

Schalldämpfung durch Wald (Teil 1)

Schriftenreihe, Heft 16/2016



Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Messtechnische Verifizierung eines akustisch-meteorologischen Modells

Dr. Astrid Ziemann, Dr. Hans-Jörg Ederer,
Christoph Stüber, Markus Hehn, Prof. Dr. Christian Bernhofer

Inhalt

1	Einführung und Zielsetzung	7
2	Sachstand zur Schalldämpfung von Wäldern	8
3	Messbedingungen	9
3.1	Messgebiet und Messstandort.....	9
3.2	Messzeitraum	16
3.3	Umgebungsbedingungen	18
4	Vorbereitung und Durchführung der Messungen	21
4.1	Akustische Messungen.....	21
4.1.1	Allgemeine Vorgehensweise	21
4.1.2	Wahl der Schallanregung	22
4.1.3	Schallaufzeichnung	25
4.1.4	Messungen mit 100 m und 200 m Entfernung des Senders.....	26
4.1.5	Messungen der Bodenimpedanz	27
4.1.6	Freifeldmessung	27
4.2	Meteorologische Messungen.....	29
4.2.1	Vergleichsmessungen der Ultraschallanemometer in Grillenburg	29
4.2.2	Meteorologische Profilmessungen in Langhennersdorf.....	31
5	Auswertung der Messungen und Ergebnisdiskussion	33
5.1	Auswertung der akustischen Messungen	33
5.1.1	Schallausbreitungsmessungen durch und über das Waldgebiet	33
5.1.2	Messungen mit 100 m und 200 m Entfernung des Senders.....	43
5.1.3	Freifeldmessung	44
5.2	Auswertung der meteorologischen Messungen.....	45
5.3	Zusammenführung der akustisch-meteorologischen Messungen	50
5.4	Vergleich mit Literaturergebnissen	63
5.5	Handlungsempfehlungen.....	64
5.5.1	Handlungsempfehlungen für die Schallimmissionsprognose	65
5.5.2	Handlungsempfehlungen für die schallschutzgerechte Planung von Waldgebieten.....	65
5.6	Weiterführende Arbeiten und Ausblick	66
	Literaturverzeichnis	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Luftbild des Messgebietes Langhennersdorf (Quelle: GeoSN) mit GPS-Messpunkten für die meteorologischen Profilmessungen und den Waldbestand	9
Abbildung 2:	Ansicht der nördlichen Waldkante (Saat, Bereich Laubwald).....	11
Abbildung 3:	Ansicht der südlichen Waldkante (Maisfeld, Bereich Laubwald)	11
Abbildung 4:	Lautsprecheraufstellung auf Stativen am Rand des Maisfeldes.....	11
Abbildung 5:	Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet (Modul 1).....	12
Abbildung 6:	Luftbild des Messgebietes Grillenburg (Quelle: GeoSN) mit GPS-Messpunkt für die meteorologische Station.....	14
Abbildung 7:	Laubwald (Eichen und Birken) der nördlichen Waldkante (links) und Ansicht der südlichen Waldkante im Bereich Laubwald (rechts)	15
Abbildung 8:	Bodenzustand am 08./09.10. (links) und am 15.10.2014 (rechts) auf dem Mais-Stoppelfeld	19
Abbildung 9:	Bodenzustand am 19.10. (links, Mitte) und am 29.10.2014 (rechts)	19
Abbildung 10:	Waldrand Anfang Oktober (links) und Anfang November (rechts)	19
Abbildung 11:	Bodenzustand während der Messungen am 10.03.2015 auf dem nördlichen (links, Mitte) und südlichen (rechts) Feld.....	20
Abbildung 12:	Bodenzustand während der Messungen am 13.03.2015 auf dem nördlichen (links) und südlichen (rechts) Feld.....	21
Abbildung 13:	Bodenbestand im Laubwald zwischen den Birken (links), zwischen den Eichen (Mitte) und im Nadelwald (rechts).....	21
Abbildung 14:	Schema der Messanordnung für die akustischen Messungen (Modul 1).....	22
Abbildung 15:	Spektren der untersuchten elektrischen Anregungssignale	23
Abbildung 16:	Vermessung der Lautsprecher im Großen Reflexionsarmen Raum der TU Dresden	23
Abbildung 17:	Vergleich der 1-m-Spektren im reflexionsarmen Raum.....	24
Abbildung 18:	Sendeseitige Messstrecke mit Lautsprecheraufstellung	24
Abbildung 19:	Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – 200 m.....	26
Abbildung 20:	Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – 100 m.....	27
Abbildung 21:	Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – Freifeldmessung vor Laubwald und Nadelwald.....	28
Abbildung 22:	Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – Maisfeld Mitwind	29
Abbildung 23:	Vergleichsexperiment der Ultraschallanemometer in Grillenburg (Modul 2)	30
Abbildung 24:	3-m-Mast auf der Nordseite des Waldgebietes (links, Mitte) und 30-m-Clarkmast auf der Südseite des Waldgebietes (Modul 1)	32
Abbildung 25:	Mittelwerte Dämpfungen – Laubwald Modul 1	35
Abbildung 26:	Mittelwerte Dämpfungen – Nadelwald Modul 1	35
Abbildung 27:	Einfügungsdämpfung Wald – Laubwald Modul 1	36
Abbildung 28:	Einfügungsdämpfung Wald – Nadelwald Modul 1.....	37
Abbildung 29:	Dämpfung A-Summenpegel – Laubwald Modul 1.....	38
Abbildung 30:	Dämpfung A-Summenpegel – Nadelwald Modul 1	38
Abbildung 31:	Mittelwerte Dämpfungen – Laubwald Modul 2	40
Abbildung 32:	Mittelwerte Dämpfungen – Nadelwald Modul 2.....	40
Abbildung 33:	Einfügungsdämpfung Wald – Laubwald Modul 2	41
Abbildung 34:	Einfügungsdämpfung Wald – Nadelwald Modul 2.....	41
Abbildung 35:	Dämpfung A-Summenpegel – Laubwald Modul 2.....	42
Abbildung 36:	Dämpfung A-Summenpegel – Nadelwald Modul 2	42
Abbildung 37:	Entfernungsmessung – Dämpfung A-Summenpegel	43
Abbildung 38:	Freifeldausbreitung – A-Pegeldifferenz	44
Abbildung 39:	Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen	45
Abbildung 40:	Tagesgang der mittleren Windrichtung im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen	46

Abbildung 41:	Mit- und Gegenwindausbreitung (in Bezug auf die Windrichtung in 10 m Höhe) im Modul 1.....	46
Abbildung 42:	Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen.....	47
Abbildung 43:	Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen	48
Abbildung 44:	Tagesgang der mittleren Windrichtung im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen	48
Abbildung 45:	Mit- und Gegenwindausbreitung (in Bezug auf die Windrichtung in 10 m Höhe) im Modul 2.....	49
Abbildung 46:	Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen.....	49
Abbildung 47:	Tagesgang der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) mit Standardabweichung im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen (links) und Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung (rechts)	50
Abbildung 48:	Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen	51
Abbildung 49:	Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schall-geschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen	52
Abbildung 50:	Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schall-geschwindigkeit (1 min Mittel) am 30.10.2014 in verschiedenen Höhen	52
Abbildung 51:	Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen.....	53
Abbildung 52:	Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 30.10.2014 in verschiedenen Höhen.....	53
Abbildung 53:	Tagesgänge der Walddämpfung (Nadel dunkelgrün und Laub hellgrün) und der Vertikalgradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im Modul 1	54
Abbildung 54:	Tagesgang der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) mit Standardabweichung im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen (links) und Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung (rechts)	55
Abbildung 55:	Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen.....	55
Abbildung 56:	Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schall-geschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen	57
Abbildung 57:	Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schall-geschwindigkeit (1 min Mittel) am 24.03.2015 in verschiedenen Höhen	57
Abbildung 58:	Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen.....	58
Abbildung 59:	Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 24.03.2015 in verschiedenen Höhen.....	58
Abbildung 60:	Tagesgänge der Walddämpfung (Nadel dunkelgrün und Laub hellgrün) und der Vertikalgradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im Modul 2	59
Abbildung 61:	Mittelwerte der Dämpfung als A-Summenpegel für beide Module	60
Abbildung 62:	Mittelwerte der Einfügungsdämpfungen für beide Module	61
Abbildung 63:	Minimale und maximale Schalldämpfung für alle Messungen in Abhängigkeit von der Entfernung von der Schallquelle.....	62
Abbildung 64:	Minimale und maximale Schalldämpfung sowie Mittelwerte für alle Messungen in Mitwindrichtung in Abhängigkeit von der Entfernung.....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Forstliche Parameter des Waldbestandes	10
Tabelle 2:	Positionen der akustischen Messkette (Modul 1).....	13
Tabelle 3:	Positionen der akustischen Messkette (Modul 2).....	15
Tabelle 4:	Zeitangaben der akustischen Messungen mit Messausstattung (Modul 1).....	16
Tabelle 5:	Zeitangaben der akustischen Messungen mit Messausstattung (Modul 2).....	17
Tabelle 6:	Übersicht zu den verwendeten Ultraschallanemometern (Modul 1).....	31
Tabelle 7:	Abstand der Messmasten zu markanten Geländepunkten (Modul 1)	31
Tabelle 8:	Übersicht zu den verwendeten Ultraschallanemometern (Modul 2).....	33
Tabelle 9:	Mittlere Entfernung der sender- und empfängerseitigen Mikrofone vom Lautsprecher für Modul 1	34
Tabelle 10:	Mittlere Entfernung der sender- und empfängerseitigen Mikrofone vom Lautsprecher für Modul 2.....	39
Tabelle 11:	Minima und Maxima der Einfügungsdämpfung (Walddämpfung) für alle Messungen	61

1 Einführung und Zielsetzung

Bereits 2008 wurde vom Auftraggeber (AG) ein Forschungsprojekt „Akustisches Modell zur Abschirmung von Wäldern“ initiiert, das von der Firma Wölfel in Zusammenarbeit mit dem Akustik Bureau Dresden bearbeitet wurde (REICHE & KRAPF 2008). Zur Vertiefung der dabei gewonnenen Erkenntnisse und zum Verständnis des Einflusses der meteorologischen Faktoren wurden in einem weiteren Projekt (BERNHOFER et al. 2012) quantitative Aussagen zur Abschirmwirkung von Wäldern gegenüber Verkehrslärm anhand einer umfangreichen Literaturrecherche ausgearbeitet. Die Studienergebnisse weisen den bedeutenden meteorologischen Einfluss auf verschiedene Größen der Schallausbreitung und ihre raum-zeitliche Schwankungsbreite in Waldgebieten nach. Ziel der nachfolgenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten war es daher, die meteorologische Zusatzdämpfung des Schallpegels für verschiedene geometrische Randbedingungen und Vegetationsparameter sowie bzgl. der tages- und jahreszeitlichen Abhängigkeiten zu modellieren. Es wurden zweidimensionale, meteorologisch-akustische Modellsimulationen in Windrichtung und in Gegenwindrichtung, für unterschiedliche Tageszeiten (stündliche Auflösung), unterschiedliche Tage im Jahr (Repräsentation der Jahreszeiten) und definierte Abstände der Schallquelle von einem 190 m breiten Waldstreifen durchgeführt. Im Ergebnis wurden meteorologische Zusatzdämpfungen als ein indirekter Vegetationseinfluss auf die Schallausbreitung abgeleitet und mit vorliegenden Abschätzungen zum direkten Vegetationseinfluss sowie weiteren Effekten bei der Schallausbreitung zusammengeführt (BARTH et al. 2013).

Ziel des aktuellen Projektes ist die Erweiterung und Verifizierung der bisher gewonnenen Mess-, Modell- und Literaturergebnisse. Eine Überprüfung wichtiger Simulationsergebnisse soll mit einem entsprechend angepassten und modular aufgebauten Messkonzept erfolgen. Die Messungen dienen neben der Modellverifizierung auch der messtechnischen Feststellung wichtiger Teilbeiträge der zeitlich variablen Gesamtdämpfung durch einen Vegetationsbestand. Für diese Größe liegen bisher nur wenig reproduzierbare und verallgemeinerbare Daten vor.

Dazu sollen Messungen der Schallausbreitung über ein definiertes Waldstück mit einer Tiefe von ca. 200 m hinweg vorgenommen werden, wobei jeweils mehrere Messpunkte zwischen der anregenden Schallquelle und der Waldkante sowie auf der abgewandten Waldseite zu nutzen sind. Um insbesondere den meteorologischen und jahreszeitlichen Einfluss zur Ausbreitungsdämpfung quantifizieren zu können, wurden über ca. je zwei Wochen im Sommer- und im Winterhalbjahr entsprechende Messungen der gleichen Anordnung vorgenommen. Mit der Studie sollen praxisnahe und anwendungsbereite Aussagen zur vegetations- und zeitabhängigen Abschirmwirkung von Wäldern getroffen werden. Die resultierenden Daten sollen in einer Struktur vorliegen, die eine Anknüpfung an bestehende Berechnungsverfahren zur Schallimmission beim AG ermöglicht.

2 Sachstand zur Schalldämpfung von Wäldern

BERNHOFER et al. (2012) führten eine Literaturrecherche mit dem Ziel durch, möglichst belastbare Aussagen zur Abschirmwirkung von Vegetation gegenüber Verkehrslärm herauszuarbeiten. Zu den Lärmarten Straßenlärm, Schienenlärm, Schießlärm und Lautsprecher wurden 19 Literaturbeispiele (mit 36 Messreihen) in die nähere Auswertung einbezogen. In der daraus abgeleiteten Datenbank sind auch Einzelmessungen aus Referenzstudien (REICHE & KRAPF 2008; HIRSCH 2010) enthalten, mit denen die Ergebnisse der Literaturrecherche verglichen wurden. Insgesamt kann Vegetation bzw. Wald in allen untersuchten Fällen von Schallquellen durch verschiedene Verkehrsarten eine schalldämpfende Wirkung zugesprochen werden. Dabei werden die mittleren Werte von REICHE & KRAPF (2008) für Verkehrslärm deutlich übertroffen. Die bisherigen Ergebnisse lassen eine passende Dämpfungsmöglichkeit auch von Fluglärm am Boden durch Vegetation, besonders im Nahbereich von Flugplätzen, vermuten.

Aus der Literaturrecherche ergab sich eine Einfügungsdämpfung ohne nicht europäische Vegetation von 14 dB auf 100 m Bewuchstiefe für die gemeinsame Betrachtung von simuliertem (Lautsprecher) und realem Verkehrslärm (Straßen-, Schienenverkehr). Die Zahl der erfassten Einzelmessungen und der daraus gebildeten Gruppen ist jedoch gering und die gewonnenen Mittelwerte ergeben sich zum Teil aus bewerteten und zum Teil aus unbewerteten Pegelangaben. Zudem sind die erfassten Literaturangaben auf Grund ihrer Heterogenität schwer vergleichbar. Insbesondere meteorologische Gegebenheiten und die damit verbundene Variabilität der Schallpegelmessungen werden in den ausgewerteten Studien meist nur geringfügig berücksichtigt.

Die Untersuchung des Vegetationseinflusses auf die Schallausbreitung ist deshalb nach wie vor ein wichtiges Forschungsthema. Ergebnisse einer weiteren Literaturrecherche (ZIEMANN 2014) zeigen, dass die meisten aktuellen Studien eine **zusätzliche Schalldämpfung durch Vegetationsbestände** abgeleitet haben. Eine Übertragbarkeit der Literaturergebnisse auf die Problematik der vorliegenden Studie ist jedoch nur eingeschränkt möglich. Die dargestellten Messergebnisse beschränken sich auf ganz bestimmte Situationen bezüglich der Tages- und Jahreszeit (teilweise Messungen über wenige Minuten) sowie der vorherrschenden Randbedingungen (z. B. landestypische Vegetationsarten). Es werden häufig zeitlich versetzte Messungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt. Der Bezug der Messungen untereinander zur Bestimmung einer Schalldämpfung kann hier nicht ohne weiteres gewährleistet werden. Bei allen Messungen wird ein Schallpegel angegeben, der eine Kombination verschiedener Einflüsse enthält (z. B. Vegetations- und Bodeneffekt). Eine reine Durchgangsdämpfung für eine Vegetationsart kann hieraus nicht abgeleitet werden. Darüber hinaus werden nur Vegetationsstreifen einer geringen Breite (unter 100 m) sowie sehr kurze Entfernungen zwischen Schallquelle und Mikrofonen (unter 500 m) betrachtet.

Aus den genannten Gründen ist ein auf die Studienziele abgestimmtes Messkonzept notwendig (BARTH et al. 2013), um wesentliche Teilbeiträge der Vegetationsdämpfung zu bestimmen und darüber hinaus die zeitliche Variabilität z. B. durch meteorologische Einflüsse zu erfassen.

3 Messbedingungen

3.1 Messgebiet und Messstandort

Bereits die Voruntersuchungen (REICHE & KRAPF 2008) hatten – erwartungsgemäß – belegt, dass die zusätzliche Dämpfungswirkung von Waldflächen auf die Schallausbreitung sowohl hinsichtlich eines breitbandigen, A-bewerteten Einzahlwertes, als auch im zugehörigen Spektrum erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit der Art des jeweiligen Waldbestandes zeigen. Insofern schien von Anfang an geraten, sich bei den Messungen nicht ausschließlich auf einen einzigen Schallausbreitungspfad zu konzentrieren. Diesbezüglich bot das Untersuchungsgebiet die Möglichkeit, unter sonst nahezu identischen Freifeld-Ausbreitungsbedingungen und Messabständen sowohl einen dichten Nadelwaldbestand als auch einen lichten Laubwaldbestand untersuchen zu können (siehe Abbildung 1). Durch die zeitliche Gliederung des Projekts in eine Sommerphase (Modul 1) und eine Winterphase (Modul 2) können zudem beide jahreszeitlichen Aspekte mit Messdaten hinterlegt werden.

Für die akustisch-meteorologischen Untersuchungen stand ein Waldgebiet (Längenausdehnung in NW-SE-Richtung ca. 200 m) in der Nähe von Langhennersdorf bei Freiberg/Sachsen zur Verfügung. Das untersuchte Waldgebiet wird von einem zwei- bis dreireihigen Eichenbestand umschlossen und gliedert sich in einen Birkenwald im westlichen Teil und einen Fichtenbestand im östlichen Teil. Diese Waldbestände sind folgendermaßen gekennzeichnet (Tabelle 1 [RAU 2014]).

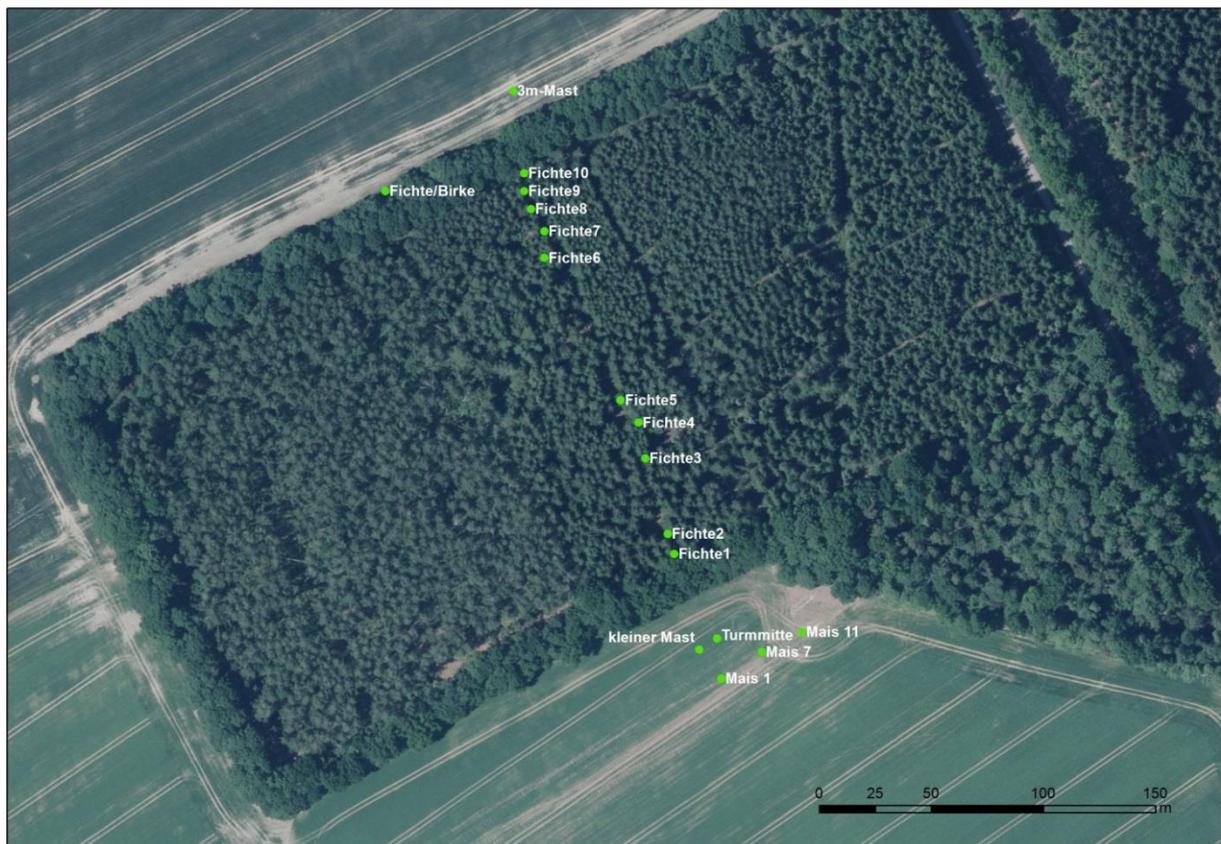


Abbildung 1: Luftbild des Messgebietes Langhennersdorf (Quelle: GeoSN) mit GPS-Messpunkten für die meteorologischen Profilmessungen und den Waldbestand

Tabelle 1: Forstliche Parameter des Waldbestandes

Teilfläche	Gesamtfläche	Hauptbaumart	Stichtag	Bestandesentstehung	Kronenschluss	Mittleres Alter	Oberhöhe
218 b 0	2,50 ha	Gemeine Birke	2011	Aus Naturverjüngung	locker	38	23 m
218 c 2	1,78 ha	Gemeine Fichte	1987		geschlossen	30	4 m (aktuell: 25-30 m Schätzung)

Die Waldfläche des Hauptmessgebietes ist an drei Seiten von Offenland umschlossen, die vierte Seite wird durch einen Weg und eine parallel verlaufende Eisenbahnstrecke begrenzt. An diese schließt sich wiederum eine weitere ausgedehnte Waldfläche an (Beschreibung: RAU 2015).

Die untersuchte Waldfläche setzt sich aus einem umlaufenden, ca. 10 m breiten Streifen aus Laubholz, einem ca. 1,5 ha großen Laubholzmischbestand, einem ca. 6 ha großen Fichtenbestand und einem ca. 5 ha großen Birkenbestand zusammen. In dem ca. 80- bis 100-jährigen mehrschichtigen Laubmischwald ist in der Oberschicht die Gemeine Birke dominierend. Baum- bis truppweise sind Rotbuchen und Stieleichen über die ganze Fläche verteilt eingemischt. Als Einzelbäume kommen außerdem auch Roteichen, Gemeine Eschen, Bergahorne, Bergulmen und Winterlinden vor. Im Unterstand sind ca. 50-jährige Hainbuchen und Verjüngungen aus Bergahorn locker verteilt. Der Birkenbestand ist gleichförmig und einschichtig aufgebaut. Das hochangesetzte Kronendach und der fehlende Mittel- und Unterstand vermitteln einen hallenartigen Eindruck. Die Baumhöhe beträgt ca. 21 m bei einem Alter von etwa 40 Jahren. Die im Vergleich zur Fichte über die Fläche stärker variierende Stammzahl beträgt ca. 500 Stück/ha. Der Bodenbewuchs wird vollflächig von der Brombeere dominiert, lediglich vereinzelt sind auch Faulbaum und Eberesche vorhanden.

Der sich daran anschließende geschlossene und weitgehend gleichförmig aufgebaute Fichtenbestand ist ca. 30 Jahre alt bei einer Stammzahl von ca. 1.500 Stück je ha. Lediglich vereinzelt treten Europäische Lärchen und Birken als Mischbaumarten auf. Die Fichten sind ca. 14 m hoch, wobei sie einen tiefen Kronenan-satz und Totäste im Bereich des Stammfußes aufweisen. Nur kleinflächig in Bestandeslücken und unterhalb der Mischbaumarten ist eine Bodenvegetation aus hauptsächlich Brombeere vorhanden (RAU 2015).

Modul 1 (Sommer, Oktober 2014)

Auf der Nordseite war das Waldgebiet während der Messungen im Modul 1 von einer ausgedehnten Ackerfläche mit Einsaat (ca. 390 m ü. NN) umgeben (Abbildung 2). Im Süden schloss sich ein abgeerntetes Maisfeld an (verdichteter Boden, Stoppeln), das in einer Entfernung von ca. 50 m von der Waldkante in ein Maisfeld (ca. 400 m ü. NN) überging (Abbildung 3). Ab dem 27.10.14 war auch dieses Maisfeld abgeerntet, sodass die akustischen Messungen auf größeren Längenskalen und mit einer vergrößerten Mikrofonmesskette betrieben werden konnten.

Wegen der besseren Zugänglichkeit des südlich angrenzenden Feldes für das Aufstellen der Lautsprecher wurde stets von dieser Seite aus angeregt. Der zunächst noch vorhandene Maisbestand ließ dabei allerdings nur einen maximalen Lautsprecherabstand von 55 m zu (Abbildung 4). Auch nachdem das Maisfeld vollständig abgeerntet worden war, wurde die ursprüngliche Lautsprecheraufstellung im Sinne der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse zunächst beibehalten.

Die akustische Messkette mit Lautsprecher und verschiedenen Mikrofonstandorten war in nordwestliche Richtung ausgelegt (Lautsprecher \Rightarrow Empfänger siehe Abbildung 5). Eine Schallausbreitung in Windrichtung findet deshalb bei einer Anströmung um Südost statt.



Abbildung 2: Ansicht der nördlichen Waldkante (Saat, Bereich Laubwald)



Abbildung 3: Ansicht der südlichen Waldkante (Maisfeld, Bereich Laubwald)



Abbildung 4: Lautsprecheraufstellung auf Stativen am Rand des Maisfeldes

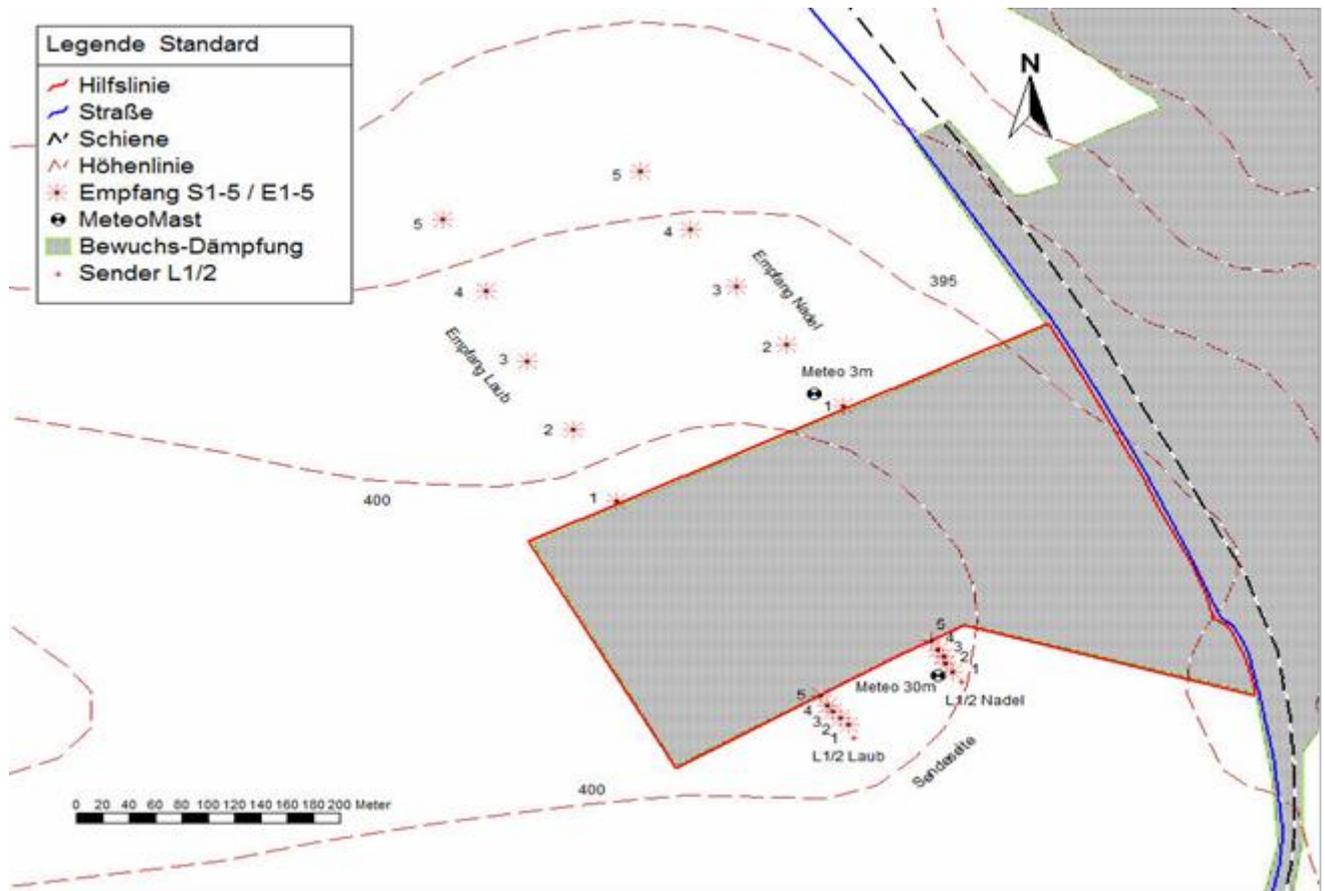


Abbildung 5: Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet (Modul 1)

Am 31.10.2014 wurden für beide Messstrecken ergänzende Messungen mit Lautsprecherabständen von jeweils 100 und 200 m zur Waldkante durchgeführt (Tabelle 4). Zur Quantifizierung der Schallausbreitung über dem sich jeweils vor bzw. hinter dem Waldgebiet anschließendem freien Feld wurden für alle vier Freifeld-Schallausbreitungspfade zudem entsprechende Ausbreitungsmessungen bis zu 600 m Entfernung ohne den Einfluss des Waldes durchgeführt (Tabelle 4):

- Maisfeld vor dem Nadelwald
- Saat hinter dem Nadelwald
- Maisfeld vor dem Laubwald
- Saat hinter dem Laubwald

Um den Einfluss der Schallreflexion an der Waldkante auszuschließen, wurden dafür die Lautsprecheraufstellungen umgekehrt, d. h. die Lautsprecher standen jeweils direkt an der Waldkante und die Ausbreitungsmessungen wurden entlang sich von dieser entfernenden Messpfaden ausgeführt. Am 21.10.2014 wurden zudem Freifeldmessungen bei einer Mitwindsituation (abgeerntetes Maisfeld, parallel zur Waldkante) begonnen, die bei einer Entfernung von 250 m jedoch wegen einsetzenden Regens abgebrochen werden mussten.

Zur Erprobung der Messtechnik und der Messmethodik wurden am 02.10.2014 auf einer Wiesenfläche in Grilenburg (Abbildung 6) vergleichende Messungen mit unterschiedlichen Mikrofonhöhen und Lautsprecherabständen durchgeführt, die ebenfalls in die Auswertung einbezogen werden.

Zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften des Bodens (akustische Oberflächenimpedanz), über dem die Schallausbreitung untersucht wurde, wurden am 03.11.2014 zudem Impulsmessungen mittels einer Korrelationsmesstechnik vorgenommen (siehe Kap. 3.2, Tabelle 4). Es wurden Daten des Schallabsorptionsgrades für alle infrage kommenden Bodentypen erhoben (siehe Kap. 4.1.5).

Die genauen Positionen der Lautsprecher, senderseitigen Mikrofone (Sender 1 bis Sender 5) und Mikrofone nach Schalldurchgang durch das Waldstück (Empfänger 1 bis Empfänger 5) sind Tabelle 2 zu entnehmen. Die Vermessung fand an jedem Messtag statt. Für die Auswertung werden Mittelwerte der Positionen verwendet. Diese Positionen wurden markiert, um die Reproduzierbarkeit der akustischen Messorte während verschiedener Messzeiten in den Modulen 1 und 2 zu gewährleisten.

Tabelle 2: Positionen der akustischen Messkette (Modul 1)

Position	Laub		Laub		Nadel		Nadel	
	Geogr.	Breite	Geogr.	Länge	Geogr.	Breite	Geogr.	Länge
Lautsprecher	50°56.	641	13°16.	526	50°56.	669	13°16.	593
Sender 1	50°56.	647	13°16.	523	50°56.	673	13°16.	589
Sender 2	50°56.	650	13°16.	518	50°56.	677	13°16.	584
Sender 3	50°56.	654	13°16.	514	50°56.	680	13°16.	582
Sender 4	50°56.	656	13°16.	510	50°56.	684	13°16.	579
Sender 5	50°56.	661	13°16.	506	50°56.	688	13°16.	575
Empfänger 1	50°56.	751	13°16.	372	50°56.	798	13°16.	514
Empfänger 2	50°56.	784	13°16.	344	50°56.	826	13°16.	477
Empfänger 3	50°56.	816	13°16.	314	50°56.	853	13°16.	445
Empfänger 4	50°56.	849	13°16.	286	50°56.	880	13°16.	414
Empfänger 5	50°56.	882	13°16.	257	50°56.	907	13°16.	382

Die meteorologischen Profilmessungen fanden an folgenden Positionen statt (GPS-Messung am 15.10.2014):

- 30-m-Profilmast-Turmmitte (Clarkmast) und kleiner Mast der 2-m-Messung (Angaben in Klammern)
Geogr. Breite: 50° 56.672'N (50° 56.669'N), Geogr. Länge: 13° 16.579'E (13° 16.573'E)
- 3-m-Profilmast
Geogr. Breite: 50° 56.804'N, geogr. Länge: 13° 16.497'E

Abbildung 1 zeigt die Position der meteorologischen Profilmasten und die Kante des Maisfeldes (Mais 1-11), den Fichtenwaldbestand mit Waldweg (Fichte 1-10) und den Übergang vom Fichten- in den Birkenbestand. Das Maisfeld war zum Beginn der Messungen (13.-27.10.) ca. 80 m breit. Der 30-m-Mast war ca. 33 m von der Waldkante (Eichenbäume-Stämme) entfernt. Der 3-m-Mast befand sich etwa 16 m entfernt von der Waldkante (Eichenbäume-Stämme).

Zusätzliche akustische Messungen fanden in Grillenburg im Tharandter Wald über einer ausgedehnten ebenen Wiesenfläche statt (Abbildung 6). Hier betreibt die Professur Meteorologie der TUD seit 2002 meteorologische Dauermessungen u. a. im Rahmen des globalen Messnetzes FLUXNET (z. B. Austausch von Treibhausgasen zwischen Atmosphäre und Boden, Luft- und Bodentemperatur, Windvektor). Die Station (50° 57.000'N, 13° 30.755'E, 377 m ü. NN) befindet sich auf einer Wiese, die zur Futtergewinnung genutzt

wird. Der Messstandort zeichnet sich durch gute Anströmbedingungen und eine weitreichende Windwirklänge aus. Kleinere Baumreihen befinden sich in mindestens 150 m Entfernung von der Station, größere Waldgebiete (Tharandter Wald) sind mindestens 450 m entfernt. An dieser Station fanden auch die Vergleichsmessungen der Ultraschallanemometer statt.



Abbildung 6: Luftbild des Messgebietes Grillenburg (Quelle: GeoSN) mit GPS-Messpunkt für die meteorologische Station

Modul 2 (Winter, März 2015)

Die Messungen im Modul 2 wurden zu Beginn der Vegetationsperiode und der landwirtschaftlichen Feldarbeiten durchgeführt. Dementsprechend war das südliche Feld (ehemals Stoppelfeld und Maisfeld) kurz vor Messbeginn umgepflügt worden (Abbildung 7). Damit verbunden waren veränderte Bodeneigenschaften (z. B. eine geringere Bodenverdichtung und veränderte Furchenbildung im Vergleich zum Modul 1), die sich auch auf die akustischen Messungen auswirken können. Auf der nördlichen Feldseite war das Wintergetreide bereits während des Moduls 1 aufgegangen und hatte den Winter überdauert. Der relativ spärliche Bewuchs wurde an der Waldkante (Standort 3-m-Mast) durch einen landwirtschaftlich genutzten Fahrweg und ausge dehnte Pfützenbildung unterdrückt (Abbildung 8).

Der Laubaustrieb der Eichen am Waldrand und der Birken im Inneren des Laubwaldgebietes hatte noch nicht eingesetzt (Abbildung 11 bis Abbildung 13). Bezüglich der Vegetationsbedingungen ergeben sich damit die in gewünschter Art veränderten Randbedingungen im Vergleich zu den Modul-1-Messungen im Oktober 2014.

Die Positionen der Lautsprecher, senderseitigen Mikrofone (Sender 1 bis Sender 5) und Mikrofone nach Schalldurchgang durch das Waldstück (Empfänger 1 bis Empfänger 5) haben sich im Vergleich zu den Messungen im Modul 1 nur geringfügig verändert. Die gemittelten Positionsangaben sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Standorte für das meteorologische Vergleichsexperiment (Grillenburg) und die kombinierten Hauptmessungen (Langhennersdorf) wurden im Modul 2 beibehalten.

Die Positionen der Messmasten und der akustischen Sender und Empfänger änderten sich nur geringfügig. Die meteorologischen Profilmessungen fanden an folgenden Positionen statt (GPS-Messung am 13.03.2015):

■ 30-m-Profilmast-Turmmitte und kleiner Mast der 2-m-Messung (Angaben in Klammern)

Geogr. Breite: 50° 56.672'N (50° 56.671'N), geogr. Länge: 13° 16.578'E (13° 16.573'E)

■ 3-m-Profilmast

Geogr. Breite: 50° 56.803'N, geogr. Länge: 13° 16.491'E

Tabelle 3: Positionen der akustischen Messkette (Modul 2)

Position	Laub		Laub		Nadel		Nadel	
	Geogr.	Breite	Geogr.	Länge	Geogr.	Breite	Geogr.	Länge
Lautsprecher	50°56.	639.0	13°16.	527	50°56.	667	13°16.	593
Sender 1	50°56.	645.9	13°16.	523	50°56.	673	13°16.	592
Sender 2	50°56.	649.7	13°16.	520	50°56.	676	13°16.	589
Sender 3	50°56.	653.7	13°16.	515	50°56.	679	13°16.	588
Sender 4	50°56.	657.2	13°16.	513	50°56.	684	13°16.	585
Sender 5	50°56.	662.0	13°16.	510	50°56.	685	13°16.	584
Empfänger 1	50°56.	748.6	13°16.	374	50°56.	786	13°16.	504
Empfänger 2	50°56.	780.0	13°16.	343	50°56.	815	13°16.	476
Empfänger 3	50°56.	815.8	13°16.	314	50°56.	844	13°16.	444
Empfänger 4	50°56.	848.0	13°16.	284	50°56.	879	13°16.	413
Empfänger 5	50°56.	881.3	13°16.	255	50°56.	907	13°16.	382



Abbildung 7: Laubwald (Eichen und Birken) der nördlichen Waldkante (links) und Ansicht der südlichen Waldkante im Bereich Laubwald (rechts)

3.2 Messzeitraum

Modul 1

Für die Bestimmung von Schallgeschwindigkeitsgradienten ist die genaue Messung von Wind- und Temperaturgradienten notwendig. Deshalb ist die Abstimmung aller beteiligten Sensoren im Freiland und im Labor unerlässlich, um Unterschiede festzustellen. Diese meteorologischen Vergleichsmessungen wurden vom 10.-16.09.2014 mit acht Ultraschallanemometern auf dem Testgelände Grillenburg durchgeführt. Erste akustische Testmessungen wurden am 02.10.2014 im Tagzeitraum über einer Wiesenfläche in Grillenburg vorgenommen.

Die akustischen Messungen zum Sommeraspekt im Hauptmessgebiet bei Freiberg (Langhennersdorf) wurden im Zeitraum vom 09.10. bis 29.10.2014, typischerweise zwischen ca. 11:00 und 17:00 Uhr durchgeführt. Am 30.10.2014 wurde einmalig ab 06:00 Uhr gemessen. Zeitlich synchronisierte Messungen Meteorologie-Akustik (entsprechend Datenlogger Meteorologie) fanden ab 19.10.2014 statt.

Tabelle 4: Zeitangaben der akustischen Messungen mit Messausstattung (Modul 1)

Tag Zeitraum	Art der Messung	Entfernung Lautsprecher	Anzahl Mikrofone	Entfernung Mikrofone
02.10.2014 11:00-17:30 MESZ	Wiese	Freifeld	2 x 5 parallel	5 x 20 m
09.10.2014 13:30-14:30 MESZ 14:45-15:35 MESZ	Laubwald Laubwald	55 m	2 x 5 parallel 2 x 5 einzeln	je 5 x 11 m 15 x 11 m
19.10.2014 12:00-17:45 MESZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75m
20.10.2014 13:50-15:20 MESZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75m
21.10.2014 11:18-14:35 MESZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75m
24.10.2014 12:35-16:30 MESZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75m
26.10.2014 10:20-15:00 MEZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75m
27.10.2014 11:00-12:00 MEZ 12:15-14:45 MEZ 15:00-16:40 MEZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln 2 x 5 parallel 2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
28.10.2014 13:15-15:05 MEZ 15:15-16:00 MEZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln 2 x 5 parallel	5 x 11 m / 5 x 75 m
29.10.2014 11:30-16:00 MEZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 parallel	5 x 11 m / 5 x 75 m
30.10.2014 06:00-11:05 MEZ 11:55-12:40 MEZ 13:00-14:00 MEZ 14:40-15:40 MEZ 16:00-16:45 MEZ	Nadelwald Nadelwald Nadelwald Laubwald Laubwald	55 m 100 m 200 m 200 m 100 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m 5 x 20 m / 5 x 75 m 5 x 50 m / 5 x 75 m 5 x 50 m / 5 x 75 m 5 x 20 m / 5 x 75 m

Tag Zeitraum	Art der Messung	Entfernung Lautsprecher	Anzahl Mikrofone	Entfernung Mikrofone
31.10.2014				
06:00-11:05 MEZ	Nadelwald-Nord			9 x 75 m
11:55-12:40 MEZ	Laubwald-Nord	Freifeld	Einzel	9 x 75 m
13:00-14:00 MEZ	Laubwald-Süd			8 x 75 m
14:40-15:40 MEZ	Nadelwald-Süd			6 x 75 m
03.11.2014				
13:00-16:00 MEZ	Feld/Wald	Impedanzmessungen	13 x Einzel (Impuls)	

Die meteorologischen Profilmessungen wurden durchgängig vom 13.10.2014 bis zum 02.11.2014 betrieben. Der hochfrequente Datensatz (im Sinne mikrometeorologischer Messungen: 10 Hz) liegt mit wenigen Unterbrechungen aufgrund von Spannungsabfall und Synchronisierung der Datenlogger der beiden meteorologischen Messmasten vor. Während der akustischen Messungen stehen vollständige Datensätze der drei Windkomponenten, der akustisch virtuellen und der aktuellen Lufttemperatur zur Auswertung bereit. Mit diesen Daten werden die Vertikalprofile der effektiven Schallgeschwindigkeit an zwei verschiedenen Stellen in der Nähe des Waldgebietes bestimmt. Dabei werden statistische Maßzahlen für verschiedene Zeiträume berechnet, um die meteorologisch bedingten Schallausbreitungsbedingungen und ihre Variabilität zu charakterisieren (Kap. 5.2 und 5.3).

Modul 2

Tabelle 5: Zeitangaben der akustischen Messungen mit Messausstattung (Modul 2)

Tag Zeitraum	Art der Messung	Entfernung Lautsprecher	Anzahl Mikrofone	Entfernung Mikrofone
11.03.2015				
11:59-13:47 MESZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
13.03.2015				
13:58-15:21 MESZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
17.03.2015				
14:31-16:19 MESZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
18.03.2015				
11:33-16:15 MESZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
19.03.2015				
12:09-16:44 MEZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
20.03.2015				
12:52-15:53 MEZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
23.03.2015				
14:08-17:08 MEZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
24.03.2015				
05:24-11:39 MEZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
25.03.2015				
10:43-13:58 MEZ	Laubwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m
27.03.2015				
13:00-15:12 MEZ	Nadelwald	55 m	2 x 5 einzeln	5 x 11 m / 5 x 75 m

Die meteorologischen Vergleichsmessungen wurden vom 13.-17.02.2015 mit acht Ultraschallanemometern auf dem Testgelände Grillenburg durchgeführt. Der Aufbau der Messeinrichtungen fand am 12.02.2015 und der Abbau am 17.02.2015 statt.

Am 09.03.2015 wurden die Profilmesseinrichtungen im Messgebiet aufgebaut. Bereits am 10.03.2015 konnten beide Messmasten mit insgesamt sieben Ultraschallanemometern in den Dauerbetrieb gehen. Die meteorologischen Profilmessungen wurden durchgängig bis zum 31.03.2015 betrieben. Zeitlich synchronisierte Messungen Meteorologie-Akustik (entsprechend Datenlogger Meteorologie) fanden ab der ersten Akustikmessung statt. Der Abbau der Mastsysteme erfolgte am 01.04.2015. Der hochfrequente Datensatz der beiden meteorologischen Messmasten liegt mit wenigen Unterbrechungen vor. Als problematisch erwiesen sich Sturmperioden, die auch zu einer Verdrehung des Clarkmastes und abgesprengten Abspannungen am 17.03.2015 führten. Der Mast mit allen Auslegern wurde zeitnah wieder in die ursprüngliche Position zurückgebracht.

3.3 Umgebungsbedingungen

Modul 1

Zu Beginn der gemeinsamen akustisch-meteorologischen Messphase herrschte eine anhaltende Südwestströmung vor, die zyklonal geprägt war. Es kam zeitweise wechselhaftes und mildes Wetter vor mit Niederschlägen in der Nacht vom 13.10.2014 bis in die Vormittagsstunden des 14.10.2014. Die zeitweisen Niederschläge dauerten bis zum 16.10.14 an. Die Lufttemperatur schwankte in dieser Zeit zwischen 10 °C in den Morgenstunden und 20 °C am Nachmittag. Anschließend fand ein Übergang in eine antizyklonal geprägte Südlage statt, die durch eine trockene Phase vom 17.-19.10.2014 und ansteigende Tagesmaxima der Lufttemperatur bis zu 23 °C am 19.10.2014 geprägt war. Es erfolgte ein erneuter Übergang zu wechselhaftem Wetter (Großwetterlage: West zyklonal) bis hin zu einer Sturmlage, die sich am 21./22.10.2014 entwickelte (Nordwest zyklonal). Am 20.10.2014 regnete es zeitweise in den Früh- und Vormittagsstunden. Am 21.10.2014 verstärkte sich die Niederschlagstätigkeit in den Nachmittagsstunden und hielt bis zum 22.10. an (Messung am 22.10. um 07:00 Uhr in Tharandt: 17,9 mm). Die Niederschläge nahmen am 23.10.2014 ab. Danach stellte sich wieder etwas ruhigeres Wetter ein (Brücke Mitteleuropa und WinkelWest) mit Übergang in die Großwetterlage Südwest antizyklonal. Diese Wetterlage hielt bis zum Ende des Messzeitraumes an und führte zu mildem Herbstwetter mit gebietsweise zähem Nebel bzw. Hochnebel. Ab 25.10.2014 blieb es trocken.

Entsprechend der Niederschlagssituation gestalteten sich auch die Bodenverhältnisse zwischen einem trockenen, verfestigten Boden auf dem Mais-Stoppelfeld, einem relativ nassen Boden nach Bodenbearbeitung (Feld mit Einsaat) und einem mit Wasser gesättigten Boden mit Pfützen. Abbildung 8 bis Abbildung 10 dokumentieren die Bodenverhältnisse im Messgebiet.



Abbildung 8: Bodenzustand am 08./09.10. (links) und am 15.10.2014 (rechts) auf dem Mais-Stoppelfeld



Abbildung 9: Bodenzustand am 19.10. (links, Mitte) und am 29.10.2014 (rechts)

Die Änderung von Vegetationsparametern (Laubfärbung) der Eichenbäume, die den gesamten Bestand umrandeten, ist in der Abbildung 10 dargestellt.



Abbildung 10: Waldrand Anfang Oktober (links) und Anfang November (rechts)

Modul 2

Während der Aufbauphase der Mastmessungen am 09.03.2015 hatte die Kaltfront eines Tiefs bei Spitzbergen die nördlichen Mittelgebirge erreicht und kam unter Auflösung noch etwas weiter nach Süden voran. Niederschlag war seit dem 07.03.2015 nicht mehr registriert worden. Bezüglich der großräumigen Wetterlage herrschte zu Beginn der Messkampagne eine Mischung aus HFa und HFz (Hoch Fennoskandien antizyklo-

nal/zyklonal) mit einem Tagesmaximum von ca. 12 °C am 09.03.2015, einem Minimum von 2 °C am 10.03.2015 und relativ strahlungsreichen Tagen mit trockenem Boden bis zum 10.03.2015 vor (Abbildung 11). Bereits in den Nachmittagsstunden des 10.03.2015 stellte sich die Wetterlage auf HFz mit böig auffrischendem Wind, Niederschlag (Tagessummen 1–2 mm in Tharandt) und abnehmendem Lufttemperaturtagesgang (0 –2 °C) um. Während dieser nass-kalten Periode (teilweise mit Nebel, z. B. am 13.03.2015 vormittags, siehe Abbildung 12) kam es teilweise zu Vereisungen der meteorologischen Geräte. Die höchste Niederschlags-summe der gesamten Messperiode wurde am 14.03.2015 in Tharandt mit 4,1 mm gemessen. Am 15.03.2015 stieg die Lufttemperatur dann erstmals wieder signifikant an und erreichte in den frühen Morgenstunden am 16.03.2015 die 6-°C-Marke. Am 16.03.2015 befand sich Deutschland zwischen einer kräftigen, nahezu stationären Höhenantizyklone mit Schwerpunkt über Karelien und einem dipolartigen Höhentief mit Drehzentren über England und dem westlichen Mittelmeer. Dazwischen stellte sich eine zunehmend südliche Höhenströmung ein, mit der gesamt-troposphärisch mildere Luft advehiert wurde. Der starke Druckgradient führte zu einer markanten Windzunahme am 16.03.2015. In den Kamm- und Gipfellagen des Erzgebirges wurden Sturmböen, vereinzelt sogar schwere Sturmböen registriert. Diese Sturmsituation führte auch zu einer Verdrehung des 30-m-Mastes.

Im Anschluss setzte eine Wetterberuhigung ein. Die Lufttemperatur erhöhte sich auf 10–13 °C im Tagesmaximum vom 17. bis 19.03.2015. In Tharandt wurde sogar ein Spitzenwert von 16 °C erreicht. Insbesondere der 18. und 19.03.2015 können als ideale Strahlungstage mit relativ geringen Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet werden. Deutschland gelangte in dieser Periode bis zum 20.03.2015 unter den Einfluss eines von den Britischen Inseln nach Norddeutschland gerichteten Höhenrückens, der dann jedoch mit Annäherung eines kräftigen Randtroges von Norden her nach Süden abgedrängt und abgebaut wurde. Es setzte merkliche Abkühlung ein. Niederschlag fiel jedoch erst wieder am 21./22.03.2015 in den Nachtstunden. Diese Troglage mit wechselhaftem und kühlem Wetter hielt weiterhin an. Niederschläge waren jedoch nur am 22.03.2015 zu verzeichnen. Nach einem Minimum von -4 °C am 23.03.2015 nahmen die Lufttemperaturwerte in den Folgetagen wieder deutlich zu. Es herrschten frostfreie und strahlungsreiche Bedingungen mit Tagesmaxima bis zu 12 °C. Das Ende des Messzeitraumes war ab 26.03.2015 durch eine winkelförmigen Westlage mit Übergang zu einer zyklonalen Nordwestlage zum Monatswechsel gekennzeichnet. Ein Sturmtief stellte erneut hohe Anforderungen an die Standfestigkeit der Messmasten und die Funktion der Messgeräte. Akustische Messungen waren in dieser Periode aufgrund der meteorologischen Randbedingungen nicht möglich.

Abbildung 11 bis Abbildung 13 zeigen weitere Beispiele für den Zustand von Vegetation und Boden im Laubwald bzw. Nadelwald während der Messungen im Modul 2.



Abbildung 11: Bodenzustand während der Messungen am 10.03.2015 auf dem nördlichen (links, Mitte) und südlichen (rechts) Feld



Abbildung 12: Bodenzustand während der Messungen am 13.03.2015 auf dem nördlichen (links) und südlichen (rechts) Feld



Abbildung 13: Bodenbestand im Laubwald zwischen den Birken (links), zwischen den Eichen (Mitte) und im Nadelwald (rechts)

4 Vorbereitung und Durchführung der Messungen

4.1 Akustische Messungen

4.1.1 Allgemeine Vorgehensweise

Primäres Ziel der akustischen Messungen ist die Verifizierung der akustischen Dämpfung bei der Schallausbreitung über und durch Waldflächen. Diese werden als zusätzliche Pegelminderung A_{misc} (Walddämpfung A_{fol}) zur Ausbreitungsdämpfung (A_{div} = Kugelwellendivergenz), üblicherweise als Oktavwerte in dB/m angegeben. Die dafür verwendeten Werte, z. B. aus der DIN ISO 9613-2, stammen aus Messungen verschiedener Autoren mit unterschiedlichen Messabständen, Anregungsmethoden und Messverfahren und stellen sehr wahrscheinlich Mittel- oder Mindestwerte für unterschiedliche Bewuchsarten dar.

Ziel der aktuellen Messungen ist es nun, neben einer zuverlässigen Verifizierung der Einfügungsdämpfung einer typischen Waldfläche selbst, auch Aussagen zum zusätzlichen meteorologischen Dämpfungseffekt ma-

chen zu können, der sich insbesondere bei größeren Prognoseabständen und zunehmendem Einfluss der Schallwelle, die sich über die Waldfläche hinweg ausbreitet, bemerkbar macht. Die Variabilität der akustischen Messergebnisse soll mit der Variabilität der meteorologischen Schallausbreitungsbedingungen in Bezug gesetzt werden, um einen Ansatz für die Prognoseunsicherheit von Schallausbreitungsgrößen aufzuzeigen.

Dazu wurden bei Anregung mit Lautsprecher über einen längeren Zeitraum (vergleiche Tabelle 4 und Tabelle 5) für zwei feste Messstrecken bei unterschiedlichen meteorologischen Ausbreitungsbedingungen Daten erhoben. Die Messanordnung wurde so gewählt, dass sowohl die sich durch den Wald ausbreitende Welle (M:S5–M:E1) als auch deren Zusammenwirken mit der sich über dem Wald ausbreitenden Welle (M: S2...S4–M: E2...E5) beschrieben werden kann (siehe Abbildung 14).

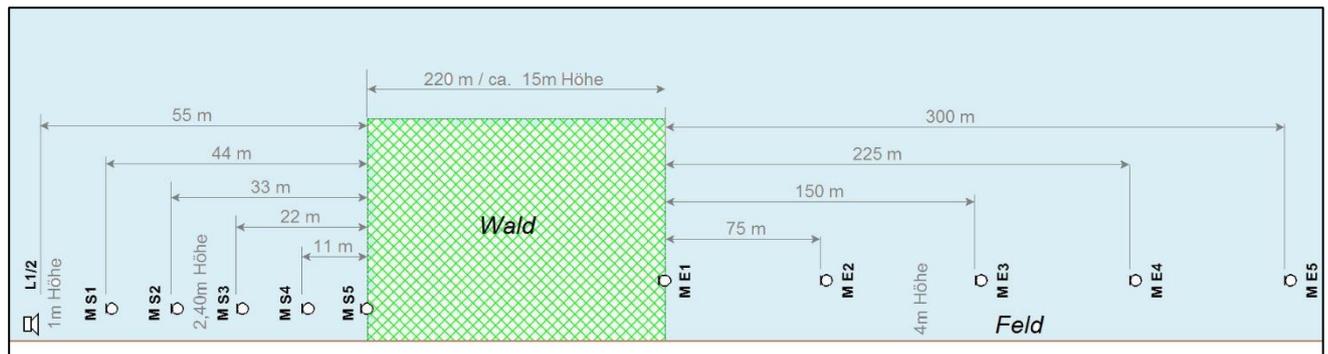


Abbildung 14: Schema der Messanordnung für die akustischen Messungen (Modul 1)

Zeitgleich zu diesen akustischen Messungen wurden sowohl vor als auch hinter dem Waldgebiet die zugehörigen meteorologischen Daten bestimmt (vgl. Kap. 5.2). Mit diesen Messdaten können vorhandene Daten eines akustisch-meteorologischen Berechnungsmodells der Professur Meteorologie der TUD und aus Literaturangaben verifiziert werden.

4.1.2 Wahl der Schallanregung

Bei früheren Untersuchungen (REICHE & KRAPF 2008) wurden für die Schallausbreitungsmessungen ausschließlich „natürliche“ Quellen wie Fahrzeuge auf Straßen und Autobahnen sowie Eisenbahnen genutzt. Diese entsprechen zwar den im Schallimmissionsschutz üblichen Quellen, führen aber zu erheblichen Problemen bei der Verifizierung der Freifeld-Ausbreitungsdämpfung und erreichen bereits nach kurzen Abständen nur noch vereinzelt einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand über den gesamten interessierenden Frequenzbereich. Eine solche Herangehensweise war deshalb für die vorliegenden Untersuchungen ungeeignet. Deshalb wurde eine Anregung mit Lautsprechern gewählt, weil diese eine identisch reproduzierbare akustische Anregung mit gleichbleibend hoher Lautstärke über einen sehr weiten Frequenzbereich ermöglicht. Genutzt wurden zwei Hochleistungs-Kompaktlautsprecherboxen (JBL: PRX 635), die von einem transportablen 2,7 kW-Stromgenerator mit Netzspannung versorgt wurden.

Um die Anregungslautstärke zu maximieren, wurden drei Signalkonfigurationen getestet (vgl. Abbildung 15):

- Rosa Rauschen linear
- Rosa Rauschen komprimiert
- Rosa Rauschen komprimiert mit Höhenabsenkung ab 500 Hz 2 dB/Oktave

In Verbindung mit dem Lautsprecherfrequenzgang und dem typischen Hintergrundspektrum wurde schließlich bei den Messungen einheitlich das Signal „Rosa Rauschen komprimiert“ verwendet. Die elektrischen Anregungssignale wurden digital auf einem Signalgenerator (NTI: „Minirator MR-PRO“) gespeichert und während der Messungen periodisch wiedergegeben.

Für das breitbandige Anregungssignal „rosa Rauchen/komprimiert linear“ (vgl. Abbildung 15) erreichen die Lautsprecher in Hauptabstrahlrichtung einen A-bewerteten Summenpegel in 1 m Entfernung von $L_{1m} \approx 118$ dB(A).

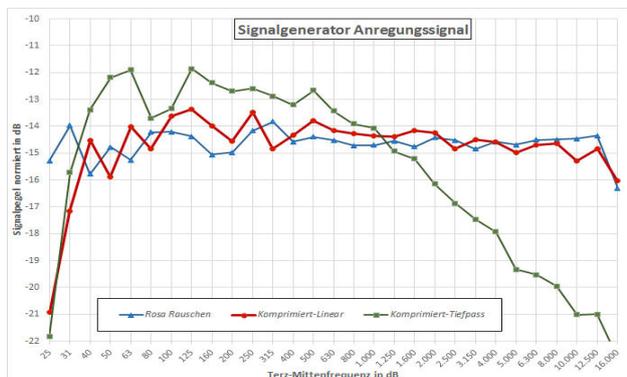


Abbildung 15: Spektren der untersuchten elektrischen Anregungssignale

Für jeden Messdatensatz wurde auch ein Referenzspektrum zur Kontrolle der tatsächlichen akustischen Anregung ermittelt. Um Nahfeldeffekte der Lautsprecher auszuschließen, wurden diese Messungen stets in 11 m Entfernung vorgenommen. In den Spektren sind deshalb bereits deutlich die Einflüsse der Bodendämpfung zu erkennen.

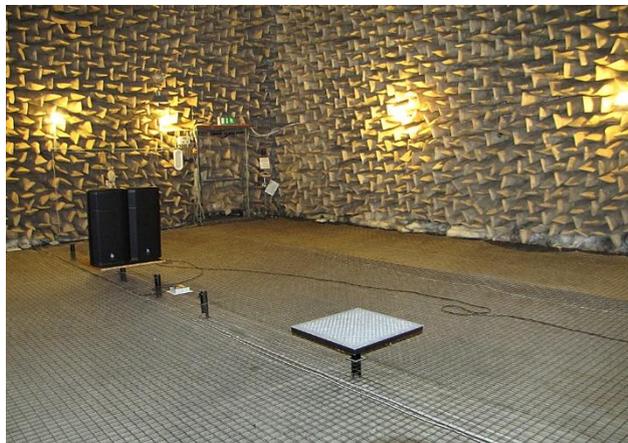


Abbildung 16: Vermessung der Lautsprecher im Großen Reflexionsarmen Raum der TU Dresden

Um ein davon unbeeinflusstes Referenzspektrum für die Auswertung der Ausbreitungsdämpfungen zu erhalten, wurde im reflexionsarmen Raum das für die Messung genutzte Lautsprechercluster vermessen. Dieses bestand aus den beiden bereits erwähnten Hochleistungslautsprechern (JBL: PRX 635), die entsprechend dem Abstand, Öffnungswinkel und Höhe der Messungen aufgestellt wurden (Abbildung 16). Für die Messungen im reflexionsarmen Raum wurden die Einstellungen für den Signalpegel und die Verstärkung der Lautsprecher aus den Standard-Messungen übernommen. Anhand der gewonnenen Messwerte für die drei untersuchten Signale (Rosa Rauschen, Rosa Rauschen komprimiert, Rosa Rauschen komprimiert mit Höhenab-

senkung ab 500 Hz 2 dB/Oktave) wurden die mittleren Spektren der 1-m-Pegel gebildet; sie sind in Abbildung 17 dargestellt.

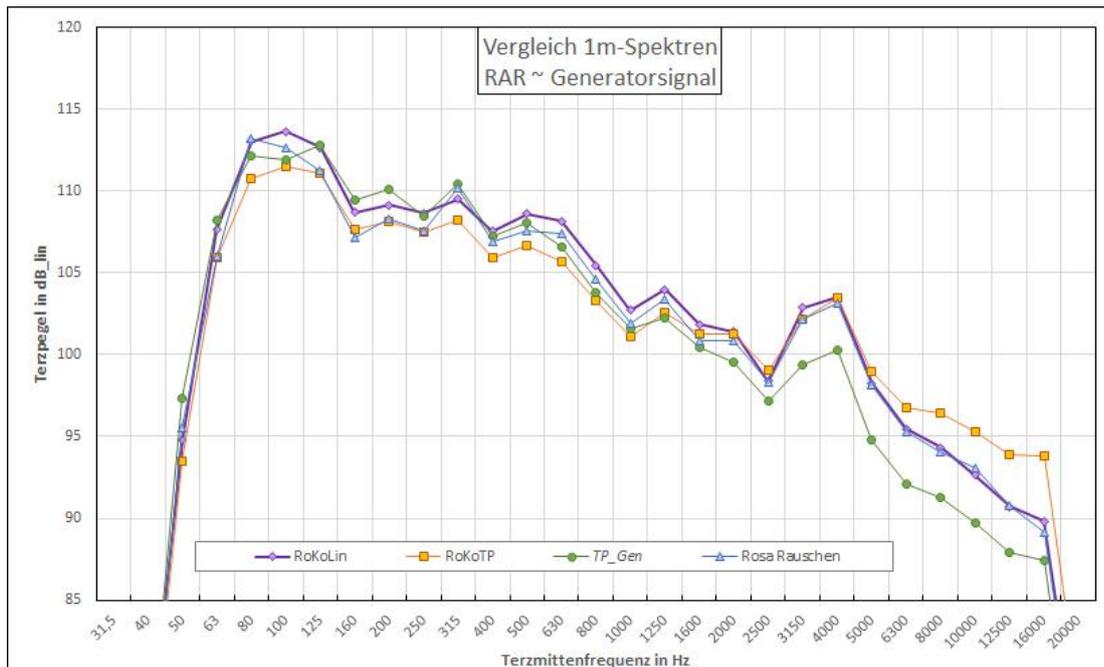


Abbildung 17: Vergleich der 1-m-Spektren im reflexionsarmen Raum

Entsprechend den Abstimmungen der Eröffnungsbesprechung beim Auftraggeber (ZIEMANN & WOLLMANN 2014) wurde eine mittlere Quellhöhe von $h_s \approx 1$ m realisiert, indem beide Lautsprecher auf niedrige Fußbänke aufgestellt wurden (Abbildung 18). Diese Höhe entspricht denjenigen bodennaher Verkehrsquellen wie der Räder von Straßen- oder Schienenfahrzeugen auf leicht erhöht liegenden Fahrbahnen.

Während der Erprobungsmessungen wurden sowohl für die Schallausbreitung über Wiese als auch über Laubwald durch die Verwendung von Lautsprecher-Stativen zusätzlich Lautsprecherhöhen von ca. 2 m genutzt.



Abbildung 18: Sendeseitige Messstrecke mit Lautsprecheraufstellung

4.1.3 Schallaufzeichnung

Um auch die Details der meteorologischen Effekte einschließlich turbulenter Schwankungen (z. B. des Windinflusses) in ausreichender Auflösung erfassen zu können, wäre eine hohe zeitliche Auflösung der Datensätze wünschenswert. Infolge der zum Teil relativ großen Abstände zwischen den meteorologischen und den akustischen Messpunkten ist der Datenzusammenhang für derartige hochfrequente Schwankungen (im Sekundenbereich bzw. darunter) allerdings ohnehin nur lose, weil deren Laufzeit (örtliche Ausbreitung des jeweiligen Effekts) die zeitliche Messauflösung um ein Mehrfaches übersteigt. Weil die Untersuchung des Brechungseinflusses (mittlere meteorologische Größen) gegenüber dem meteorologischen Streuungseinfluss (turbulente Schwankungen) im Vordergrund stand, wurde deshalb auf ein Zeitfenster von 32 s orientiert, wobei bei Bedarf in der Nachauswertung durch Teilfensterung einzelne Zeitabschnitte mit einer Zeitauflösung von 4 s (sendeseitig) bzw. 5 s (empfangsseitig) analysiert werden können. Die Messungen wurden in unregelmäßigen Abständen wiederholt, um tagesstypische Änderungen erfassen zu können.

Der zu Beginn der Messungen zunächst noch vorhandene Maisbestand südlich des Waldareals begrenzte den maximalen Lautsprecherabstand bis zur Waldkante auf 55 m (Abbildung 4). Auch wenn ab dem 27.10.2014 das Maisfeld vollständig abgeerntet worden war, wurde die ursprüngliche Lautsprecheraufstellung in Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beibehalten. Wegen der nur geringen Abstände zur Schallquelle wurden die Mikrofone auf der Sendeseite (d. h. südlich vor dem Wald) in 2,40 m Höhe auf Stativen positioniert. Alle Mikrofone waren mit Windschutz versehen. Die Strecke Lautsprecher–Waldkante wurde in fünf etwa gleichgroße Abstände geteilt, so dass sich ca. alle 11 m ein Mikrofonstandort ergibt, wobei der entfernteste identisch mit der Waldkante war.

Entsprechend den Abstimmungen mit dem Auftraggeber (ZIEMANN & WOLLMANN 2014) wurden die fünf empfangsseitigen Mikrofonstandorte (d. h. auf der abgewandten nördlichen Seite) in jeweils 75 m Entfernung zueinander positioniert, wobei der erste Mikrofonstandort identisch mit der Waldkante war (Abbildung 14). Entsprechend der für Schallimmissionsprognosen üblichen Berechnungshöhe von 4 m wurden alle Mikrofone mittels Stativen in 4 m Höhe über dem Boden positioniert. Alle Mikrofone waren mit Windschutz versehen.

Für die Standardmessung wurde sende- und empfangsseitig jeweils ein integrierender Präzisions-Schallpegelmesser

■ Sendeseite: NTI AUDIO: XL2, Nr. A2A-02332-D0 mit Mikrofon M 2210 Nr. 1071;

■ Empfangsseite: NTI AUDIO: XL2-TA, Nr. A2A-06639-E0) mit Mikrofon (NTI MA220, Nr. 2511)

eingesetzt und jeweils mindestens 30 s lang Terzanalysen im 5-s-Raster sowie als energieäquivalente Mittelwerte für die jeweilige Messdauer aufgezeichnet.

Dadurch war eine zeitgleiche Messung an jeweils einem Sender- und einem Empfangsplatz möglich. Die Messungen an den unterschiedlich entfernten Sende- und Empfangsorten mussten jedoch nacheinander ausgeführt werden.

Zur Kontrolle eines ausreichenden Signal-Stör-Abstandes wurde unmittelbar vor jeder Messung der Hintergrundpegel aufgezeichnet und bei der Auswertung terzweise mit dem zugehörigen Messsignal verglichen. Soweit möglich, wurde terzweise eine Störgeräuschkorrektur des Messsignals durchgeführt; Terzwerte mit negativem Signal-Stör-Abstand wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Pegelerfassung wurden täglich beide Kanäle (sende- wie empfangsseitig) mit einem akustischen Kalibrator (Brüel & Kjaer: Typ „4231“) auf $L_{\text{ref}} = 94$ dB kalibriert.

Ergänzend wurden während des ersten Moduls auch wiederholt Mehrkanalmessungen durchgeführt, die eine zeitgleiche Messwerterfassung an allen 10 Mikrofonstandorten ermöglichen sollten. Eine durchgehende Nutzung dieser Technik erwies sich jedoch aus verschiedenen Gründen als nicht praktikabel, sodass sich die in diesem Bericht dokumentierten Ergebnisse ausschließlich auf die seriell mittels Schallpegelmessern ausgeführten Messungen beziehen (jeweils an zwei Punkten vor/hinter dem Wald gleichzeitig; alle 10 Punkte innerhalb ca. 30 min).

4.1.4 Messungen mit 100 m und 200 m Entfernung des Senders

Ergänzend wurden Messungen mit vergrößerten Senderabständen durchgeführt. Dafür wurden die Lautsprecher 100 bzw. 200 m von der Waldkante entfernt aufgestellt.

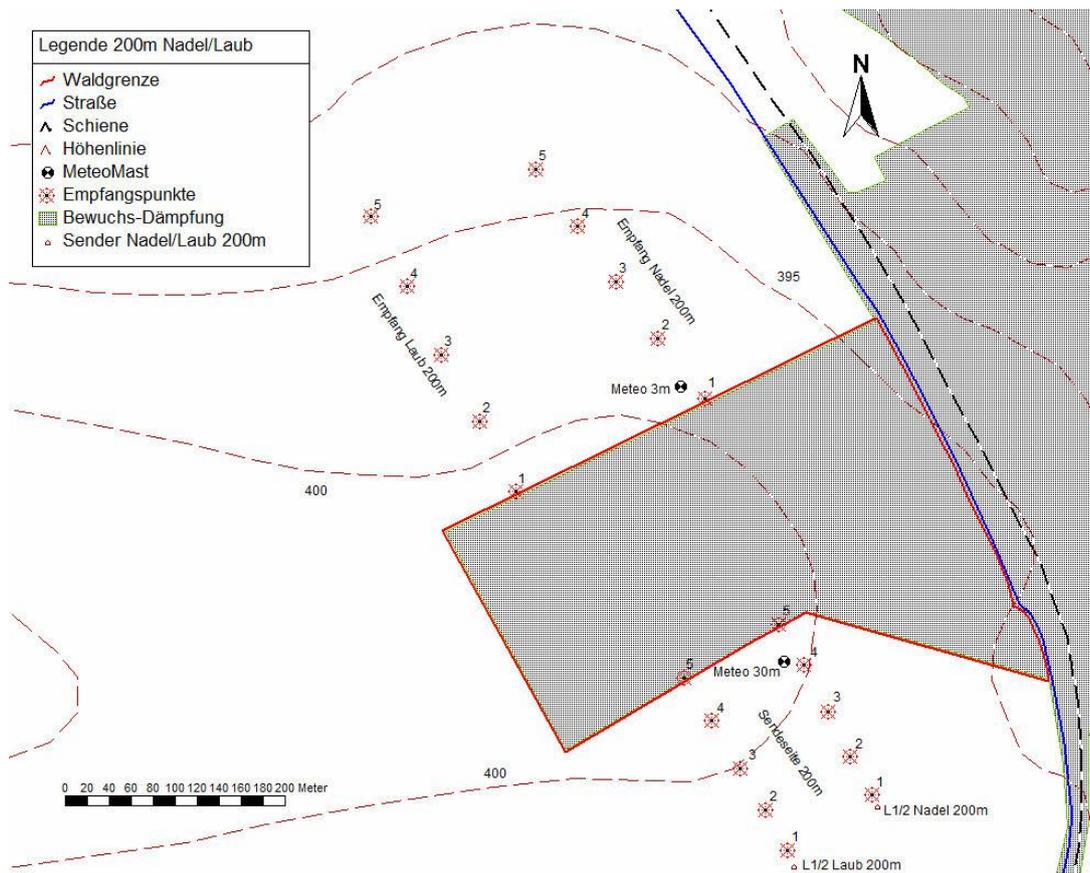


Abbildung 19: Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – 200 m

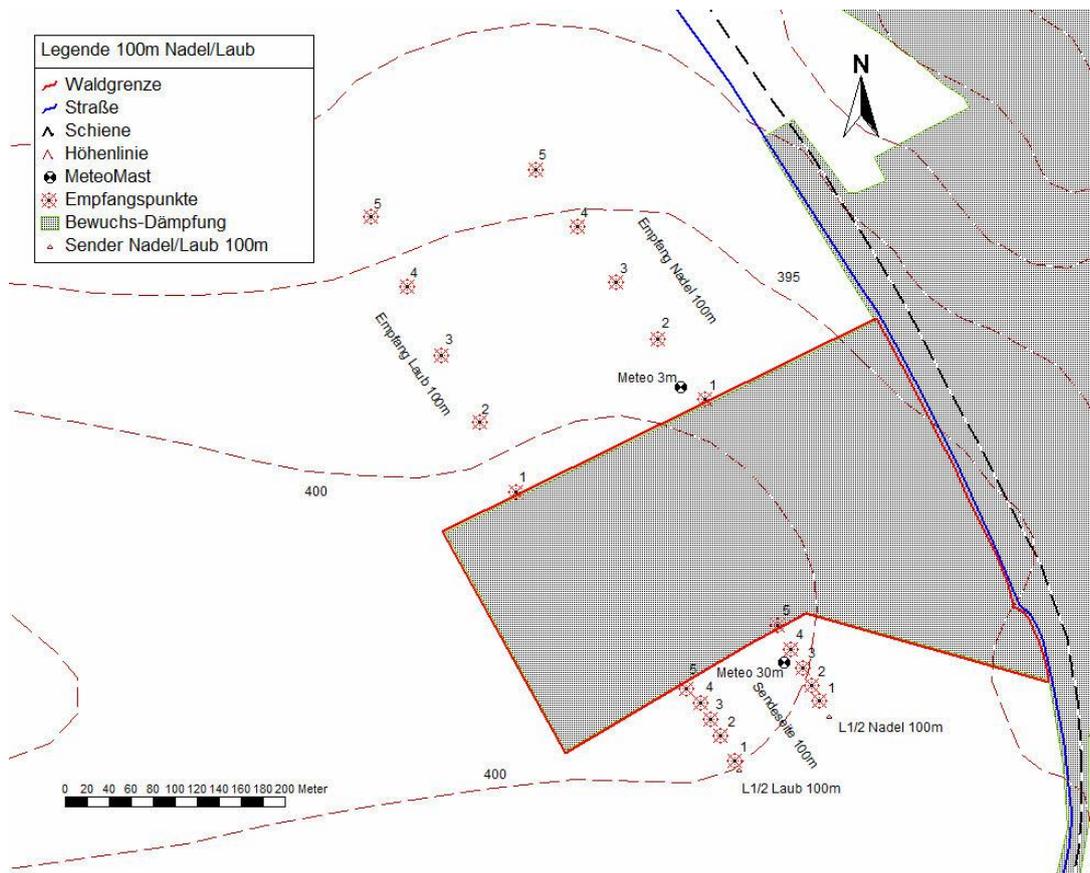


Abbildung 20: Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – 100 m

Die Mikrofone wurden in gleichmäßigen Abständen zwischen Sender und Waldkante positioniert. Wegen der dadurch ohnehin vergrößerten Gesamtabstände wurden die Mikrofonstandorte auf der Empfängerseite entsprechend dem Standardmessaufbau mit 4 x 75 m Abstand zur abgewandten Wandkante beibehalten. Somit ergeben sich die in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellten Messaufbauten. Die Messung wurde sowohl für den Laubwald als auch für den Nadelwald durchgeführt. Es wurde die gleiche Messtechnik wie auch bei der Standardmessung verwendet.

Aus logistischen Gründen konnten diese Messungen im Modul 2 nicht wiederholt werden.

4.1.5 Messungen der Bodenimpedanz

Nähere Ausführungen zur Messmethodik und zu den Auswertungen des Schallabsorptionsgrades über verschiedenen Bodentypen und Oberflächenarten sind dem Anhang A (Anlagenband) zu entnehmen. Im Anhang B werden zur Bodenimpedanz Simulationsergebnisse vorgestellt, die auf die geometrischen Randbedingungen der Messungen angepasst wurden.

Aus logistischen Gründen konnten diese Messungen im Modul 2 nicht wiederholt werden.

4.1.6 Freifeldmessung

Infolge der Messanordnung mit anteilig großen Strecken der freien Schallausbreitung über Boden setzt sich der gemessene Gesamteffekt der Zusatzdämpfung neben den meteorologischen Einflüssen aus unterschiedlichen Komponenten zusammen:

- 55 m Bodendämpfung „Maisstoppeln“ und Reflexion an der Waldkante auf der Sendeseite

■ 220 m Bewuchsdämpfung für das jeweilige Waldstück (Vegetations- und Bodeneffekt)

■ 300 m Bodendämpfung „Saat“ auf der Empfangsseite

Um möglichst alle Komponenten getrennt voneinander quantifizieren zu können, wurden am 31.10.2014 ergänzende Messungen der freien Schallausbreitung über den betreffenden Bodenflächen vorgenommen. Dafür wurden fünf verschiedene Messpfade untersucht:

1. Schallausbreitung über dem abgeernteten Maisfeld mit weitgehend trockenem und relativ festem Boden in südlicher Richtung jeweils in den Achsen der sendeseitigen Standard-Messpfade „Nadel“ und „Laub“
2. Schallausbreitung über der aufgehenden Saat mit relativ feuchtem, lockerem Boden in nördlicher Richtung jeweils in den Achsen der empfangsseitigen Standard-Messpfade „Nadel“ und „Laub“
3. Schallausbreitung in südwest-nordöstlicher Richtung auf dem Maisfeld, quer zur Achse der Standard-Messpfade während einer Mitwind-Situation

Die Abstände zwischen den einzelnen Mikrofonpositionen betragen 75 m. Es ergaben sich die Messpfade entsprechend Abbildung 21 und Abbildung 22. Für die Aufzeichnungen wurde wiederum ein integrierender Präzisions-Schallpegelmesser verwendet. Das Mikrofon war für alle Messungen auf einem 4 m hohen Stativ abgesetzt. Aus logistischen Gründen konnten diese Messungen im Modul 2 nicht wiederholt werden.

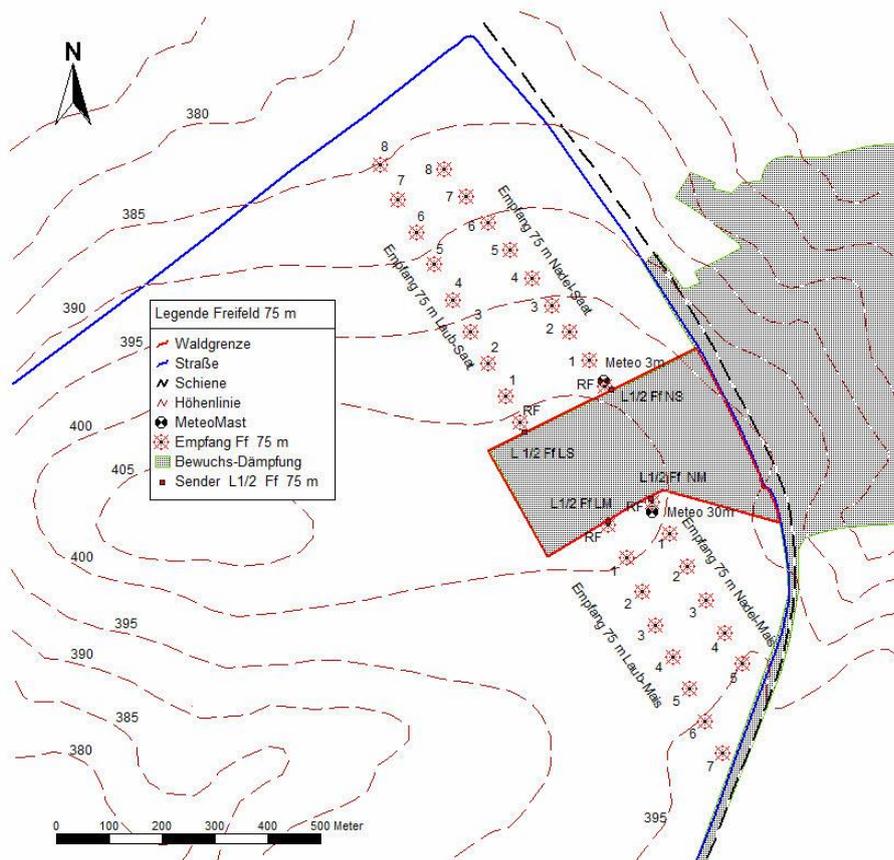


Abbildung 21: Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – Freifeldmessung vor Laubwald und Nadelwald

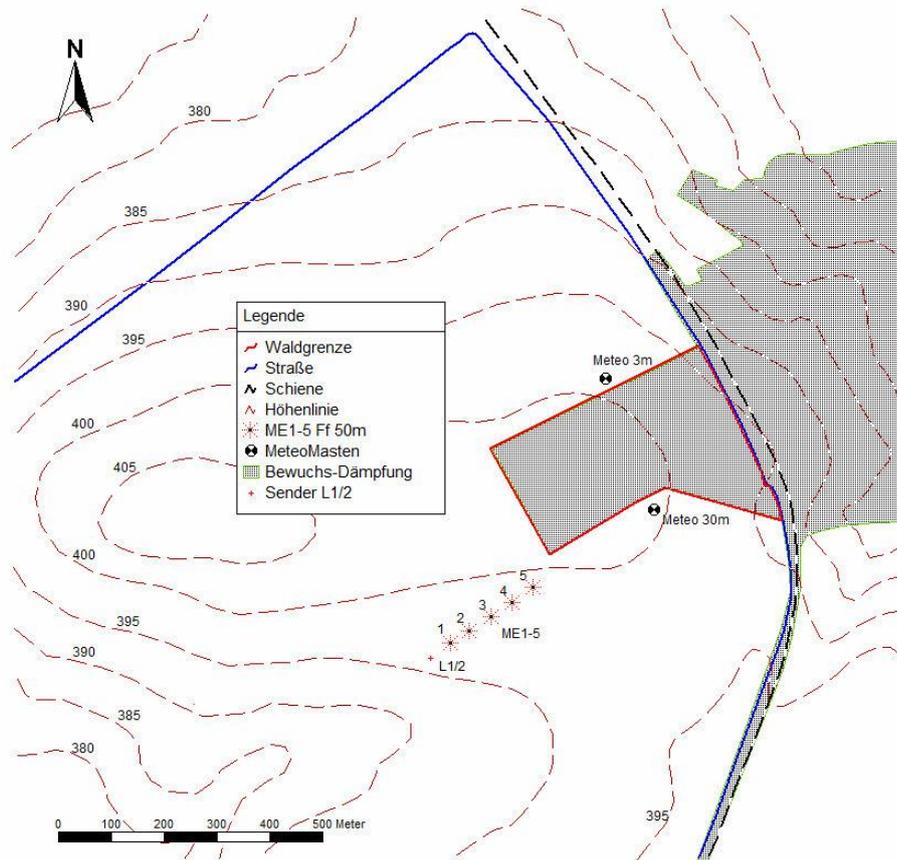


Abbildung 22: Lage der Messpfade im Untersuchungsgebiet – Maisfeld Mitwind

4.2 Meteorologische Messungen

Bei Labormessungen wurden acht baugleiche 3D-Ultraschallanemometer der Fa. Young miteinander verglichen (sieben für die Messung, eines in Reserve), um eine nachfolgende Bestimmung von Vertikalgradienten der horizontalen und vertikalen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und akustisch virtuellen Temperatur zu gewährleisten. Ebenso wurde mit sieben Thermoelementen zur hochfrequenten Messung der Lufttemperatur verfahren. Mastaufbau, Ausleger, Abspannungen, Verkabelung, Loggerprogrammierung mit Synchronisierung von zwei Datenloggern und die autarke Spannungsversorgung mit Akkus (mit Solarunterstützung) wurden für zwei Messmasten vorbereitet und getestet.

Im Anschluss daran wurden die Ultraschallanemometer für Vergleichsmessungen in Grillenburg aufgebaut und betrieben. Weitere Testmessungen fanden im Anschluss an diese Vergleichsmessungen wieder im Labor statt.

4.2.1 Vergleichsmessungen der Ultraschallanemometer in Grillenburg

Modul 1

Für die Vergleichsmessungen in Grillenburg wurden die Ultraschallanemometer in derselben Höhe angebracht und in Hauptwindrichtung ausgerichtet. Die Datenauswertung und der Datenvergleich der drei Windkomponenten sowie der akustisch virtuellen Temperatur erfolgten entsprechend der Windrichtung (sektorweise Zuordnung), um Abschattungs- und Turbulenzeffekte durch die Ausleger und Halterungen zu minimieren. Auf diese Weise wurden Windrichtungen um Nordwest (300° – 330°) bzw. Südost (120° – 150°) nicht mit in die Be-

trachtung einbezogen. Der Nordpfeil der Sensoren zeigte in Richtung 315°, was bei der Auswertung berücksichtigt wurde.

Die Messungen wurden mit acht typgleichen Ultraschallanemometern (YOUNG 81000V, R. M. Young Company USA) durchgeführt, von denen sieben Sensoren für die nachfolgenden Messungen zum Einsatz kamen. Die verwendeten Ultraschallanemometer zeichnen sich dadurch aus, dass der dreidimensionale Windvektor sowie die Schallgeschwindigkeit (akustisch virtuelle Temperatur) ohne mechanisch beweglich Teile, trägheitsfrei, reaktionsschnell, präzise und mit hoher zeitlicher Auflösung (hier: 10 Hz) gemessen werden. Die Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Schallgeschwindigkeit werden mit einer Auflösung von 0,01 m/s bzw. 0,1 ° bzw. 0,01 m/s und einer Genauigkeit von +/-1% bzw. +/-2° bzw. 0,1% (bis 30 m/s, darüber +/-3% bzw. +/-5 ° bzw. 0,05 m/s) bestimmt. Aus den Vergleichsmessungen wurden Regressionsgleichungen abgeleitet, mit denen die Rohdaten der Messungen korrigiert werden. Damit ist sichergestellt, dass unterschiedliche Wind- und Temperaturwerte bei den nachfolgenden Profilmessungen tatsächlich durch vertikale Wind- und Temperaturgradienten verursacht werden und nicht durch Sensorunterschiede.

Modul 2

Vor der Hauptmessperiode im Modul 2 wurde wiederum eine Vergleichsmessung der Ultraschallanemometer über fünf Tage durchgeführt. Der Aufbau der Geräte auf dem Messgalgen entsprach den Messungen in Modul 1. Die Geräte sind in einem Abstand von 0,85 m zueinander auf einem Ausleger angebracht, der sich 1,77 m über der Erdoberfläche befindet. Die Höhe der Geräte über Grund (Mitte Messvolumen) beträgt 2,27 m. Der Nordpfeil der Sensoren zeigt in Richtung 258°. Diese Richtungsverschiebung gegenüber Modul 1 ergab sich aus der vorherrschenden Windrichtung, um störungsfreie Strömungsmessungen zu gewährleisten.

Aus den Vergleichsmessungen wurden abermals Regressionsgleichungen abgeleitet, um eine Korrektur der Rohdaten der Messungen vorzunehmen. Die Ultraschallanemometer wurden während der nachfolgenden Hauptmessperiode entsprechend der aufgetretenen Unterschiede während der Vergleichsmessungen am 30-m-Mast angebracht.



Abbildung 23: Vergleichsexperiment der Ultraschallanemometer in Grillenburg (Modul 2)

4.2.2 Meteorologische Profilmessungen in Langhenndorf

Modul 1

Zur meteorologischen Bewertung der Schallmessungen wurden Dauermessungen von Vertikalprofilen der effektiven Schallgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, akustische Temperatur) durchgeführt. Die effektive Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus der Summe der temperatur- und luftfeuchteabhängigen Schallgeschwindigkeit sowie der Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung. Auf diese Weise fließen verschiedene meteorologische Größen in die effektive Schallgeschwindigkeit ein. Die räumlichen Unterschiede dieser Größe (insbesondere die vertikalen Gradienten) bestimmen Qualität und Quantität des Effekts der Schallbrechung in der Atmosphäre. Betrachtet man vertikale Gradienten der Schallgeschwindigkeit, dann ist der Einfluss des Temperaturgradienten im Mittel größer als derjenige des Luftfeuchtegradienten. Je nach Größe der einzelnen meteorologischen Gradienten überwiegt der Temperatur- oder der Windeinfluss auf die Schallausbreitung (siehe Messungen Module 1 und 2). Je größer der Betrag des Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit ist, desto größer ist auch der Brechungseffekt. Ein positiver Gradient resultiert in einer Abwärtsbrechung und umgekehrt. Rechnet man einen Gradienten von 0,5 1/s in einen Schallstrahlradius um (Annahme kreisförmiger Schallstrahl!), dann resultiert ein Radius von 680 m, bei 0,1 1/s ein Radius von 3,4 km. Diese Werte wurden bei den Messungen häufig erreicht und zeigen einen signifikanten meteorologischen Einfluss auf die Schallausbreitung an. Zum Vergleich geht die Norm DIN ISO 9613-2 von einem Radius von 5 km aus.

Tabelle 6: Übersicht zu den verwendeten Ultraschallanemometern (Modul 1)

Ultraschallanemometer Sensornummer	Bezeichnung der Höhe über Grund	Reale Höhe über Grund (Mitte Messvolumen)	Maststandort (Clarkmast CM 30 m bzw. 3 m)
Young 2319	2 m	1,95 m	CM
Young 2314	5 m	5,00 m	CM
Young 2322	10 m	10,56 m	CM
Young 2321	20 m	20,25 m	CM
Young 2316	30 m	30,77 m	CM
Young 2320	1 m	1,00 m	3 m
Young 2317	3 m	2,90 m	3 m

Tabelle 7: Abstand der Messmasten zu markanten Geländepunkten (Modul 1)

Bezeichnung Messmast	Abstand zu ...	
3 m	Stammraum	16,5 m
	Graben Mitte	15,2 m
	Krone	10,5 m
	Schneise (5 m breit)	9,5 m
2 m bei CM	Clarkmast	8 m, d. h. von Sonic zu Sonic
CM	Maiskante (bis 26.10.)	14 m
	Stammraum	33 m
	Kronenkante	25 m

Zusätzlich wurde die Lufttemperatur im Messvolumen des Ultraschallanemometers mit Thermoelementen gemessen. Die Thermoelemente sind 3–4 cm tiefer als die Mitte des Sonic-Messvolumens installiert.

Für die Profilmessungen wurde ein 3-m-Mast (Abbildung 24) mit zwei Young-3D-Ultraschallanemometern und ein 30-m-Clarkmast (Abbildung 24) mit fünf Young-3D-Ultraschallanemometern verwendet. Die Ausleger mit den Ultraschallanemometern wurden aufeinander abgestimmt und waren in Richtung Südwest ausgerichtet, um eine freie Anströmung bei Hauptwindrichtung zu gewährleisten.

Der Nordpfeil der Sensoren zeigte nach 68° (3 m), 45° (2 m beim Clarkmast CM) bzw. 49° (CM).

Die Messfrequenz der Ultraschallanemometer beträgt 10 Hz. Die nachfolgende Mittelbildung und Berechnung statistischer Maßzahlen enthält damit auch hochfrequente (turbulente) Schwankungen, die einen Einfluss auf die Schallausbreitung haben können. Die Entfernungen der meteorologischen Messmasten zur Waldkante erfolgten in Absprache mit dem Auftraggeber und unter Einbeziehung der vorliegenden Randbedingungen (Zugänglichkeit des Ackers, Ausdehnung des abgeernteten Maisfeldes).



Abbildung 24: 3-m-Mast auf der Nordseite des Waldgebietes (links, Mitte) und 30-m-Clarkmast auf der Südseite des Waldgebietes (Modul 1)

Modul 2

Im Modul 2 wurden ebenfalls Dauermessungen von Vertikalprofilen von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, akustischer Temperatur und Lufttemperatur mit Ultraschallanemometern und Thermoelementen durchgeführt.

Der generelle Messaufbau der Messmasten (3-m-Mast und 30-m-Clarkmast) sowie die eingesetzten Geräte waren identisch zu Modul 1. Die Höhen der Ausleger und Messgeräte wurde beibehalten. In Abhängigkeit von den Ergebnissen der Vergleichsmessungen vor dem Hauptexperiment gab es kleinere Veränderungen bei der Höhenzuordnung der einzelnen Ultraschallanemometer (Tabelle 8) Die Ausleger mit den Ultraschallanemometern wurden aufeinander abgestimmt und waren in Richtung Südwest ausgerichtet. Der Nordpfeil der Sensoren zeigte nach 60° (3 m), 59° (2 m beim Clarkmast CM) bzw. 46° (CM).

Der Abstand der Messmasten zu markanten Geländepunkten war vergleichbar zu Modul 1. Der 3-m-Messmast wurde aufgrund der räumlichen Gegebenheiten (u. a. Untergrund für Verankerung) versetzt und

hatte einen ca. 6 m geringeren Abstand zur Schneise (3 m) gegenüber Modul 1 (Tabelle 8). Die Position des Clarkmastes war um nur 1 m näher am Waldgebiet, was in den Toleranzbereich bei der Einrichtung und Aufstellung des Mastes sowie der Genauigkeit der GPS-Einmessung im natürlichen Gelände fällt.

Tabelle 8: Übersicht zu den verwendeten Ultraschallanemometern (Modul 2)

Ultraschallanemometer Sensornummer	Bezeichnung der Höhe über Grund	Reale Höhe über Grund (Mitte Messvolumen)	Maststandort (Clarkmast CM 30 m bzw. 3 m)
Young 2319	2 m	1,95 m	CM
Young 2320	5 m	5,00 m	CM
Young 2316	10 m	10,56 m	CM
Young 2321	20 m	20,25 m	CM
Young 2317	30 m	30,77 m	CM
Young 2324	1 m	1,00 m	3 m
Young 2323	3 m	2,90 m	3 m

5 Auswertung der Messungen und Ergebnisdiskussion

5.1 Auswertung der akustischen Messungen

5.1.1 Schallausbreitungsmessungen durch und über das Waldgebiet

Modul 1

Die „Zusatzdämpfung“ der Schallausbreitung wurde generell terzweise aus den störschallkorrigierten energieäquivalenten Kurzzeit-Mittelungsspektren bestimmt. Für die Bestimmung der Wald-Dämpfungen wurden alle Werte entsprechend der jeweiligen Entfernung zwischen Sender und Mikrofonstandort bezüglich der geometrischen Ausbreitungsdämpfung im Freifeld korrigiert, die vereinfachend als Kugelwellendivergenz behandelt wurde. Ausgewertet wurden jeweils die folgenden Kenngrößen:

- Zusatzdämpfung (Bodendämpfung, Meteorologieeinfluss und empfangsseitig Bewuchsdämpfung) für die jeweilige Entfernung, bezogen auf den im reflexionsarmen Raum gemessenen ungestörten Lautsprecher-Frequenzgang (gemäß Abbildung 17) in Form von Terz-Spektren
- Bewuchsdämpfung des 220 m tiefen Waldes, bezogen auf das jeweilige an der sendeseitigen Waldkante gemessene Terzspektrum¹ (für diese ist jeweils die Standardabweichung der Pegelwerte für alle betreffenden Messungen mit dargestellt)
- Zusatzdämpfung in Form von A-bewerteten Summenpegeln entsprechend der jeweiligen Entfernung, berechnet aus den Störschall-korrigierten Terzspektren

¹ ergibt sich aus den beiden Mikrofonpositionen an den Waldkanten Sender 5 und Empfänger 1

Die Auswertungen wurden für fünf senderseitige und fünf empfängerseitige Positionen vorgenommen. Zur Erläuterung der nachfolgenden Abbildungen sind in der Tabelle 9 die mittleren Entfernungen der akustischen Messpositionen zusammengefasst. Das Waldgebiet befindet sich zwischen den Positionen „Sender 5“ und „Empfänger 1“.

Tabelle 9: Mittlere Entfernung der sender- und empfängerseitigen Mikrofone vom Lautsprecher für Modul 1

Position	Entfernung zum Lautsprecher in m Laub	Nadel
Sender 1	11	9
Sender 2	19	19
Sender 3	27	25
Sender 4	33	32
Sender 5	44	42
Empfänger 1	271	256
Empfänger 2	339	322
Empfänger 3	408	384
Empfänger 4	476	444
Empfänger 5	546	506

Die in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellten Mittelwerte der frequenzabhängigen Dämpfungen an den jeweiligen Mikrofonstandorten ergeben sich aus den 16 Messdurchläufen für die Messung im Laubwald (Abbildung 25) und den 29 Messdurchläufen im Nadelwald (Abbildung 26) während des ersten Moduls.

Dargestellt sind sowohl die Mittelwerte für die Zusatzdämpfung auf der Empfängerseite (Bodendämpfung, Bewuchsdämpfung und Meteorologieeinfluss) als auch auf der Senderseite (Bodendämpfung und Meteorologieeinfluss). Außerdem wird die Bewuchsdämpfung für den Wald als zusätzliche Pegeldifferenz zwischen den beiden Waldkanten² frequenzabhängig angegeben (rote Kurve mit Rauten). Da sich beide Mikrofonpositionen mindestens 10 m unter Kronenhöhe befinden (Mikrofonhöhen sendeseitig 2,40 m, empfangsseitig 4,00 m), entsprechen diese Werte nahezu ausschließlich der Schallausbreitung durch den Wald hindurch im Sinne einer direkten „Durchstrahlung“.

² ergibt sich aus den beiden Mikrofonpositionen an den Waldkanten Sender 5 und Empfänger 1

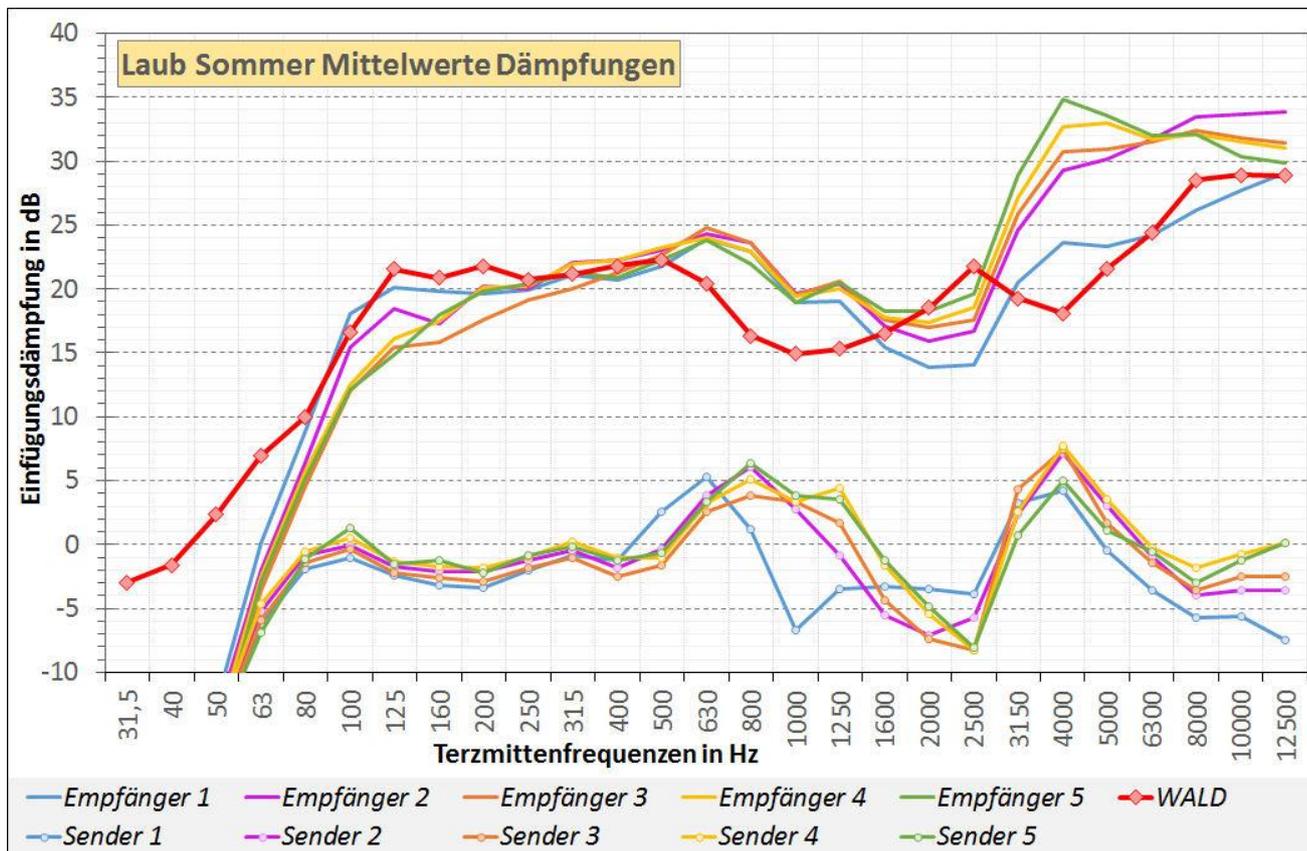


Abbildung 25: Mittelwerte Dämpfungen – Laubwald Modul 1

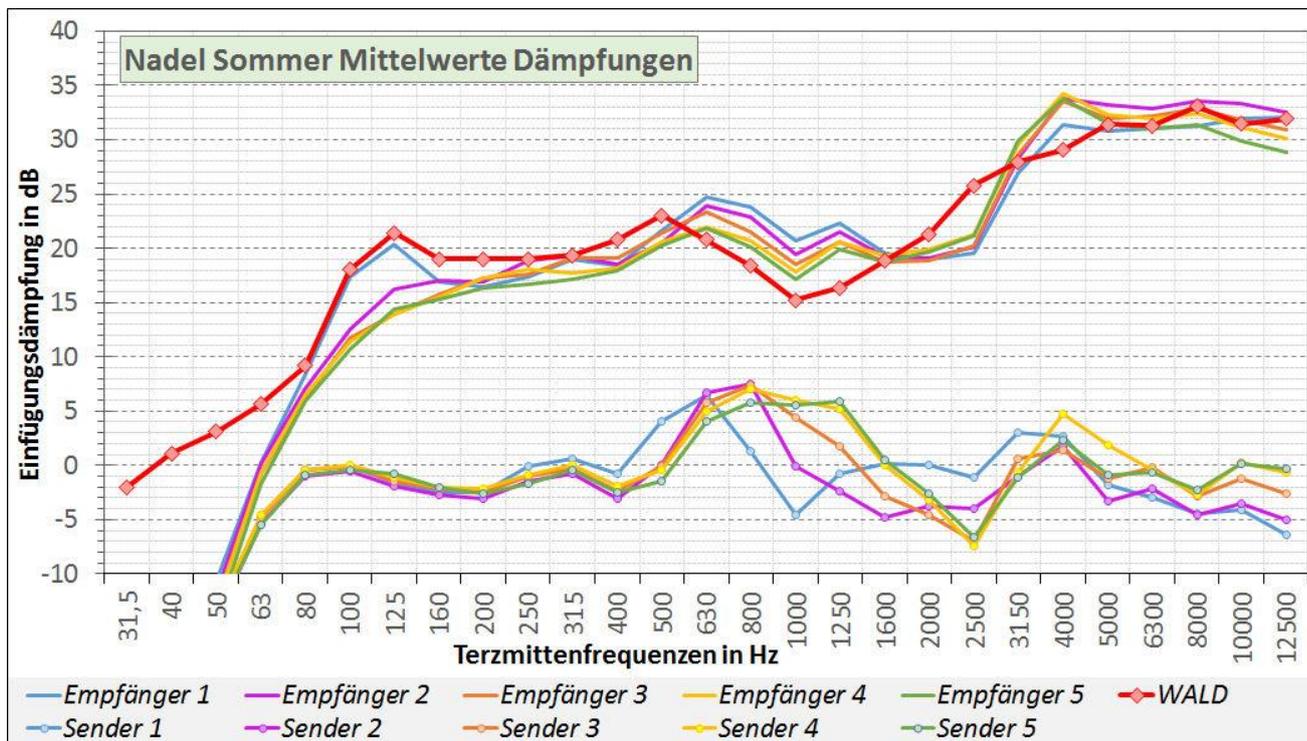


Abbildung 26: Mittelwerte Dämpfungen – Nadelwald Modul 1

In der Abbildung 25 lässt sich für die mittlere Dämpfung der Messungen über dem Laubwald während des ersten Moduls erkennen, dass zwischen 250 und 1.250 Hz die mittlere Dämpfung unabhängig der Mikrofonposition ist. Oberhalb von 1.250 Hz nimmt die Einfügungsdämpfung mit steigender Entfernung zu. Auffällig ist der erste Empfänger, hier ist die Einfügungsdämpfung oberhalb von 1.250 Hz gegenüber den anderen Positionen deutlich geringer. Für die Sendeseite sind deutliche Bodeneffekte zu erkennen. Wegen des Bezugs auf die Schallabstrahlung in den Vollraum nehmen die Dämpfungen für die sendeseitigen Empfangspositionen zum Teil negative Werte an (konstruktive Interferenz mit den Reflexionen am Boden und an der Waldkante).

Für die bei Schallimmissionsberechnungen übliche energetische Addition der Reflexionsanteile (= Vollraum-/Halbraum-Abstrahlung) ergäbe sich ein Wert von -3 dB für die mittlere Dämpfung über einer vollständig reflektierenden Bodenfläche ohne Meteorologieeinfluss. Zwischen 100 und 500 Hz liegt die Dämpfung in erster Annäherung bei 0 dB. Zwischen 500 und 1.600 Hz ist hingegen bei den Mikrofonen 2–5 eine Dämpfung zu erkennen. Diese fällt jedoch bei 2.500 Hz auf -8 dB ab. Bei 4.000 Hz ist erneut ein Bodeneffekt zu erkennen, weil die Dämpfung zwischen 5–8 dB liegt. Eine Ausnahme bildet das Mikrofon 1. Auch hier sind die gleichen Effekte zu erkennen, doch verschiebt sich die Frequenz nach unten (blaue Kurve).

Die Abbildung 26 zeigt die Mittelwerte für die Messungen durch und über den Nadelwald während des ersten Moduls. Im Vergleich zu den Laubwald-Messungen sind nur geringfügige Unterschiede zu erkennen. Einzig die Einfügungsdämpfung innerhalb des Nadelwaldes unterscheidet sich gegenüber Einfügungsdämpfung im Laubwald. Diese entspricht in etwa den übrigen Kurven. Die in Abbildung 25 und Abbildung 26 rot dargestellten Kurven (mit Rauten) entsprechen der Einfügungsdämpfung innerhalb des Waldes. Diese wird in den Abbildung 27 und Abbildung 28 noch einmal mit der Standardabweichung gezeigt. Während sich bei den Laubwald-Messungen die Einfügungsdämpfungen oberhalb von 3.150 Hz gegenüber den Dämpfungen über den gesamten Bereich unterscheiden, fallen bei den Nadelmessungen nur geringfügige Unterschiede auf.

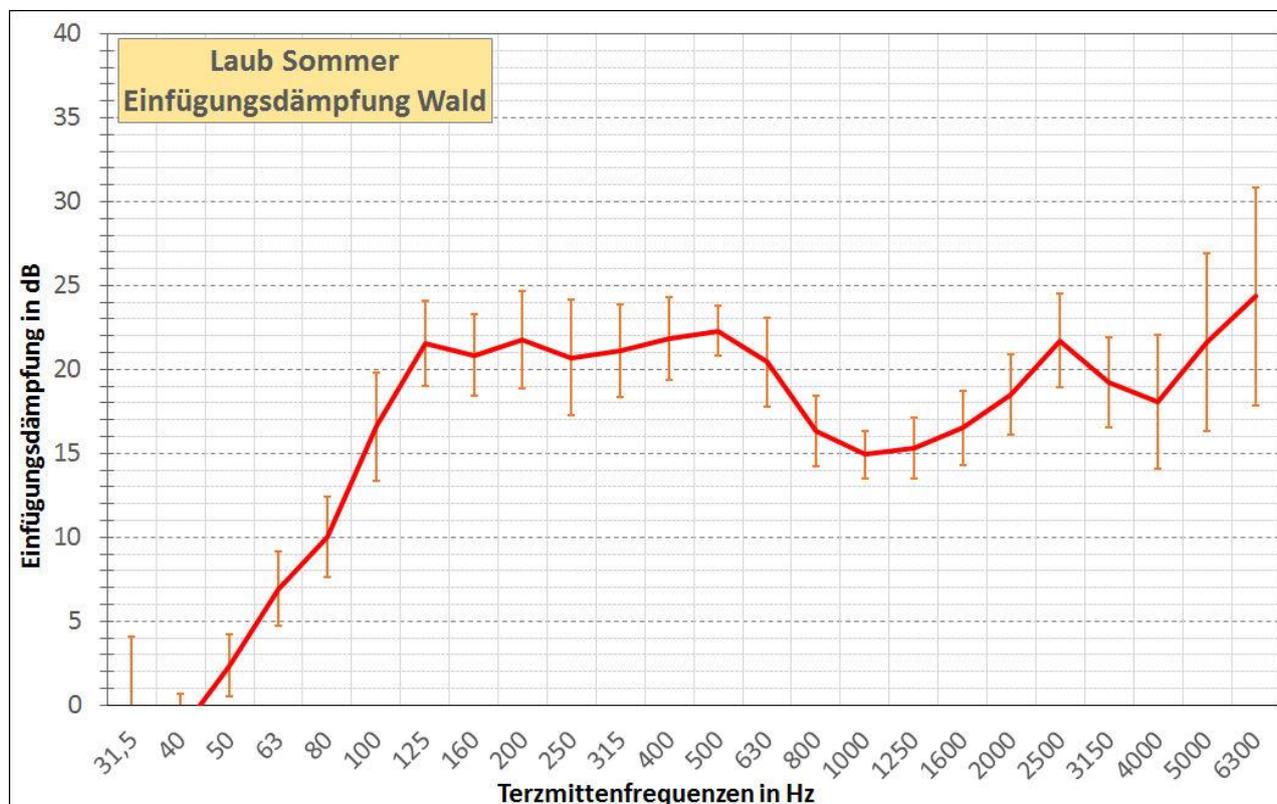


Abbildung 27: Einfügungsdämpfung Wald – Laubwald Modul 1

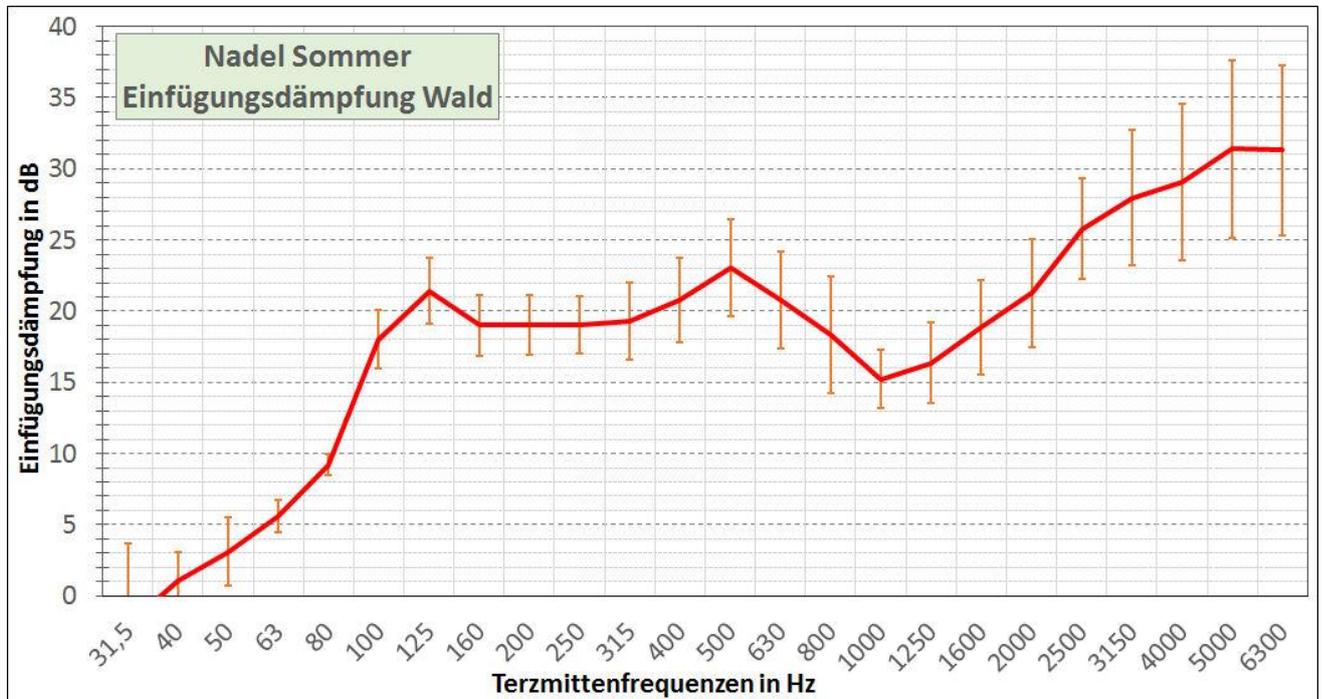


Abbildung 28: Einfügungsdämpfung Wald – Nadelwald Modul 1

Zusätzlich wurde die Dämpfung auch entfernungsabhängig dargestellt. Dafür wurde aus den Empfangsspektren jeweils der A-bewertete Summenpegel gebildet und in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikrofonstandort in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt. In den Grafiken wurde als Referenzkurve der Mittelwert für die Freifeldausbreitung „Maisfeld“ aus den Freifeldmessungen (vgl. Kap. 4.1.6) mit angegeben. Anhand dieser Abbildungen lässt sich erkennen, dass sich die Ausbreitungsdämpfungen bis ca. 55 m (freie Schallausbreitung über Maisfeld vor der Waldkante) kaum unterscheiden und auf der abgewandten Seite infolge der zusätzlichen Bewuchsdämpfung durch den Wald größere Unterschiede auftreten. Diese liegen gegenüber der Freifeldkurve (= Bodendämpfung) im Bereich kurz hinter der Waldkante bei ca. 10 dB und fallen mit zunehmender Entfernung von dieser infolge des größer werdenden Einflusses der sich über den Wald hinweg ausbreitenden Schallanteile auf ca. 5 dB in 300 m Entfernung von der Waldkante ab.

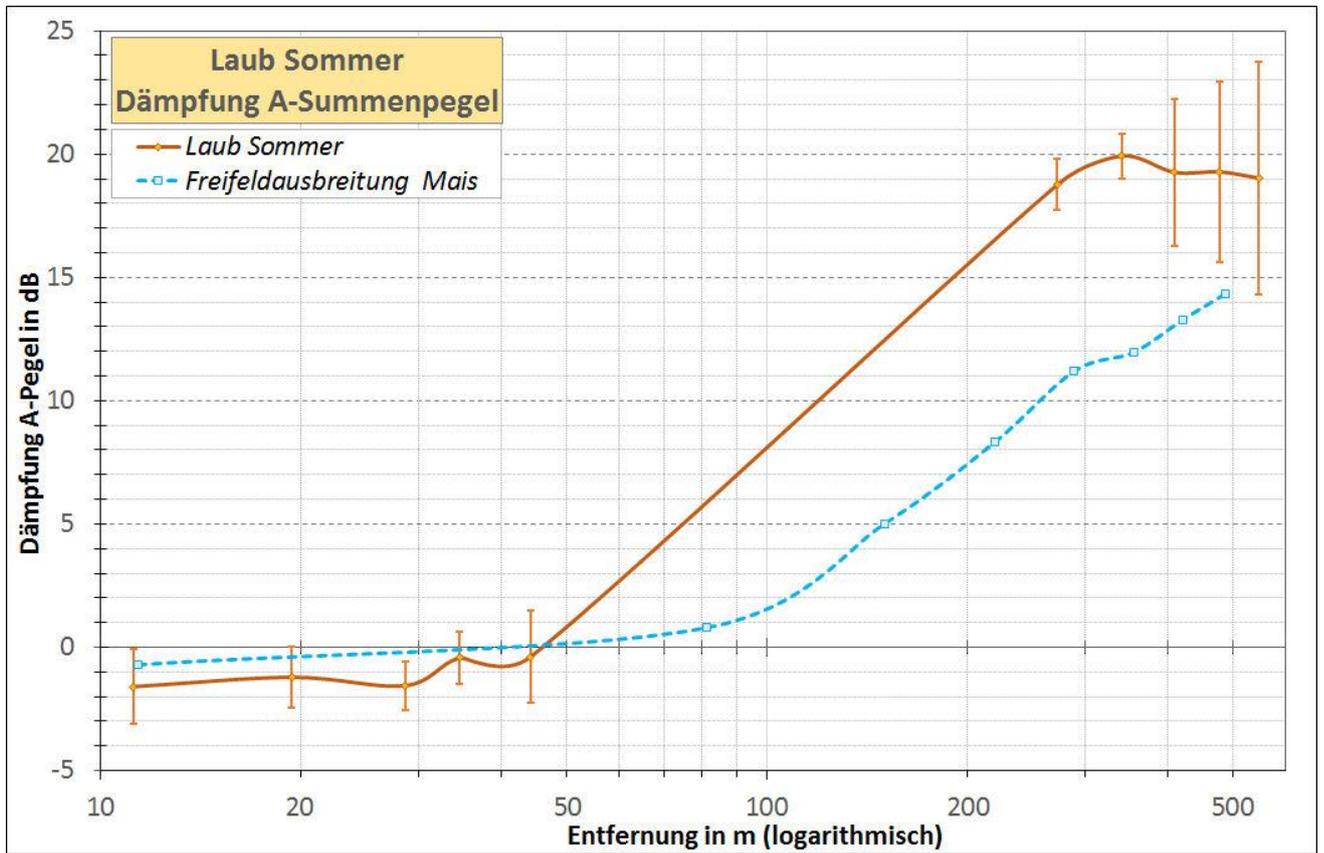


Abbildung 29: Dämpfung A-Summenpegel – Laubwald Modul 1

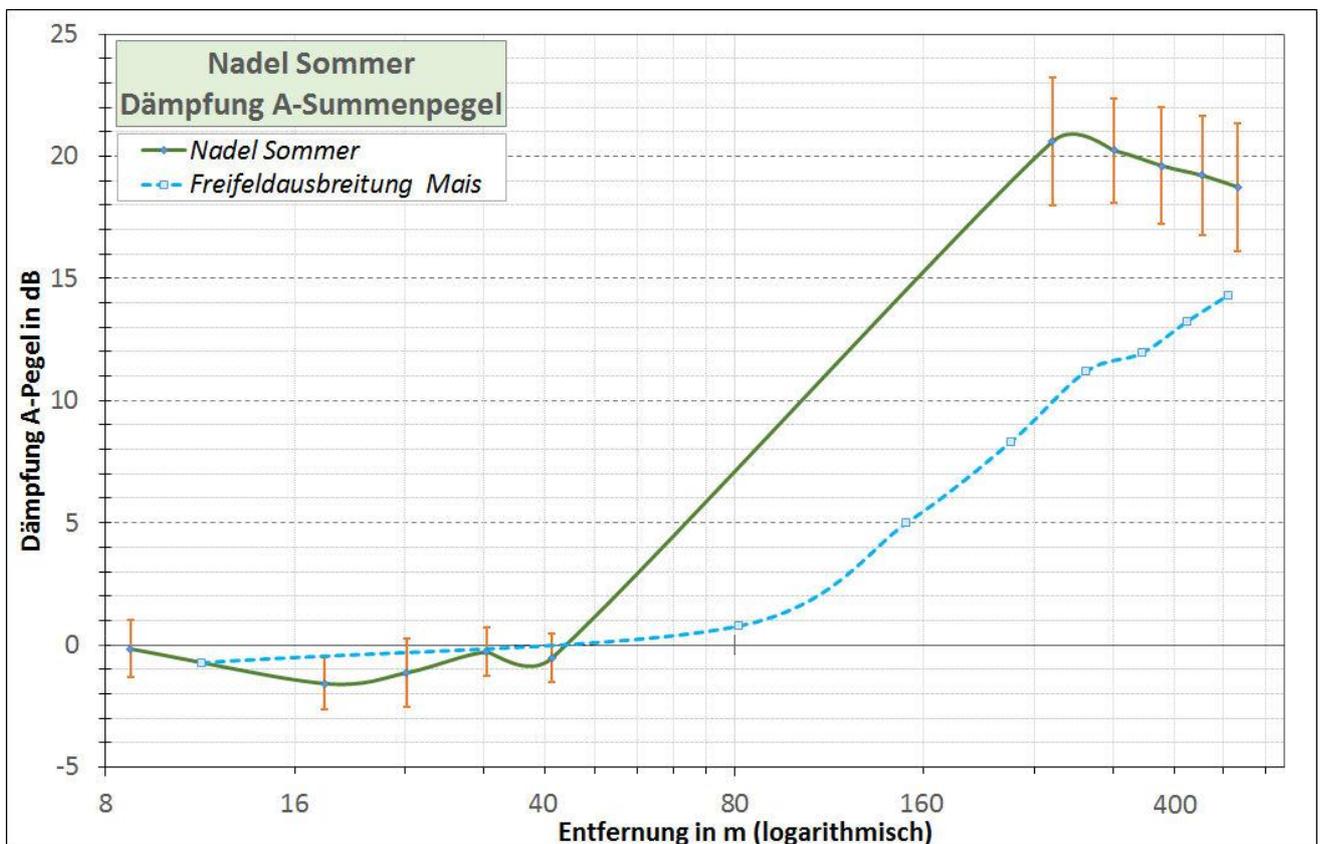


Abbildung 30: Dämpfung A-Summenpegel – Nadelwald Modul 1

Modul 2

In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind analog zu den Messungen aus dem ersten Modul die gemittelten Dämpfungen für den Laubwald und den Nadelwald für die Messungen im Modul 2 dargestellt. Für den Laubwald ergeben sich die Mittelwerte aus 36 Einzelmessungen und für den Nadelwald aus 42 Einzelmessungen.

Entscheidend ist hierbei vor allem der Bodeneinfluss. So ist bereits auf der Sendeseite zwischen 160 und 630 Hz eine Dämpfung zu erkennen. Diese lässt sich auf die geänderte Bodenbeschaffenheit aufgrund des Umpflügens des ursprünglichen Maisstoppfeldes zurückführen. Dieser Effekt tritt folglich sowohl bei den Laubmessungen als auch bei den Nadelmessungen auf und wird besonders deutlich, wenn die Kurven mit den Einfügungsdämpfungen des Laub- bzw. Nadelwaldes (rote Kurve mit Rauten) verglichen werden. Die Dämpfung bei ca. 4.000 Hz unterscheidet sich hingegen nicht gegenüber den Messungen aus dem ersten Modul.

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen wieder die Einfügungsdämpfungen des Laub- bzw. Nadelwaldes und werden jeweils mit der Standardabweichung angegeben.

Wie im ersten Modul wurden die Dämpfungen auch für die Standardmessung des zweiten Moduls entfernungsabhängig als A-bewerteter Summenpegel bestimmt und in Abbildung 35 und Abbildung 36 beschrieben. Zur Erläuterung sind in der Tabelle 10 wieder die mittleren Entfernungen der akustischen Messpositionen dargestellt.

Tabelle 10: Mittlere Entfernung der sender- und empfängerseitigen Mikrofone vom Lautsprecher für Modul 2

Position	Entfernung zum Lautsprecher in m	
	Laub	Nadel
Sender 1	15	11
Sender 2	23	18
Sender 3	31	23
Sender 4	37	32
Sender 5	48	34
Empfänger 1	272	243
Empfänger 2	339	307
Empfänger 3	412	372
Empfänger 4	481	445
Empfänger 5	551	509

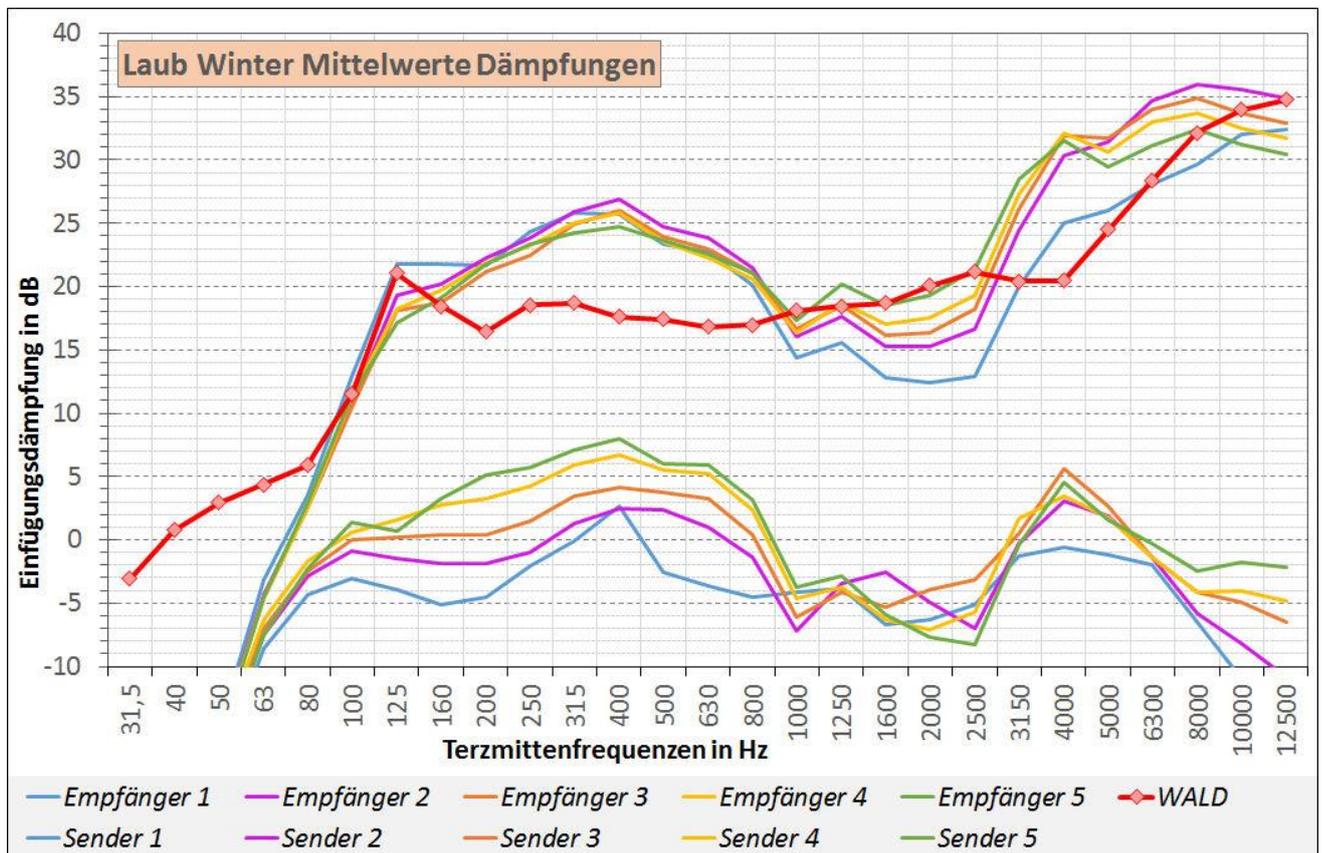


Abbildung 31: Mittelwerte Dämpfungen – Laubwald Modul 2

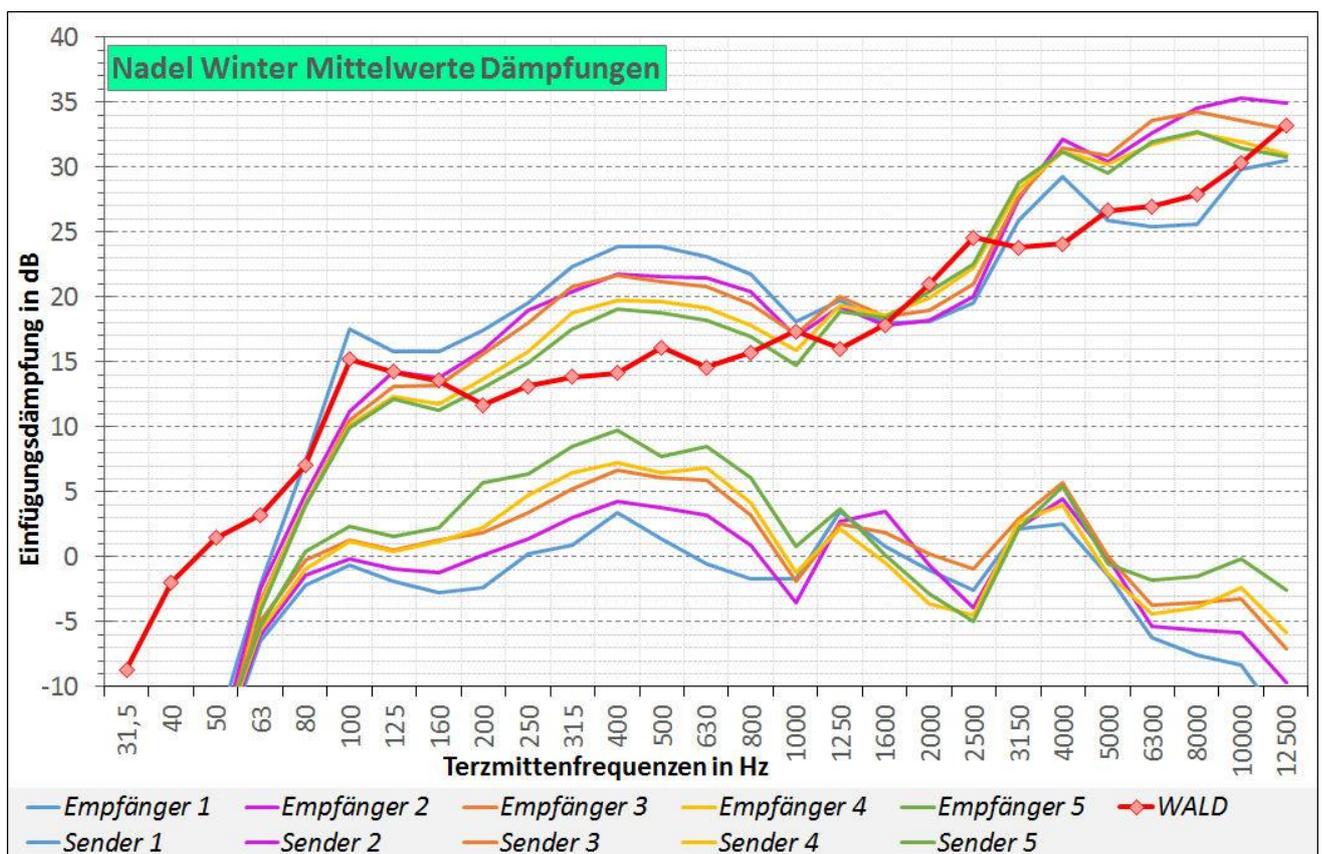


Abbildung 32: Mittelwerte Dämpfungen – Nadelwald Modul 2

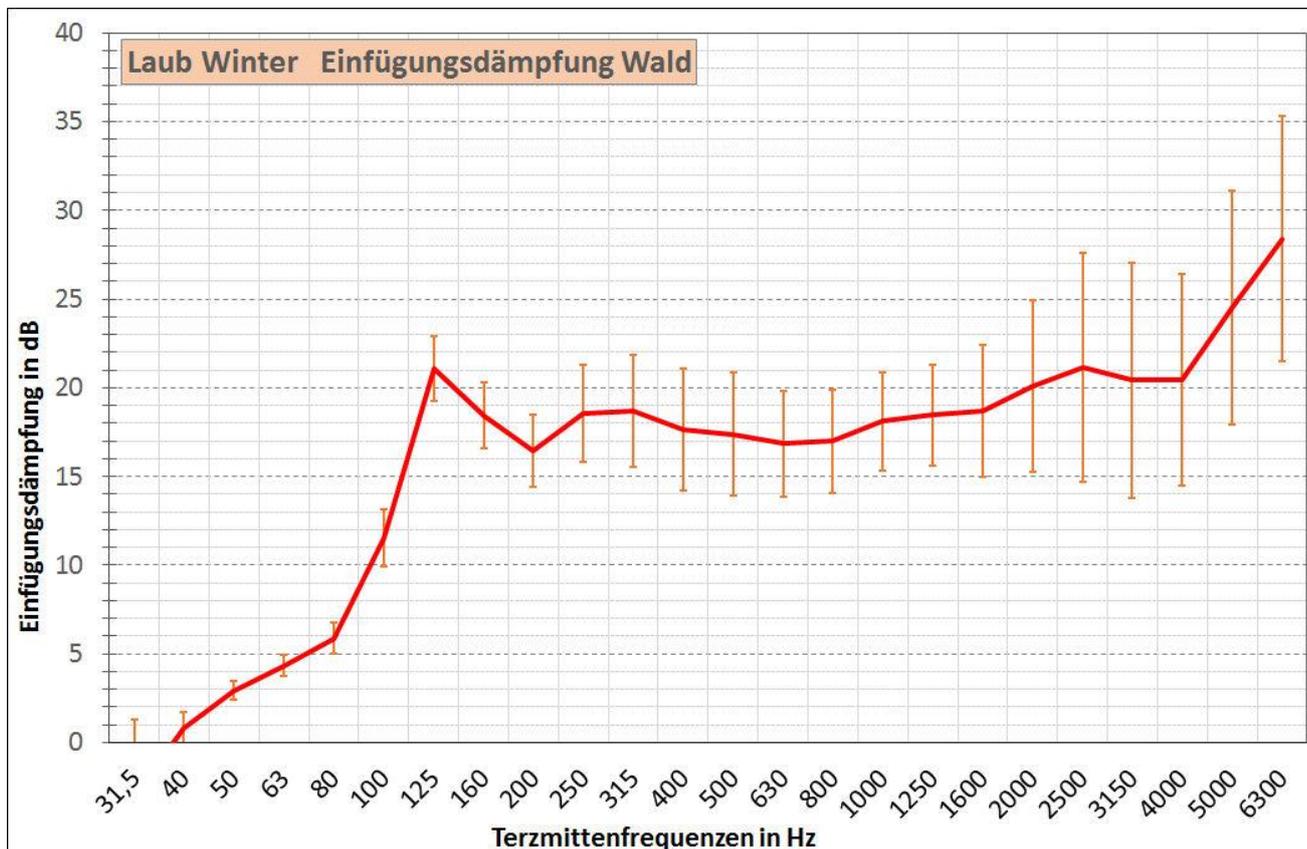


Abbildung 33: Einfügungsdämpfung Wald – Laubwald Modul 2

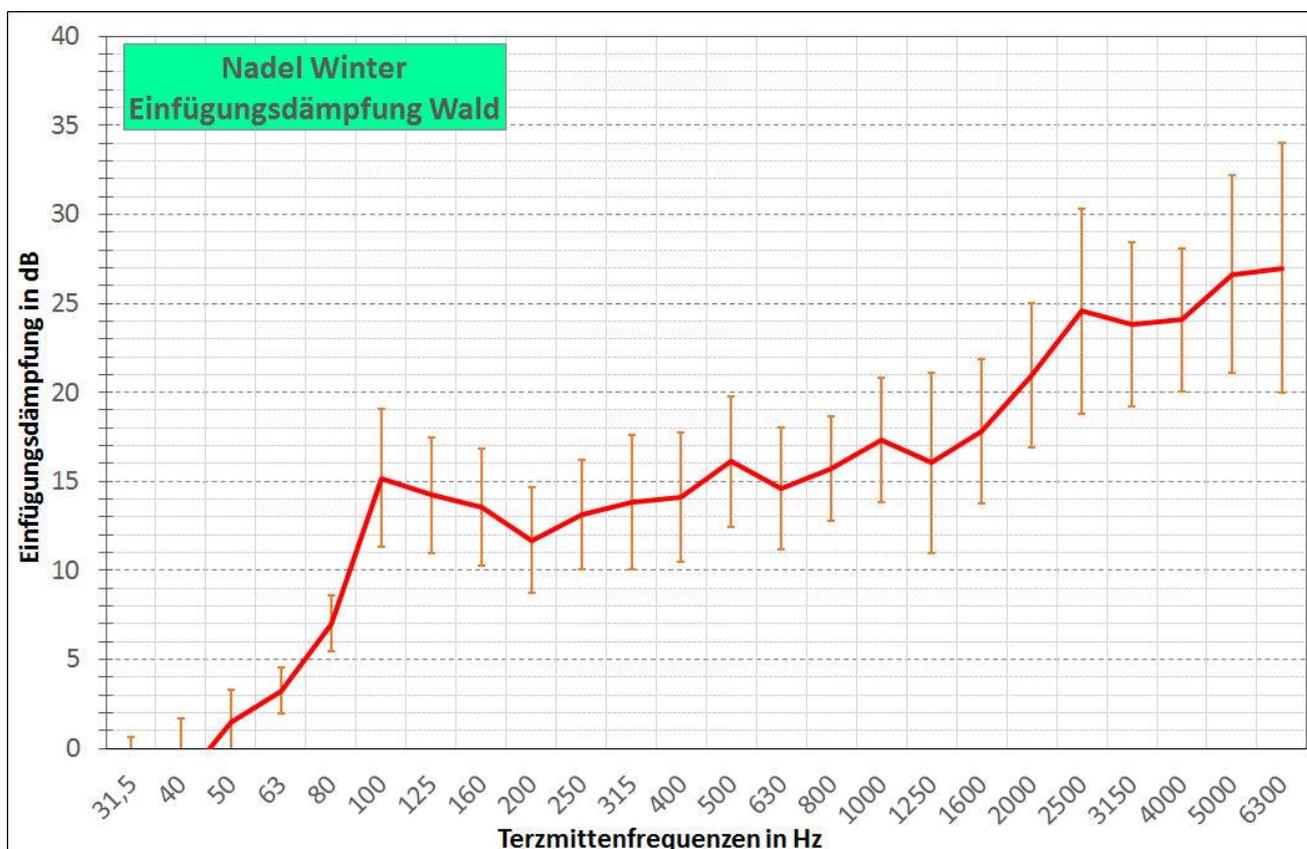


Abbildung 34: Einfügungsdämpfung Wald – Nadelwald Modul 2

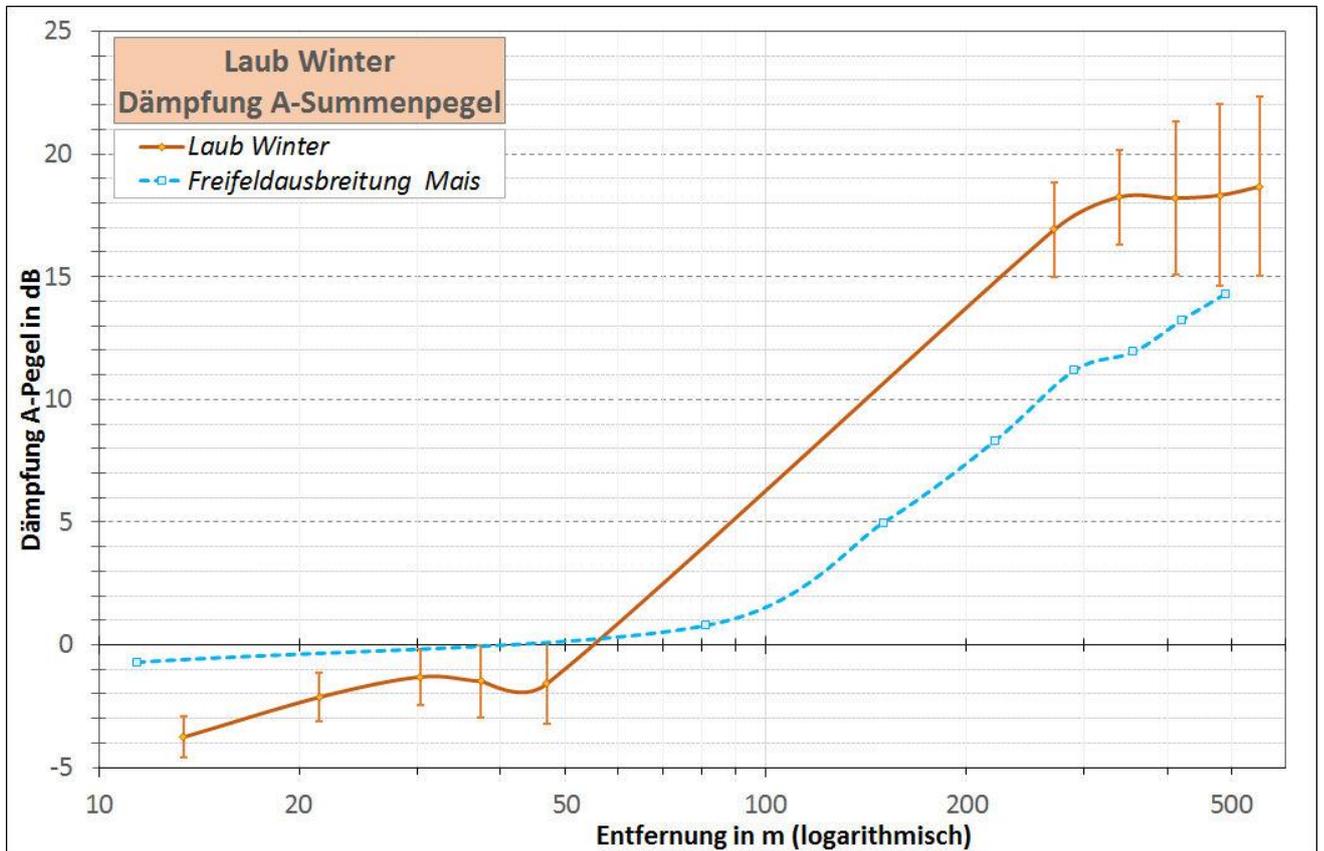


Abbildung 35: Dämpfung A-Summenpegel – Laubwald Modul 2

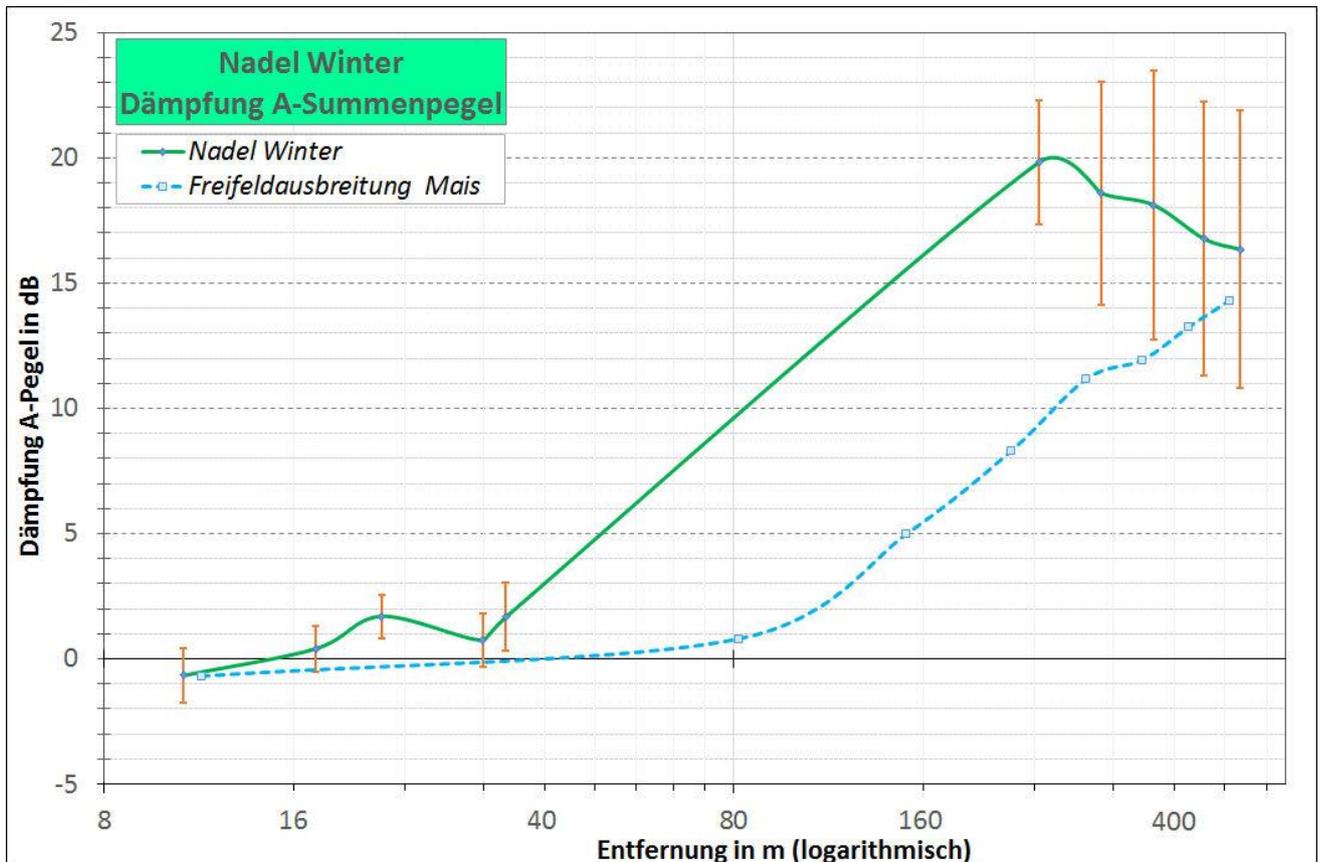


Abbildung 36: Dämpfung A-Summenpegel – Nadelwald Modul 2

5.1.2 Messungen mit 100 m und 200 m Entfernung des Senders

Die Standardmessungen wurden durch die sogenannten „Entfernungsmessungen“ ergänzt. Dafür wurde der Sender sowohl für die Laubwaldmessungen als auch für die Nadelwaldmessung jeweils auf 200 m und 100 m Entfernung zur Waldkante aufgestellt und die Mikrofone gemäß Abbildung 19 und Abbildung 20 positioniert. Da die Messungen mit einem sehr hohen zeitlichen Aufwand verbunden waren, konnten nur zwei Messdurchläufe für jede Messreihe ausgeführt werden.

Bei der Analyse der gewonnenen Messwerte fällt auf, dass sich insbesondere die Messungen „100 m Laubwald“ und „200 m Laubwald“ senderseitig sehr stark unterscheiden. Als Ursache können vor allem Boden- und Geländeeinflüsse angenommen werden. Die relativ konstanten meteorologischen Bedingungen können den großen Unterschied nicht begründen. Im Messzeitraum (Nachmittag 30.10.14) traten zwar unterschiedliche Windrichtungen auf. Diese führten jedoch nicht zu maßgeblichen Änderungen der Vertikalgradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit, welche die gemessenen Dämpfungsunterschiede erklären. Derartig große Differenzen treten zwischen den Nadelwaldmessungen nicht auf. Hier entsprechen die Unterschiede in etwa den Mittelwerten aus den Standard-Messungen. Die Zusatzdämpfungen für die Empfängerseite unterscheiden sich erstaunlich wenig hinsichtlich der jeweiligen Senderentfernung von der Waldkante (vergleiche Abbildung 37: rechte Seite). Daraus ließe sich schlussfolgern, dass der Einfluss der Bewuchsdämpfung im Sinne einer entfernungsunabhängigen Zusatzdämpfung – zumindest im Bereich der untersuchten Entfernungsskalen – erhalten bleibt.

Zusätzlich wurde als Referenzkurve die entfernungsabhängige Dämpfung für die Freifeldmessung „Mais“ mit dargestellt. Diese Kurve ist ebenfalls mit den Mittelwerten der Standard-Messung aus dem ersten Modul gut vergleichbar.

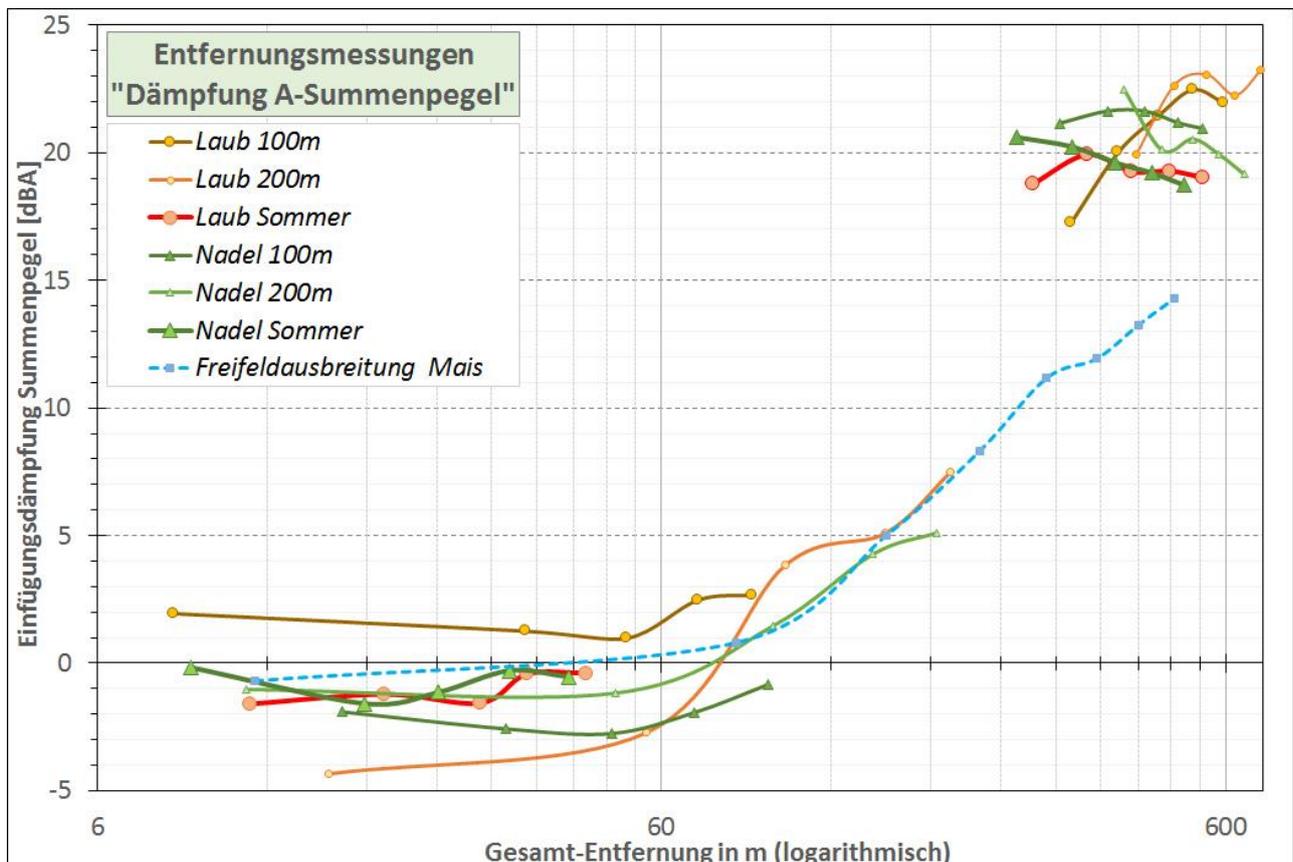


Abbildung 37: Entfernungsmessung – Dämpfung A-Summenpegel

5.1.3 Freifeldmessung

Neben der Einfügungsdämpfung, die auf den Wald zurückzuführen ist, wurde auch die Ausbreitungsdämpfung über dem freien Gelände untersucht. Dabei wurden alle Messwerte bezüglich der Pegelabnahme, die sich allein aus der Entfernung zwischen Sender und Empfänger ergeben, als Kugelwellendivergenz korrigiert. Daher entsprechen die angegebenen Dämpfungen den zum Zeitpunkt der Messung herrschenden Bedingungen für die Bodendämpfung und den meteorologischen Einflüssen.

Wie bereits unter Kap. 4.1.6 beschrieben, wurden die Einfügungsdämpfungen über ebenem Gelände vor den beiden Waldkanten (Laub- und Nadelwald) jeweils für das abgeerntete Maisfeld („Mais“) und die aufgehende Saat („Saat“) untersucht. Zusätzlich wurde auf dem freien Maisfeld eine Mitwindsituation gemessen. Daher wurden insgesamt fünf Messpfade mit jeweils zwei Messreihen durchgeführt. Zusätzlich werden in der Abbildung 38 die Messergebnisse der Entfernungsmessung mit dargestellt, wobei nur die Messwerte auf der Sendeseite berücksichtigt wurden.

Während im „Nahfeld“ (bis 60 m) noch relativ große Unterschiede zwischen den einzelnen Messreihen in Abbildung 38 zu erkennen sind, werden die Unterschiede ab 60 m deutlich geringer, wobei immer einzelne Ausreißer zu erkennen sind. Bis 60 m bilden die Messreihen der Entfernungsmessung für den Laubwald die untere (Laub 200 m) und die obere (Laub 100 m) Grenze (siehe Kap. 5.1.2).

Interessanterweise liegen die Messungen über dem Maisfeld bei Mitwind bis zu einer Entfernung von 120 m genau im Mittel der übrigen Dämpfungskurven. Ein systematischer Unterschied entsteht erst für größere Entfernungen. Leider musste die Messserie wegen einsetzenden Regens vorzeitig abgebrochen werden.

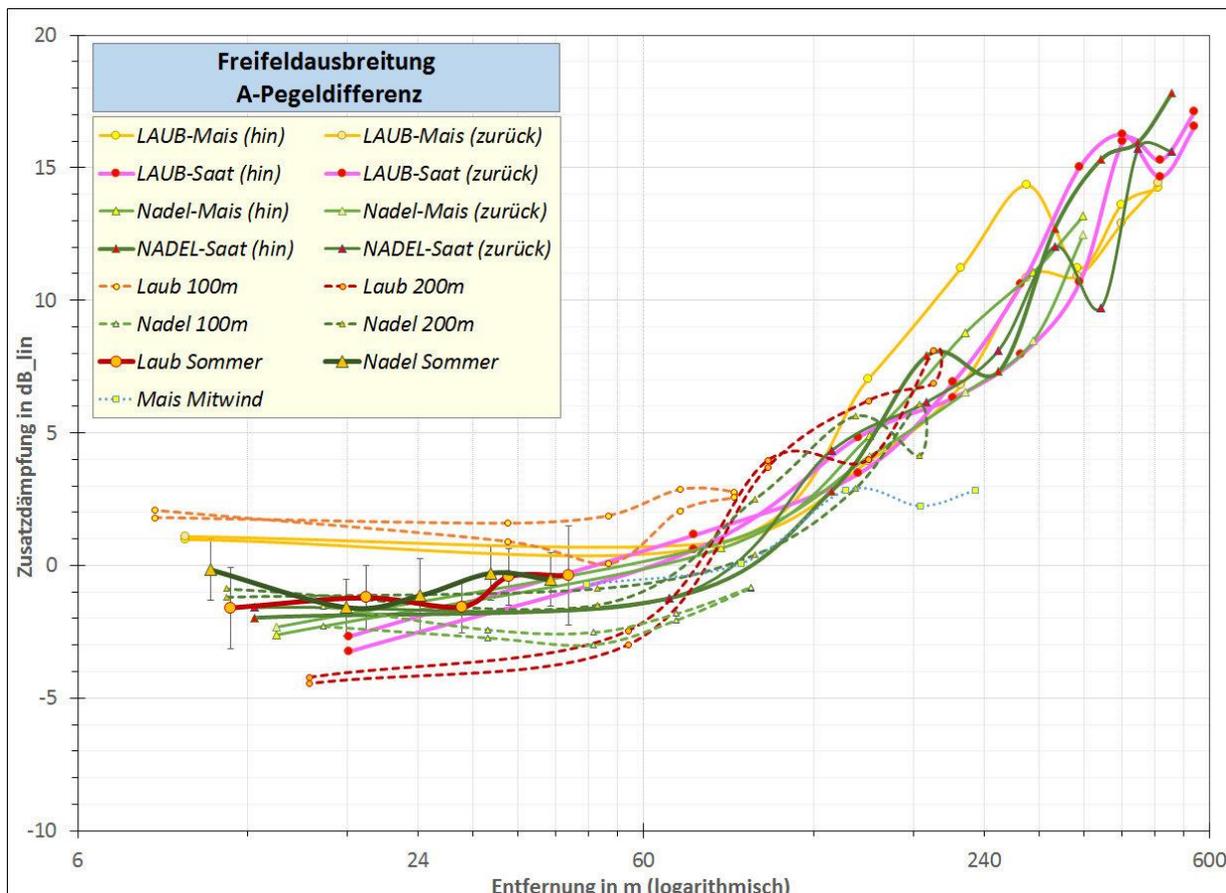


Abbildung 38: Freifeldausbreitung – A-Pegeldifferenz

5.2 Auswertung der meteorologischen Messungen

Modul 1

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen (Vorexperiment in Grillenburg) wurden bei den Auswertungen berücksichtigt. Zu beachten ist, dass die mit dem Ultraschallanemometer gemessene Schalltemperatur (auch akustisch virtuelle Temperatur) den Einfluss der Luftfeuchte enthält.

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick zu den meteorologischen Verhältnissen in der akustisch/meteorologisch abgestimmten Messperiode (zeitlicher Abgleich der Messungen ab 19.10.2014). Die Werte der Schalltemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden im 10-Hz-Takt gemessen und über 30 min gemittelt.

Der Tagesgang der meteorologischen Größen folgt den Erläuterungen der Großwetterlage im Kap. 3.3. Am 19.10.2014 wurden die höchsten Temperaturwerte innerhalb von Modul 1 gemessen (Abbildung 39). Dieser Strahlungstag war außerdem durch einen großen Tagesgang von über 10 K gekennzeichnet. Die anschließende Phase mit wechselhaftem Wetter und Niederschlägen zeigte sich in insgesamt abnehmenden Temperaturwerten und einem verringerten Tagesgang. Eine ruhigere und trockenere Phase setzte ab 25.10.2014 ein. Auch hier waren strahlungsreiche Tage mit einem hohen Tagesgang zu verzeichnen, z. B. am 28.10.2014. Die maximalen Temperaturwerte lagen jedoch um 8 K unter denen vom 19.10. Die Windgeschwindigkeit war in dieser 2. Messphase ebenfalls etwas geringer (bis auf den 28./29.10.) als zu Beginn der Messungen im Modul 1.

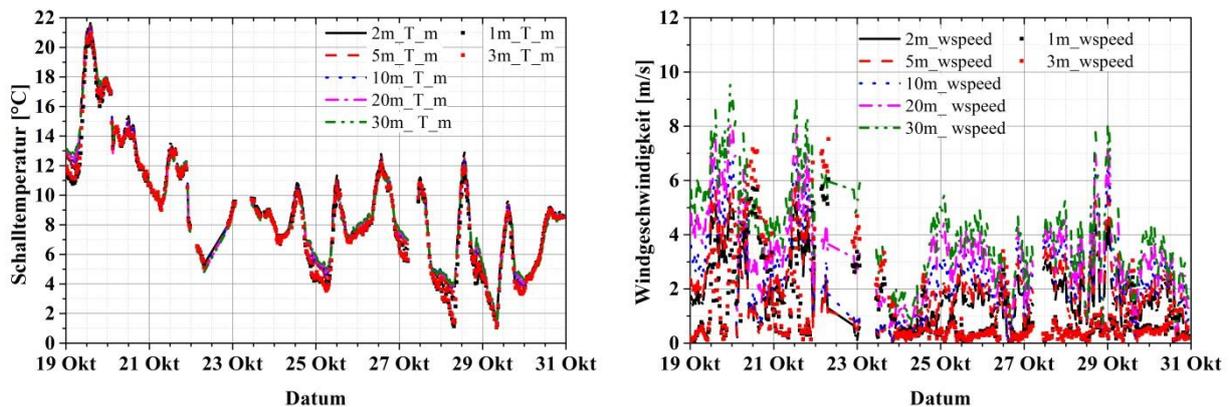


Abbildung 39: Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen

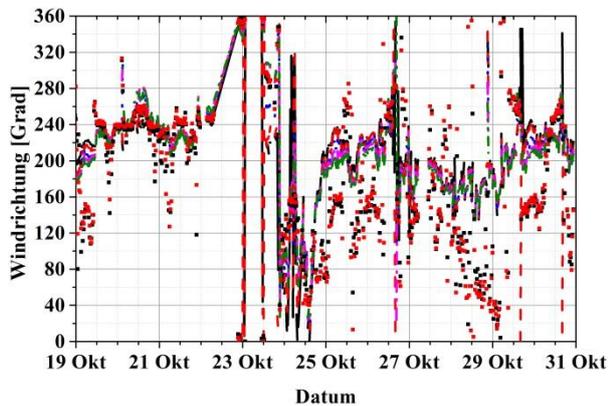


Abbildung 40: Tagesgang der mittleren Windrichtung im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen

Während der Messungen traten verschiedene Windrichtungen auf. Südliche bis südwestliche Richtungen waren jedoch bevorzugt zu verzeichnen (Abbildung 40).

Das Auftreten von bestimmten Windrichtungen (hier in 10 m Höhe am Clarkmast gemessen) wurde in Bezug auf die mittlere Schallausbreitungsrichtung (Mittelwert über die Positionsvermessung an verschiedenen Mess Tagen, Richtung Sender-entferntester Empfänger) gesetzt. Stimmen die Richtungen in einem Sektor von $\pm 45^\circ$ überein, dann wurde eine Mitwindsituation (Kennzahl = 1) detektiert. Weichen Wind- und Schallausbreitungsrichtung um 180° ($\pm 45^\circ$) voneinander ab, ergibt sich Gegenwindausbreitung (Kennzahl = -1). Alle anderen Situationen wurden als Querwindausbreitung festgelegt (Kennzahl = 0). In 25,5 % der Fälle herrschte eine Mitwindrichtung vor. Wenn zusätzlich die Bedingung eingeführt wird, dass die Windgeschwindigkeit im Intervall zwischen 1 m/s und 5 m/s liegt, resultieren in 22,1 % der Fälle Mitwindrichtungen. Die Auswertung lässt darauf schließen, dass die meisten Schallmessungen bei Querwind bzw. in Windrichtung durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 41 und Tabelle 4).

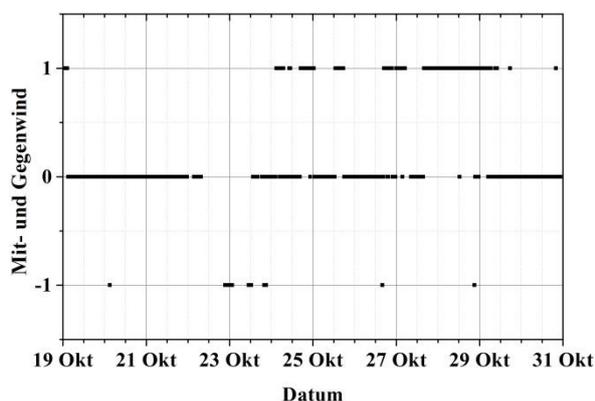


Abbildung 41: Mit- und Gegenwindausbreitung (in Bezug auf die Windrichtung in 10 m Höhe) im Modul 1

Bei dieser Auswertung ist zu berücksichtigen, dass sowohl der Waldstreifen als auch das Maisfeld einen Einfluss auf das Windfeld in 10 m Höhe am Clarkmast ausüben. Auf der anderen Waldseite werden die Windverhältnisse ebenfalls durch den Wald beeinflusst und weisen, je nach Windrichtung, deutliche Unterschiede zu den Messungen am 30-m-Mast auf.

Abbildung 42 gibt einen Überblick zur tageszeitlichen Variabilität der mittleren Vertikalgradienten der Schallgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit im Messzeitraum des Moduls 1. Die Schalltemperatur wurde für diese Auswertungen in die Schallgeschwindigkeit (nur Lufttemperatur- und Luftfeuchteinfluss!) umgerechnet.

Positive Gradienten stehen für eine Zunahme der betrachteten Größe mit zunehmender Höhe und umgekehrt. Eine Temperaturinversion ist dementsprechend durch einen positiven Vertikalgradienten der Schallgeschwindigkeit gekennzeichnet. Häufig wird damit auch eine günstige Situation für eine weitreichende Schallausbreitung charakterisiert. Eine solche Situation ist in Bezug auf den Schutz vor erhöhter Lärmimmission als ungünstig einzustufen.

Empfängerseitig fallen die insgesamt größeren Gradienten, besonders für die Windgeschwindigkeit, auf. Eine Ursache liegt u. a. in der geringeren Schichtdicke (3-1 m) und der Bodennähe der Messhöhen. Die Temperaturgradienten sind, über den gesamten Zeitraum betrachtet, betragsmäßig geringer als die Windgradienten. Weil sie jedoch im Tagesgang sowohl positive als auch negative Werte erreichen, sind Temperaturgradienten durch eine bedeutende Steuerwirkung bzgl. der Schallausbreitungssituation charakterisiert.

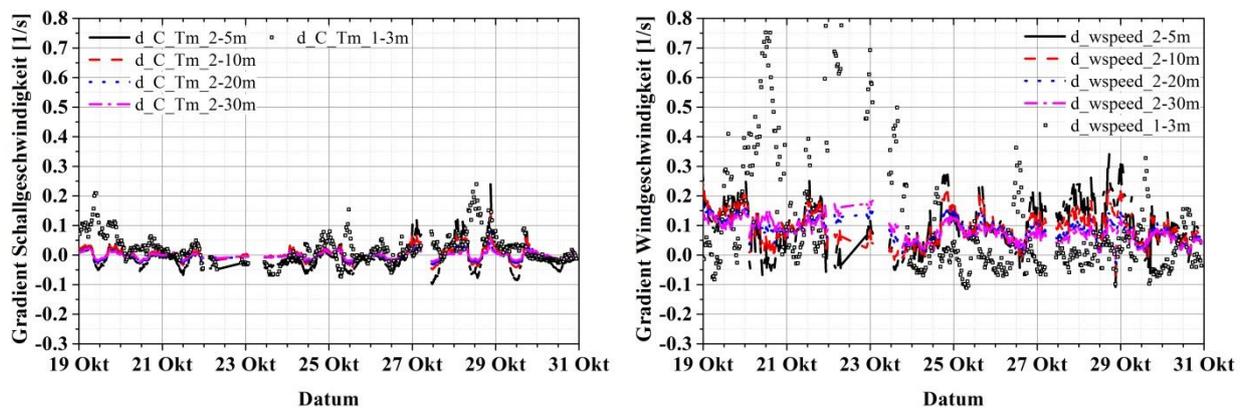


Abbildung 42: Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen

Zusätzlich zur Windgeschwindigkeit beeinflusst die Windrichtung die meteorologisch bedingte Schallbrechung. Dieser Effekt wird mit der effektiven Schallgeschwindigkeit (Summe aus temperaturbeeinflusster Schallgeschwindigkeit und Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung) und ihrem Vertikalgradienten zwischen verschiedenen Höhen beschrieben (siehe Kap. 5.3).

Modul 2

Die Auswertung der meteorologischen Größen wurde für die Messungen im Modul 2 entsprechend der vorangegangenen Vorgehensweise durchgeführt. Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick zu den meteorologischen Verhältnissen in der gesamten akustisch-meteorologischen Messperiode (zeitlicher Abgleich der Messungen ab 10.03.2015). Die Werte der Schalltemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden wieder über 30 min gemittelt.

Der Tagesgang der meteorologischen Größen folgt den Erläuterungen der meteorologischen Umgebungsbedingungen im Kap. 3.3. Der 19.03.2015 war einer der nahezu idealen Strahlungstage mit einem Tagesgang der Temperatur von über 10 K (Abbildung 43). Die höchsten Werte für die Schalltemperatur wurden mit 16 °C am 25.03. gemessen. Temperaturwerte deutlich unter dem Gefrierpunkt (-4 °C) ergaben sich am 23.03.2015. Die Windgeschwindigkeit war im Modul 2 starken Wechseln unterworfen. Es kamen zwei Sturmphasen vor mit

bis zu ca. 15 m/s im 30-min-Mittel am 29.03.2015. Zwischendurch lag die maximale mittlere Windgeschwindigkeit selbst in 30 m Höhe bei 4-5 m/s.

Während der Messungen traten verschiedene Windrichtungen auf. Im Vergleich zu Modul 1 kam es im Modul 2 auch häufiger zu östlichen und nördlichen Richtungen, typisch für das Winterhalbjahr (Abbildung 44).

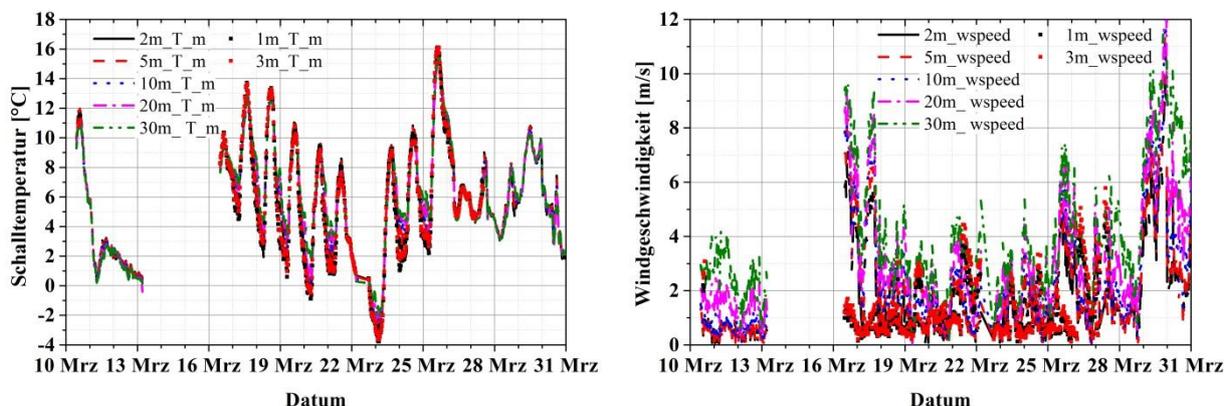


Abbildung 43: Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen

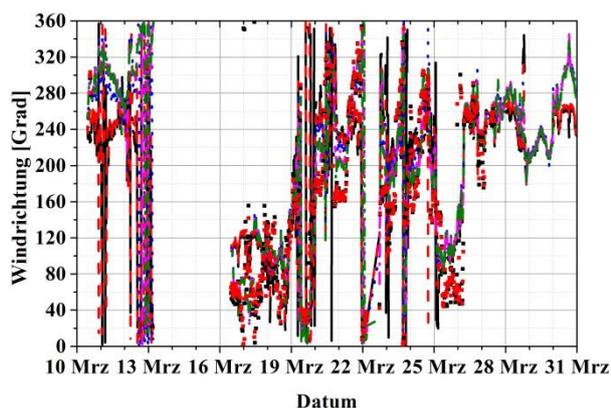


Abbildung 44: Tagesgang der mittleren Windrichtung im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen

Mit der Windrichtung in 10 m Höhe (Clarkmast) wurde wieder die Häufigkeit des Auftretens einer Mitwindrichtung (Kennzahl = 1) ausgewertet. In 11,6 % der Fälle herrschte eine Mitwindrichtung vor, die damit seltener auftrat als im Modul 1. Wenn zusätzlich die Bedingung eingeführt wird, dass die Windgeschwindigkeit im Intervall zwischen 1 m/s und 5 m/s liegt, ergeben sich in 7,2 % der Fälle Mitwindrichtungen. Diese Auswertung lässt darauf schließen, dass die Schallmessungen im Gegensatz zu Modul 1 auch häufig bei Quer- oder Gegenwind (Kennzahl = 0 bzw. -1) durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 45 und Tabelle 5).

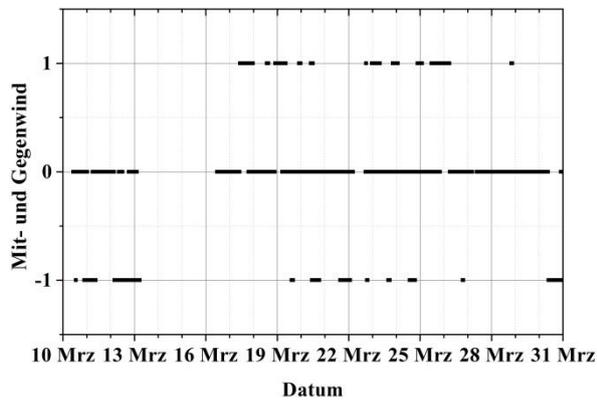


Abbildung 45: Mit- und Gegenwindausbreitung (in Bezug auf die Windrichtung in 10 m Höhe) im Modul 2

Eine genaue Einschätzung der günstigen bzw. ungünstigen Bedingungen für eine weitreichende Schallausbreitung (d. h. hohe Schallpegel in größerer Entfernung) kann jedoch nur über das Zusammenwirken der Gradienten von Schalltemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Bezug auf die Schallrichtung vorgenommen werden (Kap. 5.3).

Abbildung 46 gibt einen Überblick zur tageszeitlichen Variabilität der mittleren Vertikalgradienten der Schallgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit im Messzeitraum des Moduls 2. Schallgeschwindigkeits- und Windgradienten liegen, im Gegensatz zum Modul 1, in derselben Größenordnung. Besonders ausgeprägt ist der Tagesgang der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeitsgradienten. Am 3-m-Mast treten, wie auch im Modul 1, die betragsmäßig größten Gradienten auf. Der Wechsel zwischen stabiler (positive Gradienten der Schallgeschwindigkeit) und labiler (negative Gradienten) Atmosphärensichtung tritt hier deutlich stärker auf als während der Messungen im Modul 1. Demgegenüber sind die Windgradienten erwartungsgemäß häufig positiv. Der Waldeinfluss macht sich, in Abhängigkeit von der Windrichtung, durch negative Gradienten der Windgeschwindigkeiten bemerkbar.

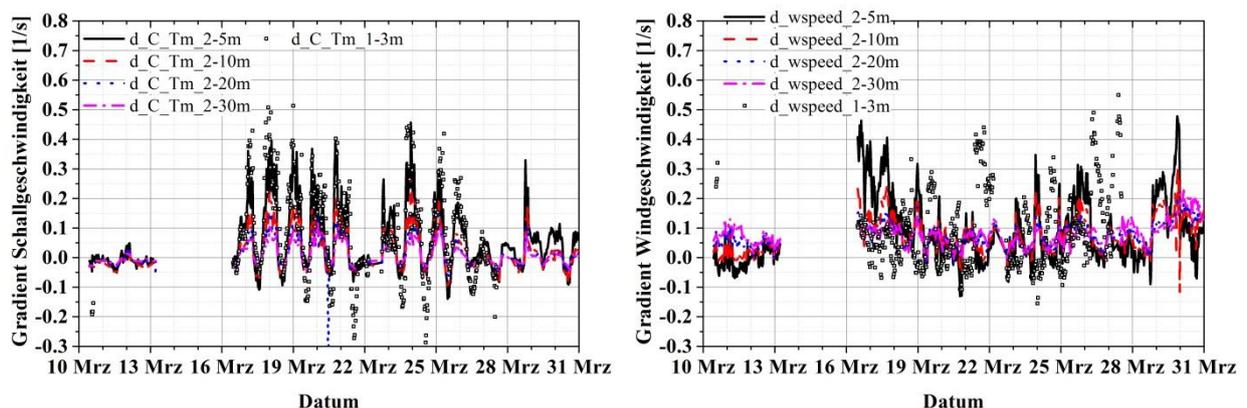


Abbildung 46: Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen

5.3 Zusammenführung der akustisch-meteorologischen Messungen

Modul 1

Die meteorologisch bedingte Schallbrechung, d. h. die Änderung der Ausbreitungsrichtung der Schallenergie, wird durch die räumliche Änderung von Schalltemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung bestimmt. Alle drei Größen fließen in die effektive Schallgeschwindigkeit (Summe aus temperaturbeeinflusster Schallgeschwindigkeit und Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung) ein, deren Änderungen insbesondere in der Vertikalrichtung zu betrachten sind, um den Effekt der Schallbrechung zu beschreiben. Für die Schallrichtung (ca. Südost nach Nordwest) wurden die aus allen Messungen 2014 gemittelten Positionen des Senders und des entferntesten Empfängers verwendet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die für die bodennahe Schallausbreitung über wenige 100 m Entfernung wesentlichen Höhenschichten auf beiden Waldseiten dargestellt (Clarkmast: 10-2 m, 3-m-Mast: 3-1 m). Abbildung 47 (links) zeigt den Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit in den ausgewählten Höhen am Clarkmast (Linien) bzw. am 3-m-Mast (Symbole) während des zeitlich abgestimmten Messzeitraums im Modul 1. Hier zeichnen sich der 19.10. und der 28./29.10.2014 mit maximalen Werten ab, die einerseits durch hohe Werte der Schalltemperatur (19.10.2014) und andererseits durch hohe Werte der Windgeschwindigkeitskomponente in Schallausbreitungsrichtung (28./29.10.2014) bedingt sind. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass unterschiedliche meteorologische Größen einen ähnlichen Effekt auf die effektive Schallgeschwindigkeit ausüben können.

Zusätzlich zum 30-min-Mittelwert ist die Standardabweichung dargestellt, die die zeitliche Variabilität anzeigt. Die Standardabweichung bietet ein Kriterium, inwiefern kurzzeitige akustische Messungen auch auf andere Zeiträume übertragbar und damit zu verallgemeinern sind.

Die Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen Standardabweichungen der effektiven Schallgeschwindigkeit in den betrachteten Höhen ist ebenfalls in Abbildung 47 (rechts) dargestellt. Die Häufigkeit für die Messungen am 3-m-Mast ist erwartungsgemäß ähnlich und unterscheidet sich zwischen 2 m und 10 m teilweise deutlich. Im Allgemeinen ist die zeitliche Variabilität in 10 m Höhe höher (Median: 0,34 m/s) als in 2 m Höhe (Median: 0,24 m/s). Die Variabilität am Clarkmast ist außerdem höher als am 3-m-Mast (Median: 0,22 m/s).

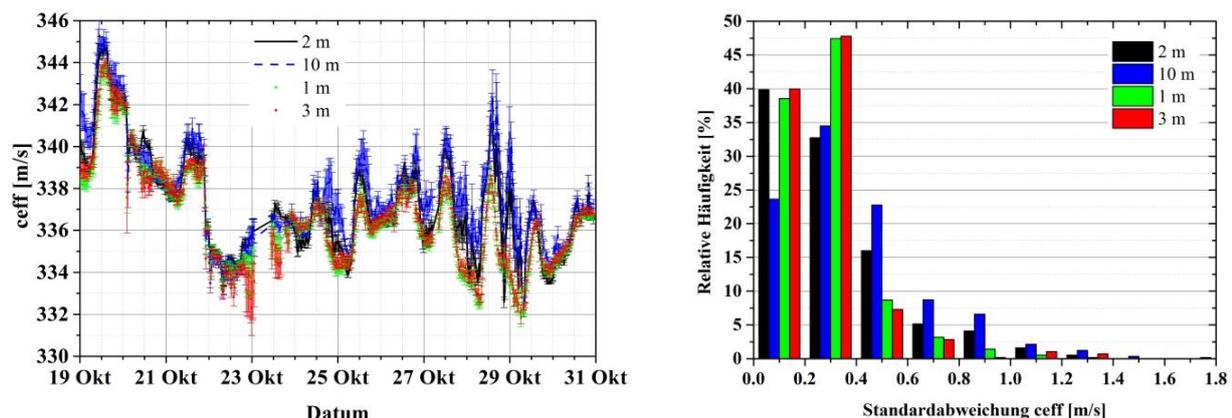


Abbildung 47: Tagesgang der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) mit Standardabweichung im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen (links) und Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung (rechts)

Dieses Resultat ist durch die häufige Lage des kleinen Mastes im Windschatten bzw. im Strahlungsschatten zu erklären.

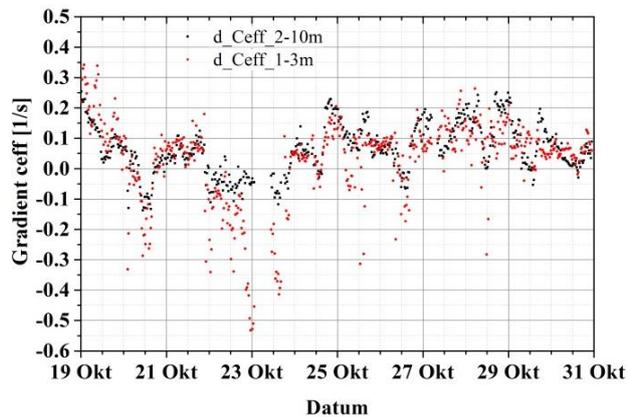


Abbildung 48: Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im abgestimmten Messzeitraum Modul 1 (2014) in verschiedenen Höhen

Abbildung 48 stellt die tägliche und tageszeitliche Variabilität der mittleren Schallgeschwindigkeitsgradienten in den Höhen zwischen 10 m und 2 m sowie 3 m und 1 m für den Messzeitraum im Modul 1 dar. Positive Gradienten stehen auch bei der effektiven Schallgeschwindigkeit für eine günstige Situation für eine weitreichende Schallausbreitung (ungünstig für den Immissionsschutz). Negative Gradienten zeigen einen lärmschützenden Effekt der Atmosphärenschichtung an.

Für den gesamten Zeitraum überwiegen an beiden Messmasten positive Gradienten, d. h. es wurde häufig bei akustischen Mitwindsituationen gemessen. Am Clarkmast treten, im Vergleich zum 3-m-Mast, vor allem tagsüber auch häufiger negative Gradienten auf. Hierbei hatte das Temperaturprofil (Abnahme der Temperatur mit der Höhe) einen entscheidenden Einfluss auf den Schallgeschwindigkeitsgradienten. Betragsmäßig werden in diesen ungünstigen Situationen für eine weite Schallausbreitung die größten Gradienten erreicht. Ein Gradient von 0,6 1/s entspricht, mit der groben Annahme kreisförmiger Schallstrahlen und einer horizontalen Schallabstrahlung, einem Radius des Schallstrahls von ca. 560 m und damit einem starken Brechungseinfluss im Vergleich zur DIN ISO 9613-2 (Radius von 5 km).

Die Gradienten am 3-m-Mast sind demgegenüber häufig positiv, weil hier meist eine Temperaturinversion bei gleichzeitiger Windzunahme mit der Höhe vorkam. Auf Empfängerseite existierten also häufig, zumindest in der Nähe des Waldrandes, Situationen für eine weitreichende Schallausbreitung.

Weitere Datenauswertungen wurden mit einer höheren zeitlichen Auflösung durchgeführt. Die folgenden Darstellungen zeigen exemplarisch für zwei Tage den Bereich der Standardabweichung (+/-Mittelwert) der über eine Minute gemittelten effektiven Schallgeschwindigkeit.

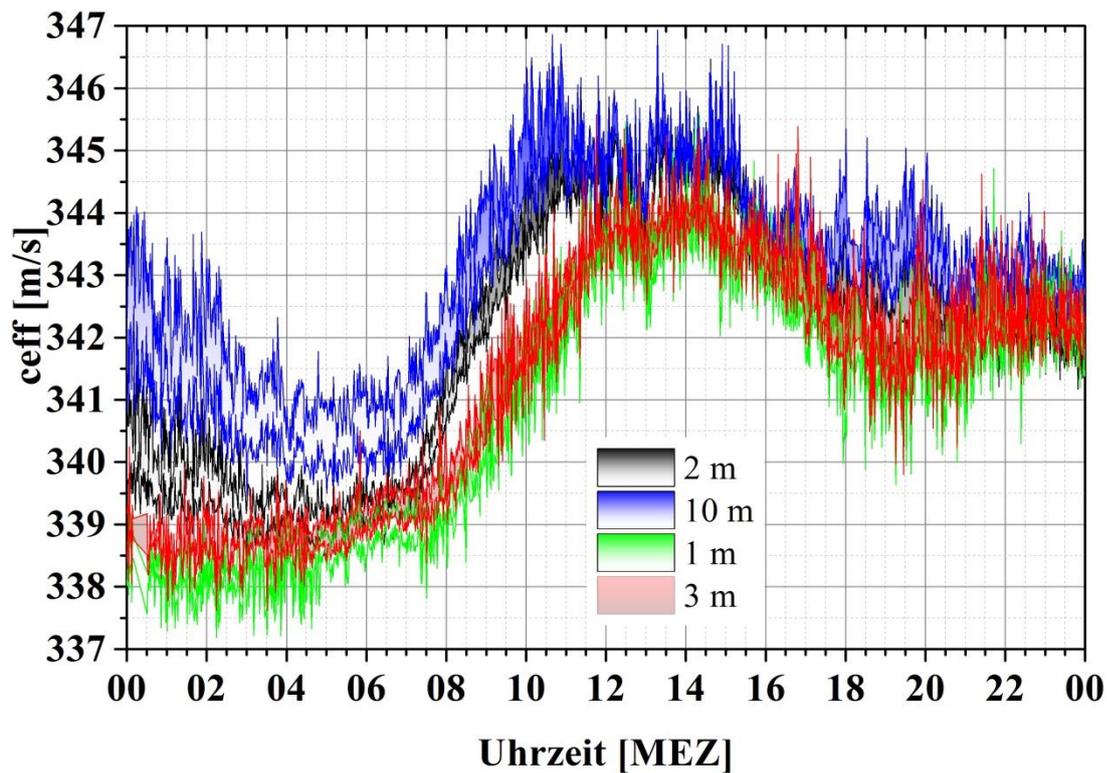


Abbildung 49: Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen

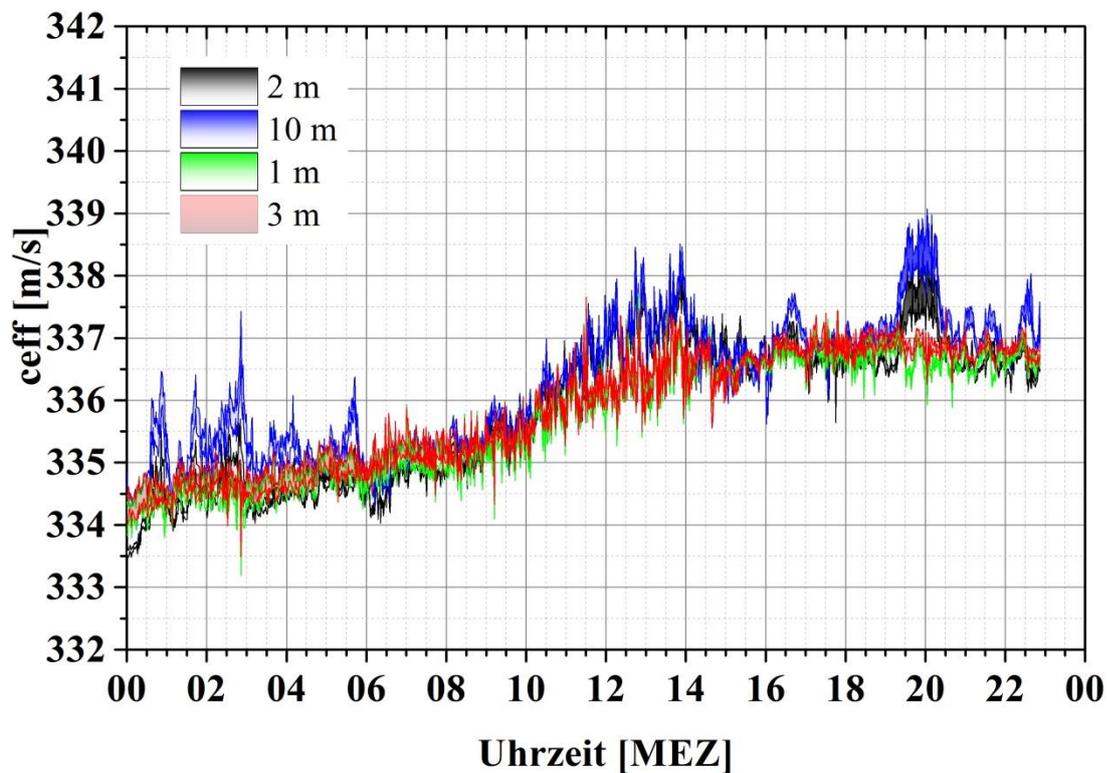


Abbildung 50: Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 30.10.2014 in verschiedenen Höhen

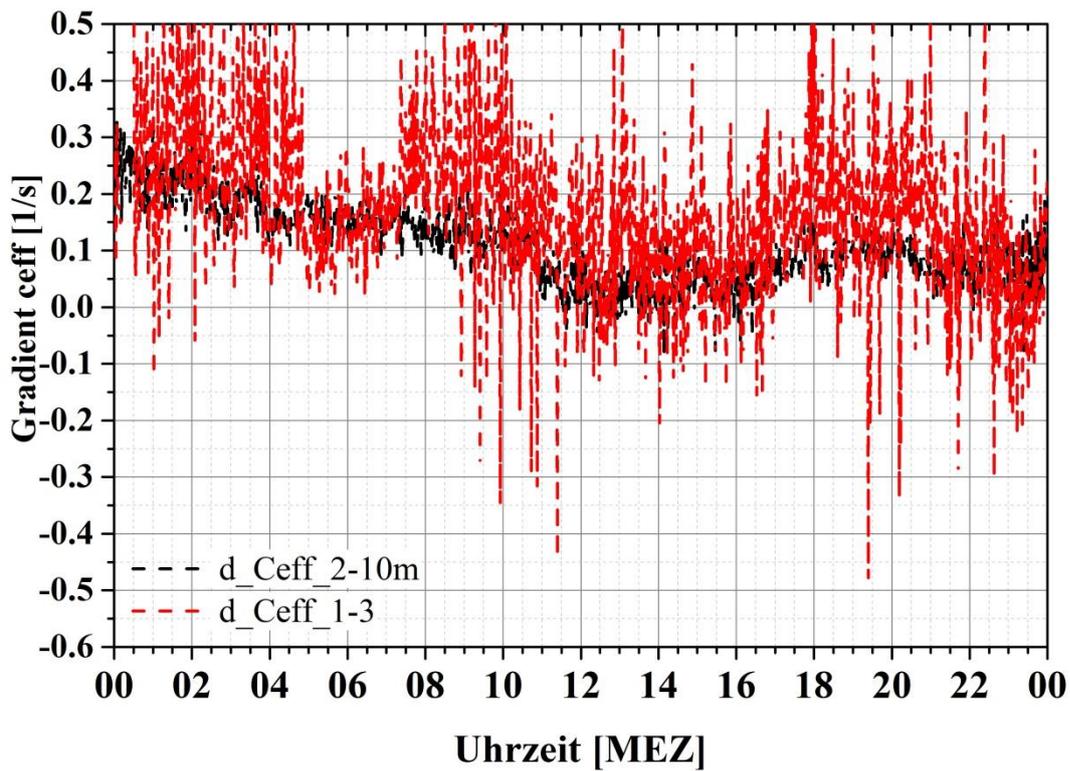


Abbildung 51: Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen

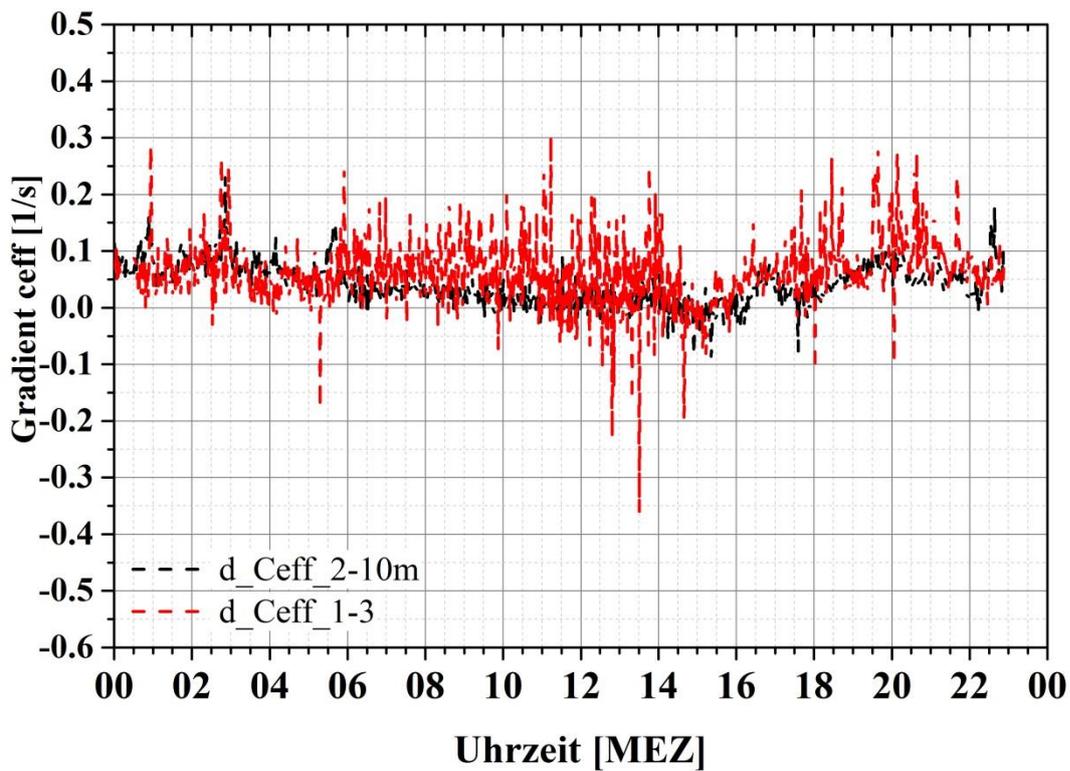


Abbildung 52: Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 30.10.2014 in verschiedenen Höhen

Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen 1-min-Mittelwerte bzw. die dazu gehörenden Standardabweichungen. Am 19.10.2014 war die mikroskalige Turbulenz besonders stark ausgeprägt. Die Mittelwerte und die Standardabweichungen der effektiven Schallgeschwindigkeit schwanken während der gesamten 24 Stunden sehr stark. Maximale Standardabweichungen werden zwischen 00:00 und 02:00 Uhr MEZ erreicht (ca. 1,2 m/s in 10 m Höhe). Demgegenüber gestaltete sich der Tagesgang am 30.10.2014 deutlich ruhiger. Die generelle Zunahme der effektiven Schallgeschwindigkeit in allen Höhen ist auch im 1-min-Mittel zu erkennen. Die Standardabweichung erreicht nur maximale Werte von 0,4 m/s in 10 m Höhe (erneut in der 2. Nachthälfte). Diese unterschiedlichen Schwankungsbreiten beeinflussen auch die Schallgeschwindigkeitsgradienten an den betrachteten Tagen (Abbildung 51, Abbildung 52). Im Allgemeinen ist die zeitliche Variabilität der Gradienten am empfängerseitigen Mast (3-1 m) höher als zwischen 2 und 10 m (senderseitiger 30-m-Mast).

Aufgrund der starken zeitlichen Schwankungen der Gradienten ist die Verdeutlichung von generellen Trends (Zunahme/Abnahme), die eine Auswirkung auf die Schallausbreitung haben, erschwert. Deshalb werden nachfolgend die über 30 min gemittelten Gradienten mit den gemessenen Walddämpfungen (d. h. Dämpfung zwischen den Mikrofonen, die am nächsten zur Waldkante auf beiden Seiten des Waldgebietes liegen) verglichen.

Für die Einschätzung der Übertragbarkeit der akustischen Messergebnisse auf andere Tageszeiten bzw. Tage eignen sich generell die Standardabweichungen zu den 30-min-Mittelwerten und speziell diejenigen der 1-min-Werte. Zusammenfassend sind die Tagesgänge der Walddämpfungen (A-bewertet, Summenpegel) mit denjenigen der Schallgeschwindigkeitsgradienten dargestellt (Abbildung 53).

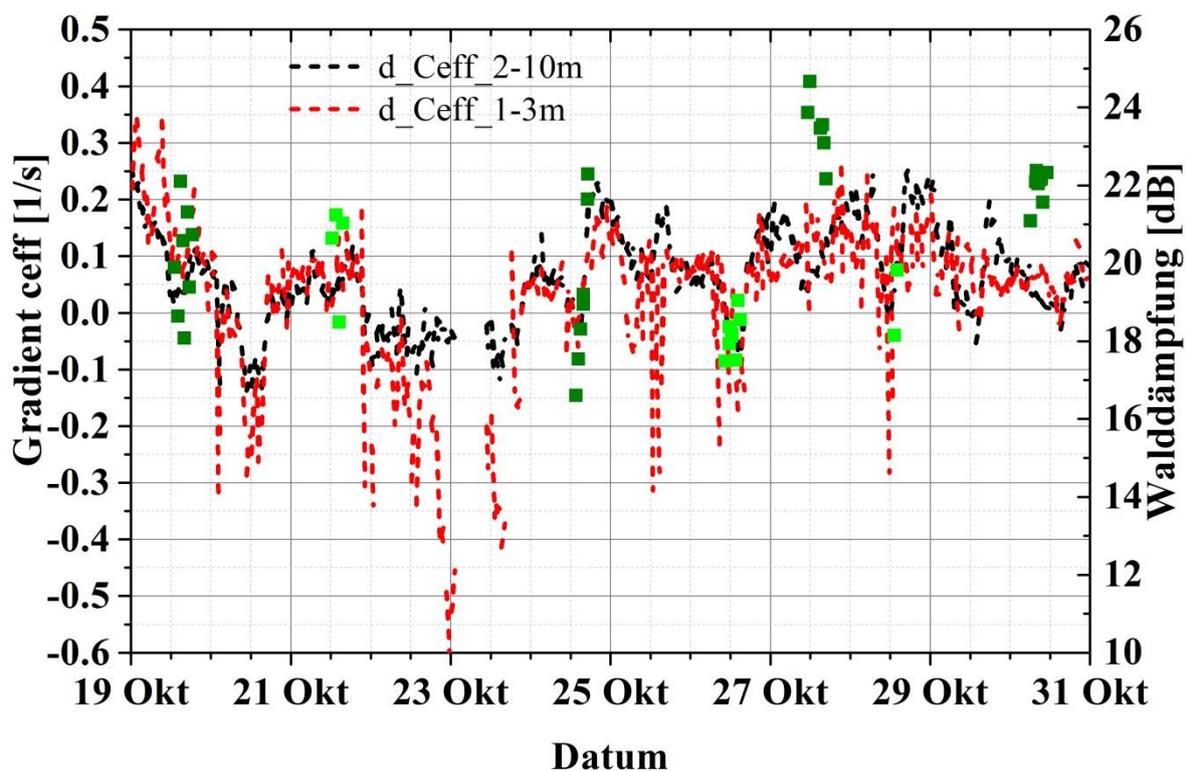


Abbildung 53: Tagesgänge der Walddämpfung (Nadel dunkelgrün und Laub hellgrün) und der Vertikalgradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im Modul 1

Der Wertebereich der Dämpfungen durch Nadelwald für die Messung an einem Tag ist größer als derjenige für die Laubwaldmessungen. Die geringsten tageszeitlichen Schwankungen der Dämpfungen (z. B. am 30.10.2014) sind mit geringen Standardabweichungen der Schallgeschwindigkeitsgradienten verbunden und umgekehrt (z. B. am 19.10.2014).

Modul 2

Für die Messperiode im Modul 2 wurde ebenfalls die mittlere effektive Schallgeschwindigkeit (Abbildung 54) und deren Vertikalgradienten für bestimmte Höhen (Abbildung 55) ausgewertet.

Der Wertebereich der effektiven Schallgeschwindigkeit ist im Modul 2 größer als im Modul 1. Damit verbunden ist auch eine höhere Variabilität zwischen den Tagen. Eine Ursache dafür liegt in den Sturmpetoden (mit erhöhter Böigkeit) bzw. dem Durchzug von Wetterfronten während des Moduls 2. Auch die Standardabweichung innerhalb eines 30-min-Zeitraums war im Modul 2 höher. Das Aussehen der Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung ist in prinzipiellen Zügen vergleichbar zum Modul 1: die Variabilität ist am Clarkmast, insbesondere in 10 m Höhe (Median: 0,39 m/s), höher als am 3-m-Mast (Median: 0,27 m/s in 1 m bzw. 0,24 m/s in 3 m Höhe).

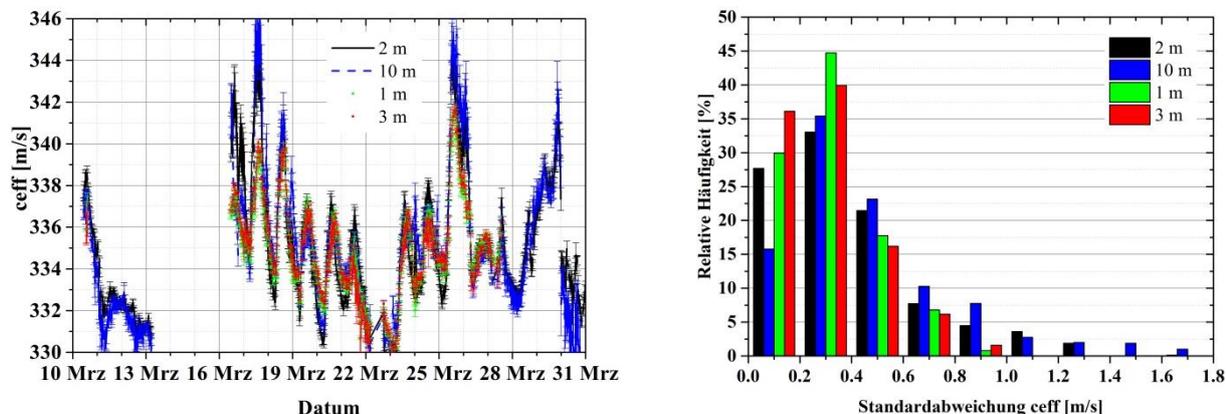


Abbildung 54: Tagesgang der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) mit Standardabweichung im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen (links) und Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung (rechts)

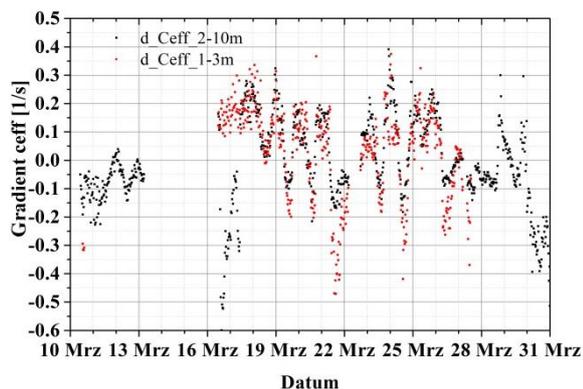


Abbildung 55: Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im abgestimmten Messzeitraum Modul 2 (2015) in verschiedenen Höhen

Abbildung 55 stellt die tägliche und tageszeitliche Variabilität der mittleren Schallgeschwindigkeitsgradienten für den Messzeitraum im Modul 2 dar. Im Vergleich zu Modul 1 treten, bedingt durch die vorherrschende Windrichtung, auch am 3-m-Mast deutlich häufiger negative Gradienten auf. Die Variabilität zwischen den einzelnen Tagen und Tageszeiten ist ebenfalls im Modul 2 größer. Über den gesamten Zeitraum betrachtet, treten sowohl positive als auch negative Gradienten auf, wobei die Mitwindsituationen überwiegen. Betragsmäßig werden die größten Gradienten wieder in ungünstigen Situationen für eine weite Schallausbreitung erreicht. Im Vergleich zu Modul 1 treten jedoch auch häufiger Situationen mit einem positiven Gradienten von 0,3 m/s und mehr auf, was einem starken Schallbrechungseffekt (Brechung in Richtung Erdoberfläche = weitreichende Schallausbreitung) entspricht.

Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigen wieder eine höhere zeitliche Auflösung, d. h. einen 1-min-Mittelwert bzw. die dazu gehörende Standardabweichung. Tagsüber unterliegt die effektive Schallgeschwindigkeit sehr starken Schwankungen von Minute zu Minute. Auch die Standardabweichung schwankt in dieser Zeit besonders intensiv. Die Maximalwerte der Standardabweichung werden zwischen 10 und 16 Uhr MEZ mit ca. 1,2-1,4 m/s in 10 m Höhe erreicht. Diese Werte liegen im Bereich der maximalen Standardabweichung am 19.10.2014. In den Morgenstunden werden minimale Werte der zeitlichen Variabilität gemessen. Relativ hohe Werte der Standardabweichung treten auch in den Nachtstunden auf. Am 19.03. und am 24.03.2015 herrschten bezüglich dieses beschriebenen Tagesganges ähnliche Bedingungen vor.

Die Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit (Abbildung 58 und Abbildung 59) schwanken am 3-m-Mast wie auch 2014 wieder am meisten. Im Vergleich zu den speziell betrachteten Tagen im Modul 1 ist hier jedoch ein stärkerer Tagesgang zu verzeichnen, mit einem Minimum der Gradienten in den Mittagsstunden (negative Gradienten) und maximalen Werten in der 2. Nachthälfte (positive Gradienten). Unterschiede zwischen den beiden Messmasten treten vor allem am 24.03.2015 auf. Hier lag der kleine Mast meist im Lee des Waldgebietes.

Für die Einschätzung der Übertragbarkeit der akustischen Messergebnisse auf andere Tageszeiten bzw. Tage eignen sich wie auch bei Modul 1 die Standardabweichungen zu den 30-min-Mittelwerten und speziell diejenigen der 1-min-Werte.

Die Zusammenschau der Gradienten mit den akustischen Messdaten (Walddämpfungen) wird jedoch vor allem aus Gründen der Übersichtlichkeit und Ableitung genereller Tendenzen mit den 30-min-Mittelwerten vorgenommen (Abbildung 60).

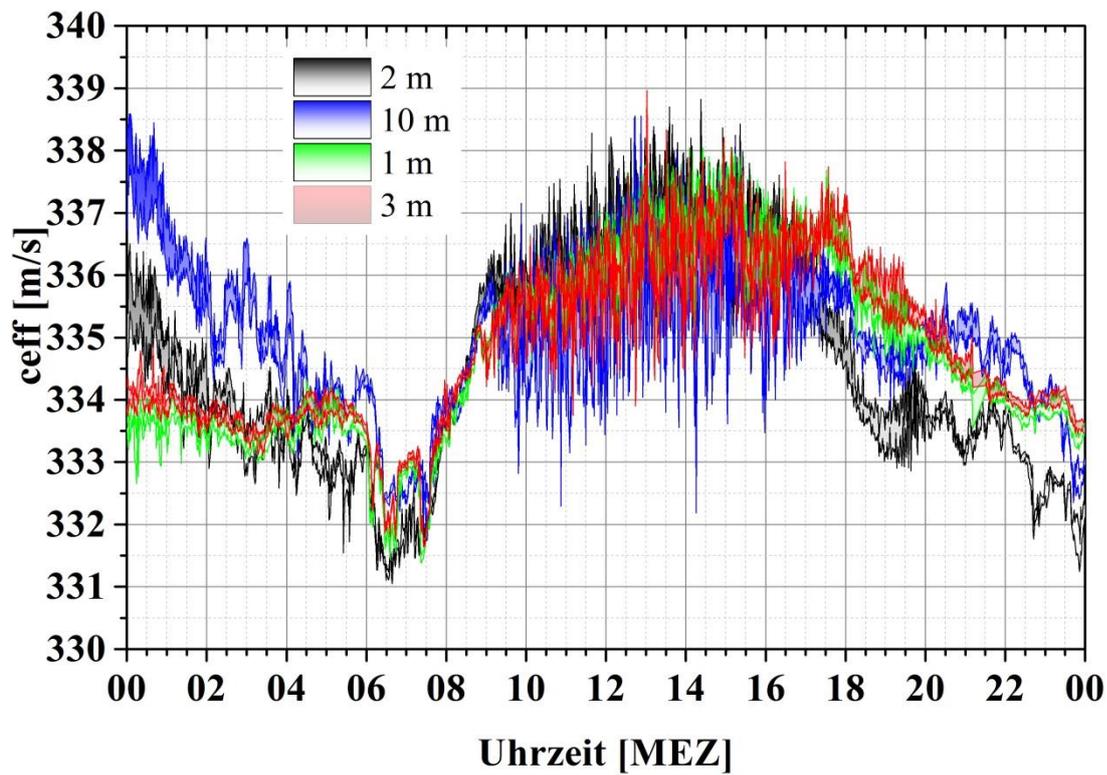


Abbildung 56: Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen

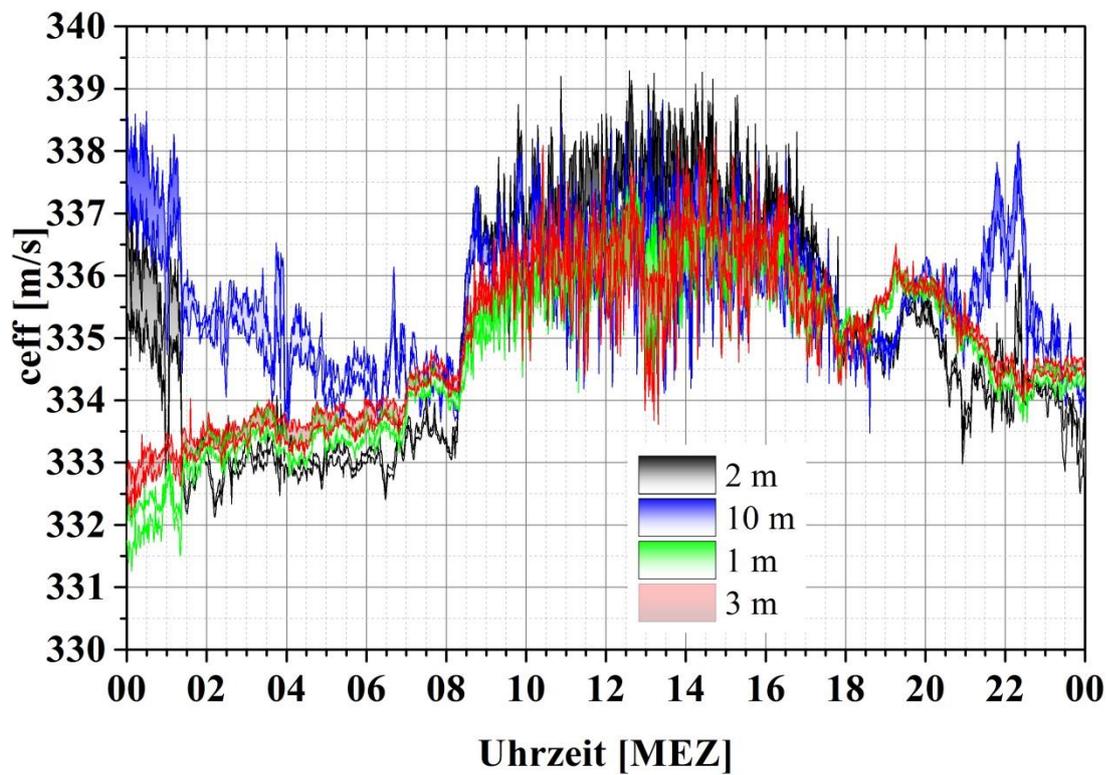


Abbildung 57: Tagesgang des Standardabweichungsbereiches um die mittlere effektive Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 24.03.2015 in verschiedenen Höhen

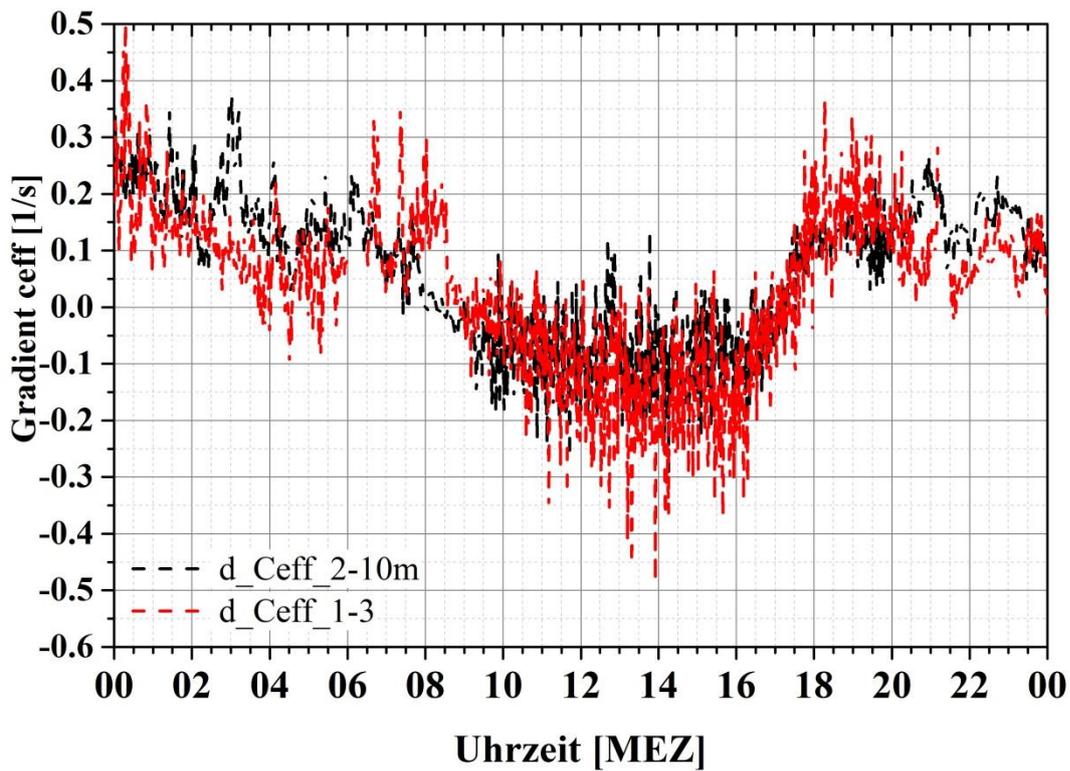


Abbildung 58: Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen

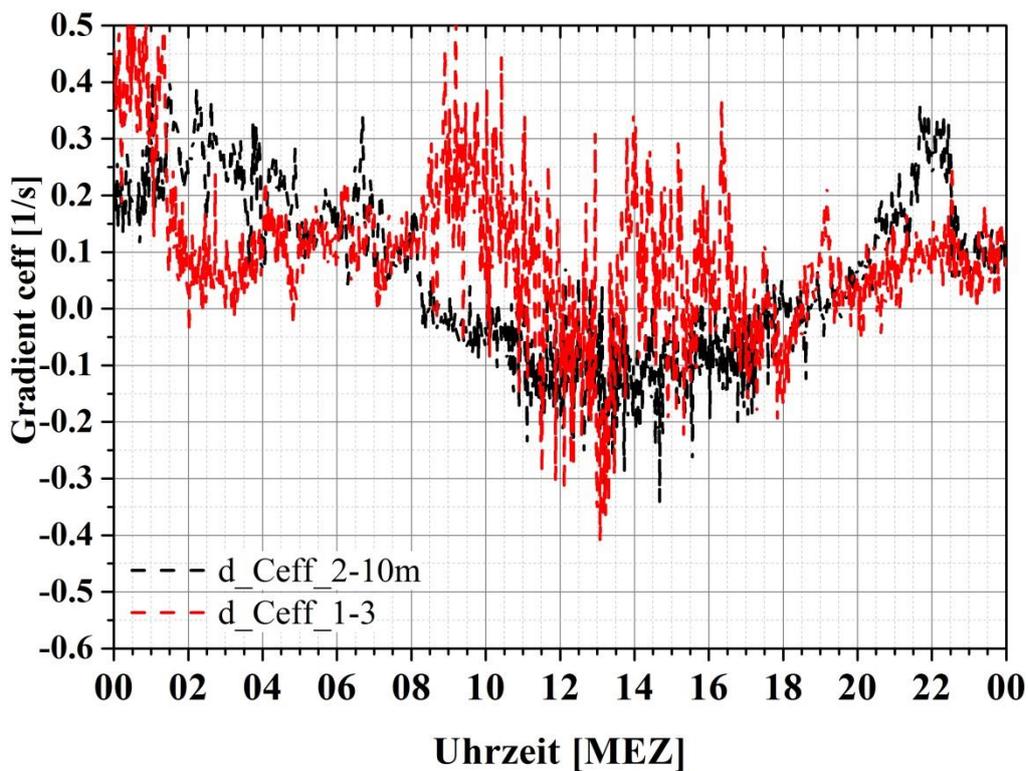


Abbildung 59: Tagesgang der Vertikalgradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (1 min Mittel) am 24.03.2015 in verschiedenen Höhen

Zusammenfassend sind wieder die Tagesgänge der Walddämpfung (A-bewertet, Summenpegel) zusammen mit denjenigen der Schallgeschwindigkeitsgradienten in Abbildung 60 dargestellt.

Der Wertebereich der Dämpfungen durch Nadelwald für die Messung an einem Tag ist diesmal in ungefähr derselben Größenordnung wie derjenige für die Laubwaldmessungen. Insgesamt sind die Schwankungsbreiten größer (bis zu 8 dBA) als für Modul 1. Dieses Resultat stimmt auch mit den größeren Schwankungen der Gradienten überein. Es ist davon auszugehen, dass bei Einbeziehung von Nachtmessungen, d. h. eines vollständigen Tagesganges, noch etwas größere Schwankungsbreiten für die Walddämpfungen auftreten. Die geringsten tageszeitlichen Schwankungen der Dämpfungen (z. B. am 11.03.2015) sind wieder mit geringen Standardabweichungen der Schallgeschwindigkeitsgradienten verbunden und umgekehrt (z. B. am 24.03.2015).

Im Modul 2 werden teilweise deutlich geringere Walddämpfungen erreicht, sowohl für die Laubwald- als auch für die Nadelwaldmessungen (11 dBA Minimum im Vergleich zu 16 dBA im Modul 1).

Weiteren Einblick in die tageszeitlichen Schwankungen und den tageszeitlichen Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeitsgradienten und Walddämpfung gibt der Anlagenband.

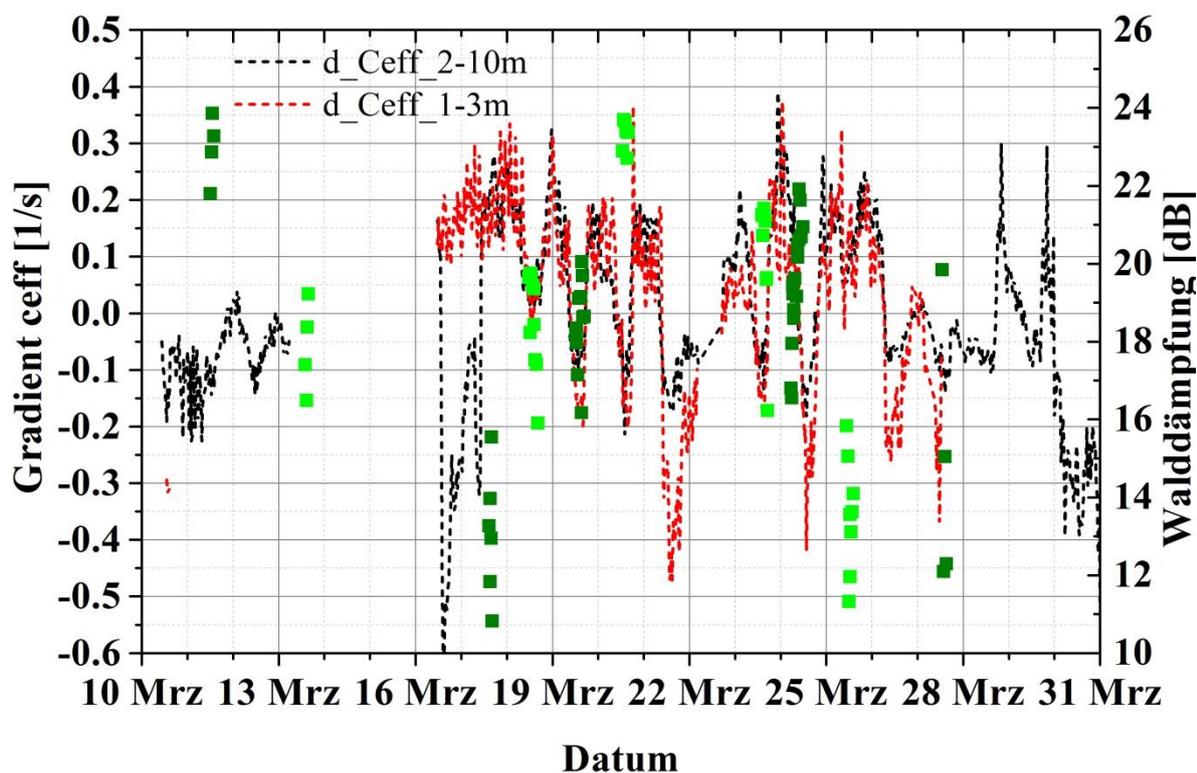


Abbildung 60: Tagesgänge der Walddämpfung (Nadel dunkelgrün und Laub hellgrün) und der Vertikalgradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit (30 min Mittel) im Modul 2

Zusammenfassung Modul 1 und 2

Bisher wurden alle Messreihen einzeln betrachtet. Um eine allgemeine Aussage treffen zu können, werden die Mittelwerte der Messreihen nun miteinander verglichen und mit den meteorologischen Daten zusammengeführt. An dieser Stelle sollen die akustischen Messdaten in zwei Übersichtsdiagrammen (Abbildung 61 und Abbildung 62) dokumentiert werden.

Abbildung 61 lässt vermuten, dass für die Angabe der Dämpfung als A-bewerteter Summenpegel die Waldart keine Relevanz hat, sondern eher durch meteorologische Größen bestimmt wird. Wird die Dämpfung jedoch frequenzabhängig betrachtet, so lassen sich systematische Unterschiede zwischen den Waldarten (und integral auch den Bodenbeschaffenheiten) erkennen.

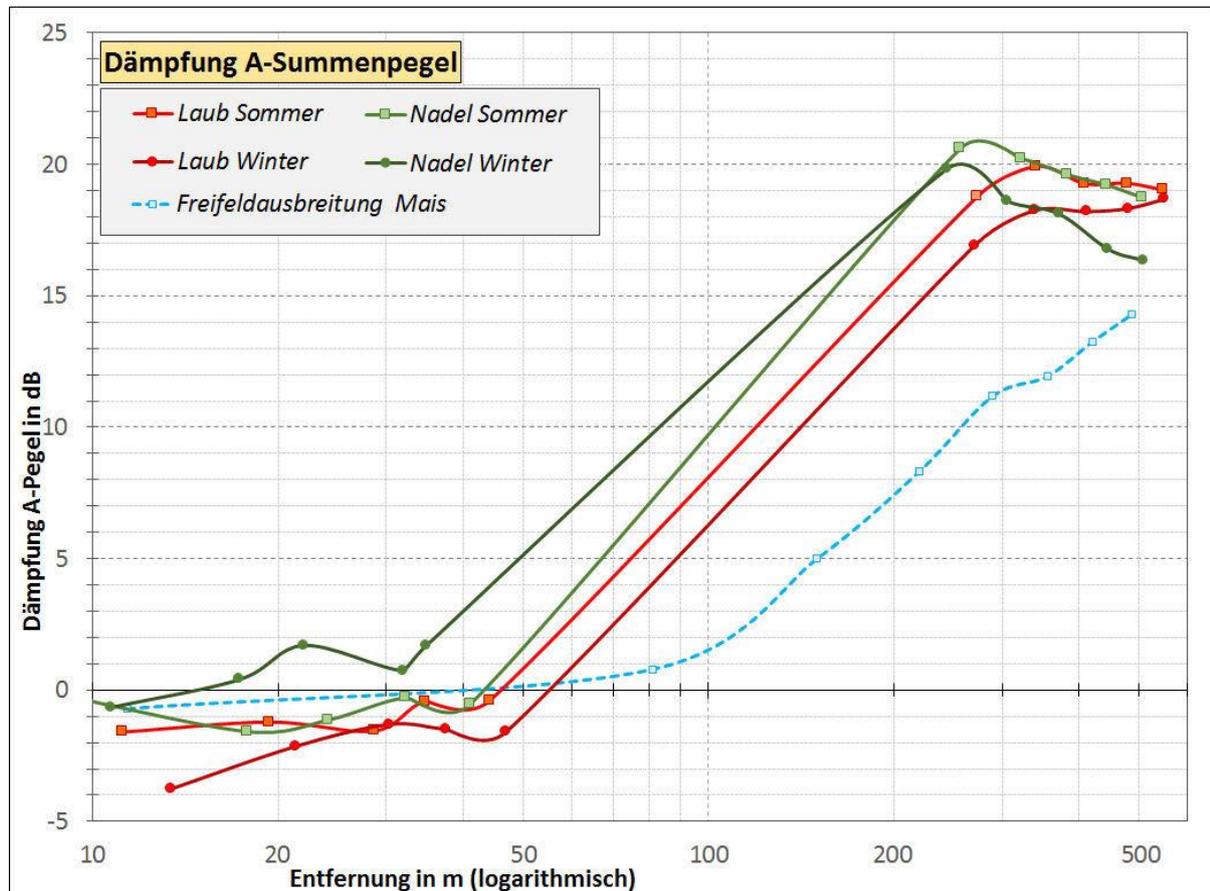


Abbildung 61: Mittelwerte der Dämpfung als A-Summenpegel für beide Module

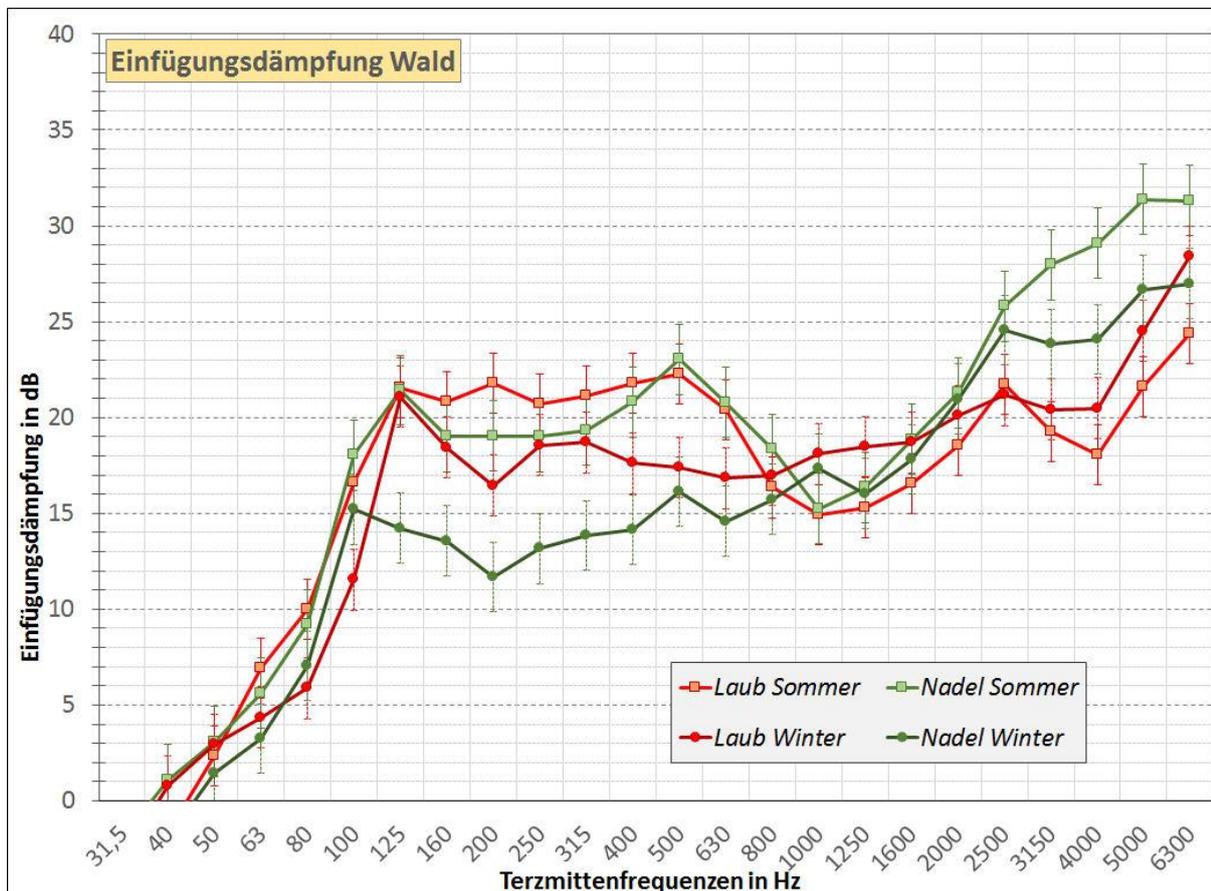


Abbildung 62: Mittelwerte der Einfügungsdämpfungen für beide Module

In der Abbildung 62 sind besonders bei hohen Frequenzen Unterschiede zwischen Laubwald und Nadelwald zu erkennen. Die Dämpfung ist für den Nadelwald deutlich höher. Dies könnte auf die deutlich größere Bewuchsdichte zurückzuführen sein. Betrachtet man den A-Summenpegel der Walddämpfung, dann ergeben sich folgende minimale und maximale Werte, die während aller Messungen festgestellt wurden:

Tabelle 11: Minima und Maxima der Einfügungsdämpfung (Walddämpfung) für alle Messungen

Modul/Baumart	Minimum Walddämpfung in dBA	Maximum Walddämpfung in dBA
1 (Winter)/Nadel	10,8	23,9
2 (Sommer)/Nadel	16,6	24,7
1 (Winter)/Laub	11,3	23,7
2 (Sommer)/Laub	17,5	21,2

Die niedrigsten Minima und die größten Maxima werden im Winterhalbjahr (Übergang zum Frühjahr) erreicht, d. h. die zeitliche Variabilität ist hier größer. Die Unterschiede zwischen Laub- und Nadelwald in einer Jahreszeit fallen demgegenüber geringer aus.

Betrachtet man die Schalldämpfung entfernungsabhängig (nur empfängerseitig, nach Walddurchgang des Schalls), dann zeigt sich ein zunehmender Unterschied der Minima und Maxima mit zunehmender Entfernung (Abbildung 63). Für diese Darstellung wurden für alle Messreihen (Modul 1 und 2 sowie Laub- und Nadelwald, jeweils unterschiedliche Farbabstufung) die Maxima und Minima bestimmt. Während die Maxima kaum entfer-

nungsabhängig sind, tritt für die Minima eine Verringerung der Dämpfung mit zunehmender Entfernung auf. Die maximale Schalldämpfung von ca. 20–25 dBA liegt dabei in einem Bereich, der auch in der Literatur angegeben wird (z. B. SALOMONS 2001). Die minimalen Schalldämpfungen sind meist größer als die Walddämpfung der Norm DIN ISO 9613-2 für einen 200 m breiten Waldbestand.

Zur Erläuterung der an zwei Messtagen aufgetretenen geringen Dämpfungswerte im Modul 2 wurden die meteorologischen Daten analysiert. Die vertikalen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit waren insbesondere am 17.03.2015 immer positiv (siehe auch Anlagenband). Die zu den Schallmessungen (Nadelwald) zugehörigen 1-min-Mittelwerte waren an beiden Messmasten mit 0,1 1/s bis 0,3 1/s (in zeitlicher Nachbarschaft sogar bis 0,5 1/s) relativ hoch. Senderseitig stimmten die Schallausbreitungs- und Windrichtung überein. Diese Bedingungen sprechen für eine weitreichende Schallausbreitung, also geringe Dämpfungen. Am 25.03.2015 waren die Dämpfungswerte auch gering (Walddämpfung Laubwald vergleichbar mit 17.03.2015). In größerer Entfernung von der empfängerseitigen Waldkante traten aber größere Dämpfungen als am 17.03.2015 auf. Auch am 25.03.2015 wurden während der akustischen Messzeiten positive c_{eff} -Gradienten gemessen, allerdings mit etwas geringeren Werten. Der Brechungseffekt ist am 25.03. etwas geringer als am 17.03.. Ob mit dem meteorologischen Einfluss die deutlich verringerten Dämpfungswerte auch im Vergleich mit den anderen Messtagen vollständig zu erklären sind, bleibt Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Die mittlere Dämpfung für Mitwindbedingungen (Abbildung 41 und Abbildung 45) für die vier verschiedenen Messreihen ist der Abbildung 64 zu entnehmen. Zu beachten ist hierbei, dass die Mittelbildung (Symbole mit Linien verbunden) für eine unterschiedliche Datenanzahl vorgenommen wurde. In dieser Abbildung sind auch minimale und maximale Werte eingezeichnet (ohne Linienverbindung).

Die meisten akustischen Messungen fanden bei Querwindbedingungen bezüglich der Windrichtung statt.

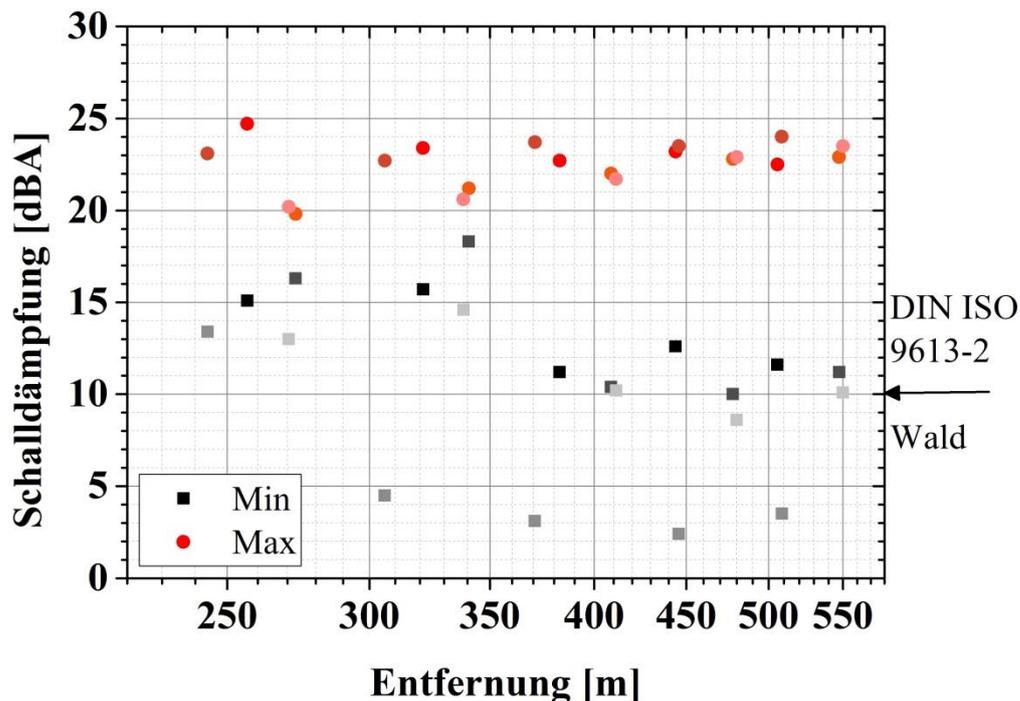


Abbildung 63: Minimale und maximale Schalldämpfung für alle Messungen in Abhängigkeit von der Entfernung von der Schallquelle

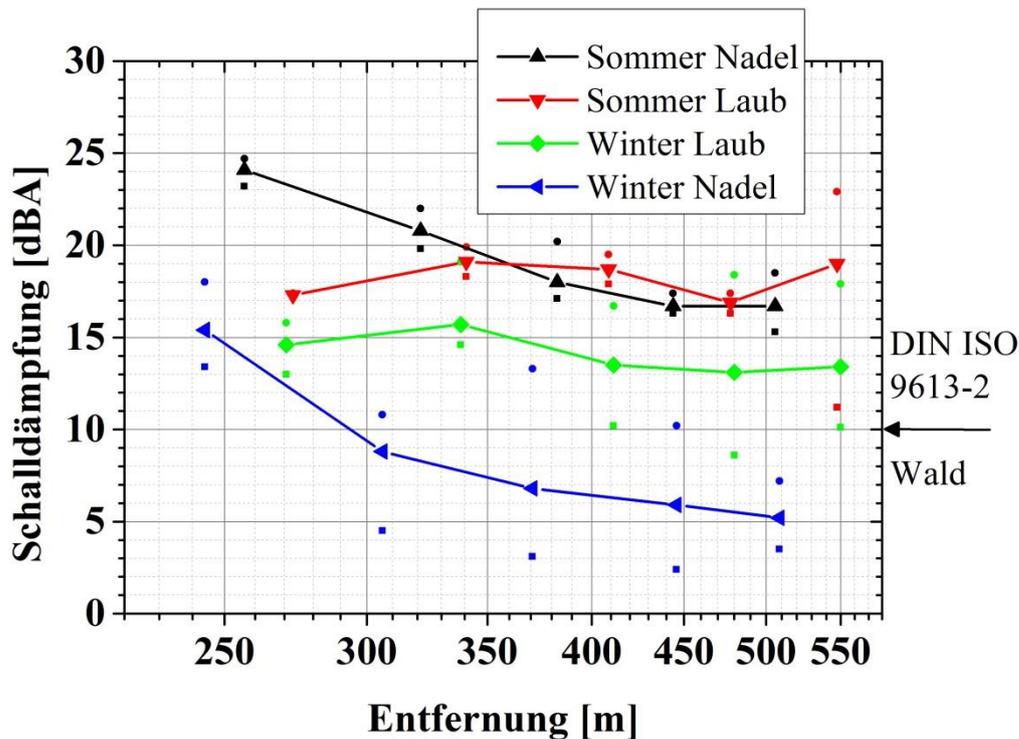


Abbildung 64: Minimale und maximale Schalldämpfung sowie Mittelwerte für alle Messungen in Mitwindrichtung in Abhängigkeit von der Entfernung

5.4 Vergleich mit Literaturergebnissen

Mit einer Literaturrecherche wurde der meteorologische Einfluss auf die Schallausbreitung und die damit verbundene Messung von Schallgrößen belegt (ZIEMANN 2014). Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend im Vergleich zu Modellrechnungen der Vorgängerstudie (BARTH et al. 2013) zusammengefasst.

Erste umfangreiche Untersuchungen des meteorologischen Einflusses auf die Schallausbreitung führten WIENER & KEAST (1959) durch. Ausgehend von einer Schallquelle in 1,5 m Höhe wurde die Dämpfung des Schallpegels für einen Empfänger in 3,6 m Höhe und unterschiedliche Entfernungen sowie Frequenzbänder bestimmt. Für eine Temperaturabnahme mit der Höhe (bzw. Gegenwind) wurde eine maximale Dämpfung von 35 dB gemessen. Ein ähnlicher Grenzwert für die Schalldämpfung in Schallschattenbereichen wurde auch von anderen Autoren und in der Vorgängerstudie festgestellt (HEIMANN & SALOMONS 2004; CHEINET 2012; BARTH et al. 2013). Auch bei einer Temperaturinversion (bzw. Mitwind) kam es in größerer Entfernung (ab ca. 100 m) in den Messungen von WIENER & KEAST (1959) zu einer Abnahme des Schallpegels, die allerdings geringer als die Dämpfung bei Gegenwind war. Für hohe Frequenzen (2,4–4,8 kHz) wurden 15 dB Dämpfung erreicht. Dieser Wert stimmt mit den Modellergebnissen von BARTH et al. (2013) überein. Aktuelle Untersuchungen von CHEINET (2014) weisen ebenfalls auf eine schalldämpfende Wirkung der Schallbrechung von ca. 10–20 dB hin.

FOSS (1979) ermittelte bei Messungen mit Lautsprechern und Mikrofonen in 1,2 m Höhe einen Schallpegelunterschied von 13 dB zwischen Mit- und Gegenwindausbreitung auf einer Entfernung von nur 46 m und in einem Frequenzbereich zwischen 1 und 3 kHz. Der Unterschied nahm mit zunehmender Empfängerhöhe etwas ab und betrug für geringe Frequenzen nur noch wenige dB (siehe auch EMBLETON 1996). BAUME et al.

(2005) und OSTASHEV (1997) finden einen ähnlichen Pegelunterschied (15–20 dB) für unterschiedliche meteorologische Bedingungen bei einer Entfernung von 200 m zwischen Schallquelle und Empfänger in 2 m Höhe.

Weiterhin untersuchten WIENER & KEAST (1959) die Variabilität des aufgezeichneten Schallpegels und stellten innerhalb von 30 s eine Schwankungsbreite von 10-25 dB fest. CHEINET (2012) und BAUME et al. (2005) finden ähnliche Schwankungsbreiten des Schallpegels infolge der zeitlichen Variabilität der meteorologischen Größen. Die größten Schwankungen traten tagsüber bei Gegenwind auf (siehe auch BARTH et al. 2013).

Untersuchungen von bodengebundenen Fluglärmereignissen bestätigen diese Resultate (PARKIN & SCHOLLS 1965). In dieser Studie wurden außerdem mittlere Dämpfungsunterschiede von 5 dB wegen veränderter Temperaturprofile im Sommer im Vergleich zum Winter gemessen. Markant war der Einfluss der Windrichtung: Bei einer Änderung von Mit- auf Gegenwindbedingungen resultierte eine Dämpfungsänderung um 20 dB bereits auf einer Entfernung von 110 m für größere Frequenzen (ab 800 Hz). Bei größeren Entfernungen zwischen Schallquelle und Empfänger war dieser Effekt für alle untersuchten Frequenzen feststellbar. Eine noch größere Variabilität in den Schallpegeln wurde bei der Messung von Explosionsknallen festgestellt (VALENTE et al. 2012).

Untersuchungen an Linienschallquellen verdeutlichen ebenfalls den meteorologischen Einfluss auf die Schallausbreitung. Langzeitmessungen von Straßenverkehrslärm in einer Entfernung von wenigen hundert Metern (GAUVREAU 2013) zeigen einen Dämpfungsunterschied (15-min-Mittelwert) von bis zu 20 dB für verschiedene Wettersituationen. HOHENWARTER & MURSCH-RADLGRUBER (2014) fanden Unterschiede zwischen verschiedenen Temperaturprofilen bis zu 10 dB(A) im Schallleistungspegel SEL, der in maximal 200 m Entfernung von einer Schienenlärmquelle gemessen wurde. Diese Pegelunterschiede waren bei der Betrachtung einzelner Frequenzen teilweise deutlich größer.

Die hohe Sensitivität der Schallausbreitungsparameter bezüglich des Schallbrechungseinflusses belegen Studien von JUNKER et al. (2007): Der Schallpegel ändert sich um 1 dB(A), wenn sich der vertikale Schallgeschwindigkeitsgradient um nur 0,005 1/s (bei einem mittleren Gradienten kleiner als 0,15 1/s) verändert.

5.5 Handlungsempfehlungen

Die Messergebnisse des aktuellen Projektes erweitern und verifizieren die in verschiedenen Vorgängerstudien erzielten Resultate zur akustischen Abschirmwirkung von Waldgebieten mit einem modular aufgebauten und innovativen Messkonzept. Die Einfügungsdämpfung von zwei unterschiedlichen Waldgebieten einer Breite von ca. 200 m wurde quantifiziert und in ihrer zeitlichen Variabilität infolge meteorologischer Einflüsse bewertet. Diese sogenannte Walddämpfung entspricht der Dämpfung eines A-bewerteten Summenpegels infolge des Waldeinflusses (kombinierter Einfluss des Waldbodens, der Vegetation und der meteorologischen Situationen). Für dieses Dämpfungsmaß wurden, in Anlehnung an das Bewuchsdämpfungsmaß der Norm DIN ISO 9613-2, die akustischen Messungen mit zwei Mikrofonen jeweils direkt an den nord- (empfängerseitig) und südseitig (senderseitig) gelegenen Waldkanten genutzt. Entfernungsabhängige Dämpfungen wurden mit Mikrofonen in größerer Entfernung von der Waldkante bestimmt.

Die folgenden Bewertungen der Projektergebnisse können als Handlungsempfehlungen für die Anwendung der Bewuchsdämpfungsmaßzahl A_{fol} aus der Norm DIN ISO 9613-2 und zur schallschutzgerechten Planung der Anpflanzung von Wäldern dienen.

5.5.1 Handlungsempfehlungen für die Schallimmissionsprognose

Der angegebene Normwert für die Bewuchsdämpfung A_{fol} (Dämpfung eines Oktavbandgeräusches bei 500 Hz) wird entsprechend Anmerkung 1 der DIN ISO 9613-2 zum Vergleich mit den folgenden Dämpfungen der A-bewerteten Summenpegel verwendet.

- Der gemessene Betrag der **Abschirmwirkung** eines 200 m breiten Waldgebietes ist immer **größer als die Normangaben** der DIN IS 9613-2 (= 10 dB). Für Modul 1 (Sommer) liegt das Einfügungsdämpfungsmaß für die untersuchten Waldgebiete im Bereich von **17–25 dB**, für Modul 2 (Winter) bei **11–24 dB**. Diese Werte liegen im Bereich von anderen Literaturangaben (Mittelwert 14 dB/100 m unter Beachtung der eingeschränkten Vergleichbarkeit der Studien).
- Im Mittel über alle Messungen (zwei Module, zwei Waldgebiete) beträgt die gemessene Walddämpfung A_{fol} **19 dB für ein 200 m breites Waldgebiet**. Daraus ergibt sich für das Bewuchsdämpfungsmaß der Modellansatz $A_{fol} = 0,095 \text{ dB/m}$. Im Sinne des Immissionsschutzes erscheint der Ansatz der Norm DIN ISO 9613-2 in Höhe von 0,05 dB/m deshalb als konservativ.
- Die **zeitliche Variabilität** der Walddämpfung (**6 dB** und mehr innerhalb von drei bis vier Stunden bei einer Änderung des vertikalen Schallgeschwindigkeitsgradienten um ca. 0,2 1/s) hängt mit den meteorologischen Einflüssen auf die Schallausbreitung zusammen. Dieser Schwankungsbereich sollte bei der Angabe von Mittelwerten für die Walddämpfung berücksichtigt werden.
- Die Walddämpfungen für einen Fichtenbestand und einen Birkenbestand liegen in einem ähnlichen Bereich. Die **Unterschiede zwischen den Modulen** (= der Einfluss von Jahreszeit/Messserien) sind **größer als zwischen den Vegetationstypen**. Im Modul 1 werden die größten Walddämpfungen für den Fichtenbestand erreicht. Bei Mitwind ist die Dämpfungsreichweite des Birkenbestandes größer (geringer Datenumfang). Einen bedeutenden Teilbeitrag zur gesamten Walddämpfung leistet der **Bodeneffekt** des schallweichen Waldbodens.

5.5.2 Handlungsempfehlungen für die schallschutzgerechte Planung von Waldgebieten

Die untersuchten Waldgebiete erbringen beide (Fichten- und Birkenbestand) eine **signifikante zusätzliche Schalldämpfung**. Bei der Planung eines **schallschutzgerechten Waldgebietes** sollte auf folgende Parameter geachtet werden:

- Bei den Baumarten ist ein Optimum zwischen **hoher Pflanzenoberflächendichte** auch ohne Belaubung (hohe Dichte an Ästen und Zweigen) und dem Grad an **Kompaktheit der Waldstruktur** (hohe Stammzahl pro Flächeneinheit) zu finden. Einerseits führt eine hohe Dichte an Stämmen, Ästen, Zweigen zu einer hohen Dämpfung über einen größeren Bereich des akustischen Frequenzspektrums. Andererseits muss ein ausreichendes Lichtangebot für die Entwicklung einer Bodenvegetation gegeben sein.
- Um das oben genannte Kriterium zu erfüllen und gleichzeitig einen optimalen Schallschutz auch während des Winters zu gewährleisten, wird generell die Anpflanzung von **Mischwäldern** empfohlen.
- Auf die Gestaltung der Waldränder und des bodennahen Bewuchses ist zu achten. **Gestufte Waldränder** (d. h. Sträucher in verschiedenen Höhen) und ein ausgeprägter **Unterwuchs** im Waldbestand (z. B. durch unterschiedliche Altersgruppen des Baumbestandes) führen zu einer maximalen akustischen Dämpfung. Damit werden alle Einzelkomponenten der Walddämpfung maximiert (Dämpfung durch Vegetationsbestandteile, Dämpfung durch den Waldboden).
- Der Waldbestand sollte eine Breite von mindestens 100 m aufweisen und **nahe der Schallquelle** angepflanzt werden. Die gemessene Fernwirkung bis in mindestens 300 m Entfernung hinter der empfängerseitigen Waldkante empfiehlt eine **Bestandsbreite von ca. 200 m** und eine **Vegetationshöhe von mindestens 20 m**.

Nähere Informationen zur **Wahl der bevorzugten Baum- und Straucharten** sind der nachstehenden Zusammenstellung zu entnehmen (Rau, 2015):

- Geeignet für die **Waldrandgestaltung** sind Kornelkirsche, Roter Hartriegel, Hasel, Eingriffeliger Weißdorn, Zweigriffeliger Weißdorn, Europäisches Pfaffenhütchen, Schlehe, Kreuzdorn und Gemeiner Schneeball.
- Darüber hinaus sind weitere Waldsträucher zum Aufbau eines **gestuften Waldrandes** geeignet (Abfolge des Aufbaus von außen zum Wald hin: Krautschicht, Strauchschicht, Vorwald, Wald):
 - Höhenklasse bis 3 m: Berberitze, Heckenrose, Pfaffenhütchen, Roter Hartriegel, Rote Heckenkirsche, Schwarzdorn
 - Höhenklasse 3–7 m: Faulbaum, Gewöhnlicher Schneeball, Haselnuss, Kornelkirsche, Kreuzdorn, Liguster, Purpurweide, Roter Holunder, Schwarzer Holunder, Weißdorn, Wolliger Schneeball
 - Höhenklasse 8–15 m: Feldahorn, Mehlbeere, Salweide, Traubenkirsche, Vogelbeere

Bei der Wahl der Baumarten ist auch auf die Förderrichtlinie Wald und Forstwirtschaft WuF/2014 des SMUL im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur- und Küstenschutz (GAK) Erstaufforstungen zu achten. Dabei wird eine Neuanlage von Wald mit einem Mindestanteil von 30 % Laubbäumen gefördert. Diese Förderung ist entsprechend GAK-Rahmenplan bis 31. Dezember 2016 befristet. Ausgeschlossen sind dabei Aufforstungen mit Gemeiner Esche.

5.6 Weiterführende Arbeiten und Ausblick

Die meteorologischen und akustischen Messergebnisse der vorliegenden Studie ergeben zusammen mit den akustischen Messungen der Vorgängerstudie (REICHE & KRAPF 2008) eine umfangreiche Datenbank zur Abschirmwirkung von Waldgebieten. Die aktuell durchgeführten Messungen quantifizieren außerdem den meteorologischen Einfluss auf die akustische Walddämpfung bzw. auf die Schalldämpfung in unterschiedlichen Entfernungen vom Waldgebiet. Auf diese Weise wurden der Wertebereich und weitere statistische Kenngrößen der akustischen Abschirmwirkung in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen bestimmt.

Zur vorhandenen Datenbasis zählen auch die Resultate umfangreicher numerischer Simulationen mit verschiedenen meteorologisch-akustischen Modellketten (BARTH et al. 2013; ZIEMANN 2014) und aus unabhängigen Literaturquellen (BERNHOFER et al. 2012; ZIEMANN 2014). Die vorliegende Datenbank mit Modelldaten zur meteorologisch beeinflussten, zeitlich und räumlich variablen Zusatzdämpfungswirkung von Waldgebieten bietet sich für eine weitergehende Diskussion und Verallgemeinerung der Messergebnisse an.

Folgende Arbeitspakete (AP) werden dafür im **direkten Anschluss** an das Projekt vorgeschlagen:

AP 1: Auswertung von akustischen 10-Kanal-Messungen und Korrelation mit meteorologischen Messungen sowie Modelldaten

Inhalt:

- Auswertung der vorhandenen Messwerte eines 5-Kanal-Systems (Brüel & Kjaer, senderseitig) und Vergleich mit den Daten der empfangsseitigen seriellen 5-Kanal-Messung
- Korrelation der akustischen Messwerte mit meteorologischen Messdaten im 30-min-Mittel und 1-min-Mittel einschließlich Standardabweichung (Gradienten von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Schalltemperatur und der effektiven Schallgeschwindigkeit)

- Vergleich der Korrelation meteorologischer und akustischer Daten sender- und empfangsseitig und Ergebnisdiskussion unter Einbeziehung von passenden Modelldaten der meteorologisch-akustischen Modellkette
- Bewertung der Stationarität der direkt gemessenen bzw. abgeleiteten meteorologischen Größen im akustischen Messzyklus und Diskussion der Auswirkung von Instationaritäten auf die akustischen Messungen

Ziel:

Vergrößerung, Absicherung und Erhöhung der Verallgemeinerbarkeit der erhobenen Datenbasis, Abschätzung des meteorologischen Einflusses auf den Unterschied zwischen paralleler und serieller akustischer Messung

AP 2: Detailauswertung Messung mit akustischer Kamera

Inhalt:

- detaillierte Auswertung akustischer Messdaten, erhoben mit der akustischen Kamera, und Auswertung der entsprechenden meteorologischen Messdaten gemäß AP 1
- Korrelation der meteorologischen und akustischen Messergebnisse gemäß AP 1
- Bewertung der Daten der akustischen Kamera hinsichtlich der (räumlichen) Informationserweiterung zu den durchgeführten akustischen Messungen unter Einbeziehung meteorologischer Einflüsse auf die Schallausbreitung
- Vergleich der Messdaten mit passenden Modelldaten und Bewertung des Vergleichs

Ziel:

Abschätzung, welcher Informationsgewinn durch Messungen mit einer akustischen Kamera neben herkömmlichen akustischen Messungen erzielt werden kann

Weitere Arbeitspakete (AP) für mittelfristige Forschungsvorhaben dienen der Untersuchung besonderer Situationen (bezüglich der Umgebungsbedingungen bzw. der Aufstellung der Sender) während der Messkampagnen. Neben vorhandenen Modell- und Literaturdaten sollen dabei die Ansätze der DIN ISO 9613-2 zum Vergleich herangezogen werden.

AP Detailauswertung spezieller Messsituationen bezüglich der Schallausbreitungsgeometrie und Umgebungsbedingungen sowie Vergleich mit Modelldaten

Inhalt:

- detaillierte Auswertung meteorologischer und akustischer Messdaten einzelner Tage mit Dämpfungen infolge des Waldeinflusses bzw. in größerer Entfernung vom Waldgebiet für eine Senderposition in größerer Entfernung vom Waldgebiet und für Freifeldschallausbreitungen
- Vergleich der entsprechenden meteorologischen Messdaten mit passenden Modelldaten und Bewertung des Vergleichs
- Vergleich der akustischen Messdaten mit passenden Modelldaten der Zusatzdämpfung aus der Vorgängerstudie und Diskussion möglicher Abweichungen zwischen Mess- und Modelldaten unter Einbeziehung der Berechnungsvorschrift der DIN ISO 9613-2

Ziel:

Erhöhung der Verallgemeinerbarkeit der gemessenen Datenbasis mit Hilfe von Modelldaten, Abschätzung des Unterschieds zwischen Messung und verschiedenen Modellen einschließlich der DIN ISO 9613-2

AP Detailauswertung von Messsituationen mit extremen Dämpfungen und Vergleich mit Modelldaten

Inhalt:

- detaillierte Auswertung meteorologischer und akustischer Messdaten einzelner Tage mit extremen Dämpfungen (Maxima, Minima) infolge des Waldeinflusses bzw. in größerer Entfernung vom Waldgebiet
- Vergleich der entsprechenden meteorologischen Messdaten mit passenden Modelldaten und Bewertung des Vergleichs
- Vergleich der akustischen Messdaten mit passenden Modelldaten der Zusatzdämpfung aus der Vorgängerstudie und Diskussion möglicher Abweichungen zwischen Mess- und Modelldaten unter Einbeziehung der Berechnungsvorschrift der DIN ISO 9613-2

Ziel:

Absicherung und Verallgemeinerbarkeit der gemessenen Datenbasis mit Hilfe von Modelldaten, Abschätzung des Unterschieds zwischen Messung und verschiedenen Modellen einschließlich der DIN ISO 9613-2

AP Bewertung der Berechnung des Bodeneffektes nach DIN ISO 9613-2 für Waldgebiete

Inhalt:

- gemeinsame Auswertung der vorhandenen Mess- und Modelldaten zum Bodeneinfluss in Abhängigkeit von Entfernung und Höhe der Schallquelle und der Empfänger sowie des Bodentyps und des betrachteten Frequenzbandes
- Bewertung des Bodeneinflusses in den Mess- und Modelldaten zur Walddämpfung bzw. Schalldämpfung unter Beachtung der Kopplung zwischen Boden- und Meteorologieeinfluss

Ziel:

Bewertung der Berechnung des Bodeneffektes nach DIN ISO 9613-2 (Bewertung alternatives Verfahren) mit Anwendungsempfehlung

Ziel **neuer Untersuchungen** in einem Folgeprojekt sollte u. a. die Erweiterung der Datenbasis (Messung und Modellierung) und damit die Unterstützung bzw. Evaluierung der erlangten Erkenntnisse zur Schallabschirmung von Wäldern aus dem aktuellen Projekt sein. Hierzu sollte ein weiterer Waldstandort messtechnisch untersucht werden, der durch andere Vegetationsparameter (u. a. Baumart bzw. Artenmischung, Bewuchshöhe und Walddichte, Bodenbewuchs) und mikroklimatologische Bedingungen im Vergleich zum Standort Langhennersdorf gekennzeichnet ist. Insbesondere die Ausdehnung des durchschallten Waldgebietes sollte sich vom untersuchten Waldbestand unterscheiden. Angestrebt wird hier ein Bestand der Breite 100 m und (in naher Umgebung gelegen) 300 m, um den Effekt der Bestandsbreite auf den Wert des Einfügungsdämpfungsmaßes und die Schalldämpfung in größerer Entfernung vom Waldgebiet (Fernwirkung Wald) zu bestimmen. Hierbei sollten abgestimmte und mit dem Vorgängerprojekt vergleichbare meteorologische und akustische Messungen durchgeführt werden. Flankierend bieten sich adäquate Modelluntersuchungen an, welche die zeitlich und räumlich begrenzten Messungen verallgemeinern und außerdem weitere Parameter- und Sensitivitätsstudien ermöglichen. Die einzelnen Module bzw. Arbeitspakete orientieren sich dabei an den Vorgängerprojekten.

Der Vergleich der erzielten Ergebnisse beider Messstandorte ermöglicht die Ableitung einer tragkräftigeren Verallgemeinerung zur Schallabschirmung von Wäldern mit praxisnahen Anwendungsempfehlungen im Vergleich zur DIN ISO 9613-2.

Literaturverzeichnis

- BARTH, M., A. ZIEMANN, C. BERNHOFER (2014): Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Simulationen mit einem akustisch-meteorologischen Modell. Abschlussbericht der Technischen Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 69 S. Schriftenreihe des LfULG, Heft 33/2014 „Akustische Abschirmwirkung von Wäldern“
- BAUME, O., B. GAUVREAU, M. BÉRENGIER, F. JUNKER, H. WACKERNAGEL, J. P. CHILÈS (2005): Statistical exploration of small-scale variation in acoustic time series taking into account micro-meteorological stability condition. In Proc. Forum Acusticum, S. 1117-1122
- BERNHOFER, C., A. ZIEMANN, T. DONIX (2012): 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, 36 S. (unveröffentlicht)
- CHEINET, S. (2012): A numerical approach to sound levels in near-surface refractive shadows. The Journal of the Acoustical Society of America. 131 (2012), S. 1946-1958
- CHEINET, S. (2014): Long-term, global-scale statistics of sound propagation. The Journal of the Acoustical Society of America 135 (2014), S. 2581-2590
- DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (1999)
- EMBLETON, T. F. W. (1996): Tutorial on sound propagation outdoors. The Journal of the Acoustical Society of America 100 (1996), S. 31-48.
- FOSS, R. N. (1979): Effects of wind and ground plane attenuation on sound propagation near the ground. The Journal of the Acoustical Society of America 66 (1979), S. 1088-1092.
- GAUVREAU, B. (2013): Long-term experimental database for environmental acoustics. Applied Acoustics 74 (2013), S. 958-967.
- HEIMANN, D., E. M. SALOMONS (2004): Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels. Applied Acoustics 65 (2004), S. 925-950
- HIRSCH, K.-H. (2010): Bestimmung lärmindernder Faktoren beim Schießen. Abschlussbericht Cervus Consult GmbH, Auftraggeber: TransfBw DezMgmtNTSBw (2010), 109 S.
- HOHENWARTER, D., E. MURSCH-RADLGRUBER (2014): Nocturnal boundary layer profiles and measured frequency dependent influence on sound propagation. Applied Acoustics 76 (2014), S. 416-430
- JUNKER, F., B. GAUVREAU, D. ECOTIÈRE, C. CREMEZI-CHARLET, P. BLANC-BENON (2007): Meteorological classification for environmental acoustics—Practical implications due to experimental accuracy and uncertainty. In invited paper to International Congress on Acoustics (ICA).
- OSTASHEV, V. E. (1997): Acoustics in moving inhomogeneous media. E & FN Spon (1997), 261 S.
- PARKIN, P. H., W. E. SCHOLLES (1965): The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at Hatfield. Journal Sound Vibration 2, S. 353-374
- RAU, M. (2014): Waldbestandsdaten des Messgebietes Langhennersdorf, Staatsbetrieb Sachsenforst, Abteilung Obere Forst- und Jagdbehörde, persönliche Mitteilung vom 13.10.2014
- RAU, M. (2015): Weitere Waldbestandsdaten des Messgebietes Langhennersdorf sowie Informationen zu Strauch- und Baumarten für einen gestuften Waldrand, Staatsbetrieb Sachsenforst, Abteilung Obere Forst- und Jagdbehörde, persönliche Mitteilung vom 28.09.2015
- REICHE, D., K.-G. KRAPP (2008): Forschungsvorhaben „Akustisches Modell zur Abschirmwirkung von Wäldern. Abschlussbericht Wölfel Meßsysteme, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2008), 97 S. (unveröffentlicht)

- VALENTE, D., L. M. RONSSE, L. PATER, M. J. WHITE, R. SERWY, E. T. NYKAZA, D. G. ALBERT (2012): Blast noise characteristics as a function of distance for temperate and desert climates. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132 (2012), S. 216-227.
- WIENER, F. M., D. N. KEAST (1959): Experimental Study of the Propagation of Sound over Ground. *The Journal of the Acoustical Society of America* 31 (1959), S. 724-733.
- ZIEMANN, A. (2014): Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Simulationen mit einem akustisch-meteorologischen Modell. Abschlussbericht (Projektverlängerung) der Technischen Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2014), 32 S. (unveröffentlicht)
- ZIEMANN, A., WOLLMANN, U. (2014): Protokoll Kick-Off-Meeting des Projektes am LfULG Dresden-Pillnitz, 13.10.2014.

Danksagung

Besonders danken wir Rolf Büttner, Leiter der Agrargenossenschaft Langhenndorf eG, für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und vor allem für die Möglichkeit, die landwirtschaftlich genutzten Flächen für die akustisch-meteorologischen Messungen zu nutzen. Außerdem bedanken wir uns bei Matthias Rau vom Staatsbetrieb Sachsenforst für die Begleitung des Projektes und die Bereitstellung der forstlichen Parameter der Waldgebiete.

Wir danken der Technikabteilung der Professur für Meteorologie: Uwe Eichelmann, Udo Postel und Heiko Prasse für die umfangreiche Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Experimente in Grillenburg und Langhenndorf. Die besondere Herausforderung der Verdrehung des 30-m-Mastes infolge eines Sturmereignisses wurde durch den technischen Projektmitarbeiter Markus Hehn unter hohem persönlichem Einsatz gemeistert.

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:

Astrid Ziemann, Markus Hehn, 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
Hans-Jörg Ederer, Christoph Stüber
Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH
Julius-Otto-Straße 13, 01219 Dresden
Telefon: +49|351|4711-568
Telefax: +49|351|4711-599
E-Mail: mail@abd-online.com

Redaktion:

Uwe Wollmann
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Anlagenbezogener
Immissionsschutz, Lärm
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5201
Telefax: +49 351 2612-5099
E-Mail: uwe.wollmann@smul.sachsen.de

Fotos:

Astrid Ziemann, Markus Hehn, Hans-Jörg Ederer, Christoph Stüber

Redaktionsschluss:

02.06.2016

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 zugunsten 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.