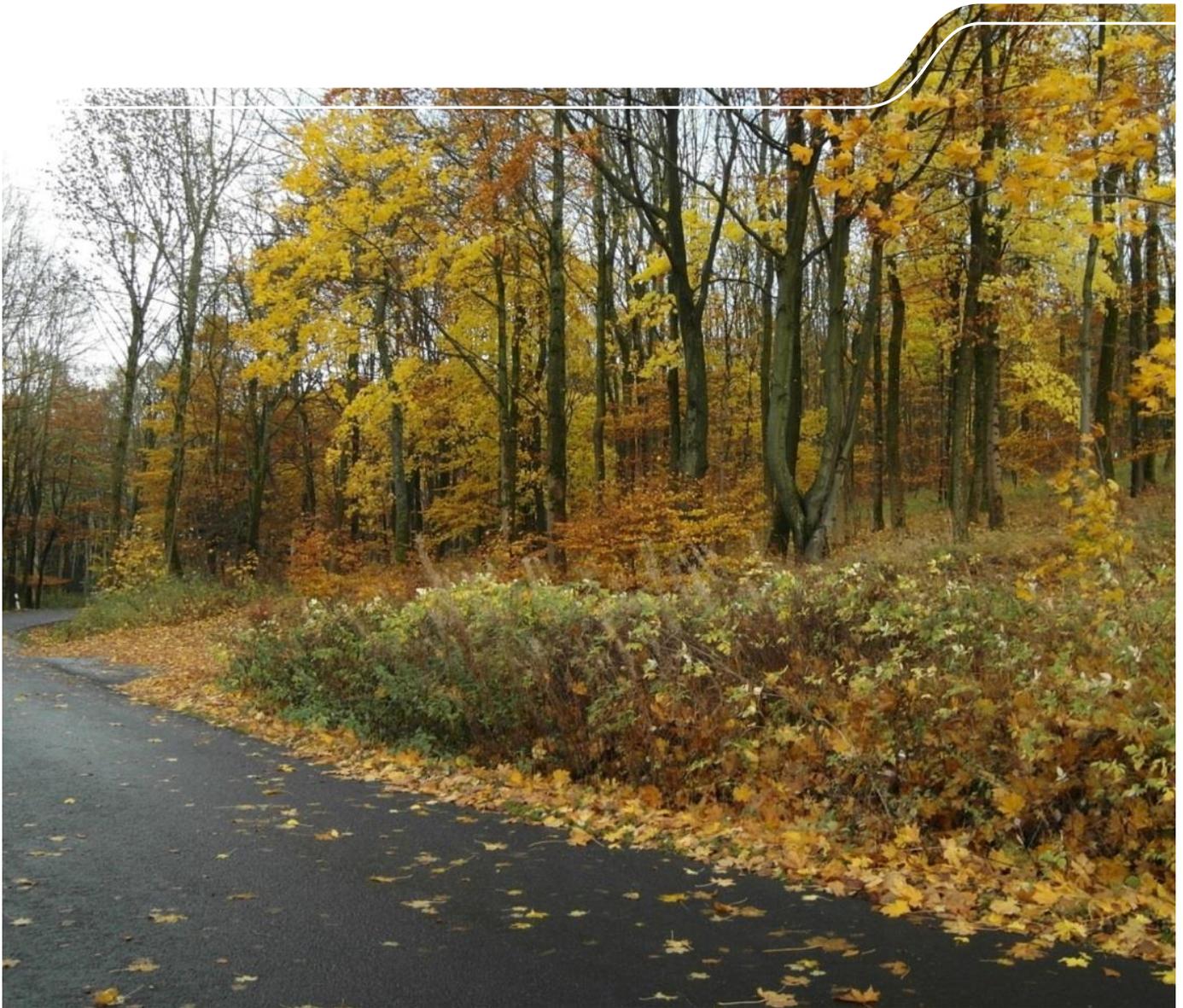




# Akustische Abschirmwirkung von Wäldern

Schriftenreihe, Heft 33/2014



# Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Simulationen mit einem akustisch-meteorologischen Modell

Dr. Manuela Barth, Dr. Astrid Ziemann, Prof. Dr. Christian Bernhofer

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Das meteorologisch-akustische Modell</b> .....	<b>8</b>
2.1	Das meteorologische Modell HIRVAC2D .....	8
2.2	Das Akustikmodell SMART .....	9
<b>3</b>	<b>Randwerte für die Simulationen</b> .....	<b>10</b>
3.1	Meteorologische Daten.....	10
3.1.1	Temperatur.....	11
3.1.2	Wind .....	12
3.2	Vegetationsparameter .....	13
3.2.1	Referenz: Ausgedehnte Wiesenfläche .....	14
3.2.2	Dichter Nadelwald-Altbestand .....	15
3.2.3	Lockerer Nadelwald-Altbestand.....	15
3.2.4	Dichter Laubwald-Altbestand.....	16
3.2.5	Lockerer Laubwald-Altbestand .....	17
3.2.6	Zusammenstellung der Vegetationsparameter .....	18
<b>4</b>	<b>Modellrechnungen</b> .....	<b>19</b>
4.1	Einfluss der Vegetation auf die meteorologischen Bedingungen (HIRVAC2D) .....	20
4.1.1	Referenz: ausgedehnte Wiesenfläche.....	21
4.1.2	Rechnungen für unterschiedlichen Waldbestand .....	23
4.2	Der meteorologische Einfluss auf die Schallausbreitung (SMART) .....	27
<b>5</b>	<b>Dämpfung akustischer Signale</b> .....	<b>31</b>
5.1	Quellen von Lärm .....	31
5.2	Einfluss der Entfernung auf die Dämpfung .....	33
5.3	Einfluss der Luftabsorption auf die Dämpfung.....	33
5.4	Einfluss der meteorologischen Umgebungsbedingungen auf die Dämpfung .....	36
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>40</b>
6.1	Bewertung der Projektergebnisse .....	40
6.2	Vorbereitung eines Messkonzeptes.....	43
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>46</b>
<b>Anhang</b>	.....	<b>48</b>
	Meteorologische Zusatzdämpfung: Jahresmittelwerte .....	48
	Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.01. ....	52
	Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.04. ....	56
	Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.07. ....	60
	Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.10. ....	64
	Verlängerung des Schallweges innerhalb des Bestands durch atmosphärische Brechung und Reflexion (an der Erdoberfläche).....	68
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>69</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des gekoppelten Vegetations-Atmosphärenmodells HIRVAC in der eindimensionalen Version (aus GOLDBERG & BERNHOFER 2001).....	9
Abbildung 2:	Tagesmittelwerte der Temperatur (TMK) im Jahresverlauf (DOY = Day Of the Year) im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013). Rote Kreise: Mittelwert der 30 einzelnen Tagesmittelwerte für jeden Tag des Jahres. Vertikale schwarze Linien: repräsentative Tage (15.01., 15.04., 15.07. 15.10) .....	11
Abbildung 3:	Relative Häufigkeiten beobachteter Windrichtungen zu je drei Terminmessungen an den Referenztagen im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013).....	12
Abbildung 4:	Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit (FMK) im Jahresverlauf (DOY = Day Of the Year) im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013). Rote Kreise: Mittelwert der 30 einzelnen Tagesmittelwerte für jeden Tag des Jahres. Vertikale schwarze Linien: repräsentative Tage (15.01., 15.04., 15.07. 15.10) .	13
Abbildung 5:	Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten dichten Nadelwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts) .....	15
Abbildung 6:	Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten lockeren Nadelwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts). .....	16
Abbildung 7:	Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten dichten Laubwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts) .....	17
Abbildung 8:	Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten lockeren Laubwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts) .....	18
Abbildung 9:	Vertikalprofile der Blattflächendichte (LAD) für verschiedene Bestandsszenarien. Ebenfalls eingezeichnet sind die Vertikalprofile der Blattflächendichte an der Waldkante (WK) im Übergangsbereich zwischen Wald und Wiese. ....	19
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der Ausdehnung des Modellgebietes (ohne Bodenteil) und Lage des Waldbestandes innerhalb des Modellgebietes in Metern sowie Unterteilung in Gitterzellen bzw. Schichten (Werte in Klammern) .....	20
Abbildung 11:	Modellierte Tagesgänge der Lufttemperatur (links) und der horizontalen Windgeschwindigkeit (rechts) an den repräsentativen Tagen (15.01., 15.04., 15.07., 15.10.) über einer ebenen Wiesenfläche .....	22
Abbildung 12:	Räumliche Anordnung ausgewählter Vertikalprofile (Profil 1 ... Profil 5) im Modellgebiet.....	23
Abbildung 13:	Vertikalprofile der Temperatur (T, links) und der horizontalen Windgeschwindigkeit (vh, rechts) für verschiedene Baumbestände und eine ausgedehnte Wiesenfläche im Modellgebiet an der Position x = 765 m (Profil 3, Abbildung 12) am 15.07. um 12:00 Uhr (oben) und um 24:00 Uhr (unten) .....	24
Abbildung 14:	Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit um 06:00 Uhr in Windrichtung (ceffP) und Gegenwindrichtung (ceffM) an verschiedenen Positionen im Modellgebiet für Winter (15.01., links) und Sommer (15.07., rechts) sowie für unterschiedlichen Waldbestand bzw. Wiese als Referenz .....	25
Abbildung 15:	Geometrie bei den Schallausbreitungsrechnungen in Mitwind- und Gegenwindrichtung in Bezug auf das HIRVAC-Modellgebiet. Schallquellen (Q1 ... Q4) am Boden im Abstand von jeweils 500 m, 100 m, 50 m und 10 m von der Waldkante. Angabe der meteorologischen Zusatzdämpfung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Waldkante, die von der Schallquelle abgewandt ist (nachdem der Schall den Waldstreifen passiert hat). ....	29
Abbildung 16:	Beispiele für Schallstrahlverläufe bei horizontal inhomogenen Vertikalprofilen von Temperatur und Windgeschwindigkeit/-richtung. Grün: Position des dichten Laubwald-Altbestands. Schallquelle: 50 m im Luv des Waldes (Position x = 0 m, z = 0 m). Emissionswinkel des Schallstrahls: 83 Grad (Zenitwinkel).....	30
Abbildung 17:	Beispiele für Schallstrahlverläufe bei unterschiedlicher Vegetation und horizontal inhomogenen Vertikalprofilen von Temperatur und Windgeschwindigkeit/-richtung am 15.01. um 18:00 Uhr. Grün: Position des Waldes. Schallquelle: 50 m im Luv des Waldstreifens (Position x = 0 m, z = 0 m). Emissionswinkel des Schallstrahls: 83 Grad (Zenitwinkel).....	30
Abbildung 18:	Frequenzspektren des unbewerteten Schalldruckpegels für Straßenverkehrslärm (nach SALOMONS 2001) und Schienenlärm (nach BVS 2004). Schallpegel des Straßenlärms: 71 dB, Schallpegel des Schienenlärms: 86 dB.....	32

Abbildung 19:	Oktavspektrum des Schallleistungsexpositionspegels eines am Boden rollenden Flugzeugs nach AzB 2008 (Luftfahrzeugklasse S 5.2-L). Schallleistungspegel: 131 dB .....	33
Abbildung 20:	Abhängigkeit der Schallpegeldämpfung von der Lufttemperatur bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % (Berechnung der Luftabsorptionskoeffizienten nach BASS et al. 1995) .....	34
Abbildung 21:	Abhängigkeit der Schallpegeldämpfung von der relativen Feuchte bei einer Lufttemperatur von 20 °C (Berechnung der Luftabsorptionskoeffizienten nach BASS et al. 1995) .....	34
Abbildung 22:	Mittelwerte der meteorologischen Zusatzdämpfung für verschiedene Szenarienrechnungen (unterschiedliche Vegetation, Mitwind) bei einem Quellabstand von 50 m zur Waldkante. Ganztags (00:00 bis 24:00 Uhr): links, nachts (22:00 bis 06:00 Uhr): rechts. Mittelwertbildung: Rechnungen an allen vier Referenztagen im Jahr.....	37
Abbildung 23:	Mittelwerte (oben) und Standardabweichungen (unten) der meteorologischen Zusatzdämpfung in Windrichtung bei einem Quellabstand von 50 m von der Waldkante. Dichter Nadelwald-Altbestand: links, lockerer Nadelwald-Altbestand: rechts.....	39
Abbildung 24:	Mittelwerte und Standardabweichungen (Fehlerbalken) der meteorologischen Zusatzdämpfung für lockeren Nadelwald-Altbestand in Windrichtung (MW) und Gegenwindrichtung (GW). 00:00 bis 24:00 Tagesmittel, 22:00 bis 06:00 Nachtmittel, jeweils für alle vier Referenztage und eine Quelle, die sich 50 m vor dem Waldstreifen befindet .....	40
Abbildung 25:	Schematische Darstellung des Modell- und Messkonzeptes mit Schallquellen in Mit- und Gegenwindrichtung zu einem Waldstreifen mit einer Ausdehnung von 150 m (mit Randbewuchs insgesamt 190 m).....	45

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Geografische Lage der Station Leipzig/Halle (bis 31.12.2009 Leipzig-Schkeuditz), Stationskennziffer 10469, und Höhen der Messsonden für Temperatur und Wind. ....	10
Tabelle 2:	Mittlere Tagesmitteltemperaturen und entsprechende Standardabweichungen für die repräsentativen Tage 15.01., 15.04., 15.07. und 15.10. im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013) .....	12
Tabelle 3:	Mittlere Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit sowie entsprechende Standardabweichungen für die repräsentativen Tage 15.01., 15.04., 15.07. und 15.10. im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013) .....	13
Tabelle 4:	Vegetationsparameter der betrachteten Waldstreifen. Angegeben sind die Höhe der Vegetation, der Blattflächenindex (LAI) und der Vegetationsbedeckungsgrad (VBG) der unterschiedlichen Bestände.....	18
Tabelle 5:	Simulierte Tagesmittelwerte (simu) der Windgeschwindigkeit in 9,8 m Höhe und der Lufttemperatur in 2,1 m Höhe für die repräsentativen Tage 15.01., 15.04., 15.07. und 15.10. Zum Vergleich: Tagesmittelwerte (mess) aus Messwerten (vgl. Tabelle 2, Tabelle 3) .....	21
Tabelle 6:	Höhenbereich der Vorzeichenumkehr der simulierten effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten in unterschiedlichen Bestandsarten im Vergleich zur Schallausbreitung ohne Vegetation für die Modellposition $x = 765$ m (Profil 3) am 15.01., 06:00 Uhr.....	26
Tabelle 7:	Entfernungsabhängige Zusatzdämpfung für unterschiedliche Abstände zwischen Schallquelle und Immissionsort.....	33
Tabelle 8:	Frequenzabhängige Schalldruckpegeldämpfung in dB pro 1 km für gegebene Oktavbandmittenfrequenzen infolge von Luftabsorption bei verschiedenen meteorologischen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur T, relative Feuchte rH) bei einem Luftdruck von 101,325 kPa (Berechnung nach BASS 1995).....	35
Tabelle 9:	Schallpegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) in verschiedenen Abständen zur Quelle durch Luftabsorption bei einer Umgebungstemperatur von 10 °C, einer relativen Luftfeuchte von 50 % und einem Luftdruck von 101,325 kPa.....	35
Tabelle 10:	Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß für unterschiedliche Entfernungen nach VDI 2714 (1988). Geometrie: vgl. Abschnitt 4.2, Quelle am Boden in 50 m Abstand vor dem Waldstreifen (Breite 190 m), verschiedene Entfernungen hinter der Waldkante (Immissionsniveau in 4 m über Grund).....	42
Tabelle 11:	Pegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) in verschiedenen Abständen zur Quelle durch den direkten Einfluss der Vegetation (Streuung, Absorption) entlang des gesamten Ausbreitungsweges nach VDI 2714 (1988).....	43
Tabelle 12:	Schallpegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) und verschiedene Dämpfungsterme. Meteorologieeffekt: Angabe der Jahresmittelwerte für 00-24 Uhr bzw. 22-06 Uhr in Klammern.....	47
Tabelle 13:	Pegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) nach VDI 2714 (1988).....	47

## Abkürzungsverzeichnis

HB	Wuchshöhe des Bestandes (Höhe der Vegetation)
HIRVAC	meteorologisches Grenzschichtmodell (High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler)
LAI	Leaf Area Index (Blattflächenindex)
LAD	Leaf Area Density (Blattflächendichte)
SMART	Schallstrahlenmodell zur Berechnung der meteorologischen Zusatzdämpfung (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing)
VBG	Vegetationsbedeckungsgrad

# 1 Einführung und Zielsetzung

Die Schallausbreitung in Waldgebieten ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Je nach Schallquelle und Abstand zwischen Schallquelle und Immissionsort können unterschiedliche Effekte, z. B. vegetationspezifische Durchgangsdämpfung, Bodeneinfluss, Luftabsorption und Schallbrechung dominieren. In vorangegangenen Projekten wurde festgestellt, dass die vorliegenden experimentellen oder modellgestützten Untersuchungen zur Schallausbreitung in Waldgebieten noch keine verallgemeinerungsfähigen Aussagen für den Immissionsschutz ergeben (vgl. BERNHOFER et al. 2012). Insbesondere die meteorologischen Effekte, die einen signifikanten akustischen Einfluss haben können, wurden in bisherigen Studien nicht näher analysiert.

Ziel der ergebnisoffenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es daher, die meteorologische Zusatzdämpfung des Schallpegels in bestimmten Entfernungen von einer Schallquelle für verschiedene geometrische, akustische und meteorologische Randbedingungen (tages- und jahreszeitliche Abhängigkeiten) für das Referenzgebiet Leipzig-Schkeuditz zu untersuchen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Einfluss unterschiedlicher Vegetation (Waldstreifen unterschiedlicher Dichte und Art) auf die meteorologische Zusatzdämpfung akustischer Signale. Das hierfür angewendete Konzept der additiven Zusatzdämpfungen entspricht dabei der normgerechten Vorgehensweise zur Bildung eines Schallpegels an einem Immissionsort (s. z. B. DIN ISO 9613-2, 1999).

Um die Auswirkungen von ausgedehnten Waldstreifen auf die meteorologischen Größen zu erfassen, wird das meteorologische Modell HIRVAC (High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler) eingesetzt. Dieses Modell lässt eine differenzierte Betrachtung des zeitlich und räumlich variablen Bestandsklimas zu. Die damit berechneten Profile von Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit dienen dann als Eingangsdaten für das Schallausbreitungsmodell SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing). SMART wurde konzipiert, um Fragen der Schallausbreitung in der Atmosphäre und des Schallschutzes operationell, d. h. mit vergleichsweise geringer Rechenzeit, beantworten zu können. Unter Verwendung von Schallstrahlensimulation kann mit diesem Modell die Zusatzdämpfung des Schalls für verschiedene, auch horizontal inhomogene, thermische Schichtungen und vertikale Windvektorprofile modelliert werden. Über den Zusammenhang zwischen forstlichen Parametern und dem Wind- und Temperaturprofil können vegetationsbeeinflusste Profile der Schallgeschwindigkeit im Tages- und Jahresgang in Wäldern abgeleitet werden. Daraus wird die meteorologische Zusatzdämpfung berechnet, die den Brechungseinfluss auf die Schallpegeländerung in einem bestimmten Abstand zur Schallquelle beschreibt.

## 2 Das meteorologisch-akustische Modell

Die Simulationen der akustischen Abschirmwirkung von Wäldern auf Basis der durch die Vegetation veränderten Profile meteorologischer Größen wurde mithilfe einer Modellkette, bestehend aus einem meteorologischen Grenzschichtmodell (HIRVAC2D) und einem Schallstrahlenmodell (SMART), realisiert.

### 2.1 Das meteorologische Modell HIRVAC2D

Die Simulation der meteorologischen Profile von Temperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Vegetationsarten erfolgte mit der zweidimensionalen, nicht hydrostatischen Version des gekoppelten Atmosphären-Vegetationsmodells HIRVAC (High Resolution Vegetation Atmosphere Coupler).



der Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung hervorgerufen. Unter Verwendung dieser Schallstrahlsimulation kann die Zusatzdämpfung des Schalls in einer bestimmten Höhe über Grund für verschiedenste Zustände der atmosphärischen Grenzschicht modelliert werden.

Dieses Modell wurde bereits für die Beantwortung von Fragen zu meteorologischen Einflüssen auf die Schallimmission über homogenem Wiesengelände, aber auch in urbanen Räumen eingesetzt (siehe z. B. ZIEMANN et al. 2007; ZIEMANN & FISCHER 2009). Unter Verwendung von Schallstrahlensimulationen kann mit diesem Modell die Zusatzdämpfung des Schalls durch Schallbrechung für verschiedene, auch horizontal inhomogene, thermische Schichtungen und vertikale Windvektorprofile modelliert werden. Über den Zusammenhang zwischen forstlichen Parametern, z. B. Vertikalprofil der Blattflächendichte und dem Wind- und Temperaturprofil (z. B. ZIEMANN 1998) können vegetationsbeeinflusste Profile der Schallgeschwindigkeit im Tages- und Jahresgang in verschiedenen Wäldern abgeleitet und damit der Brechungseffekt bestimmt werden. Außerdem können mit SMART die energetischen Auswirkungen der Schallreflexion am Erdboden berücksichtigt werden.

### 3 Randwerte für die Simulationen

Als Eingangsdaten für die numerischen Simulationen dienen jahreszeitlich aufgelöste meteorologische Messdaten der letzten 30 Jahre (Mittelwerte von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit/-richtung in Bodennähe) aus dem Referenzgebiet Leipzig-Schkeuditz sowie unterschiedliche Bestandsszenarien (Vegetationsart und -dichte). Hierbei wurden solche Vegetationsarten ausgewählt, die in der Zielregion bereits heimisch sind bzw. deren Anbau aufgrund der lokalen Gegebenheiten möglich ist (RAU 2013; vgl. BERNHOFER et al. 2013).

#### 3.1 Meteorologische Daten

Die Simulation der meteorologischen Parameter in einem Waldbestand erfolgte in Anlehnung an langjährig beobachtete Werte im Untersuchungsgebiet (Region Leipzig-Schkeuditz). Relevante Eingabeparameter für die Modellsimulationen sind der geostrophische Wind (Windgeschwindigkeit oberhalb der reibungsbeeinflussten atmosphärischen Grenzschicht; vgl. KRAUS 2000) und die Windrichtung an der Oberkante des Modellgebietes sowie die Lufttemperatur.

Zur Bestimmung der relevanten meteorologischen Parameter wurde die Klimadatenbank des Deutschen Wetterdienstes genutzt (DWD 2013). Insbesondere wurden die Termin- und Tageswerte der Station Leipzig-Schkeuditz (seit 01.01.2010 Leipzig/Halle), Stationskennziffer: 10469, für den Zeitraum vom 01.07.1983 bis zum 30.06.2013 (30 Jahre Referenzzeitraum) analysiert. Die Station befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Flughafen Leipzig/Halle. Die geografischen Koordinaten der Messstation und die Messhöhen für den relevanten Zeitraum sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tabelle 1: Geografische Lage der Station Leipzig/Halle (bis 31.12.2009 Leipzig-Schkeuditz), Stationskennziffer 10469, und Höhen der Messsonden für Temperatur und Wind.**

Zeitraum	Geogr. Länge (Grad)	Geogr. Breite (Grad)	Stationshöhe (m)	Messhöhe Temperatur (m über Grund)	Messhöhe Wind (m über Grund)
01.05.1972 – 14.10.1989	12,22	51,42	131	2	12
15.10.1989 – 18.01.1994	12,22	51,42	133	2	14
19.01.1994 – 29.02.2000	12,23	51,41	144	2	10
seit 01.03.2000	12,24	51,44	131	2	10

Der verfügbare Datensatz enthält unter anderem Informationen zu Tagesmittelwerten der Temperatur sowie der Windgeschwindigkeit. Die Berechnung dieser Mittelwerte erfolgte bis zum 31.03.2001 aus Messungen an den drei Klimaterminen<sup>1</sup>. Diese Beschränkung auf nur drei Klimatermine war sinnvoll in einer Zeit, in der Beobachtungen überwiegend manuell durchgeführt wurden. Seit dem 01.04.2001 erfolgt die Berechnung der Tagesmittel aus 24 Stundenwerten bzw. aus den Messungen zu den Hauptterminen (00, 06, 12, 18 UTC), wenn mehr als drei Stundenwerte fehlen (DWD 2013).

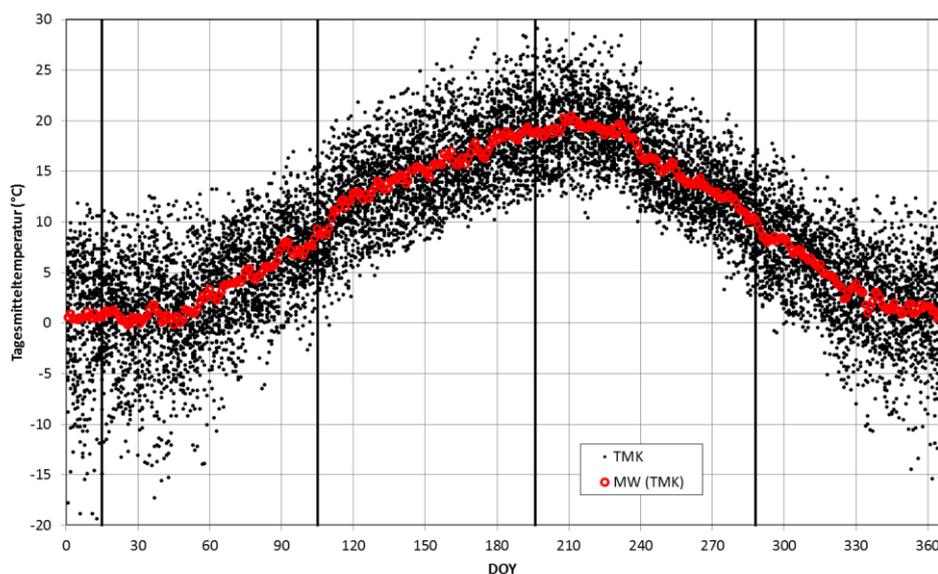
Um die meteorologischen Bedingungen zu den unterschiedlichen Jahreszeiten zu erfassen, wurden Temperatur- und Windinformationen für die Tage

- 15.01. (Winter) – 15. Tag des Jahres,
- 15.04. (Frühling) – 105. Tag des Jahres,
- 15.07. (Sommer) – 196. Tag des Jahres und
- 15.10. (Herbst) – 288. Tag des Jahres

betrachtet.

### 3.1.1 Temperatur

Abbildung 2 zeigt den Jahresgang der Tagesmitteltemperatur im 30-jährigen Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013) und den aus diesen Daten berechneten mittleren Wert für jeden Tag des Jahres.



**Abbildung 2: Tagesmittelwerte der Temperatur (TMK) im Jahresverlauf (DOY = Day Of the Year) im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013). Rote Kreise: Mittelwert der 30 einzelnen Tagesmittelwerte für jeden Tag des Jahres. Vertikale schwarze Linien: repräsentative Tage (15.01., 15.04., 15.07. 15.10)**

Für die repräsentativen Tage ergeben sich die in Tabelle 2 angegebenen mittleren Tagesmittelwerte der Temperatur im Referenzzeitraum.

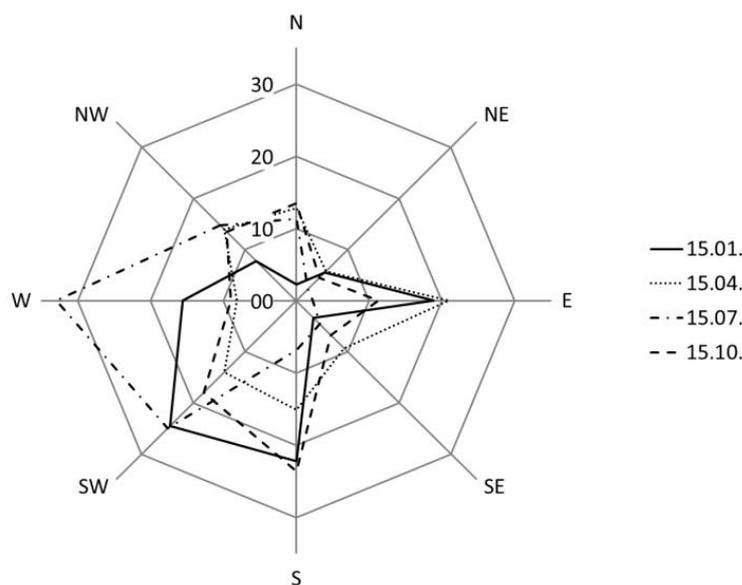
<sup>1</sup> Für den Zeitraum 01.07.1972–31.12.1990 wurden die Beobachtungen um 06, 12 und 18 UTC durchgeführt. Im Zeitraum vom 01.01.1991–31.03.2001 erfolgten die Beobachtungen um 07:30, 14:30, 21:30 MEZ.

**Tabelle 2: Mittlere Tagesmitteltemperaturen und entsprechende Standardabweichungen für die repräsentativen Tage 15.01., 15.04., 15.07. und 15.10. im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013)**

	15.01.	15.04.	15.07.	15.10.
Mittelwert (°C)	0,5	9,3	18,7	10,2
Standardabweichung (°C)	5,0	3,4	3,2	3,3

### 3.1.2 Wind

Die Termin- und Tageswerte der Klimadatenbank enthalten Informationen zu den Windrichtungen an drei Beobachtungsterminen je Tag. Im Referenzzeitraum waren für jeden Tag des Jahres somit bis zu 30 Terminbeobachtungen der Windrichtung (45°-Intervall) verfügbar (bei fehlenden Beobachtungen und/oder Beobachtungen bei Windstille verringert sich die Anzahl entsprechend). Um einen Eindruck über die räumliche Verteilung der Windrichtungen im Referenzzeitraum an den repräsentativen Tagen zu erlangen, wurden die relativen Häufigkeiten der auftretenden Windrichtungen bestimmt (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Relative Häufigkeiten beobachteter Windrichtungen zu je drei Terminmessungen an den Referenztagen im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013)**

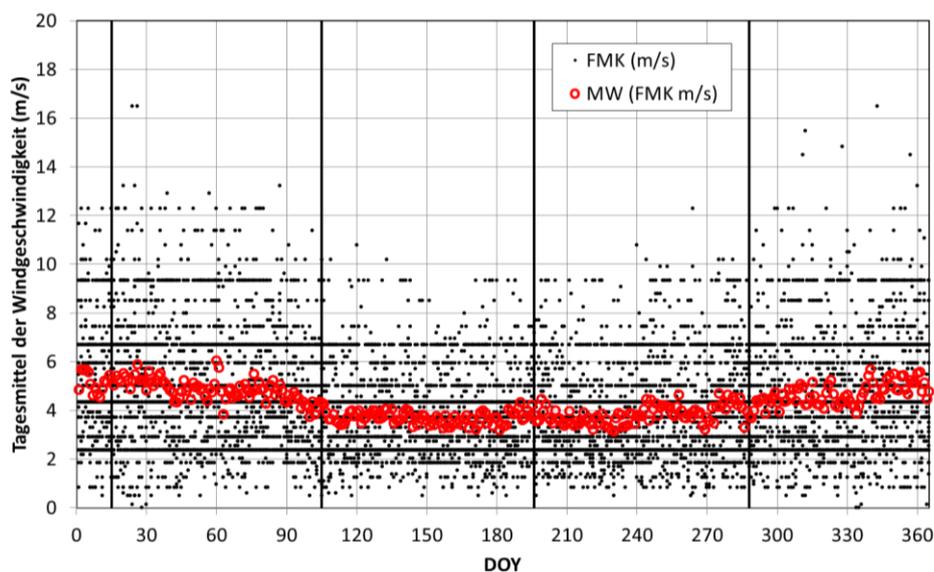
Hierbei wird deutlich, dass die Station am häufigsten aus südlichen, südwestlichen und westlichen Richtungen angeströmt wird. Insbesondere zum Frühjahrs- und Wintertermin (15.04., 15.01.) wurde jedoch auch ein auffällig hoher Anteil östlicher Anströmung der Station beobachtet.

Neben den Windrichtungsinformationen wurden die Informationen zu den Tagesmittelwerten der Windstärke (Angabe in 0,1 Beaufort) analysiert. Die Umrechnung dieser Werte in Windgeschwindigkeiten in m/s erfolgte entsprechend (KRAUS 2000)

$$v = 0,836 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot B^{3/2}.$$

Hierbei symbolisieren  $B$  die Windstärke in Beaufort und  $v$  die Windgeschwindigkeit in m/s.

Abbildung 4 zeigt den Jahresgang der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit im 30-jährigen Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013) und den aus diesen Werten berechneten mittleren Wert für jeden Tag des Jahres.



**Abbildung 4: Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit (FMK) im Jahresverlauf (DOY = Day Of the Year) im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013). Rote Kreise: Mittelwert der 30 einzelnen Tagesmittelwerte für jeden Tag des Jahres. Vertikale schwarze Linien: repräsentative Tage (15.01., 15.04., 15.07. 15.10)**

Für die repräsentativen Tage ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen mittleren Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit im Referenzzeitraum.

**Tabelle 3: Mittlere Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit sowie entsprechende Standardabweichungen für die repräsentativen Tage 15.01., 15.04., 15.07. und 15.10. im Referenzzeitraum (01.07.1983–30.06.2013)**

	15.01.	15.04.	15.07.	15.10.
Mittelwert (m/s)	5,3	4,3	3,8	3,8
Standardabweichung (m/s)	2,8	2,1	1,3	1,4

### 3.2 Vegetationsparameter

Die meteorologisch bedingte akustische Abschirmwirkung von Wäldern wurde anhand unterschiedlicher Bestandsszenarien untersucht. Insbesondere werden ein dichter Nadelwald-Altbestand, ein lockerer Nadelwald-Altbestand, ein dichter Laubwald-Altbestand sowie ein lockerer Laubwald-Altbestand betrachtet. Alle Wälder sind in eine ausgedehnte Grasfläche eingebettet und haben eine Bestandstiefe im Modell von jeweils 150 m. Die Waldbestände unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bestandsparameter Bewuchshöhe, Blattflächenindex und Vegetationsbedeckungsgrad sowie hinsichtlich der vertikalen Verteilung der spezifischen Pflanzenoberfläche im Bestand.

Die Bewuchshöhe kennzeichnet die Höhe des Bestands in m.

Der Blattflächenindex (LAI von engl.: Leaf Area Index) gibt das Verhältnis zwischen Vegetationsoberfläche (beinhaltet alle Pflanzenbestandteile: Stamm, Äste, Blätter) und Bestandsgrundfläche an

$$\text{LAI} = \text{Vegetationsoberfläche/Grundfläche des Bestands [m}^2\text{/m}^2\text{]}.$$

Der Vegetationsbedeckungsgrad (VBG) gibt das Verhältnis der von der Vegetation überdeckten Fläche zur Grundfläche des Bestands an und kann zwischen 0 und 1 variieren.

Die vertikale Verteilung der spezifischen Pflanzenfläche im Bestand (LAD von engl.: Leaf Area Density, Blattflächendichte) kennzeichnet die Dichte der Vegetation innerhalb des Bestands

$$\text{LAD} = \text{Vegetationsoberfläche/Volumeneinheit [m}^2\text{/m}^3\text{]}.$$

Der Blattflächenindex kann aus der Blattflächendichteverteilung durch Integration über die gesamte Bewuchshöhe (HB) bestimmt werden:

$$\text{LAI} = \int_{z=0\text{m}}^{\text{HB}} \text{LAD}(z) dz$$

Laut Auskunft des Staatsbetriebes Sachsenforst ist die Hauptbaumart im Untersuchungsgebiet Leipzig-Schkeuditz der Laubbaum. Als Beispiel für die Zusammensetzung der Vegetation wird das Forstrevier 13 (Tiefensee) des Forstbezirkes Taura betrachtet, das sich im Norden an das Untersuchungsgebiet anschließt. Ein Privatwald im Waldteil 11 G Glesien in diesem Forstrevier setzt sich z. B. aus 68 % Traubeneiche, je 15 % Winterlinde und Hainbuche sowie 2 % Vogelkirsche zusammen (RAU 2013, vgl. BERNHOFER et al. 2013). Auf diese Zusammensetzung der Waldstruktur wird bei der Festlegung der Vegetationsparameter des Laubwaldes Bezug genommen.

Nadelbäume findet man im Untersuchungsgebiet derzeit nur selten. Es gibt jedoch geeignete Nadelbaumarten, die bei Anpflanzung auf diesem Standort einen An- und Aufwuchserfolg sicherstellen könnten. Hierzu zählen die Gemeine Kiefer, die Douglasie, die Blaufichte und die Schwarzkiefer, wobei die beiden erstgenannten Baumarten den Hauptbestand bilden (RAU 2013). Als Referenz für einen Nadelwaldbestand wird daher ein Kiefernbestand betrachtet.

Die Abgrenzung des Waldbestandes zur umgebenden Wiesenfläche wird in allen Fällen gleich gestaltet. Der Übergangsbereich umfasst eine Breite von jeweils 20 m vor und hinter dem Waldstreifen und wird als zweistufige Einfassung des Waldstreifens mit Büschen und Jungwuchs realisiert.

Die Vegetationsparameter für die unterschiedlichen Waldstreifen sind der Literatur entnommen und werden im Folgenden dargestellt.

### 3.2.1 Referenz: Ausgedehnte Wiesenfläche

Um den Effekt unterschiedlicher Vegetation auf die meteorologischen Bedingungen und daraus folgend auf die Schallausbreitung im Modellgebiet abschätzen zu können, wird als Referenz eine ausgedehnte Wiesenfläche betrachtet, die sich über das gesamte Modellgebiet erstreckt. Die Wiese ist durch eine Wuchshöhe von  $HB = 0,3$  m, einen typischen Blattflächenindex von  $LAI = 2,0$  (wie z. B. im Mittel für eine Grasfläche in Grillenburg bei Dresden gemessen, vgl. HUSSAIN et al. 2011) und eine vollständige Bedeckung des Bodens

(VBG = 1) charakterisiert. Die Verteilung der Vegetation wird als homogen angenommen, d. h. das Vertikalprofil der Blattflächendichte LAD(z) ist im gesamten Grasbestand konstant und beträgt

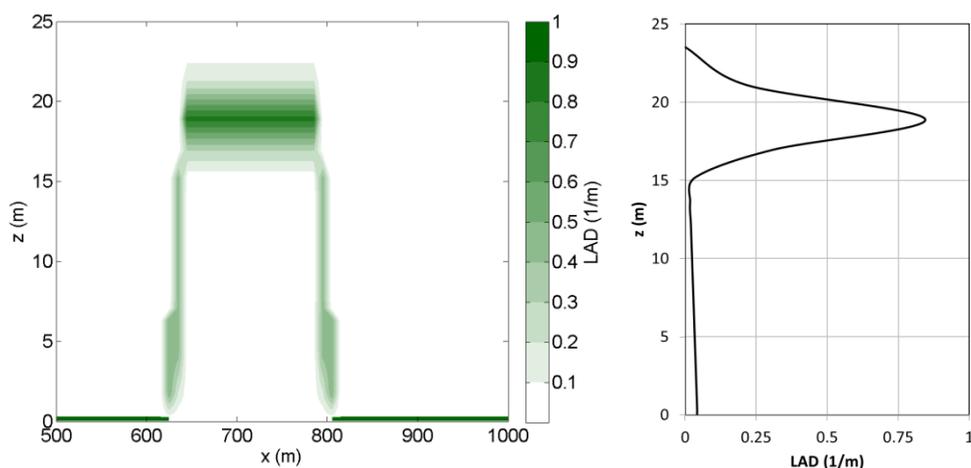
$$\text{LAD}(z \leq \text{HB}) = \text{LAI} / \text{HB} = 2,0 / 0,3 \text{ m} = 6,7 \text{ m}^{-1}.$$

### 3.2.2 Dichter Nadelwald-Altbestand

Nach RAU (2013) wird als Referenz für einen Nadelwald-Bestand ein Kiefernwald betrachtet. Der dichte Kiefernbestand ist dabei durch ein geschlossenes Kronendach gekennzeichnet (VBG = 1). Im Stammbereich findet sich nur wenig Vegetation, weil das Licht das dichte Kronendach nur schlecht durchdringen kann. Somit wird eine hohe Blattflächendichte im oberen Teil des Bestands erwartet und nur ein geringer Anteil im unteren Bereich. Das Vertikalprofil der Blattflächendichte und die Höhe des Bestands wurden der Literatur entnommen (CERMÁK et al. 1998). In dieser Arbeit wurde ein 66 Jahre alter Bestand aus Gemeiner Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) in Brasschaat/Belgien untersucht. Das Maximum der Blattflächendichte dieses Bestands lag in einer Höhe von etwa 19,6 m, die Vegetationshöhe reichte von 15 m bis zu maximal 24 m. Der Blattflächenindex für den untersuchten Wald (ohne Stamm/Äste) wird mit 3,0 angegeben. Für die Modellrechnungen ist die gesamte Vegetation zu berücksichtigen. Der mittlere Stammdurchmesser in Brusthöhe ( $z = 1,3 \text{ m}$ ) wird in der Arbeit mit 26,8 cm angegeben. Die Bewuchsdichte betrug 542 Bäume pro Hektar. Hieraus lässt sich die Stammflächendichte in Brusthöhe zu  $0,04 \text{ m}^{-1}$  abschätzen. Unter Annahme einer linearen Abnahme des Stammdurchmessers bis zur Krone ergibt sich für den gesamten Bestand ein zusätzlicher Anteil für den LAI-Wert von 0,5.

Der dichte Nadelwald-Altbestand (Abbildung 5) ist durch folgende Vegetationsparameter gekennzeichnet:

- Bestandstiefe: 150 m
- Bestandshöhe: 24 m
- Blattflächenindex: 3,5
- Vegetationsbedeckungsgrad: 1,0
- Vertikalprofil der Blattflächendichte im Bestand entsprechend Abbildung 5 (rechts)



**Abbildung 5: Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten dichten Nadelwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts)**

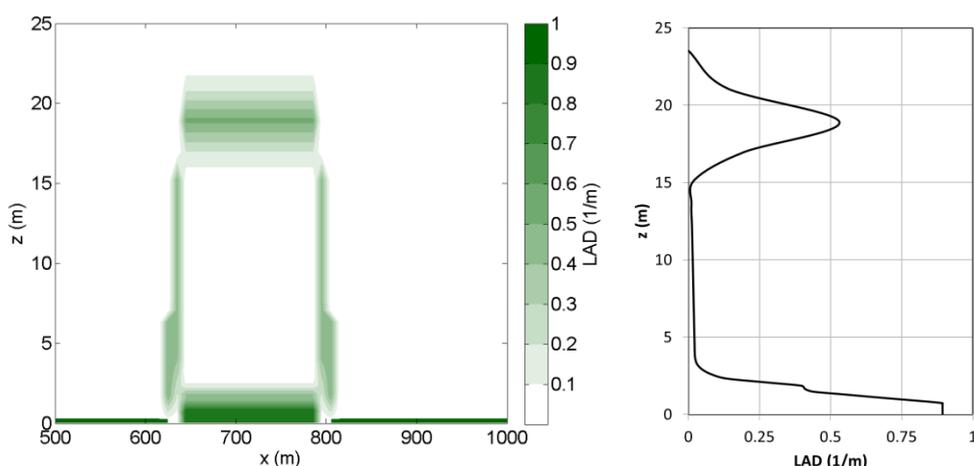
### 3.2.3 Lockerer Nadelwald-Altbestand

Die Vegetationsparameter des lockeren Nadelwald-Altbestandes wurden in Anlehnung an den dichten Nadelwald-Altbestand, wiederum für einen Kiefernwald, festgelegt. Die vertikale Verteilung der Blattflächendichte

wurde qualitativ beibehalten, allerdings wurde die absolute Dichte der Vegetation verringert ( $LAI = 2,2$ ). Dies entspricht einer Durchforstung des Waldes. Durch die Verringerung der Vegetationsdichte insbesondere im Kronenraum kann Licht tiefer in den Bestand eindringen, sodass sich in Bodennähe ein stärkerer Unterwuchs entwickeln kann. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wurde das verdünnte Vertikalprofil der Blattflächendichte des dichten Nadelwald-Altbestandes um ein im Tharandter Wald vermessenes Vertikalprofil der Blattflächendichte (QUECK et al. 2012), das sich durch starken Unterwuchs auszeichnet, im Bereich bis zu einer Höhe von 2,5 m über Grund ergänzt. Das resultierende Profil ist in Abbildung 6 (rechts) dargestellt. Die Vertikalprofile wurden so angepasst, dass der resultierende Blattflächenindex dem des dichten Nadelwald-Altbestands entspricht ( $LAI = 3,5$ ). Für das generierte Profil beträgt der LAI-Anteil des Unterwuchses am Gesamt-LAI 1,3.

Der lockere Nadelwald-Altbestand (Abbildung 6) ist gekennzeichnet durch folgende Vegetationsparameter:

- Bestandstiefe: 150 m
- Bestandshöhe: 24 m
- Blattflächenindex: 3,5
- Vegetationsbedeckungsgrad: 1,0
- Vertikalprofil der Blattflächendichte im Bestand entsprechend Abbildung 6 (rechts)



**Abbildung 6: Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten lockeren Nadelwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts).**

### 3.2.4 Dichter Laubwald-Altbestand

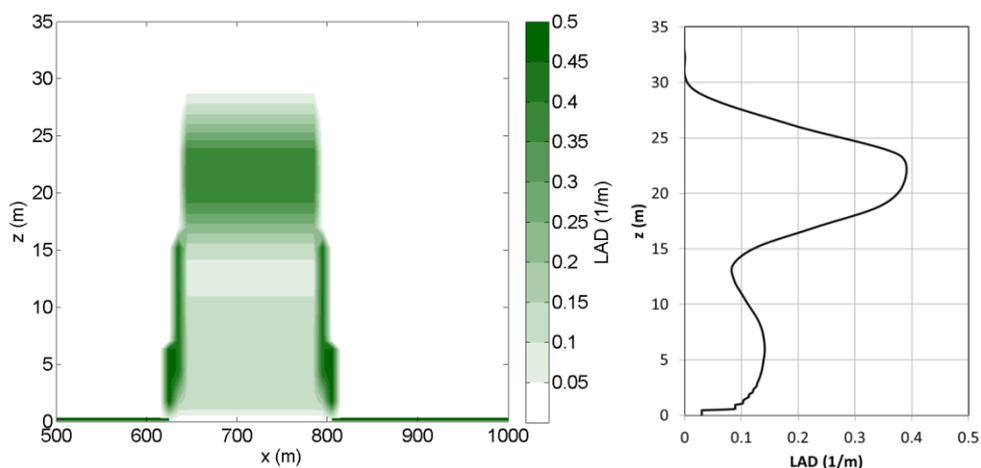
In der Region um das Untersuchungsgebiet Leipzig-Schkeuditz findet man häufig Eichen und Eichenmischwälder. Aus diesem Grund wurde in der Literatur nach vergleichbaren Wäldern gesucht. CERMÁK (1998) beschreibt einen Auwald, dessen Hauptbaumart mit 78 % (bezogen auf das Holzvolumen) Stieleiche (*Quercus robur* L.) ist. Darüber hinaus besteht der von CERMÁK (1998) analysierte Wald zu 18 % aus Esche (*Fraxinus excelsior* L. und *Fraxinus angustifolia* Vahl.), 3 % Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) und zu 1 % aus anderen Spezies.

Für die Modellrechnungen wurde ein vertikales Blattflächendichteprofil für einen Wald zusammengestellt, der zu 68 % aus Eiche besteht. Der verbleibende Anteil von 32 % wurde als Winterlinde simuliert. Die vertikalen Verteilungen der Blattflächendichte für Eiche und Winterlinde wurden CERMÁK (1998) entnommen.

Für ausgereifte Eichenwälder ist in der Literatur ein breites Spektrum für Wuchshöhen zwischen 24,4 m und 39,2 m und LAI-Werte im Bereich von 2,9 bis 7,2 zu finden (LE DANTEC et al. 2000). Für die Simulation wurde das Vertikalprofil der Blattflächendichte der Eiche so skaliert, dass eine Gesamthöhe von 31,3 m erreicht wurde und ein LAI von 5,5 (mittlere Wuchshöhe für einen ausgereiften Bestand und mittlerer maximaler Blattflächenindex für die Jahre 1995–1998 nach LE DANTEC et al. 2000). Die Anpassung des Profils für Winterlinde erfolgte derart, dass sich eine Wuchshöhe von 24 m (Endhöhe nach Baumkunde 2013) und ein LAI von 5,3 (80-jähriger Bestand, nach RAUNER 1976 in CERMÁK 1998) ergeben. Durch die Kombination dieser beiden Profile (Wichtung entsprechend der Anteile von Eiche und Winterlinde) wurde das in Abbildung 7 (rechts) gezeigte Vertikalprofil der Blattflächendichte generiert.

Der dichte Laubwald-Altbestand (Abbildung 7) ist gekennzeichnet durch folgende Vegetationsparameter:

- Bestandstiefe: 150 m
- Bestandshöhe: 31,3 m
- Blattflächenindex: 5,4
- Vegetationsbedeckungsgrad: 1,0
- Vertikalprofil der Blattflächendichte im Bestand entsprechend Abbildung 7 (rechts)



**Abbildung 7: Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten dichten Laubwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts)**

### 3.2.5 Lockerer Laubwald-Altbestand

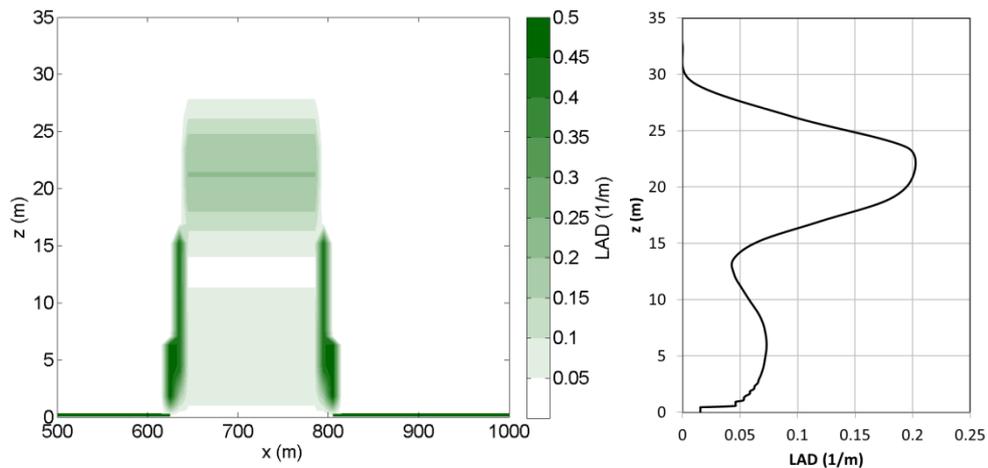
Der lockere Laubwald-Altbestand wurde als kürzlich durchforsteter Waldstreifen simuliert. Er ist gekennzeichnet durch eine nicht geschlossene Bedeckung des Bodens mit Vegetation und einen markanten Rückgang des Blattflächenindex im Vergleich zum dichten Laubwald-Altbestand. Die vertikale Verteilung der Vegetation soll erhalten bleiben, lediglich die Absolutwerte der Blattflächendichte verringern sich (Abbildung 8, rechts).

Unter diesen Randbedingungen ergeben sich für den lockeren Laubwald-Altbestand (Abbildung 8) folgende Vegetationsparameter:

- Bestandstiefe: 150 m
- Bestandshöhe: 31,3 m
- Blattflächenindex: 3,5

■ Vegetationsbedeckungsgrad: 0,8

■ Vertikalprofil der Blattflächendichte im Bestand entsprechend Abbildung 8 (rechts)



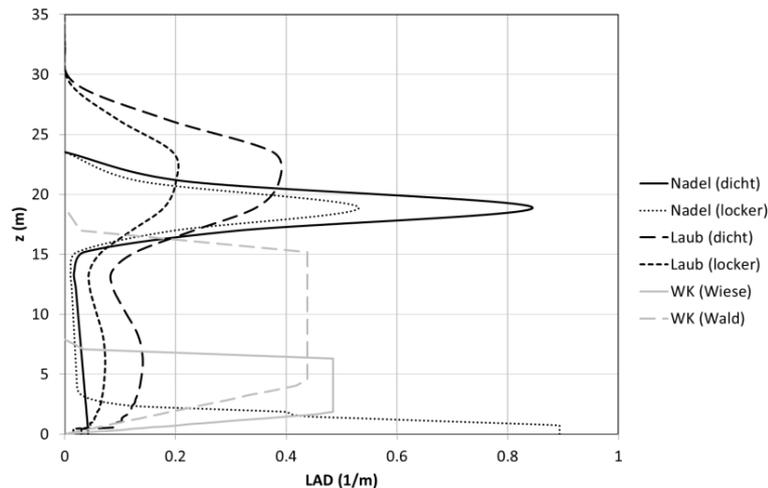
**Abbildung 8: Blattflächendichteverteilung innerhalb des simulierten lockeren Laubwald-Altbestands im Modellgebiet (links) und Vertikalprofil der Blattflächendichteverteilung im Bestand (rechts)**

### 3.2.6 Zusammenstellung der Vegetationsparameter

Alle Waldbestände haben eine horizontale Ausdehnung von 150 m im Modellgebiet. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihres Blattflächenindex sowie hinsichtlich der vertikalen Verteilung der Vegetation, des Vegetationsbedeckungsgrades und der Gesamthöhe der Vegetation. Die relevanten Vegetationsparameter sind in Tabelle 4 zusammengefasst und die Vertikalprofile der Blattflächendichte sind für alle Waldbestände zum Vergleich in Abbildung 9 dargestellt.

**Tabelle 4: Vegetationsparameter der betrachteten Waldstreifen. Angegeben sind die Höhe der Vegetation, der Blattflächenindex (LAI) und der Vegetationsbedeckungsgrad (VBG) der unterschiedlichen Bestände.**

Bezeichnung	Vegetationshöhe (m)	LAI	VBG
Wiesenfläche	0,3	2,0	1,0
Dichter Nadelwald-Altbestand	24,0	3,5	1,0
Lockerer Nadelwald-Altbestand	24,0	3,5	1,0
Dichter Laubwald-Altbestand	31,3	5,4	1,0
Lockerer Laubwald-Altbestand	31,3	3,5	0,8
Waldkante (Wald)	18,0	6,5	1,0
Waldkante (Wiese)	7,5	3,0	1,0



**Abbildung 9: Vertikalprofile der Blattflächendichte (LAD) für verschiedene Bestandsszenarien. Ebenfalls eingezeichnet sind die Vertikalprofile der Blattflächendichte an der Waldkante (WK) im Übergangsbereich zwischen Wald und Wiese.**

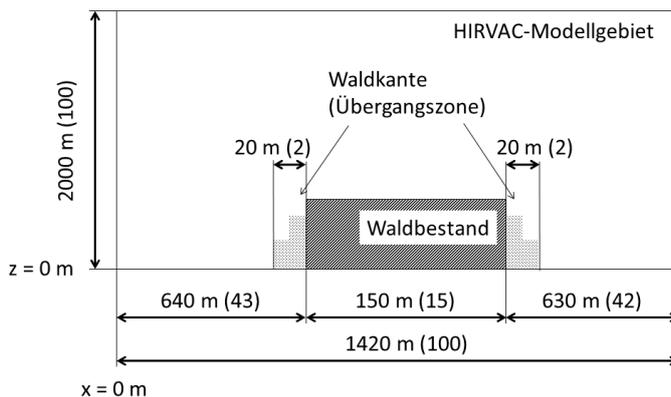
## 4 Modellrechnungen

Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss unterschiedlicher Vegetation auf die meteorologischen Bedingungen in einem Untersuchungsgebiet abzuschätzen und hieraus abzuleiten, inwiefern sich die Schallausbreitung aufgrund der veränderten atmosphärischen Bedingungen verändert. Hierfür wurden zwei Modelle miteinander gekoppelt. Der Einfluss der unterschiedlichen Vegetationsarten auf die meteorologischen Bedingungen in der bodennahen Atmosphäre wurde mit dem meteorologischen Grenzschichtmodell HIRVAC2D (vgl. Abschnitt 2.1) durchgeführt. Im Ergebnis wurden horizontal inhomogene Vertikalprofile von Temperatur- und Windgeschwindigkeit/-richtung berechnet. Profile dieser Größen sind entscheidend für die Beschreibung der Schallausbreitung in der Atmosphäre, weil sie sich maßgeblich auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit akustischer Signale auswirken. Vertikale Änderungen der Schallgeschwindigkeit bewirken wiederum eine Brechung akustischer Signale, sodass sich infolge der veränderten meteorologischen Bedingungen die Schallausbreitung abhängig von der jeweiligen Vegetation ändert. Als Referenz für die Schallausbreitung ohne Wald dient eine ausgedehnte Wiesenfläche.

Die Berechnung horizontal inhomogener meteorologischer Profile erfolgte für die Wiesenfläche (vgl. Abschnitt 3.2.1) und die vier unterschiedlichen Waldbestände (vgl. Abschnitte 3.2.2 bis 3.2.5). Die Verteilung von Temperatur und Windgeschwindigkeit/-richtung wurde mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Stunde für jeweils einen Modelltag im Winter (15.01.), im Frühling (15.04.), im Sommer (15.07.) und im Herbst (15.10.) (Referenztage) für die weiteren Analysen mit dem Schallausbreitungsmodell gespeichert. Für die akustischen Schallausbreitungsrechnungen standen somit insgesamt 480 unterschiedliche (horizontal inhomogene) meteorologische Felder zur Verfügung.

## 4.1 Einfluss der Vegetation auf die meteorologischen Bedingungen (HIRVAC2D)

Für die vorliegenden Simulationen wurde ein Modellgebiet mit einer horizontalen Ausdehnung von insgesamt 1.420 m und einer vertikalen Ausdehnung von 2.000 m betrachtet (vgl. Abbildung 2). Im Modellgebiet wurde mit 100 horizontalen Gitterpunkten ( $\Delta x = 10$  m im Zentrum des Modellgebietes) und 100 vertikalen Schichten gerechnet. Die unteren 30 m des Modellgebietes, in denen der Großteil der Vegetation zu finden ist, wurden in 55 Schichten unterteilt. Die Simulationszeit beträgt für alle Vegetationsarten 48 Stunden, von denen die ersten 24 Stunden zum Einschwingen des Modells benötigt werden. Alle folgenden Analysen der meteorologischen Parameter beziehen sich daher auf den zweiten simulierten Modelltag (Stunde 25 bis 48; Tageszeit von 01:00 bis 24:00).



**Abbildung 10: Schematische Darstellung der Ausdehnung des Modellgebietes (ohne Bodenteil) und Lage des Waldbestandes innerhalb des Modellgebietes in Metern sowie Unterteilung in Gitterzellen bzw. Schichten (Werte in Klammern)**

Als standortspezifische Parameter für das Untersuchungsgebiet Leipzig-Schkeuditz gehen in das Modell eine Ortshöhe von 131 m über NN und die geografische Breite von 51,44 Grad ein. Die Startwerte für die meteorologischen Parameter Windgeschwindigkeit am Oberrand des Modells und Temperatur werden so gewählt, dass die modellierten Werte mit den für das Untersuchungsgebiet gefundenen mittleren Tageswerten (vgl. Abschnitt 3.1) übereinstimmen. Aus diesem Grund wurden zunächst Rechnungen für eine homogene Grasfläche im Modell durchgeführt. Dies diente einerseits zur bereits genannten Festlegung der meteorologischen Startwerte und zum anderen als Referenz für die nachfolgend durchgeführten Rechnungen mit verschiedenen Waldbeständen.

Im Hinblick auf eine Dämpfungswirkung akustischer Signale wurden insbesondere die vertikalen Profile von Temperatur<sup>2</sup> ( $T$ ) und Strömung (horizontale Windgeschwindigkeit  $vh$ ) betrachtet. Der Einfluss der vertikal variablen Luftfeuchte auf die Schallbrechung kann gegenüber dem Temperatur- und Windeinfluss vernachlässigt werden (ZIEMANN 2002). Aus Temperatur und Strömung wurden Profile der effektiven Schallgeschwindigkeit

<sup>2</sup> Die Lufttemperatur  $T$  beeinflusst maßgeblich die Schallgeschwindigkeit  $c$  in ruhender Luft (adiabatische oder Laplacesche Schallgeschwindigkeit). Neben der Temperatur beeinflusst auch die Zusammensetzung des Gasgemisches die Schallgeschwindigkeit. In der Troposphäre kann die Zusammensetzung trockener Luft als konstant betrachtet werden. Es ist  $c^2 = 401,9 \text{ [m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}] \cdot T$ . Der Faktor  $401,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$  für Luft entspricht dabei dem Produkt aus spezifischer Gaskonstante für trockene Luft ( $287,05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) und dem Verhältnis aus spezifischer Wärmekapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen für trockene Luft (1,4).

(gekoppelter Einfluss von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit) in Windrichtung ( $c_{eff,P}$ ) und in Gegenwindrichtung ( $c_{eff,M}$ ) (SALOMONS 2001) abgeleitet:

$$c_{eff,P}(T, vh) = vh + \left(401,9 \left[\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}\right] \cdot T\right)^{1/2}, \quad c_{eff,M}(T, vh) = -vh + \left(401,9 \left[\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}\right] \cdot T\right)^{1/2}.$$

Außerdem wurden die für die Schallbrechung relevanten Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit berechnet. Hierbei bewirkt ein positiver Gradient (Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe) eine Brechung des Schalls in Richtung Boden und führt, bei einem Scheitelpunkt oberhalb des Immissionsniveaus, zu einem vermehrten Eintrag von Schallenergie. Ein negativer Gradient hingegen (Abnahme der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe) bewirkt eine Aufwärtsbrechung des Schalls. Dieses kann die Ausbildung so genannter Schallschattenzonen zur Folge haben.

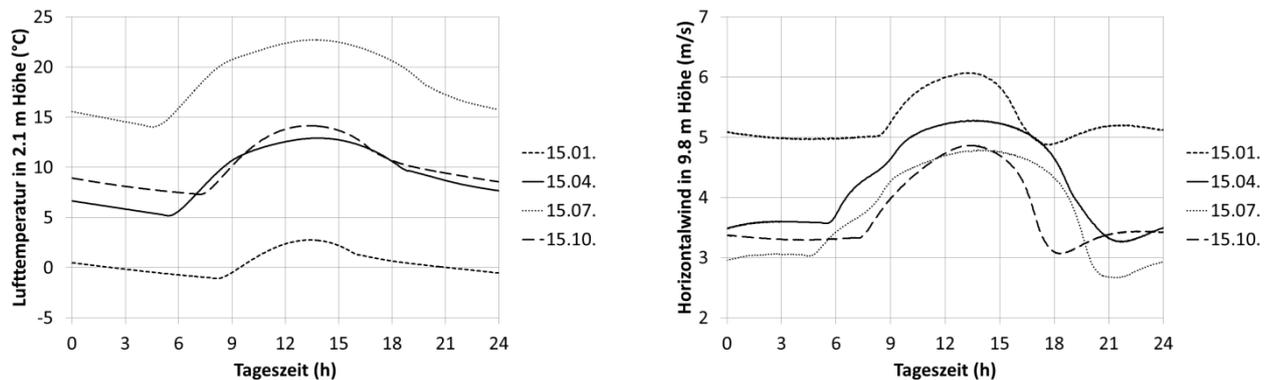
Eine Drehung des Windes mit der Höhe wurde für diesen ersten Überblick nicht betrachtet, wird aber sowohl bei den Rechnungen mit dem meteorologischen Modell HIRVAC2D als auch bei den Ausbreitungsrechnungen mit dem Schallausbreitungsmodell SMART berücksichtigt.

#### 4.1.1 Referenz: ausgedehnte Wiesenfläche

Zunächst wurden eine ausgedehnte homogene Wiesenfläche (Abschnitt 3.2.1) als Vegetation in das Modell HIRVAC2D eingebunden und Simulationsrechnungen durchgeführt. Die simulierten Daten der Temperatur und Windgeschwindigkeit wurden für den zweiten Modelltag in den Schichthöhen 2,1 m (Temperatur) und 9,8 m (Windgeschwindigkeit) betrachtet. Tagesmittelwerte beider Größen wurden den analysierten Messwerten an der Station Leipzig/Halle an den Referenztagen gegenübergestellt. Die Startwerte für das Modell wurden an allen Referenztagen so lange verändert, bis die simulierten Tagesmittelwerte denen der Messdaten entsprachen (siehe Tabelle 5). Die entsprechenden Tagesgänge der Temperatur- und Windwerte sind in Abbildung 11 dargestellt.

**Tabelle 5: Simulierte Tagesmittelwerte (simu) der Windgeschwindigkeit in 9,8 m Höhe und der Lufttemperatur in 2,1 m Höhe für die repräsentativen Tage 15.01., 15.04., 15.07. und 15.10. Zum Vergleich: Tagesmittelwerte (mess) aus Messwerten (vgl. Tabelle 2, Tabelle 3)**

Meteorologische Größe		15.01.	15.04.	15.07.	15.10.
Windgeschwindigkeit (m/s)	simu	5,3	4,2	3,8	3,7
	mess	5,3	4,3	3,8	3,8
Lufttemperatur (°C)	simu	0,5	9,3	18,7	10,2
	mess	0,5	9,3	18,7	10,2



**Abbildung 11: Modellierter Tagesgänge der Lufttemperatur (links) und der horizontalen Windgeschwindigkeit (rechts) an den repräsentativen Tagen (15.01., 15.04., 15.07., 15.10.) über einer ebenen Wiesenfläche**

An allen Tagen findet man das Maximum der Temperatur erwartungsgemäß in den frühen Nachmittagsstunden, nachdem der maximale Energieeintrag durch solare Strahlung am Mittag erreicht wurde und die bodennahen Schichten am stärksten erwärmt worden sind. Zu dieser Zeit ist die atmosphärische Grenzschicht gut durchmischt und die Temperatur nimmt mit zunehmender Höhe stetig ab. In den Nachmittags- und Abendstunden nimmt das Energieangebot durch solare Einstrahlung wieder ab, sodass sich die Atmosphäre infolgedessen vom Boden her abkühlt. Dies führt zur Ausbildung einer bodennahen Schicht (ca. 100–200 m Höhe um Mitternacht, KAIMAL & FINNIGAN 1994; GARRATT 1992), in der die Temperatur mit der Höhe zunimmt (**Inversionsschicht**). Im Verlauf der Nacht geht die Temperatur weiter zurück, bis die Temperatur in Bodennähe ihr Minimum in der Zeit um Sonnenaufgang erreicht. In dieser Zeit erreicht auch die Inversionsschicht ihre maximale Ausdehnung. Diese Darstellung entspricht dem mittleren Tagesgang der Grenzschichtentwicklung über einer Landoberfläche. Mit Sonnenaufgang und der damit verbundenen erneuten Energiezufuhr beginnt wieder die Erwärmung der Luft vom Boden her. Der Sonnenaufgang findet im Winter (15.01.) gegen 08:10 MEZ (Mitteleuropäische Zeit), im Frühjahr (15.04.) gegen 05:15 MEZ, im Sommer (15.07.) gegen 04:15 MEZ und im Herbst (15.10.) gegen 06:30 MEZ statt. Im Sommer beginnt daher die Erwärmung am frühesten.

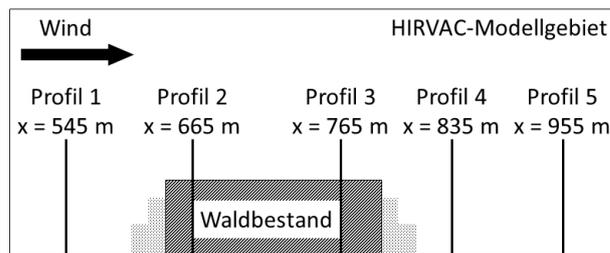
Das Minimum der Windgeschwindigkeit findet man in den Abend- bzw. frühen Morgenstunden. Das Maximum wird am frühen Nachmittag beobachtet und ist auf einen erhöhten vertikalen Impulsaustausch in der instabilen atmosphärischen Grenzschicht zurückzuführen. Die Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit sind im Allgemeinen durch eine Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe gekennzeichnet. In der so genannten Prandtschicht (bis max. 100 m Höhe über Grund) nimmt die Windgeschwindigkeit annähernd logarithmisch mit der Höhe zu. Darüber, in der so genannten Ekman-Schicht, dreht der Wind mit zunehmender Höhe allmählich nach rechts (gerechnet in Strömungsrichtung) und die Windgeschwindigkeit nimmt im Gegensatz zur Prandtl-Schicht nur noch wenig zu (s. z. B. KRAUS 2008).

Die Windgeschwindigkeitsprofile unterscheiden sich zwischen den Jahreszeiten hinsichtlich des absoluten Betrages (Windgeschwindigkeit im Winter höher als im Sommer und Herbst, vgl. Abschnitt 3.1.2) und in Bezug auf die Lage (Höhe) sowie die Ausprägung eines Strömungsmaximums in der Ekman-Schicht (u. a. abhängig von der Höhe der turbulenten Mischungsschicht). Besonders ausgeprägte Windmaxima findet man in den frühen Morgenstunden (06:00). In diesen Fällen spricht man von nächtlichen Low-Level-Jets (LLJ). Derartige Strömungsmuster stehen im Zusammenhang mit der Ausbildung von **Temperaturinversionen durch nächtliche Auskühlung**. Die damit verbundene stabile Atmosphärenschichtung bewirkt eine Entkopplung der höheren Atmosphärenschichten vom bodennahen Reibungseinfluss, sodass sich am Oberrand der Inversion vergleichsweise hohe Windgeschwindigkeiten ausbilden können (s. z. B. KALLISTRATOVA et al. 2009).

#### 4.1.2 Rechnungen für unterschiedlichen Waldbestand

Im folgenden Abschnitt werden Beispiele der Simulationsergebnisse für unterschiedlichen Bewuchs im Modellgebiet dargestellt. Dabei werden ein dichter und lockerer Laubwald-Altbestand und ein dichter und lockerer Nadelwald-Altbestand betrachtet und den Ergebnissen der Simulationen mit einer ausgedehnten Wiesenfläche im Modellgebiet gegenübergestellt.

Um charakteristische Aussagen zu den meteorologischen Parametern und den daraus abgeleiteten Schallausbreitungsbedingungen im Modellgebiet mit inhomogenem Bewuchs zu treffen, werden die Vertikalprofile an fünf Punkten im Modellgebiet betrachtet (Abbildung 12). Profil 1 befindet sich 75 m vor der Waldkante im Luv des Waldbestandes. Die Profile 2 und 3 befinden sich im Bestand, Profil 2 am Anfang und Profil 3 nahezu am Ende bezüglich der Anströmrichtung. Profil 4 befindet sich in einem Abstand von 25 m hinter der Waldkante und Profil 5 liegt weit im Lee des Bestandes in einem Abstand von 145 m zur Waldkante.



(x,z) = (0,0) m

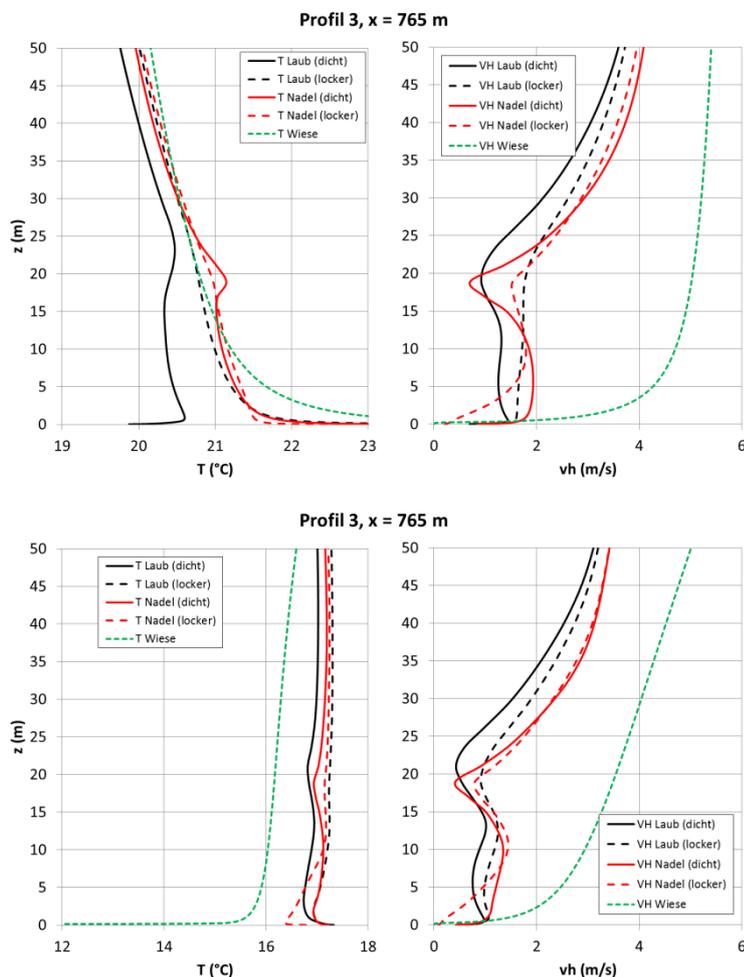
**Abbildung 12: Räumliche Anordnung ausgewählter Vertikalprofile (Profil 1 ... Profil 5) im Modellgebiet**

Die vertikalen Temperatur- und Windprofile zwischen den Simulationsrechnungen mit Waldstreifen und für die ausgedehnte Wiesenfläche unterscheiden sich im gesamten Modellgebiet. Besonders markante Unterschiede sind innerhalb und im Lee des Waldbestandes zu finden. Hier kann der Einfluss des Waldgebietes noch bis in eine Entfernung der 20–50-fachen Baumhöhe festgestellt werden (FLEMMING 1994). Aber auch im Luv unterscheiden sich die Profile voneinander. Diese luvseitige Waldwirkung reicht ca. 10 Vegetationshöhen weit. So weisen die Windprofile mit Waldbestand bereits im Luv der Vegetation eine weniger starke Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe im Vergleich zur Wiesenrechnung auf. Ursache hierfür ist die höhere Bodenrauigkeit, die durch das Einbringen von Vegetation mit einer Höhe von bis zu 31 m (Laubbaum-Altbestand) entsteht.

Abbildung 13 zeigt beispielhaft Temperatur- und Windprofile im Waldbestand (Position von Profil 3) an einem Sommertag (15.07.) zu unterschiedlichen Tageszeiten (12:00 und 24:00) für alle Vegetationsarten. Alle Profile unterscheiden sich merklich vom Referenzprofil über der ebenen Wiesenfläche (Position im Modellgebiet identisch, aber Rechnung ohne Wald). Insbesondere fallen am Mittag die deutlich geringeren Temperaturen in Bodennähe und eine Temperaturinversion im Kronenbereich der dichten Waldbestände auf. Nachts sind die Temperaturen im Bestand höher im Vergleich zur Referenz-Wiesenfläche, weil die Auskühlung innerhalb des Bestands durch die Vegetation behindert wird. Zu dieser Zeit ist außerdem bei den dichten Waldbeständen eine Temperaturinversion im Kronenbereich auszumachen.

Die Strömungsprofile zu den beiden Zeiten zeigen qualitative Ähnlichkeiten. Sie zeichnen sich durch ein sekundäres Maximum der Windgeschwindigkeit im Stammraum und ein Windgeschwindigkeitsminimum im Kronenraum aus. Dabei ist die Geschwindigkeitsabnahme im Kronenraum umso stärker, je dichter der Bestand ist.

Die Analyse der Simulationsergebnisse mit Waldbestand ergab, dass maximale Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit an der Modellposition  $x = 665 \text{ m}$  (Profil 2), kurz nach der Übergangszone von Wiese zu Wald, zu finden sind. Bei der Untersuchung des Einflusses der verschiedenen simulierten Arten von Waldbestand findet man oberhalb von  $10 \text{ m}$  maximale Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit für den dichten Nadelwald-Altbestand. Die größten Werte treten hier in einer Höhe von etwa  $20 \text{ m}$  auf und erreichen Werte von  $\pm 0,7 \text{ m/s pro m}$ . Des Weiteren sind die **Gradienten im Winter (15.01.) am höchsten**, im Herbst (15.10.) geringer und im Frühjahr (15.04.) noch etwas niedriger. Die **geringsten Gradienten** der effektiven Schallgeschwindigkeiten werden im **Sommer (15.07.)** simuliert, wenn die Windgeschwindigkeiten im Modell minimal sind und damit verbunden auch die Geschwindigkeitsgradienten im bodennahen Bereich. Betrachtet man einen einzelnen Waldbestand an einem Modeltag, dann ist dieser Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten geringer als der Jahresgang. Der Einfluss geänderter Vegetationsparameter auf die Schallgeschwindigkeitsgradienten dominiert ebenfalls im Vergleich zum Tagesgang. Eine Gegenüberstellung der Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeiten um  $06:00$  im Winter (15.01.) und Sommer (15.07.) für unterschiedliche Positionen im Modellgebiet und die unterschiedlichen Arten von Waldbestand sind in Abbildung 14 zusammengestellt.



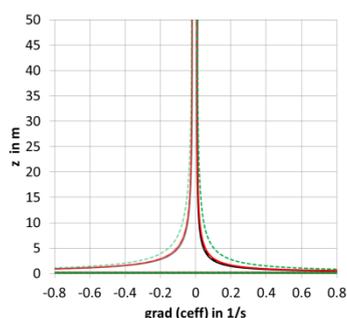
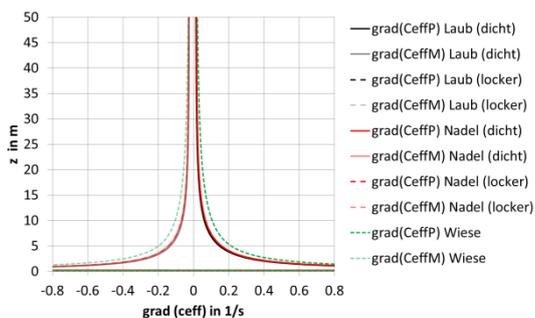
**Abbildung 13: Vertikalprofile der Temperatur (T, links) und der horizontalen Windgeschwindigkeit (vh, rechts) für verschiedene Baumbestände und eine ausgedehnte Wiesenfläche im Modellgebiet an der Position  $x = 765 \text{ m}$  (Profil 3, Abbildung 12) am 15.07. um 12:00 Uhr (oben) und um 24:00 Uhr (unten)**

15.01. (Tageszeit: 06:00)

15.07. (Tageszeit: 06:00)

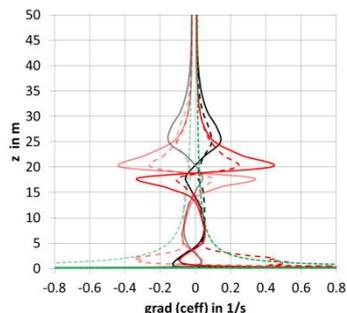
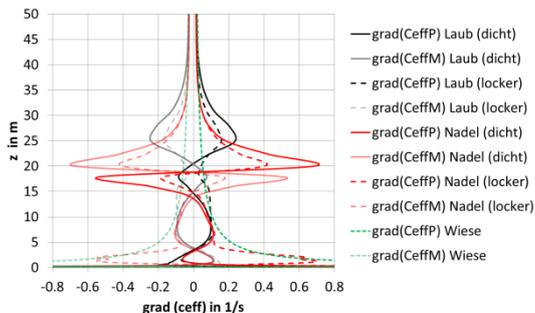
Profil 1

x = 545 m



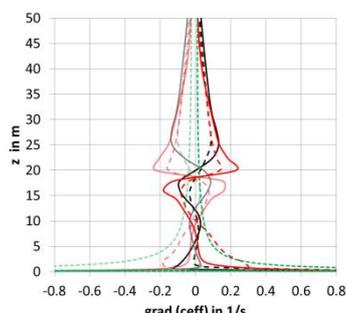
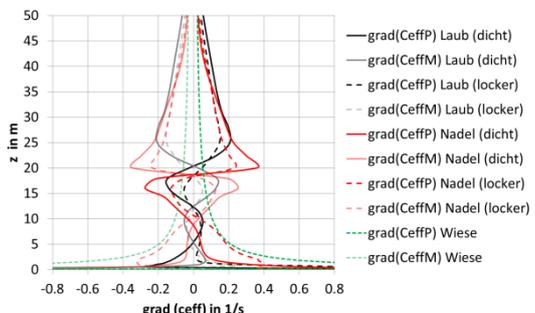
Profil 2

x = 665 m



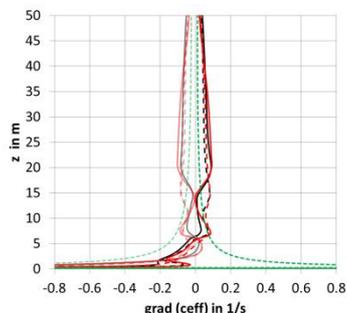
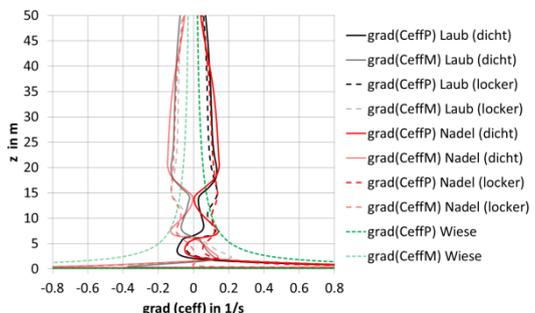
Profil 3

x = 765 m



Profil 4

x = 835 m



Profil 5

x = 955 m

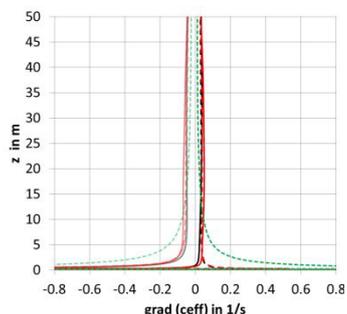
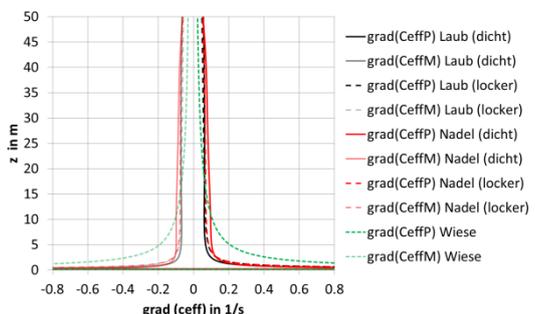


Abbildung 14: Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit um 06:00 Uhr in Windrichtung (ceffP) und Gegenwindrichtung (ceffM) an verschiedenen Positionen im Modellgebiet für Winter (15.01., links) und Sommer (15.07., rechts) sowie für unterschiedlichen Waldbestand bzw. Wiese als Referenz

Im Luv des Waldbestandes (Profil 1) ähneln die Schallgeschwindigkeitsgradienten denen des Referenzprofils am meisten, wohingegen noch weit im Lee des Waldbestandes (Profil 5) Unterschiede zwischen Referenzprofil und Profilen mit Bestand sichtbar sind. Grund hierfür sind die im gesamten Modellgebiet geringeren Windgeschwindigkeiten in den unteren Modellschichten bei den Simulationsrechnungen mit Wald, weil aufgrund des Hindernisses die Strömung in diesem Bereich im gesamten Modellgebiet in seiner horizontalen Erstreckung verlangsamt wird (geringere Strömungsgeschwindigkeit → geringere Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe → geringere Gradienten).

Einen deutlichen Einfluss der Vegetation findet man an den Profilen 2 (im Bestand), 3 (im Bestand) und 4 (dicht hinter dem Waldstreifen) und dabei insbesondere an Profil 2, das im Wesentlichen durch den Übergang von der umgebenden Wiese zum Wald mit dichtem Bewuchs über die gesamte Vegetationshöhe gekennzeichnet ist. In diesem Bereich findet man bei den Nadelwald-Beständen und dem dichten Laubwald-Altbestand in Mit- und Gegenwindrichtung sowohl Regionen, in denen der Schall aufwärts (negative Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit) als auch abwärts (positive Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit) gebrochen wird. Lokale Maxima treten dabei im Höhenbereich oberhalb der maximalen Blattflächendichte auf (Laubwald: um 25 m, dichter Nadelwald: um 20 m, lockerer Nadelwald: in Bodennähe, um 2,5 m, sekundäres Maximum über dem Kronenbereich um 20 m), also in Bereichen, in denen die Windgeschwindigkeit oberhalb der Vegetation allmählich zunimmt. Unterhalb des Kronenraumes findet man für die Nadelwald-Bestände und den dichten Laubwald-Altbestand eine Vorzeichenumkehr der effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten, die bis zu einer Höhe von 15 m (dichter Laubwald- und lockerer Nadelwaldbestand) bzw. 14 m (dichter Nadelwaldbestand) hinabreicht. Darunter entspricht das Vorzeichen der Gradienten demjenigen oberhalb des Kronenraums für die Ausbreitung in Wind- bzw. Gegenwindrichtung. Als eine Ursache für diesen Vorzeichenwechsel sind die Zunahme der Windgeschwindigkeit im Stammraum des Bestandes (Ausbildung eines sekundären Windmaximums), der Rückgang der Windgeschwindigkeit durch die hohe Vegetationsdichte im Kronenraum und der anschließende erneute Anstieg oberhalb der Vegetation zu nennen. Als Folge dieser veränderten Brechungseigenschaften innerhalb des Bestandes (Vorzeichenumkehr der effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten und damit Vorzeichenumkehr der Schallbrechung) kann es zur Herausbildung von Schichten kommen, in denen der Schall kanalisiert wird/gefangen ist (**Schallausbreitungskanäle**).

Tiefer im Bestand (Profil 3) wird eine Vorzeichenumkehr der effektiven Schallgeschwindigkeiten auch für den lockeren Laubwald-Altbestand beobachtet. Die Höhen der Vorzeichenumkehr der effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten an der Position von Profil 3 sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

**Tabelle 6: Höhenbereich der Vorzeichenumkehr der simulierten effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten in unterschiedlichen Bestandsarten im Vergleich zur Schallausbreitung ohne Vegetation für die Modellposition x = 765 m (Profil 3) am 15.01., 06:00 Uhr**

	z1 in m	Z2 in m
dichter Nadelwald-Altbestand	18	9
lockerer Nadelwald-Altbestand	18	10
dichter Laubwald-Altbestand	20	12
lockerer Laubwald-Altbestand	18	12

Betrachtet man das Profil im Lee des Waldbestandes in unmittelbare Nähe zur Waldkante, ist immer noch eine deutliche Beeinflussung der effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten zu bemerken. Man findet jedoch keine Schallausbreitungskanäle (Vorzeichenumkehr) mehr und auch die Amplitude der Gradienten geht zurück.

Die stärksten Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeiten wurden für Simulationen im Winter (15.01.) bei maximalen Windgeschwindigkeiten (größte vertikale Gradienten) und für dichten Nadelwald-Altbestand (sehr dichte Krone) gefunden. Sie erreichen Werte von bis zu  $\pm 0,7$  1/s. Bei Annahme von Schallstrahlen in Kreisbogenform entspricht dieser Gradient bei horizontaler Schallabstrahlung einem Kreisbogenradius von nur 500 m (extrem starke Brechung, Berechnung s. z. B. SAGER 1974). Selbst ein vergleichsweise geringer Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit von  $\pm 0,1$  1/s bewirkt einen immer noch starken Brechungseffekt (Krümmungsradius von 3,4 km) im Vergleich zu dem in der DIN ISO 9613-2 (1999) angenommenen Wert (Krümmungsradius von 5 km) für günstige Schallausbreitungsbedingungen in einer Mitwindsituation oder bei gut entwickelter, leichter Bodeninversion (üblicherweise nachts).

Die Simulationen haben gezeigt, dass Waldbestände mit unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich der Vegetationsparameter sowohl die Temperatur- als auch die Windprofile maßgeblich beeinflussen. Diese meteorologischen Größen haben wiederum Einfluss auf die effektive Schallgeschwindigkeit und vertikale Änderungen dieser Größen bewirken Änderungen der effektiven Schallgeschwindigkeit. Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verursachen wiederum eine Brechung des Schalls und führen somit zu einer veränderten Schallausbreitung. Um Aussagen über die Schallausbreitungseigenschaften treffen zu können, muss daher in jedem Fall der **kombinierte Einfluss aus Temperatur- und Windprofil auf die effektive Schallgeschwindigkeit** für das entsprechende Gebiet berücksichtigt werden. Gerade dieser gekoppelte Einfluss von Temperatur und Wind erschwert einfache Vorhersagen der Schallausbreitungsbedingungen ohne den Einsatz einer geeigneten akustisch-meteorologischen Modellkette.

## 4.2 Der meteorologische Einfluss auf die Schallausbreitung (SMART)

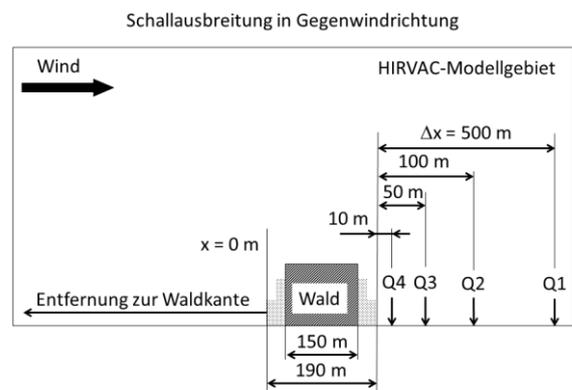
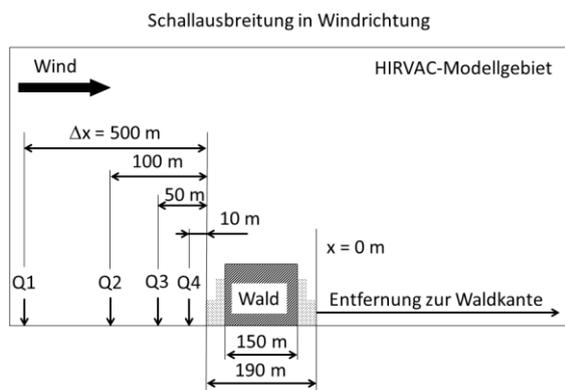
In diesem Abschnitt werden die Anwendungen des Schallausbreitungsmodells SMART zur Berechnung der meteorologischen Zusatzdämpfung beschrieben und Beispiele für Schallausbreitungswege gezeigt. Die Ergebnisse der Rechnungen sind im Abschnitt 5.4 (Einfluss der meteorologischen Umgebungsbedingungen auf die Dämpfung) zusammengestellt.

Die mit HIRVAC2D simulierten Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsprofile (abhängig von Bestandsart und -dichte sowie für unterschiedliche Tages- und Jahreszeiten – insgesamt 480 verschiedene meteorologische Situationen) – bilden die Grundlage für die Berechnung der **meteorologischen Zusatzdämpfung** mit dem Schallausbreitungsmodell SMART, mit dessen Hilfe der Verlauf einer Vielzahl von Schallstrahlen in Abhängigkeit von den gegebenen meteorologischen Bedingungen simuliert wird. Hierbei wird insbesondere berücksichtigt, dass vertikale Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit (gekoppelter Einfluss von Temperatur und Wind) eine Brechung der Schallstrahlen bewirken. Als Ergebnis dieser Rechnungen werden tages- und jahreszeitliche Aussagen zur Schalldruckpegeldämpfung infolge unterschiedlichen Bewuchses in verschiedenen Entfernungen von den Waldstreifen abgeleitet.

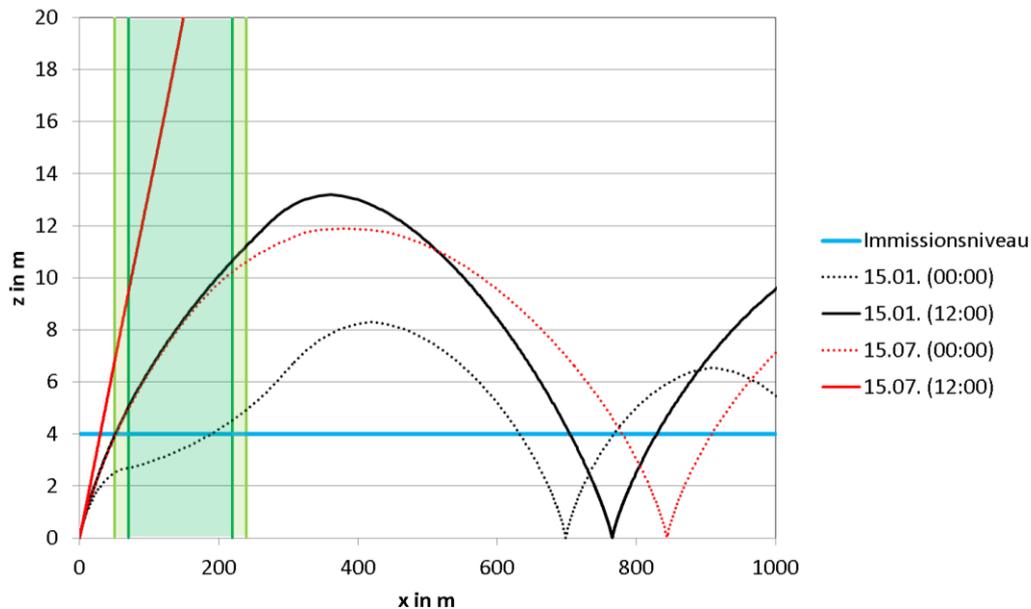
Um Aussagen zur Variabilität bei der Schallausbreitung **in Wind- und Gegenwindrichtung** treffen zu können, wurden Rechnungen für beide Schallausbreitungsbedingungen durchgeführt. Hierfür wurden die mit HIRVAC simulierten Windrichtungen an die Modellgeometrie angepasst. Als Referenzwert für die Windrichtungskorrektur diente die von HIRVAC simulierte Windrichtung in 9.81 m Höhe in einer Entfernung von 100 m im Luv des Waldes (vor der Waldkante,  $x = 525$  m, vgl. Abbildung 12). Der gewählte Referenzwert liegt für alle simulierten Vegetationsarten (mit Waldstreifen bzw. ausgedehnte Wiesenfläche) bei westlicher Richtung ( $270^\circ \pm 45^\circ$ ). Es fällt jedoch auf, dass die Anströmung bei den Rechnungen mit Waldvegetation aus etwa 10 Grad südlicherer Richtung im Vergleich zur Anströmung über der ausgedehnten Wiesenfläche erfolgt. Ursache hierfür ist, dass aufgrund des Waldes die Rauigkeit der Unterlage im Vergleich zur Wiese höher ist. Eine höhere Bodenrauigkeit verursacht wiederum eine stärkere Winddrehung mit der Höhe, sodass bei gleicher Windrichtung in der freien Atmosphäre (geostrophischer Wind) eine umso stärkere Drehung der Windrichtung in Bodennähe zu erwarten ist, je größer die Rauigkeit ist. Die Anpassung der Windrichtung erfolgt entsprechend des Referenzwertes durch Drehung aller Windrichtungsprofile im Modellgebiet zu einem Simulationszeitpunkt. Die nachfolgenden Schallausbreitungsrechnungen sind somit als Ausbreitungsrechnungen in Windrichtung (Gegenwindrichtung) bezüglich dieses Referenzpunktes zu interpretieren.

Des Weiteren wurden die mit HIRVAC2D simulierten Vertikalprofile von Temperatur und Windgeschwindigkeit und die angepassten Windrichtungsprofile für die Schallausbreitungsrechnungen linear interpoliert. Hierbei wurde für den bodennahen Bereich ( $\leq 2$  m Höhe) eine vertikale Auflösung von 1 mm gewählt. Im Höhenbereich zwischen 2 m und 30 m betrug die vertikale Auflösung der interpolierten Profile 5 cm, zwischen 30 m und 50 m 10 cm und oberhalb von 50 m bis 75 m noch 0,2 m. Auf diese Weise wurden meteorologische Eingangsprofile bestehend aus 2.886 Werten für den Höhenbereich bis 75 m generiert. Darüber hinaus wurden die meteorologischen Profile dahingehend angepasst, dass im Bereich des Grases (unterhalb von 0,25 m) keine vertikalen Änderungen der meteorologischen Parameter zugelassen wurden, sodass hier die Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit unterdrückt wurden.

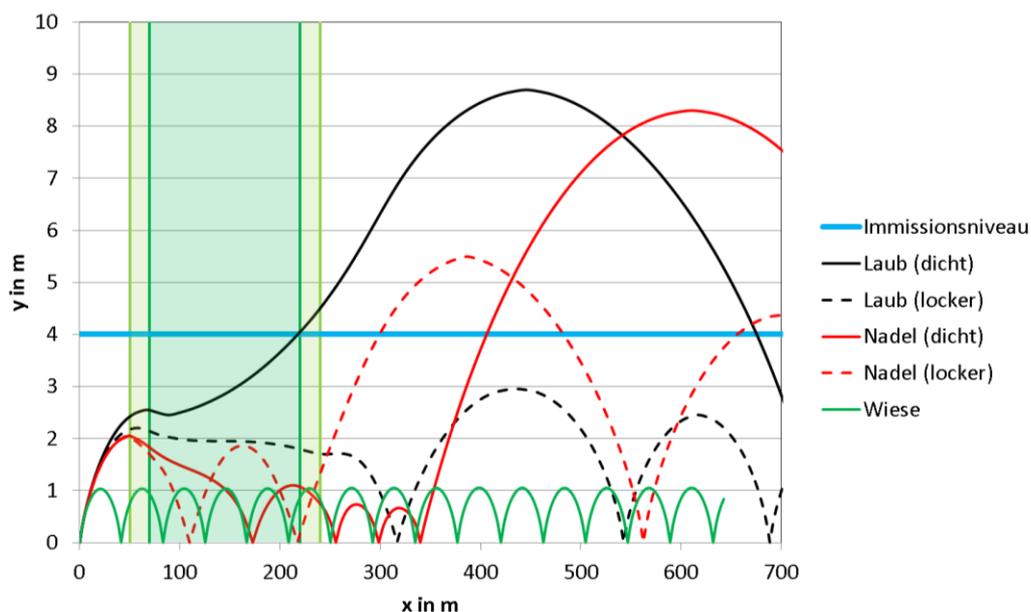
Die Schallquelle wird für die Ausbreitungsrechnungen als **Punktquelle** betrachtet, die sich **am Boden** befindet. Das **Immissionsniveau** befindet sich für alle Rechnungen in einer Höhe von **4 m über Grund**. Die Berücksichtigung der Schallausbreitungsbedingungen in Wind- und Gegenwindrichtung wurde bei den Simulationen durch geeignete Positionierung der Schallquelle im Modellgebiet berücksichtigt. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss der Position der Schallquelle relativ zum Waldstreifen (Abstand Quelle – Waldkante) auf die akustische Dämpfungswirkung. Hierfür wurden Schallausbreitungsrechnungen für jeweils vier unterschiedliche Entfernungen der Schallquelle zum Wald (jeweils in Wind- und Gegenwindrichtung) in den Abständen 10 m, 50 m, 100 m und 500 m durchgeführt (Abbildung 15). Für die 480 mit HIRVAC2D simulierten meteorologischen Felder (4 Waldstreifen und 1 Wiesenfläche, je 4 Tage mit stündlicher Datenausgabe) ergeben sich folglich insgesamt **3.840 akustische Ausbreitungsrechnungen** (je 4 Entfernungen zur Waldkante in Wind- und Gegenwindrichtung).



**Abbildung 15: Geometrie bei den Schallausbreitungsrechnungen in Mitwind- und Gegenwindrichtung in Bezug auf das HIRVAC-Modellgebiet. Schallquellen (Q1 ... Q4) am Boden im Abstand von jeweils 500 m, 100 m, 50 m und 10 m von der Waldkante. Angabe der meteorologischen Zusatzdämpfung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Waldkante, die von der Schallquelle abgewandt ist (nachdem der Schall den Waldstreifen passiert hat).**



**Abbildung 16: Beispiele für Schallstrahlverläufe bei horizontal inhomogenen Vertikalprofilen von Temperatur und Windgeschwindigkeit/-richtung. Grün: Position des dichten Laubwald-Altbestands. Schallquelle: 50 m im Luv des Waldes (Position  $x = 0$  m,  $z = 0$  m). Emissionswinkel des Schallstrahls: 83 Grad (Zenitwinkel).**



**Abbildung 17: Beispiele für Schallstrahlverläufe bei unterschiedlicher Vegetation und horizontal inhomogenen Vertikalprofilen von Temperatur und Windgeschwindigkeit/-richtung am 15.01. um 18:00 Uhr. Grün: Position des Waldes. Schallquelle: 50 m im Luv des Waldstreifens (Position  $x = 0$  m,  $z = 0$  m). Emissionswinkel des Schallstrahls: 83 Grad (Zenitwinkel).**

Für jede Modellgeometrie (Position der Quelle) wurden Schallausbreitungsrechnungen durchgeführt, wobei jeweils über 11.000 Schallstrahlen simuliert wurden, um die Schalldämpfungseigenschaften im Untersuchungsgebiet zu berechnen. Der Emissionswinkel der einzelnen Strahlen wurde für nahezu horizontale Abstrahlung von der Schallquelle (für Zenitwinkel zwischen 80 und 90 Grad) mit einer Winkelauflösung von 0,001 Grad sehr hoch gewählt. Mit dem Schallstrahlenmodell wird eine spiegelnde, verlustfreie Bodenreflexion

betrachtet. Schallstrahlen, die den Erdboden erreichen, werden vollständig reflektiert und energetisch überlagert. Damit wird eine Maximalwertabschätzung des Bodeneffektes berechnet.

Beispiele für Schallstrahlenverläufe im Modellgebiet bei horizontal inhomogenen und zeitlich variablen meteorologischen Bedingungen sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 für einen Strahl mit dem Emissionswinkel von 83 Grad dargestellt. Hierbei verdeutlicht Abbildung 16 die tages- und jahreszeitliche Änderung der Schallausbreitung bei gleichbleibendem Bewuchs (dichter Laubwald-Altbestand). Zunächst ist festzustellen, dass sich die Schallstrahlenverläufe zeitlich sehr stark unterscheiden (Abbildung 16). Vor allem im Sommer ist eine hohe tageszeitliche Variabilität festzustellen. Bei sommerlicher starker Erwärmung wird der Schall wesentlich stärker vom Boden weggebrochen als im Winter oder nachts. Abbildung 17 illustriert den Effekt der unterschiedlichen Vegetation auf die Ausbreitung des Schalls für eine bestimmte Jahres-/Tageszeit. Deutlich erkennbar ist der Unterschied der Schallstrahlen mit Vegetation im Vergleich zur Schallausbreitung über der Referenz-Wiesenfläche. Bei der Wiesenfläche sind die Vertikalprofile der meteorologischen Parameter im gesamten Modellgebiet nahezu konstant. Der Schallstrahlverlauf spiegelt dies durch einen horizontal symmetrischen Verlauf wider. Die horizontal inhomogenen Profile der Simulationsrechnungen mit Waldstreifen zeigen demgegenüber deutliche Unterschiede im Verlauf der Schallstrahlen im Modellgebiet. Eine anfänglich abwärts gerichtete Schallausbreitung kann die Richtung im Bestand umkehren, um dann im Lee, in größerem Abstand von der Waldkante, wieder einen Richtungswechsel zu vollführen. Hierbei tritt auch die meteorologisch bedingte **Kanalisierungswirkung** auf, welche zu einer Verlängerung des Schallstrahlenweges durch den Waldbestand in bestimmten Höhengniveaus führt. Dieses komplexe Verhalten der Schallstrahlen, in Abhängigkeit vom Emissionswinkel und den lokalen Vertikalgradienten der meteorologischen Größen, kann nur mit Hilfe einer Modellkette aus einem meteorologischen und akustischen Modell beschrieben werden.

## 5 Dämpfung akustischer Signale

Die Dämpfung akustischer Signale bei ihrer Ausbreitung im Freien hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Hierzu zählen die **Dämpfung aufgrund des geometrischen Abstands** der Schallquelle vom Empfänger (Ausbreitungsdämpfung) und die **Dämpfung durch Luftabsorption**. Beide Effekte werden im Folgenden näher betrachtet. Darüber hinaus wird der Effekt der **Dämpfung des Schalls durch die meteorologischen Umgebungsbedingungen** anhand der Simulationen mit dem Modell SMART abgeschätzt.

Die Dämpfung akustischer Signale z. B. durch die Luftabsorption ist zum Teil stark von der Frequenz abhängig. Daher werden zunächst verschiedene Spektren von Geräuschquellen vorgestellt.

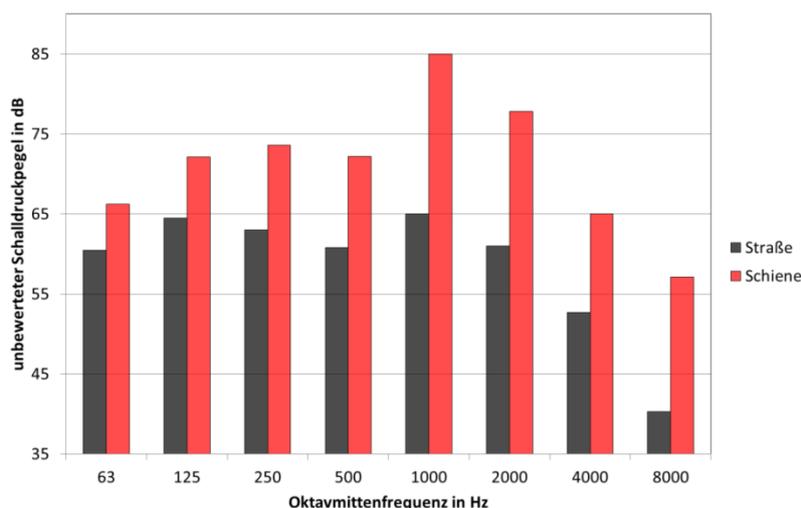
### 5.1 Quellen von Lärm

Es werden verschiedene Lärmarten unterschieden. Zu ihnen zählen Schienenverkehrs-, Straßenverkehrs- und Luftverkehrslärm sowie Industrie- und Gewerbelärm bzw. Sport- und Freizeitlärm. Die dominierende Lärmquelle in Deutschland ist hierbei der Straßenverkehr. 54 Prozent der Deutschen fühlen sich durch Lärm auf Straßen in ihrem Wohnumfeld gestört oder belästigt. Der Schienenverkehr steht auf Platz zwei der verkehrsbedingten Lärmquellen: Bundesweit fühlt sich jeder dritte Einwohner durch Schienenverkehr beeinträchtigt. Und immer noch 23 Prozent der Deutschen fühlen sich durch Luftverkehrslärm belästigt (RÜCKERT-JOHN et al. 2013).

Die verschiedenen Verkehrslärmarten unterscheiden sich hinsichtlich ihres Gesamtpegels, aber auch bezüglich der Verteilung der Pegelwerte für einzelne Frequenzbereiche. Daher werden hier typische Spektren unterschiedlicher Verkehrslärmarten vorgestellt.

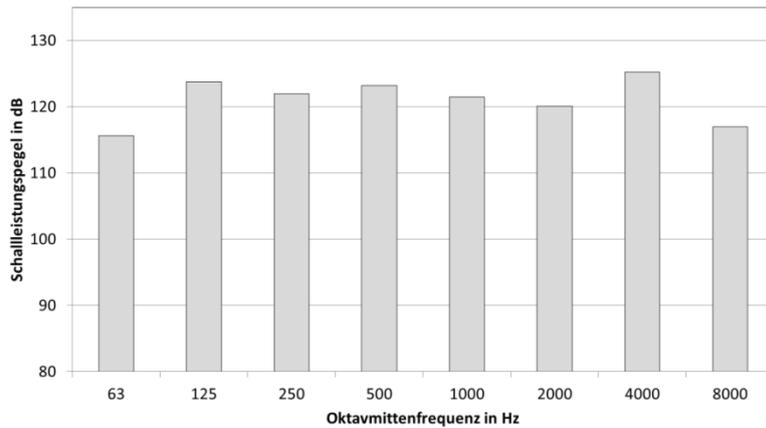
**Straßenverkehrslärm** wird durch Schallemissionen des Motors und durch die Rollgeräusche der Reifen auf dem Untergrund verursacht. Hierbei dominieren Schallemissionen durch den Motor für geringe Geschwindigkeiten ( $\leq 35$  km/h), während Rollgeräusche für höhere Geschwindigkeiten dominieren (ECMT/OECD 2006). Abbildung 18 zeigt typische Frequenzspektren für einen PKW, der mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h in einer Entfernung von 30 m vorbeifährt (nach SALOMONS 2001). Die höchsten Pegelwerte treten für mittlere und niedrige Frequenzen ab und unterhalb von ca. 1.000 Hz auf.

Ein weiteres häufig genutztes Transportsystem ist der **Schieneverkehr**. Neben den Schallemissionen der Antriebssysteme der Lokomotiven spielen vor allem Abrollgeräusche der Stahlräder auf den Schienen und Bremsgeräusche eine entscheidende Rolle bei der Lärmemission. Diese können maßgeblich durch die verwendeten Bremsen bzw. die Art des Gleiskörpers beeinflusst sein (vgl. LiS 2013). Ebenfalls können Geräusche bei Kurvenfahrten, bei denen erhöhte Schleifwirkungen zwischen Rädern und Schienen auftreten, Quellen von Lärm darstellen. Abbildung 18 zeigt modellhaft den unbewerteten Schalldruckpegel für einen einzelnen Güterwagen (ohne Antriebswagen) bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h (nach BVS 2004). Im Vergleich zum Straßenverkehrslärm (Vorbeifahrt eines PKW mit 120 km/h in 30 m Entfernung) zeigt das Schienenlärmspektrum höhere Pegel insbesondere für mittlere und hohe Frequenzen ( $\geq 1.000$  Hz).



**Abbildung 18: Frequenzspektren des unbewerteten Schalldruckpegels für Straßenverkehrslärm (nach SALOMONS 2001) und Schienenlärm (nach BVS 2004). Schallpegel des Straßenlärms: 71 dB, Schallpegel des Schienenlärms: 86 dB**

Als drittes Beispiel für ein Verkehrslärmspektrum ist in Abbildung 19 das Schalleistungsspektrum eines am Boden rollenden gelandeten **Flugzeugs** dargestellt. Das Spektrum wurde nach AzB (Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen 2008) aus dem Oktavspektrum für die Flugzeugklasse S 5.2 (Strahlflugzeuge mit einer Höchststartmasse über 50 t bis 120 t; Flugzeugtypen wie z. B. A320 und B737) abgeleitet.



**Abbildung 19: Oktavspektrum des Schalleistungsexpositionspegels eines am Boden rollenden Flugzeugs nach AzB 2008 (Luftfahrzeugklasse S 5.2-L). Schalleistungspegel: 131 dB**

## 5.2 Einfluss der Entfernung auf die Dämpfung

Schallwellen breiten sich von ihrer Quelle (Punktschallquelle) ausgehend im Raum aus. Dabei verteilt sich die Energie der Schallwelle auf einer gedachten Kugeloberfläche im Raum. Als Folge nimmt die an einem Punkt messbare Schallenergie mit wachsender Entfernung stetig ab. Hierbei bewirkt eine Verdopplung der Entfernung eine zusätzliche Schallpegeldämpfung von 6 dB. Der Unterschied zwischen den Schalldruckpegelwerten an zwei beliebig entfernten Punkten  $r_1$  und  $r_2$  von der Schallquelle  $\Delta L_p$ , kann beschrieben werden als

$$\Delta L_p = 20 \cdot \log_{10} \left( r_2 / r_1 \right).$$

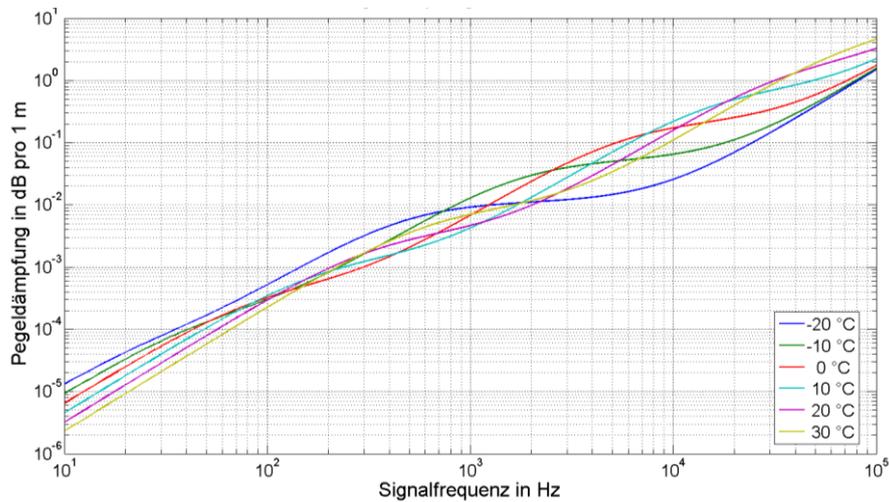
In Tabelle 7 sind entfernungsabhängige Zusatzdämpfungen für unterschiedliche Abstände zwischen Schallsender und Immissionsort zusammengestellt.

**Tabelle 7: Entfernungsabhängige Zusatzdämpfung für unterschiedliche Abstände zwischen Schallquelle und Immissionsort**

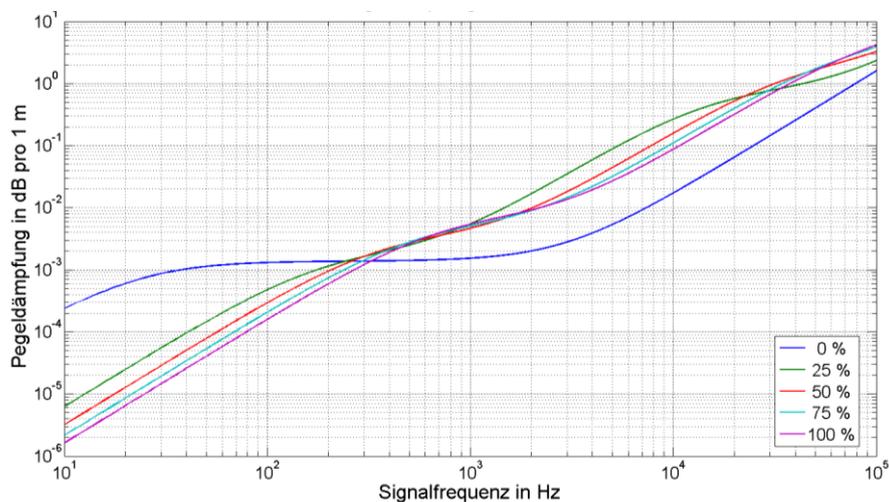
Entfernung in m	1	10	50	100	200	500	1000
Pegeldämpfung bzgl. Referenzabstand von 1 m	0 dB	20 dB	34 dB	40 dB	46 dB	54 dB	60 dB

## 5.3 Einfluss der Luftabsorption auf die Dämpfung

Bei der Ausbreitung des Schalls durch ein mehratomiges Gas wird die Schallenergie durch Molekülschwingungen (Schwingungsrelaxation) gedämpft. Die Stärke der hierdurch verursachten Dämpfung wächst mit zunehmender Frequenz des Schallsignals und hängt von der Temperatur entlang des Ausbreitungsweges ab. Darüber hinaus variiert die Dämpfung durch Luftabsorption in Abhängigkeit von dem in der Luft enthaltenen Anteil an Wasserdampf. Die folgenden Abbildungen zeigen die frequenzabhängige Schalldruckpegeldämpfung für unterschiedliche Lufttemperaturen (Abbildung 20) bzw. für unterschiedliche Werte der relativen Luftfeuchte (Abbildung 21).



**Abbildung 20: Abhängigkeit der Schallpegeldämpfung von der Lufttemperatur bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % (Berechnung der Luftabsorptionskoeffizienten nach BASS et al. 1995)**



**Abbildung 21: Abhängigkeit der Schallpegeldämpfung von der relativen Feuchte bei einer Lufttemperatur von 20 °C (Berechnung der Luftabsorptionskoeffizienten nach BASS et al. 1995)**

In Tabelle 8 sind Werte der Luftabsorptionsdämpfung für unterschiedliche Umgebungsbedingungen für die Oktavmittenfrequenzen zwischen 63 Hz und 8 kHz zusammengestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die relative Feuchte ein Maß dafür ist, wie stark die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Warme Luft kann deutlich mehr Wasserdampf aufnehmen als kühlere Luft. So tritt Wasserdampfsättigung bei 20 °C ein, wenn in der Luft  $17 \text{ g/m}^3$  Wasserdampf enthalten ist. Bei 0 °C ist die Luft bereits bei einem Wasserdampfgehalt von  $5 \text{ g/m}^3$  gesättigt (dieser Werte entspricht bei 20 °C einer relativen Feuchte von nur 28 %).

**Tabelle 8: Frequenzabhängige Schalldruckpegeldämpfung in dB pro 1 km für gegebene Oktavbandmittelfrequenzen infolge von Luftabsorption bei verschiedenen meteorologischen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur T, relative Feuchte rH) bei einem Luftdruck von 101,325 kPa (Berechnung nach BASS 1995)**

T (°C)	rH (%)	Oktavmittelfrequenz (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
-10	50	0,2	0,4	1,2	4,1	12,9	29,9	45,8	59,0
0	50	0,2	0,4	0,8	2,1	6,8	23,9	71,6	148,1
10	50	0,2	0,5	1,0	1,9	4,3	13,3	47,2	157,1
20	50	0,1	0,4	1,3	2,7	4,7	9,9	29,7	105,5
10	25	0,2	0,6	1,1	2,6	8,4	29,1	86,9	179,3
10	75	0,1	0,4	1,0	1,9	3,6	9,2	30,9	111,3
10	100	0,1	0,3	1,0	2,0	3,6	7,8	23,7	85,0

Aus den berechneten Luftabsorptionskoeffizienten lässt sich für die in Abschnitt 5.1 gegebenen Oktavspektren der unterschiedlichen Lärmquellen der Effekt der Luftabsorption auf die Schalldruckpegeldämpfung für unterschiedliche Entfernungen von der Quelle abschätzen. Die resultierenden Dämpfungswerte bei einer Lufttemperatur von 10 °C und einer relativen Feuchte von 50% (bodennaher Luftdruck von 101,325 kPa) sind für die Pegelwerte der Referenzspektren für unterschiedliche Entfernungen in Tabelle 9 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass für alle Referenzspektren eine **Pegeldämpfung von 5 dB bei Entfernungen von bis zu 1 km** bezüglich des jeweiligen Referenzpegels nicht überschritten wird. Der Effekt der Luftabsorption auf die Schallpegeldämpfung ist also mindestens eine Größenordnung kleiner als der Effekt, der durch die geometrische Ausbreitungsdämpfung der Signale (vgl. Abschnitt 5.2) hervorgerufen wird.

Des Weiteren wird ersichtlich, dass für geringe Entfernungen die höchsten absoluten Dämpfungswerte für den Fluglärm zu verzeichnen sind. Ursache hierfür ist der insgesamt deutlich höhere Referenzpegel im Vergleich zu Straßen- oder Schienenlärm. Es zeigt sich weiter, dass der Schienenlärm im Vergleich zum Straßenverkehrslärm bei größeren Entfernungen stärker gedämpft wird. Ursache hierfür sind die im Schienenverkehr enthaltenen höheren Oktavpegelwerte für mittlere und hohe Frequenzen ( $\geq 1$  kHz), bei denen die Luftabsorption stärker wirkt als für niedrige Frequenzen.

**Tabelle 9: Schallpegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) in verschiedenen Abständen zur Quelle durch Luftabsorption bei einer Umgebungstemperatur von 10 °C, einer relativen Luftfeuchte von 50 % und einem Luftdruck von 101,325 kPa**

Entfernung (bzgl. Referenz)	Straßenverkehrslärm (relativ zum Pegel in 30 m Entfernung von der Quelle)	Schienenlärm (relativ zum Referenzpegel)	Fluglärm (relativ zum Schallleistungspegel eines am Boden rollenden Flugzeugs)
Referenzpegel	70,7 dB	86,4 dB	131,0 dB
50 m	0,2 dB	0,3 dB	0,8 dB
100 m	0,3 dB	0,5 dB	1,3 dB
200 m	0,6 dB	1,0 dB	1,9 dB
500 m	1,3 dB	2,3 dB	2,7 dB
1000 m	2,1 dB	4,2 dB	3,5 dB

## 5.4 Einfluss der meteorologischen Umgebungsbedingungen auf die Dämpfung

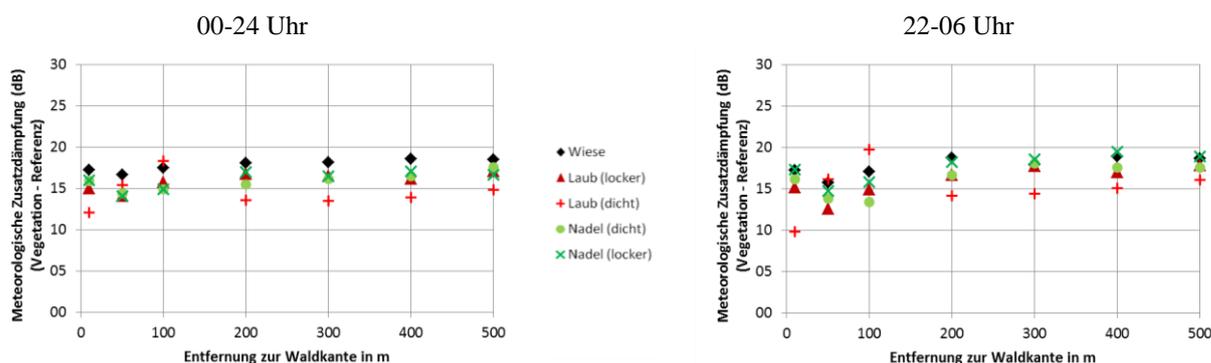
Mit Hilfe der Schallstrahlensimulationen des Modells SMART werden entfernungsabhängige Dämpfungen in Bezug auf einen Abstand von 1 m von der Schallquelle berechnet. Diese Dämpfungen enthalten den Einfluss der abstandsabhängigen Schallpegelabnahme für eine punktförmige Schallquelle (Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung, siehe DIN ISO 9613-2, 1999), die Reflexion von Schallstrahlen am Boden sowie den Einfluss der Schallstrahlenbrechung infolge von Temperatur- und Windgradienten. Die beiden letztgenannten Effekte sind miteinander gekoppelt, weil eine Bodenreflexion bei einer Schallquelle am Boden nur in einer abwärts brechenden Atmosphäre auftreten kann. Um den meteorologischen Einfluss auf die Schalldämpfung zu extrahieren, wird eine **meteorologische Zusatzdämpfung** berechnet. Diese Zusatzdämpfung ergibt sich aus der Differenz zwischen der Dämpfung, die bei den aktuellen meteorologischen Bedingungen auftritt (Verwendung der horizontal inhomogenen Temperatur-, Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsprofile, die mit dem atmosphärischen Grenzschichtmodell HIRVAC2D simuliert wurden) und der Dämpfung, die sich ohne den Schallbrechungseffekt der Atmosphäre (d. h. ohne vertikale Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsgradienten) ergibt. Wenn die meteorologische Zusatzdämpfung positiv ist, dann übt die entsprechende Atmosphärenstruktur einen schalldämpfenden Einfluss aus. In diesem Fall ist mit einer geringeren Schallimmission und damit Lärmbelastung im Vergleich zu einer Situation ohne Schallbrechungseffekte zu rechnen. Eine negative meteorologische Zusatzdämpfung kennzeichnet demgegenüber eine Situation mit vergleichsweise höherer Lärmbelastung. Für die folgenden Ausführungen ist zu berücksichtigen, dass nur der **indirekte, meteorologische Vegetationseffekt** auf die Schallausbreitung betrachtet wird. Direkte Vegetationseffekte (Reflexion, Streuung, Absorption von Schall durch die Vegetationselemente) sind nicht in den Schalldämpfungen enthalten.

Es wurden meteorologische Zusatzdämpfungen für unterschiedliche Abstände der Schallquelle von der Waldkante (10 m, 50 m, 100 m, 500 m) bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen (Effekt unterschiedlicher Vegetation auf die Profile von Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung) in Mit- und Gegenwindrichtung analysiert. Um die Ergebnisse der meteorologischen Zusatzdämpfung für verschiedene Vegetationsszenarien und geometrische Ausbreitungsverhältnisse miteinander vergleichen zu können, wurden die Simulationsergebnisse für jede Vegetationsart und für jede Sender-Empfänger-Geometrie zunächst zu Mittelwerten für alle vier betrachteten Tage mit jeweils 24 stündlichen Simulationen (insgesamt 96 Simulationsergebnisse je Vegetationsart und Geometrie) zusammengefasst (s. Anhang). Um Aussagen zu tages- und jahreszeitlichen Fluktuationen treffen zu können, wurden weiterhin die Standardabweichungen zu den Mittelwerten bestimmt. Die Nachtstunden (22:00 bis 06:00 Uhr) sind dabei von besonderem Bedeutung für den Immissionsschutz, weil sich die Emissionswerte meist nur wenig, aber die Immissionsrichtwerte (TA Lärm 1998) deutlich verringern. Deshalb wurden diese Nachtstunden zusätzlich betrachtet und hierfür ebenfalls Mittelwerte und Standardabweichungen (aus jeweils 32 Simulationsergebnissen) bestimmt.

Die Mittelwerte der meteorologischen Zusatzdämpfung sind für alle untersuchten Szenarien und Fälle sowohl bei Betrachtung des ganzen Tages als auch nachts positiv, d. h., der **Schallbrechungseffekt übt im Mittel einen schalldämpfenden Einfluss** aus. Beispielhaft sind in Abbildung 22 Mittelwerte für eine Quelle, die sich 50 m von der Waldkante entfernt befindet, dargestellt. Die Breite des für die Simulation der meteorologischen Profile verwendeten Waldstreifens beträgt 150 m. Hinzu kommen jeweils 20 m Übergangszone zwischen Wald und umgebender Wiesenfläche, sodass sich der Vegetationsstreifen horizontal über insgesamt 190 m erstreckt. Die in den Abbildungen angegebenen Entfernungen des Immissionsortes (Immissionsniveau in 4 m Höhe über Grund) beziehen sich auf die quellabgewandte Waldkante. Die tatsächliche Entfernung zwischen

Sender und Immissionsort ergibt sich somit aus den in den Abbildungen angegebenen Entfernungen zur Waldkante zuzüglich der Breite des Vegetationsstreifens (190 m) zuzüglich des Abstands der Quelle von der Vegetation (im Beispiel 50 m). Die angegebenen meteorologischen Zusatzdämpfungen für eine Entfernung von z. B. 100 m zur Waldkante entsprechen einem horizontalen Abstand zwischen Sender und Empfänger von 340 m (vgl. Abbildung 15).

Es zeigt sich, dass die meteorologische Zusatzdämpfung über einer ausgedehnten Wiesenfläche im Jahresmittel im Vergleich zu den Rechenergebnissen mit Waldstreifen (Abbildung 22, links) meist etwas größer ist. Dies gilt vor allem für die ganztägigen Betrachtungen. Die größten Unterschiede im Vergleich zur Wiesenfläche findet man bei den Ganztagesmittelwerten für Laubwälder, erwartungsgemäß in Gegenwindrichtung (bis 10 dB, s. Anhang Seite 48). Für den Immissionsschutz ist dieser Bereich im Vergleich zur Mitwindrichtung von sekundärer Bedeutung.



**Abbildung 22: Mittelwerte der meteorologischen Zusatzdämpfung für verschiedene Szenarienrechnungen (unterschiedliche Vegetation, Mitwind) bei einem Quellabstand von 50 m zur Waldkante. Ganztags (00:00 bis 24:00 Uhr): links, nachts (22:00 bis 06:00 Uhr): rechts. Mittelwertbildung: Rechnungen an allen vier Referenztagen im Jahr**

Für die **Bewertung dieser Ergebnisse der meteorologischen Zusatzdämpfung** sind auch die unterschiedlichen **Schallstrahlenverläufe** zu berücksichtigen (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17). Im Fall der Mitwindausbreitung über Gras werden die Schallstrahlen bereits bei relativ geringen Emissionswinkeln abwärts gebrochen. Die vertikalen Temperatur- und Windgradienten sind in Bodennähe maximal und nehmen dann schnell mit der Höhe ab. Dementsprechend wirkt auch der Brechungseffekt auf die Schallstrahlen in Bodennähe stärker als in größerer Höhe über der Erdoberfläche. Befindet sich die Schallquelle am Boden (wie hier angenommen), dann erreichen bereits Strahlen mit einem Emissionswinkel (Zenitwinkel) von  $83^\circ$  nur eine maximale Höhe von 1 m und können damit im Immissionsniveau in 4 m Höhe nicht zu einer Erhöhung des Schallpegels (Verringerung der Dämpfung) beitragen (vgl. Abbildung 17). Dieser Umstand führt zu den relativ hohen Dämpfungswerten über Gras. Befindet sich die Schallquelle in einer größeren Höhe bzw. wird ein niedrigeres Immissionsniveau betrachtet, verringern sich auch die Dämpfungswerte. Dabei kann es sogar zu negativen meteorologischen Zusatzdämpfungen von bis zu -15 dB in kurzer Entfernung von ca. 75 bis 200 m von der Schallquelle kommen (s. Messungen und Auswertungen: BALOGH et al. 2006; ZIEMANN et al. 2007).

Die dargestellten Ergebnisse bezüglich des Dämpfungsunterschieds zwischen Wiesenfläche und Waldstreifen sind also ausdrücklich auf die betrachtete Geometrie (Schallquelle am Boden, Immissionsniveau in 4 m Höhe) zu beziehen. Rechnungen mit einem CNPE-Modell (Crank-Nicholson Parabolic Equation – Modell basierend auf einer approximierten Version der Wellengleichung) für eine Schallfrequenz von **500 Hz** zeigen zum Beispiel eine höhere meteorologische Zusatzdämpfung bei einer Schallausbreitung in Mitwindrichtung durch einen Waldstreifen im Vergleich zu einer ausgedehnten Wiesenfläche (vgl. ZIEMANN et al. 2013). Betrachtet

man eine Schallquelle am Boden bzw. in einer Höhe von 1,35 m und eine Empfängerhöhe von 4 m, ergibt sich ein **Anstieg der Schalldämpfung für den Waldstreifen sowie eine verringerte meteorologische Zusatzdämpfung für die Wiesenfläche mit zunehmender Quellhöhe**, wobei die meteorologischen Dämpfungen über der Wiesenfläche am sensitivsten auf Änderungen in der Schallausbreitungsgeometrie reagieren. Dieses Verhalten führt insbesondere für größere Entfernungen zu signifikant größeren Dämpfungen für Waldstreifen, wie das nachfolgende Beispiel verdeutlicht. In einer **Entfernung von 164 m zu einem Referenzpunkt mit einem Abstand von 26 m zu einer Quelle (Höhe: 1,35 m)** ist die Schalldämpfung für einen Waldstreifen im **Tagesmittel um wenige bis 20 dB größer als über Wiese**, je nach Vegetationsart und meteorologischen Randbedingungen. Eine Ursache für dieses Verhalten stellen die hohen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit über der Wiesenfläche nahe der Erdoberfläche dar (s. Abbildung 14). Eine Veränderung der Quellhöhe wirkt sich deshalb besonders stark über einer Wiesenfläche aus.

In den **Nachtstunden** nimmt teilweise die Dämpfung in Mitwindrichtung für die Waldbestände etwas zu (Abbildung 22, rechts). Der **lockere Nadelwaldbestand** erreicht hierbei häufig die **größten Dämpfungswerte**, die für größere Entfernungen (ab 300 m von der Waldkante) geringfügig über den Werten für eine Wiesenfläche liegen.

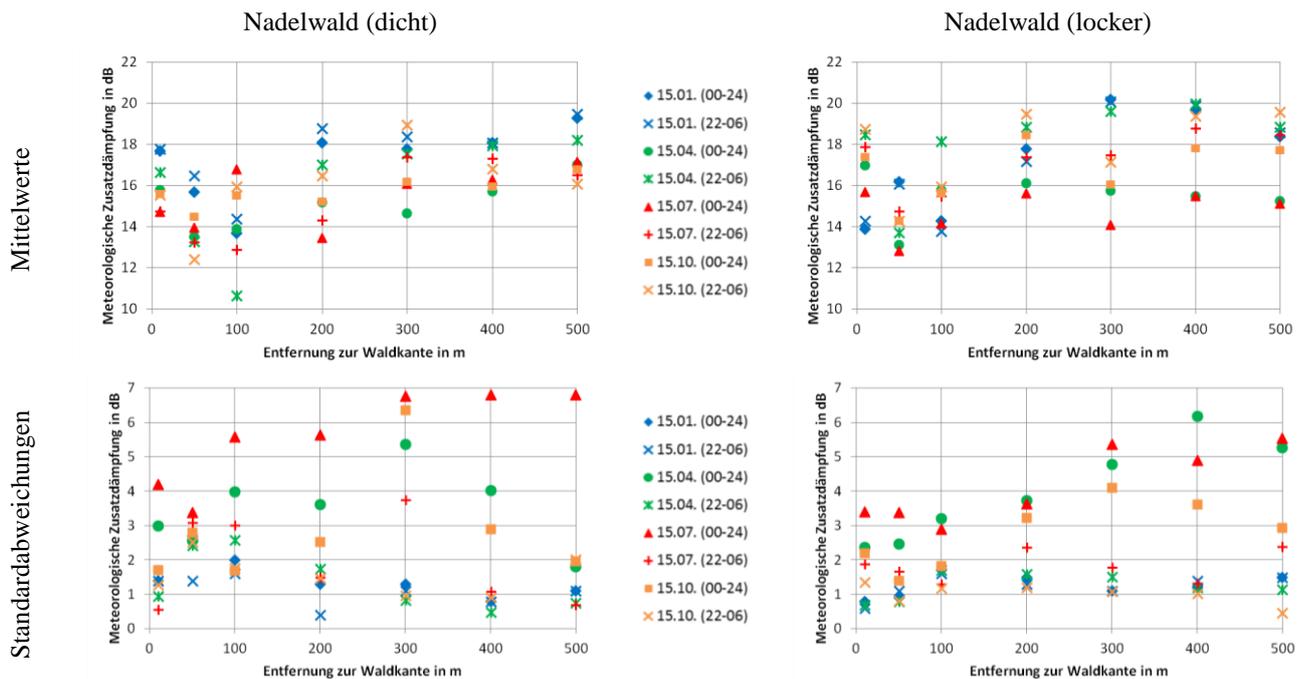
Der Vergleich der Dämpfungswirkung der verschiedenen Waldbestände zeigt, dass im Jahresmittel die **größten meteorologischen Zusatzdämpfungen** durch die veränderten atmosphärischen Vertikalprofile von Nadelwäldern bewirkt werden. Für eine Quelle in der Nähe des Waldes erweist sich hierbei der **lockere Nadelwald-Altbestand** (mit starkem Unterwuchs) am effektivsten und empfiehlt sich daher besonders für Lärmschutzzwecke.

Die **Schwankungsbreite der Mittelwerte** (Standardabweichungen, Abbildungen im Anhang ab Seite 48) unterscheidet sich ebenfalls in Mit- und Gegenwindrichtung sowie für die unterschiedlichen Vegetationsarten. Bei einer Schallausbreitung in Windrichtung findet man maximale Unterschiede für einen dichten Laubwald-Altbestand, wenn sich die Quelle nahe am Wald (10 m, 50 m) befindet. Für die anderen Vegetationsarten liegt die Standardabweichung der mittleren meteorologischen Zusatzdämpfung sowohl für die Ganztagesbetrachtungen als auch für die Nachtstunden bei Schallausbreitung in Windrichtung immer unter 6 dB. **In Gegenwindrichtung sind die Schwankungen deutlich größer** und betragen für alle Vegetationsstreifen bis zu 12 dB bei einzelnen geometrischen Schallausbreitungsbedingungen.

Um die Ergebnisse der meteorologischen Zusatzdämpfung für verschiedene jahreszeitliche Situationen miteinander zu vergleichen, wurden die Referenztage (15.01., 15.04., 15.07., 15.10.) einzeln betrachtet und Tagesmittelwerte und die dazu gehörenden Standardabweichungen sowie Mittelwerte und Standardabweichungen für die Nachtstunden (22:00 bis 06:00 Uhr) berechnet. Entsprechende Abbildungen für alle Tage sind im Anhang (15.01. ab Seite 52, 15.04. ab Seite 56, 15.07. ab Seite 60, 15.10. ab Seite 64) zusammengestellt. Auch bei dieser Betrachtung sind für jeden Tag die Tagesmittelwerte der meteorologischen Zusatzdämpfungen positiv, d. h. auch bei jahreszeitlicher Analyse wirkt der Atmosphäreneinfluss im Tagesmittel schalldämpfend. Auch in der Nacht bleiben die Werte der meteorologischen Zusatzdämpfung in der immissionsschutzrelevanten Mitwindrichtung immer positiv. Im Herbst und Winter sind die **Zusatzdämpfungen für Waldstreifen in Mitwindrichtung** in den sensitiven **Nachtstunden teilweise um einige dB höher als für Grasland** (s. Anhang Seite 54, Seite 66).

Die jahreszeitlich aufgelösten Ergebnisse sind vergleichbar mit den Resultaten im Jahresmittel: Die meteorologischen Dämpfungswerte der verschiedenen Vegetationsszenarien unterscheiden sich geringfügiger für eine Mitwindausbreitung im Vergleich zu einer Gegenwindausbreitung. Je weiter die Schallquelle von der Waldkan-

te entfernt ist, desto geringer werden die Unterschiede zwischen den Vegetationsszenarien. Im Fall der weiter entfernt liegenden Schallquelle werden mehr Schallstrahlen in größerer Höhe über den Waldstreifen hinweg geführt. Meteorologische Unterschiede zwischen den verschiedenen Vegetationsbeständen wirken sich dann nur noch in geringerem Maße auf die Schallausbreitung bzw. Schalldämpfung aus. Außerdem nehmen in größeren Höhen (bzw. außerhalb von Inhomogenitätszonen) die vertikalen Temperatur- und Windgradienten ab. Aus diesem Grund nimmt auch die tagesperiodische Variabilität (Maßzahl: Standardabweichung) in Mitwindrichtung mit zunehmender Quellentfernung von der Waldkante ab. In Gegenwindrichtung sind generell immer höhere Standardabweichungen zu erwarten. Bei ein- und demselben Standort für die Schallquelle nimmt erwartungsgemäß die Schwankung mit zunehmender Entfernung zu. Die Standardabweichung ist, mit wenigen Ausnahmen im Sommer, für Nadelwaldstreifen am geringsten. Dies gilt auch für die spezielle Betrachtung der Nachtstunden.

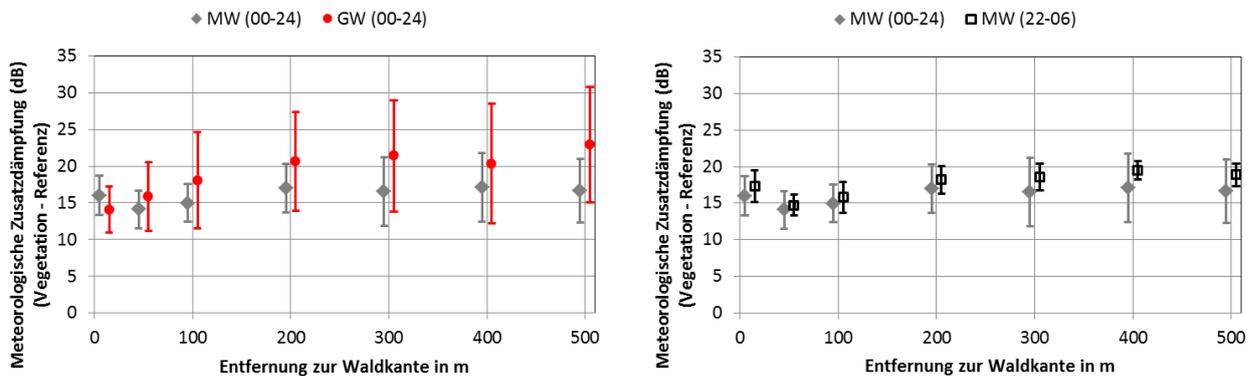


**Abbildung 23: Mittelwerte (oben) und Standardabweichungen (unten) der meteorologischen Zusatzdämpfung in Windrichtung bei einem Quellabstand von 50 m von der Waldkante. Dichter Nadelwald-Altbestand: links, lockerer Nadelwald-Altbestand: rechts**

Abbildung 23 stellt die tages- und jahreszeitlichen Unterschiede für die Vegetationsstreifen dichter Nadelwald-Altbestand und lockerer Nadelwald-Altbestand für eine Quellposition in 50 m Entfernung von der Waldkante gegenüber. Bei Schallausbreitung in Windrichtung findet man vergleichbare meteorologische Zusatzdämpfungen für beide Bestandsarten an allen Tagen und für alle Entfernungen von der Waldkante. Die Unterschiede zwischen Nachtstunden und ganztägiger Betrachtung liegen im Bereich weniger dB und auch die jahreszeitlichen Unterschiede sind mit nur wenigen dB vergleichsweise gering. Trotzdem liegen die Dämpfungswerte für den lockeren Nadelwald im Mittel etwas über den Werten des dichten Bestandes. Für größere Entfernungen von der Waldkante sind die meteorologischen Zusatzdämpfungen nachts dabei etwas höher als im Tagesmittel. Dieses Ergebnis belegt den Waldeinfluss auf die Schalldämpfung **auch für größere Entfernungen vom Bestand**. Zusätzlich zu diesem Effekt ist die tagesperiodische Variabilität (Standardabweichung) des lockeren Waldbestandes in den meisten Fällen etwas geringer als für den dichten Bestand.

Die Dämpfungsdaten im Jahresmittel für den **lockeren Nadelwaldstreifen** sind zusätzlich in der Abbildung 24 für Mit- und Gegenwindrichtung bzw. Tagesmittel- und Nachtstundenmittelwerte zusammengestellt.

Bei Mitwind betragen die Dämpfungen im Jahresmittel 14–17 dB und sind für fast alle Entfernungen geringer als bei Gegenwind. Die zeitliche Variabilität der Dämpfungen nimmt mit zunehmender Entfernung zu und liegt für Mitwind bei ca.  $\pm 5$  dB. Bei Gegenwind ist die Abhängigkeit von der Jahres- und Tageszeit größer (ca.  $\pm 8$  dB). Nachts nimmt die mittlere Dämpfung gegenüber dem Tagesmittelwert leicht zu. Die Standardabweichung der nächtlichen Dämpfungswerte bleibt dabei sehr gering. Auch diese Betrachtung der immissionschutzrelevanten Nachtstunden empfiehlt den **lockeren Nadelwald-Altbestand für Lärmschutzzwecke**.



**Abbildung 24: Mittelwerte und Standardabweichungen (Fehlerbalken) der meteorologischen Zusatzdämpfung für lockeren Nadelwald-Altbestand in Windrichtung (MW) und Gegenwindrichtung (GW). 00:00 bis 24:00 Tagesmittel, 22:00 bis 06:00 Nachtmittel, jeweils für alle vier Referenztage und eine Quelle, die sich 50 m vor dem Waldstreifen befindet**

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie werden im Folgenden diskutiert und den in der Datenrecherche (vgl. BERNHOFER et al. 2012) gefundenen Werten gegenübergestellt sowie bezüglich der VDI 2714 (1988) bzw. DIN ISO 9613-2 (1999) bewertet. Des Weiteren wird ein Messkonzept vorgestellt, das eine messtechnische Validierung der Simulationsergebnisse in verschiedenen Ausbaustufen ermöglicht.

### 6.1 Bewertung der Projektergebnisse

#### 6.1.1 Diskussion der berechneten Schalldämpfungen

Es wurden verschiedene Dämpfungsanteile bei der Ausbreitung akustischer Signale in der Atmosphäre untersucht. Den größten Effekt bewirkt dabei die **entfernungsabhängige Dämpfung**. Bezüglich eines Schallpegelwertes in 1 m Abstand von der Quelle (Referenzabstand) bewirkt dieser Effekt eine Pegeldämpfung von mehr als 46 dB bei 200 m Entfernung zur Schallquelle.

Des Weiteren wurde der Effekt durch **Luftabsorption** für unterschiedliche Spektren von Lärm abgeschätzt. Für Fluglärm wurde eine maximale Pegeldämpfung von 2 dB bei einer Entfernung von 200 m zur Quelle gefunden. Der Effekt der Luftabsorption ist deutlich geringer als der Effekt durch geometrische Dämpfung.

Die **meteorologische Zusatzdämpfung** wurde für unterschiedliche Szenarien und Geometrien abgeschätzt. Es zeigten sich sowohl tages- als auch jahreszeitliche Schwankungen und Unterschiede bei der Schallausbreitung in Mit- und Gegenwindrichtung. Hierbei wurden für die Schallausbreitung in Gegenwindrichtung deutlich größere Unterschiede zwischen den einzelnen Vegetationsstreifen gefunden. In Windrichtung wurden mittlere meteorologische Zusatzdämpfungen von maximal 20 dB (Jahresmittelwert nachts, Standardabweichung ca. 2 dB), in Gegenwindrichtung von maximal 25 dB (Jahresmittelwert gesamter Tag, Standardabweichung 4–10 dB) für die Waldstreifen bestimmt. Diese Werte meteorologischer Zusatzdämpfungen liegen generell im erwarteten Bereich, der auch durch Mess- und Simulationsergebnisse anderer Autoren (s. SALOMONS 2001) bestätigt wird. Für alle simulierten Szenarien bewirkte die **Schallbrechung** durch meteorologische Gradienten im Mittel einen positiven Dämpfungseinfluss, das heißt eine **positive Dämpfung des Schallpegels am Immissionsort**. Insgesamt wurden für die Simulationen mit Laubwald die geringsten Werte der meteorologischen Zusatzdämpfung im berechneten. Die **höchsten Pegeldämpfungen wurden für einen lockeren Nadelwald-Altbestand** gefunden, wenn sich Quelle und Immissionsort in der Nähe des Waldes befinden. Diese immergrüne Vegetation eignet sich daher besonders für Schallschutzaufgaben, bei denen **Quelle und Empfänger nicht zu weit von der Waldfläche entfernt** sind. Ist der Abstand der Quelle bzw. des Empfängers zum Wald zu groß, breitet sich der Schall in größeren Höhen, zum Teil oberhalb des Waldstreifens aus. In diesen Höhen sind die vertikalen Gradienten von Temperatur und Windgeschwindigkeit weniger stark als in Bodennähe, sodass der Schall weniger stark gebrochen wird. Des Weiteren kann der Wald bei einer solchen Ausbreitungssituation seine Abschirmwirkung als Hindernis im Schallweg (Streuung/Absorption durch Vegetationselemente bzw. den Boden) nicht oder nur zum Teil entfalten.

Befindet sich die Schallquelle in geringer Entfernung vom Waldstreifen, wirkt auch die meteorologisch bedingte **Kanalisation** (TUNICK 2003) auf die Schallausbreitung. Damit wird der Schall auf vergleichsweise längeren Ausbreitungswegen innerhalb des Waldstreifens geführt. Zur Erzielung der Kanalisierungswirkung sind Nadelwaldstreifen am besten geeignet. Abbildung 17 zeigt, dass der betrachtete Schallstrahl im Nadelwald schnell zur Erdoberfläche zurück gebrochen wird und sich dann in geringen Höhen (dämpfende Wirkung von Unterwuchs!) ausbreitet. Der **direkte Vegetationseinfluss** kann auf diese Weise effektiver wirken und in einer erhöhten Schalldämpfung resultieren. Die Stärke der Dämpfungswirkung hängt dabei wesentlich von der Frequenz des Schalls ab. Im Rahmen einer umfangreichen Literaturstudie (BERNHOFER et al. 2012) wurde eine Vielzahl von Arbeiten zur akustischen Dämpfungswirkung durch Wälder analysiert. Hierbei wurden sehr heterogene Angaben sowohl hinsichtlich des Umfangs der angegebenen Messbedingungen als auch im Hinblick auf die resultierenden Dämpfungswerte gefunden. Als mittlerer Wert für die akustische Dämpfungswirkung von Wald konnte ein Wert von **14,0 dB auf 100 m Bewuchstiefe** abgeschätzt werden.

Unter Berücksichtigung der meteorologischen Bedingungen innerhalb eines Waldstreifens führen Brechungseffekte zu einer Verlängerung des Schallweges durch den Bestand. Bei Mitwind führen die hohen vertikalen Temperatur- und Windgradienten für den lockeren Nadelwald-Altbestand (vertikale Gradienten der Schallgeschwindigkeit von bis zu  $0,5 \text{ s}^{-1}$ ) zu maximalen Schallwegverlängerungen innerhalb des Bestandes von bis zu 7 m (vgl. Rechnung im Anhang auf Seite 68). Aufgrund dieses Schallweges resultiert eine direkte Dämpfung durch die Vegetationselemente von 28 dB für einen Waldstreifen mit einer Breite von 190 m.

Entsprechend des Konzepts der additiven Beiträge von verschiedenen Dämpfungseffekten (DIN ISO 9613-2, 1999) können direkter und indirekter (meteorologischer) Vegetationseffekt kombiniert werden. In der Summe ergeben sich so **vegetationsbedingte Dämpfungen von bis zu 48 dB in Windrichtung bzw. 53 dB in Gegenwindrichtung**. Dies sind **Dämpfungswerte**, die in jedem Fall **über** denen der **Grasfläche** liegen.

### 6.1.2 Vergleich mit Berechnungen nach VDI 2714

Entsprechend der Richtlinie **VDI 2714 (1988)** kann eine meteorologische Zusatzdämpfung in Form eines gekoppelten **Boden- und Meteorologiedämpfungsmaßes** abgeschätzt werden. Die Richtlinie lässt dabei keine negativen Dämpfungswerte (entspricht einer Schallverstärkung) zu. Die Stärke der Dämpfung kann in Abhängigkeit von der horizontalen Entfernung zwischen Schallquelle und Empfänger sowie der mittleren Höhe von Emissions- und Immissionsort berechnet werden (Beispiel: Tabelle 10).

**Tabelle 10: Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß für unterschiedliche Entfernungen nach VDI 2714 (1988). Geometrie: vgl. Abschnitt 4.2, Quelle am Boden in 50 m Abstand vor dem Waldstreifen (Breite 190 m), verschiedene Entfernungen hinter der Waldkante (Immissionsniveau in 4 m über Grund)**

Entfernung zur Waldkante	10 m	50 m	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
Horizontaler Abstand Quelle Empfänger	250 m	290 m	340 m	440 m	540 m	640 m	740 m
Schallweglänge (Schrägstrecke)	250,03 m	290,03 m	340,02 m	414,02 m	540,01 m	640,01 m	740,01 m
Boden- & Meteorologiedämpfungsmaß	4,5 dB	4,6 dB	4,6 dB	4,6 dB	4,7 dB	4,7 dB	4,7 dB

Für die Modellgeometrie der Schallstrahlsimulationen mit einer Quelle, die sich 50 m vor einem 190 m breiten Waldstreifen befindet, resultieren Boden- und Meteorologiedämpfungswerte, die mit **unter 5 dB deutlich geringer** als die mit den Schallstrahlensimulationen gefundenen Werte sind.

Des Weiteren wird in der Richtlinie ein Vorgehen zur Berechnung der Schalldämpfung durch Vegetation (das **Bewuchsdämpfungsmaß**) beschrieben, das als Kombination aus Streuprozessen an Ästen, Stämmen und Blättern in Verbindung mit Absorption durch aufgelockerten Boden verstanden wird. Anzumerken ist hierbei, dass die Berechnungsvorschriften zur Bestimmung des direkten Vegetationseinflusses mit den Vorgaben der DIN ISO 9613-2 (1999) übereinstimmen. Für einfache Rechnungen wird ein frequenzunabhängiger **Dämpfungswert von 0,05 dB pro m** angegeben, der auch in der DIN ISO 9613-2 (1999) zu finden ist. Dieser Wert ist ebenfalls geringer als der aus der Literaturrecherche ermittelte Dämpfungswert (BERNHOFER et al. 2012). Bei Schallausbreitung in Windrichtung oder bei Temperaturinversionen ist laut VDI 2714 eine Krümmung der Schallstrahlen zu berücksichtigen, wobei der Krümmungsradius als konstant mit einem Wert von 5 km anzunehmen ist.

Für die betrachtete Geometrie der Schallmessstrecke (Quelle am Boden, unterschiedliche Entfernungen des Immissionsortes von der Waldkante in einer Höhe von 4 m über Grund) lassen sich hieraus für die unterschiedlichen Empfangspositionen die Höhen des Ein- bzw. Austrittes des Schalls in bzw. aus dem Vegetationsstreifen und damit die (als geradlinig angenommene) schräge Weglänge des Schalls durch den Waldstreifen abschätzen. Für eine Quelle, die sich 50 m vor dem Waldstreifen (Breite mit Randbewuchs: 190 m) befindet, verlaufen die Schallwege komplett durch den Wald. Dabei verlängert sich der Laufweg durch Strahlkrümmung aufgrund des Meteorologieeinflusses zwischen 0,01 m (Empfänger 10 m hinter der Waldkante) und 0,24 m (Empfänger 500 m vom Wald entfernt). Mit dem mittleren Dämpfungskoeffizienten für verschiedene Waldarten nach VDI 2714 (0,05 dB/m) kann hieraus der Dämpfungseinfluss durch Vegetation abgeschätzt werden. Er beträgt für eine Schallweglänge von 190,24 m durch den Waldstreifen (Empfänger in 500 m Entfernung von der Waldkante) insgesamt 9,5 dB und ist damit deutlich geringer als der aus der Literaturrecherche abgeschätzte Wert für den direkten Vegetationseffekt. Betrachtet man die Bewuchsdämpfung frequenz aufgelöst und berechnet den Dämpfungseffekt eines 190 m breiten Waldstreifens für die in Abschnitt 5.1 angegebenen Verkehrslärmspektren, erhält man Dämpfungswerte von bis zu 10,8 dB (maximal für Schienenlärm, vgl. Tabelle 11).

**Tabelle 11: Pegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) in verschiedenen Abständen zur Quelle durch den direkten Einfluss der Vegetation (Streuung, Absorption) entlang des gesamten Ausbreitungsweges nach VDI 2714 (1988)**

Entfernung (bzgl. Referenz)	Straßenverkehrslärm (relativ zum Pegel in 30 m Entfernung von der Quelle)	Schienenlärm (relativ zum Referenzpegel)	Fluglärm (relativ zum Schallleistungspegel eines am Boden rollenden Flugzeugs)
10 m	0,7 dB	1,0 dB	1,1 dB
50 m	2,3 dB	3,0 dB	2,9 dB
100 m	4,4 dB	5,8 dB	5,4 dB
190 m	7,8 dB	10,8 dB	9,3 dB
≥ 200 m	8,1 dB	11,3 dB	9,7 dB

Des Weiteren wird in VDI 2714 (1988) angenommen, dass der wirksame Schallweg durch einen Vegetationsbestand eine Länge von 200 m im Allgemeinen nicht überschreitet. Hieraus ergibt sich (ohne Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Dämpfung) eine maximale Dämpfungswirkung von 10 dB durch den direkten Vegetationseffekt. Bei frequenzabhängiger Abschätzung wird für den Schienenlärm eine **maximale Dämpfung von 11,3 dB** berechnet.

Eine numerische Simulation des **direkten Effekts durch Vegetation** im Hinblick auf Streuung, Reflexion oder Absorption ist durchaus möglich, kann jedoch nur mit einem Wellenmodell durchgeführt werden. Solche Modelle stellen im Vergleich zu Schallstrahlenmodellen deutlich höhere Anforderungen an Rechenleistung und Rechenzeit und sind somit nicht für Parameterstudien geeignet. Des Weiteren können natürliche Waldbestände auch in solche Modelle nur parametrisiert eingehen (zum Beispiel ist für höhere Frequenzen Art, Anzahl oder Dichte der Belaubung bzw. einzelner Blätter von Bedeutung). Daher sind für belastbare Aussagen zur akustischen Dämpfungswirkung spezieller Waldflächen **Messungen unumgänglich**.

## 6.2 Vorbereitung eines Messkonzeptes

Das hier vorgestellte akustisch-meteorologische Messkonzept zur Überprüfung der verwendeten Modellkette (Messgeometrie, Messgrößen, zeitliches Messregime) hängt von der **speziellen Zielstellung der Messungen** ab. Daher wird ein modular aufgebautes Messkonzept vorgeschlagen, das mit verschiedenen Ausbaustufen (höchste Ausbaustufe = 1.) an die konkrete Zielstellung angepasst werden kann.

1. Zielstellung: vollständige Validierung der meteorologisch-akustischen Modellkette und Erfassung aller verschiedenen Teilbeiträge zur Gesamtdämpfung durch einen Vegetationsbestand

Für diese Zielstellung wird ein Messkonzept benötigt, das alle Effekte der Schallausbreitung messtechnisch erfasst, insbesondere **horizontal inhomogener Bodeneffekt** (Bestimmung der Bodenimpedanz), **horizontal und vertikal inhomogener Brechungseffekt** (einschließlich Bestimmung der Temperatur- und Windprofile), **direkte Vegetationswirkung** (Bestimmung von Reflexion, Streuung, Absorption der Vegetationselemente).

Diese Effekte treten bei Messungen in gekoppelter Form auf und können nur schwer voneinander getrennt werden. Eine Möglichkeit, den meteorologischen Einfluss auf die Schallimmission abzuschätzen, besteht in einer zeitlich aufgelösten Dauermessung (Einzelmessungen im Bereich weniger Minuten oder häufiger) über einige Tage bei autochthoner Wetterlage (Hochdruckwetterlage mit Tagesgang der meteorologischen Größen,

ohne Niederschlag) mit definierter Schallquelle, die reproduzierbar Signale definiert (z. B. zeitliche Abfolge) aussendet. Diese Bedingungen gewährleisten, dass sich die Boden- und Vegetationsverhältnisse nur geringfügig ändern. Bei einer konstanten Schallquelle (Quellstärke, Abstrahlcharakteristik) sind Änderungen des Schallpegels dann als Messsignal für meteorologische Einflüsse zu interpretieren. Zur Bewertung der Schallmessungen sind gleichzeitig zeitlich hoch aufgelöste Messungen von Wind- und Temperaturprofilen durchzuführen. Bei typischen Schallausbreitungsstrecken von 500 m Entfernung sollten die Profile bis mindestens 50 m Höhe erfasst werden. Weil sich diese Profile bei horizontal inhomogener Unterlage (Wechsel zwischen Grasfläche und Vegetationsstreifen) unterscheiden, sind gleichzeitige Profilmessungen an verschiedenen Orten (im Luv, im Wald, im Lee nahe und in weiterer Entfernung zur Waldkante durchzuführen). Um die jahreszeitlich variable Charakteristik der Profile und weitere unterschiedliche Randbedingungen (z. B. Bodenfeuchte) zu erfassen, sind die Messungen für unterschiedliche Jahreszeiten und Wetterlagen zu wiederholen.

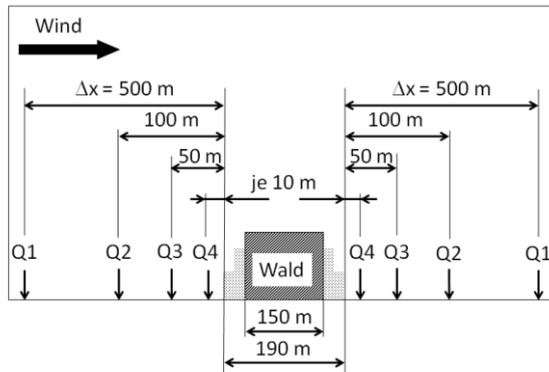
Für geringere Frequenzen dominiert der Bodeneffekt auf die Schalldämpfung (PRICE et al. 1988). Der akustisch weiche Waldboden mit Nadel- bzw. Blattauflage und einem geringeren akustischen Strömungswiderstand (z. B. ATTENBOROUGH 1992) führt zu einer vergleichsweise höheren Schalldämpfung. Untersuchungen von RASPET & SABATIER (1996) weisen darauf hin, dass es auch einen meteorologischen Einfluss auf die Bodenimpedanz geben kann, der insbesondere für Waldböden von Bedeutung ist.

Die Messung der Bodenimpedanz für Untersuchungen der Schallausbreitung im Freien wird häufig mit der Zwei-Mikrofon-Methode durchgeführt (ALLARD et al. 1989; ANSI/ASA S1.18-2010), wobei die Transferfunktion zwischen den beiden Mikrofonen gemessen wird. Diese Methode eignet sich für das gesamte Schallspektrum. KRUSE & MELLERT (2008) haben eine ausführliche Fehlerbetrachtung zu Impedanzmessungen durchgeführt und eine Optimierung standardisierter Messvorschriften abgeleitet. Weil sich die akustischen Bodeneigenschaften zwischen Waldgebieten und einer Graslandschaft unterscheiden und sich innerhalb des Waldstreifens auch horizontal ändern, sind Messungen der Bodenimpedanz an mehreren Positionen im Waldstreifen (Randbereich, innerer Bereich) durchzuführen.

Alle Messungen sind für verschiedene Schallfrequenzen im interessanten Spektralbereich (63 Hz bis max. 8 kHz) auszuführen, weil die untersuchten Effekte frequenzabhängig sind. Für die Analysen sollten die frequenzabhängigen Dämpfungseffekte mindestens für Terzpegel bestimmt werden (TRIMPOP 2013b). Optimal ist die Aufzeichnung der Schallsignale als Schalldruckschwankungen (Zeitsignale), um nachfolgende spektrale Auswertungen und die Berechnung verschiedener Schallpegelmaße zu ermöglichen. Die Effekte der geometrischen Ausbreitungsdämpfung und Luftabsorption können bei bekannter Ausbreitungsgeometrie, Schallfrequenz, Lufttemperatur und Luftfeuchte entlang der Schallausbreitungspfade berechnet werden.

Als Schallquellen können für niedrige Frequenzen Propangaskanonen (TRIMPOP 2013a) verwendet werden. Für höhere Frequenzen (500 Hz bis 10 kHz) kommen Hornlautsprecher in Frage, bei denen jedoch die Richtwirkung explizit zu berücksichtigen ist, insbesondere bei der Abschätzung der geometrischen Ausbreitungsdämpfung (TRIMPOP 2013b).

Für die Validierung der simulierten Modellwerte ist das Messkonzept an die Modellgeometrie anzupassen (siehe Abbildung 25). Dabei sind je vier Schallquellen in Mit- bzw. in Gegenwindrichtung bodennah aufzubauen. Jeweils sieben Messmikrofone sind ebenfalls entlang dieser Messkette auf beiden Seiten des Waldstreifens in 4 m Höhe zu platzieren (in 10 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m Entfernung zur Waldkante). Alle Messmikrofone sind an eine Aufzeichnungseinheit anzuschließen, um eine einheitliche Zeitbasis zu gewährleisten. Des Weiteren sind Messungen für verschiedene Wälder vorzusehen, um Aussagen zu den typischen Eigenschaften unterschiedlicher Vegetationsstreifen (Bestandsarten und -tiefe) abzuschätzen.



**Abbildung 25: Schematische Darstellung des Modell- und Messkonzeptes mit Schallquellen in Mit- und Gegenwindrichtung zu einem Waldstreifen mit einer Ausdehnung von 150 m (mit Randbewuchs insgesamt 190 m).**

Im Vergleich zu Messungen über einer homogenen und weit ausgedehnten Grasfläche weisen die Messungen mit einem Waldstreifen einen deutlich höheren Aufwand an Geräten, Personal und Zeit auf. Über einer Grasfläche würden ein Profilmast für meteorologische Messungen sowie ein Messplatz zur Bestimmung der Bodenimpedanz genügen. Die Anzahl der benötigten Schallquellen und Messmikrofon könnte ebenfalls auf ca. die Hälfte verringert werden.

Der technische und logistische Aufwand für das oben skizzierte Messkonzept verringert sich, wenn die Zielstellung der Messungen entsprechend der Ausbaustufen 2 und 3 verändert wird:

2. Zielstellung: Validierung wichtiger Ergebnisse der meteorologisch-akustischen Modellkette und Erfassung wichtiger Teilbeiträge zur Gesamtdämpfung durch einen Vegetationsbestand

3. Zielstellung: Validierung wichtiger Ergebnisse der meteorologisch-akustischen Modellkette und Erfassung der Gesamtdämpfung durch einen Vegetationsbestand

Bei Ausbaustufe 3 kann die Zahl der notwendigen Schallquellen und Empfänger verringert werden. So könnte z. B. eine einzelne Schallquelle in 50 m Entfernung von der Waldkante aufgestellt werden, was einem typischen Abstand bei Verkehrslärm und einem speziellen Simulationsszenario entspricht. Dabei ist jedoch die Erfassung meteorologischer Daten vor Ort notwendig, um immissionsschutzrelevante Messungen bei schallausbreitungsgünstigen Bedingungen zu garantieren. Die Bestimmung dieser Bedingungen richtet sich nach dem vertikale Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit. Dieser ist von den Vertikalprofilen von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung abhängig. Entsprechende Messungen der meteorologischen Größen in einer für die Schallausbreitung relevanten Höhenschicht (in Abhängigkeit von Sender- und Empfängerhöhe) sind zur Bestimmung der „Schallwetterlage“ erforderlich. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich die meteorologischen Ausbreitungsbedingungen im Luv und Lee eines Waldbestandes unterscheiden. Die Anzahl der notwendigen Messmikrofone kann ebenfalls gegenüber Ausbaustufe 1 auf die Hälfte verringert werden, wenn nur Messungen in der schallausbreitungsbegünstigten Richtung durchgeführt werden.

# 7 Zusammenfassung

Hauptziel der vorliegenden Studie war die Untersuchung des Einflusses von durch Vegetationsstreifen veränderten meteorologischen Bedingungen auf die Dämpfung akustischer Signale in der Atmosphäre. Um horizontal inhomogene Vertikalprofile der für die Schallbrechung in der Atmosphäre relevanten Parameter Temperatur und Windrichtung/Windgeschwindigkeit zu bestimmen, wurden Waldstreifen verschiedener Bestandsarten und -dichten in ein meteorologisches Grenzschichtmodell eingebracht. Anschließend wurden Schalldämpfungen für die simulierten meteorologischen Bedingungen mit einem Schallstrahlenmodell bestimmt. Es wurden Rechnungen für eine Schallausbreitung in Windrichtung und in Gegenwindrichtung, für unterschiedliche Tageszeiten (stündliche Auflösung), unterschiedliche Tage im Jahr (Repräsentation der Jahreszeiten) und definierte Abstände der Schallquelle vom Waldstreifen (10 m, 50 m, 100 m, 500 m) durchgeführt. Im Ergebnis wurden meteorologische Zusatzdämpfungen in unterschiedlichen Entfernungen zum Waldrand abgeleitet.

Die Mittelwerte der meteorologischen Zusatzdämpfung sind für alle untersuchten Szenarien und Fälle positiv d. h., der **Schallbrechungseffekt übt im Mittel einen schalldämpfenden Einfluss** aus. In den **Nachtstunden** ist die meteorologische Zusatzdämpfung in Mitwindrichtung für größere Entfernungen von der Waldkante für den **lockeren Nadelwaldbestand** etwas größer als über einer Wiesenfläche. Der geringe Dämpfungsunterschied zwischen Waldstreifen und Wiesenfläche nimmt bei der untersuchten Schallausbreitungsgeometrie mit zunehmender Quellhöhe zu. Dieses Verhalten führt für größere Entfernungen zu signifikant größeren Dämpfungen für Waldstreifen gegenüber einer Wiesenfläche. Mit den hier dargelegten Untersuchungen einer bodennahen Quelle beschreibt man einen Mindeststandard für die meteorologische Walddämpfung gegenüber einer Wiesenfläche und ist damit auf der „sicheren Seite“ bei Abschätzungen bzgl. des Lärmschutzes.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit einem lockeren **Nadelwaldbestand (einschließlich Unterwuchs)**, der in der Nähe der Schallquelle angepflanzt wird, eine **maximale meteorologische Zusatzdämpfung** und **Kanalierungswirkung** erzielt werden kann. Diese Wirkung führt zu einer Effektivierung des direkten Vegetationseinflusses auf die Gesamtschalldämpfung.

In Tabelle 12 sind die Untersuchungsergebnisse für verschiedene Lärmquellen und Dämpfungsarten zusammengestellt. Entsprechend der Vorgehensweise der DIN ISO 9613-2 (1999) können die verschiedenen Dämpfungsarten für eine bestimmte Schallweglänge additiv zusammengefasst werden, um eine Gesamtdämpfung in einer bestimmten Entfernung von der Lärmquelle zu bestimmen. Zu beachten ist, dass sich die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung und der Meteorologieeffekt auf eine Referenzentfernung von 1 m von der Schallquelle bezieht (siehe Abschnitte 5.2 und 5.4). Die Dämpfung durch Luftabsorption ist u. a. frequenzabhängig und hängt damit von den verwendeten Verkehrslärmspektren ab (siehe Abschnitt 5.3).

Im Vergleich zu den Angaben der VDI 2714 (1988) ist die meteorologische Zusatzdämpfung bei einer Schallausbreitung in Windrichtung unter Einfluss eines lockeren Nadelwaldstreifens im Mittel um ca. 9–12 dB stärker (s. Tabelle 13). Zu diesem indirekten Vegetationseinfluss tritt die direkte Wirkung der Vegetationselemente. Entsprechend der Ergebnisse der Literaturrecherche ergeben sich hier für einen 190 m breiten Waldstreifen (mit Randbewuchs) im Mittel Dämpfungswerte, die um ca. 16–19 dB höher sind als in der Richtlinie. Es ist zu beachten, dass die Berechnungsvorschriften für die direkte Vegetationsdämpfung nach VDI 2714 (1988) mit den Angaben in der DIN ISO 9613-2 (1999) übereinstimmen.

**Tabelle 12: Schallpegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) und verschiedene Dämpfungsterme. Meteorologieeffekt: Angabe der Jahresmittelwerte für 00-24 Uhr bzw. 22-06 Uhr in Klammern**

Dämpfung durch		Schallweglänge	Straßenverkehrslärm (relativ zum Pegel in 30 m Entfernung von der Quelle)	Schienenlärm (relativ zum Referenzpegel)	Fluglärm (relativ zum Schalleistungspegel eines am Boden rollenden Flugzeugs)
<b>Geometrische Ausbreitung</b>		250 m		48,0 dB	
		500 m		54,0 dB	
<b>Luftabsorption</b>		250 m	0,8 dB	1,2 dB	2,1 dB
		500 m	1,3 dB	2,3 dB	2,7 dB
<b>Meteorologieeffekt</b> für Sender-Empfänger-Abstände von 250...740 m (davon 190 m Waldstreifen) <sup>3</sup>					
Dichter Laubwald		Mitwind: 12,1...18,3 dB ( 9,8...19,8 dB); Gegenwind: 10,8...18,8 dB ( 6,5...15,7 dB)			
Lockerer Laubwald		Mitwind: 14,1...17,1 dB (12,6...17,9 dB); Gegenwind: 11,9...18,8 dB ( 6,9...12,8 dB)			
Dichter Nadelwald		Mitwind: 14,4...17,6 dB (13,5...18,1 dB); Gegenwind: 10,0...24,0 dB ( 7,9...22,9 dB)			
Lockerer Nadelwald		Mitwind: 14,1...17,1 dB (14,7...19,5 dB); Gegenwind: 14,1...23,9 dB (11,7...19,9 dB)			
<b>direkter Vegetationseffekt</b> (Streuung, Absorption, Boden); mittlerer Absorptionskoeffizient $\alpha$ nach Bernhofer et al., 2012					
		26,6 dB ( $\alpha = 14$ dB/100 m: Mittelwert Literaturrecherche)			
		190 m	19,0 dB ( $\alpha = 10$ dB/100 m: Straßenverkehrslärm) 34,2 dB ( $\alpha = 18$ dB/100 m: Schienenlärm)		

**Tabelle 13: Pegeldämpfung für unterschiedliche Lärmquellen (vgl. Abschnitt 5.1) nach VDI 2714 (1988).**

Dämpfungsursache nach VDI 2714 (1988)	Schallweglänge (bzgl. Referenz)	Straßenverkehrslärm (relativ zum Pegel in 30 m Entfernung von der Quelle)	Schienenlärm (relativ zum Referenzpegel)	Fluglärm (Schalleis- tungspegel eines am Boden rollenden Flug- zeugs)
Boden- und Meteorologie- dämpfungsmaß	250 m		4,5 dB	
	500 m		4,7 dB	
Bewuchsdämpfungsmaß	190 m	7,8 dB	10,8 dB	9,3 dB

Eine Überprüfung der Simulationsergebnisse sollte mit einem entsprechend angepassten Messkonzept erfolgen. Das hier vorgestellte akustisch-meteorologische Messkonzept ist modular aufgebaut und kann an die spezielle Zielstellung der Messungen angepasst werden. Die Messungen dienen neben der Modellvalidierung auch der messtechnischen Feststellung der zeitlich variablen Vegetationsdämpfung, für die bisher nur wenige reproduzierbare und verallgemeinerbare Daten vorliegen.

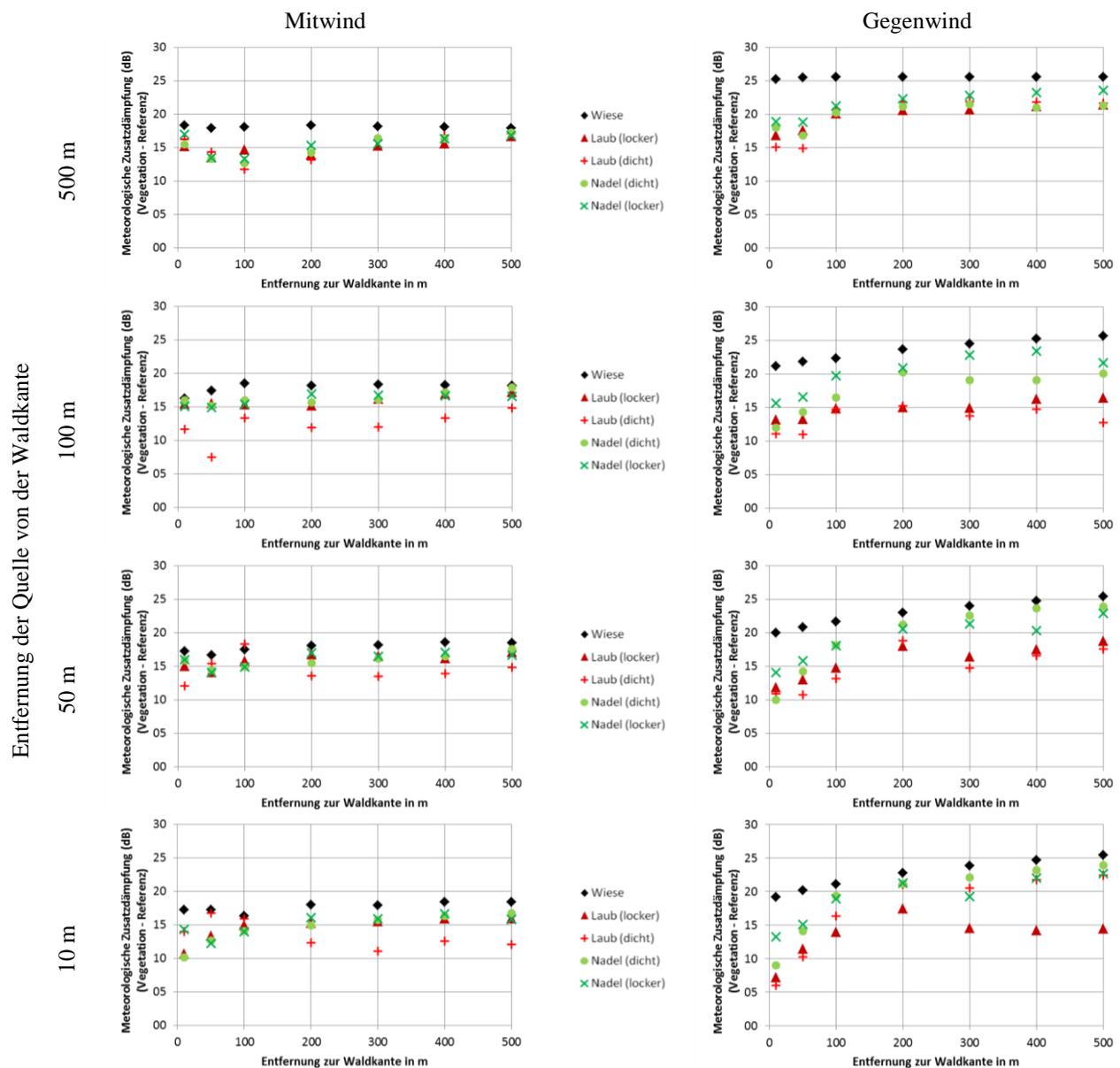
<sup>3</sup> Die angegebenen Dämpfungsintervalle entsprechen den kleinsten und größten Mittelwerten der meteorologischen Zusatzdämpfung in einer Entfernung von 10 ... 500 m hinter einem Waldstreifen, der insgesamt (mit Randbewuchs) 190 m breit ist, und eine Quelle, die sich 50 m vor dem Waldstreifen befindetet. Die Mittelwerte wurden aus Simulationen für 4 Tage im Jahr mit jeweils stündlicher Auflösung (insgesamt 96 Einzelwerte) in Wind- und Gegenwindrichtung berechnet. In Klammern sind die entsprechenden kleinsten und größten Mittelwerte für die Nachtstunden, 22-06 Uhr, (berechnet aus 32 Einzelwerten) angegeben.

# Anhang

## Meteorologische Zusatzdämpfung: Jahresmittelwerte

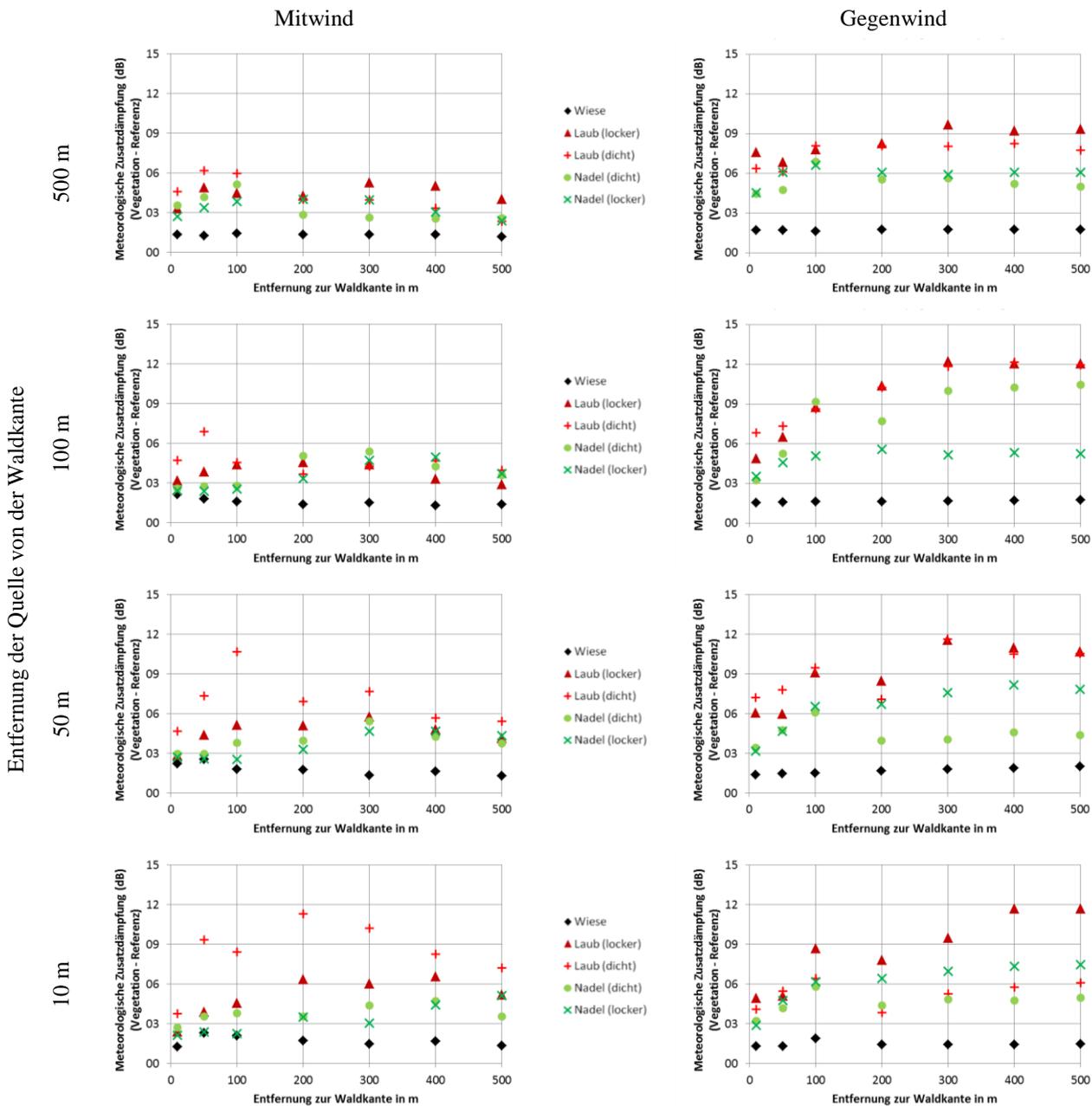
### Tagesmittel (00-24 Uhr)

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



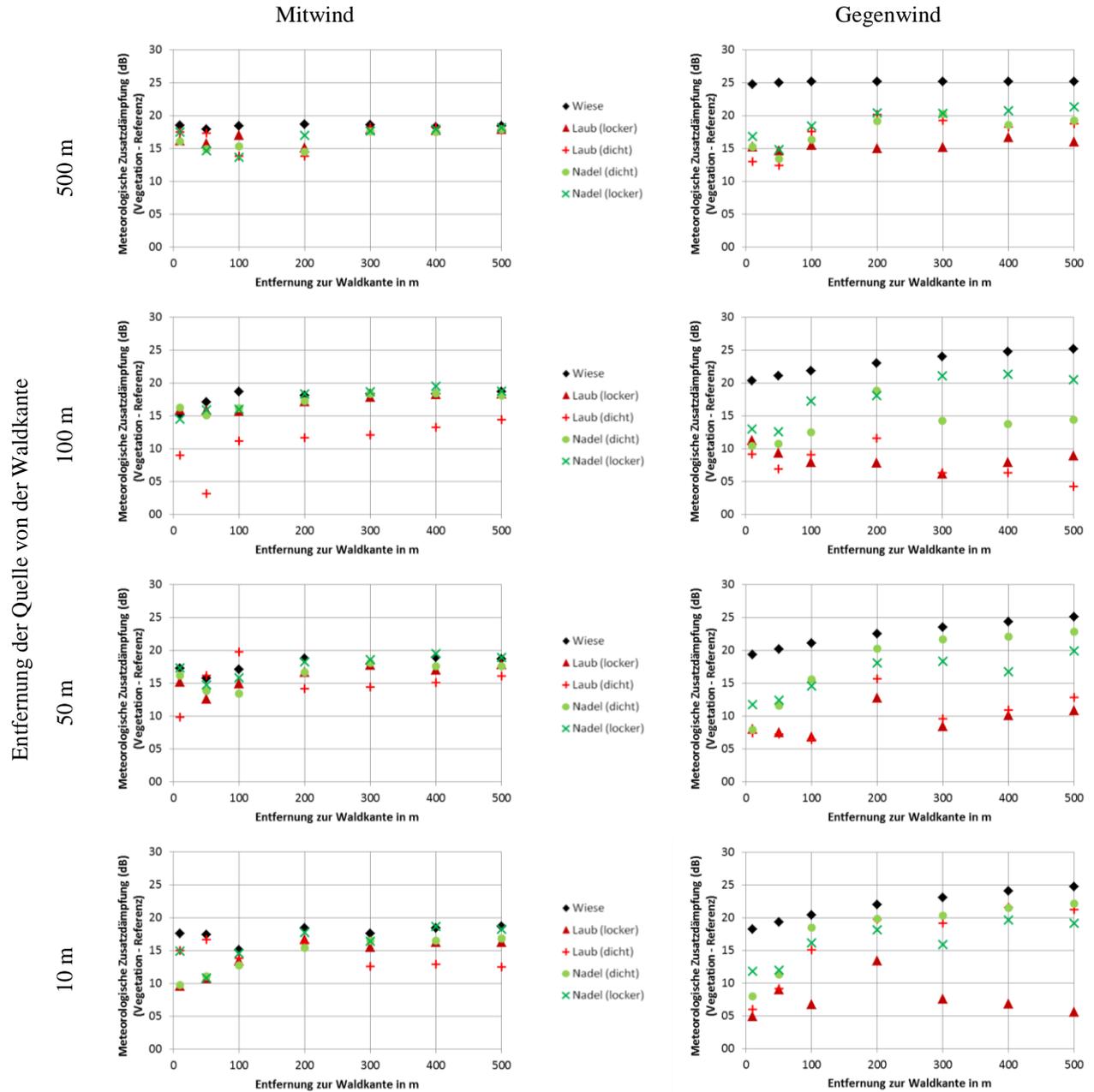
## Standardabweichung zu Tagesmittelwerten (00-24 Uhr)

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



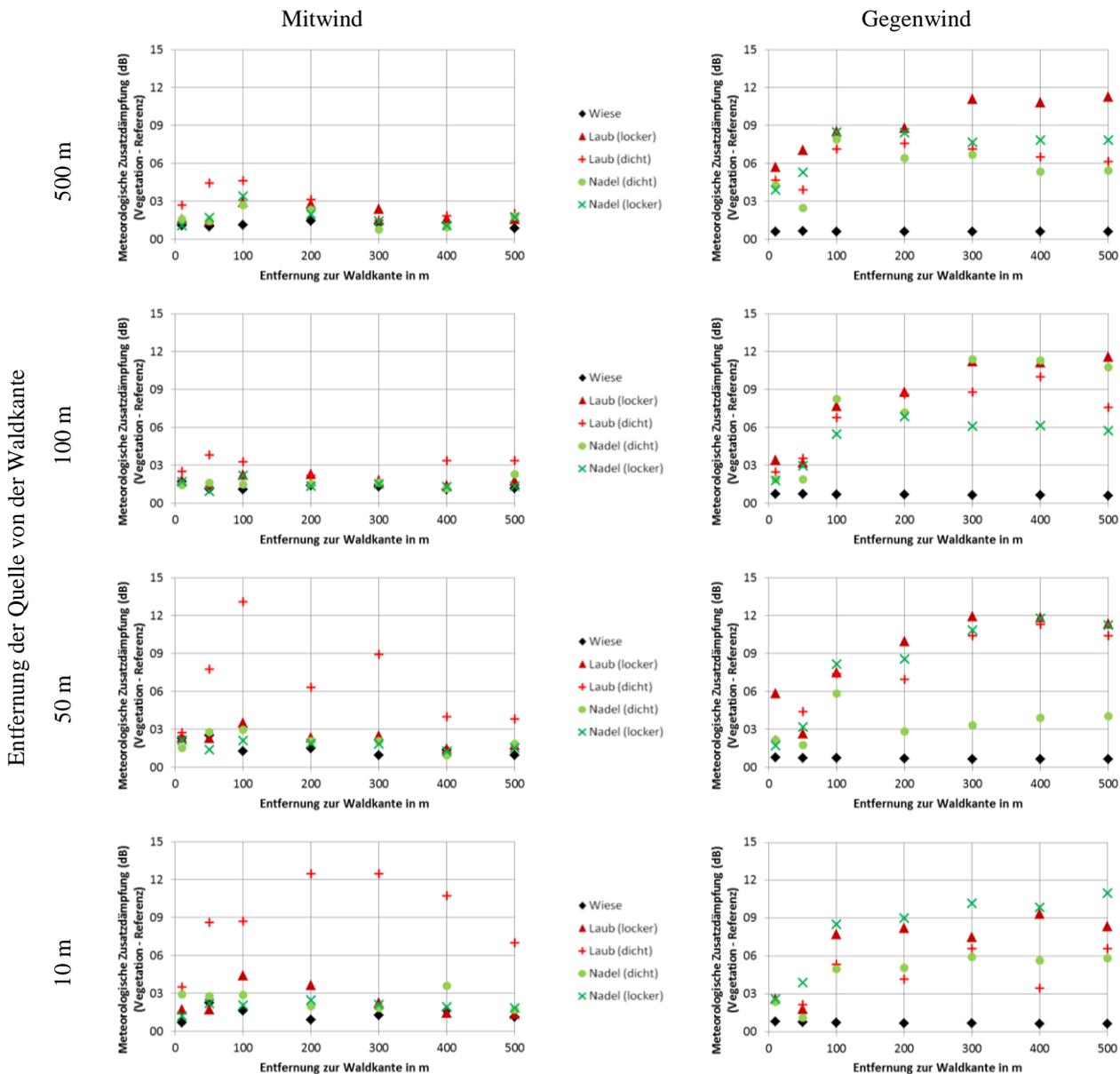
## Nachtmittel (22-06 Uhr)

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



### Standardabweichung zu Nachtmittelwerten (22-06 Uhr)

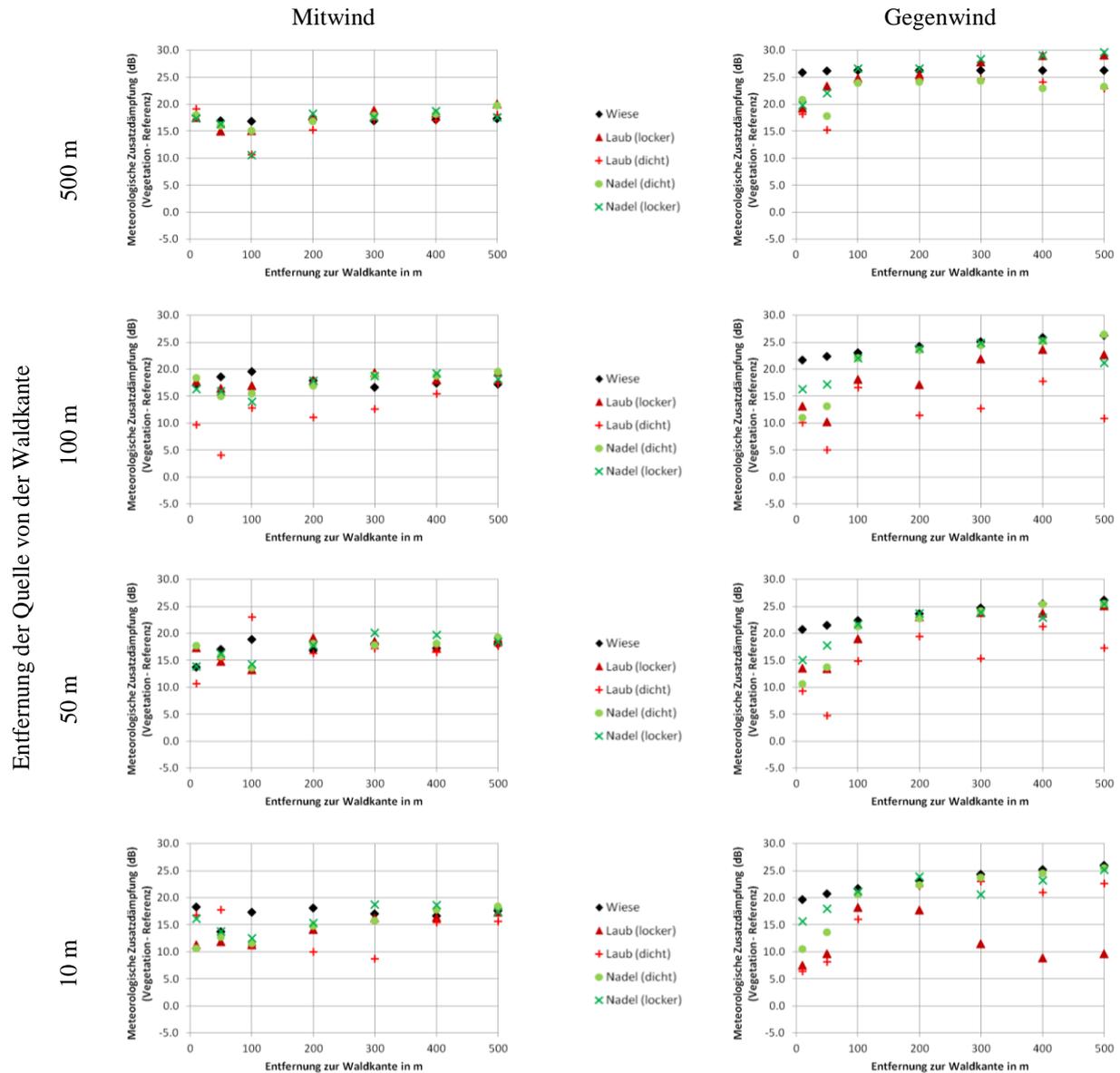
- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



# Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.01.

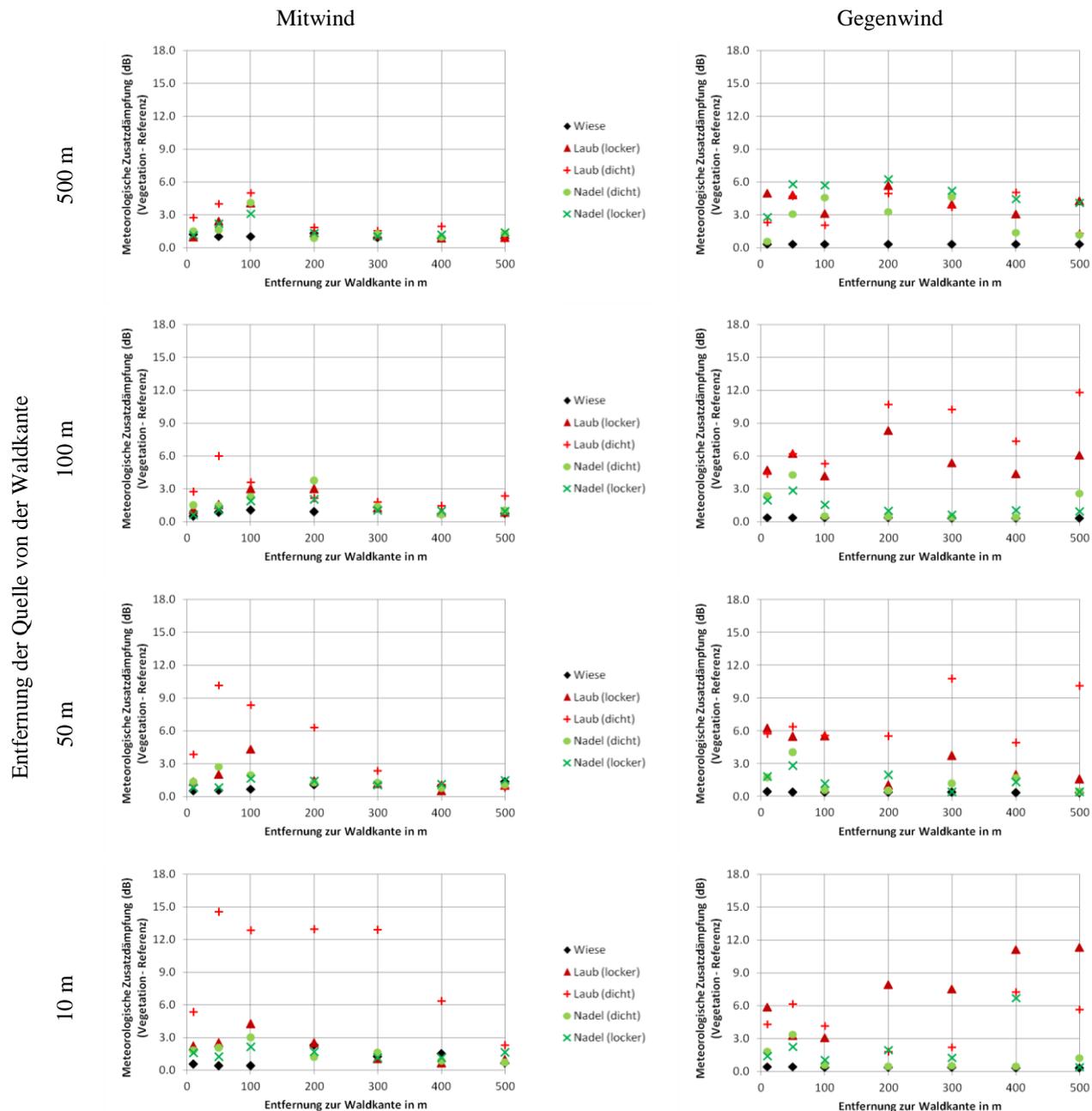
## Tagesmittelwerte (00-24 Uhr) am 15.01.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



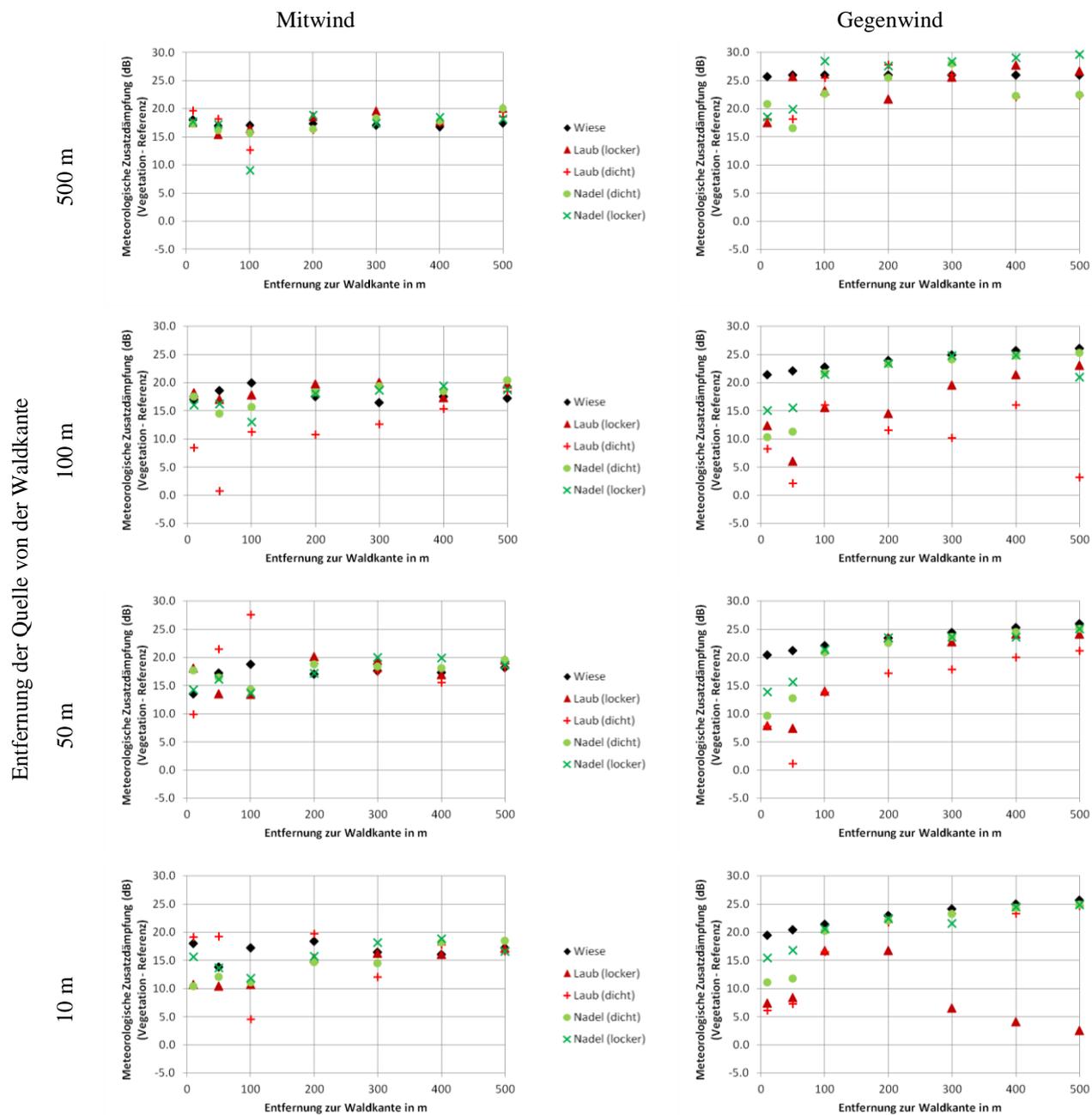
**Standardabweichung zu Tagemittelwerten (00-24 Uhr) am 15.01.**

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



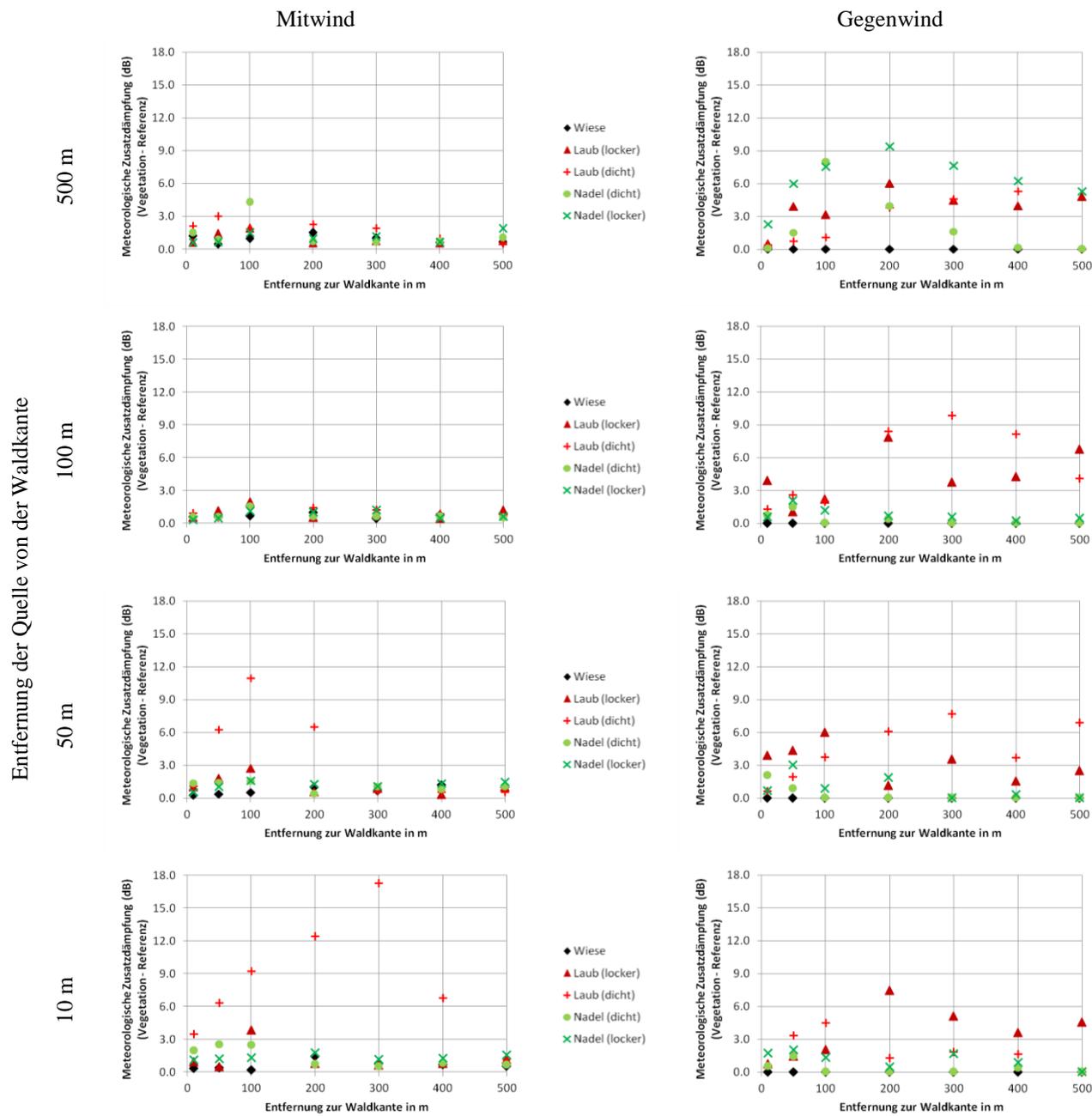
Mittelwerte nachts (22-06 Uhr) am 15.01.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung ± 5 m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



**Standardabweichungen zu Nachtmittelwerten (22-06 Uhr) am 15.01.**

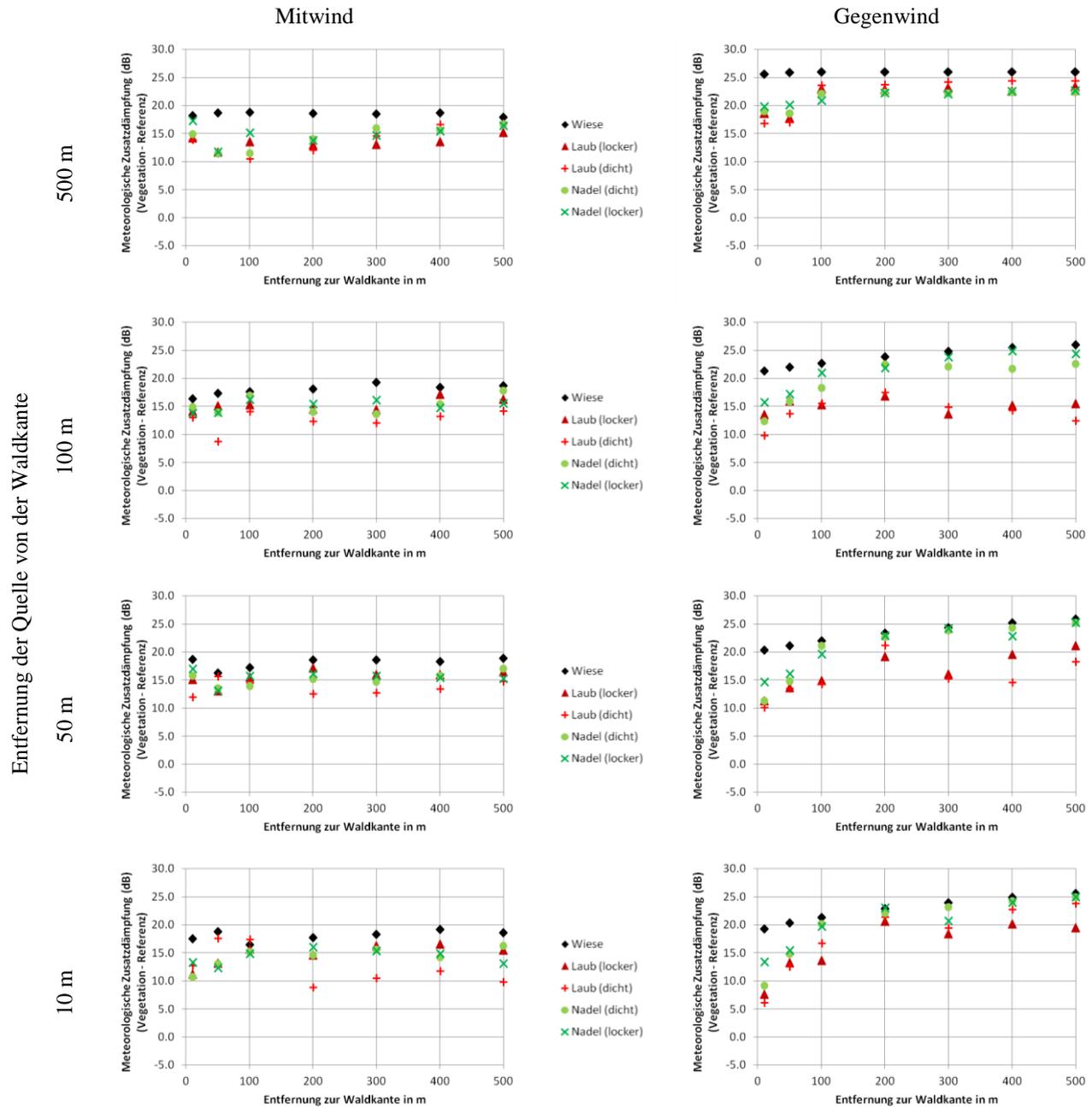
- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



# Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.04.

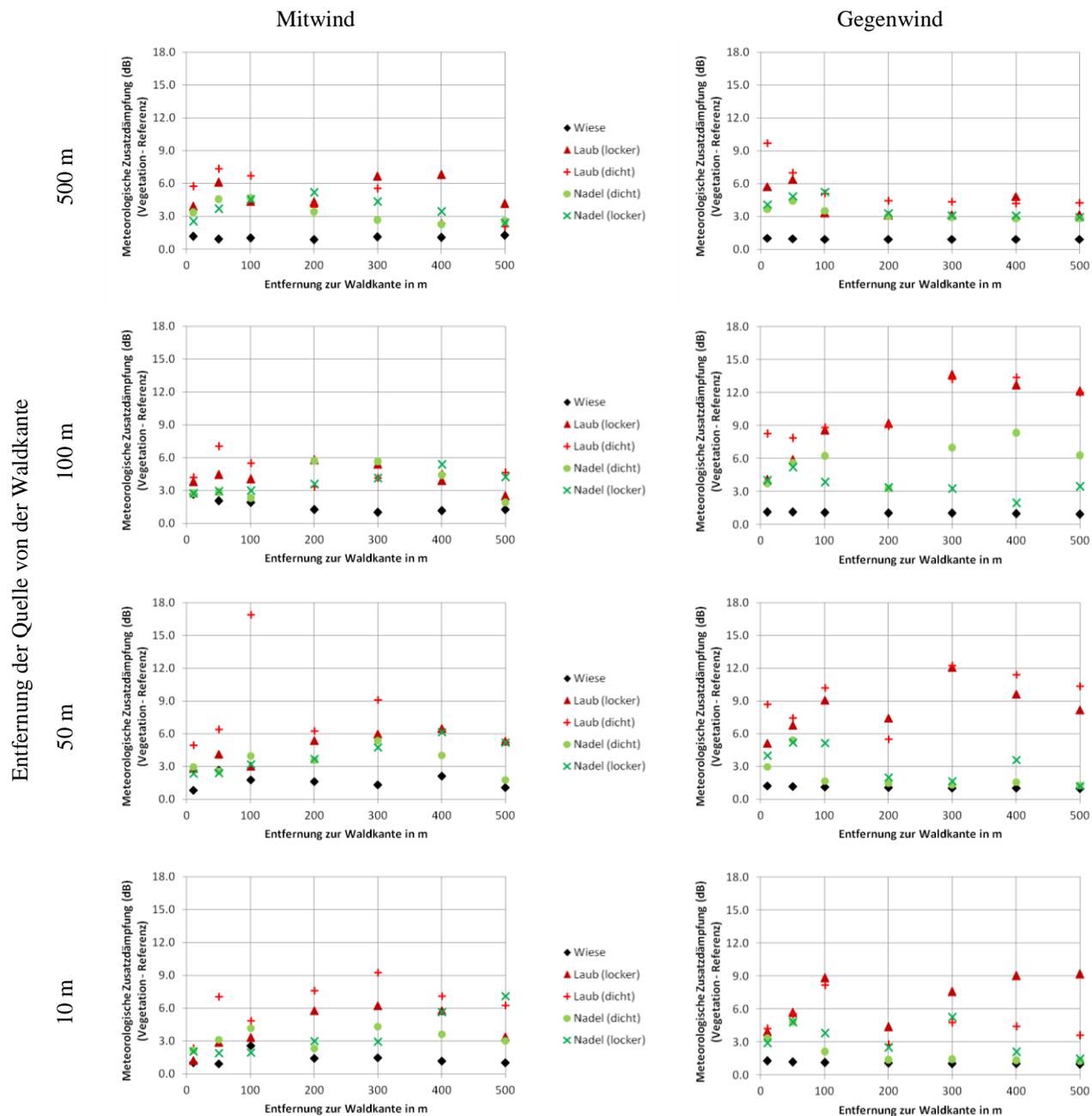
## Tagesmittelwerte (00-24 Uhr) am 15.04.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



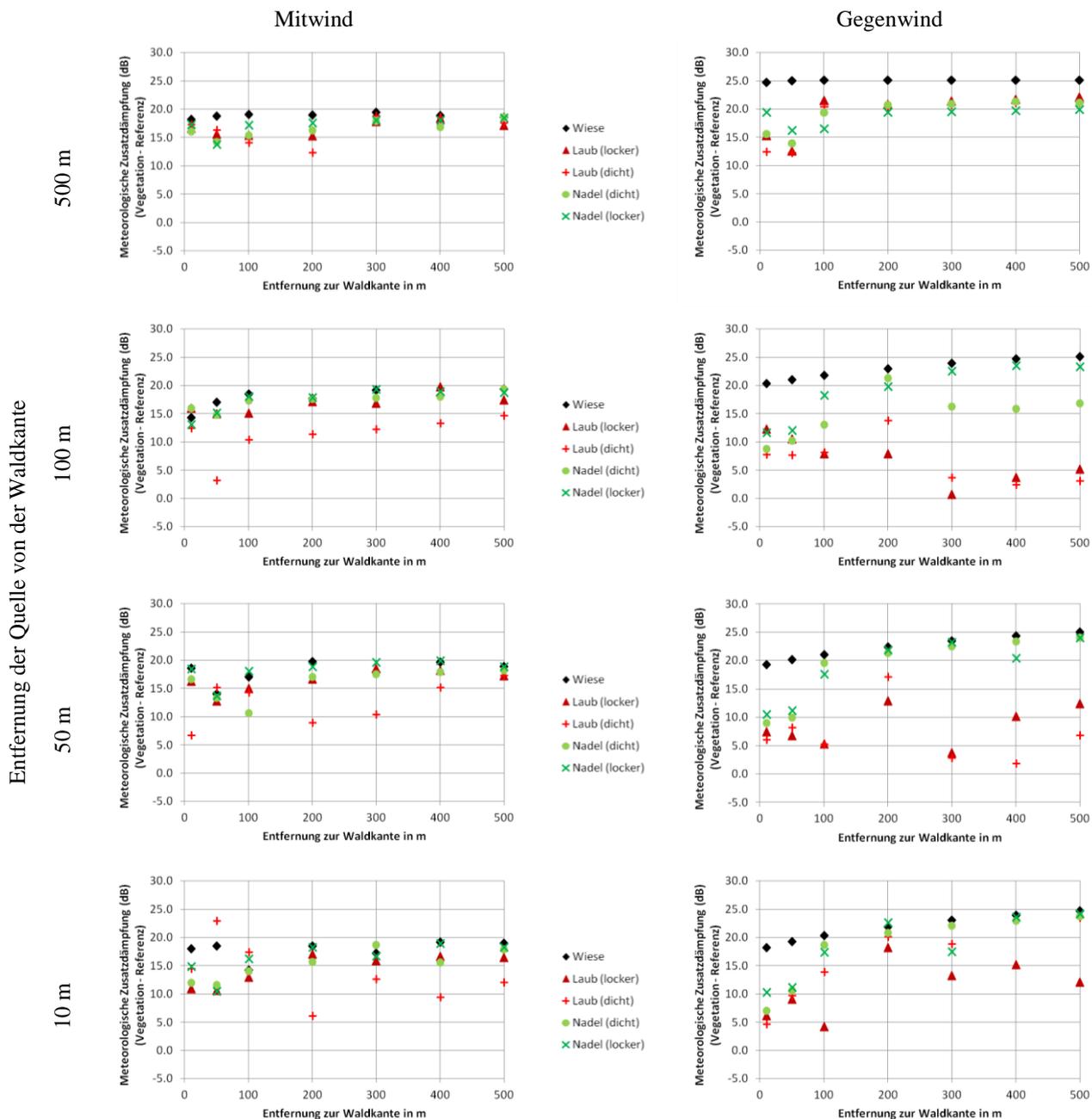
**Standardabweichung zu Tagemittelwerten (00-24 Uhr) am 15.04.**

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung ± 5 m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



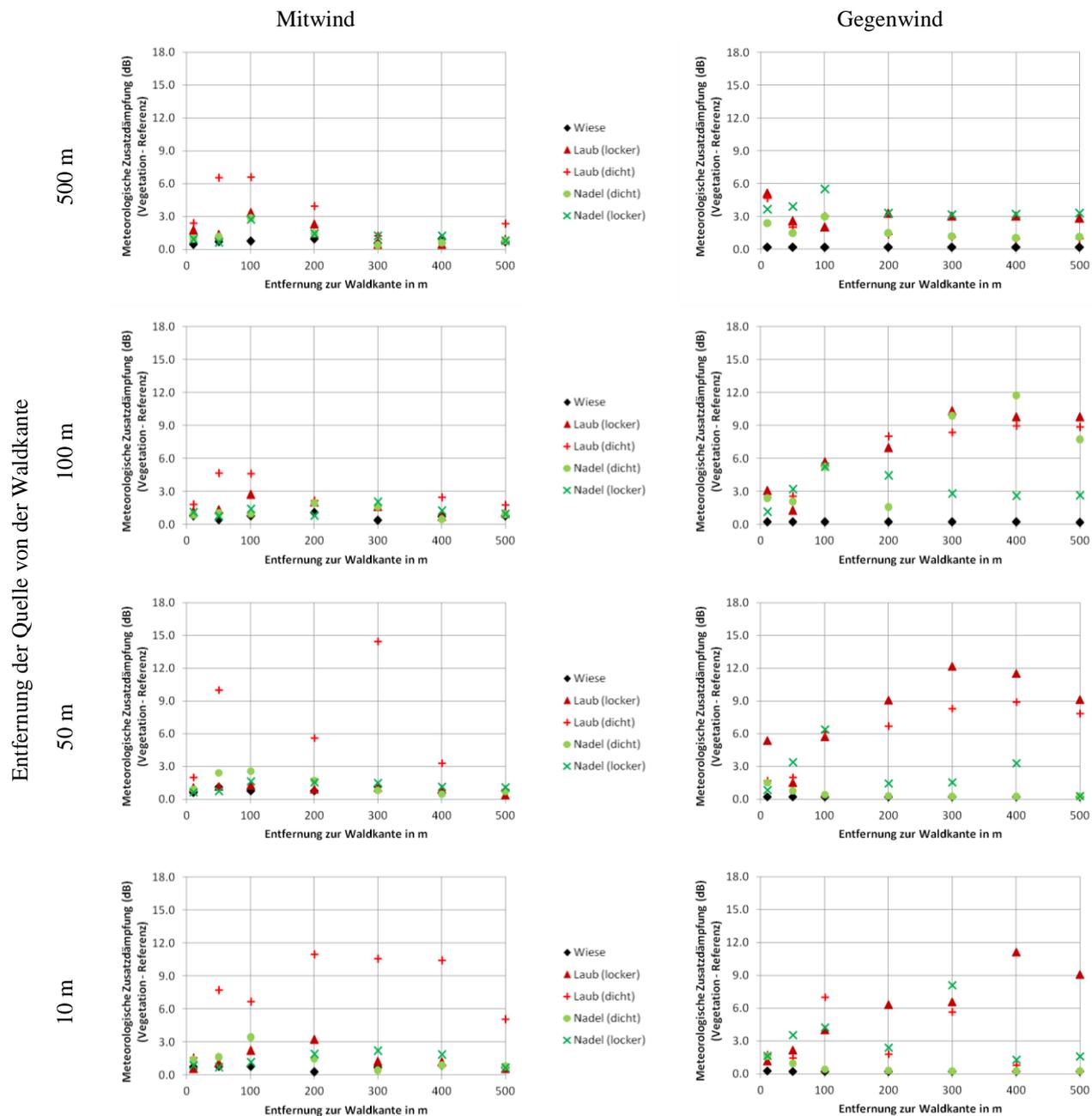
Mittelwerte nachts (22-06 Uhr) am 15.04.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung ± 5 m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



Standardabweichungen zu Nachtmittelwerten (22-06 Uhr) am 15.04.

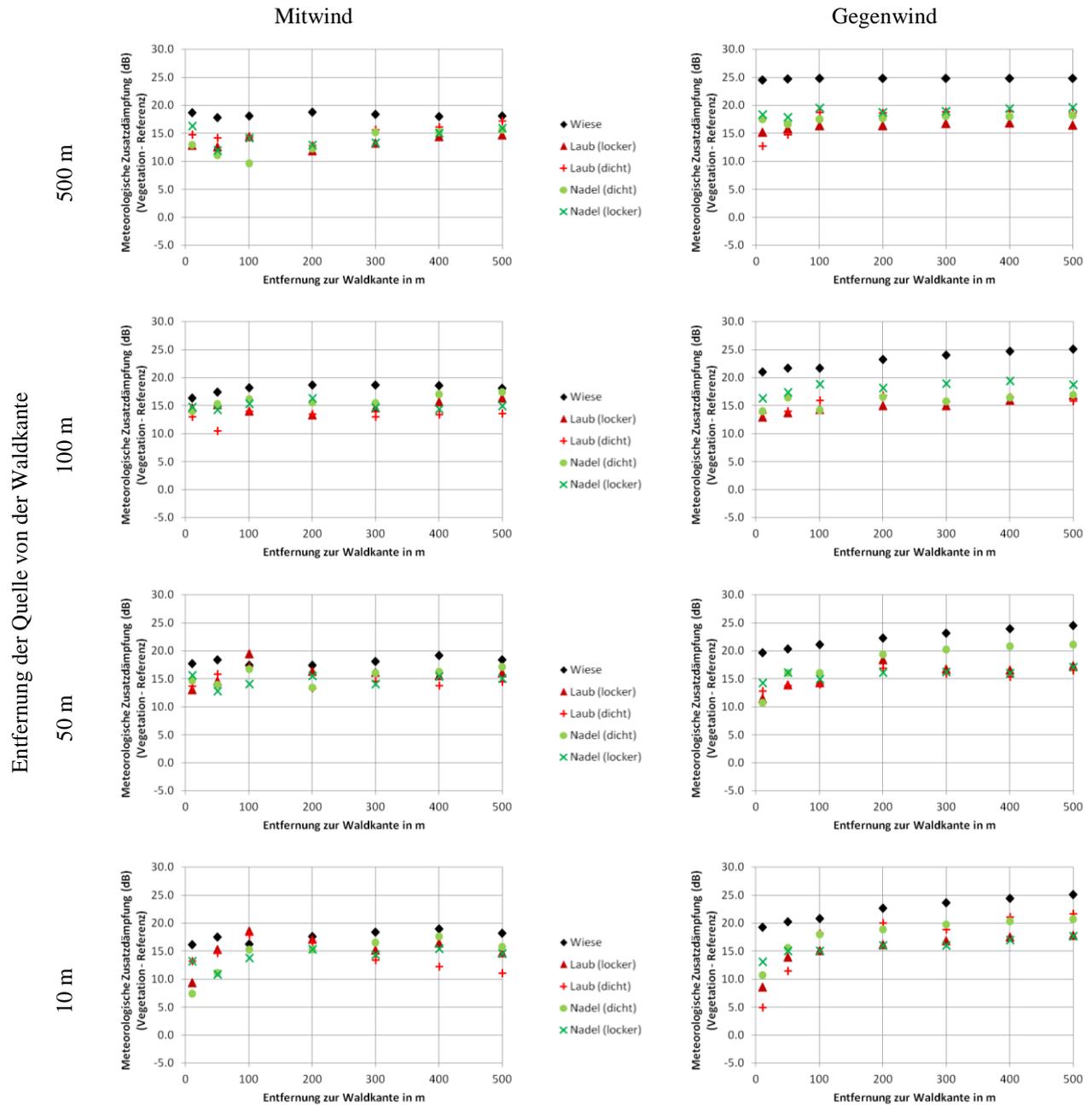
- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



# Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.07.

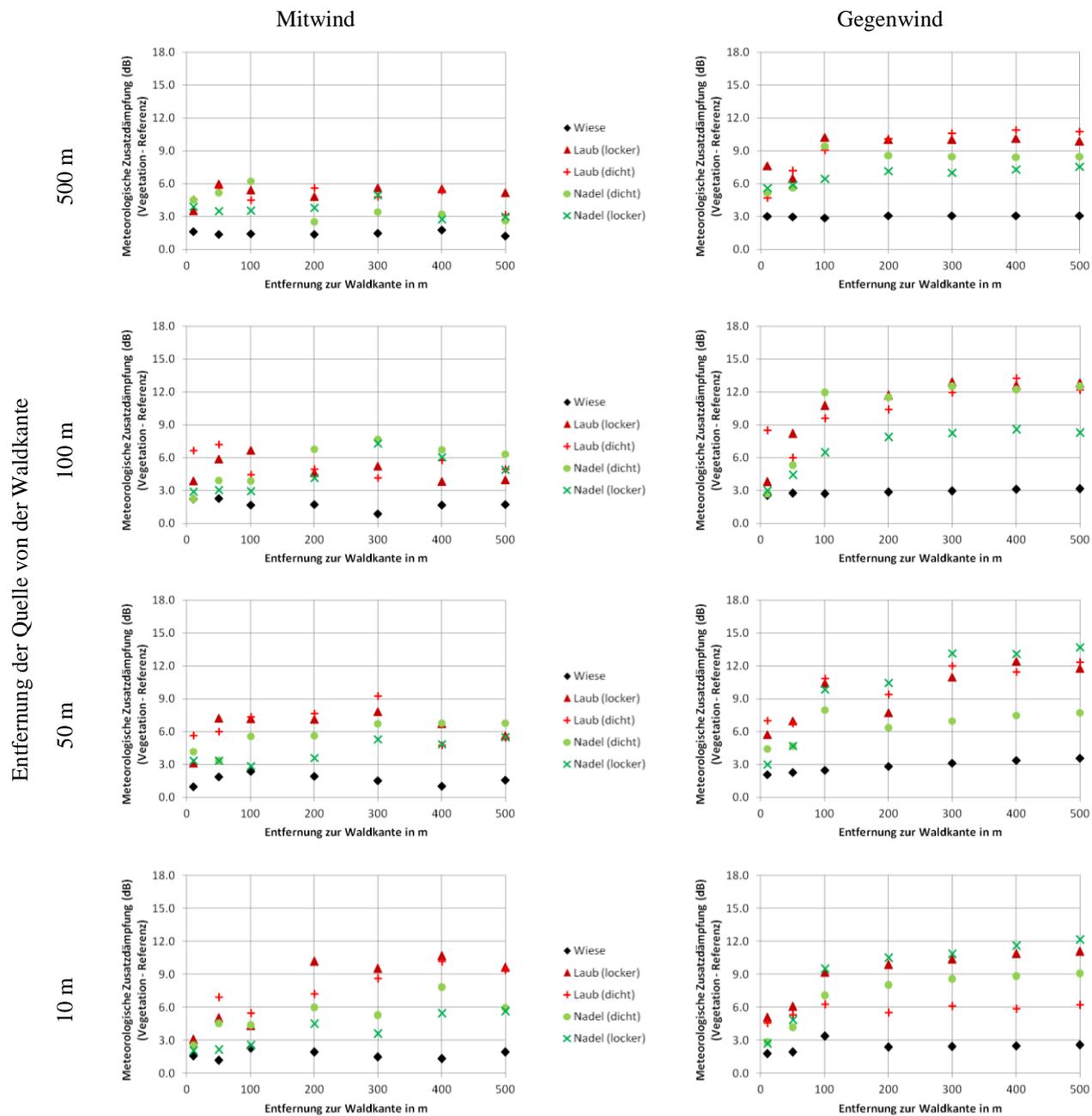
## Tagesmittelwerte (00-24 Uhr) am 15.07.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



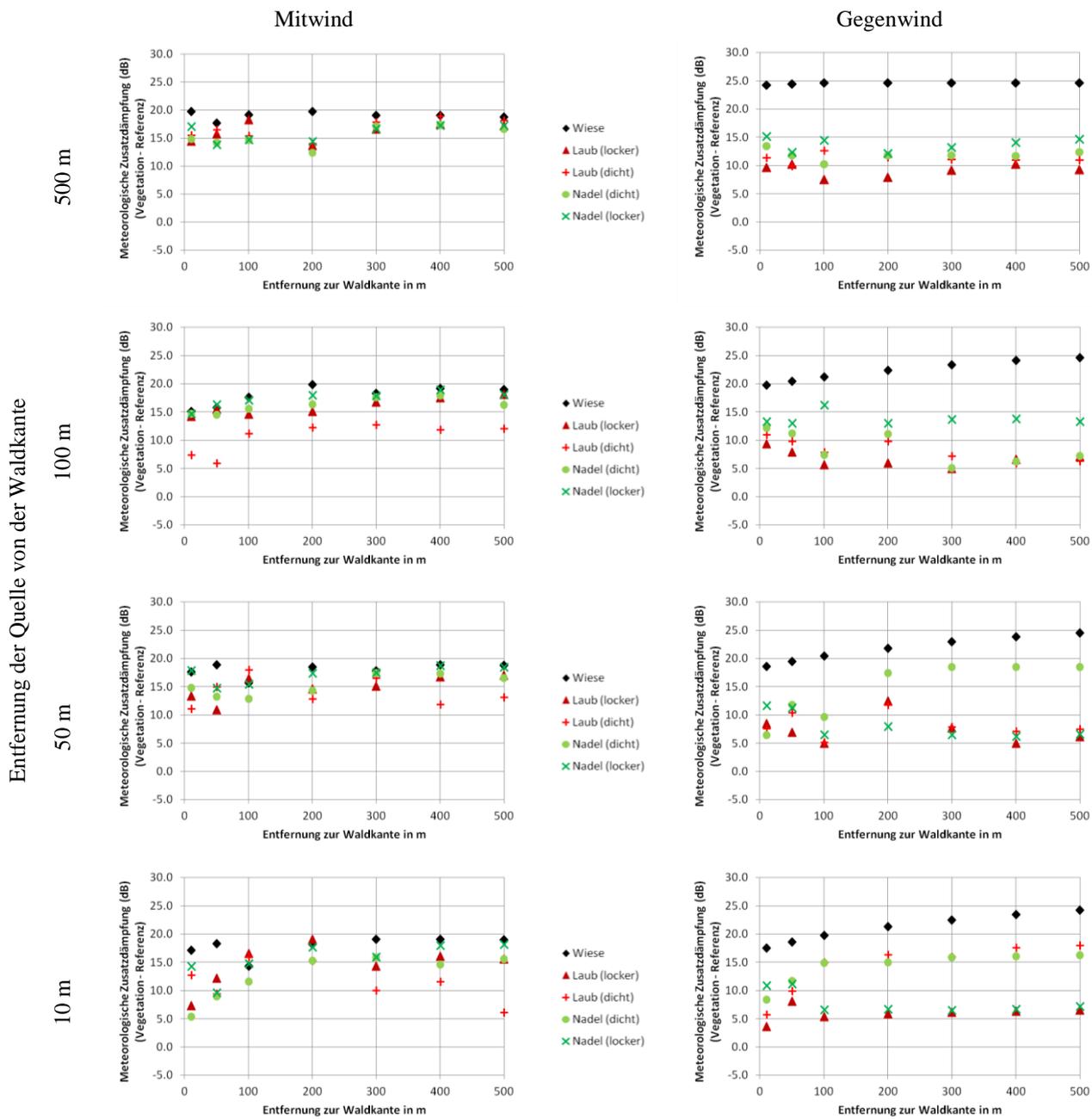
**Standardabweichung zu Tagemittelwerten (00-24 Uhr) am 15.07.**

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



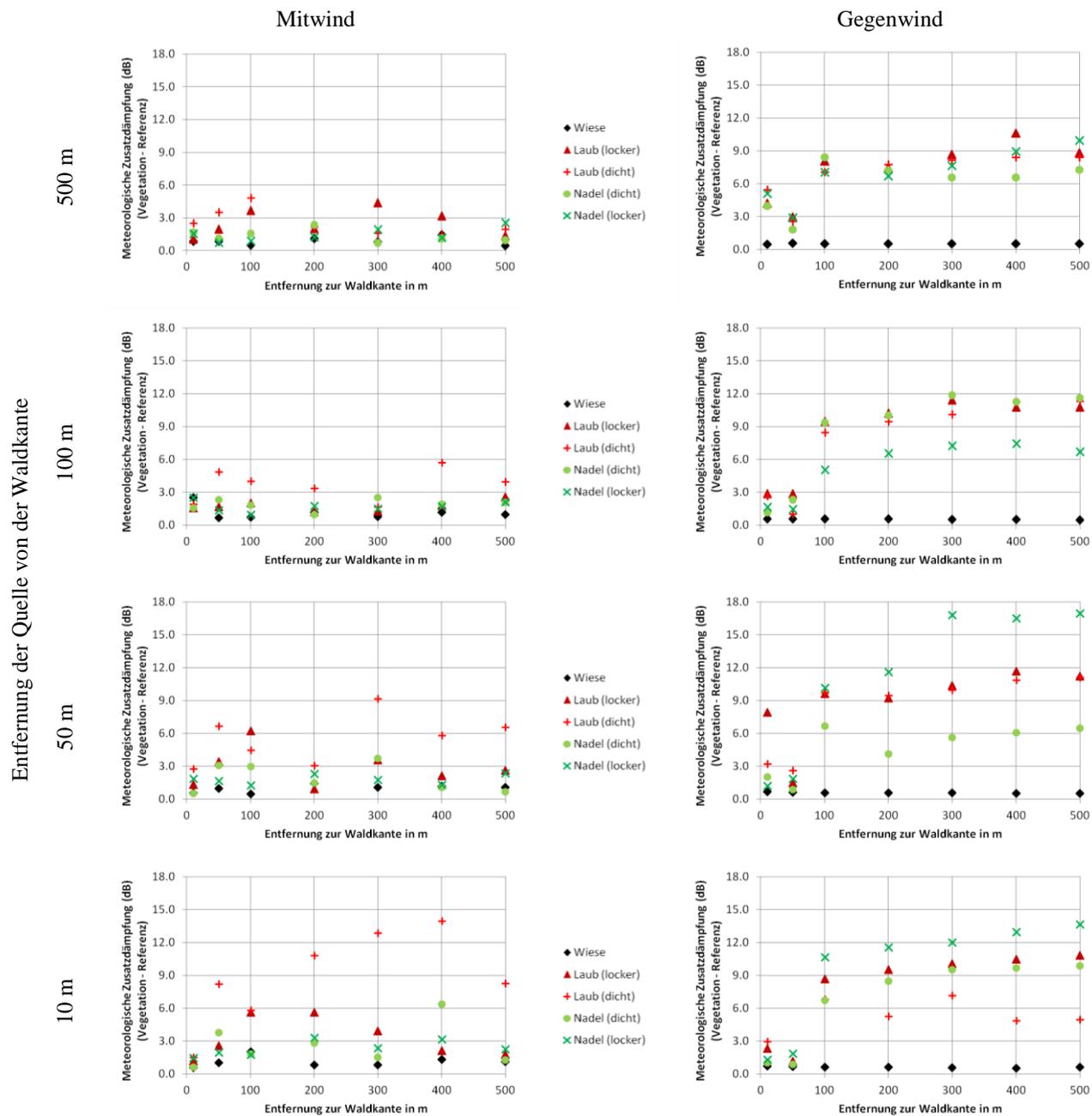
Mittelwerte nachts (22-06 Uhr) am 15.07.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



**Standardabweichungen zu Nachtmittelwerten (22-06 Uhr) am 15.07.**

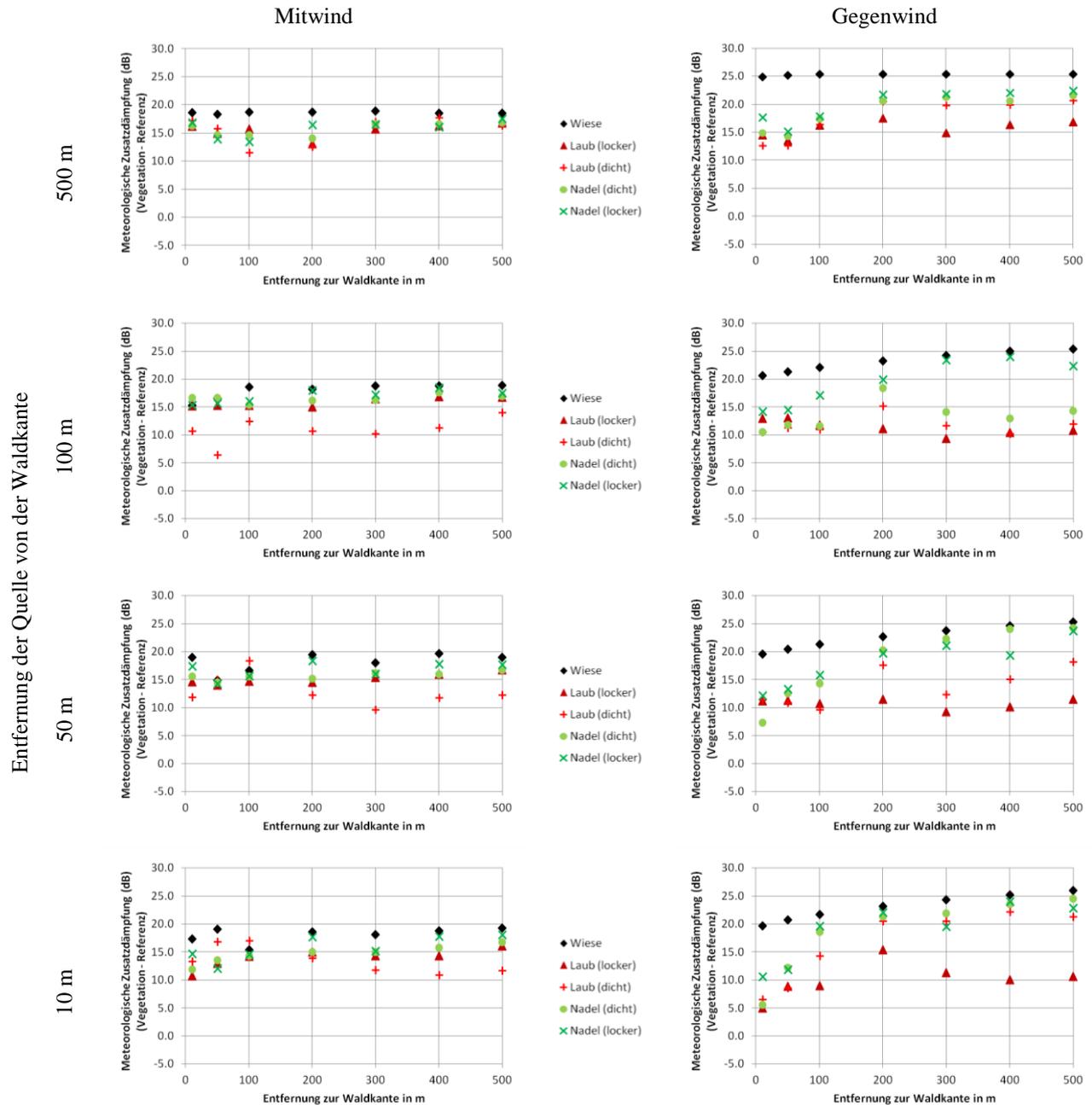
- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



# Meteorologische Zusatzdämpfung am 15.10.

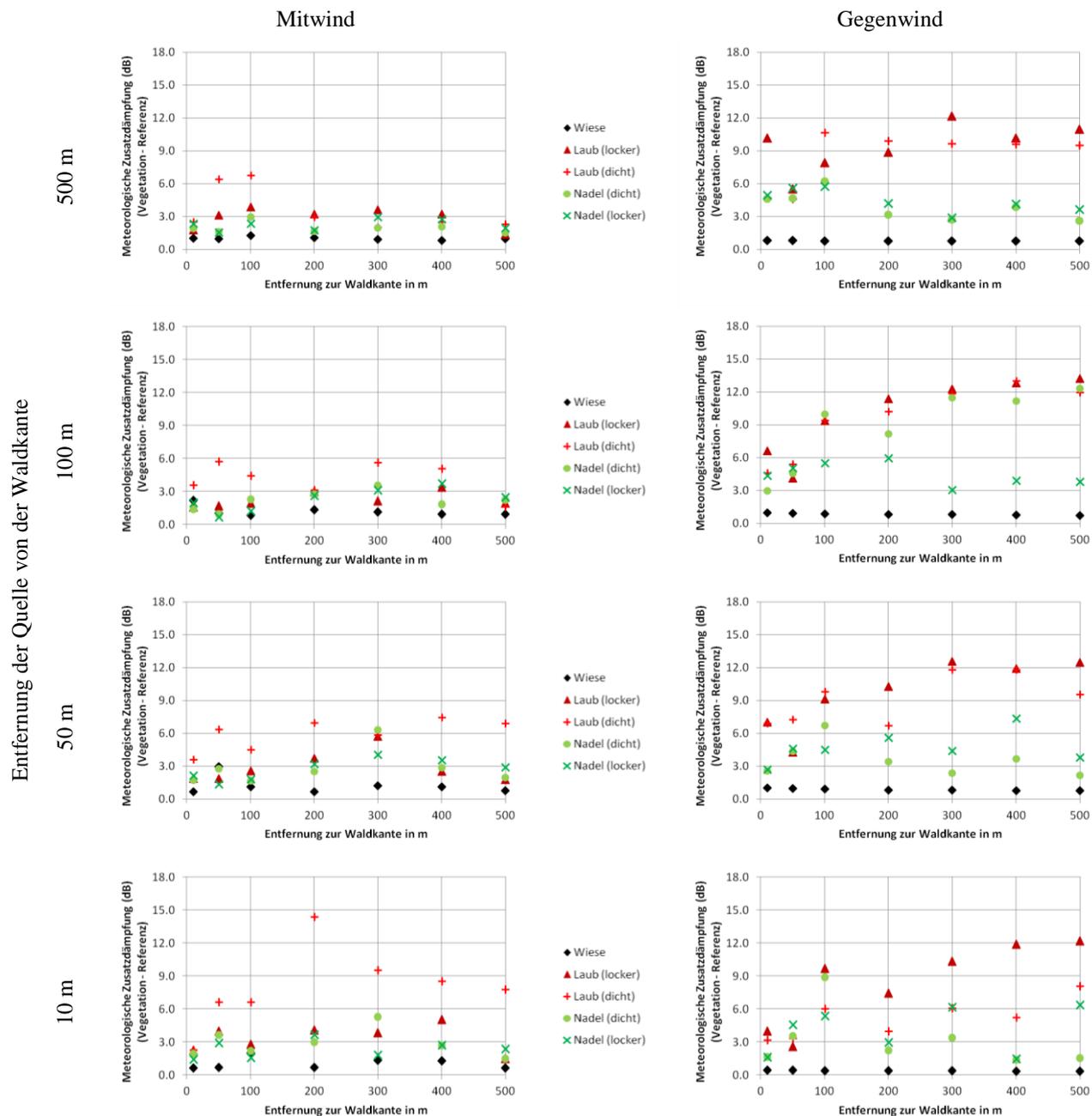
## Tagesmittelwerte (00-24 Uhr) am 15.10.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



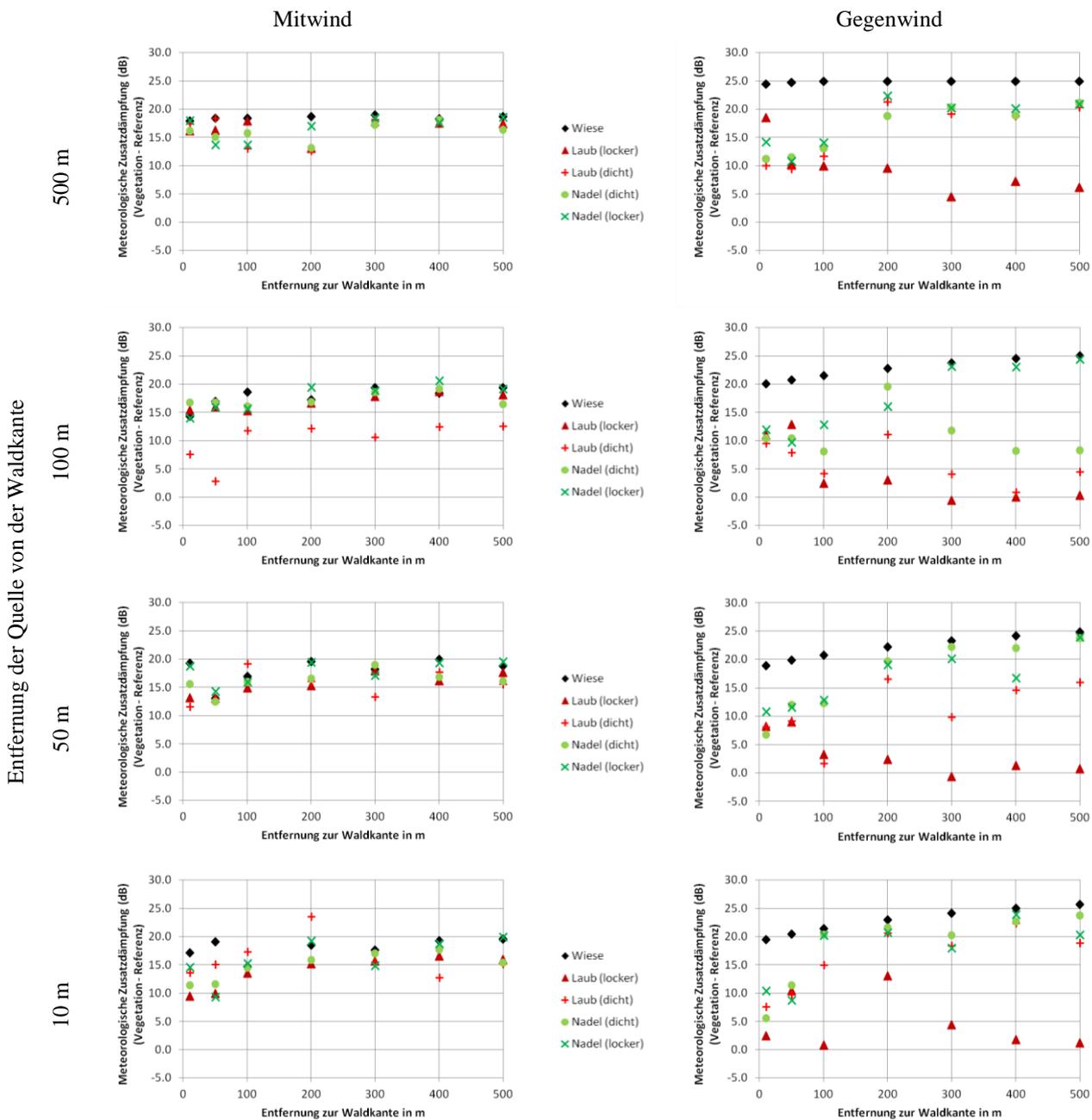
**Standardabweichung zu Tagemittelwerten (00-24 Uhr) am 15.10.**

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



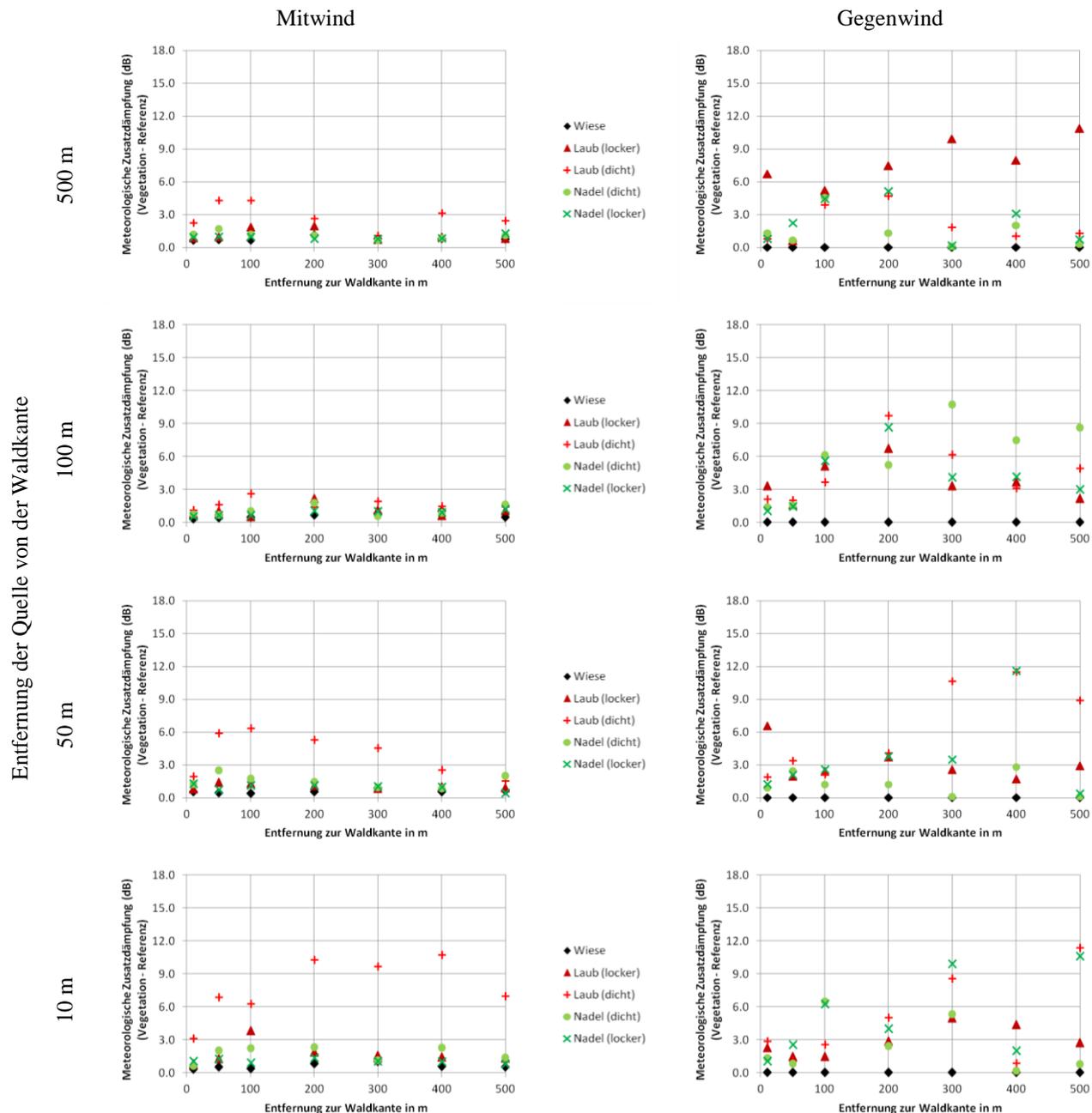
Mittelwerte nachts (22-06 Uhr) am 15.10.

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



**Standardabweichungen zu Nachtmittelwerten (22-06 Uhr) am 15.10.**

- Meteorologische Zusatzdämpfung: Dämpfung mit Vegetation minus Referenzdämpfung (Rechnung mit konstanter Temperatur, kein Wind)
- Verschiedene Entfernungen der Schallquelle zum Wald (linke Spalte) in Mit- und Gegenwindrichtung
- Abszisse: räumlicher Mittelwert über 10 m-Intervall (angegebene Entfernung  $\pm 5$  m)
- Wald: 150 m homogener Wald und je 20 m Übergangszone zur Wiese (insgesamt 190 m breiter Streifen)
- Sender-Empfänger-Abstand: Entfernung der Quelle plus 190 m (Waldstreifen) plus Abszissenwert



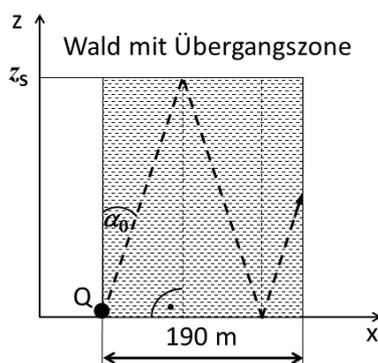
# Verlängerung des Schallweges innerhalb des Bestands durch atmosphärische Brechung und Reflexion (an der Erdoberfläche)

Der maximale Vertikalgradient der effektiven Schallgeschwindigkeit beträgt für einen lockeren Nadelwaldstreifen mit Unterwuchs am 15.07. ca. 0,5 1/s und ist in der Nähe der Erdoberfläche zu finden. Deshalb wirkt dieser hohe Schallgeschwindigkeitsgradient besonders bei einer bodennahen Schallquelle und bewirkt in der Mitwindrichtung ein Abwärtsbrechen der Schallstrahlen. Auch in größerer Höhe (bei ca. 17 m Höhe über Grund) sind, infolge der meteorologischen Wirkung des Baumbestandes, noch Gradienten in dieser Größenordnung zu finden. Für eine Maximalwertabschätzung ist deshalb die Annahme gerechtfertigt, mit einem höhenkonstanten Gradienten von 0,5 1/s für die gesamte Vegetationsschicht bis in eine Höhe von 24 m zu rechnen.

Schallstrahlen, welche ihren Scheitelpunkt an der Obergrenze des Baumbestandes haben, legen einen maximalen Weg innerhalb des Vegetationsstreifens zurück. Die Höhe des Scheitelpunktes  $z_s$  wird, bei einer Schallquelle am Boden, folgendermaßen berechnet (SAGER 1974):

$$z_s = \frac{1}{m} \left( \frac{1}{\sin \alpha_0} - 1 \right), \quad m = \frac{1}{c_0} \frac{dc}{dz}$$

Der Parameter  $m$  ist dabei der (mit der Schallgeschwindigkeit in Quellnähe  $c_0 = 340$  m/s normierte) vertikale Schallgeschwindigkeitsgradient,  $\alpha_0$  ist der Emissionswinkel des Schallstrahls an der Schallquelle (vgl. Abbildung unten). Für  $z_s = 24$  m und  $m=0,00147$  1/s ergibt sich ein Emissionswinkel von ca. 75°. Schallstrahlen mit diesem Emissionswinkel bei einer Schallquelle am Rand des Waldstreifens legen bis zur ersten Bodenreflexion einen Schallweg von 185,5 m im Bestand bei einer horizontalen Entfernung von 179,1 m zurück. Für einen 190 m ausgedehnten Waldstreifen resultiert eine maximale Schallweglänge von ca. 197 m innerhalb des Waldstreifens. Unter der Annahme einer Zusatzdämpfung durch Vegetation von 14 dB/100 m (BERNHOFER et al. 2012) beträgt die maximale Zusatzdämpfung für diesen Waldstreifen und bei der oben beschriebenen Verlängerung der Schallstrecke infolge von Schallbrechung ca. 28 dB.



*Geometrie zur Aussendung eines Schallstrahls von einer Quelle Q am Boden ( $\alpha_0$ : Emissionswinkel des Strahls gegen das Einfallslot), seiner Totalreflexion an einer Grenzfläche in der Höhe  $z_s$  und der anschließenden Reflexion am Boden. Der Gradient der Schallgeschwindigkeit wird über den gesamten betrachteten Höhenbereich als konstant angenommen.*

# Literaturverzeichnis

- ALLARD, J.F., Y. CHAMPOUX, J. NICOLAS: Pressure variation above a layer of absorbing material and impedance measurement at oblique incidence and low frequencies. *J. Acoust. Soc. Am.* 86 (1989), S. 766-770
- ANSI/ASA S1.18-2010: American National Standard Method for Determining the Acoustic Impedance of Ground Surfaces. (2010), 47 S.
- ATTENBOROUGH, K.: Ground parameter information for propagation modeling. *J. Acoust. Soc. Am.* 92 (1992), S. 418-427
- AzB, 2008: Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen vom 19.11.2008. 142 S.
- BALOGH, K., A. ZIEMANN, D. DANIEL: Influence of atmospheric refraction on pulse propagation over a flat ground surface, *Acustica* 92 (2006), S. 848-852
- BASS, H.E., L.C. SUTHERLAND, A.J. ZUCKERWAR, D.T. BLACKSTOCK, D.M. HESTER: Atmospheric Absorption of Sound: Further Developments. *J. Acoust. Soc. Am.* 97 (1995), S. 680-683
- BAUMKUNDE: Baumkunde.de - Online-Datenbank für Bäume und Sträucher: Winterlinde, URL: [http://www.baumkunde.de/Tilia\\_cordata/](http://www.baumkunde.de/Tilia_cordata/) (letzter Zugriff: August 2013)
- BERNHOFER, C., A. ZIEMANN, T. DONIX: Datenrecherche „Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern“. Abschlussbericht der Technischen Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2012), 36 S.
- BERNHOFER, C., A. ZIEMANN, M. BARTH: Zwischenbericht zum Projekt „Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Simulationen mit einem akustisch-meteorologischen Modell.“ Technischen Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2013), 53 S.
- BVS (BUNDESVEREINIGUNG GEGEN SCHIENENLÄRM), 2004: Beschreibung von Verkehrslärm und seiner Wirkung.
- CERMÁK, J.: Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forest in southern Moravia. *Tree Physiology* 18 (1998), S. 727-737
- CERMÁK, J., F. RIGUZZI, R. CEULEMANS: Scaling up from the individual tree to the stand level in Scots pine. I. Needle distribution, overall crown and root geometry. *Ann. Sci. For.* 55 (1998), S. 63-88
- DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (1999)
- DWD: Termin und Tageswerte (Klimadaten Deutschland). Verfügbar online unter <http://www.dwd.de> → Klima + Umwelt → Klimadaten → Klimadaten – online – frei → Klimadaten Deutschland → Messstationen → Termin- und Tageswerte (letzter Zugriff: August 2013)
- ECMT/OECD (European Conference of Ministers of Transport/Organisation for Economic Cooperation and Development): Speed Management OECD (2006), S. 45, Fig. 2.8
- FALGE, E, S. RETH, N. BRÜGGEMANN, K. BUTTERBACH-BAHL, V. GOLDBERG, A. OLTCEV, S. SCHAAF, G. SPINDLER, B. STILLER, R. QUECK, B. KÖSTNER, C. BERNHOFER: Comparison of surface energy exchange models in VERTIKO. *Ecological Modelling* 188 (2005), S. 174-216
- FLEMMING G.: Wald – Wetter – Klima. Eine Einführung in die Forstmeteorologie. 3. Auflage, Dt. Landwirtschaftsverlag, Bln. (1994), 136 S.
- GARRATT, J.R.: The atmospheric boundary layer. Cambridge Atmospheric and Space Science Series (1992) 145 S.

- GOLDBERG, V., C. BERNHOFER: Quantifying the coupling degree between land surface and the atmospheric boundary layer with the coupled vegetation-atmosphere model HIRVAC. *Annal. Geophys.* 19 (2001), S. 581-587
- HUSSAIN, M.Z., T. GRÜNWARD, J.D. TENHUNEN, Y.L. LI, H. MIRZAE, C. BERNHOFER, D. OTIENO, N.Q. DINH, M. SCHMIDT, M. WARTINGER, K. OWEN: Summer drought influence on CO<sub>2</sub> and water fluxes of extensively managed grassland in Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environments* 141 (2011), S. 67-76
- KAIMAL, J.C., J.J. FINNIGAN: *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, New York (1994) 289 S.
- KALLISTRATOVA., M., R.D. KOUZNETSOV, D.D. KUZNETSOV, I.N. KUZNETSOVA, M. NAKHEAV, G. CHIROKOVA: Summertime low-level jet characteristics measured by sodars over rural and urban areas. *Meteorol. Z.* 18 (2009), S. 289-295
- KRAUS, H.: *Die Atmosphäre der Erde – Eine Einführung in die Meteorologie*. Vieweg Verlag (2000), 470 S.
- KRAUS H.: *Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie – Einführung in die Physik der Atmosphärischen Grenzschicht und in die Mikrometeorologie*. Springer-Verlag (2008), 211 S.
- KRUSE, R., V. MELLERT: Effect and minimization of errors in in-situ ground impedance measurements. *Appl. Acoustics* 69 (2008), S. 884-890
- LE DANTEC, V., E. DUFRÊNE, B. SAUGIER: Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperature deciduous stands. *Forest Ecology and Management* 134 (2000), S. 71-81
- LIS, 2013: *Lärmschutz im Schienenverkehr. Alles über Schallpegel, innovative Technik und Lärmschutz an der Quelle*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin (Hrsg.). URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/108340/publicationFile/74523/laerschutz-im-schienenverkehr-broschuere.pdf> (Letzter Zugriff: November 2013).
- MIX, W.: Grenzschichtmodelle für die Umweltüberwachung. *Meteorol. Rdsch.* 44 (1991), S. 43-55
- MIX, W., V. GOLDBERG, K.-H. BERNHARDT: Numerical experiments with different approaches under large-area forest canopy conditions. *Meteorol. Z.* 3 (1994), S. 187-192
- OSTASHEV, V.E.: *ACOUSTICS in moving inhomogeneous media*. E & FN Spon, London (1997), 259 S.
- PRICE, M.A., K. ATTENBOROUGH, N.W. HEAP: Sound attenuation through trees: Measurements and models. *J. Acoust. Soc. Am.* 84 (1988), S. 1836-1844
- QUECK, R., A. BIENERT, H.-G. MAAS, S. HARMANSA, V. GOLDBERG, C. BERNHOFER: Wind fields in heterogeneous conifer canopies: parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3D vegetation scans. *Eur. J. Forest Res.* 131 (2012), S. 165-176
- RASPET, R., J.M. SABATIER: The surface impedance of grounds with exponential porosity profiles. *J. Acoust. Soc. Am.* 99 (1996), S. 147-152
- RAU, M.: Teilflächeninformationen zum Forstbezirk Taura. Staatsbetrieb Sachsenforst, Abteilung Obere Forst- und Jagdbehörde, Persönliche Mitteilung am 24.07.2013
- RAUNER, J.L.: *Deciduous Forests*. In: *Vegetation and the Atmosphere*, Vol. 2, Ed. J.L. Monteith, Academic Press, London (1976), S. 241-261
- RÜCKERT-JOHN, J., I. BORMANN, R. JOHN: *Umweltbewusstsein in Deutschland 2012 – Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Hrsg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Umweltbundesamt (UBA) (2013), S. 52  
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4396.pdf>
- SAGER, G.: Eine Methode zur Bestimmung der Schallausbreitung in quasiruhender Atmosphäre. *Meteorol. Z.* 24 (1974), S. 117-129
- SALOMONS, E.M.: *Computational atmospheric acoustics*. Kluwer Academic Publishers (2001), 335 S.

- TA LÄRM: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm. (1998)
- TRIMPOP, M.: Measurements on the damping effect of forests. Langfassung zur AIA-DAGA 2013 - Conference on Acoustics, Merano, Italien (2013a)
- TRIMPOP, M.: Entwurf eines Messkonzeptes zur Überprüfung der meteorologisch-akustischen Dämpfungswirkung von Vegetationsstreifen. Persönliche Kommunikation (November 2013b)
- TUNICK, A.: Calculating the micrometeorological influences on the speed of sound through the atmosphere in forests. *J. Acoust. Soc. Am.* 114 (2003), S. 1796–1806
- VDI 2714: Schallausbreitung im Freien. (1988)
- ZIEMANN, A.: NUMERICAL simulations of meteorological quantities in and above forest canopies. *Meteorol. Z.* 7 (1998), S. 120-128
- ZIEMANN, A.: Zum Einfluss vertikaler Gradienten meteorologischer Größen auf die Laufzeit von akustischen Signalen zwischen Schallquellen und Schallempfängern in der bodennahen Atmosphäre, *Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig* 26 (2002), S. 31-42
- ZIEMANN, A., K. BALOGH, K. ARNOLD: Modelling and measuring the atmospheric excess attenuation over flat terrain. *Meteorol. Z.* 16 (2007), S. 429-441
- ZIEMANN, A., G. FISCHER: Adapting a sound ray model of the atmosphere to simulate sound propagation in urban environment. NAG/DAGA 2009 International Conference on Acoustics, Rotterdam (The Netherlands), publ. on CD-ROM (2009)
- ZIEMANN, A., M. HEHN, M. BARTH, G. FISCHER, V. GOLDBERG: Meteorologische Einflüsse auf das Lärminderungspotential von Waldgebieten. Vortrag auf der Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologentagung (DACH) 2013, Innsbruck, Österreich (September 2013).

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de  
www.smul.sachsen.de/lfulg

**Autoren:**

Manuela Barth, Astrid Ziemann, Christian Bernhofer  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Umweltwissenschaften  
Professur für Meteorologie  
PF 1117, 01735 Tharandt  
Telefon: +49 351 463-31346  
Telefax: +49 351 463-31302  
E-Mail: astrid.ziemann@tu-dresden.de

**Redaktion:**

Uwe Wollmann  
LfULG, Abteilung Klima, Lärm, Luft, Strahlen/Referat Anlagenbezogener Immissionsschutz, Lärm  
Telefon: +49 351 2612-5201  
Telefax: +49 351 2612-5099  
E-Mail: uwe.wollmann@smul.sachsen.de

**Titelfoto:**

Manuela Barth

**Redaktionsschluss:**

31.12.2013

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.