herangezogen werden, in denen keine ausgeprägte Vorzugswindrichtung zu beachten ist. Die Vielzahl der Messungen und der lange Erhebungszeitraum weisen diesen Mittelwerten trotz bestehender Vorbehalte hinsichtlich ihrer Repräsentanz den Charakter von Langzeitaussagen zu.

Quantitativ bedeutet dies, daß der auf der Basis des energieäquivalenten Dauerschallpegels gewonnene langfristige Beurteilungspegel für Ausbreitungsprognosen unter obigen Randbedingungen den Angaben der Tabelle 9 entspricht. Es ergeben sich je nach Frequenz für eine Prognose Abschlüsse auf den Normierungspegel:

Entfernung zur Quelle	Frequenz (Oktave)			
	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
100 m	1.2	0.8	0.1	1.0
200 m	0.6	1.6	0.8	1.4
400 m	1.9	1.3	0.2	1.2
800 m	5.0	4.5	3.5	4.1
(1600 m	4.1	4.8	3.1	2.2)

Die Pegelangaben entsprechen in dB dem arithmetischen Mittelwert aller für energieäquivalente Dauerschallpegel über 20 Minuten beobachteten Zusatzdämpfungen.

Die Angaben bei 1600 m sind aufgrund des zu geringen Störabstandes an diesem Meßpunkt sicherlich etwas zu gering und werden hier wie auch sonst nur der Vollständigkeit halber angegeben. Die Pegelabschlüsse geben aufgrund der Art ihres Zustandekommens nur anonymisiert das Maß aller Einflüsse auf die Schallausbreitung wieder. In konkreten Situationen vorherrschender Windrichtung beispielsweise werden durch sie die zu erwartenden Mittelungspegel nur ungenau abgeschätzt. Daher wird im folgenden Abschnitt das Datenmaterial auf

Schichtungsmöglichkeiten zum Zwecke einer differenzierteren Prognose untersucht.

4.5. Der Einfluß von Meteorologie und Boden auf die Schallausbreitung

Nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, herrscht also ein positiver Windgradient, so werden wie im Kapitel 2 beschrieben, die Schallstrahlen auf ihrem Ausbreitungsweg in Windrichtung zum Erdboden hin gekrümmt. Diese Brechung der Schallstrahlen zur Erdoberfläche hin stellt eine günstige Schallausbreitungssituation dar, weil kaum Energie in den oberen Halbraum abgestrahlt wird. Darüber hinaus bewirkt eine solche Windsituation eine Erhöhung des Reflexionswinkels über den Winkel hinaus, der sich allein aus der Geometrie der Abb. 1 ergibt. Dieses hat wiederum eine Reduzierung der stark vom Reflexionswinkel und der Frequenz abhängigen Zusatzdämpfung durch die Bodenimpedanz zur Folge. Es ist also bei Schallausbreitung in Mitwindrichtung aus beiden genannten Ursachen nur mit sehr geringen Zusatzdämpfungen zu rechnen. In der Gegenwindrichtung, d.h. bei Ausbreitung des Schalls gegen die Windrichtung, kehren sich die Effekte um. Die Schallstrahlen werden vom Erdboden weg in den oberen Halbraum gebrochen, und es bildet sich eine Zone des Schallschattens aus. Die Schallpegelabnahme erfolgt vom Rand der Schattenzone aus sehr viel schneller mit der Entfernung als es der sphärischen Ausbreitungsdämpfung und der Dämpfung durch Molekularabsorption entspricht. Infolge von Streuung der Schallwellen tritt jedoch an der Schattengrenze kein Sprung des Schallpegels auf. Diesem Brechungseffekt überlagert sich eine Zunahme der Bodendämpfung, da die Brechung der Schallstrahlen in den oberen Halbraum eine Verringerung des Einfallswinkels zur Folge hat. Die hier geschilderte Situation eines positiven Windgeschwindigkeitsgradienten ist typisch für den Tageszeitraum, in dem diese Untersuchung stattfand. In den Nachtstunden flacht die Windtätigkeit meist ab, und es herrschen in Verbindung mit einem positiven Temperaturgradienten stabilere Ausbreitungszustände vor.

Dem Einfluß des Windgradienten überlagert sich allgemein der des Temperaturgradienten. Eine mit der Höhe zunehmende Temperatur, also ein positiver Temperaturgradient, bewirkt eine mit der Höhe zuneh-

mende Schallgeschwindigkeit und damit eine Brechung der Schallstrahlen zur Erdoberfläche hin. Da dieser Einfluß im Gegensatz zum Einfluß des Windgradienten nicht richtungsspezifisch ist, unterstützt er in Mitwindrichtung die Schallausbreitung und reduziert in Gegenwindrichtung den Einfluß des Windgradienten - verringert also die Ausbildung von Schattenzonen. Ist er groß genug, wird sogar jegliche Schattenzone aufgehoben. Umgekehrt wird durch einen negativen Temperaturkoeffizienten die Bildung von Schattenzonen durch Brechung der Schallstrahlen in den oberen Halbraum bewirkt. Aus Temperatur und Windgradient läßt sich nach WIENER und KEAST [10] näherungsweise die Schattengrenze berechnen.

$$R = \left(\frac{2 C_0}{\beta \cdot \cos \phi - \alpha} \right)^{1/2} (\sqrt{h_s} + \sqrt{h_r}) \quad ; \quad \alpha = \frac{C_0}{2T_0} \gamma \quad (5)$$

h_r = Empfängerhöhe; h_s = Quellenhöhe

R = Entfernung zwischen Quelle und Schattengrenze

γ = Temperaturgradient

α = der durch γ verursachte Schallgeschwindigkeitsgradient

C_0 = Geschwindigkeit des Luftschalls unter Normalbedingungen

β = Windgeschwindigkeitsgradient

ϕ = Winkel zwischen Windrichtung und Meßachse

T_0 = Bezugstemperatur

Für einen Fall, wie er tagsüber während der Messung häufig vorkam, ergibt sich mit $\gamma = -0,2^\circ\text{C m}^{-1}$ und $\beta = 0,7 \text{ s}^{-1}$ eine Schattengrenze von 180 m für die Gegenwindrichtung, wenn der Meßstrahl in dieser Richtung liegt ($\phi = 0$).

Da in der Regel tagsüber die Wirkungen positiver Windgeschwindigkeitsgradienten die des typisch leicht negativen Temperaturgradienten überwiegen, ist zu erwarten, daß ein deutlicher Einfluß von Mit- und Gegenwind auf die Höhe des Schallpegels in den Entfernungen nachweisbar ist, in denen die Ausbildung von Schattenzonen möglich ist.

Das gesamte Meßwertkollektiv wurde daraufhin in Mit- und Gegenwind-situationen geschichtet. Hierbei wurde nicht nach der Höhe der Windgeschwindigkeit unterschieden und der Winkelbereich der jeweiligen Windrichtungen auf $\pm 45^\circ$ begrenzt; d.h., Querwindsituationen

wurden nicht berücksichtigt. Das Ergebnis dieser Schichtung ist als Summenhäufigkeitsverteilung für die $L_{Fm,20}$ in den Abbildungen 24 und 25 graphisch und in den Tabelle 10 bis 13 numerisch dargestellt. Eine Analyse liefert folgendes Ergebnis:

1. In Mitwindrichtung liegt der arithmetrische Mittelwert der Pegel mit 0,8 dB geringfügig über bzw. mit 2,8 dB deutlich unter dem Normierungspegel. Dies gilt für den gesamten Entfernungsbereich. Im Prognosefall für Mitwindausbreitung sind nach den hier vorliegenden Ergebnissen also selbst für große Entfernungen (1600 m) keine Pegelabschläge zulässig, die mehr als 1 bis 2 dB betragen.
2. Die Mitwindpegel unterscheiden sich in ihrer Höhe bis zu Entfernungen von 400 m nicht signifikant von den Mittelungspegeln über sämtliche beobachteten Ausbreitungssituationen. Bei Entfernungen von 800 m und 1600 m liegen die Mitwindpegel bis zu 1,5 dB oberhalb der über alle Situationen gemessenen Mittelungspegel der Abbildungen 24 und 25.
3. Es sind keine nennenswerten Frequenzeinflüsse auf die Mitwindpegel bei bestimmten Entfernungen festzustellen, d.h., in Mitwindrichtung wurden keine Bodendämpfungen beobachtet. Diese Tatsache steht auf den ersten Blick im Gegensatz zu den in der Literatur [11] und im Kapitel 2 enthaltenen Angaben zum Einfluß der Bodendämpfung. Betrachtet man die Randbedingungen der vorliegenden Untersuchung jedoch näher, so erklärt sich der fehlende Einfluß der Bodendämpfung wie folgt:
 - a) Im Gegensatz zu den dort verwendeten Schmalband- bzw. Terzanalysen, tritt hier die starke Frequenzabhängigkeit der Bodendämpfung infolge des oktavbreiten Anregungssignals nur geringer in Erscheinung.
 - b) Im Entfernungsbereich bis 400 m liegen die Reflexionswinkel der Schallstrahlen aufgrund der Sender- und Empfängerhöhe von 10 m bei Werten $\psi = 3^\circ$. Somit kann nicht mit steifendem Schalleinfall bei der Reflexion am Boden gerechnet werden wie bei den in [11] genannten Untersuchungen.

- c) Bei Berücksichtigung des Windgradienten ergeben sich durch die Krümmung der Schallstrahlen zur Erdoberfläche hin (Mitwindrichtung) auch für die Entfernungen > 400 m größere Reflexionswinkel und damit geringere Zusatzdämpfungen durch den Bodeneinfluß als den geometrischen Verhältnissen ($800 \text{ m} : \psi_{\text{geom.}} = 1,4^\circ$; $1600 \text{ m} : \psi_{\text{geom.}} = 0,7^\circ$) nach zu erwarten ist.

Diese Überlegungen werden qualitativ durch die Arbeit von CHESSEL [12, 13] und quantitativ durch das von CASANOVA-MARTINEZ [14] ausgearbeitete strahlenoptische Berechnungsprogramm für Schallstrahlen gestützt.

4. Mit wachsender Entfernung zur Quelle, beginnend bei 400 m, zeigen sich deutliche Zusatzdämpfungen der Pegel in Gegenwindrichtung gegenüber der Mitwindrichtung. Sie betragen bis zu 1,7 dB bei 400 m, 11,7 dB bei 800 m und 17,5 dB bei 1600 m. Der starke Anstieg der Zusatzdämpfungen mit der Entfernung ist auf das Einsetzen der Schattenzone infolge Brechung der Schallstrahlen in den oberen Halbraum zurückzuführen und deckt sich qualitativ mit den Untersuchungsergebnissen von WIENER und KEAST [10] .
5. Neben der Zusatzdämpfung durch Refraktion zeigen sich deutliche Einflüsse der Frequenz, die auf Dämpfungen durch die Reflexion der Schallstrahlen am Erdboden zurückzuführen sind. Die Reflexionswinkel liegen bei 800 m und 1600 m im Bereich streifenden Einfalls und werden infolge des Einflusses des Windgradienten in Gegenwindrichtung zusätzlich kleiner. Dies bewirkt eine weitere Absenkung des Gegenwindpegels bei 800 m und den Frequenzen 250 Hz und 500 Hz um ca. 3 dB gegenüber den Frequenzen 1 kHz und 2 kHz. Bei 1600 m tritt dieser Einfluß mit ca. 8 dB zwischen den Pegeln bei 250 Hz und 2 kHz schon deutlicher hervor, wie den Abbildungen 24 und 25 zu entnehmen ist.
6. Eine Analyse der während der Messungen beobachteten Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten ergibt nach der von WIENER und KEAST angegebenen Näherungsgleichung zur Bestimmung der Schattengrenze Werte zwischen 100 und 250 m. Ein Vergleich mit den Meßergebnissen für die Gegenwindsituation zeigt jedoch, daß der Einsatz des Schallschattensbereiches bei annähernd der dop-

pelten Entfernung vorliegt. Dies könnte darauf hindeuten, daß in der von WIENER und KEAST angegebenen Näherung der Einfluß von Sender und Empfängerhöhe durch einen zu kleinen Exponenten berücksichtigt wurde. Andererseits stimmt der Entfernungsbereich für die deutliche Zunahme der Dämpfung durch Refraktion und Bodenabsorption gut mit dem durch die Geometrie bestimmten Bereich des Übergangs zur streifenden Reflexion überein.

Faßt man die vorgenannten sechs Punkte im Ergebnis zusammen, so gilt unter den vorliegenden Randbedingungen der Sender- und Empfängergeometrie:

1. In Mitwindrichtung dürfen weder frequenz- noch entfernungsabhängige Abschläge auf den Normierungspegel erfolgen, die 2 dB übersteigen.
2. In Gegenwindrichtung sind für Entfernungen > 400 m frequenz- und entfernungsabhängige Zusatzdämpfungen infolge Bodenabsorption und Refraktion bis zu 17 dB bei der Prognose zu berücksichtigen.

Alternativ zur Schichtung in $\pm 45^\circ$ breite Sektoren für die Mit- und Gegenwindsituationen wurde eine Regressionsanalyse über alle gemessenen $L_{Fm,20}$ auf den Einfluß des Vektorwindes durchgeführt. Jedem Pegelwert wurde der mit dem Cosinus des Winkels zwischen Wind- und Meßstrahlrichtung multiplizierte Windgeschwindigkeitsmittelwert zugeordnet. Die aus Pegel und Vektorwind gebildeten Wertepaare wurden in die Diagramme der Abb. 26 eingezeichnet und mit einem Rechner drei verschiedene Regressionsansätze optimiert. Die Ergebnisse der Rechnung sind für die drei gewählten Modelle - lineare, quadratische und exponentielle Regression - in die Abbildung eingetragen.

Ausgehend vom stärksten Gegenwind erkennt man bei allen vier Frequenzbereichen eine Zunahme des Pegels mit ansteigendem Vektorwind. Die Zunahme ist frequenzabhängig und beträgt bei linearer Regression ca. 1,4 dB je m/s Windgeschwindigkeitsänderung und 250 Hz. Die Steigungen der Regressionsgeraden reduzieren sich mit ansteigender Frequenz auf ca. 0,6 dB je m/s bei 2 kHz. Zu quantitativ ähnlichen Angaben gelangen auch PARKIN und SCHOLES [11] für eine Entfernung

von 615 m bei 1,8 m Sender- und 1,2 m Empfängerhöhe sowie negativen Temperaturgradienten.

Von den drei willkürlich gewählten Regressionsansätzen erscheint der Exponentialansatz vom Augenschein und aus physikalischen Gründen der vorerst beste zu sein, da er die Tatsache berücksichtigt, daß aus Gründen der Energiebilanz ein Pegelanstieg begrenzt sein muß.

Die Abbildung 26 zeigt insbesondere im Bereich negativen Vektorwindes wie groß die Pegelunterschiede selbst bei 20minütiger Mittelung von Momentanwerten bei gleichem Vektorwind ausfallen (19 dB, 250 Hz). Ferner erkennt man, daß im Bereich geringer Vektorwindgeschwindigkeit (-1,0 bis 2,0 m/s) bei gegenüber dem stärkeren Gegenwind reduzierter Schwankungsbreite der Pegelwerte die höchsten Pegel auftreten. Oberhalb von 2 m/s sind die Pegel kaum noch von der Windgeschwindigkeit abhängig und weisen engere Schwankungsbreiten auf. Damit aber wird eine Schichtung der beobachteten Pegel nach dem Vektorwind innerhalb der Schichtung lediglich nach Mit- und Gegenwind fragwürdig, denn in Mitwindrichtung besteht nur geringe Abhängigkeit der Pegel vom Vektorwind und in Gegenwindrichtung überlassen die großen Schwankungsbreiten eine solche Schichtung zu sehr dem Zufall. Andererseits sind aber die Pegelunterschiede für die Mit- und Gegenwindsituationen so deutlich, daß die Schichtung der Abb. 26 allein nach Mit- und Gegenwind hierdurch gerechtfertigt erscheint.

Zu einem quantitativ ähnlichen Ergebnis gelangt man, wenn man die Abhängigkeit der Pegelwerte von Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten untersucht. Hierzu wurden für die Entfernung 800 m und die Frequenz 500 Hz die jedem gemessenen Pegelwert ($L_{Fm,20}$) zugeordneten Gradienten ermittelt und in Abb. 27 zusammengefaßt. Die Entfernung von 800 m wurde ausgewählt, da sie in Gegenwindrichtung im Bereich der Schattenzone sowie streifenden Einfalls liegt und demnach deutlichen Gradienteneinfluß erwarten läßt.

Der aus bodennahen Messungen in 16 m und 2 m Höhe in Anlehnung an die Empfehlungen von PARKIN und SCHOLES berechnete Windgeschwindigkeitsgradient wurde mit dem Cosinus des Winkels zwischen Wind-

richtung und Richtung des Meßstrahls multipliziert. Durch Subtraktion des ebenfalls zwischen 16 m und 2 m bestimmten Temperaturgradienten vom Windgeschwindigkeitsgradienten wurden die in Abb. 27 angegebenen Abzissenwerte δ ermittelt. Die Abbildung läßt sich ähnlich der Abb. 26 in folgende drei Bereiche unterteilen:

1. Im Mitwindbereich ($\delta < -0,5$) liegen die gemessenen Pegel geringfügig unter dem Normierungspegel. Sie weisen untereinander nur geringe Schwankungen auf und sind nicht von der absoluten Höhe des Gradienten abhängig.
2. Im neutralen Bereich $-0,5 \leq \delta \leq 0,5$, der Situationen kleiner Gradienten, sowie kleiner Windgeschwindigkeit bis hin zur Windstille und leichte Inversionen umfaßt, treten aufgrund der hier herrschenden günstigen Ausbreitungsbedingungen die höchsten Pegel auf. Diese Pegel übersteigen den Normierungspegel geringfügig und weisen etwas größere Pegelschwankungen als die des Mitwindbereiches auf.
3. Im Gegenwindbereich $\delta > 0,5$ tritt ein starker Pegelabfall sowie eine deutliche Zunahme der Pegelschwankungen auf. Betrachtet man die Schwankungsbreite der Pegel bei $\delta = 1$, die sich mit acht Einzelmessungen zwischen 35,8 dB und 49,8 dB zu einer Breite von 14 dB ergibt und damit die Schwankungsbreite aller Gegenwind-situationen ($\pm 45^\circ$) abdeckt, so wird deutlich, daß auch im Gegenwindbereich die absolute Größe des Gradienten nicht als dominierende Einflußgröße auf die Höhe des Pegels bzw. die Größe der Zusatzdämpfung angesehen werden kann, solange dieser lediglich größer als 0,5 ist. Auch eine genauere Analyse der diesen acht Pegelwerten zuzuordnenden meteorologischen Situationen (s. Tabelle 14) weist auf keinerlei nachweisbaren, pegelbestimmenden Einfluß hin. Dies gilt sowohl für die Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, dem Temperaturgradienten und dem Winkel zwischen Windrichtung und Meßstrahlrichtung. Die tatsächliche Ursache dieser Pegelschwankungen wird auf die Auswirkungen von Turbulenzen des Windes zurückgeführt und macht einmal mehr auf die Fragwürdigkeit der Abbildung der wahren meteorologischen Verhältnisse durch das verwendete meßtechnische Instrumentarium aufmerksam. Durch letzteres können die zeitlichen Änderungen der meteorologischen

Parameter nicht so schnell erfaßt werden, wie sie sich auf die Höhe des Schallpegels auswirken. Auch würde der erforderliche Aufwand zur notwendigen Messung des räumlichen, vektoriellen Windfeldes alles mögliche Maß übersteigen.

Aus diesem Sachverhalt wird ebenso wie aus der Analyse der Abhängigkeit der Pegel von der Größe des Vektorwindes der Schluß gezogen, sich hinsichtlich einer Ausbreitungsprognose im Wissen um die Fragwürdigkeit, andere Einflüsse nachweisen zu können, letztlich auf die klare Unterscheidung in die meteorologischen Klassen Mitwind und Gegenwind zu beschränken.

4.6. Korrelation des energieäquivalenten Dauerschallpegels mit den Prozentpegeln

Um die Möglichkeit eines funktionalen Zusammenhanges zwischen den beobachteten energieäquivalenten Dauerschallpegeln einer Einzelmessung und den Prozentpegeln L_1 bzw. L_{99} zu prüfen, wurde das Kollektiv aller Einzelmessungen am Beispiel der Frequenz 1 kHz für alle Entfernungen mit den bekannten Methoden der Statistik [17] auf vorhandene Korrelation untersucht.

Für die jeweils einander zuzuordnenden Kollektive der als gleichwertig angesehenen Zufallsvariablen L_m und L_1 bzw. L_m und L_{99} wurde der Produktmoment-Korrelationskoeffizient R geschätzt, der ein Maß für den Grad des Zusammenhangs zwischen beiden Variablen der Stichprobe darstellt.

Das durch Quadrieren von R gebildete Bestimmtheitsmaß $B=R^2$ gibt an, wieviel % der Gesamtstreuung aus der Variation der Einflußgröße durch lineare Regression zu interpretieren sind. Beträgt $B=1$, so liegen alle Werte auf der Regressionsgeraden. In der Abbildung 28 sind die Korrelogramme für die beiden genannten Paare von Kollektiven sowie die errechneten Korrelationskoeffizienten dargestellt. Für eine weitergehende Analyse sind in Tabelle 15 neben den Korrelationskoeffizienten die arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Pegeldifferenzen $L_1 - L_{Fm}$ bzw. $L_{99} - L_{Fm}$, deren Standardabweichungen sowie Minimal- und Maximalwerte derselben angegeben.

Es ist ersichtlich, daß beide Korrelationskoeffizienten (R für L_1/L_{Fm} und R für L_{99}/L_{Fm}) für jede einzelne Entfernung zum einen fast gleichgroß und zum anderen von ähnlicher Größenordnung sind. Hieraus wird geschlossen, daß sowohl die seltenen hohen (L_1) als auch die seltenen niedrigen Pegel (L_{99}) in ähnlicher Weise mit dem energieäquivalenten Dauerschallpegel korreliert sind. Dies ist ein Hinweis darauf, daß der L_{99} nicht durch Hintergrundgeräusche beeinflusst war. Wäre er durch sie beeinflusst gewesen, dann sicherlich stärker als der höherpegelige L_{Fm} und mit der Folge eines niedrigeren Korrelationskoeffizienten als desjenigen zwischen L_1 und L_{Fm} .

Ferner kann der Tabelle 15 ein Anwachsen des Korrelationskoeffizienten mit der Entfernung bis auf Werte von 0,9 ab 800 m entnommen werden. Es wäre falsch, hieraus zu schließen, daß sich mit wachsender Entfernung infolge der hohen Korrelation die Prozentpegel genauer aus dem Mittelungspegel bestimmen ließen. Der hohe Korrelationskoeffizient ist vielmehr auf die gegenüber den kleinen Entfernungen wesentlich größere Variation der Einflußgrößen als auf einen weniger durch Zufälle bestimmten Zusammenhang zwischen den zu korrelierenden Variablen zurückzuführen. Demnach führt auch die sich in einer kleineren Standardabweichung ausdrückende Variation der Einflußgröße bei der Entfernung 100 m zu kleineren Korrelationskoeffizienten als in 800 m oder 1600 m Entfernung. Dennoch ist der aus der Variation des L_{Fm} und dem Korrelationskoeffizienten abzuschätzende Wertebereich der Prozentpegel in 100 m Entfernung geringer und damit genauer angebar als in 1600 Metern.

In Erweiterung zur obigen Fragestellung : Wie sind für alle Situationen die Prozentpegel mit dem L_{Fm} in Abhängigkeit von der Entfernung korreliert? wird im folgenden die Fragestellung untersucht: Wie sind für Mit- und Gegenwind die zugehörigen Prozentpegel und L_{Fm} -Pegel in Abhängigkeit von der Frequenz miteinander korreliert? Hierzu sind in den Abbildungen 29 u. 30 die entsprechenden Korrelogramme und in Tabelle 16 die Kenngrößen angegeben. Auch für diesen Fall ergibt sich, daß sowohl L_1 als auch L_{99} aufgrund gleicher bzw. nicht sehr unterschiedlicher Korrelationskoeffizienten auf gleiche Art mit dem energieäquivalenten Dauerschallpegel verknüpft sind. Dies gilt gleichermaßen für Mitwind und für Gegenwind sowie für

alle untersuchten Frequenzbereiche. Eine Korrelation zwischen Mit- und Gegenwindpegeln wurde nicht untersucht, da beide nicht ursachenrelevant miteinander verknüpft sind.

5. Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit anderen Prognosemodellen

Unter mehreren Schallausbreitungs-Prognosemodellen wurden zum Zwecke des Vergleichs mit den Ergebnissen dieser Untersuchung zwei Verfahren ausgewählt, deren Voraussagen sich nicht auf rechnerische Aussagen, sondern wie auch hier auf reale Ausbreitungsmessungen abstützen. Das erste Modell wurde von CONCAWE unter dem Titel "The propagation of noise from petroleum and petrochemical complexes to neighbouring communities" 1981 veröffentlicht [9] und behandelt die Schallausbreitung im Freien bei verschiedenen meteorologischen Ausbreitungsklassen. Als zweites Beispiel wurden die Aussagen der VDI-Richtlinie 2714 "Schallausbreitung im Freien" herangezogen, die ein in der Bundesrepublik verbreitetes Prognosemodell darstellt.

5.1. Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Voraussagen des CONCAWE-Modells

Beim CONCAWE Modell werden vom Normierungspegel, der sich ebenso wie in dieser Untersuchung durch Berücksichtigung der Quellstärke und des evtl. vorhandenen Richtwirkungsmaßes der Schallquelle sowie nach Abzug der geometrischen Ausbreitungsdämpfung und der Dämpfung durch Molekularabsorption errechnet, zusätzliche Dämpfungen subtrahiert, die sich aus für die Schallausbreitung relevanten, meteorologischen Stabilitätsklassen, der Sender-Empfänger-geometrie sowie der Zusatzdämpfung durch den Boden im Einzelfall anhand der dort erarbeiteten Daten bestimmen lassen.

Als erste dieser Zusatzdämpfungen wird in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse von PARKIN & SCHOLES [11] die entfernungs- und frequenzabhängige Größe der Bodendämpfung K_3 eingeführt. Die

entsprechenden Werte sind für die Oktaven 63 Hz bis 4 kHz für Entfernungen bis zu 2 km tabelliert bzw. als Diagramme dargestellt.

Der Bodendämpfung K 3 wird die durch Refraktion der Schallstrahlen infolge des Wind- und Temperaturgradienten entstandene meteorologische Zusatzdämpfung K 4 hinzuaddiert. Hierzu werden sechs verschiedene, meteorologische Ausbreitungsklassen zugelassen, bei denen die während der Messung gewonnenen meteorologischen Daten zuerst einer der Stabilitätsklassen A bis F nach PASQUILL [15] zugeordnet werden und anschließend aus PASQUILL-Klasse und Vektorwind die endgültige Einordnung in eine der sechs Klassen des CONCAWE Modells erfolgt.

Die entsprechende PASQUILL-Klasse ist tagsüber von der Größe der einfallenden Sonnenenergie und des Nachts vom Wolken-Bedeckungsgrad abhängig. Die zur Zeit der Messung vorliegende Kombination aus Sonnenenergie (Bedeckungsgrad) und Betrag der Windgeschwindigkeit entscheidet dann über die Klassenzuordnung; d.h., die PASQUILL-Klasse berücksichtigt in indirekter Weise den mit der Sonnenenergie verknüpften Windgradienten. Die Windrichtung schließlich wird bei der Einordnung in eine der sechs meteorologischen Klassen derart berücksichtigt, daß innerhalb einer PASQUILL-Klasse der Übergang von starkem Mitwind in starken Gegenwind mit aufsteigender Klasse erfolgt. Daher entsprechen auch die unteren CONCAWE-Klassen 1 bis 3 der Mitwindsituation, die Klasse 4 der meteorologisch neutralen Situation und die Klassen 5 und 6 der Gegenwindsituation.

Die der einzelnen Klasse entsprechenden Zusatzdämpfungen sind nach Oktavmittenfrequenz und Entfernung tabelliert. Die dort angegebenen Werte beziehen sich auf Untersuchungsergebnisse von PARKIN & SCHOLE sowie DELANY [11] und [16].

Als letzter Dämpfungsterm, wenn man einmal von den hier nicht in Betracht zu ziehenden Dämpfungen durch innere Abschattung im Bereich der Quelle sowie den durch Beugungen an Hindernissen bedingten Dämpfungen absieht, wird im CONCAWE-Modell der Einfluß der Sender-Empfängergeometrie auf die Schallausbreitung behandelt. Diese als K 5 tabellierte Zusatzdämpfung errechnet sich nach der Beziehung $K 5 = (K 3 + K 4 + 3) \cdot (\gamma - 1)$ dB. γ stellt hier eine Funktion

des aus der Sender-Empfänger-Geometrie mit $\psi = \text{tg}^{-1} \frac{hs+hr}{d}$ berechneten Reflexionswinkels des am Erdboden reflektierten geradlinigen Schallstrahls dar. γ ist Null für alle $\psi > 5^\circ$ und wächst exponentiell beginnend ab 5° auf den Wert 1 bei $\psi = 0^\circ$ an. Mit der Funktion $\gamma(\psi)$ wird also der Einfluß des streifenden Schalleinfalls berücksichtigt. Klammert man einmal für einen Augenblick den für festes ψ konstanten Term $3 \cdot (\gamma - 1)$ aus der Bestimmungsgleichung für K_5 aus und addiert sämtliche genannten Zusatzdämpfungen, so erhält man

$$\begin{aligned} \sum K_i &= K_3 + K_4 + K_5 & (6) \\ \sum K_i &= K_3 + K_4 + (K_3 + K_4) (\gamma - 1) \\ \sum K_i &= (K_3 + K_4) \cdot \gamma \end{aligned}$$

In dieser Schreibweise wird klar, daß γ , also letztlich ψ , der bestimmende Einfluß auf die Höhe der Zusatzdämpfung zugewiesen wird. Außerdem ist es evident, daß ψ sich gleichsinnig und mit gleichem Relativanteil auf die Zusatzdämpfung durch den Erdboden sowie auf die Zusatzdämpfung durch Refraktion auswirkt. Schließlich wirken sich demnach meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung nur im Bereich streifenden Schalleinfalls ($0^\circ < \psi < 5^\circ$) aus und nicht schon bei viel geringeren Entfernungen, wenn für diese die Schattenzone nach [11] einsetzt.

Der Term $3 \cdot (\gamma - 1)$ kann bei der Erläuterung dieses Wirkungsmechanismus außer acht bleiben, da er als rein additives Glied weder die Bodendämpfung noch die Dämpfung durch Refraktion beeinflusst.

Aufgrund vorliegender meteorologischer Meßergebnisse war es möglich, sämtlichen gemessenen Pegeln die entsprechende meteorologische Kategorie nach dem CONCAWE-Modell zuzuordnen. Da die Reflexionswinkel für die Entfernung 100 m und 200 m größer als 5° waren, ergeben sich nach CONCAWE auch keine Zusatzdämpfungen für diese Entfernungen. In der Tabelle 12 sind demnach für 400 m und 800 m die nach dem CONCAWE-Schema klassierten Ergebnisse dieser Untersuchung den Voraussageergebnissen nach CONCAWE gegenübergestellt. Auf einen Vergleich für die Entfernung 1600 m mußte aus Gründen zu geringer Stichprobenmächtigkeit verzichtet werden. Wegen des expo-

nentiellen Verlaufs der Funktion $\gamma(\psi)$ wirken sich in 400 m Entfernung die Zusatzdämpfungen mit ca. 18 % und bei 800 m mit ca. 50 % ihres Maximalwertes ($\gamma = 1$ für $\psi = 0$) aus.

Bei den in Tabelle 17 angegebenen CONCAWE-Voraussagenpegeln wurde der Term $3 \cdot (\gamma - 1)$ dB des Dämpfungsgliedes K_5 zu Null angenommen, da dann die Pegeldifferenzen zwischen Messung und Voraussage um 0 dB schwanken, andererseits bei seiner Berücksichtigung alle Ergebnisse in 400 m um 2,4 und in 800 m um 1,5 dB systematisch zu höheren Voraussagepegeln verschoben würden.

Da die CONCAWE-Ergebnisse nur für Sender- und Empfängerhöhen $h_{s,r} \leq 2$ m verifiziert sind und bei diesen Höhen γ zu 1 angenommen wird, ergibt sich der Dämpfungsterm $3 \cdot (\gamma - 1)$ zu Null; d.h., sein quantitativer Einfluß konnte nicht durch Messungen erwiesen werden. Mißt man jedoch wie hier bei größeren Sender- und Empfängerhöhen, so führt seine Anwendung zu systematischen Differenzen zwischen Prognose und Messung. Die Anwendbarkeit bzw. Nichtanwendbarkeit dieses Terms sollte durch weitere Untersuchungen überprüft werden.

Führt man den Vergleich ohne Berücksichtigung des Korrekturgliedes $3 \cdot (\gamma - 1)$ zwischen den nach CONCAWE klassierten arithmetischen Mittelwerten der gemessenen Pegel und den Vorhersagepegeln für die einzelnen meteorologischen Kategorien durch, so fällt insgesamt die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Vorhersage auf. Die Pegeldifferenzen liegen in der Mehrzahl der Fälle bei 400 m unter 1 dB und bei 800 m unter 1,5 dB. Mit Ausnahme der Pegeldifferenz von 4,3 dB in der Kategorie 6 bei 800 m und 2 kHz liegen sämtliche Abweichungen zwischen den Meßergebnissen dieser Untersuchung und den Vorhersagepegeln nach CONCAWE unterhalb von 3 dB und dies trotz einer Spannweite der Einzelergebnisse von ca. 20 dB. Sieht man wegen der geringen Schwankungen der Zusatzdämpfungen und der Einzelergebnisse von einer Diskussion der Ergebnisse für die Entfernung 400 m ab, so zeigt der Vergleich bei 800 m doch einige Besonderheiten.

1. In der Oktave 250 Hz liegt der gemessene Pegel in der Kategorie 2 (Gegenwind) um 2,4 dB niedriger und in der Kategorie 6 um 2,3 dB höher als der Vorhersagepegel; d.h., die gemessene Spannweite von 10,5 dB zwischen Kategorie 2 und Kategorie 6 wird vom Modell

nur etwa halb so groß (5,8 dB) geschätzt.

2. In der Oktave 500 Hz werden in allen Kategorien die gemessenen Pegel mit einer Präzision $\leq 0,7$ dB durch die Vorhersage geschätzt. Die Spannweite zwischen den Kategorien 2 und 6 weisen zwischen Messung und Vorhersage nur eine Differenz von 0,1 dB auf.
3. In der Oktave 1 kHz entspricht der in Kategorie 2 gemessene Pegel dem Vorhersagepegel der Kategorie 1 und der gemessene Pegel der Kategorie 1 dem Vorhersagepegel der Kategorie 2. Dieser Sachverhalt ist jedoch nicht auf ein versehentliches Vertauschen von Zahlen zurückzuführen, sondern deutet vielmehr auf die schon früher erläuterte Zuordnungsschwierigkeit zwischen Pegel und meteorologischer Klasse hin.
4. In der Oktave 2 kHz wird der Gegenwindpegel der Kategorie 2 vom Modell mit nur 0,6 dB Abweichung, der Mittelungspegel und damit auch die Spannweite jedoch um mehr als 3 dB zu hoch geschätzt.

Die vergleichsweise in Tabelle 17 mit aufgeführten Mit- und Gegenwindergebnisse dieser Untersuchung weisen zum Teil größere Spannweiten auf, als die Spannweite zwischen Kategorie 6 und 2 der Meßergebnisse. Der Grund hierfür liegt eindeutig in der die Pegel schärfer trennenden Beschränkung des $\pm 45^\circ$ breiten Auswahlsektors für die Windrichtung, der im CONCAWE-Modell doppelt so groß ist.

Trotz der genannten Vorbehalte hinsichtlich der Zuordnung der Kategorien bzw. einer teilweise zu groß geschätzten Spannweite, zeigt das CONCAWE-Modell insgesamt eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen dieser Untersuchung.

5.2. Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Voraussagen der VDI-Richtlinie 2714

Die VDI-Richtlinie 2714 "Schallausbreitung im Freien" gibt unter Ziffer 7.3 und der Überschrift "Dämpfung durch Wind- und Temperatureinfluß" ein Prognoseverfahren für bestimmte meteorologische Kategorien an. Diese Kategorien lauten:

1. Immissionspegel, der über längere Zeit nur selten erreicht wird.
2. Immissionspegel, der langfristig dem energetischen Mittelwert bei leichtem Mitwind (Windrichtungsschwankungsbreite $\pm 45^\circ$) und leichter Temperaturinversion während der Nachtzeit entspricht (Mitwind-Mittelungspegel).
3. Immissionspegel, der langfristig dem energetischen Mittelwert der Nachtzeit bei etwa gleicher Häufigkeit aller Windrichtungen entspricht (Langzeit-Mittelungspegel).
4. Immissionspegel, der langfristig nur selten unterschritten wird.

Diesen 4 Kategorien sind im Bild 9 der Richtlinie 4 Kurven zugeordnet, die in Abhängigkeit des Sender- Empfängerabstandes unterschiedliche Zusatzdämpfungen ausweisen. Eine Abhängigkeit der Dämpfungsverläufe von der Frequenz wird nicht unterstellt.

Der Vergleich mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen liefert folgendes Bild:

Die Kurve 1, die entfernungsunabhängig dem "Immissionspegel", der über längere Zeit nur selten erreicht wird, die Zusatzdämpfung 0 dB - also letztlich den Normierungspegel - der jeweiligen Entfernung zugeordnet, entspricht dem früher erläuterten 0,5-Quantil der $L_{10,20}$ -Verteilung über sämtliche Meßwerte dieser Untersuchung. Oder anders ausgedrückt: Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Frequenz- und Entfernungsunabhängigkeit der Kurve 1 und quantifizieren den Begriff "über längere Zeit nur selten erreicht" mit dem 50-%-Wert der L_{10} -Summenhäufigkeitsverteilungen aller Momentanwerte zu 0 dB.

Die Kurve 2, die der leichten Mitwindsituation eine mit der Entfernung stetig zunehmende Dämpfung von max. bis zu 3,125 dB zuordnet, wird in Tabelle 7 mit den $L_{Fm,20}$ -Pegeln bei Mitwind verglichen. Wie schon früher ausgeführt, wurde für die Zusatzdämpfungen bei Mitwind keine signifikante Frequenz- und Entfernungsabhängigkeit beobachtet. Daher wird hier vorgeschlagen, die Kurve 2 durch eine entfernungsunabhängige konstante Zusatzdämpfung von 1 dB zu ersetzen. Diese Zusatzdämpfung von 1 dB entspricht dem Mittelwert

der beobachteten Zusatzdämpfungen bei allen Frequenzen und Entfernungen.

Die durch Kurve 3 bezeichneten Zusatzdämpfungen, die bei etwa gleicher Häufigkeit aller Windrichtungen zu berücksichtigen sind, werden mit den über alle meteorologischen Situationen gemittelten Zusatzdämpfungen in Tabelle 7 verglichen. Der infolge zu geringer Stichprobenzahl an Quer- und Gegenwindsituationen bei 1600 m nur bis zu 800 m Meßentfernung mögliche Vergleich der Zusatzdämpfungen zeigt zumindest in der Tendenz aber auch für 800 m in der Quantität eine gute Übereinstimmung der Beobachtungen mit der Voraussage der VDI-2714. Die Kurve 3 wird also durch die vorliegenden Ergebnisse auch dann gestützt, wenn das Kollektiv der meteorologischen Situationen nicht nur wie in der VDI 2714 auf den Nacht-, sondern auch auf den Tageszeitraum ausgedehnt wird. Die Zusatzdämpfungen über alle meteorologischen Situationen zeigen ebenso wie die bei Mitwind beobachteten Dämpfungen keine deutliche Frequenzabhängigkeit.

Die Kurve 4, die letztlich eine Abschätzung der max. Zusatzdämpfungen im Bereich von Schallschattenzonen ermöglichen soll, kann durch die vorliegenden Ergebnisse nicht gestützt werden. Der in Gegenwindrichtung wesentlich kompliziertere Zusammenhang zwischen meteorologischer Situation und der Zusatzdämpfung erfordert hier zwingend die Berücksichtigung der Abhängigkeit der Zusatzdämpfungen von der Frequenz und der Sender- Empfänger-geometrie unter Einbezug der Bodendämpfung. In Anlehnung an vorangegangene Erläuterungen wird daher vorgeschlagen, die Kurve 4 auf der Basis der in dieser Untersuchung bei Gegenwind beobachteten Zusatzdämpfungen wie folgt zu ersetzen:

1. Die Zusatzdämpfungen infolge Meteorologie und Bodeneinfluß werden für die Gegenwindsituation der Kategorie 2 bis zur Entfernung von 400 m vom CONCAWE-Modell übernommen und bei 800 m an die Ergebnisse dieser Untersuchung angepaßt. Hiermit ergibt sich folgender Dämpfungsverlauf:

$$\alpha_{250\text{Hz}} = [-719.2 + 890.99 \lg d - 367.62 (\lg d)^2 + 51.34 (\lg d)^3] \cdot \gamma \text{ dB} \quad (7)$$

$$\alpha_{500\text{Hz}} = [-897.6 + 1135.32 \lg d - 473.29 (\lg d)^2 + 66.00 (\lg d)^3] \cdot \gamma \text{ dB} \quad (8)$$

$$\alpha_{1\text{kHz}} = [-287.7 + 324.34 \lg d - 116.35 (\lg d)^2 + 14.06 (\lg d)^3] \cdot \gamma \text{ dB} \quad (9)$$

$$\alpha_{2\text{kHz}} = [-671.2 + 837.24 \lg d - 348.54 (\lg d)^2 + 48.89 (\lg d)^3] \cdot \gamma \text{ dB} \quad (10)$$

mit $\gamma = 1 - 0.478\psi + 0.068\psi^2 - 0.0029\psi^3$; $\gamma = 1$ für $h_s \leq 2 \text{ m}$ (11)

$$\psi = \text{tg}^{-1} \frac{h_s + h_r}{d}$$

h_s = Senderhöhe in m

h_r = Empfängerhöhe in m

d = Sender-Empfängerabstand in m

2. Das geometrieabhängige Dämpfungsglied nach CONCAWE $3 \cdot (\gamma - 1)$ wird zu 0 angenommen.

Die entsprechenden Kurvenverläufe sind in Abb. 31 wiedergegeben.

6. S c h l u ß b e t r a c h t u n g

Die Prognosegenauigkeit der bei freier Schallausbreitung in verschiedenen Entfernungen zur Schallquelle auftretenden Schallpegel ist naturgemäß an die exakte und vollständige Erfassung der auf die Ausbreitung einwirkenden, physikalischen Zustände des Übertragungsmediums gebunden. Die einwirkenden Zustände des Erdbodens und des meteorologischen Systems, speziell der Turbulenzen, sind zum Teil zeitlich schnell veränderliche Zufallsgrößen, die eine unmittelbare Veränderung des Schallpegels bewirken. Bei auch nur annähernd vertretbarem Aufwand an Geld und Zeit erscheint es auch in Zukunft nicht möglich, das vorhandene, unvollständige Meßinstrumentarium zur Bestimmung der Zustände des Ausbreitungsmediums so zu verbessern und einzusetzen, wie es zur vollständigen Lösung des Problems erforderlich ist. Daher konnten trotz großen Aufwandes auch bei dieser Untersuchung bestehende Ursache-Wirkungsmechanismen nur mit Einschränkungen quantifiziert werden. In Anbetracht der Größe des Unwissens um die freie Schallausbreitung stellt dies dennoch eine Verbreiterung der Aussagebasis von Prognosen dar, die von praktischer Bedeutung ist und, wie in Abschnitt 5.1 und 5.2 ausgeführt, zur besseren Anpassung vorhandener Modelle an die Realität von Nutzen ist.

S c h r i f t t u m

- [1] SOMMERFELD, A.N.:
Propagation of Waves in Wireless Telegraphy.
Ann. Phys. (Paris) 28, 665 (1909); 81 (1926),
S. 1135-1153.
- [2] RUDNICK, I.:
Propagation of an Acoustic Wave Along a Boundary.
J. Acoust. Soc. Amer., 19 (1947), S. 348-356.
- [3] WENZEL, A.R.:
Propagation of Waves along an Impedance Boundary.
J. Acoust. Soc. Amer., 55 (1974), S. 956-963.
- [4] DONATO, R.J.:
Propagation of a Spherical Wave near a Plane Boundary
with Complex Impedance
J. Acoust. Soc. Amer., 60 (1976), S. 34-39.
- [5] EMBLETON T.F., J.E. PIERCY and N.OLSON:
Outdoor Propagation over Ground of Finite Impedance.
J. Acoust. Soc. Amer., 59 (1976), S.267-277.
- [6] LAWHEAD, R.B. and RUDNICK, I.:
Acoustic Wave Propagation along a Constant Normal
Impedance Boundary.
J. Acoust. Soc. Amer., 23 (1951), S. 546-549.
- [7] INGARD, K.U.:
On the Reflection of a Spherical Wave from an
Infinite Plane.
J. Acoust. Soc. Amer., 23 (1951), S. 329-335.
- [8] VDI-Richtlinie 2714 (Entwurf):
Schallausbreitung im Freien (Dezember 1976).

- [9] The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities.
CONCAWE REPORT No 4/81,
CONCAWE, Den Haag, Mai 1981.
- [10] WIENER, F.M. u. KEAST, D.N.:
Experimental Study of the Propagation of Sound over Ground.
J. Ac. Soc. Amer., 231 (Juni 1959), 6, S. 724-733.
- [11] PARKIN, P.H. u. SCHOLLES, W.E.:
The Horizontal Propagation of Sound From a Jet Engine Close to the Ground at Hatfield.
J. of Sound u. Vibr., 24 (1965), S. 353-374.
- [12] CHESSEL, C.I.:
Meteorological and Ground Effects on the Propagation of Aircraft Noise Close to the Earth[s Surface].
J. of Sound and Vibr., 60 (1978), (2), S. 251-266.
- [13] CHESSEL, C.I.:
Propagation of Noise Along a Finite Impedance Boundary.
J. of. Ac. Soc. Amer., 62 (1977), 4, S. 825-834.
- [14] CASANOVA - MARTINEZ, S.:
Untersuchungen zur Bestimmung der Verteilung von Schallpegeln bedingt durch meteorologische Einflüsse in der unteren Atmosphäre.
TÜV-Rheinland Bericht Nr. 326007, Dez. 1977.

- [15] PASQUILL, F.:
Atmospheric Diffusion.
Hrsg.: J. Wiley, Revised Ed. 1976.
- [16] DELANY, M.:
Range Prediction for Siren Sources.
NP 2 Special Aero Report 033, 1969.
- [17] SACHS, L.:
Angewandte Statistik.
4. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York:
Springer Verlag 1973.

T a b e l l e n - u n d B i l d a n h a n g

Tabelle 1:

Zusammenstellung der mittleren Normierungspegel und des jeweiligen Pegelabstandes zum durch Wind von 20 km/h am Mikrofon verursachten Störpegel

Entfernung		100 m	200 m	400 m	800 m	1600 m
Frequenz						
250 Hz	L_{norm}	81.6	75.5	69.3	62.9	56.1
	ΔL	39.6	33.5	27.3	20.9	14.1
500 Hz	L_{norm}	75.4	69.2	62.8	56.0	48.4
	ΔL	40.4	34.2	27.8	21.0	13.4
1 kHz	L_{norm}	71.3	64.9	58.1	50.6	41.5
	ΔL	46.3	39.9	33.1	25.6	16.5
2 kHz	L_{norm}	69.2	62.4	54.7	45.2	32.3
	ΔL	46.2	39.4	31.7	22.2	19.3

L_{norm} = mittlerer Normierungspegel in dB, der sich aus Quellstärke, Frequenz, Entfernung und mittlerer Dämpfung durch Molekularabsorption ergibt.

ΔL = gibt die Pegeldifferenz in dB zum Normierungspegel an, um die das Störgeräusch bei 5,65 m/s Windgeschwindigkeit unterhalb des Normierungspegels liegt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte, der Standardabweichungen und Spannweiten der gemessenen Momentanpegelverteilungen der 20-Minuten-Einzelmessungen. Alle Zahlenangaben in dB.

r	E	100 m		200 m		400 m		800 m		1600 m	
		$\bar{\sigma}$	\bar{R}								
250 Hz	Mitwind	0.75	5.6	1.1	8.3	2.0	13.3	2.8	18.5	3.2	19.5
	Gegenwind	0.75	4.0	1.8	11.9	2.9	17.9	3.2	19.5	2.4	14.5
	Querwind	0.58	2.9	1.0	6.8	1.9	13.6	2.7	17.3	2.6	15.9
500 Hz	Mitwind	0.87	6.3	1.4	10.0	2.4	16.2	3.0	19.8	3.0	20.0
	Gegenwind	0.72	5.0	2.1	14.8	4.1	23.4	2.9	19.9	2.3	13.2
	Querwind	0.60	3.4	1.2	8.3	2.3	17.1	3.3	20.8	2.8	18.4
1 kHz	Mitwind	1.0	6.9	1.8	12.5	2.7	19.3	3.2	21.8	3.3	20.5
	Gegenwind	0.9	4.7	2.3	16.0	4.0	24.5	3.5	21.0	2.6	16.0
	Querwind	0.9	5.8	1.7	11.6	2.9	19.6	3.2	19.7	2.8	18.4
2 kHz	Mitwind	1.4	11.4	2.3	15.7	3.1	20.1	3.2	20.6	3.0	18.2
	Gegenwind	1.1	8.3	2.9	18.5	4.1	24.9	2.8	20.3	1.8	11.0
	Querwind	1.0	5.9	2.0	13.8	3.2	21.7	3.0	20.8	2.8	20.5

Tabelle 5: Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel und des L_{Fm} bei 250 Hz und für alle Situationen. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

Delta	100m						200m						400m						800m						1600m								
	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM			
-28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	3	0	0			
-25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	7	0	0			
-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0	0	10	0	0			
-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	11	0	0	0	7	17	0	0			
-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	11	1	0	0	13	17	0			
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	14	1	0	0	17	17	0			
-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	11	19	1	0	0	3	17	20	3	
-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	12	23	4	0	0	17	17	20	7	
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	15	27	4	0	0	17	20	23	13	
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	8	20	30	7	0	3	17	23	23	13	
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	4	11	23	7	0	7	17	23	23	13	
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	15	27	37	12	3	13	20	30	17	
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	3	7	16	28	38	12	7	13	23	23	30	20
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	13	0	0	0	0	3	8	20	32	39	14	7	13	23	27	30	23
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	15	0	0	0	0	3	11	22	32	47	19	10	17	23	30	33	23
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	20	0	0	0	0	7	11	24	38	51	20	10	17	27	30	43	23
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	25	0	0	0	0	8	14	27	42	55	22	13	23	27	30	50	27
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	14	35	0	0	0	0	11	18	27	45	62	26	13	23	27	30	63	27
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	0	0	0	1	17	45	0	0	0	0	11	20	32	49	78	27	13	23	27	33	70	27
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	13	0	0	0	5	26	53	4	0	0	0	12	22	35	55	82	30	17	23	30	40	73	27
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	27	1	0	7	33	69	5	0	0	0	14	26	41	69	85	37	23	27	30	63	83	30
-5	0	0	0	0	3	0	0	0	3	18	42	2	0	2	12	45	82	8	0	0	0	15	28	45	78	88	42	23	27	30	73	90	30
-4	0	0	0	7	28	0	0	1	5	35	49	3	2	5	21	68	88	18	0	0	0	18	30	49	84	92	47	27	27	30	77	90	30
-3	0	0	3	35	69	10	1	3	18	44	64	14	4	6	35	82	94	31	0	0	0	26	34	58	87	93	53	27	30	37	87	97	33
-2	0	14	38	72	97	44	3	8	39	60	83	35	4	15	53	94	97	54	0	0	0	28	41	74	92	95	64	27	30	57	90	97	40
-1	21	52	76	100	100	76	5	20	53	81	92	52	7	25	79	95	100	75	0	0	0	31	49	81	93	97	80	30	33	73	97	97	60
0	59	79	100	100	100	98	13	38	68	92	97	68	18	42	91	100	100	92	0	0	0	38	54	91	96	99	89	33	33	87	97	97	77
1	83	100	100	100	100	98	33	56	88	99	99	89	28	68	100	100	100	100	0	0	0	42	66	92	97	99	92	33	37	87	97	97	83
2	100	100	100	100	100	100	49	79	99	99	99	99	42	88	100	100	100	100	0	0	0	49	82	96	100	100	96	33	57	93	97	97	87
3	100	100	100	100	100	100	69	94	99	99	100	99	67	100	100	100	100	100	0	0	0	57	91	99	100	100	99	33	77	97	97	97	90
4	100	100	100	100	100	100	91	99	99	100	100	100	88	100	100	100	100	100	0	0	0	70	96	100	100	100	99	40	80	97	97	100	97
5	100	100	100	100	100	100	95	99	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	0	0	0	85	96	100	100	100	100	60	83	97	97	100	97
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	92	99	100	100	100	100	77	90	97	100	100	97
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	96	100	100	100	100	100	80	97	97	100	100	97
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	100	100	100	100	100	100	83	97	100	100	100	100
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	100	100	100	100	100	100	90	97	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	100	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 6: Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel und des L_{Fm} bei 500 Hz und für alle Situationen. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

Delta	Entf.: 100m						200m						400m						800m						1600m									
	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM				
-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
-28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0			
-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0			
-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0			
-25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	3	3	0	0			
-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	3	3	0	0			
-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0			
-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	3	3	3	0	0			
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	3	3	7	3	0			
-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	13	2	0	0	3	3	7	10	3	0		
-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	8	15	3	0	0	3	3	7	20	3	0		
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	12	19	5	0	3	3	7	16	20	3	0		
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	15	25	5	0	3	3	7	20	23	7	0		
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	9	19	31	6	0	3	3	7	20	27	10	0	
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	15	0	0	0	0	3	7	10	20	30	10	0	
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	22	0	0	0	0	3	7	17	23	30	13	0	
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	22	0	0	0	0	7	10	20	30	30	17	0	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	24	0	0	0	0	10	10	20	30	40	17	0	
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	17	27	0	0	0	10	13	27	30	50	23	0	
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	19	30	0	0	0	10	17	30	37	50	27	0	
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	20	38	0	0	0	10	17	30	40	67	27	0	
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	23	53	1	0	0	13	23	30	50	80	30	0	
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	24	72	1	0	0	10	18	30	67	87	30	0	
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	38	80	6	0	0	10	21	36	76	87	30	0	
-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	57	85	9	0	0	12	25	36	82	90	34	0	
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	77	90	10	0	0	13	27	51	85	93	36	0	
-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29	85	96	24	0	0	16	28	67	87	96	51	0
-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	51	92	99	47	0	0	16	30	73	96	97	84	0
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	72	96	100	63	0	0	19	36	85	97	100	81	0
0	22	52	78	96	100	87	16	57	97	100	100	96	3	30	84	100	100	79	21	45	91	97	100	91	0	0	30	33	90	97	100	87	0	
1	56	74	93	100	100	100	41	81	100	100	100	100	9	47	96	100	100	94	27	61	96	100	100	94	0	0	30	70	93	97	100	93	0	
2	78	96	100	100	100	100	58	95	100	100	100	100	27	65	99	100	100	99	34	81	99	100	100	99	0	0	33	83	97	97	100	97	0	
3	93	100	100	100	100	100	81	100	100	100	100	100	37	85	100	100	100	100	42	93	100	100	100	100	0	0	33	87	97	100	100	97	0	
4	100	100	100	100	100	100	91	100	100	100	100	100	51	98	100	100	100	100	52	96	100	100	100	100	0	0	47	97	97	100	100	97	0	
5	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	73	100	100	100	100	100	78	100	100	100	100	100	0	0	67	97	97	100	100	97	0	
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100	0	0	83	97	97	100	100	97	0	
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	0	0	97	97	100	100	100	97	0	
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	0	0	97	97	100	100	100	100	0	
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	97	97	100	100	100	100	0	
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	97	97	100	100	100	100	0	
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	97	100	100	100	100	100	0	
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	97	100	100	100	100	100	0	
13	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	97	100	100	100	100	100	0	
14	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	97	100	100	100	100	100	0	
15	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	0

Tabelle 7: Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel und des L_{Fm} bei 1 kHz und für alle Situationen. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

Entf.:	100m						200m						400m						800m						1600m							
DELTA	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM		
-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
-25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0			
-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0			
-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0			
-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0			
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0			
-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0			
-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	5	0			
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	9	0	0	0	0	5	0			
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2	9	12	0	0	0	0	10	0			
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	2	10	18	0	0	0	0	5	10	0		
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	0	0	0	3	12	27	3	0	0	0	10	24	0		
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	11	0	0	0	9	16	29	3	0	0	0	19	24	0		
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	14	0	0	0	2	9	27	40	7	0	0	5	24	29	5	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	20	0	0	0	2	10	31	41	7	0	0	10	24	33	5	
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	6	24	0	0	0	6	13	34	47	10	0	0	19	29	43	10	
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	5	13	28	1	0	0	7	21	37	62	12	0	0	5	19	29	57	19
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	5	19	38	1	0	0	5	19	43	77	15	0	0	5	24	38	62	19
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	26	0	0	0	5	22	57	3	0	0	6	10	31	47	81	19	0	10	29	52	71	19
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	34	0	0	1	6	24	75	5	0	0	6	12	32	62	87	21	0	14	29	57	76	29
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	19	52	1	0	1	6	33	79	5	0	0	6	15	34	77	91	29	5	19	33	71	81	29
-5	0	0	0	0	11	0	0	0	3	32	80	3	0	1	8	53	87	5	0	0	9	18	38	82	94	31	10	19	43	71	86	33
-4	0	0	0	11	26	0	0	1	10	49	90	3	0	4	15	70	94	6	0	0	10	21	47	91	94	38	14	24	48	76	86	33
-3	0	0	4	26	59	6	0	1	22	78	97	10	0	5	19	82	96	10	0	0	12	27	63	94	96	46	14	33	57	86	86	43
-2	0	4	11	59	82	14	1	4	37	95	97	32	0	5	39	90	99	18	0	0	13	29	81	94	97	60	14	33	67	86	95	57
-1	4	7	41	82	96	33	3	12	70	96	100	56	0	6	54	99	100	35	0	0	13	32	84	96	99	77	19	33	71	86	100	67
0	7	30	82	96	100	75	4	25	84	99	100	79	1	11	72	100	100	60	0	0	22	41	93	97	99	87	24	38	76	95	100	71
1	22	67	100	100	100	94	10	47	97	100	100	96	4	19	85	100	100	73	0	0	27	52	93	99	100	90	33	52	86	100	100	76
2	59	96	100	100	100	94	19	69	99	100	100	99	9	42	95	100	100	84	0	0	26	72	94	100	100	93	33	62	86	100	100	86
3	85	100	100	100	100	94	37	89	100	100	100	100	15	62	99	100	100	95	0	0	35	78	100	100	100	100	33	71	100	100	100	95
4	96	100	100	100	100	100	67	96	100	100	100	100	24	76	100	100	100	100	0	0	49	91	100	100	100	100	43	76	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100	80	99	100	100	100	100	35	85	100	100	100	100	0	0	59	94	100	100	100	100	52	91	100	100	100	100
6	100	100	100	100	100	100	93	100	100	100	100	100	54	92	100	100	100	100	0	0	74	100	100	100	100	100	67	95	100	100	100	100
7	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	65	100	100	100	100	100	0	0	97	100	100	100	100	100	76	100	100	100	100	100
8	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	84	100	100	100	100	100	0	0	93	100	100	100	100	100	91	100	100	100	100	100
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	100	100	100	100	100	0	0	95	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	0	0	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
13	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 8: Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel und des L_{Fm} bei 2 kHz und für alle Situationen. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

DELTA	Entf.: 100m						200m						400m						800m						1600m						
	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	L1	L10	L50	L90	L99	LFM	
-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0		
-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0		
-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0		
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0		
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	7	0	0	0	0	0	0	0		
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	9	1	0	0	0	0	0	0		
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	16	1	0	0	0	0	6	0		
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	13	17	1	0	0	0	13	19	0		
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6	18	0	0	1	4	13	28	1	0	0	0	13	19	0	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	4	7	27	0	0	1	7	19	39	4	0	0	0	6	19	25	6	
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	5	9	33	1	0	1	12	28	52	6	0	0	0	6	19	44	6	
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	0	0	0	6	14	44	1	0	3	15	42	68	10	0	0	6	19	31	50	6
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	30	0	0	0	6	25	53	4	0	4	20	52	81	13	0	0	6	19	44	50	19
-8	0	0	0	0	7	0	0	0	0	9	51	0	0	0	6	31	73	4	3	7	28	67	84	17	0	0	6	31	50	50	19
-7	0	0	0	3	17	0	0	0	1	17	70	1	0	1	8	44	84	7	3	10	42	77	87	26	6	6	31	50	50	31	
-6	0	0	0	10	33	0	0	0	3	35	87	2	0	2	18	57	91	8	3	12	48	84	94	35	6	19	31	50	56	31	
-5	0	0	7	30	47	5	0	0	8	66	92	2	0	4	21	77	93	14	6	17	51	87	94	45	6	25	44	50	81	38	
-4	0	3	20	40	63	14	0	1	16	83	96	7	0	4	29	85	98	19	7	25	68	91	96	51	6	31	50	56	94	44	
-3	3	3	27	53	87	19	0	3	38	94	99	31	1	8	38	91	99	27	10	35	81	94	99	67	13	31	50	69	100	44	
-2	3	23	37	83	93	29	1	5	65	97	100	51	1	14	55	94	99	35	12	45	86	96	99	77	13	38	50	88	100	50	
-1	13	33	70	93	97	67	3	16	81	100	100	69	1	19	80	99	100	51	13	52	86	99	99	83	19	44	63	94	100	50	
0	27	53	90	97	100	86	8	40	94	100	100	85	6	24	88	99	100	75	25	61	91	99	100	84	31	44	63	100	100	63	
1	47	73	93	100	100	91	13	56	99	100	100	93	11	33	93	100	100	88	29	75	96	99	100	93	38	50	75	100	100	63	
2	57	87	100	100	100	95	29	74	99	100	100	98	17	48	93	100	100	92	41	81	99	100	100	99	44	63	94	100	100	75	
3	73	97	100	100	100	98	42	86	100	100	100	100	20	69	99	100	100	93	49	87	99	100	100	99	44	63	94	100	100	88	
4	87	97	100	100	100	100	58	92	100	100	100	100	31	85	100	100	100	99	61	91	99	100	100	99	50	75	100	100	100	94	
5	97	100	100	100	100	100	71	99	100	100	100	100	38	89	100	100	100	100	77	97	99	100	100	99	50	75	100	100	100	94	
6	97	100	100	100	100	100	81	100	100	100	100	100	47	94	100	100	100	100	83	99	100	100	100	100	63	88	100	100	100	100	
7	100	100	100	100	100	100	88	100	100	100	100	100	72	97	100	100	100	100	86	99	100	100	100	100	63	88	100	100	100	100	
8	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	81	99	100	100	100	100	91	99	100	100	100	100	69	100	100	100	100	100	
9	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	86	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	88	100	100	100	100	100	
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100	88	100	100	100	100	100	
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	88	100	100	100	100	100	
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	
13	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	
14	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	
15	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Tabelle 9: Pegeldifferenzen zwischen den 0,5-Quantilen und den arithmetischen Mittelwerten der normierten Summenhäufigkeitsverteilungen L_{10} und L_{Fm} , gemessen über alle Situationen

	100 m			200 m			400 m			800 m			1600 m			
	L_{10}	L_{Fm}		L_{10}	L_{Fm}		L_{10}	L_{Fm}		L_{10}	L_{Fm}		L_{10}	L_{Fm}		
250 Hz	q 0.5	-0.5	-1.3	0.8	1.2	-0.6	1.8	0.8	-1.7	2.5	-0.2	-3.0	2.8	2.2	-1.0	3.2
	\bar{L}	-0.4	-1.2	0.8	1.0	-0.6	1.6	0.5	-1.9	2.4	-2.1	-5.0	2.9	-1.0	-4.1	3.1
500 Hz	q 0.5	0.4	-0.8	1.2	0.3	-1.5	1.8	1.7	-1.3	3.0	0.8	-2.5	3.3	0.9	-2.2	3.1
	\bar{L}	0.6	-0.8	1.4	0.3	-1.6	1.9	1.5	-1.3	2.8	-1.5	-4.5	3.0	-1.8	-4.8	3.0
1 kHz	q 0.5	1.0	-0.1	1.1	1.7	-0.7	2.4	2.9	+0.1	2.8	1.4	-2.2	3.6	1.3	-2.0	3.3
	\bar{L}	1.0	-0.1	1.1	1.6	-0.8	2.4	2.7	-0.2	2.9	-0.2	-3.5	3.3	0.2	-2.9	3.1
2 kHz	q 0.5	0.3	-0.9	1.2	1.1	-1.5	2.6	2.6	-0.5	3.1	-0.8	-3.6	2.8	1.5	-1.5	3.0
	\bar{L}	0.3	-1.0	1.3	1.3	-1.4	2.7	2.1	-1.2	3.3	-1.0	-4.1	3.1	0.4	-2.2	2.6

Tabelle 10: Summenhäufigkeitsverteilungen der gemessenen L_{Fm} bei 250 Hz für Mitwind und Gegenwind. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

DELTA	250 HZ LFM															
	R100			R200			R400			R800			R1600			
	ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			
-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	25	
-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6	7	0	50	
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6	13	0	75	
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	18	13	0	75	
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	18	13	0	75	
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	41	17	0	75	
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	41	26	0	100	
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	47	23	0	100	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	71	23	0	100	
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	77	25	0	100	
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	82	27	0	100	
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	82	27	0	100	
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	88	27	0	100	
-7	0	0	0	0	0	0	4	0	5	30	0	94	27	0	100	
-6	0	0	0	1	0	5	5	0	5	37	0	100	30	7	100	
-5	0	0	0	2	0	9	8	5	15	42	0	100	36	7	100	
-4	0	0	0	3	0	9	18	14	35	47	0	100	38	7	100	
-3	10	0	0	14	0	23	31	19	50	53	14	100	33	7	100	
-2	44	50	40	35	5	59	54	33	80	64	38	100	40	14	100	
-1	76	75	80	52	5	82	75	67	80	80	71	100	60	50	100	
0	98	100	80	68	32	91	92	91	100	89	86	100	77	71	100	
1	98	100	80	89	82	96	100	100	100	92	91	100	83	79	100	
2	100	100	100	97	96	100	100	100	100	96	100	100	87	86	100	
3	100	100	100	99	96	100	100	100	100	99	100	100	90	86	100	
4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	97	100	100	
5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Tabelle 11: Summenhäufigkeitsverteilungen der gemessenen L_{Fm} bei 500 Hz für Mitwind und Gegenwind. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

DELTA	500 HZ LFM			R200			R400			R600			R1600			
	ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			
	R100	R200	R400	R600	R1600	R100	R200	R400	R600	R1600	R100	R200	R400	R600	R1600	
-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	20
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	20
-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	7	3	0	20	
-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	13	3	0	20	
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	13	3	0	20	
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	13	7	0	20	
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	20	10	0	40	
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	33	10	0	40	
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	40	13	0	60	
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	47	17	0	80	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	60	17	0	80	
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	67	23	0	100	
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	67	27	0	100	
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	73	27	0	100	
-8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	25	0	87	30	0	100	
-7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	25	0	87	30	0	100	
-6	0	0	0	0	1	5	0	6	0	30	0	100	33	9	100	
-5	0	0	0	0	1	5	0	9	0	34	0	100	33	9	100	
-4	3	0	0	0	2	9	0	10	0	36	5	100	33	9	100	
-3	5	0	0	0	20	18	27	24	23	40	51	33	100	43	18	100
-2	22	11	75	0	51	55	50	47	59	62	64	52	100	70	73	100
-1	62	44	100	0	85	86	86	63	82	67	81	86	100	83	100	100
0	89	89	100	0	96	96	100	79	96	81	91	95	100	87	100	100
1	100	100	100	0	100	100	100	94	100	91	94	100	100	93	100	100
2	100	100	100	0	100	100	100	99	100	95	99	100	100	97	100	100
3	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100
4	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100
5	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100
6	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100
7	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100
8	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 12: Summenhäufigkeitsverteilungen der gemessenen L_{Fm} bei 1 kHz für Mitwind und Gegenwind. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

DELTA	1000 HZ LFM			R200			R400			R600			R1600				
	ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN			ALLE MIT GEGEN				
	R100	R200	R400	R600	R1600	R100	R200	R400	R600	R1600	R100	R200	R400	R600	R1600		
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	11	
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	11	
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	26	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	26	
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	32	
-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	37	
-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	47	
-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	53	
-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	58	
-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	58	
-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	84	
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	84	
-3	6	10	0	0	0	6	10	13	10	12	13	10	0	25	46	21	95
-2	14	10	29	0	0	32	32	46	18	13	33	60	42	95	57	30	100
-1	33	30	43	0	0	56	56	58	35	42	46	77	67	95	67	50	100
0	75	90	86	0	0	79	76	83	60	75	58	87	75	100	71	60	100
1	94	100	100	0	0	96	100	92	73	92	67	90	83	100	76	70	100
2	94	100	100	0	0	99	100	100	84	96	71	93	92	100	86	90	100
3	94	100	100	0	0	100	100	100	95	100	92	100	100	100	95	90	100
4	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 13: Summenhäufigkeitsverteilungen der gemessenen L_{Fm} bei 2 kHz für Mitwind und Gegenwind. Die Klasse Delta = 0 entspricht dem jeweiligen Normierungspegel.

2000 HZ LFM		R100			R200			R400			R800			R1600		
DELTA		ALLE MIT GEGEN														
-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	0	0	
-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	0	0	
-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	0	0	
-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	0	0	
-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	25	6	0	
-11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	6	0	33	6	0	
-10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	10	0	50	6	0	
-9	0	0	0	0	0	0	0	4	0	16	13	0	58	19	20	
-8	0	0	0	0	0	0	0	4	0	16	17	5	67	19	20	
-7	0	0	0	0	1	0	0	7	0	26	26	11	75	31	20	
-6	0	0	0	0	2	0	5	8	5	26	35	16	83	31	20	
-5	5	13	17	2	0	5	14	10	26	45	16	92	38	40	100	
-4	14	25	33	7	0	10	19	20	32	51	32	92	44	40	100	
-3	19	25	33	31	19	40	27	25	47	67	53	100	44	40	100	
-2	29	25	50	51	30	50	35	25	53	77	79	100	50	60	100	
-1	67	50	83	69	67	65	51	55	63	83	79	100	50	60	100	
0	86	75	100	85	81	75	75	90	79	84	79	100	63	60	100	
1	91	100	100	93	95	85	88	95	95	93	95	100	63	60	100	
2	95	100	100	98	95	95	92	95	100	99	100	100	75	80	100	
3	98	100	100	100	100	100	93	95	100	99	100	100	88	80	100	
4	100	100	100	100	100	100	99	100	100	99	100	100	94	100	100	
5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	94	100	100	
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Tabelle 14: Meteorologische Randbedingungen zu den in Abb. 27 für 800 m Quellentfernung und 500 Hz dargestellten Gegenwindpegeln, deren Gradient δ den Wert von $\approx 1 \text{ s}^{-1}$ aufweist. β und α wurden aus Meßwerten in 2 m und 16 m Höhe berechnet.

$L_{Fm,20}$ [dB]	δ [s^{-1}]	β [s^{-1}]	α [s^{-1}]	ϕ [$^\circ$]	v_w [m/s]	Datum	Zeit [h:min]	Temp. in 2 m Höhe [$^\circ\text{C}$]
49.8	1.0	1.0	0.0	0	4.0	04.08.	8:58	14.5
47.7	1.0	1.3	-0.1	41	3.6	25.03.	16:40	6.3
44.4	1.0	0.8	-0.6	23	3.3	28.03.	10:43	2.3
42.7	1.0	1.0	0.0	11	3.2	28.03.	7:55	0.0
41.0	1.1	1.1	-0.2	27	5.2	25.03.	10:53	7.3
40.0	1.0	0.9	-0.3	30	3.2	22.03.	12:12	5.5
36.7	1.1	1.6	0.8	17	2.1	04.08.	21:02	12.5
35.8	1.0	1.8	1.2	14	1.0	24.06.	18:40	26.3

Tabelle 15: Korrelationskoeffizienten und Kenngrößen der paarweise gebildeten Pegeldifferenzen $L_1 - L_{Fm}$ und $L_{99} - L_{Fm}$ für alle Situationen bei 1 kHz. Alle Angaben für Mittelwert, Standardabweichung, minimale und maximale Pegeldifferenzen in dB.

F=1KHZ

ENTFERNUNG

100m 200m 400m 800m 1600m
 L_1-L_{Fm} $L_{99}-L_{Fm}$ L_1-L_{Fm} $L_{99}-L_{Fm}$ L_1-L_{Fm} $L_{99}-L_{Fm}$ L_1-L_{Fm} $L_{99}-L_{Fm}$ L_1-L_{Fm} $L_{99}-L_{Fm}$

MITTEL	2.62	-2.28	4.59	-5.06	6.24	-8.22	6.93	-7.77	6.66	-6.94
STANDA	0.66	0.70	1.23	1.81	1.58	2.64	1.62	2.22	1.01	1.43
MIN	0.70	-3.50	1.80	-10.50	2.00	-14.00	2.40	-12.70	4.00	-9.10
MAX	4.40	-0.80	7.90	-1.60	9.80	-1.50	11.10	-1.60	8.30	-4.00
N	27	27	73	73	75	75	68	68	21	21
R	0.73	0.66	0.78	0.55	0.80	0.61	0.93	0.89	0.98	0.56

Tabelle 16:

Korrelationskoeffizienten und Kenngrößen der paarweise gebildeten Pegeldifferenzen $L_1 - L_{Fm}$ und $L_{99} - L_{Fm}$ für Mitwind und Gegenwindsituationen bei 800 m Quellenentfernung. Alle Angaben für Mittelwert, Standardabweichung, minimale und maximale Pegeldifferenzen in dB.

	Mitwind		Gegenwind		
	$L_1 - L_{Fm}$	$L_{99} - L_{Fm}$	$L_1 - L_{Fm}$	$L_{99} - L_{Fm}$	
250 Hz	Mittel	5.93	- 7.43	6.5	- 7.85
	G	0.97	1.27	1.59	1.77
	MIN	3.9	-10.2	3.5	-12.5
	MAX	7.6	- 4.6	9.1	- 3.9
	N	21	21	17	17
R	0.80	0.79	0.89	0.87	
500 Hz	Mittel	6.44	- 7.58	7.15	- 6.28
	G	0.94	0.96	2.25	2.05
	MIN	4.4	- 9.9	3.3	- 9.2
	MAX	7.9	- 5.6	11.0	- 2.2
	N	21	21	15	15
R	0.65	0.81	0.93	0.88	
1 kHz	Mittel	6.8	- 7.99	7.29	- 7.58
	G	0.95	1.73	1.75	2.32
	MIN	4.6	-12.4	4.6	-12.7
	MAX	8.8	- 4.8	11.1	- 3.4
	N	24	24	19	19
R	0.88	0.64	0.96	0.80	
2 kHz	Mittel	7.40	- 7.18	7.0	- 6.13
	G	1.01	0.93	1.42	2.24
	MIN	4.9	- 9.9	4.5	- 9.8
	MAX	9.6	- 5.7	9	- 3.2
	N	19	19	12	12
R	0.93	0.93	0.94	0.82	

T a b e l l e 17:

Vergleich der nach CONCAWE kategorisierten Ergebnisse dieser Untersuchung (LIS) mit den Vorhersagepegeln des CONCAWE Modells (CON)

Entfernung 400 m:

CAT	250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz	
	LIS	CON	LIS	CON	LIS	CON	LIS	CON
G	66.6		60.6		57.3		51.6	
2	66.5	66.7	61.0	60.1	57.7	55.2	53.7	53.1
3	67.7	66.9	61.8	60.7	54.6	56.2	53.1	53.5
4	67.4	67.7	62.1	61.4	57.3	57.3	53.2	54.3
5	67.4	68.3	61.2	62.0	58.0	58.2	53.6	54.8
6	67.9	68.5	61.7	62.3	58.0	58.2	53.0	55.2
M	67.7		61.3		58.0		53.4	
L_{norm}	69.3		62.8		58.1		54.7	

Entfernung 800 m:

CAT	250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz	
	LIS	CON	LIS	CON	LIS	CON	LIS	CON
G	50.3		43.8		42.8		37.2	
2	51.6	54.0	47.8	48.3	45.3	42.7	39.3	39.9
3	55.8	54.7	49.8	49.9	42.5	45.3	39.9	41.2
4	59.7	56.9	52.5	51.8	49.4	48.4	42.8	43.7
5	61.7	59.3	54.7	54.1	49.6	50.9	42.4	45.2
6	62.1	59.8	54.5	54.9	49.9	50.9	41.6	45.9
M	61.3		53.9		49.9		42.9	
L_{norm}	62.9		56.0		50.6		45.2	

Die in der Tabelle angegebenen Pegel entsprechen den gemessenen bzw. vorhergesagten absoluten Pegeln in dB. Zum Vergleich sind in Spalte "LIS" zusätzlich die nur nach Mitwind (M) und Gegenwind (G) sowie $\pm 45^\circ$ breitem Windrichtungssektor klassierten Pegel aufgeführt. Die Zusatzdämpfungen für die einzelnen Kategorien können durch Differenzbildung mit dem jeweiligen Normierungspegel L_{norm} berechnet werden.

T a b e l l e 18:

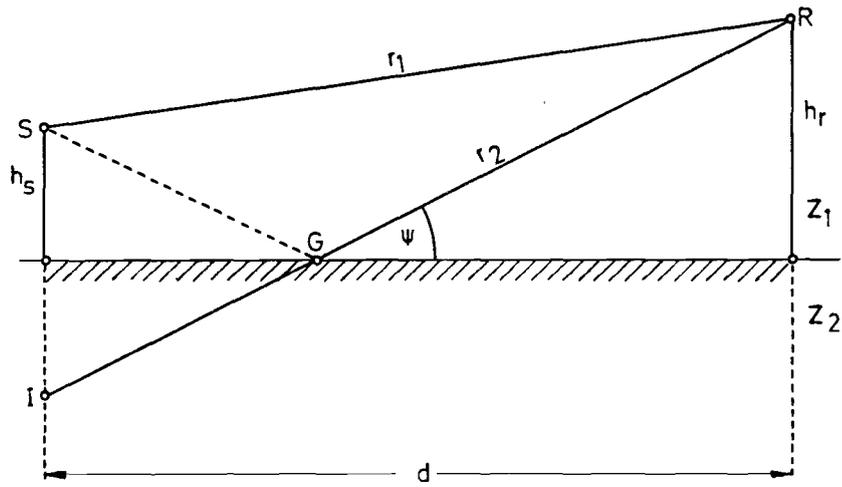
a) Vergleich der Meßergebnisse $\bar{L}_{m,20}$ für leichten Mitwind (nach CONCAWE, Kategorie 5, angeordnet) mit den Vorhersagepegeln der VDI-2714 für Kurve 2

	250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz	
	400m	800m	400m	800m	400m	800m	400m	800m
LIS (Cat.5)	67.4	61.7	61.2	54.7	58.0	49.6	53.6	42.4
VDI Kurve 2	67.1	60.1	60.6	53.2	55.9	47.8	52.5	42.4

b) Vergleich der Meßergebnisse $\bar{L}_{m,20}$ über sämtliche meteorologische Situationen mit den Vorhersagepegeln der VDI 2714 für Kurve 3

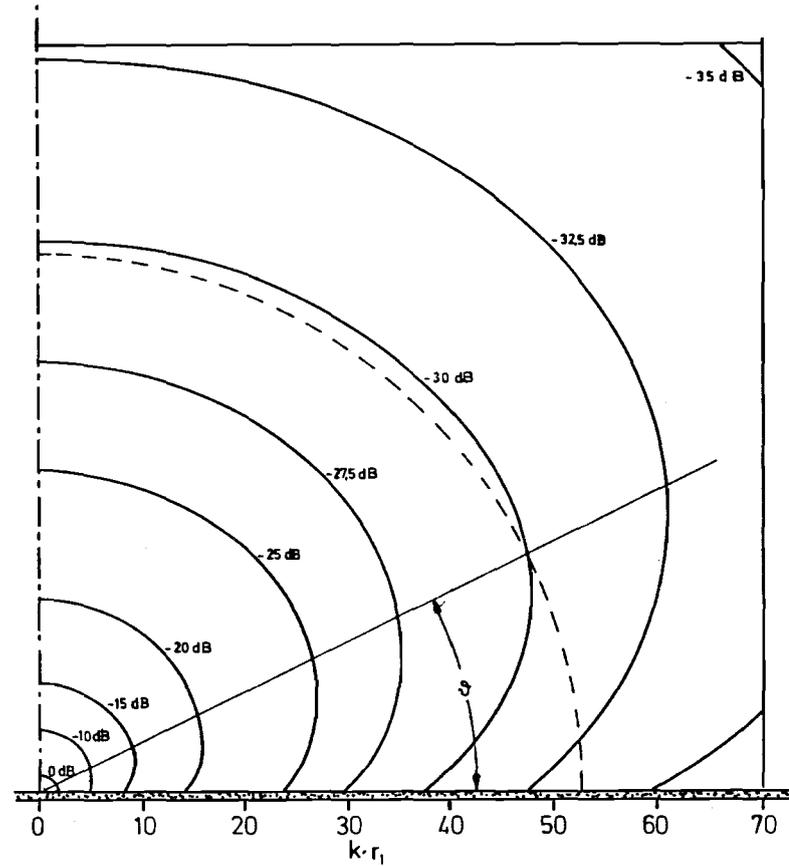
	250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz	
	400m	800m	400m	800m	400m	800m	400m	800m
LIS \bar{L}_m über alle met. Sit.	67.1	55.8	61.0	48.9	57.7	46.4	52.5	40.1
VDI Kurve 3	65.7	58.3	49.2	51.4	54.5	46.0	51.1	40.6

Alle Pegelangaben in dB



S = Sender, h_s = Senderhöhe
 R = Empfänger, h_r = Empfängerhöhe
 I = Spiegelschallquelle
 d = Sender / Empfängerabstand
 ψ = Reflexionswinkel am Erdboden
 Z_1 = Luftimpedanz, Z_2 = Bodenimpedanz

Abb. 1: Strahlengang des direkten und reflektierten Schallstrahls für vorgegebene Sender-Empfängergeometrie



gestrichelt: nur sphärische Ausbreitung

$$k \cdot r_1 = \frac{2\pi \cdot r_1}{\lambda}$$

Abb. 2: Abnahme des Schallpegels um eine am Erdboden befindliche Punktschallquelle in Abhängigkeit von der Entfernung $k \cdot r_1$ nach [7] für Abstrahlwinkel (ψ) zwischen 0° und 90° . Dargestellt ist der Pegelverlauf für $\frac{Z_2}{Z_1} = 10$.

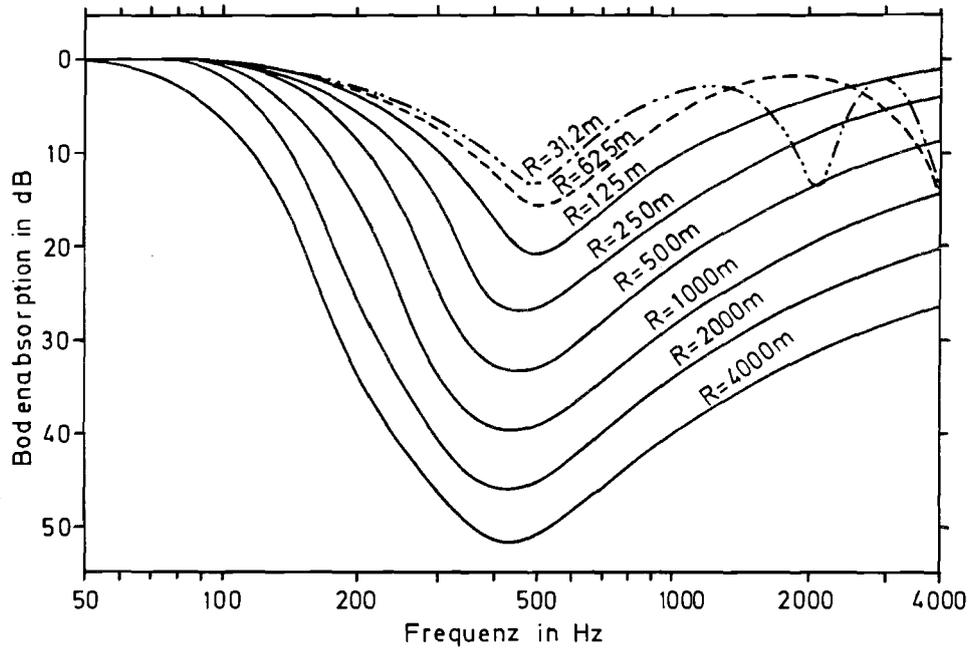


Abb. 3: Zusatzdämpfung durch Bodenabsorption bei der freien Schallausbreitung nach [5] für eine Punktschallquelle $h_s = 1,8$ m; $h_r = 1,5$ m. Ausbreitung über gemähtem Grasland

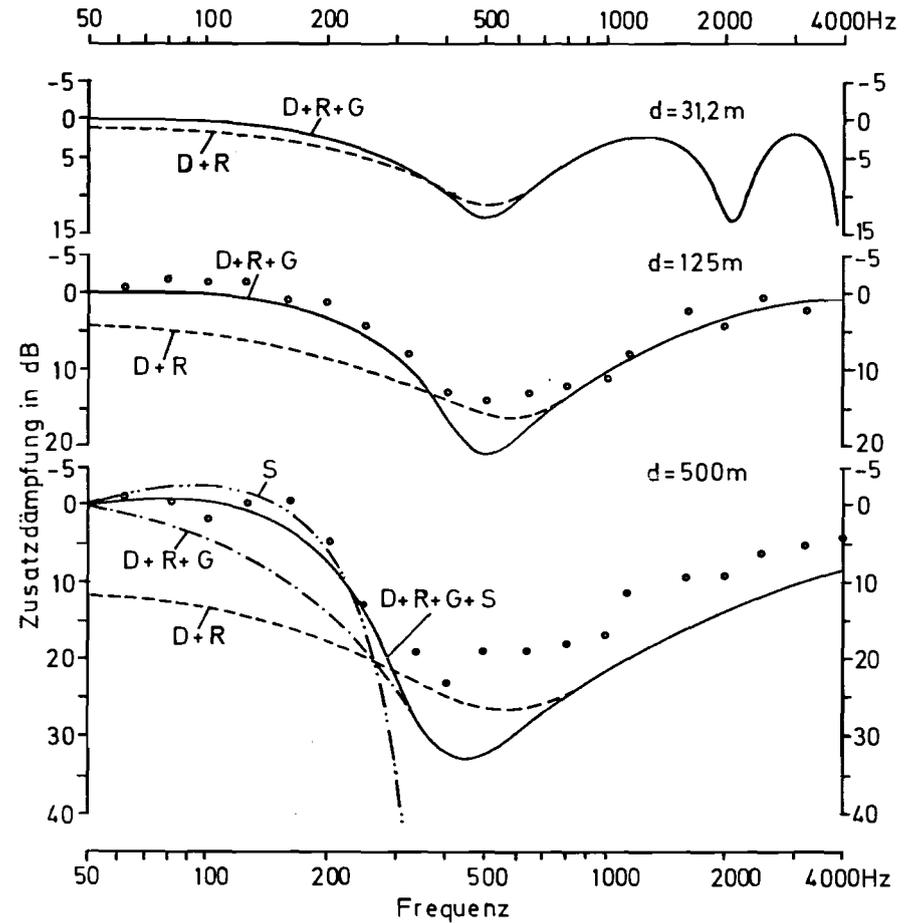


Abb. 4: Zusatzdämpfung bei Schallausbreitung einer Punktschallquelle über gemähtem Grasland nach [5] mit $h_s = 1,8$ m u. $h_r = 1,5$ m. Die gerechneten Kurven zeigen im Vergleich zu realen Meßergebnissen (Punkte) den Einfluß verschiedener Schallwellen. D: Direkte Schallwelle, R: reflektierte Schallwelle, G: Bodenwelle, S: Oberflächenwelle.

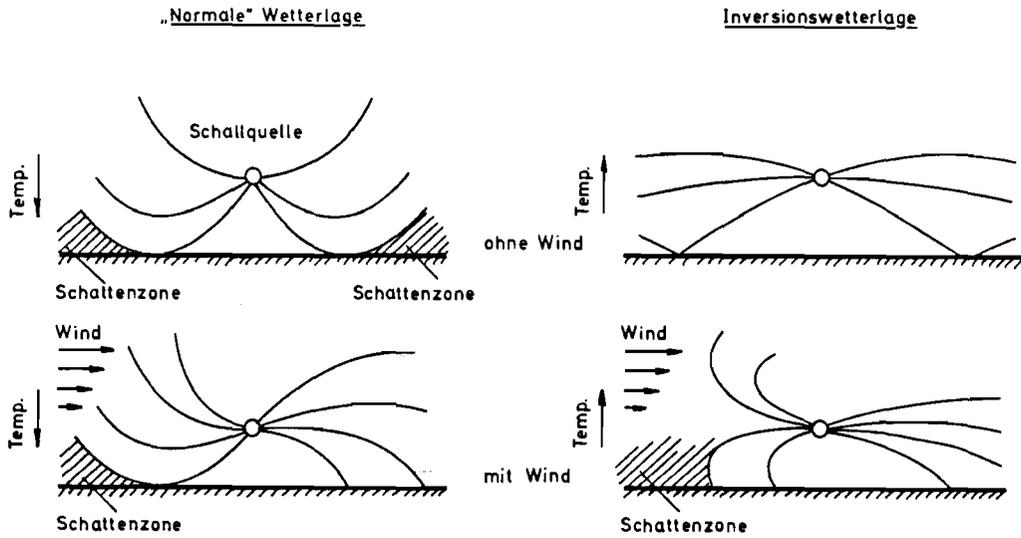


Abb. 5: Einfluß von Temperatur und Windgeschwindigkeitsgradient auf den Verlauf der Schallstrahlen für eine Punktschallquelle

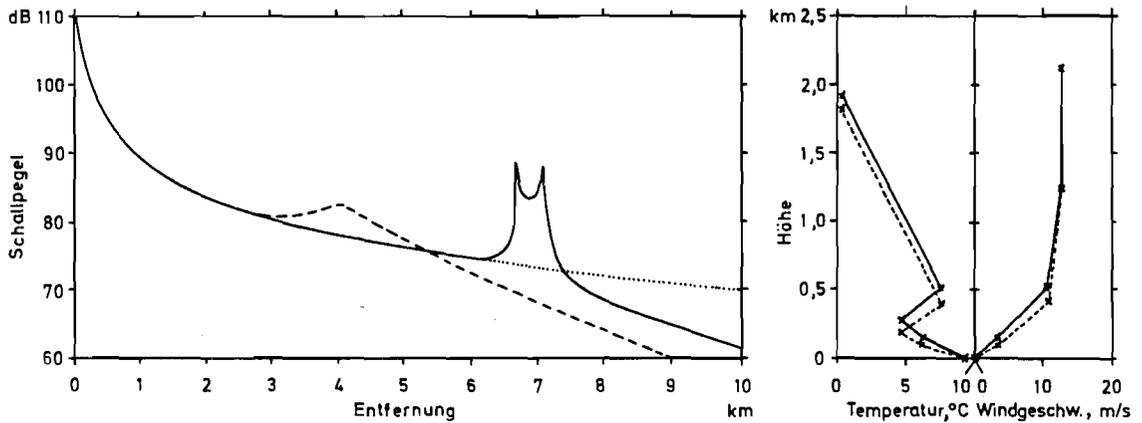


Abb. 6: Berechneter Schallpegelverlauf (ausgezogene Kurve) für die rechts dargestellte, gemessene Inversionswetterlage (ausgezogene Kurve) ohne Berücksichtigung der Molekularabsorption. (•••••) rein sphärische Ausbreitung; (----) berechneter Schallpegelverlauf für eine angenommene, geringfügig geänderte meteorologische Situation (----). Quelle: [12]

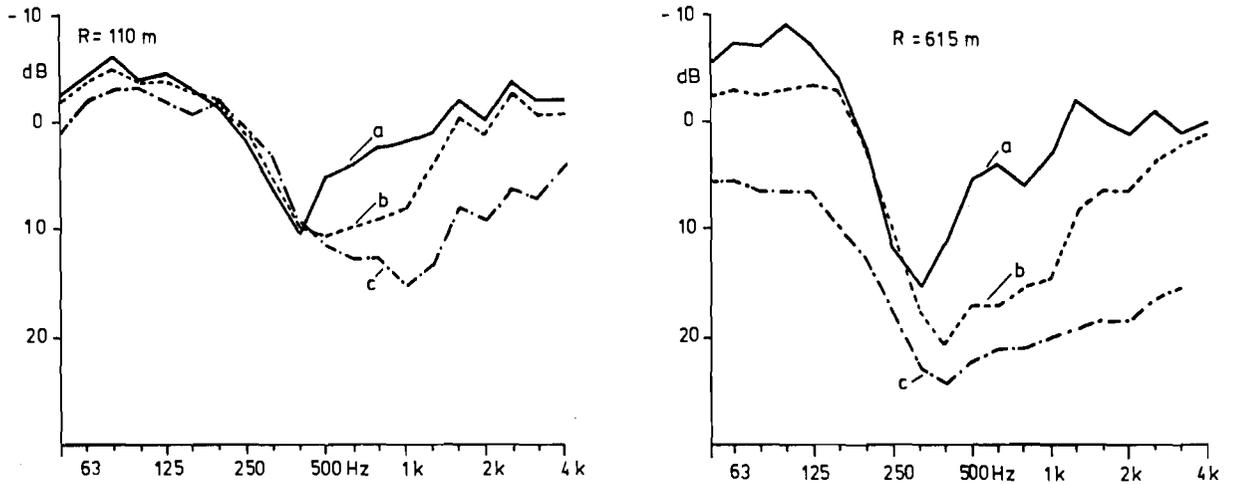


Abb. 7: Gemessene Zusatzdämpfungen bei der freien Schallausbreitung von Flugzeuglärm in Abhängigkeit verschiedener meteorologischer Zustände nach [11]. Triebwerk und Mikrofon befanden sich in Bodennähe, Dämpfungen infolge sphärischer Ausbreitung und Molekularabsorption wurden vom gemessenen Schallpegel abgezogen, a: Mitwind (Vektorwind) von 5 m/s; b: Windstille; c: Gegenwind (Vektorwind) von -5 m/s.

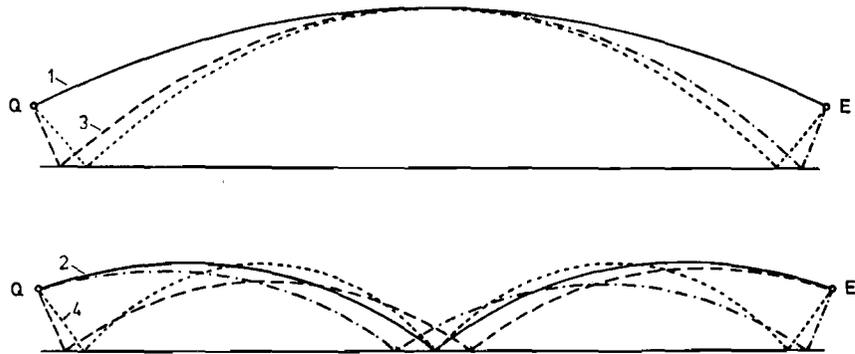


Abb. 8: Mehrfachreflexionen von Schallstrahlen an der Erdoberfläche, Strahlenverlauf. Die Ziffern bezeichnen die durch gleiche Zenithöhen des Strahls zugeordneten Strahlengruppen.

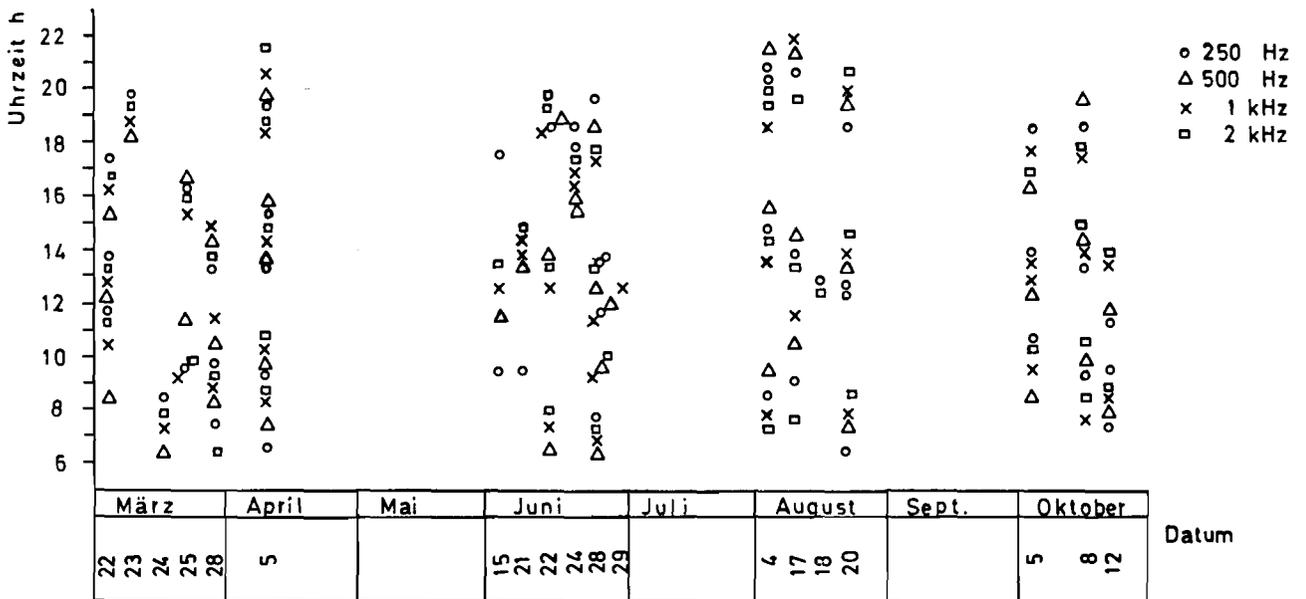


Abb. 9: Zeitliche Zuordnung der Einzelmessungen

1	LD	.5	EA	90	22'48"	0/	0	MI.	74.6/STA.	.44/ERG.	74.6
2	LD	.5	EA	80	20'38"	0/	0	MI.	66.5/STA.	.67/ERG.	66.5
3	LD	.5	EA	80	20'38"	0/	0	MI.	67.6/STA.	.65/ERG.	67.6
4	LD	.5	EA	80	20'38"	0/	0	MI.	64.5/STA.	1.18/ERG.	64.7
5	LD	.5	EA	80	20'43"	0/	0	MI.	61.1/STA.	1.44/ERG.	61.3
6	LD	.5	EA	70	20'43"	0/	0	MI.	57.0/STA.	3.73/ERG.	58.2
7	LD	.5	EA	70	20'43"	0/	0	MI.	59.1/STA.	1.59/ERG.	59.4
8	LD	.5	EA	60	21'40"	0/	0	MI.	44.8/STA.	3.51/ERG.	46.3

KANAL	MESSVEFAHREN (Leq, 0,5 s)	ENDAUSCHLAG	UNGESTÖRTE MESSZEIT	ÜBERSCHREITUN- GEN	UNTERSCHREITUN- GEN	ARITHM. MITTELWERT	STANDARD- ABWEICHUNG	ENERGETISCHER MITTELWERT
-------	------------------------------	-------------	------------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------------

KURZAUSDRUCK DER ERGEBNISSE FÜR DIE MESSPUNKTE 1...8

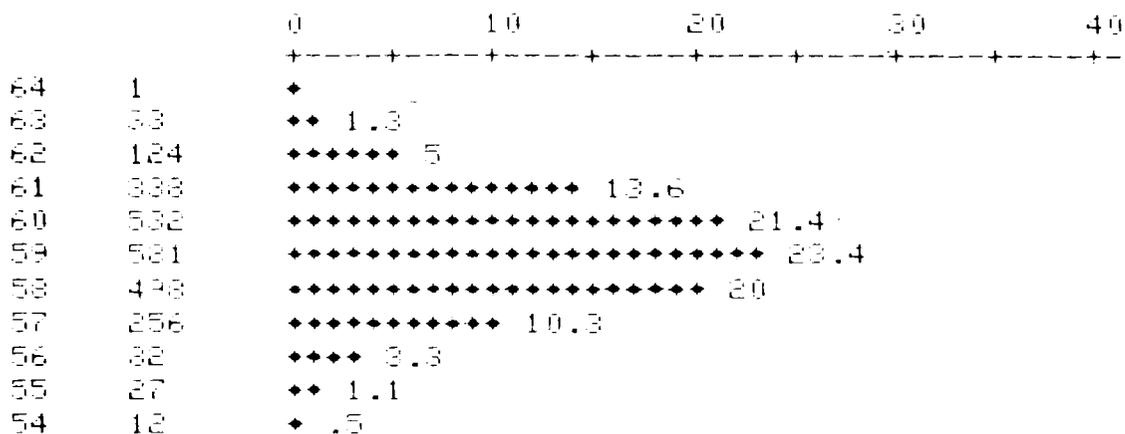
MESSTAG	: 7.3.	STUNDE	: 8.20
FREQUENZ [Hz]	: 500	GERÄUSCHART	: /
ENTFERNUNG[METER]:	800	MESSORT	: 1

ENDAUSCHLAG [dB]:	70	LEQ/TAKT [SEK]:	.5
ARITHM.MW. [dB]:	59.11	STAND.ABW. [dB]:	1.59
ENDERGEBNIS [dB]:	59.4		

MESSZEIT: 20	MIN. 43	SEK	TAKTZAHL : 2466

DB-KL.BEL.

HÄUFIGKEIT [%]



HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ALLE 0.5 SEC GEMESSENEN MOMENTANWERTE AM MESSPUNKT 800m BEI 500 Hz

Abb. 10: Protokollausdruck für eine 20-Minuten-Messung

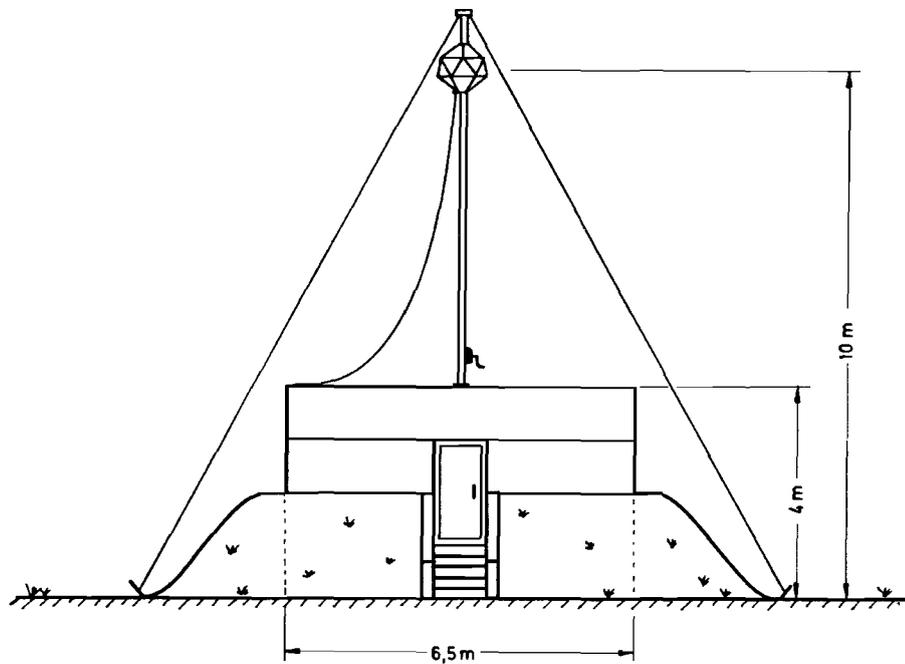
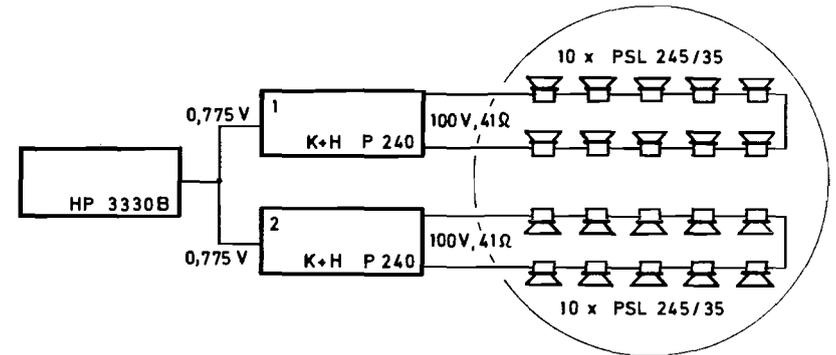


Abb. 11: Anordnung der Lautsprecherkugel im Meßgelände



<u>Tongenerator</u>	<u>Leistungsverstärker</u>	<u>Lautsprecherkugel</u>
Frequ. Sweep, 2 x 240 W		(Ikosaeder)
100 Steps		20 Lautsprecher
1 ms/Step		in 2 Gruppen
Amplitude: +3 dB		

Signale: Sinustöne frequenzmoduliert, (Heultöne)
 Hub: ca. $\pm 3\%$, Modulationsfrequenz: 5 Hz

Signal	Oktaven, DIN 45651			Tongeneratoreinstellung			
	f_u	f_m	f_o	f_u	f'_m	f_o	Δf
Nr	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
1	180	250	355	177.5	267.5	357.5	1.8
2	355	500	710	352.5	532.5	712.5	3.6
3	710	1000	1400	710	1055	1400	6.9
4	1400	2000	2800	1400	2100	2800	14.0

Abb. 12: Erzeugung des Quellensignals
 oben : Geräteaufbau
 unten: Spezifikationen zum abgestrahlten Tonsignal

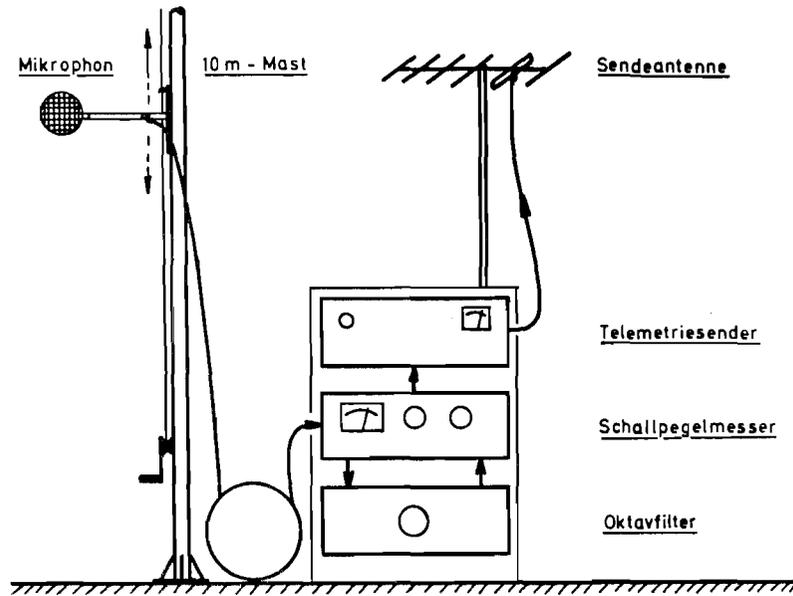


Abb. 13: Empfängerseitige Meßgeräteanordnung

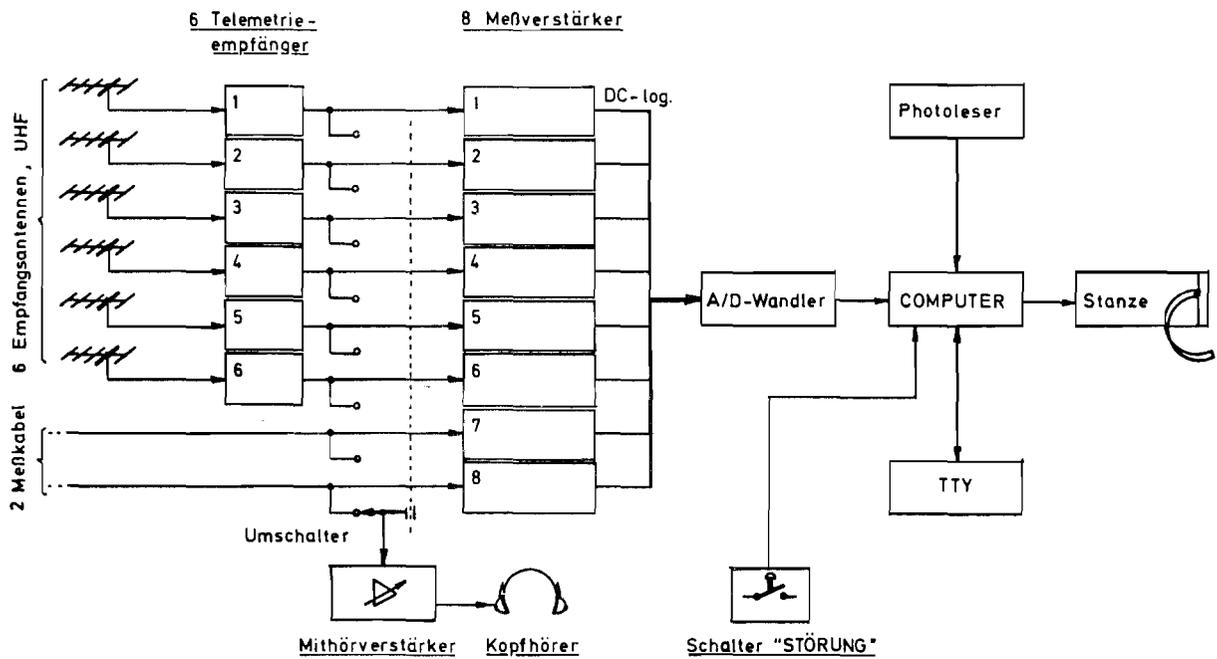


Abb. 14: Blockschaltbild der empängerseitigen Datenauswertung im Meßfahrzeug

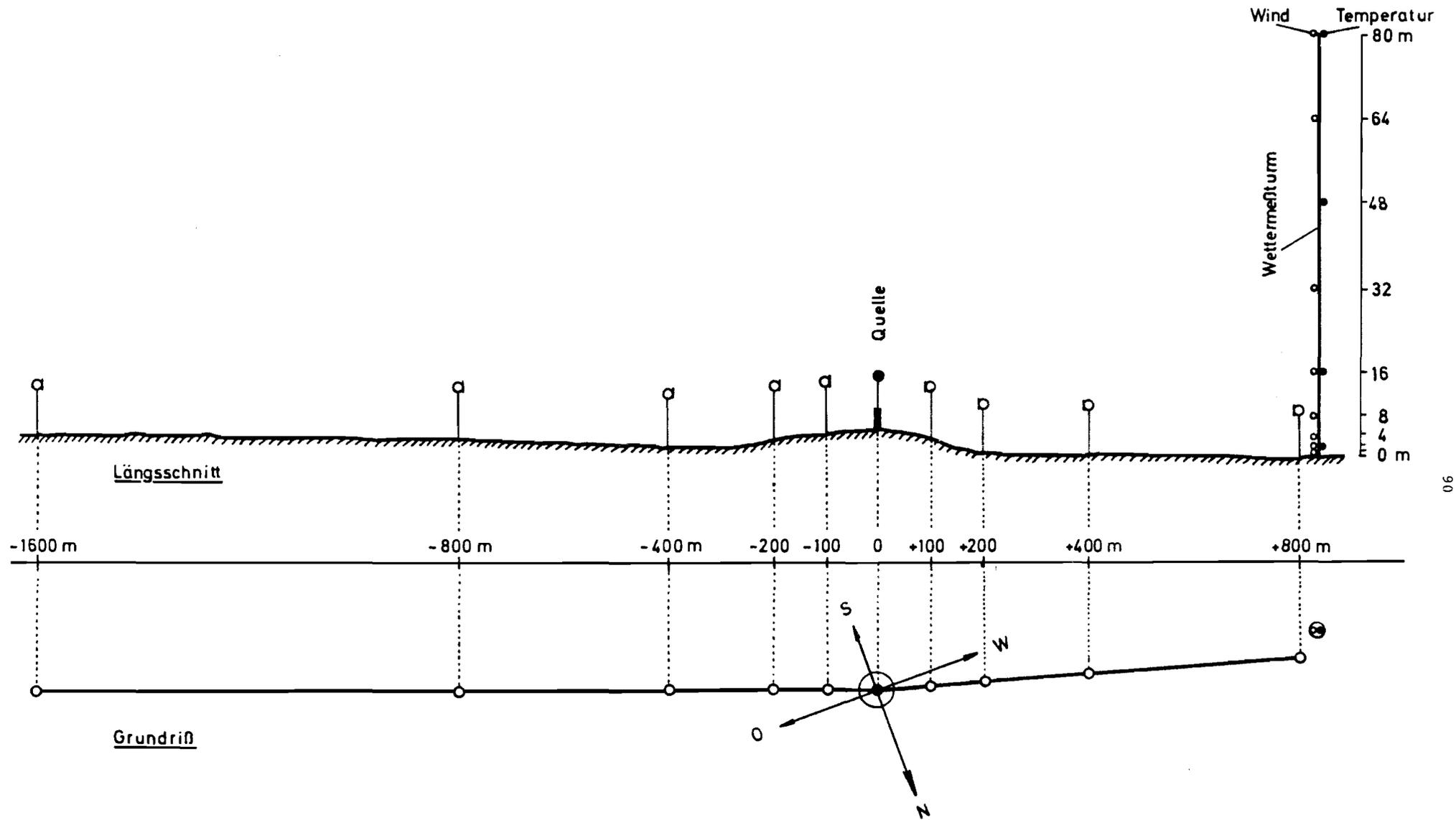


Abb. 15: Anordnung von Schallquelle, Meßmikrofonen und meteorologischen Sonden im Gelände

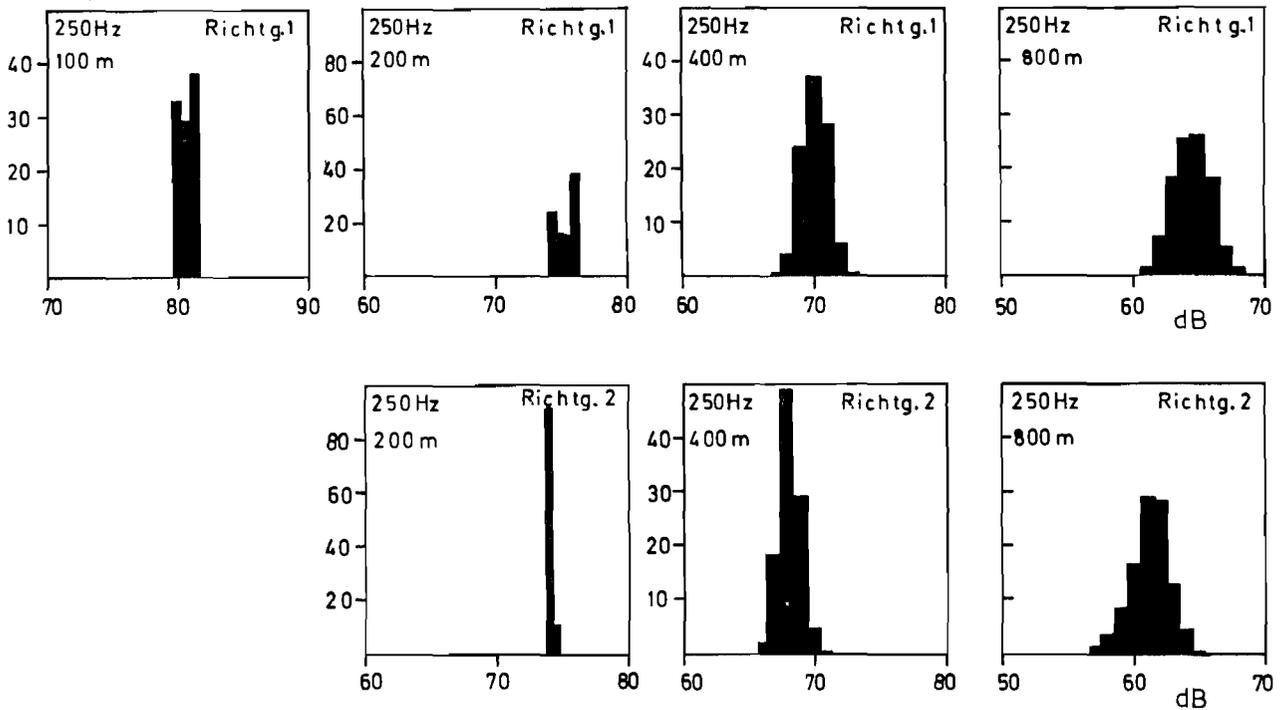


Abb. 16: Häufigkeitsverteilungen von Momentanwerten zeitgleich gewonnener 20-Minuten-Messungen an verschiedenen Orten bei einer Querwind-situation (2,4 m/s)

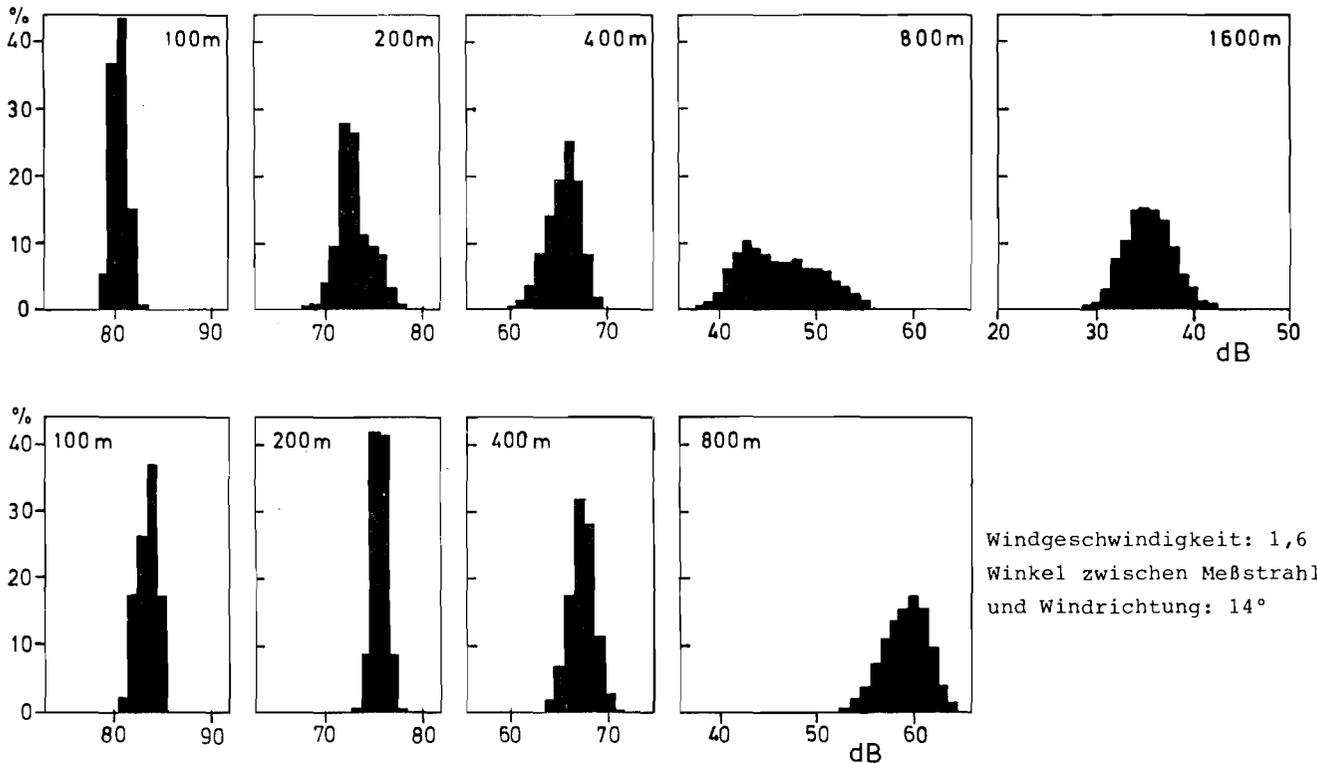


Abb. 17: Häufigkeitsverteilungen der Momentanwerte einer zeitgleichen 20-Minuten-Messung an verschiedenen Meßorten:
 obere Zeile : Gegenwind (Richt. 1) bei Entfernungen von 100 m bis 1600 m, Frequenz: 250 Hz
 untere Zeile: Mitwind (Richt. 2) bei Entfernungen von 100 m bis 800 m, Frequenz: 250 Hz.

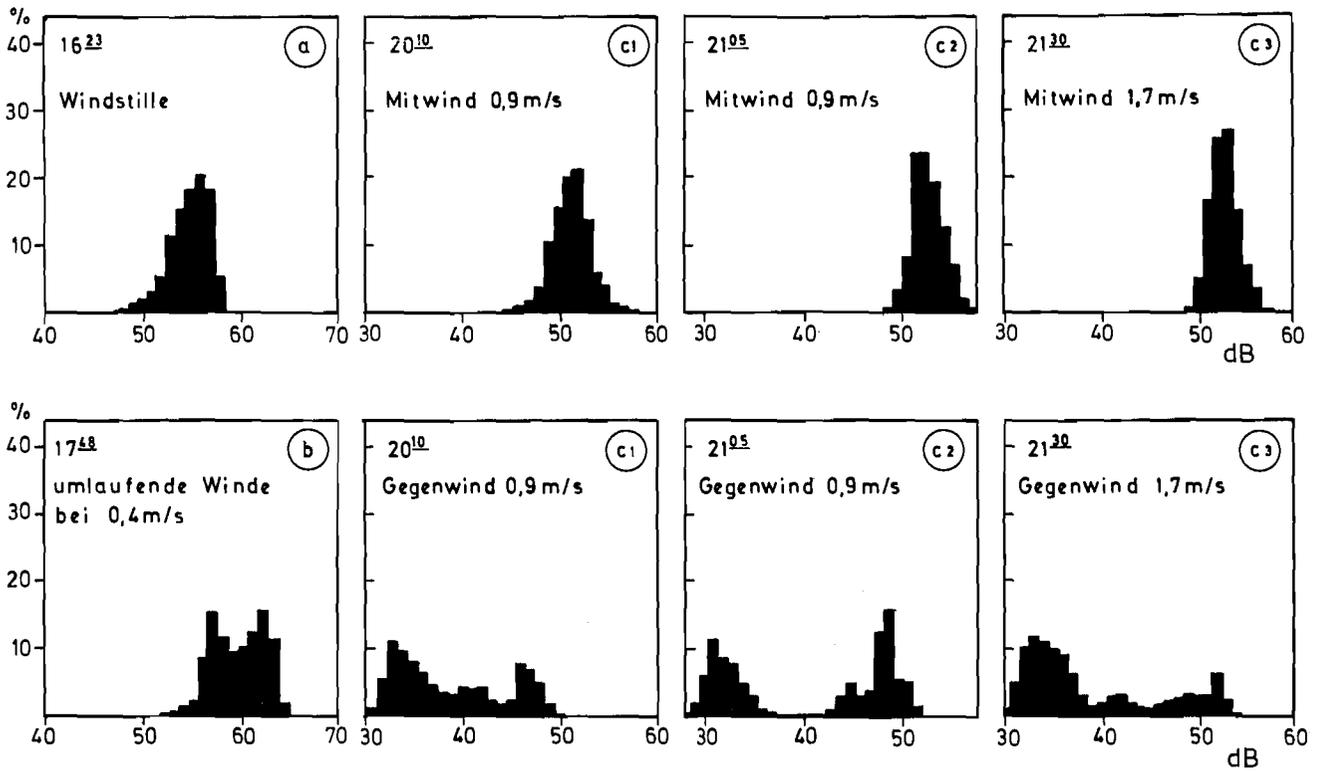


Abb. 18: Häufigkeitsverteilungen der Momentanwerte verschiedener 20-Minuten-Messungen (Entfernung 800 m, Frequenz 500 Hz)

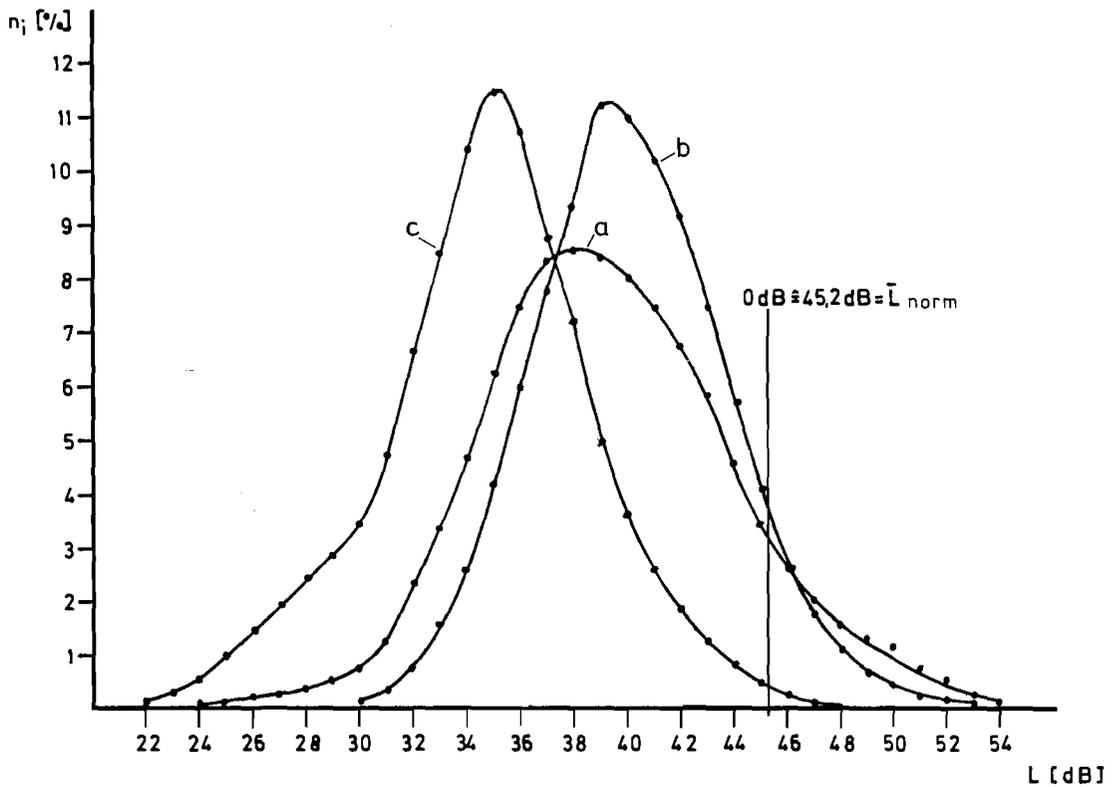


Abb. 19: Häufigkeitsverteilungen der Momentanwerte (Abtastwerte) aus sämtlichen Messungen (a), sowie für Mitwind (b) und Gegenwind (c) für die Entfernung 800 m, und die Frequenz 2 kHz

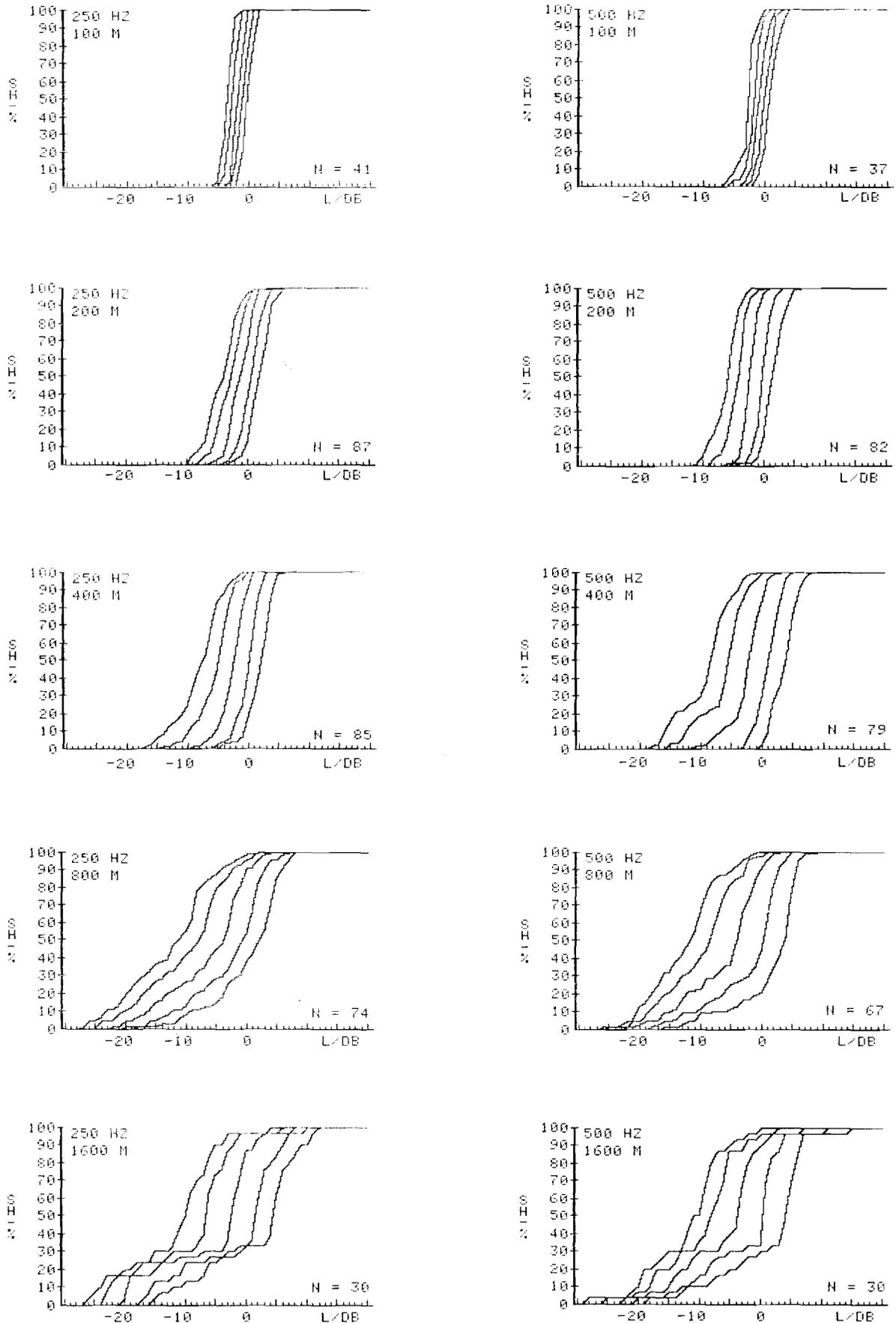


Abb. 20: Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel sämtlicher Einzelmessungen. Die Ergebnisse sind als Pegeldifferenzen gegenüber dem Normierungspegel (0 dB) dargestellt. Die Prozentpegel sind je Diagramm einheitlich von rechts nach links in der Reihenfolge L_1 , L_{10} , L_{50} , L_{90} u. L_{99} angeordnet.

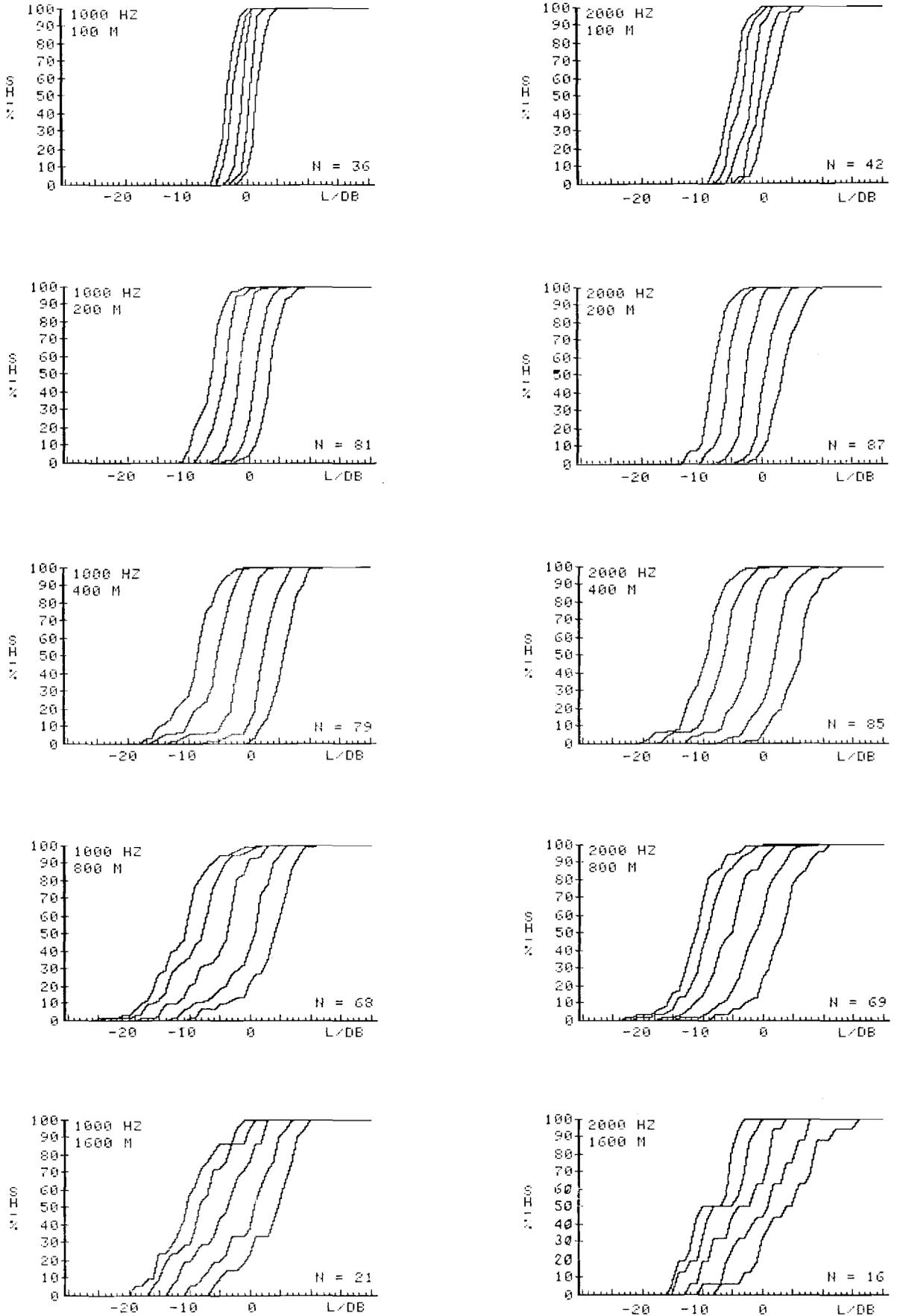


Abb. 21: Summenhäufigkeitsverteilungen der Prozentpegel sämtlicher Einzelmessungen. Die Ergebnisse sind als Pegeldifferenzen gegenüber dem Normierungspegel (0 dB) dargestellt. Die Prozentpegel sind je Diagramm einheitlich von rechts nach links in der Reihenfolge L_1 , L_{10} , L_{50} , L_{90} u. L_{99} angeordnet.

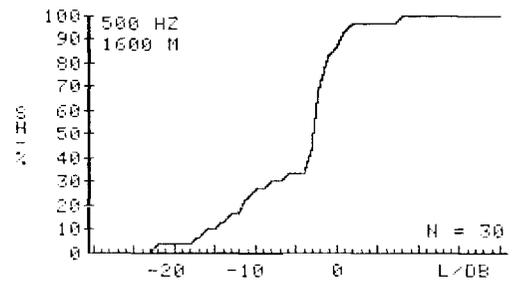
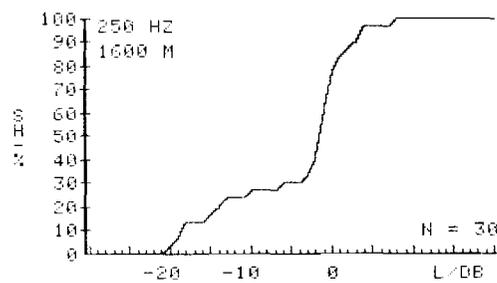
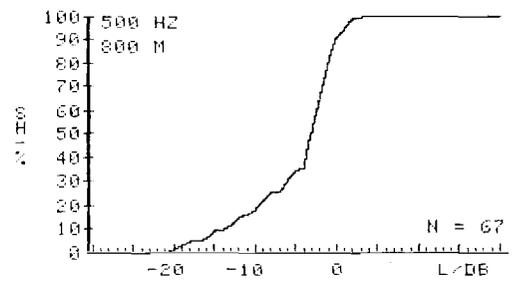
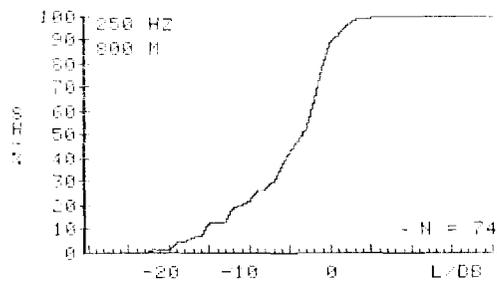
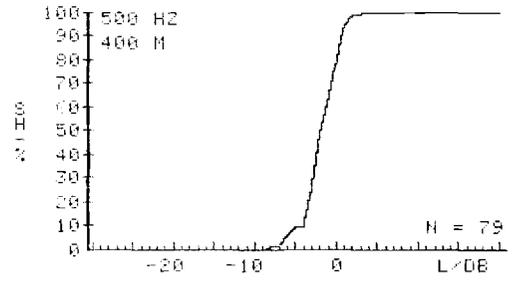
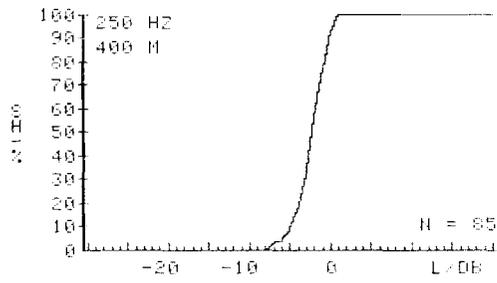
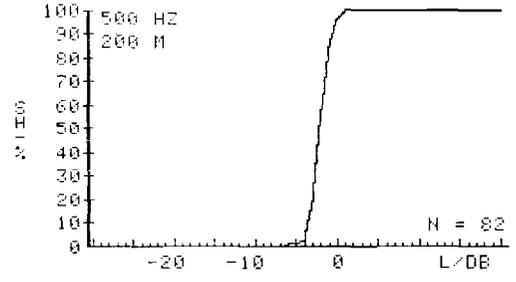
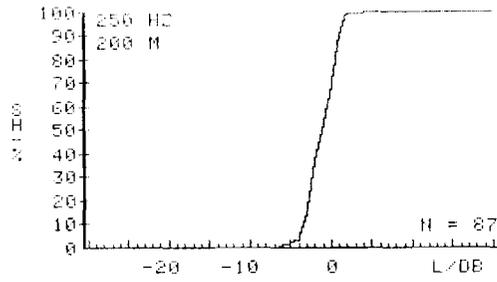
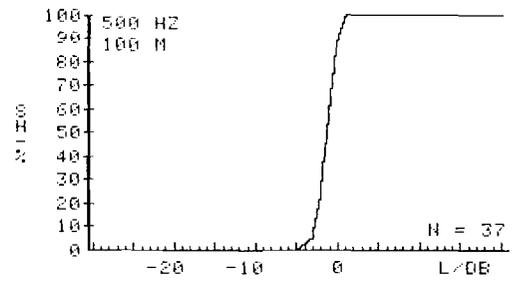
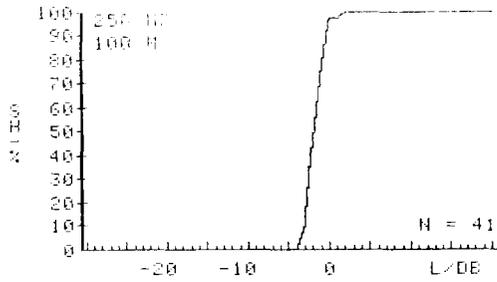


Abb. 22: Summenhäufigkeitsverteilungen der energieäquivalenten Dauerschallpegel L_m sämtlicher Einzelmessungen. Die Ergebnisse sind als Pegeldifferenzen gegenüber dem Normierungspegel (0 dB) dargestellt.

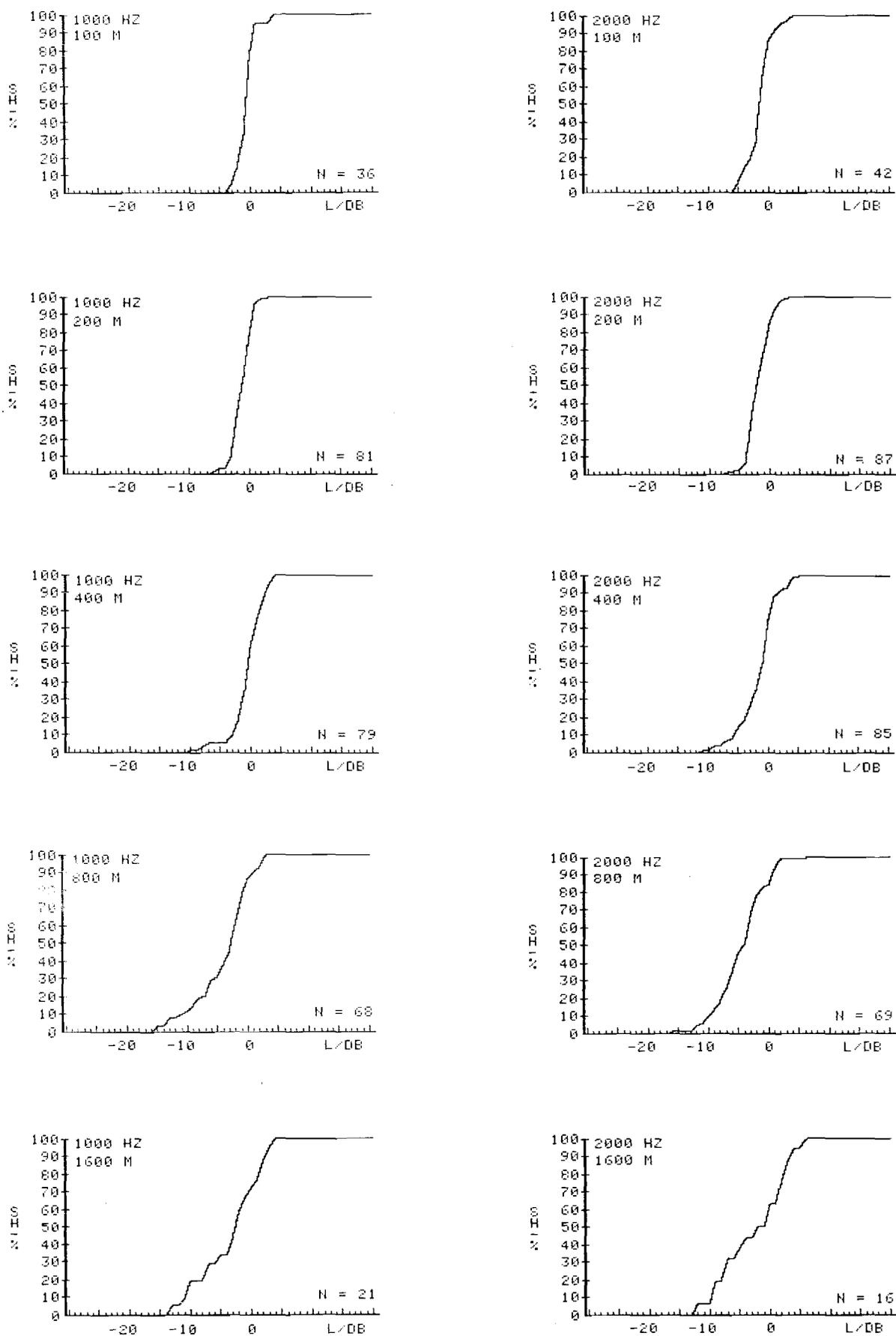


Abb. 23: Summenhäufigkeitsverteilungen der energieäquivalenten Dauerschallpegel L_m sämtlicher Einzelmessungen. Die Ergebnisse sind als Pegeldifferenzen gegenüber dem Normierungspegel (0 dB) dargestellt.

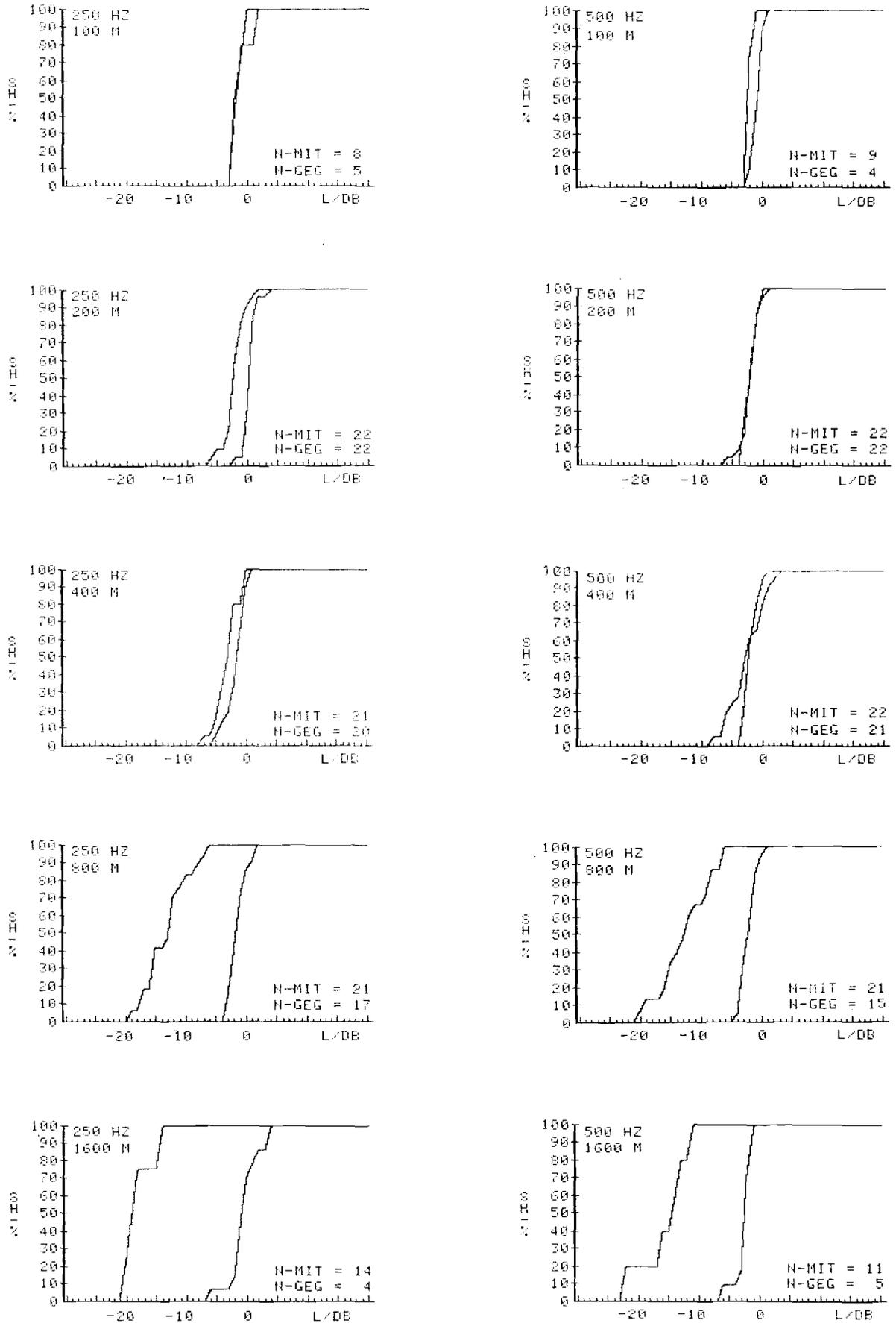


Abb. 24: Summenhäufigkeitsverteilungen der energieäquivalenten Dauerschallpegel L_m der nach Mit- u. Gegenwind geschichteten Einzelmessungen. Die Ergebnisse sind als Pegeldifferenzen gegenüber dem Normierungspegel (0 dB) dargestellt.

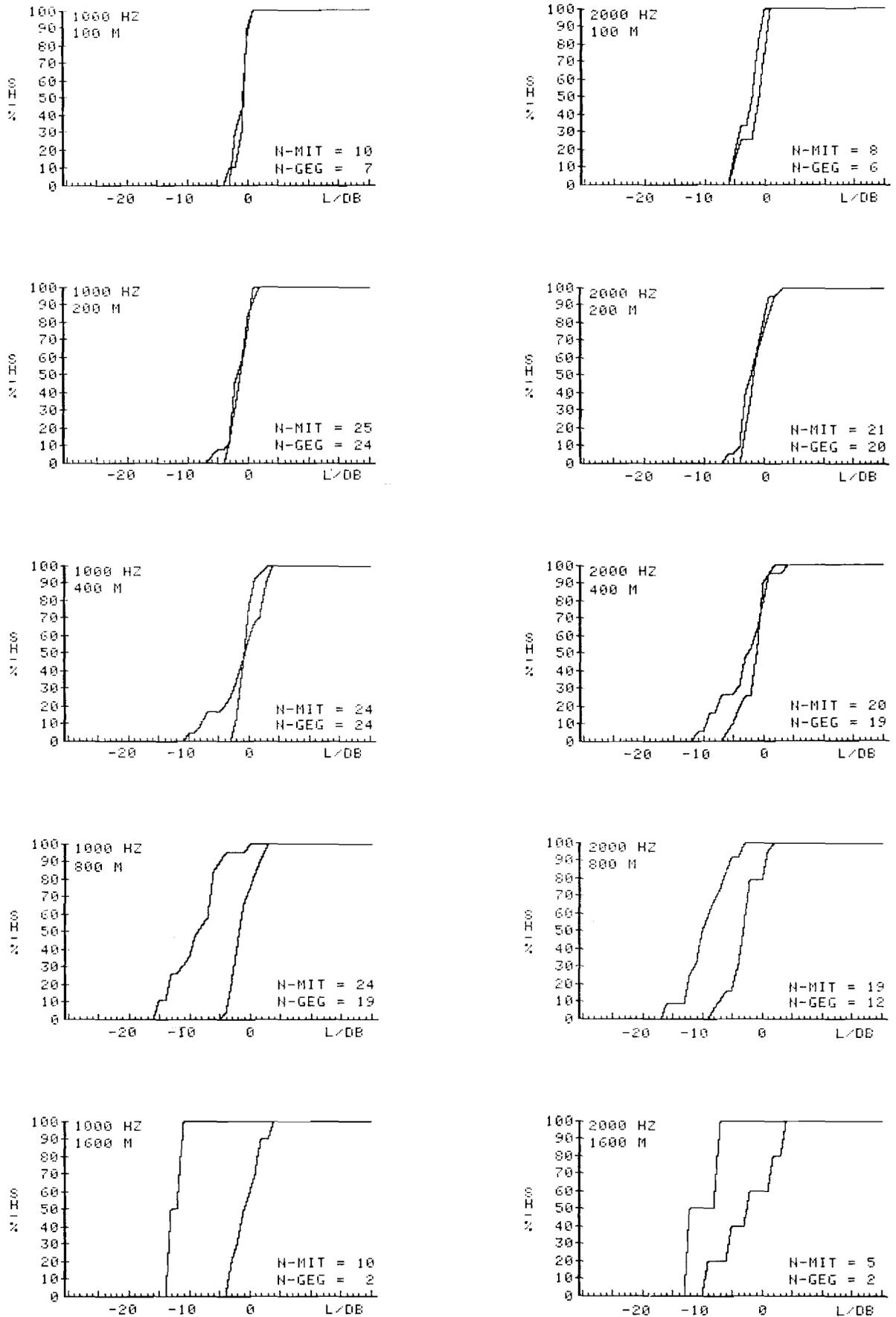


Abb. 25: Summenhäufigkeitsverteilungen der energieäquivalenten Dauerschallpegel L_m der nach Mit- u. Gegenwind geschichteten Einzelmessungen. Die Ergebnisse sind als Pegeldifferenzen gegenüber dem Normierungspegel (0 dB) dargestellt.

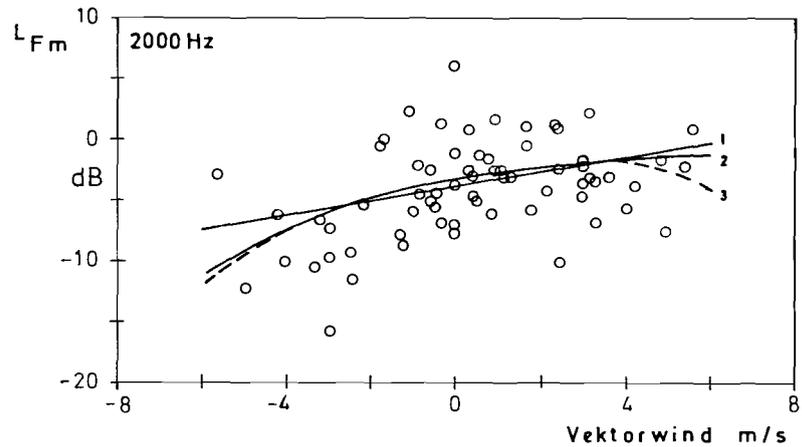
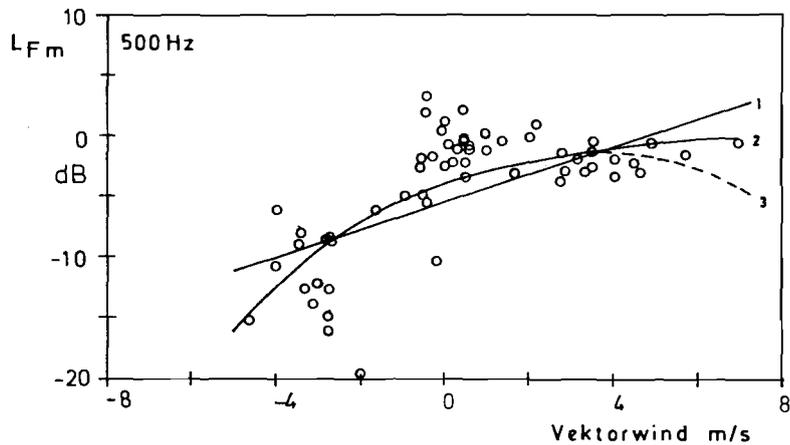
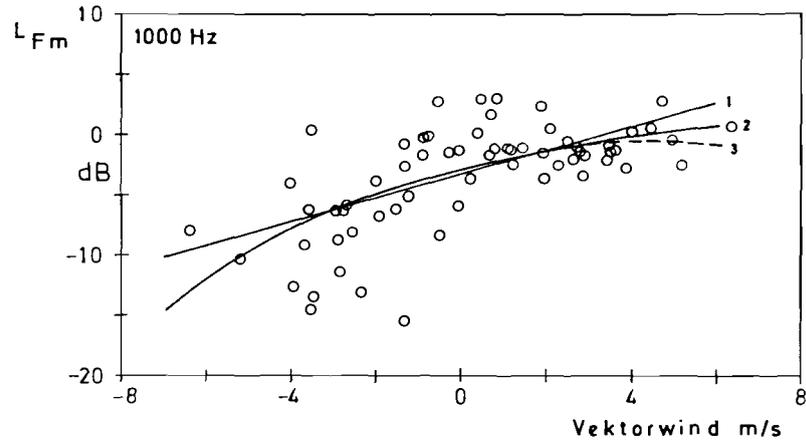
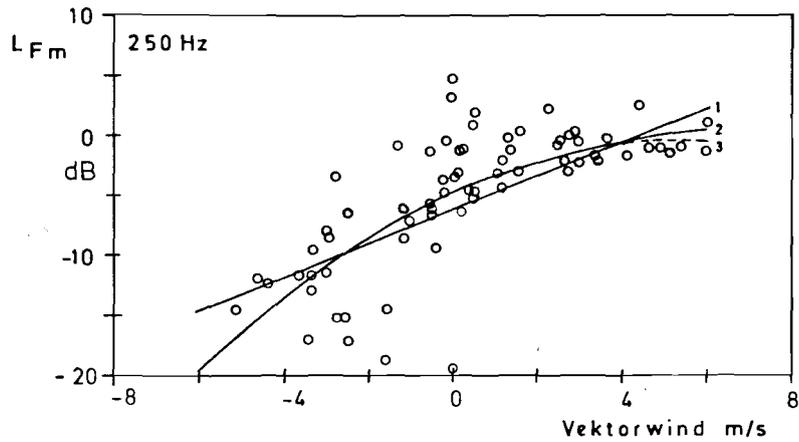


Abb. 26a: Regressionskurven (1 $\hat{=}$ lineare, 2 $\hat{=}$ exponentielle, 3 $\hat{=}$ quadratische Näherung) für den Zusammenhang zwischen der Größe des Vektorwindes und dem zeitlich über 20 Minuten gemessenen energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{m,20}$ bei 800 m Quellenentfernung

Abb. 26b: Regressionskurven (1 $\hat{=}$ lineare, 2 $\hat{=}$ exponentielle, 3 $\hat{=}$ quadratische Näherung) für den Zusammenhang zwischen der Größe des Vektorwindes und dem zeitlich über 20 Minuten gemessenen energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{m,20}$ bei 800 m Quellenentfernung.

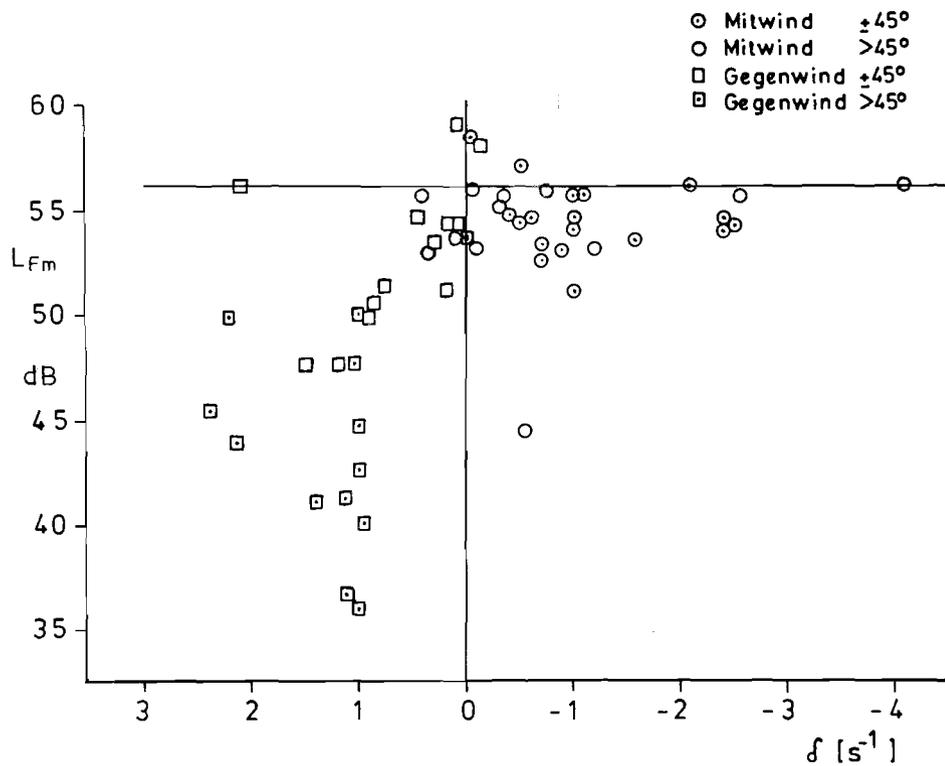


Abb. 27: Abhängigkeit gemessener, energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{m,20}$ vom Gradienten d für die Entfernung 800 m und die Oktave der Mittenfrequenz 500 Hz ($d = \beta \cos \phi - \alpha$)

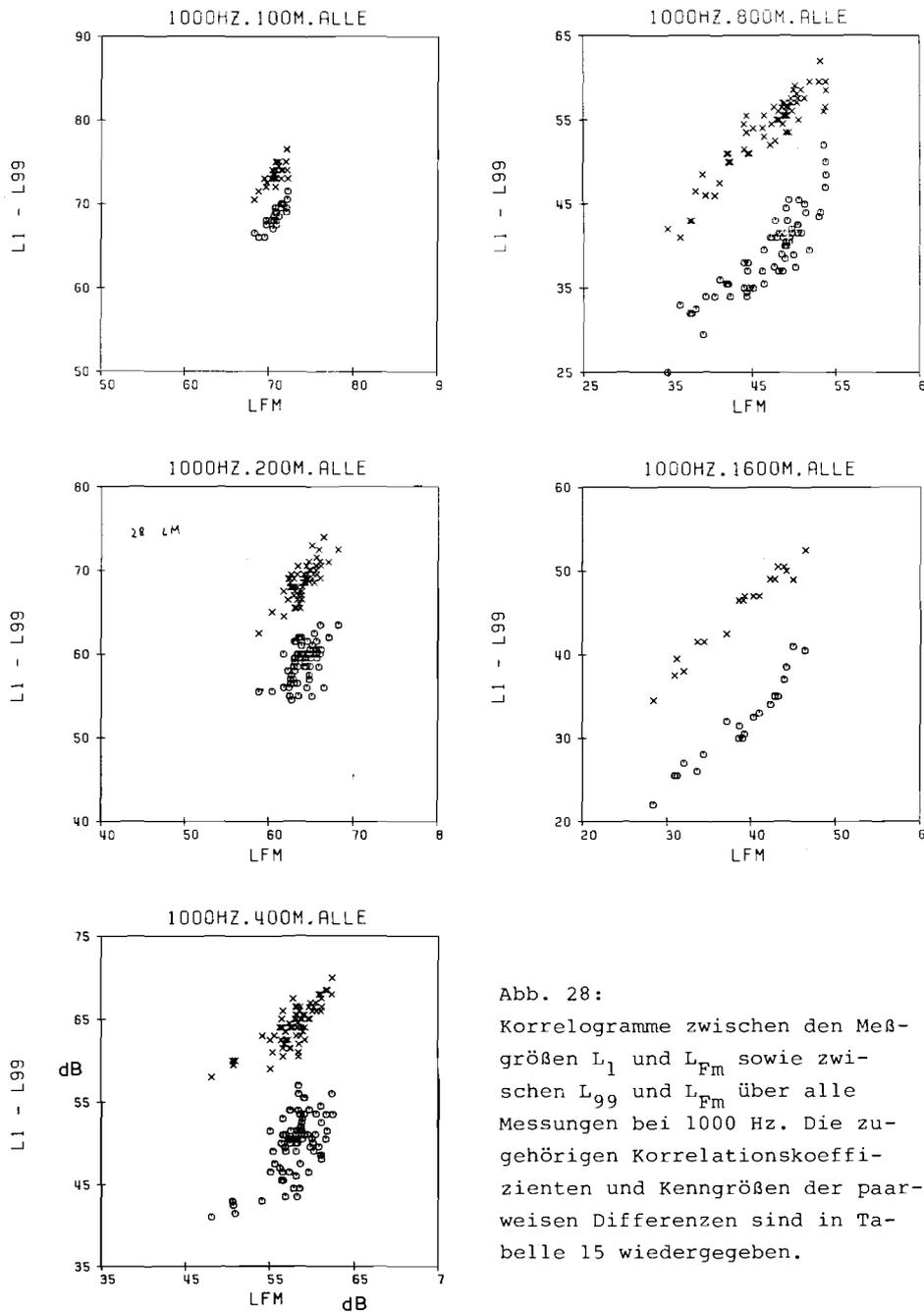
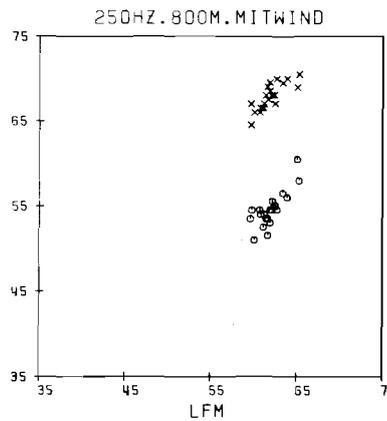
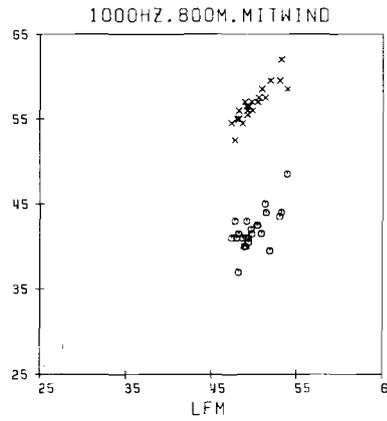


Abb. 28: Korrelogramme zwischen den Meßgrößen L_1 und $L_{m,20}$ sowie zwischen L_{99} und $L_{m,20}$ über alle Messungen bei 1000 Hz. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten und Kenngrößen der paarweisen Differenzen sind in Tabelle 15 wiedergegeben.

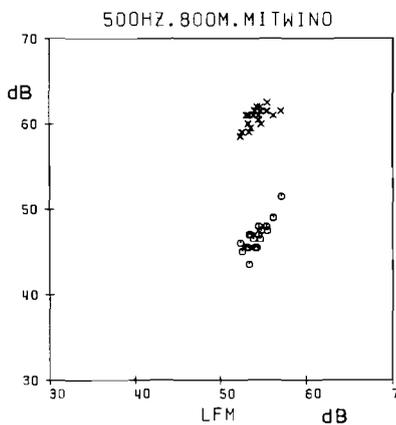
667 - 17



667 - 17



667 - 17



667 - 17

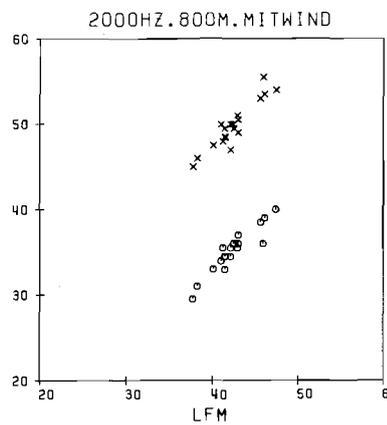
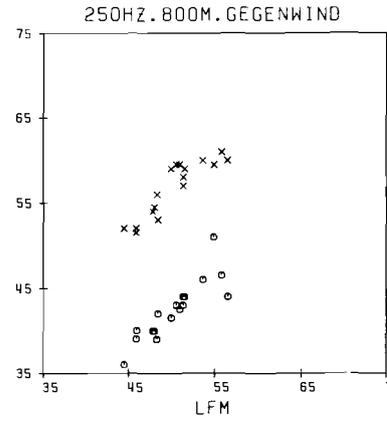
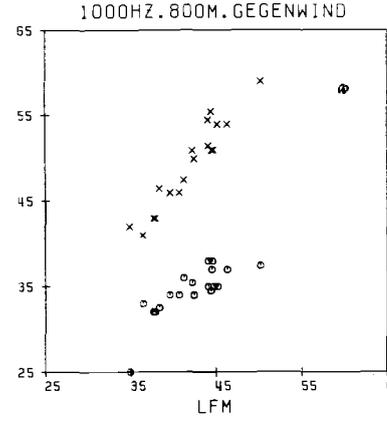


Abb. 29: Korrelogramme zwischen den Meßgrößen L_1 und L_{Fm} sowie zwischen L_{99} und L_{Fm} für 800 m Quellenentfernung und Mitwind. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 16 angegeben.

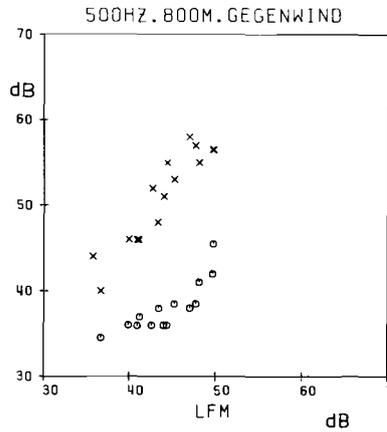
667 - 17



667 - 17



667 - 17



667 - 17

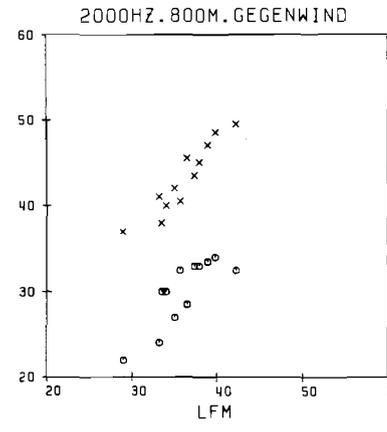


Abb. 30: Korrelogramme zwischen den Meßgrößen L_1 und L_{Fm} sowie zwischen L_{99} und L_{Fm} für 800 m Quellenentfernung und Gegenwind. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 16 angegeben.

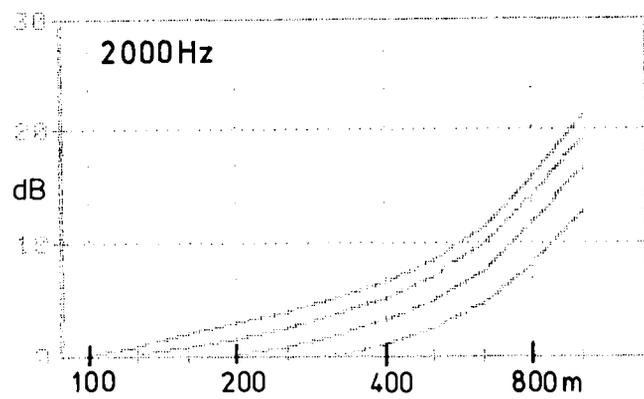
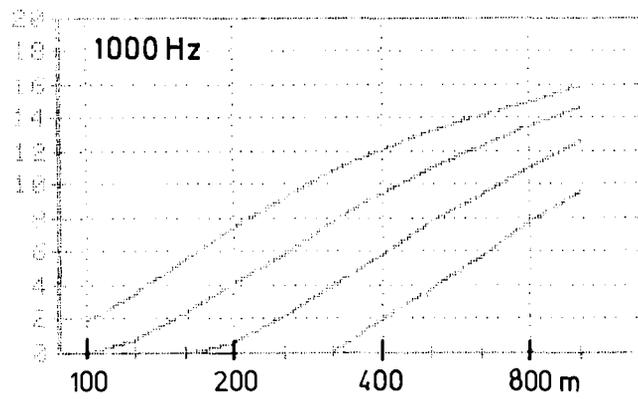
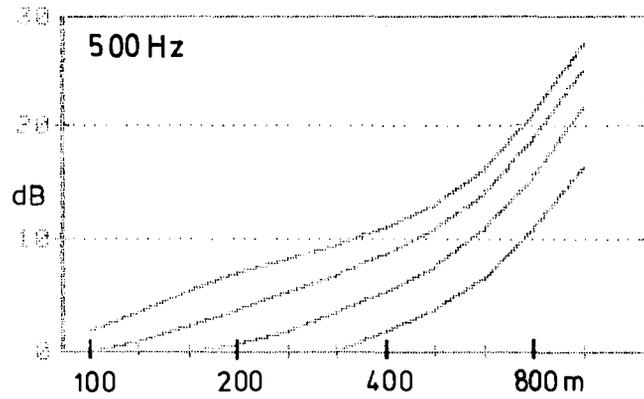
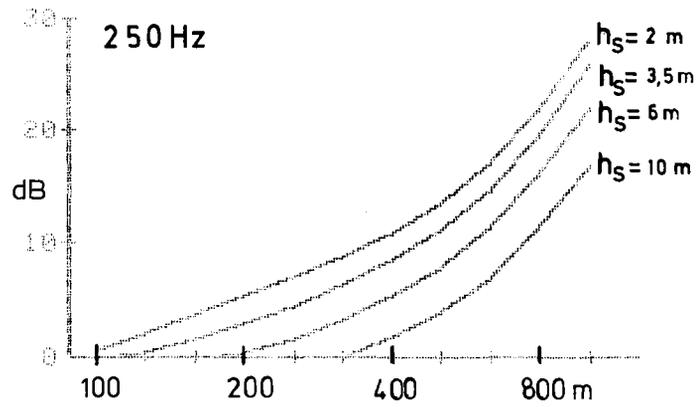


Abb. 31: Verlauf der Zusatzdämpfungen für Gegenwind in Abhängigkeit von der Quellenentfernung und der Sender-Empfänger-Geometrie

Berichte der

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus den wissenschaftlichen Untersuchungen der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Einzelexemplare werden Interessenten auf Anforderung kostenlos zur Verfügung gestellt.

Anforderungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
4300 E s s e n 1

- Berichte-Nr. 1: KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ:
(vergriffen) LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems - (1978).
- Berichte-Nr. 2: BUCK, M.:
(vergriffen) Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität (1978).
- Berichte-Nr. 3: SCHEICH, G.:
(vergriffen) Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungsprogramme in den USA (1979).
- Berichte-Nr. 4: SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
(vergriffen) Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten am Bau (1979).
- Berichte-Nr. 5: SPLITTGERBER, H.:
(vergriffen) Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen (1979).
- Berichte-Nr. 6: STRAUCH, H. und K.H. GOLDBERG:
(vergriffen) Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbauzustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege (1979).
- Berichte-Nr. 7: KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ UND K. ADAMEK:
(vergriffen) Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen (1980).
- Berichte-Nr. 8: WIETLAKE, K.H.:
Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern (1980).
- Berichte-Nr. 9: STRAUCH, H.:
(vergriffen) Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen (1980).
- Berichte-Nr. 10: HILLEN, R.:
Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung
-Ziele, Methodik, Ergebnisse- (1980).
- Berichte-Nr. 11: MANNS, H., H. GIES und W. STRAMPLAT:
(vergriffen) Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes FH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft (1980).
- Berichte-Nr. 12: GIEBEL, J.:
(vergriffen) Verhalten und Eigenschaften atmosphärischer Sperrschichten (1981).
- Berichte-Nr. 13: BRÖKER, G., H. GLIWA und E. MEURISCH:
Abscheidegrade von biologisch- und chemisch-aktiven Aggregaten zur Desodorierung osmogener Abluft von Tierkörperbeseitigungsanlagen (1981).

- Berichte-Nr. 14: BRANDT, C.J.:
(vergriffen) Untersuchungen über Wirkungen von Fluorwasserstoff auf Lolium Multiflorum und andere Nutzpflanzen (1981).
- Berichte-Nr. 15: WELZEL, K. und H.D. WINKLER:
(vergriffen) Emission und interner Kreislauf von Thallium bei einem Drehrohrofen mit Schwebegaswärmeaustauscher zur Herstellung von Portlandzementklinker unter Einsatz von Purpureerz als Eisenträger. - 1. Bericht - (1981).
- Berichte-Nr. 16: PRINZ, B.:
(In Vorbereitung) Umweltpolitik in der VR China und technologische Entwicklung.
- Berichte-Nr. 17: BRÖKER, G. und H. GLIWA:
Untersuchungen zu den Dioxin-Emissionen aus den kommunalen Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 18: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Die Entwicklung der Immissionsbelastung in den letzten 15 Jahren in der Rhein-Ruhr-Region (1982).
- Berichte-Nr. 19: PFEFFER, H.U.:
Das Telemetrische Echtzeit-Mehrkomponenten-Erfassungssystem TEMES zur Immissionsüberwachung in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 20: BACH, R.W.:
Über Schätzfunktionen zur Bestimmung hoher Quantile der Grundgesamtheit luftverunreinigender Schadstoffkonzentrationen aus Stichproben (1982).
- Berichte-Nr. 21: STRAUCH, H.:
Hinweise zur Anwendung flächenbezogener Schalleistungspegel (1982).
- Berichte-Nr. 22: SPLITTGERBER, H.:
Verfahren zur Auswertung von Erschütterungsmessungen und zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (1982).
- Berichte-Nr. 23: KRAUSE, G.M.H.:
Immissionswirkungen auf Pflanzen - Forschungsschwerpunkte in den Vereinigten Staaten von Amerika. Bericht über eine Reise in die USA und die Teilnahme am 13. Air Pollution Workshop in Ithaca, N. Y., in der Zeit vom 02.05.-24.05.1981 (1982).
- Berichte-Nr. 24: KÜLSKE, S.:
Analyse der Periode sehr hoher lokaler Schadstoffbelastungen im Ruhrgebiet vom 15.01.1982 bis 20.01.1982 (1982).
- Berichte-Nr. 25: VAN HAUT, H. und G.H.M. KRAUSE:
Wirkungen von Fluorwasserstoff-Immissionen auf die Vegetation (1982).
- Berichte-Nr. 26: KOCH, E., V. THIELE, J. GIEBEL, H. STRAUCH und P. ALTENBECK:
Empfehlungen für die problemgerechte Erstellung von Immissionsschutzgutachten in Bauleitplanverfahren (1982).
- Berichte-Nr. 27: MANNS, H., H. GIES und G. NITZ:
(vergriffen) Verbesserung der Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit von Messungen zur Ermittlung aromatischer Kohlenwasserstoffe in der Außenluft (1982).
- Berichte-Nr. 28: PRINZ, B., G.M.H. KRAUSE und H. STRATMANN:
Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland (1982).
- Berichte-Nr. 29: GIEBEL, J.:
Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Sperrschichthöhen und Immissionsbelastung (1983).
- Berichte-Nr. 30: MANNS, H. und H. GIES:
Ergebnisse der Laborprüfung und Optimierung des meßtechnischen Teiles der Ozon-Meßplätze im Meßnetz LIMES-TEMES (1983).

- Berichte-Nr. 31: BEINE, H., R. SCHMIDT UND M. BUCK:
Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Schwefelsäure- und Sulfatgehaltes in Luf
(1983).
- Berichte-Nr. 32: BEIER, R. und P. BRUCKMANN:
Messung und Analyse von Kohlenwasserstoff-Profilen im Rhein-Ruhrgebiet (1983).
- Berichte-Nr. 33: FRONZ, W.:
Ermittlung von Verkehrsgeräusch-Immissionen
- zum tageszeitlichen Verlauf des Geräuschpegels und des Verkehrsaufkommens an
Bundes- und Sammelstraßen (1983).
- Berichte-Nr. 34: BRÖKER, G.:
Zusammenfassende Darstellung der Emissionssituation in Nordrhein-Westfalen und
der Bundesrepublik Deutschland für Stickstoffoxide (1983).
- Berichte-Nr. 35: PIORR, D. und R. HILLEN:
Veränderung akustischer Kenngrößen infolge der nächtlichen Abschaltung von
Lichtsignalanlagen (1983).
- Berichte-Nr. 36: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Benzol-Immissionsmessungen im Lande Nordrhein-Westfalen (1983).
- Berichte-Nr. 37: BACH, R.-W. und H. STRATMANN:
Untersuchungen zur Bestimmung der Aufnahme rate des IRMA-Gerätes bei verschiedenen
Anströmverhältnissen (1983).
- Berichte-Nr. 38: WIETLAKE, K.H.:
Beurteilung und Minderung tieffrequenter Geräusche (1983).
- Berichte-Nr. 39: STRAUCH, H. und K. SCHWENGER:
Geräusche und Erschütterungen, verursacht durch elektrisch angetriebene
Wärmepumpen (1983).
- Berichte-Nr. 40: BRÖKER, G. und B. SCHILLING:
Schwermetallemissionen bei der Verbrennung kommunaler Klärschlämme (1983).
- Berichte-Nr. 41: HILLEN, R.:
Über Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualität von Schießgeräuschmessungen im
Immissionsbereich (1983).

Anmerkung:

Die LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in vielen Universitäts- und Hoch-
schulbibliotheken zur Ausleihe bzw. Einsichtnahme zur Verfügung.