

Schalldämpfung durch Wald (Teil 2)

Schriftenreihe, Heft 17/2016



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

Ergänzende Datenaufbereitung

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

1	Einführung und Zielsetzung	6
2	Messdaten	7
2.1	Schallpegelmessungen.....	7
2.2	Messungen mit der akustischen Kamera.....	8
2.3	Meteorologische Messungen.....	9
3	Methoden der Datenanalyse	9
3.1	Analyse der Schallpegelmessungen.....	9
3.2	Analyse der Kameradaten	11
3.3	Analyse der meteorologischen Messungen	12
4	Ergebnisse und Diskussion.....	12
4.1	Auswertung der 10-Kanal-Messdaten.....	12
4.2	Auswertung der Messungen mit der akustischen Kamera.....	15
4.3	Auswertung der meteorologischen Messungen	18
4.4	Zusammenführung der akustisch-meteorologischen Messergebnisse	23
4.4.1	Messtage mit akustischen 10-Kanal-Messungen	23
4.4.2	Zusätzliche Interpretation bisheriger Ergebnisse	26
4.5	Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse sowie Ausblick	37
5	Handlungsempfehlungen.....	39
	Anhang	40
	Akustische Kamera.....	40
	Handlungsempfehlungen für die Schallimmissionsprognose.....	41
	Handlungsempfehlungen für die schallschutzgerechte Planung von Waldgebieten.....	42
	Literaturverzeichnis.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema akustische Messtechnik	8
Abbildung 2:	Frequenzabhängiger Schallpegel am 28.10.2014 um 11:33:35 (links) und am 29.10.2014 um 12:34:59 (rechts)	10
Abbildung 3:	Mittlerer Schallpegel des Kanals 5 über alle Daten am 28.10.2014 (links) und am 29.10.2014 (rechts) sowie Pegeldifferenz zwischen der Messdatenaufnahme vor bzw. nach veränderter Einstellung	11
Abbildung 4:	Mittlerer Schallpegel (jeweils 30-s-Mittel) des Kanals 5 am 28.10.2014 (links) und am 29.10.2014 (rechts)	11
Abbildung 5:	Zeitlicher Verlauf der A-bewerteten Empfangspegel am 28.10.2014/Laubwald	13
Abbildung 6:	Zeitlicher Verlauf der A-bewerteten Empfangspegel am 29.10.2014/Nadelwald	13
Abbildung 7:	Tagesgänge der mittleren Windrichtung vom 27.-29.10.2014	18
Abbildung 8:	Tagesgänge des vertikalen Gradienten der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen	19
Abbildung 9:	Tagesgänge des vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen	19
Abbildung 10:	Tagesgänge der effektiven Schallgeschwindigkeit mit Standardabweichung in einminütiger Auflösung vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen	20
Abbildung 11:	Tagesgänge des Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit in einminütiger Auflösung vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen	21
Abbildung 12:	Tagesgang der mittleren Windrichtung am 24.03.2015	21
Abbildung 13:	Tagesgänge der vertikalen Gradienten der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit der und der mittleren Schallgeschwindigkeit vom 24.03.2015 in verschiedenen Höhen	22
Abbildung 14:	Tagesgänge der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (links) und des vertikalen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit (rechts) vom 24.03.2015 in verschiedenen Höhen	22
Abbildung 15:	Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der mittleren Walddämpfung am 28.10.14	24
Abbildung 16:	Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der Dämpfung der senderseitigen Pegel am 28.10.14	24
Abbildung 17:	Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der Dämpfung der empfängerseitigen Pegel am 28.10.14	25
Abbildung 18:	Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der Dämpfung der empfängerseitigen Pegel am 29.10.14	26
Abbildung 19:	Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (graue Linien) am 23.03.2015 (Laubwaldmessung)	28
Abbildung 20:	Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 24.03.2015 (Nadelwaldmessung)	30
Abbildung 21:	Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 17.03.2015 (Nadelwaldmessung)	32
Abbildung 22:	Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 25.03.2015 (Laubwaldmessung)	34
Abbildung 23:	Tagesgang des mittleren Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger S1 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) an verschiedenen Tagen im März 2015	35
Abbildung 24:	Tagesgang des mittleren Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger S1 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 24.10.2014 (Nadelwaldmessung)	36
Abbildung 25:	Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 24.10.2014 (Nadelwaldmessung)	36
Abbildung 26:	Tagesgang der mittleren Waldämpfung und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit am 24.10.2014 (Nadelwaldmessung)	37
Abbildung 27:	Bildschirm der Auswertesoftware der akustischen Kamera	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der mittleren Dämpfungswerte und zugehörigen Streuungen für eine senderseitig 55 m von der Bewuchskante entfernten Schallquelle	14
Tabelle 2:	Vergleich der frequenzabhängigen Pegelverteilungen für Nadel-/Laubwald.....	16
Tabelle 3:	Vergleich der entfernungsabhängigen Pegelverteilungen für Nadel-/Laubwald.....	17
Tabelle 4:	Mittlere Entfernung der Empfänger vom Sender aus GPS-Messungen (in m).....	26

1 Einführung und Zielsetzung

Bereits 2008 wurde vom Auftraggeber ein Forschungsprojekt „Akustisches Modell zur Abschirmung von Wäldern“ initiiert, das von der Firma Wölfel in Zusammenarbeit mit dem Akustik Bureau Dresden (ABD) bearbeitet wurde (REICHE & KRAPF 2008). Zur Vertiefung der dabei gewonnenen Erkenntnisse und zum Verständnis des Einflusses der meteorologischen Faktoren wurden in einem weiteren Projekt der Technischen Universität Dresden (TUD) (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). Die vorliegende Datenbank mit Modelldaten zur meteorologisch beeinflussten, zeitlich und räumlich variablen Zusatzdämpfungswirkung (BARTH et al. 2012; ZIEMANN 2014) bietet sich für eine weitergehende Diskussion und Verallgemeinerung der Messergebnisse an.

In dem kürzlich abgeschlossenen Folgeprojekt wurden die Modellergebnisse einer messtechnischen Verifizierung unterzogen (ZIEMANN et al. 2015). Die meteorologischen und akustischen Messergebnisse dieser Studie ergeben zusammen mit den akustischen Messungen der Vorgängerstudie (REICHE & KRAPF 2008) eine umfangreiche Datenbank zur Abschirmung von Waldgebieten. Die durchgeführten Messungen in verschiedenen Jahreszeiten 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.

Das Hauptziel der aktuellen Studie ist eine Vergrößerung, Absicherung und eine erhöhte Verallgemeinerbarkeit der erhobenen Datenbasis. Dafür sollen die bereits vorhandenen akustischen Messwerte eines 5-Kanal-Systems (Brüel & Kjaer, senderseitig) ausgewertet und mit den Daten von parallelen empfangsseitigen 5-Kanal-Messungen verglichen werden. Außerdem sollen Messdaten einer akustischen Kamera in die Auswertungen der vorliegenden Datenbasis einbezogen werden.

Sämtliche Details zu den Messbedingungen, zur Vorbereitung und Durchführung der meteorologischen und akustischen Messungen sind in ZIEMANN et al. (2015) enthalten.

2 Messdaten

2.1 Schallpegelmessungen

Die Schallpegelmessungen wurden während der Messmodule 1 und 2 im Vorgängerprojekt in verschiedenen Abständen zum Waldgebiet durchgeführt und in ZIEMANN et al. (2015) beschrieben. Die Messungen an den zehn unterschiedlichen Messpunkten (fünf senderseitig vor und fünf empfängerseitig nach Walddurchgang) fanden dabei in serieller Abfolge statt.

Ergänzend wurden während des ersten Moduls an zwei Tagen (28./29.10.2014) Mehrkanalmessungen von ABD durchgeführt, die eine zeitgleiche Messwerterfassung sowohl an den fünf senderseitigen als auch den fünf empfangsseitigen Mikrofonstandorten ermöglichten. Ziel der Auswertungen dieser Messungen war es, Einflüsse des Bodeneffekts durch die Veränderung der Mikrofonpositionierung zu verifizieren und damit eine Vergrößerung, Absicherung und eine erhöhte Verallgemeinerbarkeit der bisher ausgewerteten Datenbasis zu erreichen. Zudem sollte durch die gleichzeitige Registrierung aller zehn Mikrofonkanäle die Verbindung zu den meteorologischen Daten verbessert werden.

Für die Aufzeichnung wurde senderseitig ein 5-Kanal-Frontend (Brüel & Kjaer: „Multi-Analyzer 3560 B 020“) genutzt, das die Schallsignale von fünf Kondensatormikrofonen (Brüel & Kjaer: ½“-Kapsel „Typ 4189“ mit Vorverstärker Typ „4189-A-021“) verarbeiten kann, die mit Hilfe von BNC-Kabeln mit diesem verbunden werden. Von dem Frontend werden die digitalisierten Mikrofonsignale über eine LAN-Verbindung auf einen PC übertragen und mit Hilfe der Software „PULSE“ (ebenfalls Brüel & Kjaer, B&K) in Projektdateien in einem programminternen Datenformat gespeichert. Um eine hohe Zeitauflösung der Messungen zu ermöglichen, wurden jeweils 8 x 4 s-Datensätze aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte mittels des zum Programmsystem „PULSE“ gehörenden CPB-Analyse-Softwaremoduls.

Bedauerlicherweise traten bereits bei der Registrierung der senderseitigen Mikrofonkanäle der B&K-Messstrecke nicht nachvollziehbare und in der Auswertung zum Teil auch nicht mehr behebbare technische Probleme auf, weshalb die Daten für den Abschlussbericht 2015 nicht verwendet wurden. Um jedoch die nach Umfang und Systematik wertvollen Daten dennoch nutzen zu können, wurden alle bereits vorhandenen akustischen Messwerte der 10-Kanal-Messungen sowohl durch ABD als auch durch TUD nochmals einer Auswertung unterzogen. Es lagen am 28.10.2014 32 Messserien mit je acht Aufnahmen aller 4 s und am 29.10.2014 36 Messserien mit je acht Aufnahmen aller 4 s vor.

Entsprechend den Abstimmungen mit dem Auftraggeber (ZIEMANN & WOLLMANN 2014) wurden die fünf empfangsseitigen Mikrofonstandorte in jeweils 75 m Entfernung zueinander positioniert, wobei der erste Mikrofonstandort identisch mit der Waldkante war (ZIEMANN et al. 2015, Abbildung 14). Entsprechend der für Schallimmissionsprognosen üblichen Berechnungshöhe wurden alle Mikrofone mittels Stativen in 4 m Höhe über dem Boden positioniert. Alle Mikrofone waren mit Windschutz versehen. Die Schallsignale wurden mit ½“-Kondensatormessmikrofonen (NTI: „Typ MA220“) aufgenommen, in einem Mehrkanalmischpult (Behringer: „X32 Producer“) digitalisiert und mittels einer Firewire-Verbindung auf einem PC als Mehrkanalaufnahme (5-Kanal 48 kHz/24 bit-Mitschnitt) gespeichert (Abbildung 1). Mittels einer Audio-Schnitt-Software (Magix: „Samplitude“) wurde aus den einzelnen Aufnahmen eine unterschiedliche Anzahl möglichst störsignalfreier 5-s-Abschnitte vereinzelt und in einem Raumakustik-Analyseprogramm (Programm ARTA) einer Terzanalyse unterzogen.

Die Vergleichbarkeit der Datensätze war im Rahmen der Voruntersuchungen durch vergleichende Messungen der Schallausbreitung über einer Wiesenfläche sichergestellt worden (ZIEMANN et al. 2015).

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.

Die Messungen wurden sende- und empfangsseitig jeweils gleichzeitig gestartet und für ca. 30 s lange Zeitabschnitte aufgezeichnet (senderseitig $8 \times 4 \text{ s} = 32 \text{ s}$ /empfangsseitig $7 \times 5 \text{ s} = 35 \text{ s}$).

Zur Gewährleistung einer einheitlichen Pegelerfassung wurden täglich vor Beginn der Messungen alle 10 Kanäle mit einem akustischen Kalibrator (Brüel & Kjaer: Typ „4231“) auf $L_{\text{ref}} = 94 \text{ dB}$ kalibriert. Senderseitig speichert die Software „PULSE“ (Brüel & Kjaer) kanalweise die Werte der täglichen Kalibrierung, empfangsseitig wurde der Kalibrierton täglich für die spätere Auswertung im Labor je Kanal aufgezeichnet.

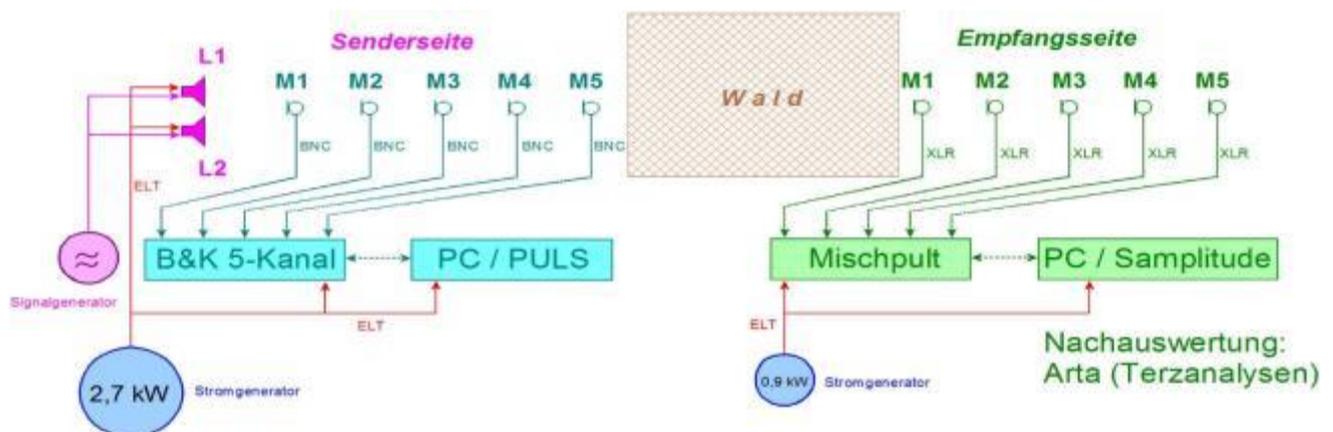


Abbildung 1: Schema akustische Messtechnik

2.2 Messungen mit der akustischen Kamera

Zum besseren Verständnis der Schallausbreitung durch das Waldgebiet hindurch und über dieses hinweg war es wünschenswert, neben den aus den zwar entfernungsabhängigen, aber richtungsneutralen Pegelmessungen auch zusätzliche Informationen zur Richtungsabhängigkeit zu erhalten. Dazu konnten am 24.03.2015 in Zusammenarbeit mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg ergänzende Messungen mit einer akustischen Kamera (Norsonic 848) gemacht werden, welche die Korrelation eines Kamerabildes mit den entsprechenden richtungsabhängigen (frequenzabhängigen) Pegelwerten ermöglicht. Auf diese Weise sollten zusätzliche Informationen gewonnen werden, in welchem Verhältnis die Schallanteile stehen, die sich zum einen direkt durch den Bewuchs hindurch und zum anderen über diesen hinweg ausbreiten.

Es wurden deshalb empfangsseitig sowohl Messungen an der Nadel- als auch an der Laubwaldfläche in unterschiedlichen Entfernungen vorgenommen. Die akustische Anregung erfolgte auch hierbei mit zwei Hochleistungs-Kompaktlautsprecherboxen (JBL: PRX 635), durch die bei einer mittleren Quellhöhe von $h_s \approx 1 \text{ m}$ ein optimiertes Anregungssignal (Rosa Rauschen Komprimiert) abgestrahlt wurde. Für den Ver-

gleich der dabei gewonnenen Ergebnisse mit den Standard-Pegelmessungen wurden die mittleren Dämpfungen für den Messzeitraum anhand des bis dahin ermittelten Tagesganges für den Messtag herangezogen.

2.3 Meteorologische Messungen

Die dieser Auswertung zugrunde liegenden Daten wurden während der Messmodule 1 (2014) und 2 (2015) im Vorgängerprojekt erhoben (ZIEMANN et al. 2015). Senderseitig wurden am transportablen und teleskopartigen Clark-Mast in fünf Höhengniveaus (2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m; Südseite Wald) und empfangsseitig am 3-m-Mast in zwei Niveaus (1 m, 3 m; Nordseite Wald) die relevanten meteorologischen Daten der Schalltemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung im 10-Hz-Takt aufgezeichnet. Der zeitlich mit den akustischen Messungen synchronisierte Messzeitrahmen des Moduls 1 erstreckte sich vom 19.10. bis 31.10.2014. Im Rahmen der aktuellen Studie werden speziell die Tage vom 28.-29.10.2014 (akustische Parallelmessungen mit einem 10-Kanal-System) betrachtet. Der Tag der Messung mit der akustischen Kamera, der 24.03.2015, lag im Messmodul 2 innerhalb der meteorologischen Messperiode vom 10.03. bis 31.03.2015. Dieser Tag wird ebenfalls in die Spezialbetrachtungen einbezogen. Zusätzlich werden vor allem Messergebnisse aus Modul 2 (2015) detaillierter betrachtet.

3 Methoden der Datenanalyse

3.1 Analyse der Schallpegelmessungen

Die generelle Auswertung der Schallpegelmessungen in Form von Terzspektren, A-bewerteten Summenpegeln und Pegel-Zeitreihen hat sich inhaltlich nicht im Vergleich zu ZIEMANN et al. (2015) geändert. Die Daten wurden jedoch komfortabler in Excel-Tabellen für die Anzeige aufbereitet (Möglichkeit der Darstellung von Zeitreihen und von 5-s-Mittelwerten zusätzlich zu den 32-s-Mittelwerten).

Für die Messtage 28.10. und 29.10.2014 wurden die 10-Kanal-Messungen durch ABD ausgewertet. Hierbei traten fragwürdige Ergebnisse auf, deren Ursache anhand einer manuellen Rohdatenauswertung durch TUD untersucht wurde. Diese Nachauswertung ergab, dass die Messungen (4-s-Mittelwerte) von vier Kanälen am 28.10.2014 bis ca. 15 Uhr verwendbar sind. Die Abfolge der senderseitigen Signale entspricht in diesem Zeitraum der Erwartung: Der höchste Pegel ist in Sendernähe zu finden (= Kanal 1), der geringste Pegel in Waldnähe mit der größten Entfernung zum Sender (= Kanal 5). Bereits vor 15 Uhr trat nachmittags eine Übersteuerung des Kanals 3 (= Position 3) auf. Die Messungen sind für diesen Messtag ab dem Zeitpunkt der Übersteuerung nicht auswertbar für diesen Kanal.

Ab ca. 15 Uhr des 28.10. einschließlich aller Messungen am 29.10.2014 ändert sich die oben beschriebene Abfolge der gemessenen Schallpegelwerte in nicht nachvollziehbarer Weise. Der höchste Pegel wird nun in größerer Entfernung (Position = Kanal 3) und nicht an der Position 1 in Sendernähe gemessen. Auch die Absolutwerte der Schallpegel und die Spektren erscheinen willkürlich verändert (Abbildung 2). Eine Übersteuerung von Kanälen (ähnlich Kanal 3 am 28.10.) ergibt sich aus der Datenanalyse der Frequenzspektren nicht. Es wurde jedoch eine Veränderung in den Einstellungen zum Wertebereich bzw. zur Sensitivität der Kanäle festgestellt, die das aufgetretene Muster der Schallpegelmessungen (Ähnlichkeit der Kanäle 2 und 4

bzw. 1 und 5) erklärt. Wie es zu diesen Änderungen der Aufzeichnungseinstellung kam, kann nicht mehr reproduziert werden.

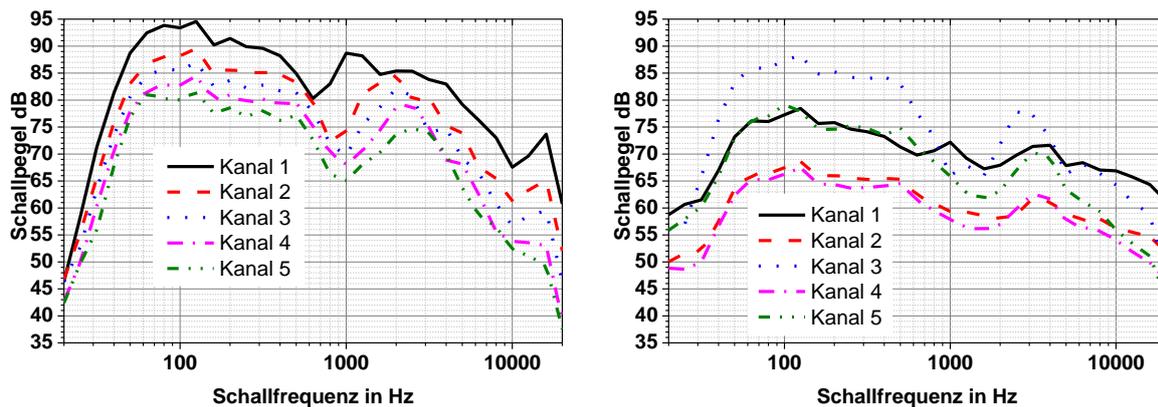


Abbildung 2: Frequenzabhängiger Schallpegel am 28.10.2014 um 11:33:35 (links) und am 29.10.2014 um 12:34:59 (rechts)

Eine nachträgliche Datenkorrektur ist für die Kanäle 1-4 nicht möglich, weil der Wertebereich der Kanäle zu gering für die Signalmessungen eingestellt war und die Daten damit abgeschnitten wurden. Das Hintergrundrauschen wurde demgegenüber senderseitig vollständig gemessen, was jedoch nicht zur Lösung der Messaufgabe beitragen kann.

Die Daten für den senderseitigen Mikrofonkanal 5 (direkt an der Waldkante) mit dem geringsten Signalpegel wurden mit einer spektralen Korrektur versehen, die sich aus der Differenz der mittleren Terzschallpegel vor (sieben Messserien mit je acht Messungen, 11:33-14:50 MEZ) und nach (neun Messserien mit je acht Messungen, 14:58-15:53 MEZ) der geänderten Einstellung ergibt. Mit diesen korrigierten Daten wurde die Wald-Einfügungsdämpfung berechnet und in den Excel-Datendateien hinterlegt. Diese Vorgehensweise wird durch die Annahme gestützt, dass für größere Frequenzbereiche ein im Mittel relativ konstanter Unterschied zwischen den Datenserien am 28.10.14 vor und nach der geänderten Messaufnahme vorhanden ist (Abbildung 3). Im Bereich des Pegelminimums zwischen 800 Hz und 1 kHz schwanken die Schallpegelwerte jedoch zeitlich (Abbildung 4). Der Versatz zwischen den Datensätzen nimmt hier stark ab. Auch im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 4 kHz treten am 28.10.14 zeitliche Schwankungen von teilweise > 5 dB auf. Hier ist auch auf die zeitlichen Unterschiede im Spektrum um 14:35 und 14:38 MEZ zu achten, d. h. vor der Änderung der Einstellungen. Diese Daten gehen in die Mittelbildung und damit in die Korrekturwerte ein.

Am 29.10.14 nimmt die zeitliche Variabilität der spektral aufgezeichneten Schallpegel ab. Die mittleren Schallpegelspektren vor (28.10.) und nach (28.10. bzw. 29.10.) geänderter Einstellung unterscheiden sich jedoch deutlich voneinander.

Aus diesen Gründen wird bei den nachfolgenden Auswertungen im Kapitel 4 auf die Einbeziehung korrigierter Werte für alle senderseitigen Empfängerpositionen verzichtet, um eine einheitliche Datenqualität der angegebenen Ergebnisse zu gewährleisten. Die weiteren Auswertungen enthalten die senderseitigen Messungen am 28.10.2014, 11:33-14:50 MEZ. Die empfängerseitigen Schallpegelmessungen wurden vollständig genutzt (siehe Kapitel 4).

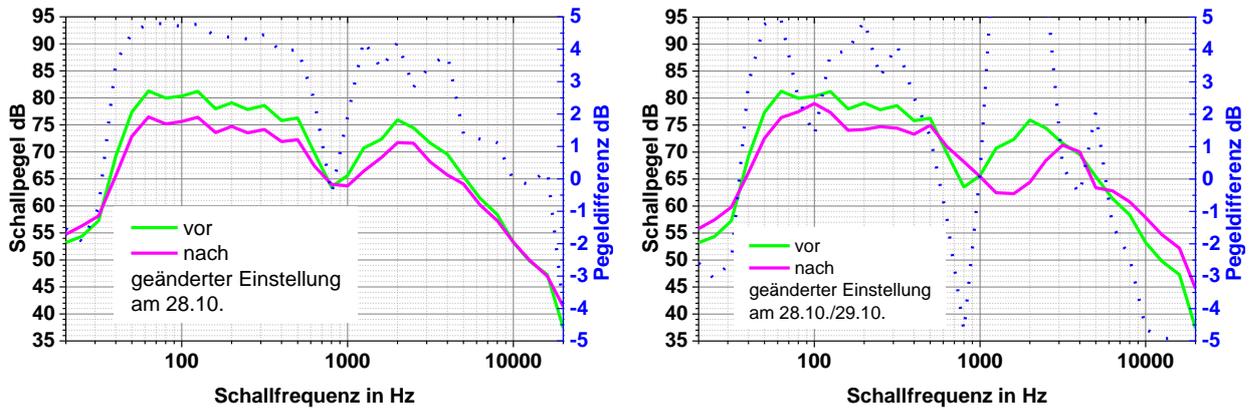


Abbildung 3: Mittlerer Schallpegel des Kanals 5 über alle Daten am 28.10.2014 (links) und am 29.10.2014 (rechts) sowie Pegeldifferenz zwischen der Messdatenaufnahme vor bzw. nach veränderter Einstellung

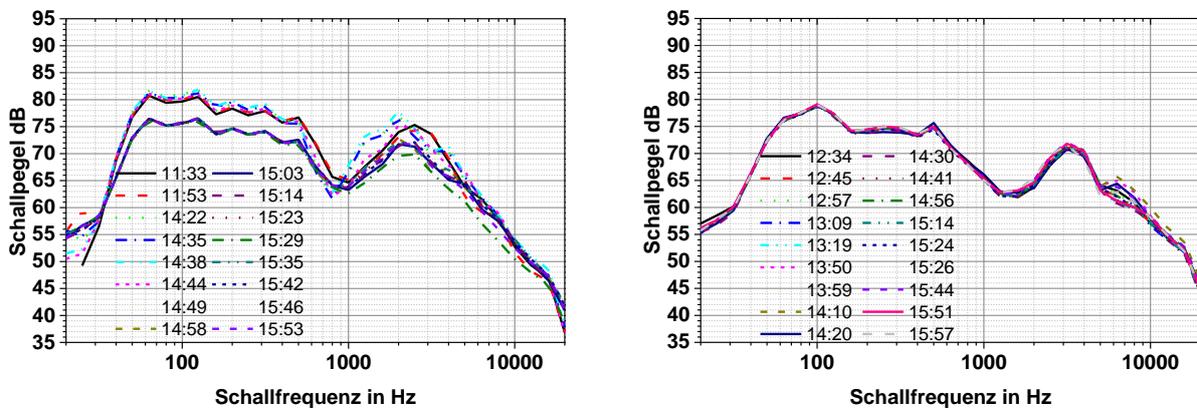


Abbildung 4: Mittlerer Schallpegel (jeweils 30-s-Mittel) des Kanals 5 am 28.10.2014 (links) und am 29.10.2014 (rechts)

3.2 Analyse der Kameradaten

Die akustische Kamera bietet für die Analyse des Schallfeldes eine Vielzahl von Optionen (Abbildung 27). Dabei können die Einstellungen für die Frequenzbewertung (unbewerteter/A-bewerteter Summenpegel, Schmalband-Ausschnitt), die Zeitbewertung (insbesondere Mittelungszeiten) und die Pegelung/Dynamik nahezu beliebig variiert werden. Vor Ort wurde zunächst jeweils ein vollständiger Datensatz für jede Messsituation gespeichert, für den in einer späteren Auswertung im Labor nochmals die Einstellungen angepasst wurden.

Eine Interpretation der Daten hinsichtlich des interessierenden Bewuchsdämpfungseffekts ist dann anhand der Überlagerung der Kamerabilder mit dazu korrelierenden „Pegelverteilungen“ für jeweils gleiche System-einstellungen möglich. Weil seitens der Autoren für die Analyse eines komplexen Schallschirmeffekts im Freien weder hinsichtlich der Anwendung einer akustischen Kamera Erfahrungen vorliegen noch vergleichende Anwendungen herangezogen werden können, beschränken sich die möglichen Deutungen zunächst auf eine rein phänomenologische Erörterung.

3.3 Analyse der meteorologischen Messungen

Die meteorologischen Messdaten der für diese Auswertung relevanten Tage wurden im Detail neu ausgewertet und 30-min- sowie 1-min-Mittelwertdateien erstellt. Dabei wurden selbst verfasste Programmroutinen verwendet und eine nachträgliche manuelle Feinkontrolle der Daten durchgeführt, um eine gleichbleibende und durch objektive Kriterien bestimmte Datenqualität zu gewährleisten. Damit wurde eine Plausibilisierung der bereits vorliegenden Daten vorgenommen. Es erfolgten keine methodischen Änderungen der Datenanalyse im Vergleich zum Vorgängerprojekt (ZIEMANN et al. 2015). Eine Übersicht zur meteorologischen Datenanalyse wurde für beide Messmodule im vorangegangenen Bericht (ZIEMANN et al. 2015) dargestellt.

Die Ableitung der Schallgeschwindigkeit (nur Lufttemperatur- und Luftfeuchteinfluss) erfolgt aus der Schalltemperatur. Die effektive Schallgeschwindigkeit setzt sich aus der Summe der temperaturbeeinflussten Schallgeschwindigkeit und der Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung zusammen. Auf diese Weise fließen verschiedene meteorologische Größen in die effektive Schallgeschwindigkeit ein, vor allem Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Die räumlichen Unterschiede dieser Größe (insbesondere die vertikalen Gradienten) bestimmen Qualität und Quantität des Effekts der Schallbrechung in der Atmosphäre. Absolute Werte der Variablen sowie deren Vertikalgradienten wurden methodisch analog zum Vorgängerprojekt analysiert. Positive Gradienten bedeuten eine Zunahme der Variablen mit zunehmender Höhe. Eine Temperaturinversion ist dementsprechend durch einen positiven Vertikalgradienten der Schalltemperatur beziehungsweise der Schallgeschwindigkeit gekennzeichnet. Häufig wird damit auch eine günstige Situation für eine weitreichende Schallausbreitung charakterisiert.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Auswertung der 10-Kanal-Messdaten

Auch für die 10-Kanal-Messungen wurden wieder die entfernungsabhängigen „Zusatzdämpfungen“ für die Schallausbreitung gegenüber einer reinen Freifeldausbreitung einer Kugelschallquelle berechnet. Dafür wurden aus den sende- und empfangsseitigen Aufzeichnungen getrennt die terzweise störschallkorrigierten energieäquivalenten Kurzzeit-Mittelungsspektren für die einzelnen Mikrofonpositionen bestimmt und zum Freifeld-Frequenzgang der Schallquelle ins Verhältnis gesetzt. Ausgewertet wurden jeweils die folgenden Kenngrößen:

- Zusatzdämpfung (summarische Wirkung von Bodendämpfung und Meteorologieeinfluss sowie empfangsseitig Bewuchsdämpfung) für die jeweilige Entfernung, bezogen auf den im reflexionsarmen Raum gemessenen ungestörten Lautsprecher-Frequenzgang in Hauptabstrahlrichtung in Form von Terz-Spektren
- Bewuchsdämpfung des 220 m tiefen Nadel- bzw. Laubwaldes, bezogen auf das jeweilige an der senderseitigen Waldkante gemessene Terzspektrum (für die Bewuchsdämpfung ist jeweils die Standardabweichung der Pegelwerte für alle betreffenden Messungen in den Datentabellen enthalten)
- Zusatzdämpfung in Form A-bewerteter Summenpegel entsprechend der jeweiligen Entfernung, berechnet aus den störschallkorrigierten Terzspektren



Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der A-bewerteten Empfangspegel am 28.10.2014/Laubwald



Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der A-bewerteten Empfangspegel am 29.10.2014/Nadelwald

Basierend auf der hohen zeitlichen Auflösung der 10-Kanal-Messserien von 5 s (empfangsseitig) können neben den mittleren Pegelwerten auch die detaillierteren zeitlichen Verläufe beurteilt werden. In Abbildung 5 (28.10.2014, Laubwald) und Abbildung 6 (29.10.2014, Nadelwald) sind die zugehörigen A-bewerteten Pegelverläufe der empfangsseitigen Mikrofonkanäle mit jeweils gleicher Dynamik dargestellt. Obwohl am 28.10.2014 (Messung Laub) in der zweiten Messphase (14:23/14:35 Uhr – hier auch veränderte Spektren des Hintergrundrauschens, ohne Abbildung) offensichtlich starke Störungen auftraten, ist in beiden Darstellungen für den Mikrofonstandort direkt an der Waldkante (Empfänger 1) ein systematischer (mittlerer) Pegelanstieg zu erkennen, der sinkenden Bewuchsdämpfungen entspricht. Für die vom Waldrand weiter entfernten Mikrofonpositionen folgen am 28.10.2014 (Messung Laub) die Pegel diesem Trend, während sie am 29.10.2014 (Messung Wald) eher umgekehrt dazu fallen. Weil die „mechanischen“ Randbedingungen (Entfernung, Wald, Boden) während der Messungen konstant blieben, muss es sich dabei also um einen meteorologischen Effekt handeln, der vor allem auf die sich über den Bewuchs hinweg ausbreitenden Schallanteile einen Einfluss hatte.

Gleichzeitig ist im Vergleich der beiden Abbildungen zu erkennen, dass die Pegel für die Messung Laubwald bei gleichlauter Anregung mit 50 ... 55 dB(A) systematisch höher liegen als die Empfangspegel für die Messung Nadelwald mit 47 ... 50 dB(A). Neben möglicherweise unterschiedlichen Schallausbreitungsbedingungen illustriert dies auch die etwas geringere Bewuchsdämpfung des Laubwaldes.

Wie die meteorologischen Einzelauswertungen in Kapitel 4.4 zeigen, herrschten an den Tagen der 10-Kanal-Messungen zum großen Teil schallausbreitungsgünstige Bedingungen, sodass die „zusätzlichen“ Einfügungsdämpfungen systematisch unter den bisherigen Mittelwerten der Standardmessungen liegen. Die Ergebnisse demonstrieren somit effektiv die durch die meteorologischen Einflüsse möglichen Schwankungsbreiten der akustischen Kennwerte – insbesondere der unter sonst gleichen Bedingungen möglichen Lautstärkeunterschiede an einem durch Bewuchs abgeschirmten Immissionsort.

Es wurden deshalb sowohl die Mittelwerte für die Einfügungsdämpfung Wald (Bewuchsdämpfung) als auch die zugehörigen Streuungen aus den jeweiligen Tagesmitteln der einzelnen 10-Kanal-Messtage neu berechnet. Erwartungsgemäß sinken die Mittelwerte gegenüber den bisherigen Ergebnissen aus den Standardmessungen, während die Streuungen zunehmen. Die Gesamtmittel für die A-bewerteten Dämpfungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der mittleren Dämpfungswerte und zugehörigen Streuungen für eine senderseitig 55 m von der Bewuchskante entfernten Schallquelle

	Laubwald (Tiefe: 228,7 m)	Nadelwald (Tiefe: 215,5 m)
Bewuchsdämpfung	18,6 ± 1,2 dB	21,1 ± 2,0 dB
Waldkante	15,8 ± 1,0 dB	20,4 ± 2,6 dB
67 m von der Bewuchskante entfernt	16,7 ± 0,9 dB	20,2 ± 2,1 dB
132 m von der Bewuchskante entfernt	16,0 ± 3,0 dB	19,5 ± 2,4 dB
196 m von der Bewuchskante entfernt	15,3 ± 3,7 dB	19,5 ± 2,5 dB
262 m von der Bewuchskante entfernt	14,0 ± 4,7 dB	18,7 ± 2,6 dB

Es ist zu erkennen, dass die Bewuchsdämpfungen mit 8,1 dB/100 m (Laub) bzw. 9,8 dB/100 m (Nadel) selbst für die schallausbreitungsgünstigste Situation (= Mittelwert - Streuung) noch deutlich über den heute für Prognosen verwendeten Werten nach ISO 9613-2 liegen. Dabei unterscheiden sich die Werte für die beiden untersuchten Waldtypen lichter Laubwald und dichter Nadelwald erstaunlich wenig.

Erwartungsgemäß nimmt die mittlere Dämpfung mit zunehmender Entfernung langsam ab, gleichzeitig nimmt die Streuung der Werte erheblich zu. Dies kann einerseits auf die Abnahme des Schirmeffekts und andererseits auf die Zunahme meteorologischer Effekte zurückgeführt werden. Die mögliche Pegelstreuung an einem ca. 300 m entfernten Immissionsort kann demnach in der Größenordnung von ±3 ... ±5 dB liegen, was Pegelunterschiede von bis zu 10 dB bewirkt. Pegelanhebungen in dieser Größenordnung lassen sich für Mitwindsituationen bei Messungen auch tatsächlich feststellen.

Dennoch überwiegt selbst in ca. 600 m Gesamtentfernung von der Schallquelle ein zusätzlicher Dämpfungseffekt gegenüber einer freien Schallausbreitung über einem schallabsorbierenden oder gar schallharten Untergrund.

4.2 Auswertung der Messungen mit der akustischen Kamera

Zur Kontrolle der Ergebnisse der Messungen mit der akustischen Kamera wurden einmal die Auswertungen frequenzabhängig für eine feste Entfernung von 50 m von der Waldkante (je 4 Oktavbänder, siehe Abbildungen in Tabelle 2) und einmal entfernungsabhängig für eine feste Frequenz (Oktavbandbreite, Mittenfrequenz 2 kHz; siehe Abbildungen in Tabelle 3) verglichen. In den Abbildungen der Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die „Abbildungsschärfe“ mit steigender Frequenz stark zunimmt – d. h. die räumliche Ausdehnung des lautesten örtlichen Schallübertragungsbereichs stark abnimmt. Beim Vergleich der Abbildungen ist zu beachten, dass alle Auswertungen zwar einen Pegelbereich von 1 dB Dynamik darstellen, die absoluten Pegelwerte sich jedoch unterscheiden. Dabei wirken sich die frequenzabhängige Auflösung des Systems infolge des zu tiefen Frequenzen hin ungünstiger werdenden Verhältnisses der Schallwellenlänge zur Kameragröße und die zu tiefen Frequenzen hin großflächigeren meteorologischen Effekte auf das Ergebnis aus. Zu hohen Frequenzen hin sind hingegen deutlich kleinräumigere Pegelverteilungen zu beobachten. Diese weisen mit steigender Frequenz eine deutlich erkennbare seitliche Ausweitung auf, die bei dem dichten Nadelwald (linke Seite) signifikant stärker ausgeprägt ist als bei dem (im Winter!) lichten Laubwald (rechte Seite). Zur Erklärung kann ein bereits bei den Messungen 2008 aufgefallener Effekt dienen: Die Frequenz des jeweiligen Maximums der Dämpfung kann anhand des mittleren Stammabstands innerhalb eines weitgehend einheitlichen Bewuchses, durch den die Schallausbreitung erfolgt, berechnet werden. Somit ließe sich die zunehmende seitliche Aufweitung des räumlichen „Übertragungsbereichs“ physikalisch anschaulich durch die stärker werdende Streuung der Schallwellen an den festen Hindernissen – also im Wesentlichen an den vertikal zur Schallausbreitungsrichtung orientierten Stämmen – und deren umgekehrt zunehmenden Schirmwirkung für den direkten Schallausbreitungspfad – erklären. Eine Elevierung des lautesten Bereichs tritt noch nicht auf – in so kurzer Entfernung von der Waldkante (50 m) überwiegt trotz der erheblichen Dämpfung von ca. 20 dB die direkte Durchstrahlung.

Für die akustische Bewuchsdämpfung ist in kurzen Entfernungen offensichtlich die Menge der festen Bestandteile des betreffenden Waldabschnittes maßgeblich (mit dem entsprechend wirksamen Streuquerschnitt).

Beim Vergleich der entfernungsabhängigen Schmalbandpegel für die 2 kHz-Oktave in Tabelle 3 ist für die größte Entfernung (285 m von der Waldkante) beim Laubwald (rechtes Bild) eine Elevierung des lautesten Bereichs erkennbar, die beim Nadelwald (linkes Bild) nicht auftritt. Obwohl beide Bewuchsflächen optisch die gleiche Höhe haben, wirkt sich hier offensichtlich die lichtere Kronenstruktur des Laubwaldes reduzierend auf die effektive Hindernishöhe – und damit auf die akustische Schirmwirkung – aus, sodass sich ein zunehmend stärkerer Schallanteil über den Bewuchs hinweg ausbreitet.

Für die akustische Bewuchsdämpfung ist in größeren Entfernungen offensichtlich die Höhe der festen Bestandteile des betreffenden Waldabschnittes maßgeblich. Für nahezu alle Entfernungen (am auffälligsten bei 140 m und 210 m) ist zudem eine nach rechts unsymmetrische seitliche Aufweitung des lautesten Bereichs zu beobachten. Dies ist möglicherweise damit zu erklären, dass sich im Falle des Nadelwaldes ein Schallanteil durch den seitlich angrenzenden lichterem Laubwald ausbreitet, im Falle des Laubwaldes seitlich um die offene Waldkante herum. Warum der Effekt stärker ausgeprägt sein soll als die Schallausbreitung über den jeweils wesentlich kürzeren Umweg über den Bewuchs hinweg, ist auf diese Weise allerdings nicht erklärbar.

Tabelle 2: Vergleich der frequenzabhängigen Pegelverteilungen für Nadel-/Laubwald

Frequenz	Entfernung 50 m/Oktavfilter; Dynamik 1 dB; Auto Range; Mittelungszeit 3 s	
	Nadel	Laub
250 Hz		
500 Hz		
1 kHz		
2 kHz		

Tabelle 3: Vergleich der entfernungsabhängigen Pegelverteilungen für Nadel-/Laubwald

Entfernung	Dynamik: 1 dB, Auto Range, Oktave 2 kHz, Mittelungszeit 3 s	
	Nadel	Laub
50 m		
140 m		
210 m		
285 m		

4.3 Auswertung der meteorologischen Messungen

Die folgenden Abbildungen geben einen detaillierten Überblick zu den meteorologischen Verhältnissen der zusätzlich ausgewerteten Tage vom 28.-29.10.2014. Dabei wurden zunächst 30-min-Mittelwerte und außerdem 1-min-Mittelwerte und die Standardabweichungen analysiert. Wenn der Bezugszeitraum nicht explizit angegeben wird, handelt es sich um Datenauswertungen mit einem 30-min-Mittelungszeitraum. Die ausführliche Darlegung der Großwetterlage ist im Kapitel 3.3 des vorangegangenen Abschlussberichtes (ZIEMANN et al. 2015) enthalten.

In Abbildung 7 ist zusätzlich der 27.10.14 aufgeführt, um die Windrichtungsverhältnisse auch vor dem betrachteten Zeitraum zu zeigen. An allen drei Tagen waren vor allem Windrichtungen aus Süd bis Südwest vorherrschend. Damit liegen der Empfängerbereich und vor allem der 3-m-Mast im Windschatten des Waldgebietes. Der Einfluss des Waldes zeigt sich zum Beispiel am 28.10. im aufgezeichneten Versatz der Windrichtung am 3-m-Mast (1m_WD_m, 3m_WD_m) im Vergleich zum 30-m-Clark-Mast. Neben der Winddrehung übt das Waldgebiet über den Formwiderstand auch einen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit aus. Die geringen Windgeschwindigkeiten am 3-m-Mast (keine Abbildung) sind mit einer großen Streuung der Windrichtung verbunden.

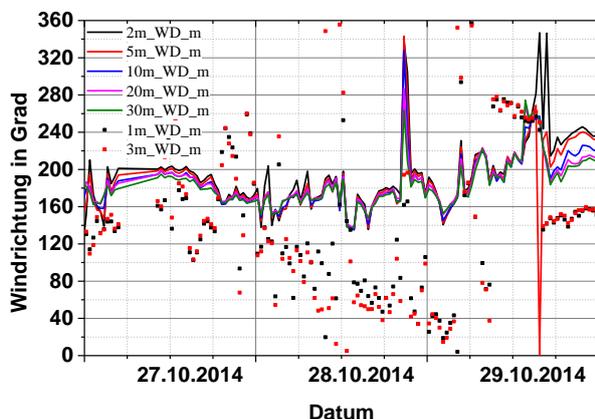


Abbildung 7: Tagesgänge der mittleren Windrichtung vom 27.-29.10.2014

Die vertikalen Gradienten der Windgeschwindigkeit weisen vor allem auf der Senderseite einen fast ausschließlich positiven Verlauf auf mit betragsmäßig oft größeren Werten (nachts) im Vergleich zur Empfängerseite (Abbildung 8). In der Mittagszeit stellen sich jedoch empfängerseitig die größeren Gradienten ein.

Senderseitig zeigt sich besonders am 28.10.14 ein ausgeprägter Tagesgang der Gradienten der Windgeschwindigkeit mit Werten gegen Null um die Mittagszeit und großen positiven Gradienten während der restlichen Zeit.

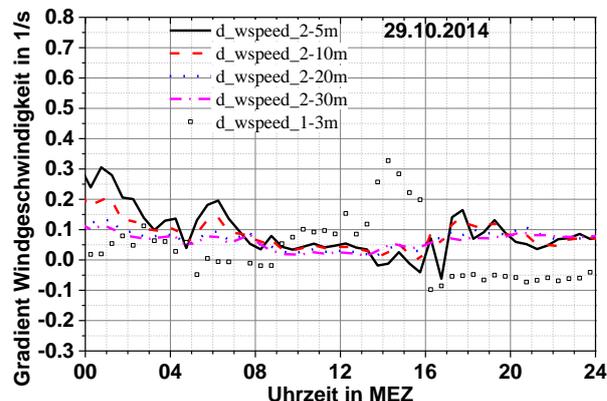
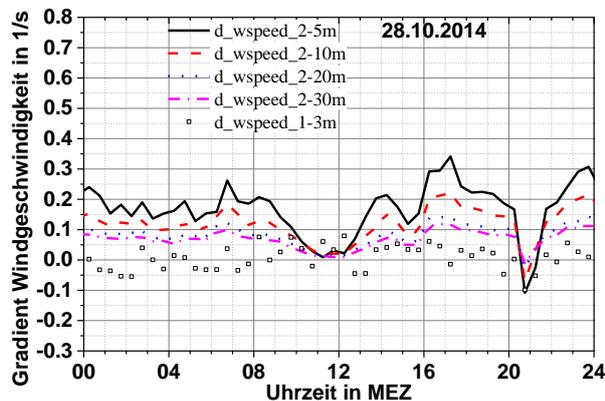


Abbildung 8: Tagesgänge des vertikalen Gradienten der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen

Die markante Verringerung bzw. Umkehr der vertikalen Austauschvorgänge gegen 21 Uhr MEZ am 28.10. ist mit dem Aufbau einer Temperaturinversion verbunden (siehe auch Abbildung 9). Während dieser Zeit fanden jedoch keine akustischen Messungen statt.

Gleichzeitig ist am 28.10. der Verlauf der Schallgeschwindigkeitsgradienten sehr charakteristisch mit tagsüber besonders hohen Beträgen im Empfängerbereich (Abbildung 9). Ein positiver Gradient ist in den meisten Fällen auf der Nordseite (Empfänger) vorherrschend. Ein betragsmäßig schwächerer, negativer Gradient ist auf der Südseite (Sender) tagsüber vorzufinden. Diese Ergebnisse spiegeln die vorherrschenden Temperaturgradienten wider: eine Temperaturinversion auf der Empfängerseite und Temperaturabnahme mit der Höhe auf der Senderseite im Luv des Waldgebietes tagsüber. Am 29.10. sind die Verhältnisse ähnlich, empfängerseitig treten jedoch nur noch geringe Gradienten am Tage auf. Vergleichend betrachtet, treten die etwas höheren Gradienten der Windgeschwindigkeit hervor, wobei sich die Beträge zwischen beiden Tagen und Messstandorten unterscheiden. Gerade bei sehr geringen Windgeschwindigkeitsgradienten, zum Beispiel am 28.10. mittags, kann die Einflussnahme der Temperaturgradienten auf die Schallbrechung stärker ausfallen.

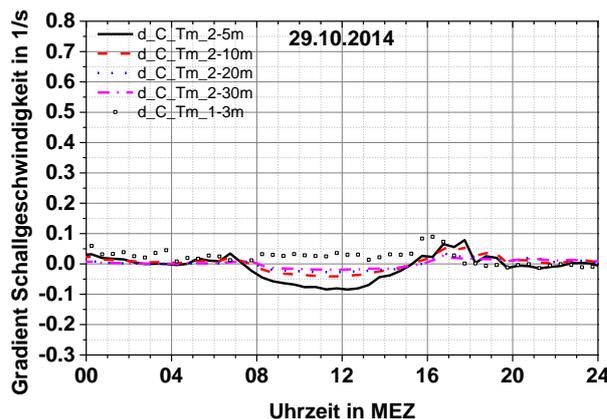
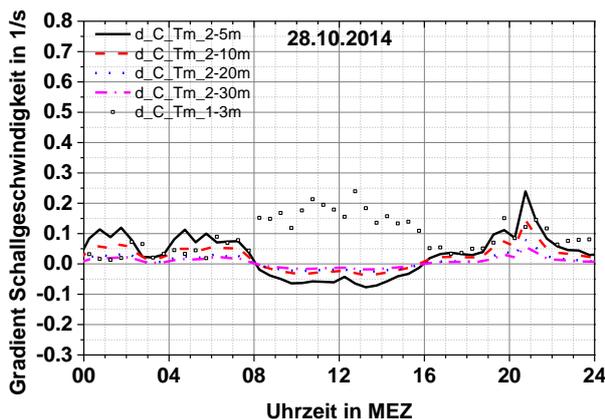


Abbildung 9: Tagesgänge des vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen

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.

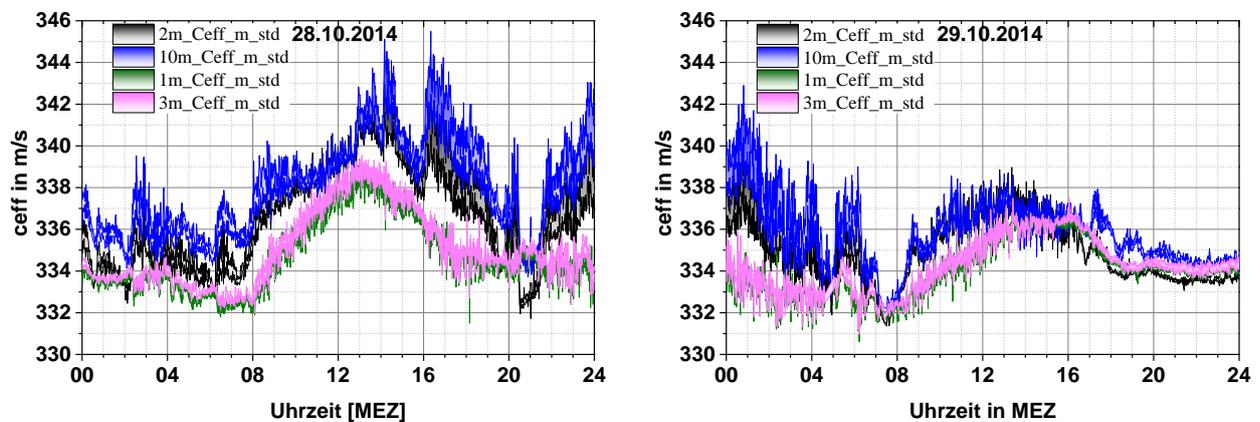


Abbildung 10: Tagesgänge der effektiven Schallgeschwindigkeit mit Standardabweichung in einminütiger Auflösung vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen den Verlauf der effektiven Schallgeschwindigkeit und ihres Vertikalgradienten zwischen verschiedenen Höhen in einminütiger Auflösung (Mittelwert über 1 min). Es werden nur die für die bodennahe Schallausbreitung wesentlichen Höhen von 2 m, 10 m, 1 m und 3 m betrachtet. Bei den Abbildungen ist zu beachten, dass sich die Wertebereiche für die effektive Schallgeschwindigkeit bzw. deren Gradienten gegenüber den Abbildungen in ZIEMANN et al. (2015) vergrößert haben, um alle Werte darzustellen. Am 28.10.2014 ist die Amplitude des Tagesgangs der effektiven Schallgeschwindigkeit besonders am senderseitigen Clark-Mast hoch (Abbildung 10 links). Die Schwankungsbreite der einminütigen Mittelwerte der Schallgeschwindigkeitsgradienten ist in den Vormittags- bis Mittagsstunden des 29.10.2014 maximal auf der Empfängerseite (Abbildung 11 rechts).

Am 28.10.2014 tagsüber und in der Nacht zum 29.10. ist die effektive Schallgeschwindigkeit durch hohe Werte insbesondere auf der Luvseite des Waldgebietes gekennzeichnet. Diese sind auch mit einer erhöhten Standardabweichung im Vergleich zu den restlichen Zeiträumen verbunden. Die geringste zeitliche Datenvariabilität zeigt sich am 29.10.2014 ab nachmittags.

Bei den Gradienten (Abbildung 11) zeichnet sich vor allem auf der Senderseite am Clark-Mast ein deutlicher Tagesgang (Abnahme der Gradienten vormittags, Zunahme nachmittags) im überwiegend positiven Bereich der Vertikalgradienten ab. Während der Mittagszeit stellen sich auch negative Werte ein. Ein Anstieg des Schallgeschwindigkeitsgradienten am Nachmittag des 28.10.2014 sollte eine weiter reichende Schallausbreitung begünstigen und damit zu einer abnehmenden Schalldämpfung führen.

Deutlich weist die Empfängerseite eine starke Variabilität der Gradienten auf. Dieses Ergebnis wird vorrangig durch die Lage des Messmastes im Lee des Waldgebietes bestimmt.

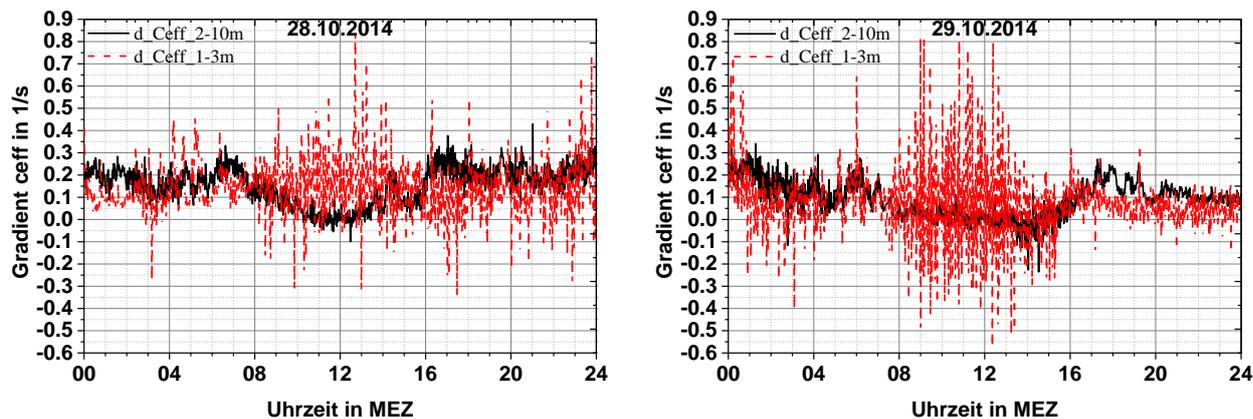


Abbildung 11: Tagesgänge des Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit in einminütiger Auflösung vom 28.-29.10.2014 in verschiedenen Höhen

Die weiteren Ausführungen charakterisieren die meteorologische Situation während der Messungen mit der akustischen Kamera am 24.03.2015. Wie in Abbildung 12 verdeutlicht, war dieser Tag geprägt durch süd- bis westliche Windrichtungen.

Deutlich ist ein Versatz der Anströmung zwischen Süd- und Nordseite infolge der Waldabschirmung zu sehen. Vergleicht man die Windgeschwindigkeiten (keine Abbildung) am 3-m-Mast (empfängerseitig) an den hier betrachteten Tagen, so fällt auf, dass diese am 24.03.15 um Einiges höher waren als am 28./29.10.14. Die gemessene Windrichtung auf der Empfängerseite streut indes weniger stark bei höheren Windgeschwindigkeiten.

In Abbildung 13 sind die Gradienten der Windgeschwindigkeit und der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit dargestellt. Auf der Senderseite sind diese geprägt durch einen schwachen Tagesgang mit betragsmäßig geringen Gradienten. Empfängerseitig sind hingegen charakteristische Tagesgänge mit entsprechend höheren Windgeschwindigkeits- und Schallgeschwindigkeitsgradienten ausgebildet. Hier fällt auf, dass der Gradient der Windgeschwindigkeit im Betrag etwas höher als jener der Schallgeschwindigkeit ist. Dies kann, je nach Windrichtung, ein Indiz für eine stärkere Einflussnahme des Windgradienten auf die Schallausbreitung sein.

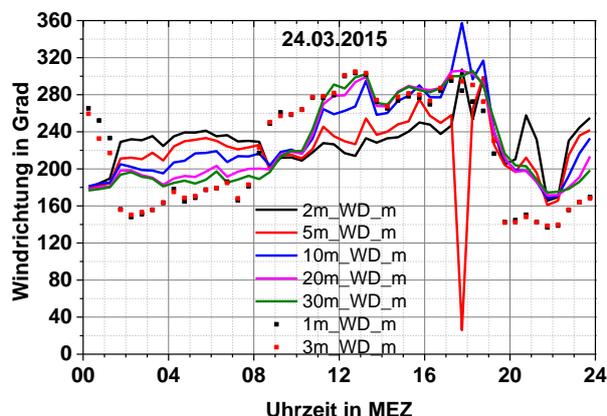


Abbildung 12: Tagesgang der mittleren Windrichtung am 24.03.2015

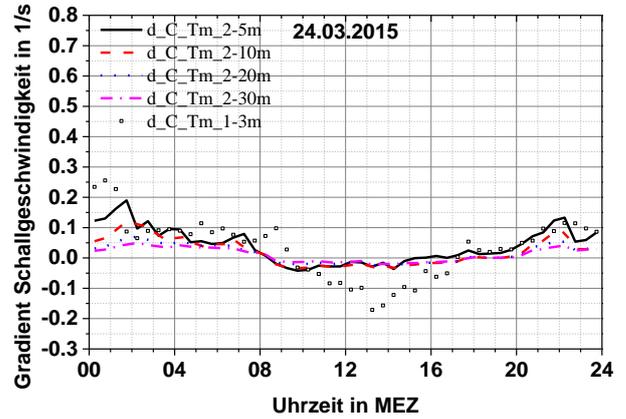
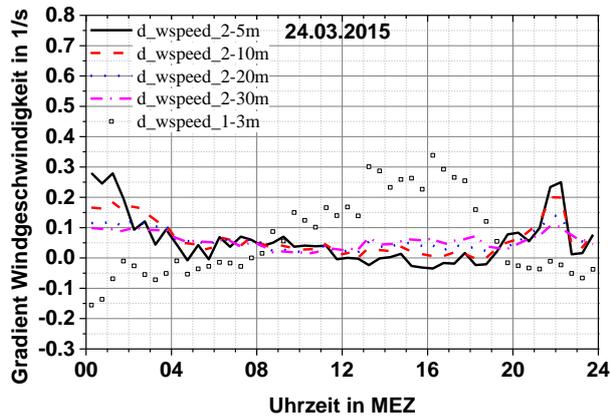


Abbildung 13: Tagesgänge der vertikalen Gradienten der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeit und der mittleren Schallgeschwindigkeit vom 24.03.2015 in verschiedenen Höhen

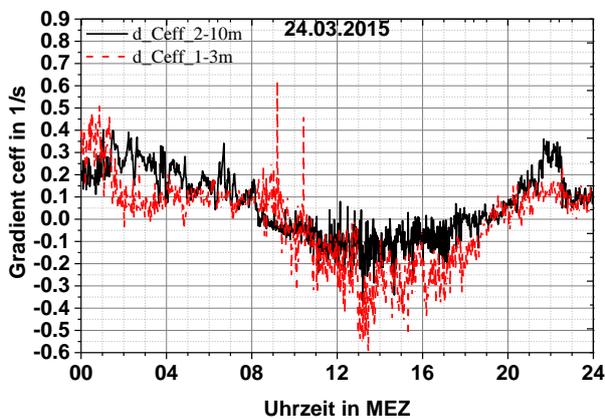
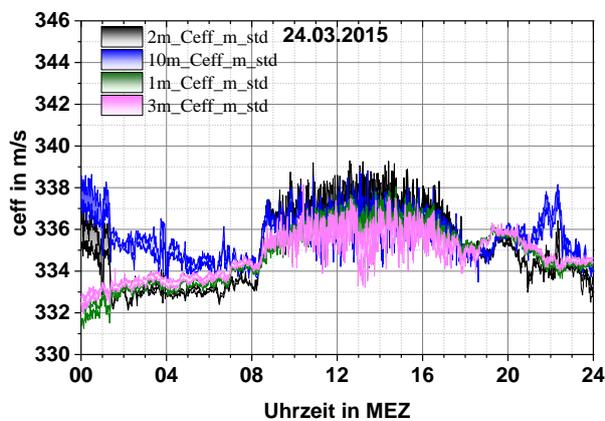


Abbildung 14: Tagesgänge der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (links) und des vertikalen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit (rechts) vom 24.03.2015 in verschiedenen Höhen

Die effektive Schallgeschwindigkeit und deren Gradienten werden, wie schon für 2014, in einer höheren Auflösung von 1-min Mittelwerten betrachtet. Die Abbildung 14 zeigt die tageszeitliche Variabilität dieser Größen in den ausgewählten Höhen. Für die effektive Schallgeschwindigkeit ist ein ausgeprägter Tagesgang zu verzeichnen, ähnlich den Messergebnissen am 29.10.2014. Der Mast auf der Empfängerseite befand sich jedoch besonders tagsüber eher im Querwindbereich. Dadurch war die effektive Schallgeschwindigkeit am

3-m-Mast höher, ein positiver Windgradient stellte sich ein und die sonst auch tagsüber vorherrschende Temperaturinversion löste sich auf, die Temperatur nahm deutlich mit der Höhe ab. Die Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit, sowohl sender- als auch empfängerseitig, sind in den Vor- bis Nachmittagsstunden im negativen Bereich. Dies kennzeichnet ungünstige Bedingungen in Bezug auf eine weitreichende Schallausbreitung.

4.4 Zusammenführung der akustisch-meteorologischen Messergebnisse

4.4.1 Messtage mit akustischen 10-Kanal-Messungen

Detaillierte Ausführungen zur meteorologischen Beeinflussung der Schallausbreitung allgemein und ein Überblick der Auswertungsergebnisse der kompletten Messkampagnen 2014/2015 sind u. a. dem Kapitel 5.3 von ZIEMANN et al. (2015) zu entnehmen.

Es können für die Zusammenführung der akustisch-meteorologischen Ergebnisse sieben Messzyklen der 10-Kanal-Technik am 28.10.14 verwendet werden (siehe Kapitel 3.1). Für den 28.10.14 werden die effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten mit den abgeleiteten Walddämpfungen (d. h. Dämpfung zwischen den Mikrofonen, die am nächsten zur Waldkante auf beiden Seiten des Waldgebietes liegen; A-bewertet, Summenpegel) verglichen. Zusätzlich werden die Absolutwerte der Dämpfung an den senderseitigen Positionen mit den Gradienten in Beziehung gesetzt. Anstelle der Walddämpfung am 28./29.10.14 werden die Absolutwerte der Pegeldämpfung auf der Empfängerseite für einen Vergleich mit den Schallgeschwindigkeitsgradienten genutzt.

In den folgenden Darstellungen werden nur die über 30 min gemittelten senderseitigen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit zwischen 2 m und 10 m am Clark-Mast gezeigt, weil aufgrund der zeitlich starken Schwankungen der Gradienten am 3-m-Mast (empfängerseitig, siehe Abbildung 11) eine übersichtliche Darstellung erschwert wird. Zudem ist gerade die Senderseite von hauptsächlicher Bedeutung für den Beginn einer weitreichenden Schallausbreitung durch bzw. über das Waldgebiet hinweg.

Abbildung 15 zeigt die am 28.10. 2014 gemessenen Gradienten der mittleren effektiven Schallgeschwindigkeit (30-min-Mittel) und die mittlere Walddämpfung des Laubwaldes (32-s-Mittel). Während der Mittagszeit ist ein leichter Anstieg der Schalldämpfung (Zunahme 0,6 dBA) bei gleichzeitigem Gradienten nahe Null (im positiven Bereich) zu beobachten. Des Weiteren ist nachmittags zwischen ca. 14:15 und 15:15 Uhr bei einer leichten Verringerung des relativ hohen positiven Gradienten ein Anstieg der Dämpfung um ca. 1,7 dBA feststellbar. Die kurzzeitig veränderten meteorologischen Bedingungen können hier zu dieser Zunahme der Walddämpfung im genannten Zeitfenster geführt haben. Der Gradient war am Nachmittag generell etwas höher als in der Mittagszeit, was sich auch in den geringeren Dämpfungswerten am Nachmittag zeigt.

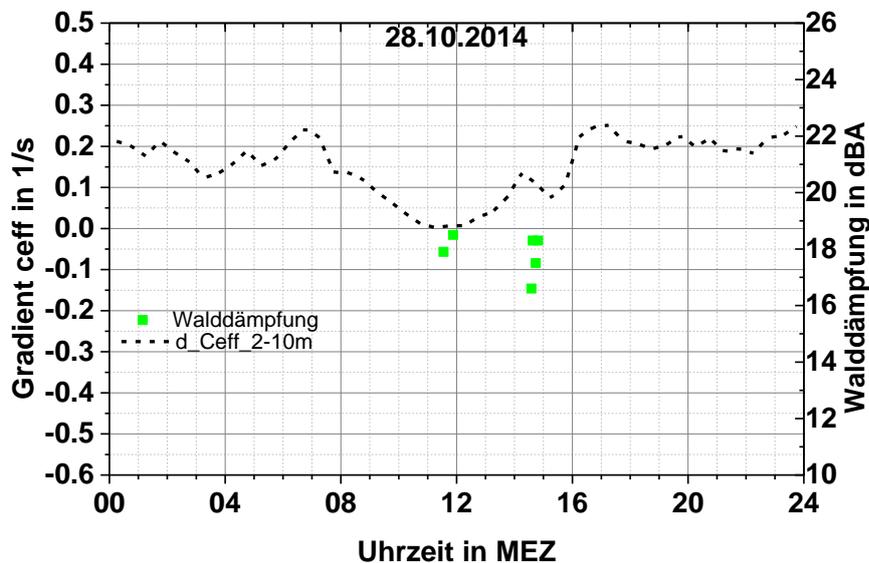


Abbildung 15: Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der mittleren Walddämpfung am 28.10.14

In Abbildung 16 ist die gemessene Dämpfung auf der Senderseite (32-s-Mittel) im Vergleich zum mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit aufgetragen. Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle (Empfänger S1 nahe der Schallquelle, Empfänger S5 nahe der Waldkante) ist meist eine Abschwächung der Verstärkung des Schallpegels (= negative Dämpfung) zu beobachten.

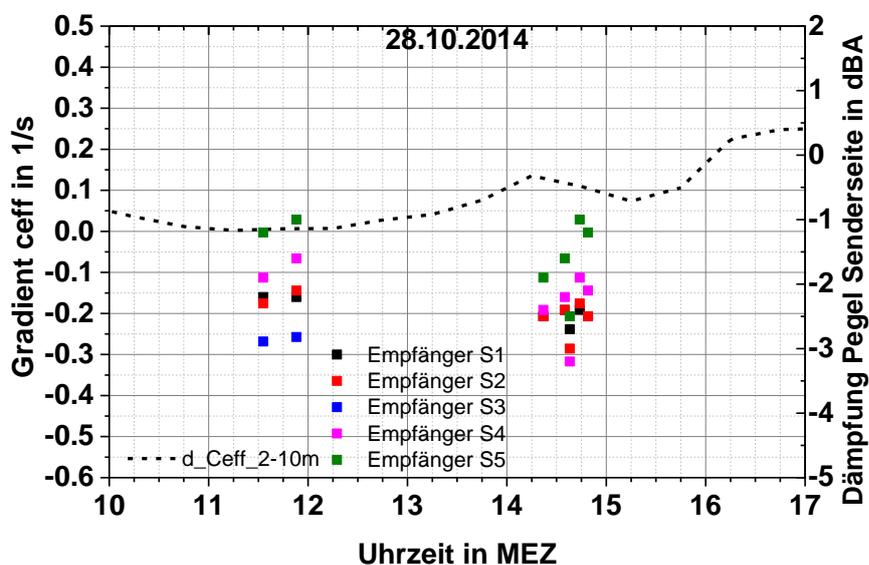


Abbildung 16: Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der Dämpfung der senderseitigen Pegel am 28.10.14

Aus der Abbildung 17 (Absolutwerte Pegeldämpfung) lässt sich eine Zunahme der Dämpfung hinter dem Waldstück bei Empfänger E1 bis E3 vor 12 Uhr am 28.10.2014 erkennen. Für die ersten vier Messzyklen in den Nachmittagsstunden kann auch von einer Zunahme der Dämpfung bei gleichzeitigem Abfall des positiven Schallgeschwindigkeitsgradienten gesprochen werden. Im weiteren Verlauf, bei einem wieder leicht

ansteigenden Schallgeschwindigkeitsgradienten, fällt die Dämpfung bei Empfänger E2 bis E5 ab. Generell sind die Dämpfungen nachmittags geringer als vormittags, was durch den größeren Schallgeschwindigkeitsgradienten erklärt werden kann.

Für den 29.10.2014 konnten nur die empfängerseitigen Schallpegel mit den meteorologischen Bedingungen verknüpft werden (Abbildung 18). Der Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit zeigt tagsüber einen relativ konstanten Verlauf nahe Null. Die absoluten Dämpfungswerte der Schallpegel bewegen sich in einer Punktwolke oder haben je nach Empfänger zueinander entgegengesetzte zeitliche Verläufe. Damit ist ein genereller Trend für alle Empfängerpositionen für den 29.10.14 erschwert ableitbar. Doch auch dadurch zeigt sich, dass relevante Instationaritäten der meteorologischen Größen (zum Beispiel am 28.10.14 nachmittags) eine weitreichende Schallausbreitung fördern oder hemmen.

Werden die Dämpfungswerte beider Tage verglichen, so ist ersichtlich, dass am 28.10.14 deutlich geringere Dämpfungen auftreten. Als eine mögliche Erklärung sind die am 28.10.14 weitaus günstigeren Schallausbreitungsbedingungen zu nennen.

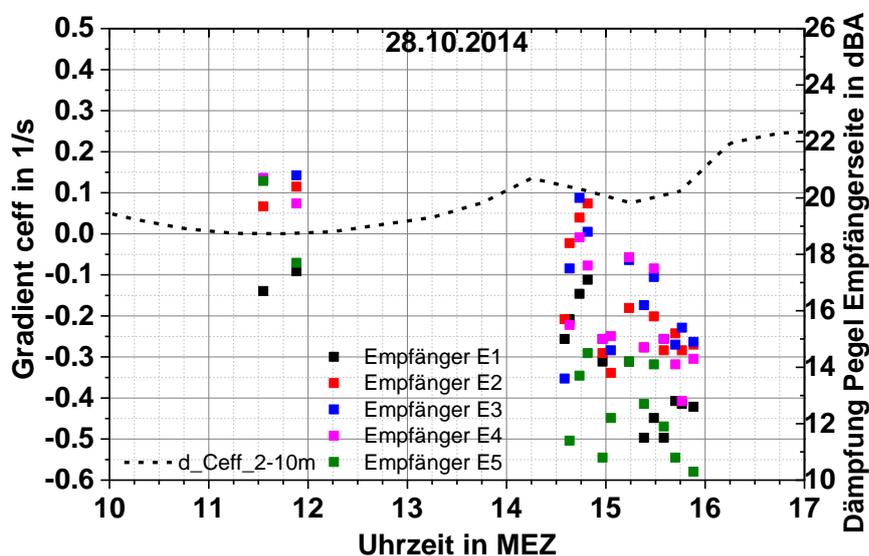


Abbildung 17: Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der Dämpfung der empfängerseitigen Pegel am 28.10.14

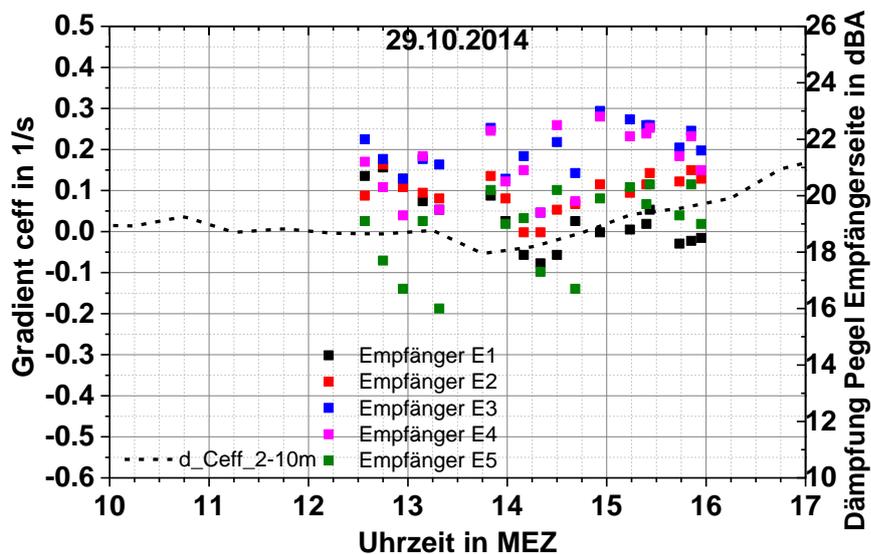


Abbildung 18: Tagesgang des mittleren Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit verglichen mit der Dämpfung der empfängerseitigen Pegel am 29.10.14

4.4.2 Zusätzliche Interpretation bisheriger Ergebnisse

Im Rahmen der zusätzlichen Qualitätssicherung, Interpretation und Verallgemeinerbarkeit bisheriger Ergebnisse wurden spezielle Messtage im Modul 2 (März 2015) näher untersucht. Diese Messtage waren entweder durch einen deutlichen Tagesgang der Walddämpfung (23.03.15 Laubwaldmessung und 24.03.15 Nadelwaldmessung) bzw. durch eine vergleichsweise geringe Walddämpfung (17.03.15 Nadelwaldmessung und 25.03.15 Laubwaldmessung) geprägt.

Tabelle 4: Mittlere Entfernung der Empfänger vom Sender aus GPS-Messungen (in m)

Empfänger	Laub 2014	Nadel 2014	Laub 2015	Nadel 2015
E1	282,9	256,5	270,6	243,8
E2	340,7	321,3	338,3	306,0
E3	408,7	382,7	411,4	370,8
E4	477,7	443,9	480,1	445,8
E5	547,4	505,8	550,0	508,6

Die folgenden Abbildungen stellen den Pegel-Zeit-Verlauf für verschiedene Terzen und für den A-bewerteten Summenpegel (Laeq, Farbe magenta) dar. Die Messungen wurden an fünf Empfängerpunkten nach Schalldurchgang durch den Wald durchgeführt (Tabelle 4). Die Schallpegelmessungen wurden über 5 s gemittelt. Jede dieser Messungen ist durch ein Symbol gekennzeichnet: Mittenfrequenz 125 Hz (schwarz), 250 Hz (rot), 500 Hz (grün), 1.000 Hz (dunkelblau), 2.000 Hz (hellblau). Eine Messserie dauerte ca. 30 s. Dementsprechend sind Häufungen von Symbolen in den Abbildungen zu verschiedenen Zeit„punkten“ zu erkennen. Über diesen Zeitraum von ca. 30 s wurde für die Dämpfungsberechnung (siehe Kapitel 4.4.1 und ZIEMANN et al. 2015) gemittelt.

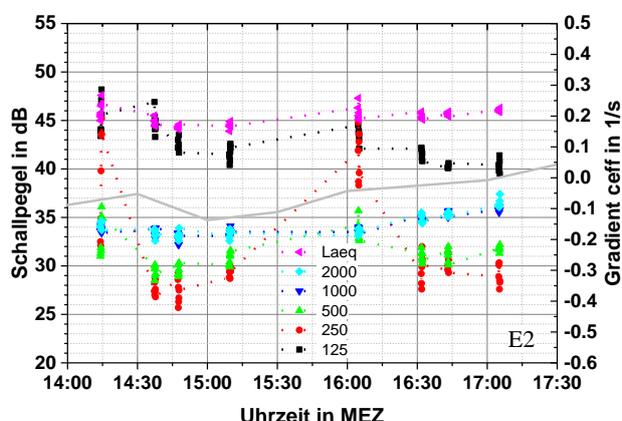
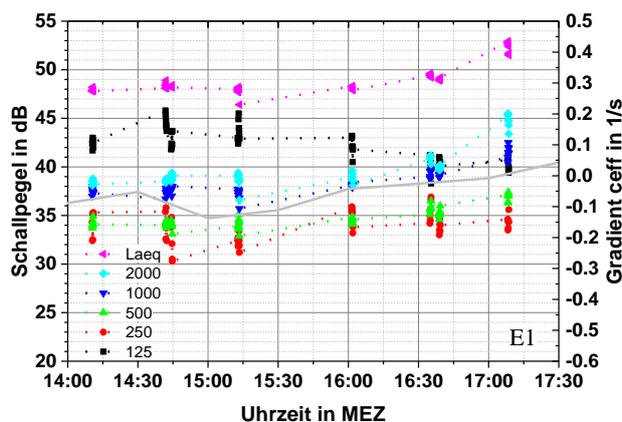
Außerdem sind in Abbildung 19 bis Abbildung 25 der mittlere (30 min) Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit dargestellt (hellgraue Linie = Gradient in der Höhe 10-2 m am Clark-Mast auf der Senderseite,

südlich des Waldstücks). Einem positiven Gradienten entsprechen günstige meteorologische Bedingungen für eine weitreichende Schallausbreitung und umgekehrt. Eine Zunahme des Gradienten ist deshalb häufig von einer Erhöhung des Schallpegels begleitet.

Die Abbildungen dienen zur Verdeutlichung des Tagesgangs der Schallpegel im Zusammenhang mit der Variabilität der meteorologischen Größen. Außerdem ist die kurzzeitige Variabilität der Schallpegel an einem Ort während einer Messserie erkennbar.

Am Nachmittag des 23.03.15 bewirkt die Zunahme des Schallgeschwindigkeitsgradienten besonders am Empfänger E1 direkt hinter dem Waldstück eine Zunahme des Schallpegels der mittleren und höheren Schallfrequenzen und damit des A-bewerteten Summenpegels um 5 dB in 3 Stunden (Abbildung 19). Auch in größerer Entfernung vom Waldstück nehmen die Schallpegel der höheren Schallfrequenzen mit der Zeit etwas zu. Die größte zeitliche Schwankungsbreite weist die 250-Hz-Terz auf, insbesondere an den Positionen E2, E3 und E5. In diesem Bereich des Schallspektrums ist der Einfluss des Bodens signifikant (sogeannter „Bodendip“ – Verringerung des Schallpegels durch destruktive Schallwelleninterferenz). Zeitliche Unterschiede in den Schallpegeln können dann fast 20 dB erreichen.

Am Vormittag des 24.03.15 nahm der Gradient der Schallgeschwindigkeit ab (Abbildung 20). Damit war eine Abnahme des Schallpegels bei höheren Frequenzen und damit auch beim A-Summenpegel verbunden. Mit zunehmender Entfernung vergrößert sich der meteorologische Einfluss und verstärkt die Schallpegelabnahme bei hohen Frequenzen. Innerhalb von 6 Stunden wird eine Abnahme des Schallpegels von fast 20 dB bei der 1.000-Hz-Terz erreicht. Der Summenpegel zeigt eine Abnahme von ca. 10 dB in diesem Zeitraum.



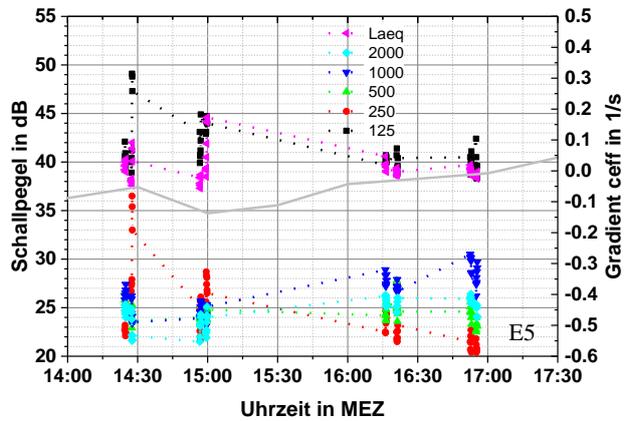
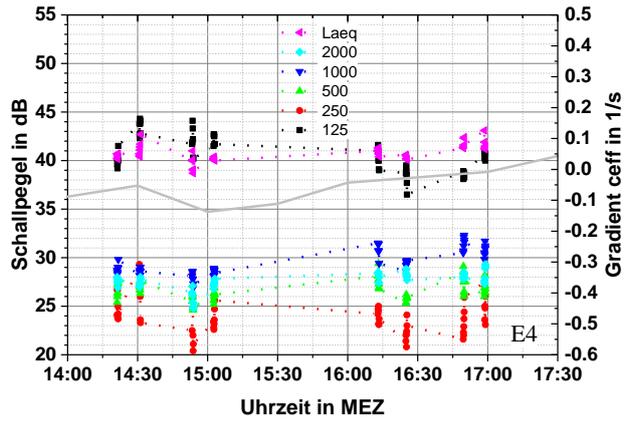
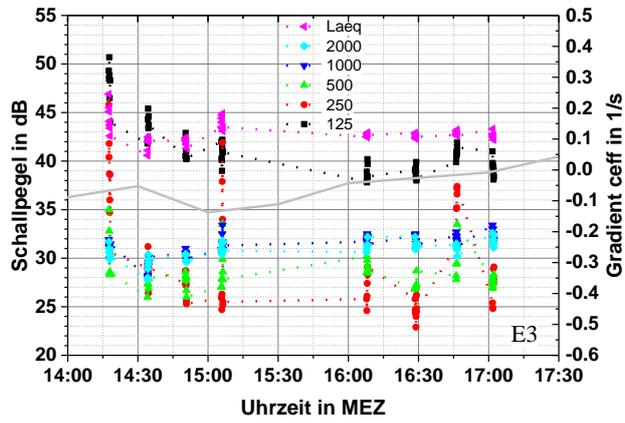
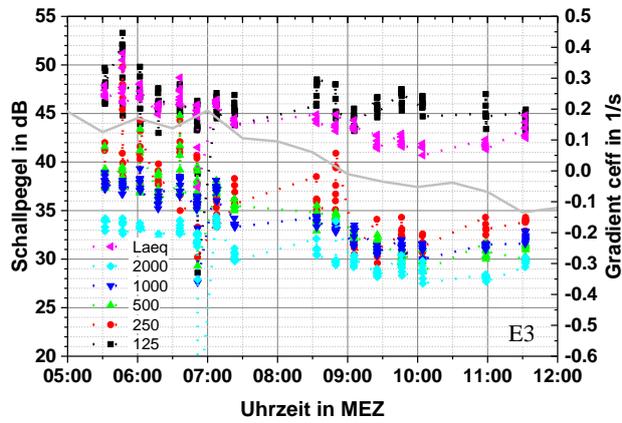
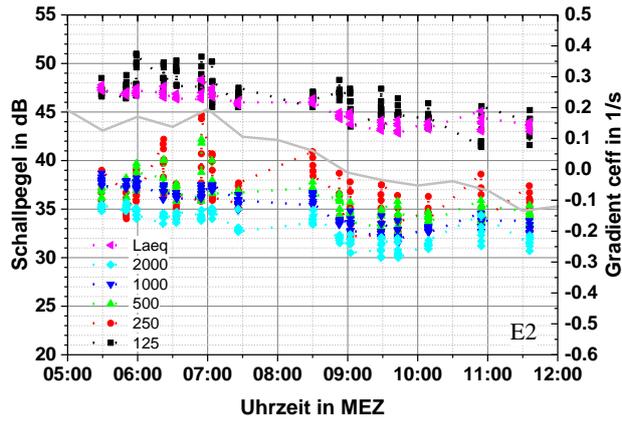
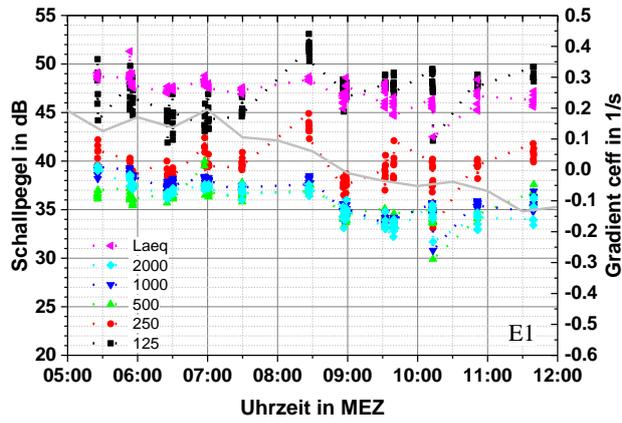


Abbildung 19: Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (graue Linien) am 23.03.2015 (Laubwaldmessung)



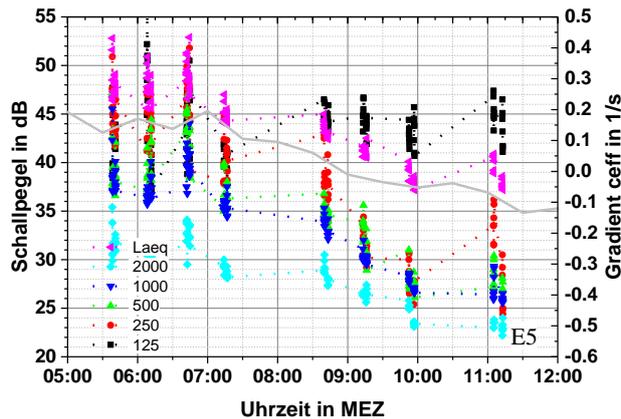
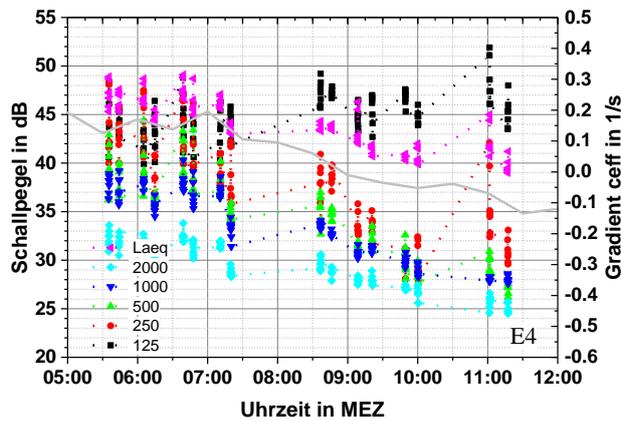
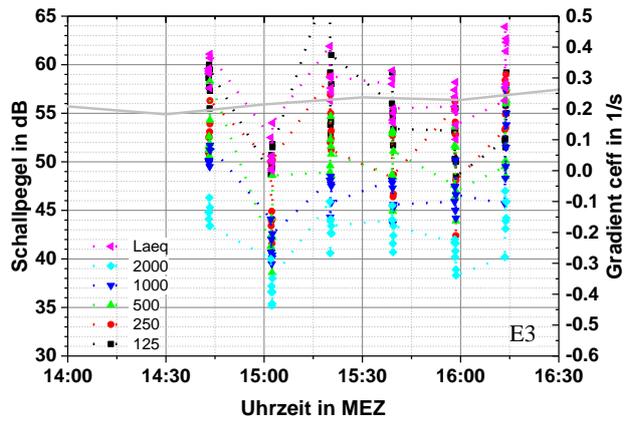
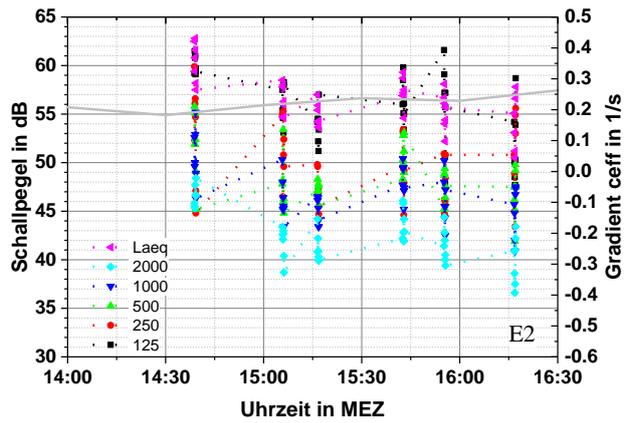
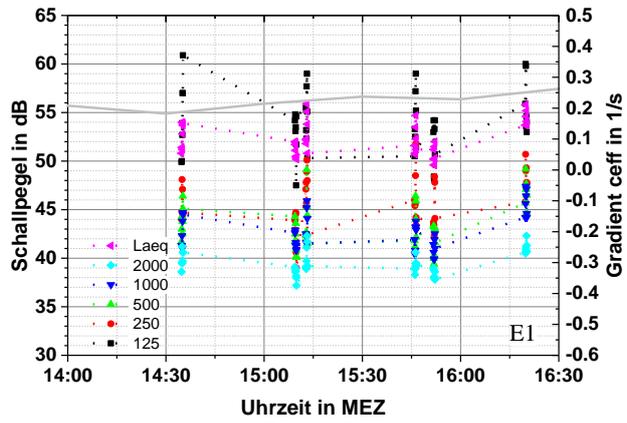


Abbildung 20: Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 24.03.2015 (Nadelwaldmessung)

Am 17.03.15 (Nadelwald) und am 25.03.15 (Laubwald) wurden jeweils geringe Walddämpfungswerte gemessen (ZIEMANN et al. 2015). Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass bereits höhere Schallpegel im Vergleich zu den anderen Messtagen bestimmt wurden. Dementsprechend sind die Grenzen der abgebildeten Wertebereiche des Schallpegels um 10 dB höher als in den vorangegangenen Darstellungen. Besonders am 17.03.15 waren die empfängerseitigen Schallpegel um ca. 10 dB höher als an anderen Tagen. Die Schallpegel verändern sich dabei kaum mit zunehmender Entfernung. Zwischen den Positionen E1 (direkt nach der Waldkante) und E2 nehmen die Schallpegel sogar noch etwas zu. Dieser Effekt tritt zumindest für einige Messungen auch an der Position E3 auf.

Die meteorologischen Bedingungen für eine weitreichende Schallausbreitung sind für den Messzeitraum als sehr gut einzuschätzen (ceff-Gradient größer als +0,1 1/s). Um senderseitige Veränderungen auszuschließen, wurden die mittleren (30 s) Schallpegel an der Position S1, ca. 11 m vom Lautsprecher entfernt, betrachtet. Der Vergleich dieser senderseitigen Daten (Abbildung 21) zeigt am 17.03.15 ähnliche Schallpegelwerte wie an anderen Tagen (z. B. 23.03.15). Es kann dementsprechend geschlossen werden, dass die hohen empfängerseitigen Schallpegelwerte durch eine günstige Kombination der Ausbreitungsbedingungen verursacht worden sind.



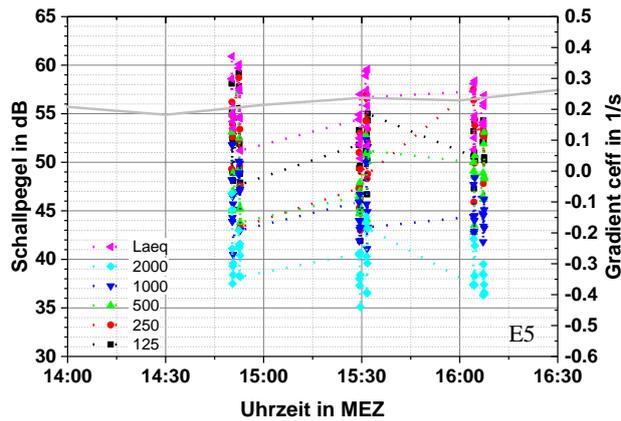
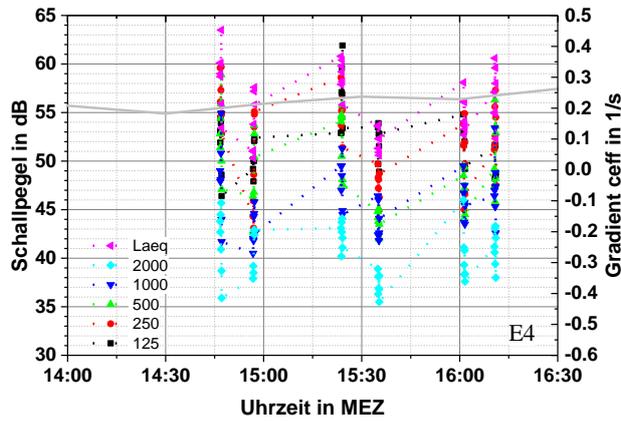
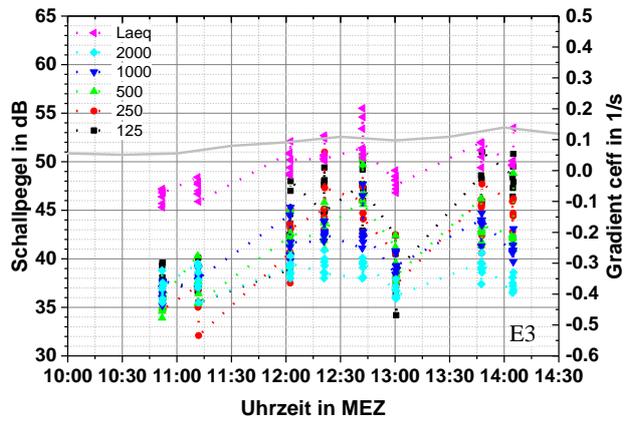
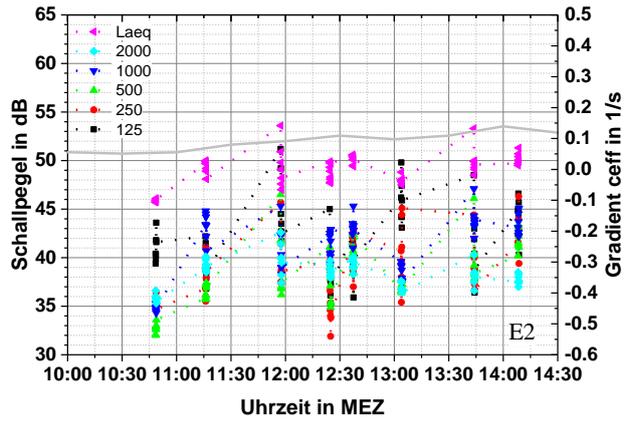
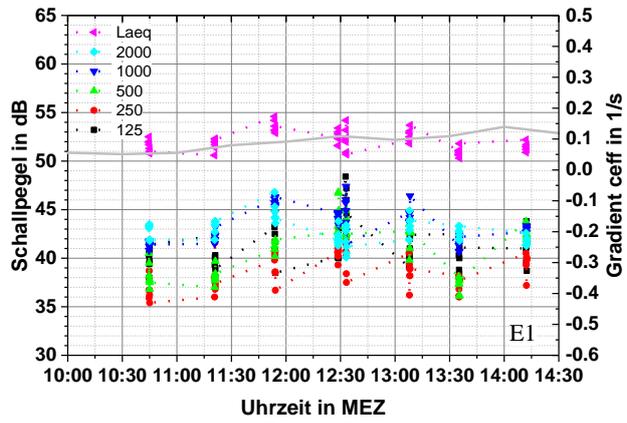


Abbildung 21: Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 17.03.2015 (Nadelwaldmessung)

Am 25.03.15 waren die bestimmten Walddämpfungen ebenfalls geringer als an den anderen Tagen. Die empfängerseitigen Schallpegel sind nicht ganz so hoch wie am 17.03.15, aber vergleichsweise immer noch ca. 5 dB höher als an anderen Tagen. Auch am 25.03.15 kamen schallausbreitungsgünstige meteorologische Bedingungen mit relativ hohen Schallgeschwindigkeitsgradienten vor. Die Schallpegel sind hier vergleichbar mit dem Beginn des (akustischen) Untersuchungszeitraums am 24.03.15 (ähnlich hohe Schallgeschwindigkeitsgradienten).



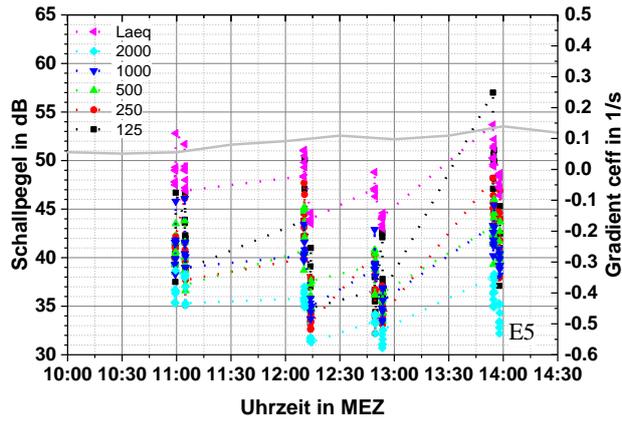
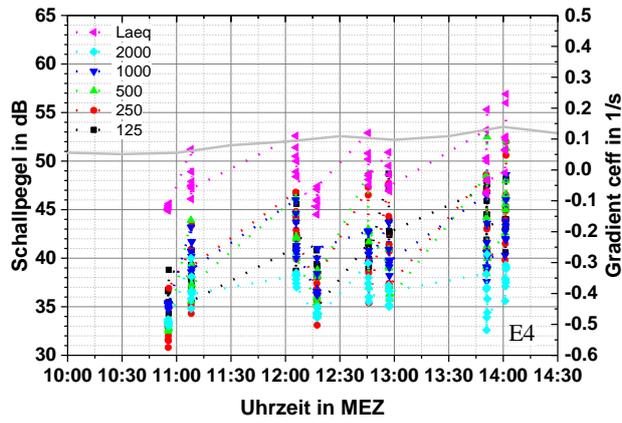


Abbildung 22: Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 bis E5 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 25.03.2015 (Laubwaldmessung)

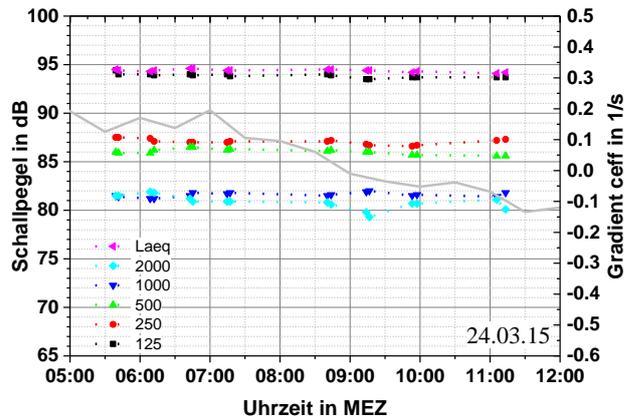
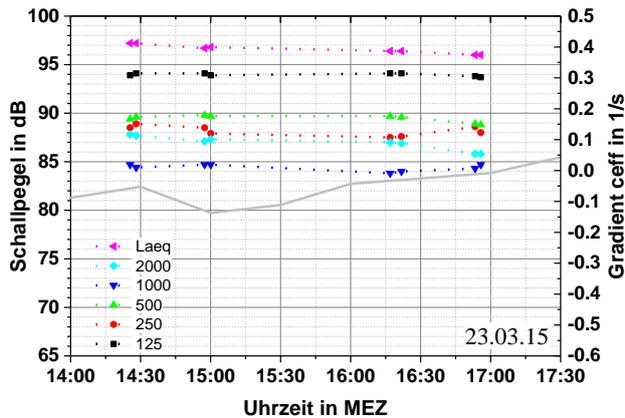
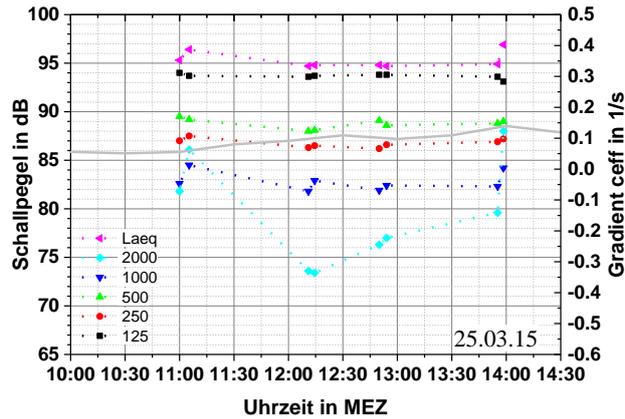
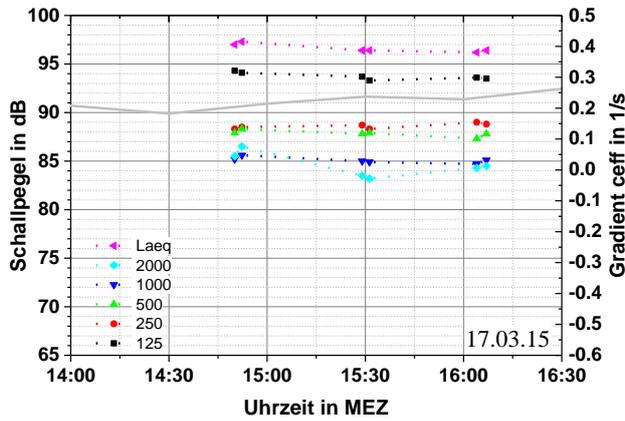


Abbildung 23: Tagesgang des mittleren Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger S1 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) an verschiedenen Tagen im März 2015

Markante Änderungen des Schallpegels an der senderseitigen Position S1 traten am 24.10.14 auf (Abbildung 24). Die letzten beiden Messserien um 16:07 und 16:10 Uhr zeigen an diesem Tag einen ca. 6 dB höheren Schallpegel im Vergleich zu den vorangegangenen Messwerten. Der A-bewertete Summenschallpegel erreicht dann fast so hohe Werte wie am 27.10.14 (um 101 dB).

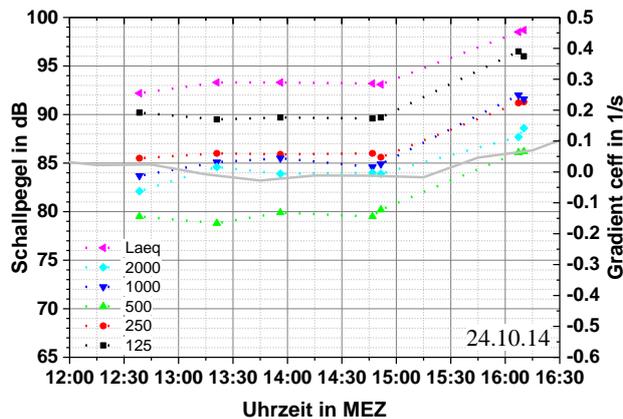


Abbildung 24: Tagesgang des mittleren Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger S1 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 24.10.2014 (Nadelwaldmessung)

Am 24.10.14 wurde eine gegensätzliche Korrelation von Walddämpfung und Schallgeschwindigkeitsgradienten festgestellt (ZIEMANN et al. 2015). Eine mögliche Ursache liegt in der Zeitverschiebung zwischen meteorologischen und akustischen Daten. Die meteorologischen Daten wurden immer mit MEZ abgelegt. Daran sollten sich alle Messungen als „Messzeit“ orientieren. Die Rohdaten der Schallmessungen wurden ebenfalls in MEZ abgelegt (Abbildung 25). In den von ABD übergebenen gemittelten Schalldatenübersichten zu den Laub- und Nadelwaldmessungen wurde die Zeitbasis aber auf MESZ eingestellt. Diese Daten wurden für den Bericht 2015 verwendet. In der Abbildung 24 wurde dieser Zeitversatz rückgängig gemacht.

Die Pegelrohdaten am Empfängerpunkt E1 (Abbildung 25) zeigen einen erwarteten Verlauf, d. h. eine Schallpegelzunahme, die vermutlich durch den Pegelanstieg am Punkt S1 (senderseitige Änderungen) bewirkt wird. Der einsetzende Anstieg des Schallgeschwindigkeitsgradienten würde ebenfalls eine Schallpegelerhöhung unterstützen.

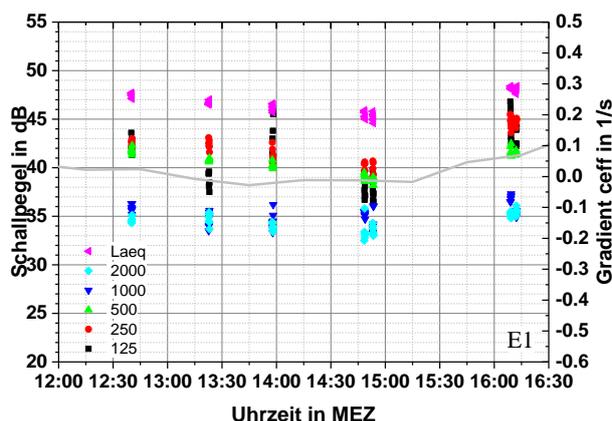


Abbildung 25: Tagesgang des Schallpegels (farbige Symbole) am Empfänger E1 und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit (Linien) am 24.10.2014 (Nadelwaldmessung)

Nach Anpassung der Zeitachsen der akustischen Messwerte auf MEZ ergibt sich das folgende Bild für die Walddämpfung (Abbildung 26). Die zwei letzten Datenpunkte gegen 16 Uhr zeigen die höchsten Dämpfungswerte, hängen aber mit dem senderseitigen Schallpegelsprung zusammen. Vermutlich nahm der Schallpegel am Punkt S5 vor dem Wald weniger stark zu als hinter dem Wald.

Der vorher stattfindende Anstieg der Walddämpfung fällt mit 2-3 dB geringer aus. In der betreffenden Zeit nahmen die Gradienten der Schallgeschwindigkeit von leicht positiven zu leicht negativen Werten ab, was eine erhöhte Dämpfung hervorrufen kann.

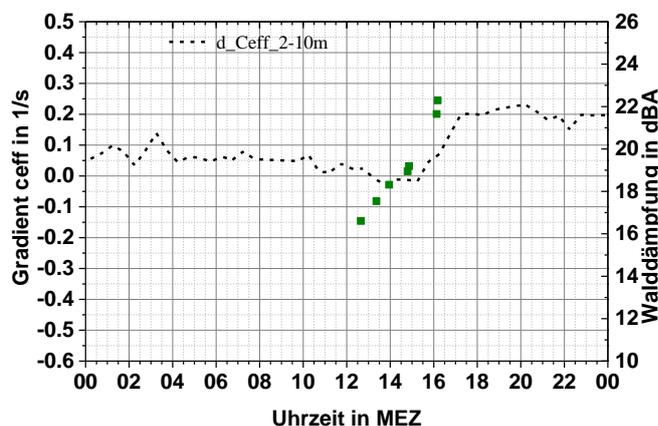


Abbildung 26: Tagesgang der mittleren Walddämpfung und des mittleren Gradienten der vertikalen Schallgeschwindigkeit am 24.10.2014 (Nadelwaldmessung)

Außerdem ist festzuhalten, dass die Pegeldata mit einem zeitlichen Unterschied von bis zu 30 min an den entsprechenden Empfängerpunkten hinter (E1) und vor dem Wald (S5) aufgenommen wurden. Bei einer kurzfristigen Änderung der meteorologischen Ausbreitungsbedingung können dadurch Störungen im Zusammenhang der Pegel an den beiden Empfängerpunkten verursacht werden.

4.5 Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse sowie Ausblick

Die in Arbeitspaket 1 erfolgten Auswertungen der Daten der 10-Kanal-Messtechnik (5-Kanal parallel jeweils für die Senderseite und Empfängerseite sowie zeitliche Abstimmung auf beiden Seiten) am 28. und 29.10.2014 bestätigen die Ergebnisse des Vorgängerberichtes, obwohl die Datenverfügbarkeit für beide Tage aufgrund vorher benannter technischer Probleme eingeschränkt war. In den Ergebnissen ist der Vorteil der Kombination von beiden 5-Kanal-Messtechniken mit einer zeitgleichen Schallmessung an allen Empfängern ersichtlich: Dadurch kann ein zeitlich engerer Zusammenhang der akustischen Messungen zur Messung der meteorologischen Umgebungsvariablen hergestellt werden. Es können damit kleine und kurzfristige Änderungen in den Schallausbreitungsbedingungen möglichen kurzfristigen Änderungen der Schallausbreitung genauer zugeordnet werden. Selbst innerhalb günstiger Schallausbreitungsbedingungen können kurzfristig stärkere Instationaritäten der meteorologischen Bedingungen zum Beispiel zu einer Verringerung des Schallpegels (siehe Dämpfung am 28.10.14 zwischen 14:00 und 15:00 Uhr) führen. Bei ausschließlich serieller Messweise ist diese Zuordnung durch den zeitlichen Versatz der Messpunkte nicht immer möglich (z. B. in Kapitel 4.4.2 Zusatzauswertung 24.10.14).

Die aus den 10-Kanal-Daten neu berechneten **Mittelwerte des Einfügungsdämpfungsmaßes** (Bewuchsdämpfung) mit **18,6 dB für Laubwald** und **21,1 dB für Nadelwald** (Tabelle 1) haben sich gegenüber dem Vorgängerbericht nur geringfügig bzw. gar nicht verändert. Die Spannbreite der Laubwaldmessungen hat sich durch die neuen Auswertungen etwas vergrößert. Ausbreitungsgünstige Bedingungen haben zu etwas geringeren Bewuchsdämpfungen geführt. Im Modul 1 (Sommer) liegen die mittleren Laub- und Nadelwald-dämpfungen in ähnlichen Bereichen: 17–21 dB bzw. 17–25 dBA. Die zeitlichen Unterschiede zwischen einzelnen Messtagen bzw. innerhalb eines Tages sind größer als zwischen den verschiedenen Vegetationstypen.

Zusätzlich zu den Arbeitspaketen 1 und 2 wurden Untersuchungen von Messtagen aus Modul 2 (März 2015) in Kapitel 4.4.2 vorgenommen, bei denen ein ausgeprägter Tagesgang der Walddämpfung oder vergleichsweise geringe Dämpfungen aufgezeichnet wurden. Die dadurch erhaltenen Resultate unterstreichen analog zu den Ergebnissen des Vorgängerberichtes den signifikanten Einfluss der meteorologischen Bedingungen auf die Schallausbreitung.

Leider lassen sich momentan keine Aussagen hinsichtlich der Informationserweiterung durch Messungen mit der akustischen Kamera im Vergleich zu den durchgeführten akustischen Messungen erzielen. Für einen konkreten Vergleich beider Messvarianten muss zuerst eine Synchronisierung der Messbereiche erfolgen. Diese Anpassung konnte im engen Zeitrahmen der Messung mit der Kamera nicht realisiert werden. Die hier gezeigten Ergebnisse der akustischen Kamera am 24.03.15 besitzen somit technischen Einführungscharakter.

Zusätzlich zur Datenauswertung wurde die **Literaturrecherche** zur vegetationsabhängigen Abschirmwirkung in wissenschaftlich begutachteten Zeitschriften aktualisiert. Die aufgefundenen Arbeiten behandeln die Ausbreitung von tieffrequenten (10 Hz bis 1 kHz: ALBERT et al. 2015 bzw. <1.350 Hz: SCHADY et al. 2016) Schallwellen durch schmale (ALBERT et al. 2015; VAN RENTERGHEM 2016) Waldbestände. SCHADY et al. (2016) führt numerische Modellsimulationen an Einzelbäumen bzw. Einzelbaumreihen durch. Die vorliegende Studie umfasst demgegenüber ein größeres Frequenzspektrum, das typisch für Verkehrslärm ist, und bezieht sich auf ausgedehntere Waldbestände von ca. 200 m Breite.

ZIEMANN et al. (2016) stellen Ergebnisse eines Vergleichs zwischen numerischen Simulationsergebnissen mit einer dreidimensionalen Modellkette und Messungen in einem Waldgebiet vor. Beide Datensätze zeigen für die Schallpegel tieffrequenter Schallsignale an unterschiedlichen Empfängerpositionen auf einer Waldlichtung und innerhalb eines Altlichtenbestandes einen übereinstimmenden Tagesgang, der von den inhomogenen Wind- und Temperaturprofilen bestimmt wird. Simulationen mit und ohne Bäume demonstrieren den schalldämpfenden Effekt eines Waldbestandes von 4 dB pro 100 m für den Tagesmittelwert des tieffrequenten Breitbandpegels (bis 141 Hz). Für höhere Frequenzen und größere Bandbreiten wird eine zunehmende Dämpfungswirkung prognostiziert. Der Nachweis für diese Aussage wurde mit den Modell- und Messergebnissen der vorliegenden Studien im Rahmen des Projektes zur „Vegetationsabhängigen Abschirmwirkung von Wäldern“ erbracht.

Ziel **weiterer Untersuchungen** in einem neuen Projekt 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 sowie 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. Dabei sollten Akustikmessungen mit paralleler Mehrkanalmesstechnik verstärkt eingesetzt werden. Flankierend bieten sich adäquate Modelluntersuchungen an, welche die zeitlich und räumlich begrenzten Messungen verallgemeinern und außerdem weitere Parameter- und Sensitivitätsstudien ermöglichen. Der Vergleich der erzielten Ergebnisse beider Messstandorte würde die weitere Verallgemeinerung praxisnaher Anwendungsempfehlungen der DIN ISO 9613-2 zur Schallabschirmung von Wäldern ermöglichen.

5 Handlungsempfehlungen

Die im vorangegangenen Projekt aufgestellten Anwendungsempfehlungen zur Schallimmissionsprognose im Vergleich zur DIN ISO9613-2 (ZIEMANN et al. 2015) wurden bestätigt und bleiben damit unverändert bestehen. Angepasst an die aktuellen Ergebnisse ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- Der gemessene Betrag der **Abschirmwirkung** eines ca. 200 m breiten Waldgebietes ist immer **größer als die Normangaben** der DIN ISO 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. Die Zusatzdämpfungen in größerer Entfernung vom Bewuchs können jedoch auch unterhalb dieser Standardwerte liegen.
- Im Mittel über alle vorliegenden Daten beträgt die gemessene Walddämpfung **19 dB**. Mit der Annahme des im Mittel für die Laub- und Nadelwaldmessungen 222 m breiten Waldgebietes ergibt sich ein Bewuchsdämpfungsmaß **von 9 dB/100 m** und damit ein deutlich höherer Wert als in der Norm DIN ISO 9613-2 in Höhe von 5 dB/100 m.
- Der meteorologisch bedingte Schwankungsbereich von Schalldämpfungen von **bis zu 10 dB** innerhalb von wenigen Stunden sollte bei der Angabe von Mittelwerten berücksichtigt werden.
- Der Dämpfungseffekt des hier untersuchten Waldstückes lässt sich noch in mindestens 200 m Entfernung von der empfängerseitigen Waldkante nachweisen.

Anhang

Akustische Kamera

Abbildung 27 bildet die verschiedenen Einstellmöglichkeiten für die akustische Kamera ab (siehe auch Kapitel 2.2 und 3.2).

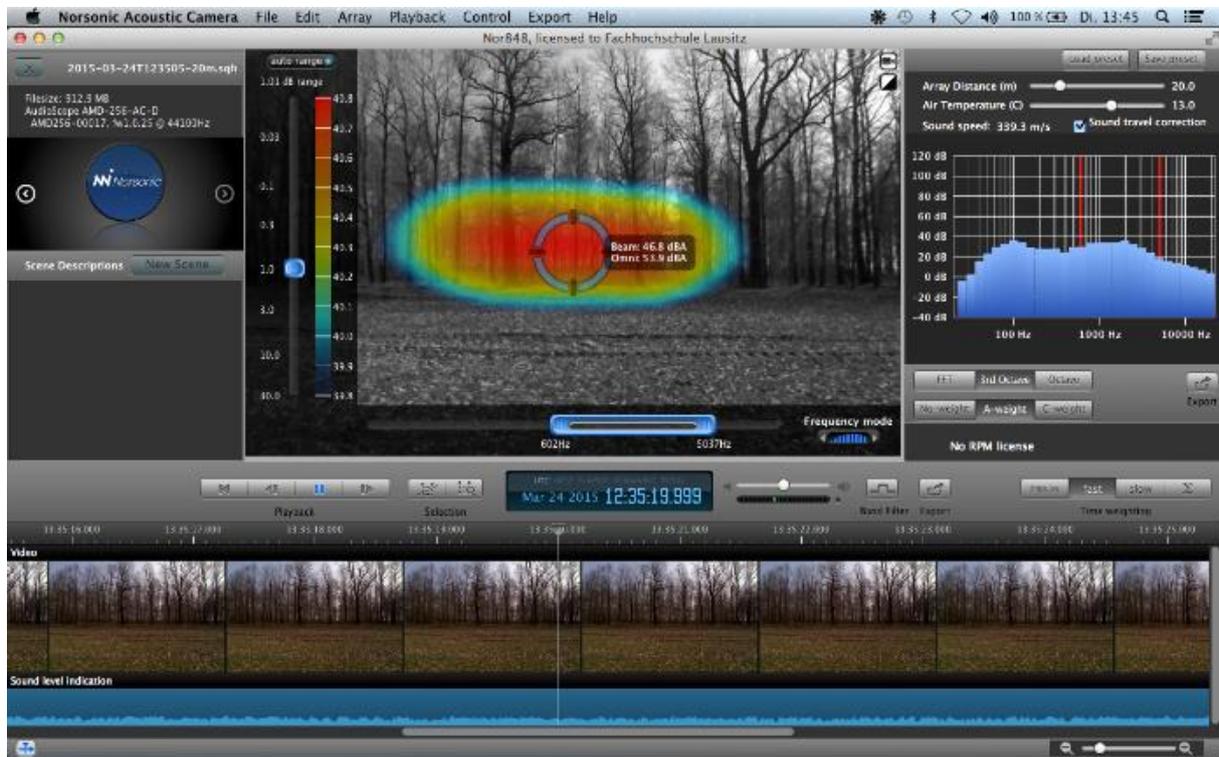


Abbildung 27: Bildschirm der Auswertesoftware der akustischen Kamera

Handlungsempfehlungen für die Schallimmissionsprognose

Die Handlungsempfehlungen für die Schallimmissionsprognose und schallschutzgerechte Planung von Waldgebieten sind ZIEMANN et al. (2015) entnommen worden.

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 folgender Modellansatz für das Bewuchsdämpfungsmaß **$A_{fol} = 0,095 \text{ dB/m}$** . 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.

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):

- Folgende Sträucher sind für die **Waldrandgestaltung** geeignet: 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.

Literaturverzeichnis

- ALBERT, D. G., M. E. SWEARINGEN, F. E. PERRON, D. L. CARBEE: Low Frequency Acoustic Pulse Propagation in Temperate Forests. *The Journal of the Acoustical Society of America* 138 (2015), 735-747.
- BARTH, M., A. ZIEMANN, C. BERNHOFER: 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 (2013), 69 S. Schriftenreihe des LfULG Heft 33/2014 „Akustische Abschirmwirkung von Wäldern“
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23277>
- BERNHOFER, C., A. ZIEMANN, T. DONIX: Datenrecherche „Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern“. Abschlussbericht der Technischen Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2012), 36 S. (unveröffentlicht)
- DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (1999)
- REICHE, D., K.-G. KRAPP: Forschungsvorhaben Akustisches Modell zur Abschirmwirkung von Wäldern. Abschlussbericht Wölfel Meßsysteme, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2008), 97 S. (unveröffentlicht)
- VAN RENTERGHEM, T: Exploiting Supporting Poles to Increase Road Traffic Noise Shielding of Tree Belts. *Acta Acustica United with Acustica* 102 (2016): 1-7.
- SCHADY, A., D. HEIMANN, J. FENG: Acoustic Effects of Trees Simulated by a Finite-Difference Time-Domain Model. *Acta Acustica United with Acustica* 100 (2014), 1112-1119.
- ZIEMANN, A.: 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.
- ZIEMANN, A., WOLLMANN, U.: Protokoll Kick-Off-Meeting am LfULG Dresden-Pillnitz, 13.10.2014.
- ZIEMANN, A., EDERER, H.-J., STÜBER, C., HEHN, M., BERNHOFER, C.: Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Messtechnische Verifizierung eines akustisch-meteorologischen Modells. Abschlussbericht der Technischen Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur Meteorologie, Auftraggeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015), 72 S. (Anhang: 40 S.), Schriftenreihe des LfULG, Heft 16/2016 „Schalldämpfung durch Wald, Teil 1“
- ZIEMANN, A., A. SCHADY, D. HEIMANN: Meteorological Effects on the 3D Sound Propagation Inside an Inhomogeneous Forest Area. *Meteorologische Zeitschrift* (2016), DOI: 10.1127/metz/2016/0710.

Danksagung

Wir danken [Stephan Henschler](#) und Thomas Rieder von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus – Senftenberg, Fakultät 3: Tragrollenprüfstand, für die Durchführung der Messungen mit der akustischen Kamera am 24.03.2015.

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:

Markus Hehn, Astrid Ziemann, Christian Bernhofer
Technische Universität Dresden/Fakultät Umweltwissenschaften
Professur für Meteorologie
PF 1117, 01735 Tharandt
Telefon: +49351 463-31346
Telefax: +49351 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|4711568
Telefax:+49|351|4711599
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: +49351 2612-5201
Telefax: +49351 2612-5099
E-Mail: uwe.wollmann@smul.sachsen.de

Foto:

Astrid Ziemann

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 zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

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