



Fachbeiträge des Landesumweltamtes

Heft Nr. 106

## **Der Einfluss turbulenter Temperatur- und Windfluktuationen auf die Standard- abweichung des akustischen Beurtei- lungspegels**

Ein Beitrag zur Minimumab-  
schätzung der Standardabweichung  
des Beurteilungspegels



**Der Einfluss turbulenter  
Temperatur- und Windfluktuationen  
auf die Standardabweichung des  
akustischen Beurteilungspegels**

Ein Beitrag zur Minimumabschätzung der  
Standardabweichung des  
Beurteilungspegels

**Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Titelreihe, Heft-Nr. 106**

**Der Einfluss turbulenter Temperatur- und Windfluktuationen auf die Standardabweichung des akustischen Beurteilungspegels**

Ein Beitrag zur Minimumabschätzung der Standardabweichung des Beurteilungspegels

**Herausgeber:**

Landesumweltamt Brandenburg (LUA)

Seeburger Chaussee 2

OT Groß Glienicke

14476 Potsdam

Tel.: 033201 - 442 0

Fax: 033201 - 43677

**E-Mail: [infoline@lua.brandenburg.de](mailto:infoline@lua.brandenburg.de)**

[www.mluv.brandenburg.de/info/lua-publikationen](http://www.mluv.brandenburg.de/info/lua-publikationen)

**Bearbeitung:**

LUA, Abteilung Technischer Umweltschutz, Referat T2 Lärmschutz, Verkehr, Energie, Klimaschutz

Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Albrecht

Dipl. Phys. Ekkehardt Peters – E-Mail: [Ekkehardt.Peters@lua.brandenburg.de](mailto:Ekkehardt.Peters@lua.brandenburg.de)

**Redaktionelle, technische Umsetzung:**

LUA, Ref. Umweltinformation/Öffentlichkeitsarbeit S5

Potsdam, im April 2007

Die Veröffentlichung als Print und Internetpräsentation erfolgt im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Dritten zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>1 Vorbemerkungen</b>	<b>4</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>4</b>
<b>3 Berechnungsergebnisse</b>	<b>11</b>
3.1 Testdatensatz und Auswertemethodik	11
3.2 Der Tagesgang der Stabilitätsverhältnisse und die Richtungsabhängigkeit der Standardabweichung des Schalldruckpegels	14
<b>4 Berechnung der Standardabweichung des Beurteilungspegels</b>	<b>15</b>
<b>5 Schlussfolgerungen</b>	<b>18</b>
<b>6 Verzeichnisse</b>	<b>19</b>
6.1 Verzeichnis der Symbole	19
6.2 Tabellenverzeichnis	20
6.3 Abbildungsverzeichnis	20
6.4 Quellennachweis	20

## Zusammenfassung

In den Modellen zur Berechnung der Schallausbreitung wird üblicherweise eine konstante Impedanz der Atmosphäre angenommen. Unter realen atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen ist die Impedanz jedoch turbulenten Schwankungen unterworfen, die ihrerseits die Schallausbreitung beeinflussen. Im vorliegenden Bericht wird zunächst der theoretische Hintergrund zur Berechnung der durch die turbulenten Fluktuationen der Impedanz verursachten Standardabweichung des Schalldruckpegels am Immissionsort erläutert. Dabei wird gezeigt, dass die erforderlichen Bestimmungsgrößen auf der Grundlage des meteorologischen Grenzschichtmodells der TA-Luft ermittelt werden können.

Unter Verwendung von Datensätzen, die vom Deutschen Wetterdienst für die Berechnung der Schadstoffausbreitung bereitgestellt werden, können die Standardabweichungen des Beurteilungspegels für die Beurteilungszeiträume Tag und Nacht berechnet werden. Diese so berechnete Standardabweichung ist eine Minimumabschätzung, weil ausschließlich der turbulente atmosphärische Anteil berücksichtigt wird. Insofern ist sie unabhängig von sonstigen Standortbedingungen und nur abhängig von der Differenz zwischen der Windrichtung und der Schallausbreitungsrichtung.

Für die Tageszeit schwanken die Werte für die Standardabweichung des Beurteilungspegels zwischen 0,03 und 1,54 dB je nach Mitwind- oder Querwindbedingungen. In der Nachtzeit liegt die Schwankungsbreite zwischen 0,01 und 0,73 dB.

# 1 Vorbemerkungen

Die Tatsache, dass die Geräuschintensität ein und derselben Schallquelle in der Nachtzeit häufig größer als am Tage, beschäftigte schon Aristoteles. Er fragte: „Warum lässt sich der Schall besser bei Nacht hören?“ Und er antwortet mit Anaxagoras „Weil bei Tage die von der Sonne erwärmte Luft zischt und raucht, sie aber bei Nacht in Ruhe ist, wegen des fehlenden Wärmestromes“ [Zitat nach [1]].

Alexander v. Humboldt hat in seinem Vortrag vor der Akademie der Wissenschaften zu Paris am 13. März 1820 für dieses auch von ihm beobachtete Phänomen eine physikalisch begründete Erklärung gefunden indem er formuliert: „... Ich glaube vielmehr, dass die Gegenwart der Sonne auf die Fortpflanzung und die Stärke des Schalls einwirkt: Durch die Hindernisse welche ihr die aufsteigenden Luftströme von verschiedener Dichtigkeit, die partiellen Wellenschwingungen der Atmosphäre, verursacht durch die ungleiche Erwärmung der verschiedenen Teile des Bodens, entgegengesetzt. Bei stiller Luft, möge sie trocken oder mit gleichmäßig verteilten blasenförmigen Dünsten vermischt sein, pflanzt sich die Schallwelle ohne Schwierigkeiten fort...“

Wir wissen heute, dass die von Humboldt beschriebene tagesperiodische Schwankung der Schallintensität durch die unterschiedlichen Stabilitätsverhältnisse der planetaren Grenzschicht am Tage und in der Nacht verursacht wird. Als planetare Grenzschicht wird der am Boden aufliegende Teil der Atmosphäre bezeichnet, der durch die Wechselwirkung mit der Erdoberfläche geprägt wird.

Charakteristisch für die verschiedenen Stabilitätsverhältnisse sind unterschiedliche turbulente Temperatur- und Windfluktuationen, die ihrerseits zu turbulenten Schwankungen der Impedanz führen. Ausgehend von einer stationären Punktschallquelle mit einer konstanten Schallleistung und konstanter Entfernung zu einem Immissionsort wird der Einfluss der turbulenten Schwankungen der Impedanz am Immissionsort auf die Standardabweichung des Schalldruckpegels untersucht und ihre Größenordnung abgeschätzt. Unberücksichtigt bleiben dabei die unterschiedlichen Wege der Schallwelle durch die Atmosphäre und der Einfluss der Bodenimpedanzen, wie z.B. in [2] dargelegt, sowie die Schallstreuung an Hindernissen und die Luftabsorption. Damit erweist sich die vorliegende Untersuchung als Minimumabschätzung der Standardabweichung des Schalldruckpegels. Das hat insofern eine nicht zu unterschätzende praktische Bedeutung, weil die bisher gebräuchlichen Schallausbreitungsmodelle nur den Mittelungspegel als Ergebnis darstellen. Die zur Bewertung des Mittelungspegels erforderliche Standardabweichung fehlt.

# 2 Theorie

Zur besseren Erläuterung der Vorgehensweise soll zunächst der theoretische Hintergrund kurz beschrieben werden. Ausgangspunkt sind die bekannten Beziehungen zwischen Schallintensität  $J$  und Schallleistung  $P$ . Die Schallintensität ist definiert als die Schallenergie, die pro Zeiteinheit senkrecht durch eine Flächeneinheit tritt.

$$(1) \quad J = \frac{P^2}{Z} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{Es bedeuten:}$$

$p$  – Schalldruck in Pa  
 $Z$  – Impedanz in  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$

$$(2) \quad Z = \rho \cdot c \quad \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

$\rho$  – Dichte trockener Luft in  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $c$  – Schallgeschwindigkeit in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Die Schallkennimpedanz  $Z_0$  ist definiert als:

$$(3) \quad Z_0 = \rho_0 \cdot c_0$$

$\rho_0 = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $c_0 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$Z_0 = 408 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

Unter der Schalleistung einer Schallquelle versteht man die insgesamt pro Zeiteinheit abgestrahlte Schallenergie. Die Schalleistung kann ermittelt werden, indem auf einer die Schallquelle umschließenden Hüllfläche  $S$  die mittlere Schallintensität  $J_m$  bestimmt wird.

$$(4) \quad P = J_m \cdot S \quad \text{W} \quad S = 4 \pi d^2, \text{ Hüllfläche in m}^2$$

$d$  – Entfernung Schallquelle – Immissionsort

$$(5) \quad P = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \cdot S$$

Unter Verwendung der üblichen Pegeldefinitionen ergibt sich nach Umstellung für den Schalldruckpegel  $L_p$ :

$$(6) \quad L_p = L_w + D_z - D_s \quad \text{dB}$$

$L_w$  – Schalleistungspegel in dB  
 $D_z$  – Maß für die Abweichung von der Schallkennimpedanz  
 $D_s$  – Maß für die geometrische Schallausbreitungsdämpfung

Hierin bedeuten:

$$(6a) \quad L_p = 10 \cdot \lg\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) \quad \text{Schalldruckpegel in dB mit } p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$(6b) \quad L_w = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad \text{Schalleistungspegel in dB mit } P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

$$(6c) \quad D_z = 10 \cdot \lg\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad \text{Maß für die Abweichung von der Schallkennimpedanz in dB mit } Z_0 = 408 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

bzw.

$$(6c') \quad D_z = 10 \cdot \lg\left(\frac{\rho \cdot c}{408}\right)$$

$$(6d) \quad D_s = 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad \text{Maß für die geometrische Schallausbreitungsdämpfung in dB mit } S_0 = 1 \text{ m}^2$$

bzw.

$$(6d') \quad D_s = 10 \cdot \lg\left(\frac{4\pi d^2}{S_0}\right) \quad d - \text{Abstand Quelle – Immissionsort}$$

Aus Gleichung (6) folgt, dass sich der Schalldruckpegel bei angenommenen konstanten Einflussgrößen wie Schalleistung und Abstand durch Veränderung der atmosphärischen Verhältnisse über den Parameter  $D_z$  ändern kann. Dieser Einfluss auf den Schalldruckpegel und dessen Standardabweichung wird im Folgenden untersucht. Ausgangspunkt hierfür ist die allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Luftdruck, der Luftdichte und der Lufttemperatur. Danach ergibt sich das Verhältnis von Luftdruck und Luftdichte aus der mit einem konstanten Faktor  $R$  multiplizierten Lufttemperatur:

$$(7) \quad \frac{p_L}{\rho} = R_L \cdot T$$

$p_L$  – Luftdruck in Pa

$R_L = 287,04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \text{ K}^{-1}$  - Gaskonstante trockener Luft

$T$  – Lufttemperatur in K

ANMERKUNG:

Durch den in der realen Atmosphäre immer vorhandenen Wasserdampf verringert sich die Luftdichte. Deshalb müsste in Gl. (7) anstelle der Temperatur  $T$  die virtuelle Temperatur  $T_v$  verwendet werden. Die virtuelle Temperatur ist definiert als die Temperatur bei der trockene Luft dieselbe Dichte hat wie feuchte Luft. Sie kann nach Gl. (8) berechnet werden [3]:

$$(8) \quad T_v = T \cdot \left( 1 + 0,6 \cdot \frac{q}{1000} - \frac{w}{1000} \right) \quad \text{K}$$

$q$  – Spezifische Feuchte in  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

$w$  – Spezifischer Tröpfchenwassergehalt in  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Außerhalb von Wolken und Nebel ist  $w = 0$

Aus Gleichung (2) ergibt sich unter Berücksichtigung von (7) für die Impedanz folgender Zusammenhang:

$$(9) \quad Z = \frac{p_L \cdot c}{R \cdot T}$$

Die effektive Schallgeschwindigkeit über Grund kann nach (10) berechnet werden:

$$(10) \quad c = A \cdot \sqrt{T} + v \cdot \cos \varphi$$

$A = 20,06$

$\varphi$  – Winkel zwischen der Schallausbreitungsrichtung und der Mitwindrichtung bzw. zwischen der Richtung zur Schallquelle und der Windrichtung, vom Immissionspunkt aus gesehen.

$v$  – Windgeschwindigkeit in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Damit ergibt sich für die Impedanz:

$$(11) \quad Z = \frac{p_L}{R} \left( \frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T} \right)$$

Diese Gleichung zeigt, dass die Impedanz nicht allein von der Lufttemperatur und dem Luftdruck abhängig ist sondern auch von der Differenz zwischen Schallausbreitungsrichtung und Mitwindrichtung. Da die Richtung zur Schallquelle konstant ist, ist die Impedanz, bezogen auf den Immissionsort, windrichtungsabhängig. Sie erreicht ihr Maximum bei Mitwindbedingungen ( $\varphi = 0$ ) und ihr Minimum bei Gegenwindbedingungen ( $\varphi = 180^\circ$ ).

Durch Einsetzen von Gleichung (11) in Gleichung (6c') wird das Impedanzmaß auf leicht bestimmbare Größen zurückgeführt.

$$(12) \quad D_z = 10 \cdot \lg \left[ \frac{p_L}{408 \cdot R} \left( \frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T} \right) \right]$$

Gleichung (12) kann umgestellt werden:

$$(13) \quad D_z = 10 \cdot \lg\left(\frac{p_L}{408 \cdot R}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T}\right)$$

Term I

Term II

Die mögliche Schwankungsbreite des Terms I reicht von ca. -0,43 dB bis etwa -0,83 dB. Bei Verwendung des Normalwertes des Luftdruckes in Meeresniveau von  $p_L = 1013 \text{ hPa}$  wird für Term I ein Wert von -0,63 dB ermittelt. Damit ergibt sich endgültig für das Impedanzmaß:

$$(14) \quad D_z = 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T}\right) - 0,6 \quad \text{dB}$$

und für den Schalldruckpegel:

$$(15) \quad L_p = L_w + \left[ 10 \cdot \lg\left(\frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T}\right) - 0,6 \right] - [20 \cdot \lg d + 11] \quad \text{dB}$$

Die Anwendung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf Gleichung (15) führt zu einer Beziehung mit der die Standardabweichung des Schalldruckpegels  $\sigma_{L_p}$  berechnet werden kann.

$$(16) \quad \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2} \quad \text{Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauß}$$

$$(17) \quad \sigma_{L_p} = \sqrt{\sigma_T^2 \left(\frac{\partial L_p}{\partial T}\right)^2 + \sigma_v^2 \left(\frac{\partial L_p}{\partial v}\right)^2 + \sigma_\varphi^2 \left(\frac{\partial L_p}{\partial \varphi}\right)^2 + \sigma_d^2 \left(\frac{\partial L_p}{\partial d}\right)^2} \quad \text{dB}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_{L_p}$  Standardabweichung des Schalldruckpegels in dB
- $\sigma_T$  Standardabweichung der turbulenten Temperaturfluktuationen in K
- $\sigma_v$  Standardabweichung der turbulenten Windgeschwindigkeitsfluktuationen in  $\text{ms}^{-1}$
- $\sigma_\varphi$  Standardabweichung der turbulenten Fluktuationen der Differenz zwischen der Schallausbreitungs- und der Mitwindrichtung, verursacht durch die turbulenten Windrichtungsschwankungen. Deshalb wird im Folgenden unter  $\sigma_\varphi$  auch die Standardabweichung der turbulenten Windrichtungsfuktuationen  $\sigma_\delta$  verstanden ( $\sigma_\delta = \sigma_\varphi$ )
- $\sigma_d$  Standardabweichung des Abstandes zwischen der Schallquelle und dem Immissionsort

Die partiellen Ableitungen in Gleichung (17) führen zu folgenden Gewichtsfunktionen:

$$(18) \quad \frac{\partial L_p}{\partial T} = \frac{-4,343 \cdot \left(\frac{A}{2 \cdot \sqrt{T^3}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T^2}\right)}{\left(\frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T}\right)}$$

$$(19) \quad \frac{\partial L_p}{\partial v} = \frac{4,343 \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{T} \right)}{\left( \frac{A}{\sqrt{T}} + \frac{v \cdot \cos \varphi}{T} \right)}$$

$$(20) \quad \frac{\partial L_p}{\partial \varphi} = - \frac{4,343 \cdot (v \cdot \sin \varphi)}{(A \cdot \sqrt{T} + v \cdot \cos \varphi)}$$

$$(21) \quad \frac{\partial L_p}{\partial d} = \frac{8,686}{d}$$

Die Standardabweichung der Temperaturfluktuationen  $\sigma_T$  wird nach [4] unter Berücksichtigung der universellen Funktion, die auch im Grenzschichtmodell der TA-Luft (2002) verwendet wird [5] berechnet.

$$(22) \quad \sigma_T = \Theta_* \cdot \Psi \left( \frac{z}{L} \right)$$

Hierin bedeuten:

$\sigma_T$	Standardabweichung der turbulenten Temperaturfluktuationen
$\Theta_*$	Temperaturstrukturparameter
$\Psi(z/L)$	Universelle Funktion
$z$	Höhe
$L$	Monin-Obuchov-Länge; Stabilitätsparameter

Für den Temperaturstrukturparameter gilt nach [6] folgender Zusammenhang:

$$(23) \quad \Theta_* = \frac{[\Theta(z_2) - \Theta(z_1)] \cdot v_*}{[v(z_2) - v(z_1)] \cdot \kappa}$$

$\Theta(z)$	Potentielle Temperatur in K
$v_*$	Schubspannungsgeschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\kappa$	von Karman Konstante, $\kappa = 0,4$

$$(24) \quad \Theta(z) = T(z) \cdot \left( \frac{1000}{p(z)} \right)^{0,285}$$

Der Temperaturstrukturparameter kann auch ersatzweise entsprechend [5] nach Gleichung (25) ermittelt werden.

$$(25) \quad T_* = \frac{v_*^2 \cdot T_m}{\kappa \cdot g \cdot L}$$

$T_m$	Mittlere Temperatur der Prandtl-Schicht
$g$	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Für die universelle Funktion gilt entsprechend [5]:

$$(26) \quad \Psi_0(\zeta) = \begin{cases} \ln(\zeta/\zeta_0) + 5 \cdot \zeta + X_1 & \text{für } \zeta < 0,5 \\ 8 \cdot \ln(\zeta) + 4,25/\zeta - 0,5/\zeta^2 + X_2 & \text{für } 0,5 \leq \zeta \leq 10 \\ 0,7585 \cdot \zeta + X_3 & \text{für } \zeta > 10 \end{cases}$$

$$(27) \quad \Psi_1(\zeta) = \ln \left[ \left( \frac{1+X}{1+X_0} \right)^2 \cdot \frac{1+X^2}{1+X_0^2} \right] - 2(\operatorname{arctg} X - \operatorname{arctg} X_0)$$

$$(28) \quad \Psi_2(\zeta) = \begin{cases} -p_s \cdot (\zeta - \zeta_0) & \text{für } L > 0 \\ 2 \cdot \ln \left( \frac{1+Y}{1+Y_0} \right) & \text{für } L < 0 \end{cases}$$

Es bedeuten:

$$\zeta(z) = \frac{z + z_0}{L} \quad z_0 \quad \text{Rauhigkeitslänge}$$

$$\zeta_0 = \frac{z_0}{L}$$

$$X_1 = -5 \cdot \zeta_0 \quad X_2 = 0,852 - \ln(\zeta_0) - 5 \cdot \zeta_0 \quad X_3 = 12,108 - \ln(\zeta_0) - 5 \cdot \zeta_0$$

$$X = (1 - 15 \cdot \zeta)^{1/4} \quad X_0 = (1 - 15 \cdot \zeta_0)^{1/4}$$

$$Y(\zeta) = (1 - p_1 \cdot \zeta)^{1/2} \quad Y_0(\zeta) = (1 - p_1 \cdot \zeta_0)^{1/2} \quad p_1 = 15$$

Die Standardabweichungen der Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsfuktuationen können ebenfalls gemäß der Vorlage in [5] ermittelt werden.

$$(29) \quad \sigma_v = \begin{cases} f_v \cdot A_v \cdot v_* & \text{für } L > 0 \\ f_v \cdot A_v \cdot v_* \cdot \left[ 1 + 0,064 \cdot \left( \frac{-h_m}{L} \right) \right]^{1/3} & \text{für } L < 0 \end{cases}$$

$$f_v = 2,5 \cdot A_v = \left( \frac{t}{3600s} \right)^{0,2} \quad t \in [600, 3600 \text{ s}]$$

Nach Rücksprache mit den Autoren von [5] ist es für den vorliegenden Anwendungsfall erlaubt, unter der Voraussetzung gleicher Stabilitätsverhältnisse, die Mittelungszeit auf größere Zeiträume auszu-dehnen.

$$(30) \quad \sigma_u = \begin{cases} f_u \cdot A_v \cdot v_* & \text{für } L > 0 \\ f_u \cdot A_v \cdot v_* \cdot \left[ 1 + 0,064 \cdot \left( \frac{-h_m}{L} \right) \right]^{\frac{1}{3}} & \text{für } L < 0 \end{cases}$$

$$f_u = 2,0$$

$$(31) \quad \sigma_\delta = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\sigma_u}{v(z)}$$

In den Gleichungen (29) und (30) bedeutet  $h_m$  die Mischungsschichthöhe. Sie kann nach [5] berechnet werden aus:

$$(32) \quad h_m = \begin{cases} \alpha \cdot \frac{v_*}{f_c} & \text{für } |L| > (v/f_c) \quad \text{indifferent} \\ \alpha \cdot \frac{v_*}{f_c} \cdot \sqrt{\frac{f_c \cdot L}{v_*}} & \text{für } 0 < L \leq (v/f_c) \quad \text{stabil} \end{cases}$$

$$\alpha = 0,3$$

$$f_c = 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad \text{Coriolisparameter}$$

$$h_m = 1100 \text{ m für labile Verhältnisse [7].}$$

Mit Hilfe der universellen Funktion kann nun über die Vertikalprofile der Temperatur sowie der Windgeschwindigkeit und Windrichtung das Vertikalprofil der Standardabweichung des Schalldruckpegels berechnet werden.

$$(33) \quad v(z) = \begin{cases} \frac{v_*}{\kappa} \Psi_0(\zeta) & \text{für } L > 0 \\ \frac{v_*}{\kappa} \left[ \ln\left(\frac{\zeta}{\zeta_0}\right) - \Psi_1(\zeta) \right] & \text{für } L < 0 \end{cases}$$

$$(34) \quad \Theta(z) = \Theta_0 + p_n \cdot \frac{T_*}{\kappa} \cdot \left[ \ln\left(\frac{\zeta}{\zeta_0}\right) - \Psi_2(\zeta) \right] \quad p_n = 1,0$$

Die vertikale Windrichtungsänderung  $D(z)$  kann nach den Angaben in [7] ermittelt werden.

$$(35) \quad \delta(z) = \delta_a + D(z) - D(z_a) \quad \text{Hierin bedeuten: } D(z) = 1,23 \cdot D_h \cdot \{1 - \exp[-1,75 (z/h_m)]\}$$

Die Werte für  $D_h$  werden in Abhängigkeit von der Stabilität nach Tabelle 1 bestimmt.

**Tab. 1: Werte für  $D_h$** 

$D_h$ in Grad	Stabilitätsbereich
0	$h_m/L < -10$
$45 + 4,5 \cdot (h_m/L)$	$-10 \leq (h_m/L) < 0$
45	$L > 0$

### 3 Berechnungsergebnisse

#### 3.1 Testdatensatz und Auswertemethodik

Vom Deutschen Wetterdienst werden als Grundlage zur Berechnung der Schadstoffausbreitung nach dem meteorologischen Grenzschichtmodell der TA-Luft von verschiedenen Meteorologischen Stationen Datensätze bereitgestellt. Diese Datensätze enthalten neben den stündlichen Werten der mittleren Windgeschwindigkeit und Windrichtung auch Angaben zu den Stabilitätsverhältnissen.

In dem Berechnungsprogramm für die Schadstoffausbreitung nach TA-Luft Austal2000 [8] ist ein anonymisierter Datensatz (anno95.akt) in der vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Form enthalten. Dieser Datensatz wurde für die folgenden Untersuchungen verwendet.

Tabelle 2 zeigt daraus einen Auszug. Eine Erläuterung für die Bedeutung der einzelnen Ziffern ist in Tabelle 3 enthalten [9]. Durch Transformation in eine MS-Excel-Datei ist eine leichtere Auswertung möglich (Tab. 4).

**Tab. 2: Auszug aus dem Datensatz anno95.akt**

```

109991995010100021113480
109991995010101022123480
109991995010102026133480
109991995010103027133425
1099919950101040251234 0
1099919950101050251234 0
1099919950101060251434 3
109991995010107025123480
109991995010108026133425

```

**Tab. 3: Erläuterung zur Bedeutung der Ziffern in anno95.akt [9]**

Parameter	Position
Stationsnummer	1 bis 5
Datum (JJJJMMTTSS)	6 bis 15
Interpolationskennung	16
Windrichtung (Dekagrad)	17 bis 18
Windgeschwindigkeit (Knoten)	19 bis 20
Klug/Manier-Klassen (1...6)	21
Turner-Klasse	22
ww-Schlüsselzahl	23 bis 24

**Tab. 4: Datensatz anno95.akt im MS-Excel-Format**

Stationsnr.	Jahr	Monat	Tag	UTC	Interpol.-K.	dd	ff	Stab. TA-L	Stab.-Turn	ww
10999	1995	1	1	0	0	21	11	3	4	80
10999	1995	1	1	1	0	22	12	3	4	80
10999	1995	1	1	2	0	26	13	3	4	80
10999	1995	1	1	3	0	27	13	3	4	25
10999	1995	1	1	4	0	25	12	3	4	0
10999	1995	1	1	5	0	25	12	3	4	0
10999	1995	1	1	6	0	25	14	3	4	3
10999	1995	1	1	7	0	25	12	3	4	80
10999	1995	1	1	8	0	26	13	3	4	25

Hierin bedeutet:

UTC Beobachtungszeit in UTC (Koordinierte Weltzeit)  
 dd Windrichtung in Dekagrad  
 ff Windgeschwindigkeit in Knoten  
 Stab. TA-L Stabilitätsklasse nach Klug/Manier aus der TA-Luft

Aus den theoretischen Betrachtungen im vorhergehenden Abschnitt folgt, dass für die Ermittlung der Standardabweichung des Schalldruckpegels die Angaben zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie zur Stabilität von besonderer Bedeutung sind.

Für die Beurteilung der Stabilitätsverhältnisse werden die auch in der TA-Luft verwendeten Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier verwendet (Tab. 5). Diese Klassen sind in der TA-Luft (1986) [10] definiert.

**Tab. 5: Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier**

Ausbreitungsklasse	Bedeutung
1	sehr stabil
2	stabil
3	neutral
4	neutral
5	labil
6	sehr labil

In dem Datensatz anno95.akt werden an einzelnen Terminen Klug/Manier-Klassen mit der Ziffer 7 angegeben.

Diese Zuordnung ist immer dann zu beobachten, wenn unter der ww-Schlüsselzahl, z.B. dichter Nebel oder Sprühregen, angegeben wird. In solchen Fällen können keine Angaben über den Gesamtbedeckungsgrad des Himmels mit Wolken gemacht werden.

Die Kenntnis des Gesamtbedeckungsgrades ist für die Bestimmung der Klug/Manier-Klasse Voraussetzung. Zur Berechnung der Vertikalprofile wird als Stabilitätsmaß die Monin-Obuchov-Länge  $L$  verwendet.

Entsprechend den Angaben in der TA-Luft (2002) [7] gilt folgender Zusammenhang zwischen den Stabilitätsklassen nach Klug/Manier und der Monin-Obuchov-Länge:

**Tab. 6: Zusammenhang zwischen den Stabilitätsklassen nach Klug/Manier und der Monin-Obuchov-Länge L [7]**

Stab. – Kl. nach Klug/Manier	Rauhigkeitslänge $z_0$ in m								
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00	1,50	2,00
1	7	9	13	17	24	40	65	90	118
2	25	31	44	60	83	139	223	310	406
3	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999
4	-25	-32	-45	-60	-81	-130	-196	-260	-326
5	-10	-13	-19	-25	-34	-55	-83	-110	-137
6	-4	-5	-7	-10	-14	-22	-34	-45	-56

Die Tabelle zeigt, dass mit Annäherung an die neutrale Schichtung der Betrag der Monin-Obuchov-Länge zunimmt. Dies folgt aus der Definition von  $L$  in [6]. Danach wird das Vorzeichen von  $L$  durch die Richtung des fühlbaren Wärmestromes bestimmt. Für  $L > 0$  ist der fühlbare Wärmestrom nach unten gerichtet, d. h. es herrschen Inversionsbedingungen. Für  $L < 0$  ist der fühlbare Wärmestrom nach oben gerichtet. Für den Fall, dass der fühlbare Wärmestrom Null wird, strebt  $L$  gegen unendlich ( $L \rightarrow \infty$ ). Dies wird bei vertikal konstanter potentieller Temperatur erreicht ( $\theta(z) = \text{const.}$ ). In diesen Fällen wird auch  $\sigma_T = 0$  und liefert somit keinen Beitrag für die Standardabweichung des Schalldruckpegels.

Zur weiteren Aufbereitung der Daten für die akustischen Belange und unter Berücksichtigung der relativ geringen Datenbasis von einem Jahr wurden die sechs Stabilitätsklassen der TA-Luft (1986) in Anlehnung an [11] in die drei Stabilitätskategorien stabil, neutral, labil zusammengefasst. Dabei wurde die Klug/Manier-Klasse 4 der Kategorie labil zugeordnet. Dieser Klasse entspricht nach Tabelle 6 eine negative Monin-Obuchov-Länge, die nach [6] kennzeichnend für labile Schichtungen sind.

**Tab. 7: Zuordnung der Klug/Manier-Klassen zu den Stabilitätskategorien stabil, neutral, labil**

Stabilitätskategorie	Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier
stabil	1, 2, 7 *
neutral	3
labil	4, 5, 6

\* Für die Fälle in denen unter der ww-Schlüsselziffer dichter Nebel oder Sprühregen in Verbindung mit einer Windgeschwindigkeit kleiner 6 kn angegeben wird.

### 3.2 Der Tagesgang der Stabilitätsverhältnisse und die Richtungsabhängigkeit der Standardabweichung des Schalldruckpegels

Die Auswertung des Datensatzes anno95.akt bezüglich der Stabilitätsverhältnisse erfolgte auf der Grundlage der in Tabelle 7 getroffenen Zuordnung. Danach ergibt sich der in Abbildung 1 dargestellte Tagesgang der Häufigkeiten der Stabilitätskategorien.

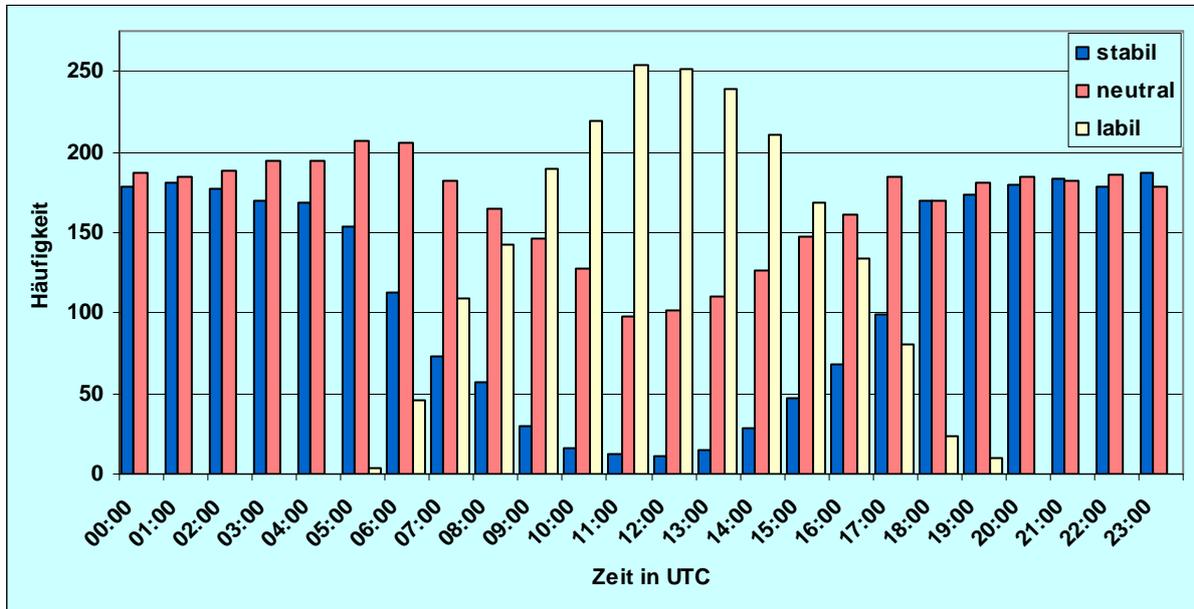


Abb. 1: Tagesgang der Stabilitätskategorien

Diese Abbildung zeigt zunächst den zu erwartenden entgegen gesetzten Verlauf der Häufigkeiten stabiler und labiler Schichtungen. Während in den Mittagsstunden die Labilität ihr Häufigkeitsmaximum erreicht, erreicht die stabile Schichtung zur gleichen Zeit ihr Häufigkeitsminimum. Neutrale Schichtung wird am häufigsten in den Frühstunden beobachtet. Etwas überraschend ist, dass in diesem Datensatz ein ausgeprägtes Maximum der Häufigkeit stabiler Schichtung in den Nachtstunden fehlt. Hier treten stabile und neutrale Schichtung mit etwa gleicher Häufigkeit auf. Dies kann ein zufälliger Auswahleffekt des Jahres 1995 sein.

Zur weiteren Vereinfachung der akustisch relevanten Berechnungen wurde zunächst der Einfluss der Stabilitätsverhältnisse auf die Standardabweichung des Schalldruckpegels untersucht. Dafür wurde in den Gleichungen (29) und (30) eine Mittelungszeit von  $t = 3.600$  s gewählt. Die Differenz zwischen der Schallausbreitungsrichtung und der Mitwindrichtung wurde in  $30^\circ$ -Schritten von  $\varphi = 0^\circ$  bis  $\varphi = 180^\circ$ , d. h. von Mitwind- über Querwind- bis zu Gegenwindbedingungen variiert. Die Ergebnisse werden in Abbildung 2 dargestellt. Für die Modellrechnungen wurde einheitlich eine Rauigkeitslänge von  $z_0 = 0,05$  m angesetzt. Für die Werte der Monin-Obuchov-Länge wurden folgende Werte verwendet (Tab. 8):

Tab. 8: Zuordnung von Monin-Obuchov-Längen zu den Stabilitätskategorien entsprechend der im Landesumweltamt Brandenburg vorhandenen Datensätze

Stabilitätskategorie	Monin-Obuchov-Länge
stabil	32
neutral	-2949
labil	-25

Die Abbildung zeigt zum einen eine deutlich ausgeprägte Winkelabhängigkeit der Standardabweichung des Schalldruckpegels mit einem Maximum bei Querwindbedingungen ( $\varphi = 90^\circ$ ) und Minima bei Mitwindbedingungen ( $\varphi = 0^\circ$ ) und Gegenwindbedingungen ( $\varphi = 180^\circ$ ). Letzteres steht in einem gewissen Widerspruch zu den akustischen Erwartungen und Erfahrungen. Die an einem Immissionsort in der Praxis zu beobachtenden z.T. erheblichen Pegelschwankungen bei Gegenwindverhältnissen werden wesentlich durch die unterschiedliche Lage der Schattenzone verursacht [12], die aber entsprechend der eingangs gemachten Bemerkungen hier nicht berücksichtigt werden kann.

Zum anderen zeigt die Abbildung 2 auch eine deutliche Abhängigkeit der Standardabweichung des Schalldruckpegels in allen Winkelbereichen von der atmosphärischen Stabilität. Die höchsten Werte der turbulenzbedingten Pegelschwankungen treten bei labiler und die niedrigsten bei indifferenter Schichtung auf. Wie oben bereits erwähnt, fehlt bei neutraler Temperaturschichtung der Anteil der Standardabweichung der turbulenten Temperaturfluktuationen  $\sigma_T$ , weil hier der vertikale fühlbare Wärmestrom Null wird.

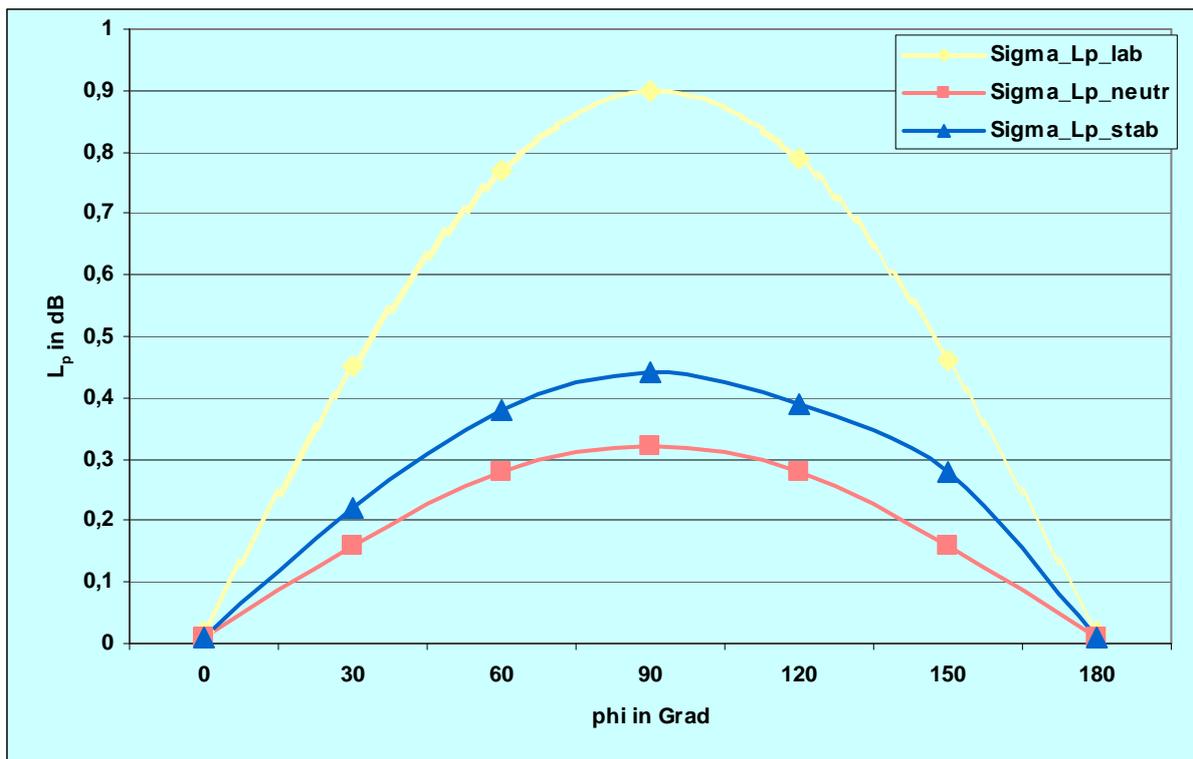


Abb. 2: Standardabweichung des Schalldruckpegels  $L_p$  bei verschiedenen Stabilitätsverhältnissen als Funktion der Differenz zwischen der Schallausbreitungsrichtung und der Mitwindrichtung  $\varphi$

#### 4 Berechnung der Standardabweichung des Beurteilungspegels

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand darin, die Standardabweichung des Beurteilungspegels  $\sigma_{L_r}$  zu ermitteln. Zur Optimierung des Rechenaufwandes wurde entsprechend der in Abbildung 1 dargestellten Häufigkeit der Stabilitätskategorien den jeweiligen Beobachtungszeiten die Kategorie mit der größten Häufigkeit zugeordnet. Bei vergleichbaren Häufigkeiten wurde entsprechend dem Prinzip des Immissionsschutzes, die Stabilitätskategorie ausgewählt, die den höheren Wert der Standardabweichung des Schalldruckpegels erwarten lässt. Weiterhin ist für die Berechnung der Standardabweichung des Beurteilungspegels eine Zuordnung der in UTC angegebenen Beobachtungstermine zu den Beurteilungszeiträumen Tag und Nacht erforderlich. Für die Beurteilungszeit wurde die Mitteleuropäische Zeit (MEZ) angenommen. Zwischen UTC und MEZ besteht eine Zeitdifferenz von einer Stunde. Diese gewählten Zuordnungen werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

**Tab. 9: Zuordnung der Stabilitätskategorien zu den Beobachtungsterminen und Zuordnung der Beobachtungstermine zu den Beurteilungszeiträumen Tag und Nacht**

Beobachtungstermin in UTC	Stabilitätskategorie	Beurteilungszeitraum
00:00	stabil	Nacht
01:00	stabil	Nacht
02:00	stabil	Nacht
03:00	stabil	Nacht
04:00	neutral	Nacht
05:00	neutral	Tag
06:00	neutral	Tag
07:00	neutral	Tag
08:00	neutral	Tag
09:00	labil	Tag
10:00	labil	Tag
11:00	labil	Tag
12:00	labil	Tag
13:00	labil	Tag
14:00	labil	Tag
15:00	labil	Tag
16:00	neutral	Tag
17:00	neutral	Tag
18:00	stabil	Tag
19:00	stabil	Tag
20:00	stabil	Tag
21:00	stabil	Nacht
22:00	stabil	Nacht
23:00	stabil	Nacht

Auf der Grundlage dieser Zuordnung kann der Tagesgang der Standardabweichung des Schalldruckpegels berechnet werden (Abb. 3).

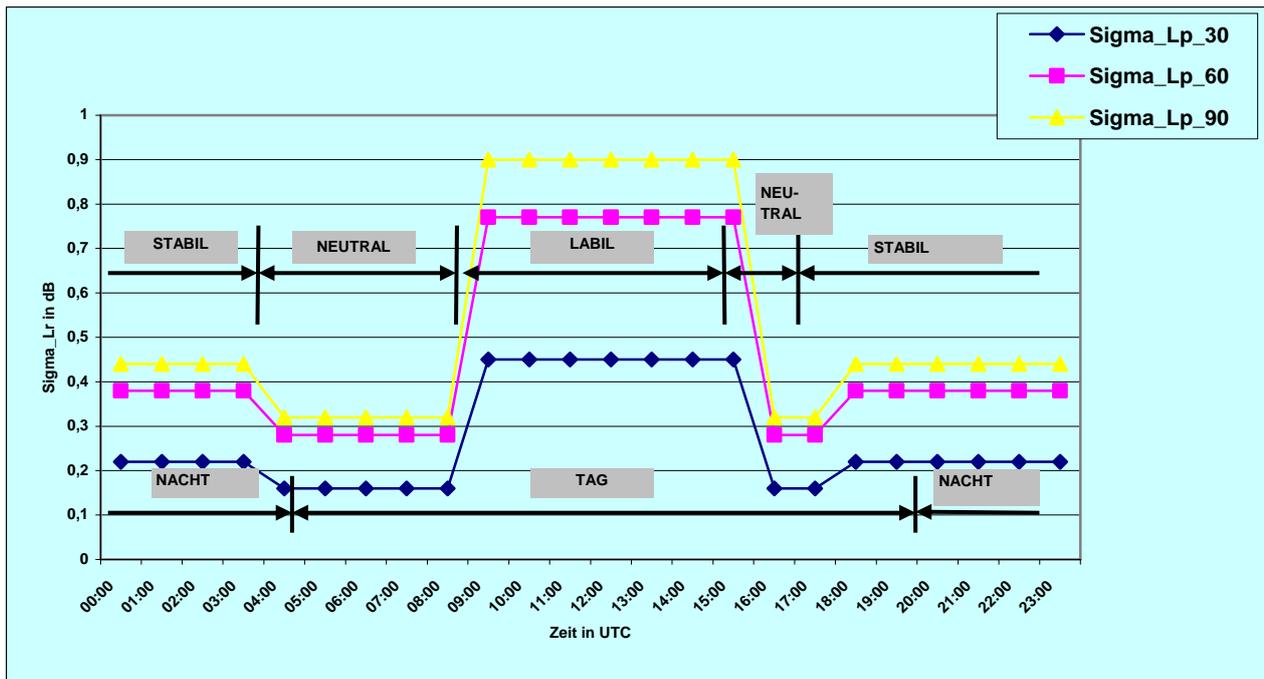
Entsprechend dieser Abbildung erreicht die Standardabweichung des Schalldruckpegels ihr Maximum im Verlaufe des Vormittags bis in den Nachmittag hinein.

Das Minimum wird nicht in den Nachtstunden sondern in den Zeiten mit einer neutralen oder indifferenten Temperaturschichtung erreicht.

Nachdem nun der Tagesgang der Standardabweichung des Schalldruckpegels bekannt ist, kann die Standardabweichung des Beurteilungspegels für die Beurteilungszeiten Tag und Nacht ermittelt werden.

Entsprechend VDI 3723 [13] können Mittelungspegel, die in einem zeitlichen Abstand von einer Stunde gewonnen werden als statistisch unabhängig voneinander betrachtet werden. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass sich die Standardabweichungen der Schalldruckpegel in den verschiedenen Stabilitätskategorien deutlich voneinander unterscheiden. Dies lässt auf unterschiedliche Schallausbreitungsverhältnisse schließen. Deshalb werden die Standardabweichungen in den unterschiedlichen Stabilitätskategorien als statistisch unabhängig voneinander betrachtet.

Unter dieser Voraussetzung werden die Standardabweichungen des Schalldruckpegels gleicher Stabilitätskategorie für die unterschiedlichen Andauerzeiten entsprechend Abbildung 3 berechnet.



**Abb. 3: Tagesgang der Standardabweichung des Schalldruckpegels  $\sigma_{Lp}$  für Differenzwinkel  $\phi$  von 30°, 60° und 90° zwischen Mitwind- und Schallausbreitungsrichtung**

Die Standardabweichungen des Beurteilungspegels für die Tages- und für die Nachtzeit werden entsprechend der Gleichungen (33) und (34) bestimmt.

$$(36) \quad \sigma_{LrT} = \sqrt{\sigma_{Lp,stab,3h}^2 + \sigma_{Lp,neut,4h}^2 + \sigma_{Lp,neut,2h}^2 + \sigma_{Lp,lab,7h}^2}$$

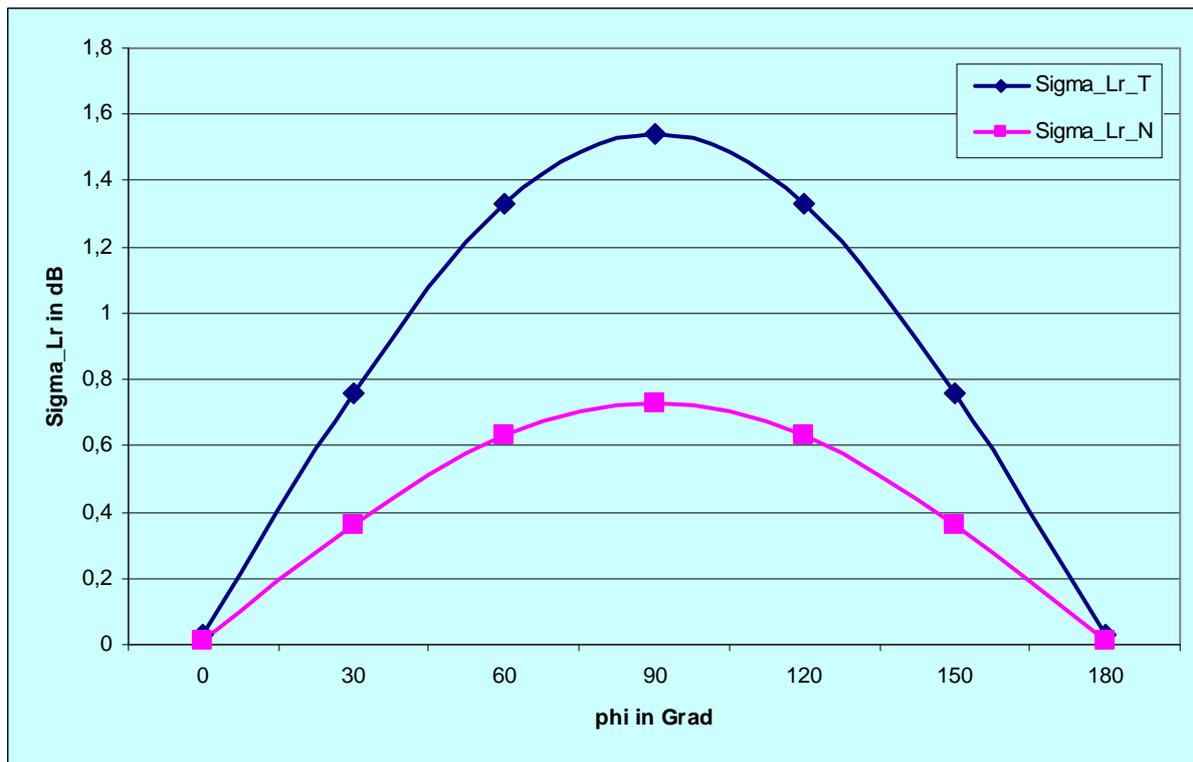
$$(37) \quad \sigma_{LrN} = \sqrt{\sigma_{Lp,stab,7h}^2 + \sigma_{Lp,neut,1h}^2}$$

Hierin bedeuten:

$\sigma_{Lp, stab, x h}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels bei stabilen Verhältnissen für einen Mittelungszeitraum von x Stunden
$\sigma_{Lp, neut, x h}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels bei neutralen Verhältnissen für einen Mittelungszeitraum von x Stunden
$\sigma_{Lp, lab, x h}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels bei labilen Verhältnissen
$\sigma_{LrT}$	Standardabweichung des Beurteilungspegels für den Beurteilungszeitraum Tag
$\sigma_{LrN}$	Standardabweichung des Beurteilungspegels für den Beurteilungszeitraum Nacht

Der Winkel  $\phi$  ist definiert als die Differenz zwischen der Schallausbreitungs- und der Mitwindrichtung. Er kann auch aufgefasst werden als die Differenz zwischen der Hauptwindrichtung und der Differenz der Richtung vom Immissionsort zur Schallquelle.

Abbildung 4 zeigt die zu erwartende Standardabweichung der Beurteilungspegel für den Tag und für die Nacht in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Richtung zur Schallquelle und der Hauptwindrichtung, die durch die turbulenten Fluktuationen der Impedanz verursacht werden.



**Abb. 4:** Standardabweichung der Beurteilungspegel für den Tag und für die Nacht für verschiedene Winkeldifferenzen zwischen der Richtung Immissionsort – Schallquelle und der Hauptwindrichtung  $\phi$

## 5 Schlussfolgerungen

- 5.1 Es wird der theoretische Hintergrund zur Berechnung der durch die turbulenten Fluktuationen der Impedanz verursachten Standardabweichung des Beurteilungspegels erläutert. Durch Anwendung der allgemeinen Gasgleichung wird die Bestimmung der Impedanz auf leicht messbare atmosphärische Kenngrößen zurückgeführt.
- 5.2 Die so berechnete Standardabweichung kann unterschiedliche Ausbreitungswege, den Einfluss unterschiedlicher Bodenimpedanzen, die unterschiedlichen Streuungen an Hindernissen am Boden oder die unterschiedliche Lage der Schattenzone bei Schallausbreitung in Verbindung mit Gegenwind nicht berücksichtigen. Insofern stellt die vorliegende Untersuchung eine Minimumabschätzung für die Standardabweichung des Beurteilungspegels dar.
- 5.3 Es wird gezeigt, dass die für die Berechnung der Standardabweichung des Beurteilungspegels erforderlichen Eingangsgrößen mit Hilfe des in der TA-Luft (2002) verwendeten meteorologischen Grenzschichtmodells berechnet werden können.
- 5.4 Für die Ausbreitungsrechnungen entsprechend den Forderungen der TA-Luft (2002) werden vom Deutschen Wetterdienst für mehrere Meteorologische Stationen Daten mit stündlichen Angaben über die Windrichtung und Windgeschwindigkeit, die Stabilitätsverhältnisse und die Wettererscheinungen bereitgestellt. In dem Berechnungsprogramm für die TA-Luft (2002) ist solch ein Datensatz (anno95.akt) in anonymisierter Form enthalten, der die Grundlage für die Berechnungen in diesem Bericht bildet.
- 5.5 Die Angaben über die Stabilitätsverhältnisse in dem Datensatz anno95.akt bildeten die Grundlage zur Ermittlung eines mittleren Tagesganges der Stabilität.

- 5.6 Auf der Grundlage der Angaben in der TA-Luft (2002) wurden die in der Datei anno95.akt enthaltenen Stabilitätsklassen nach Klug/Manier in das für die Berechnung notwendige Stabilitätsmaß, der Monin-Obuchov-Länge, transformiert.
- 5.7 Aus der Kenntnis des Tagesganges der Stabilitätsverhältnisse wurde dann der Tagesgang der Standardabweichung des Schalldruckpegels für verschiedene Winkeldifferenzen zwischen der Hauptwindrichtung und der Richtung zur Schallquelle berechnet.
- 5.8 Dabei zeigt sich, dass die höchsten Werte der Standardabweichung des Schalldruckpegels bei labiler Schichtung in Verbindung mit Querwindverhältnissen auftreten. Die niedrigsten Werte werden bei neutraler Schichtung in Verbindung mit Mitwind- und Gegenwindverhältnissen ermittelt.
- 5.9 Auf der Grundlage des Tagesganges der Standardabweichung des Schalldruckpegels wird die Standardabweichung der Beurteilungspegel für die Beurteilungszeiten Tag und Nacht für verschiedene Winkeldifferenzen zwischen der Hauptwindrichtung und der Richtung vom Immissionsort zur Schallquelle berechnet und dargestellt.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Verzeichnis der Symbole

$c$	Schallgeschwindigkeit
$D$	Vertikale Drehung der Windrichtung
$D_s$	Maß für die geometrische Ausbreitungsdämpfung
$D_z$	Maß für die Abweichung der Impedanz von der Schallkennimpedanz
$d$	Abstand von der Schallquelle
$dd$	Windrichtung in Dekagrad
$\delta$	Windrichtung
$\delta_a$	Windrichtung in Anemometerhöhe
$f_c$	Coriolisparameter
$ff$	Windgeschwindigkeit in Knoten
$\phi$	Winkel zwischen der Schallausbreitungsrichtung und der Mitwindrichtung bzw. Winkel zwischen der Richtung zur Schallquelle und der Windrichtung
$g$	Erdbeschleunigung
$h_m$	Mischungsschichthöhe
$J$	Schallintensität
$J_m$	Mittlere Schallintensität auf der Hüllfläche
$\kappa$	von Karman Konstante
$L$	Monin-Obuchov-Länge
$L_p$	Schalldruckpegel
$L_r$	Beurteilungspegel
$L_W$	Schalleistungspegel
$P$	Schalleistung
$\rho_L$	Luftdruck
$\Psi$	Universelle Funktion
$q$	spezifische Feuchte
$R_L$	Gaskonstante trockener Luft
$\rho$	Luftdichte
$S$	Hüllfläche
Stab. TA-L	Stabilitätsklasse nach Klug/Manier aus der TA-Luft
$\sigma_d$	Standardabweichung der Entfernung zwischen Quelle und Immissionsort
$\sigma_\delta$	Standardabweichung der Windrichtungsfuktuationen
$\sigma_\phi$	Standardabweichung der Fluktuationen von $\phi$
$\sigma_{L_p}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels
$\sigma_{L_p, stab, x h}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels bei stabilen Verhältnissen für einen Mittelungszeitraum von x Stunden
$\sigma_{L_p, neut, x h}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels bei neutralen Verhältnissen für einen Mittelungszeitraum von x Stunden

$\sigma_{Lp, lab, x h}$	Standardabweichung des Schalldruckpegels bei labilen Verhältnissen für einen Mittelungszeitraum von x Stunden
$\sigma_{Lr}$	Standardabweichung des Beurteilungspegels
$\sigma_{LrT}$	Standardabweichung des Beurteilungspegels für den Beurteilungszeitraum Tag
$\sigma_{LrN}$	Standardabweichung des Beurteilungspegels für den Beurteilungszeitraum Nacht
$\sigma_T$	Standardabweichung der turbulenten Temperaturfluktuationen
$\sigma_v$	Standardabweichung der turbulenten Windgeschwindigkeitsfluktuationen
$t$	Zeit
$T$	Lufttemperatur in K
$T_v$	Virtuelle Temperatur
$T_s, \theta_s$	Temperaturstrukturparameter
$\theta$	Potentielle Temperatur
UTC	Beobachtungszeit in UTC (Koordinierte Weltzeit)
$v$	Windgeschwindigkeit
$v_s$	Schubspannungsgeschwindigkeit
$w$	Spezifischer Tröpfchenwassergehalt
$Z$	Impedanz
$Z_0$	Schallkennimpedanz
$z$	Höhe
$z_a$	Anemometerhöhe
$z_0$	Rauhigkeitslänge
$\zeta$	Dimensionslose Höhe

## 6.2 Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Werte für  $D_h$
- Tab. 2: Auszug aus dem Datensatz anno95.akt
- Tab. 3: Erläuterung zur Bedeutung der Ziffern aus anno95.akt [9]
- Tab. 4: Der Datensatz anno95.akt im MS-Excel-Format
- Tab. 5: Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier
- Tab. 6: Zusammenhang zwischen den Stabilitätsklassen nach Klug/Manier und der Monin-Obuchov-Länge  $L$  [7]
- Tab. 7: Zuordnung der Klug/Manier-Klassen zu den Stabilitätskategorien stabil, neutral, labil
- Tab. 8: Zuordnung von Monin-Obuchov-Längen zu den Stabilitätskategorien entsprechend der im Landesumweltamt Brandenburg vorhandenen Datensätze
- Tab. 9: Zuordnung der Stabilitätskategorien zu den Beobachtungsterminen und Zuordnung der Beobachtungstermine zu den Beurteilungszeiträumen Tag und Nacht

## 6.3 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Tagesgang der Stabilitätskategorien
- Abb. 2: Standardabweichung des Schalldruckpegels  $L_p$  bei verschiedenen Stabilitätsverhältnissen als Funktion der Differenz zwischen der Schallausbreitungsrichtung und der Mitwindrichtung  $\varphi$
- Abb. 3: Tagesgang der Standardabweichung des Schalldruckpegels  $\sigma_{Lp}$  für Differenzwinkel  $\phi$  von 30°, 60° und 90° zwischen Mitwind- und Schallausbreitungsrichtung

## 6.4 Quellennachweis

- [1] Humboldt, Alexander v.: Über die nächtliche Verstärkung des Schalls, Vortrag in der Akademie der Wissenschaften zu Paris am 13. März 1820. Kleinere Schriften, Erster Band, Gnostische und physikalische Erinnerungen: J. G. Cotta'scher Verlag, Stuttgart und Tübingen (1853)
- [2] Hirsch, K.-W.: Aspekte eines technischen Schallausbreitungsmodells für große Entfernungen. Fortschritte der Akustik DAGA 2006
- [3] Linke, F.; Bauer, F.: Meteorologisches Taschenbuch, Neue Ausgabe, Bd. II, 2. Auflage. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K. G., Leipzig (1970)
- [4] Ламли, Дж.; Пановски, Г.: Структура атмосферной турбулентности. Издательство МИР, Москва (1966)
- [5] Janicke, L.; Janicke, U.: Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrange'sche Ausbreitungsmodelle. Berichte zur Umweltp Physik, Oktober 2000; ISSN 1439-8222

- [6] Мони́н, А. С.; Обухов, А. М.: Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. Труды геофизического института, Нр. 24 (151); Издательство АН СССР (1954)  
in: Обухов, А. М.: Турбулентность и динамика атмосферы. Ленинград, Гидрометеиздат (1988)
- [7] Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift vom 24.07.2002 zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft); Gemeinsames Ministerialblatt, Hrsg. BMI, Berlin 30.07.2002
- [8] Austal2000 Partikelmodell der TA-Luft: [www.janicke.de](http://www.janicke.de)
- [9] Austal2000 2.3 Programmbeschreibung: Ingenieurbüro Janicke; im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin; [www.Austal2000.de](http://www.Austal2000.de)
- [10] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft) vom 27.02.1986 (GMBI S. 95)
- [11] VDI 3783-8 (Entwurf) November 2001; Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (2001)
- [12] Ziemann, A.; Balogh, K.: Einfluss des variablen Atmosphärenzustandes auf die Schallausbreitung von höher liegenden Schallquellen. Fortschritte der Akustik DAGA2006
- [13] VDI 3728; Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen. Verein Deutscher Ingenieure

**Weitere Berichte des Landesumweltamtes Brandenburg (LUA) zu Fragen der Lärmbekämpfung und des Schwingungsschutzes:**

- Fluglärmimmissionen im Umfeld eines ehemaligen Militärflugplatzes, LUA–Jahresbericht 1994, Berichte aus der Arbeit 1993, S. 104 – 109
- Geschwindigkeitsabhängige Messung von verkehrsbedingten Erschütterungen, LUA–Jahresbericht 1994, Berichte aus der Arbeit 1993, S. 110 – 111
- Geräuschimmissionen im Umfeld von Windkraftanlagen, LUA–Jahresbericht 1995, Berichte aus der Arbeit 1994, S. 71 – 73
- Lärmkontingentierung für Gewerbeflächen – ein Beitrag zur Bauleitplanung und zur Genehmigung von Anlagen, LUA–Jahresbericht 1996, Berichte aus der Arbeit 1995, S. 87 – 90
- Geräuschemissionen und -immissionen durch den Motorbootverkehr, LUA–Jahresbericht 1997, Berichte aus der Arbeit 1996, S. 148 – 150
- Geräuschemissionen und Geräuschimmissionen im Umfeld von Windkraftanlagen, LUA 1997, Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft-Nr. 17
- Straßenverkehrserschütterungen – ein besonderes Brandenburger Problem?, LUA–Jahresbericht 1998, Berichte aus der Arbeit 1997, S. 135 – 138
- Besonderheiten bei der Beurteilung von Straßenverkehrserschütterungen, LUA–Jahresbericht 2000, Berichte aus der Arbeit 1999, S. 205 – 208
- Geräuschemissionen der Hochgeschwindigkeits-Eisenbahnstrecke Berlin-Hannover, LUA–Jahresbericht 2000, Berichte aus der Arbeit 1999, S. 208 – 210
- Schallimmissionen im Umfeld auf Verkehrslandeplätzen, LUA 2003, Schriftenreihe (ISSN 0948-0838) „Studien und Tagungsberichte“, Band 43
- Untersuchung von Möglichkeiten zur Berücksichtigung der akustischen Besonderheiten von Windenergieanlagen mit stall-Regelung, LUA 2004, Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft-Nr. 91
- Besonderheiten der Schallimmissionen im Umfeld von Truppenübungsplätzen und Aspekte der Schallausbreitung über große Entfernungen, LUA 2005, Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft-Nr. 96

**Ministerium für Ländliche Entwicklung,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
des Landes Brandenburg**

**Landesumweltamt Brandenburg**  
Referat Umweltinformation/Öffentlichkeitsarbeit

Seeburger Chaussee 2  
14476 Potsdam, OT Groß Glienicke  
Tel: (03 3201) 44251 5  
Fax: (03 3201) 43678  
E-Mail: [info@lua.brandenburg.de](mailto:info@lua.brandenburg.de)  
[www.mluv.brandenburg.de/info/lua-publikationen](http://www.mluv.brandenburg.de/info/lua-publikationen)