
MASTERARBEIT

im Studiengang Ingenieurakustik

Herr
Till Vincent Kleinert

Infraschall als Alltagserscheinung – eine messtechnische Querschnittserhebung Deutschlands

2023

Hochschule Mittweida Fakultät:
Medien
Hochschule München Fakultät:
Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik

MASTERARBEIT

Infraschall als Alltagserscheinung – eine messtechnische Querschnittserhebung Deutschlands

Autor/in:
Herr Till Vincent Kleinert

Studiengang:
Master Ingenieurakustik

Seminargruppe:
IA18w1-M

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

Einreichung:
München, 31.01.2023

University of applied Science Mittweida Faculty:
Media
University of applied Science Munich Faculty:
Mechanical, Automotive, Aeronautical Engineering

MASTER THESIS

Infrasound as an everyday phenomenon – a metrological cross-sectional survey of Germany

author:
Mr. Till Vincent Kleinert

course of studies:
Master Engineer Acoustics

seminar group:
IA18w1-M

first examiner:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

second examiner:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

submission:
Munich, 31.01.2023

Bibliografische Angaben

Kleinert, Till Vincent:

Infraschall als Alltagserscheinung – eine messtechnische Querschnittserhebung Deutschlands

Infrasound as an everyday phenomenon – a metrological cross-sectional survey of Germany

74 Seiten, Hochschule München / Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik / Medien

Masterarbeit, 2023

Abstract

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung und Feststellung von gewöhnlichem Infraschall. Mittels verschiedener Messkampagnen und einer Querschnittserhebung innerhalb Deutschlands wird der Infraschallgrundpegel erhoben und klassifiziert. Dieser gewöhnliche Infraschall ist festzustellen, um dann Unterschiede zu Infraschall von technischen Anlagen als Immissionsbelastung ermitteln zu können.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
Danksagung	XIII
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	3
3 Theoretische Grundlagen	4
3.1 Schallausbreitung im Freien	4
3.1.1 Thermodynamik von Schallfeldern in Gasen	4
3.1.2 Ein- und dreidimensionale Schallfelder	6
3.1.3 Schallenergie und Leistungstransport	13
3.1.4 Schalldruckpegel.....	15
3.1.5 Einfluss von Reflexion, Bodenbeschaffenheit und Absorption in der freien Schallausbreitung.....	15
3.1.6 Einfluss von Inhomogenitäten der Luft	17
3.2 Infraschall	20
3.2.1 Akustische Eigenschaften und Entstehung von Infraschall.....	20
3.2.2 Ausbreitungsmodelle für Infraschall	26
3.2.3 Wahrnehmung und mögliche Auswirkungen von Infraschall.....	29
3.2.4 Diskussion des aktuellen Forschungsstandes von Infraschallimmissionen und weitergehende Forschungsfragestellungen ...	35
3.3 Messung von Infraschall.....	37
3.3.1 Messtechnik.....	37
3.3.2 Bewertungsverfahren	39
4 Ergebnisteil	42
4.1 Methodologisches Vorgehen.....	42
4.2 Messtechnik und Messdaten.....	43
4.3 Langzeitmessung.....	44
4.3.1 Versuchsort und Versuchsaufbau	44
4.3.2 Messergebnisse und Auswertung	46
4.4 Querschnittserhebung.....	56

4.4.1	Anforderungen und Umsetzung der Messkampagne.....	56
4.4.2	Auswertung der Querschnittserhebung	60
4.5	Messung mit sekundärem Mikrofonschirm	66
4.5.1	Versuchsort und Versuchsaufbau	66
4.5.2	Auswertung der Messung mit Sekundärschirm	67
4.6	Ergebnis und Bewertung.....	71
4.7	Fazit und Ausblick.....	74
Literaturverzeichnis		XIII
Anlagen, Teil 1: Messauswertung Versuch 1		XIX
Anlagen, Teil 2: Statistikauswertung Versuch 1		XXVII
Anlagen, Teil 3: Messprotokoll Querschnittserhebung.....		XXXV
Anlagen, Teil 4: Messauswertung Querschnittserhebung		XXXVII
Anlagen, Teil 5: Statistikauswertung Querschnittserhebung		CLIX
Anlagen, Teil 6: Messauswertung Versuch 2		CLXII
Eigenständigkeitserklärung		CLXVIII

Abkürzungsverzeichnis

<i>dB</i>	Dezibel = Maßeinheit zur Kennzeichnung des dekadischen Logarithmus
<i>dB(A)</i>	A-gewichteter Pegel
<i>dB(C)</i>	C-gewichteter Pegel
<i>dB(G)</i>	G-gewichteter Pegel
<i>dB(Z)</i>	ungewichteter Pegel
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>FFT</i>	Fast-Fourier-Transformation
<i>FKZ</i>	Forschungskennziffer
<i>Hz</i>	Hertz
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
<i>MRT</i>	Magnetresonanztomographie
<i>Wach-EEG</i>	Elektroenzephalographie
<i>z.B.</i>	zum Beispiel

Formelverzeichnis

A	Amplitude in m
c	Schallgeschwindigkeit in m/s
D	Schalldruckpegeldifferenz in dB
D_Z	Abschirmmaß in dB
f	Frequenz in Hz
I	Intensität in W/m ²
K	Kelvin = Maßeinheit der absoluten Tempertaur, 0°C = 273 K
k	Wellenzahl in m ⁻¹
L_{Aeq}	A-gewichteter Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A)
L_{Ceq}	C-gewichteter Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(C)
L_{Geq}	G-gewichteter Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(G)
L_I	Schallintensitätpegel in W/m ²
L_p	Schalldruckpegel in dB
L_w	Schalleistungspegel in dB
L_{Zeq}	Ungewichteter Äquivalente Dauerschallpegel in dB(Z)
M	Masse in g
M_{mol}	Molare Masse in g
N	Fresnel-Zahl
P	Leistung in W
p_G	Druck in Pa
R	Gaskonstante Nm/K
r	Radius in m
S	Fläche in m ²
T_G	Zeitkonstante in s
v	Schallschnelle in m/s
V_G	Volumen in m ³
v_{max}	Maximale Windgeschwindigkeit in m/s
v_{mean}	Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in m/s
w	Energiedichte in W s/m ⁻³
K	Isentropen/Adiabatexponent
λ	Wellenlänge in m
ξ	Teilchenauslenkung in mm
π	Kreiszahl pi $\approx 3,14159$

ρ	Dichte in kg/m ³
φ	Geschwindigkeitspotential
ω	Kreisfrequenz in Hz

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kettenleiter aus Massen und Federelementen, links in Ruhe, rechts Longitudinalwellenform [Böge 2008].....	7
Abbildung 2: Kompression und Dekompression einer Longitudinal Welle [Hopkins 2014].....	7
Abbildung 3: Kugelwellenausbreitung am Beispiel einer Punktschallquelle nach [Hopkins 2014]	12
Abbildung 4: Spiegelung einer Schallquelle am Boden (eigene Darstellung).....	16
Abbildung 5: Windeinfluss auf die Schallausbreitung [Fasold 2003]	18
Abbildung 6: Einfluss von Temperaturschichtungen auf die Schallausbreitung [Fasold 2003].....	19
Abbildung 7: Frequenzbereiche der Akustik (eigene Darstellung).....	21
Abbildung 8: Prozentuale Verteilung von Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche aus [Krahé 2014]	23
Abbildung 9: Beispielrechnung für eine Wohnsituation mittels BEM-Simulation [Eulitz 2020].....	28
Abbildung 10: Hörschwelle Infraschall in den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 100 Hz (Eigene Darstellung)	32
Abbildung 11: Belästigung durch Infraschall in der Laborstudie [Krahé 2020]	34
Abbildung 12: Frequenzgang des verwendeten Infraschallmikrofon MK222E des Hersteller Microtech GEFELL.....	38
Abbildung 13: Ergebnisse der Druckkammermessung der verwendeten Messkette im Vergleich zu Wahrnehmungsschwellen aus der Literatur (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 14: Frequenzbewertungskurven (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 15: Messtechnikaufbau im Labor	43
Abbildung 16: Links: Außenmesspunkt, Rechts: Innenmesspunkt, unten: Schematischer Messaufbau	45
Abbildung 17: Meteorologische Daten der Langzeitmessung	46
Abbildung 18: L_{Zeq} , L_{Geq} , L_{Ceq} und L_{Aeq} und die Windgeschwindigkeit Langzeitmessung	47
Abbildung 19: Terzmittenfrequenzen des L_{Zeq} Außen (blau) und Innen (rot).....	48
Abbildung 20: Vergleich der Terzfrequenzen im Infraschallbereich von 0,5 Hz- 4 Hz am Außen- und Innenmesspunkt	50
Abbildung 21: Vergleich der Terzfrequenzen im Infraschallbereich von 5 Hz- 40 Hz am Außen- und Innmesspunkt	51
Abbildung 22: Darstellung der Messwerte am Außenmikrofon in den Terzmittenfrequenzen von 0,5Hz- 40Hz als Median (schwarz), 25% und 75% Quantile (Rot) und 5% und 95% Quantil (Grau).....	53
Abbildung 23: Vergleich L_{Zeq} -Außen zu L_{Zeq} -Innen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.....	54
Abbildung 24: Schalldruckpegeldifferenz D gebildet aus dem L_{Zeq} vom Außen- zum Innenmesspunkt bei 0 bis 0,2 m/s Windgeschwindigkeit	55
Abbildung 25: Pufferzonen für Routenplanung; Links: Windenergieanlagen und Kraftwerke; Rechts. Verkehrswege (Quelle: Open-Data-Esri und © OpenStreetMap) .	58
Abbildung 26: Routenplanung (links) und tatsächliche Messorte (rechts) (Quelle: Open-Data-Esri und © OpenStreetMap).....	59

Abbildung 27: Windgeschwindigkeiten Deutschlandtour 09.09.22-21.09.22	60
Abbildung 28: L_{Zeq} aller Messungen zwischen 0,5 Hz bis 40 Hz Querschnittserhebung	61
Abbildung 29: Vergleich zweier Messorte anhand der Quantile aus der Langzeitmessung und Sonogrammausschnitten Links: T03 Rostock, Rechts: T34 Heidelberg.....	62
Abbildung 30: Box-Plot mit unterschiedlichen Bewertungskurven (Nachtpegel) Querschnittserhebung	63
Abbildung 31: Vergleich L_{Zeq} -1-Minuten Takte Deutschlandtour mit L_{Zeq} -Quantilen der Langzeitmessung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit	64
Abbildung 32: Anzahl der verfügbaren 1-Minuten-Takte aus der Langzeitmessung und der Querschnittserhebung in den diskreditierten Windgeschwindigkeiten.....	65
Abbildung 33: Infraschallgrundpegel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit	65
Abbildung 34: Messaufbau Kontrollmessung mit sekundärem Luftschirm	66
Abbildung 35: Meteorologische Daten der Kontrollmessung.....	67
Abbildung 36: Vergleich Messung mit Sekundärschirm und Langzeitmessung in den Terzmittenfrequenzen von 1Hz bis 6,3Hz.....	69
Abbildung 37: Vergleich Messung mit Sekundärschirm und Langzeitmessung in den Terzmittenfrequenzen von 8Hz bis 40Hz.....	70
Abbildung 38: Vorschlag für zukünftige Messungen unter Freifeldbedingungen.....	72
Abbildung 39: Infraschallgrundpegel in dB(Z) in Deutschland.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Infraschallfrequenzbereich nach ISO 7196 und dazugehörige Wellenlängen λ von Infraschall in Abhängigkeit von den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 20 Hz (Wellenlängen gerundet) bei 20°C.....	21
Tabelle 2: Einzahlwerte Langzeitmessung	47
Tabelle 3: Definierte Abstände zu anthropogenen Quellen für die Messkampagne	56
Tabelle 4: Verwendete Open-Data-Source zur Messkampagnenplanung.....	57
Tabelle 5: Messergebnisse Vergleich Messung Außenmikrofon mit Sekundärschirm Kanal 2 und Außenmikrofon Langzeitmessung Kanal 1	68

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei all denjenigen Bedanken, die mich bei der Realisierung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer und Kollegen Hr. Christian Eulitz bedanken, welcher mich bei der Themenfindung und während der Erstellung der Masterarbeit stets unterstützt hat. Weiterhin gilt mein Dank meinem Kollegen Hr. Dr. Brete, der durch konstruktive Diskussion und Anregung zum Erfolg der Arbeit beigetragen hat. Der Firma Möhler + Partner Ingenieure AG danke ich für die finanzielle Unterstützung während meines Studiums und der Forschungsarbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Freunden Frau Johanna Hofmann und Herrn Robin Schulz für die Bereitstellung Ihres Wohngebäudes in Luhdorf bei Winsen herzlichst bedanken. Mein Dank gilt auch Frau Irmgard Unger, die mir Ihren Garten zur Verfügung gestellt hat.

Zuletzt gebührt mein Dank Hr. Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübel für die Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit und die Begleitung während meines Bachelor- und Masterstudiums. Für die hilfreiche Anregung und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit bedanke ich mich recht herzlich.

1 Einleitung

In den letzten beiden Jahrzehnten haben Beschwerden aus der Bevölkerung über Anlagen, die tieffrequente Geräusche oder insbesondere Infraschall emittieren, zugenommen ([Eulitz 2020]; [Krahé 2014]). Dies hat verschiedene Ursachen, wobei die Energiewende (Dezentralisierung der Energiegewinnung, dichtere Gebäudehüllen etc.) einen bedeutenden Anteil dafür vermuten lässt. Mit der Sensibilisierung auf diese Problematik ist auch die Zunahme von Studien zu erklären, in denen Infraschall als Geräuschquelle untersucht wurde, wie u.a. [Freiberg 2019] in ihrem Review in Bezug auf Studien zu Belastungen durch Windenergieanlagen zeigen. Während es sich bei tieffrequentem Schall um Geräusche in einem Frequenzbereich von 20 bis 100 Hertz ([DIN 45680]; [Schmidt, 2016]) bzw. bis 200 Hz ([Robert-Koch-Institut, 2007]; [Leventhal, 2004]) handelt, werden als Infraschall wiederum nach der internationalen Norm ISO 7196 Luftschallwellen bezeichnet, die in einem Frequenzbereich von 1 bis 20 Hz liegen.

Infraschall liegt damit unterhalb des menschlichen Hörfrequenzbereichs [DIN 1320], was aber nicht bedeutet, dass Infraschall nicht wahrgenommen werden kann. Einerseits variiert die individuelle Hörschwelle zwischen Menschen sehr stark [Kurakata 2008], andererseits ist die Hörschwelle eine frequenzabhängige Größe. Mit anderen Worten: Infraschall kann auch auditiv wahrnehmbar sein, wenn er nur „laut“ genug ist.

Wie exemplarisch Befragungsergebnisse zur Wirkung von Infraschallimmissionen zeigen, erfolgt die Wahrnehmung von Infraschall auch über andere Sinne als das „Hören“, z.B. über das Druckempfinden [Krahé 2020]. Mehrheitlich gaben die Untersuchungspersonen an, eingespielte Infraschallgeräusche von 3 Hz bis 18 Hz gehört zu haben, jedoch wurden auch andere Formen der Wahrnehmung berichtet (z.B. über das Ohr, aber nicht als Geräusch wahrnehmbar oder als Vibrationen am Körper spürbar). Eine weitere Studie zeigte, dass Infraschallgeräusche als Pulsieren oder Druckgefühl auf dem Trommelfell wahrgenommen werden [Zagubień 2016].

In laborexperimentell ausgerichteten Studien, bei denen akute Reaktionen auf Infraschallgeräusche untersucht wurden, die mit einer Dauer von wenigen Sekunden [Maijala 2020] bis zu einer halben Stunde pro Geräusch [Krahé 2020] eingespielt wurden, zeigten sich im Pegelbereich um die Wahrnehmungsschwelle keine physiologischen Reaktionen auf die Infraschallexposition wie Änderungen in der Herzrate, Herzfrequenzvariabilität, Hautleitfähigkeit, Blutdruck, Wach-EEG oder im Gleichgewichtssinn. Auch traten keine Unterschiede auf zwischen solchen Personen, die zuvor in einer Befragung Windenergieanlagen-bezogene Symptome nannten, und solchen, die keine nannten [Maijala 2020] bzw. zwischen (wissentlich) durch Infraschall vorbelasteten und nicht vorbelasteten Personen [Krahé 2020].

Gleichwohl gibt es in der Bevölkerung immer wieder Sorge um die Gesundheitsbelastung von Infraschall, insbesondere der Langzeitwirkungen des Infraschalls von Windenergieanlagen.

Aus diesem Grund hat das Umweltbundesamt die Voruntersuchung für eine umweltepidemiologische Langzeitstudie ausgeschrieben, mit der Möhler + Partner in einem Konsortium mit IPAS (TU Dresden), Zeus GmbH, Prof. Krahe und InUPH (Universitätsmedizin Essen) beauftragt wurde.

Im Rahmen dieser Voruntersuchung für eine umweltepidemiologische Langzeitstudie sind verschiedene Arbeitspakete zu bearbeiten. Als eine Grundlage für die Feststellung verschiedener quellspezifischer Infraschallexpositionen ist der gewöhnliche Infraschall in unserer Umwelt zu erheben, denn Infraschall ist eine Alltagserscheinung, der die Bevölkerung ausgesetzt ist. Dieser gewöhnliche und alltägliche Infraschall ist festzustellen, um dann Unterschiede zu Infraschall von technischen Anlagen ermitteln zu können. Es soll also die Basis für eine Klassifizierung von anthropogenen Infraschallimmissionen geschaffen werden. Dabei sind wohl die messtechnischen Herausforderungen als auch der Umgang mit verschiedenen Kenngrößen zur Beschreibung in Infraschallimmissionen zu untersuchen.

2 Aufgabenstellung

Ziel der Master-Thesis ist es, den Infraschall als Alltagserscheinung festzustellen und zu beschreiben. Hierzu wird eine messtechnische Querschnittserhebung Deutschlands durchgeführt. Dabei sollen Messungen in verschiedenen repräsentativen Gebieten in Deutschland (Nord, Ost, Süd und West), bei verschiedenen Siedlungsstrukturen (Großstadt Stadtmitte/Stadtrand, Kleinstadt, Dorf, Einzelbebauung usw.), sowie mit unterschiedlichen Witterungs- und Geländeeinflüssen beinhaltet sein. Damit tatsächlich nur der gewöhnliche Infraschall aufgezeichnet wird, müssen Mindestabstände von bekannten Infraschallquellen (Flughäfen, Windparks, Industrieanlagen, Autobahnen usw.) eingehalten werden. Neben den digitalen Tonaufnahmen, die für Nachauswertungen archiviert werden sollen, sind geeignete Pegelgrößen auszuarbeiten, um den alltäglichen Infraschall und dessen Schwankungsbereich erkennbar (grafische Visualisierung) bzw. dokumentierbar zu machen.

Die Arbeit ist in das Forschungsvorhaben „Wirkung von Infraschall – Voruntersuchung für eine umweltepidemiologische Langzeitstudie“ FKZ 3721 561010 des Umweltbundesamtes eingebettet. Für die Bearbeitung steht geeignete Soft- und Hardware der Möhler + Partner Ingenieure AG zur Verfügung, welche die Arbeit mit betreut und unterstützt.

3 Theoretische Grundlagen

Die nachfolgenden Kapitel behandeln die Erläuterungen zu den theoretischen Grundlagen zur Schallausbreitung im Freien und den akustischen Eigenschaften von Infraschall, sowie eine Aufbereitung des aktuellen Forschungsstandes zur Lärmwirkung von Infraschallimmissionen.

3.1 Schallausbreitung im Freien

In der vorliegenden Untersuchung werden insbesondere Schallwellen betrachtet und analysiert. Schallwellen entstehen aufgrund von örtlich begrenzten und zeitlich veränderlichen Störungen des Gleichgewichts eines gasförmigen Mediums, wie beispielsweise Luft (vgl. [Skudrzyk 1954], Kap.2.1). Hierfür bedarf es eines Emittenten und eines Übertragungsmediums. Der Emittent kann unterschiedlichen Ursprungs haben. Das hier interessierende Übertragungsmedium zur Beschreibung eines Schallereignisses beschränkt sich für die Schallausbreitung im Freien auf das Medium Luft.

Vereinfacht ausgedrückt ist Schall die Ausbreitung lokaler Druckschwankungen im Medium, wobei ein Zusammenhang zwischen räumlichen und zeitlichen Druckzuständen herrscht. (vgl. [Hering 2021], Kap. 7.2.1).

Um die Schallausbreitung im Freien zu beschreiben, bedarf es im Weiteren eines wellentheoretischen Verständnisses über die Fortpflanzung einer Schallwelle im freien Raum und die Thermodynamik von Schallfeldern in Gasen.

3.1.1 Thermodynamik von Schallfeldern in Gasen

Zur Beschreibung eines Schallfeldes in einem Medium werden die Dichte und das Volumen des Gases benötigt. Daher wird die sogenannte Boyle-Marionette-Gleichung für die Akustik vereinfacht herangezogen:

$$p_G V_G = \frac{M}{M_{mol}} RT_G \quad (3.1.1.1)$$

Unter M wird die molare Masse, eine Materialkonstante, und unter M_{mol} das Molekulargewicht in Gramm eines Stoffes verstanden. Für M_{mol} (Luft) ergibt sich ein Molekulargewicht von 28,8 g, bestehend aus 20% Sauerstoff und circa 80% Stickstoff. Die Allgemeine Gaskonstante $R = 8,314 \text{ N m/K}$. (vgl. [Skudrzyk 1954], Kap.2.2).

Für akustische Betrachtungen kann die Formel 3.1.1.1 zur Beschreibung der Dichte und des Volumens in nachfolgende Formel umgeformt werden:

$$p_G = \frac{R}{M_{mol}} \rho_G T_G \quad (3.1.1.2)$$

Aus der vorangegangenen Gleichung 3.1.1.2 lässt sich die Auswirkungen der Änderung einer Größe auf die anderen Größen nicht vollends beschreiben. Beispielsweise resultieren durch Verdichtungs Vorgänge von Gasen ebenso Temperaturunterschiede (vgl. [Möser 2015], Kap. 2.1). Da die Wärmeleitung bekannterweise ein im Vergleich zur Druckänderung sehr langsamer Vorgang ist und demgegenüber Schallereignisse eine hohe zeitliche Veränderung haben, kann diese Eigenschaft des Temperaturunterschiedes vernachlässigt werden. (vgl. [Möser 2004], Kap. 1.4). Daher kann festgehalten werden, dass Schallfelder einer adiabatischen Zustandsänderung unterliegen. Hieraus resultiert, dass der Schalldruck p , die Schalldichte ρ und die Schalltemperatur T im Vergleich zu den statischen Größen p_0 , ρ_0 und T_0 infinitesimal klein sind (vgl. [Möser 2015], Kap 2.1). Zur Beschreibung dieser Gegebenheit wird in der Akustik die adiabatische Zustandsgleichung wie folgt verwendet:

$$\frac{p_G}{p_0} = \left(\frac{\rho_G}{\rho_0} \right)^\kappa \quad (3.1.1.3)$$

Der Adiabatenexponent κ beschreibt das Verhältnis zwischen spezifischer Wärme bei konstantem Druck und die spezifische Wärme bei konstantem Volumen und wird in der Akustik (auf Basis von zweiatomigen Gasen wie Luft) mit dem Faktor 1,4 verwendet. Aus den Formeln 3.1.1.2 und 3.1.1.3 kann die erläuterten Gesetzmäßigkeiten in einer vereinfachten Form beschrieben werden:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{T}{T_0} \quad (3.1.1.4)$$

Wird die Formel 3.1.1.4 nun als relative Größe betrachtet, wird deutlich, dass der relative Schalldruck gleich der Summe aus der relativen Schalldichte und der relativen Schalltemperatur ist (vgl. [Möser 2017], Kap.2.1.2).

Zur Beschreibung von Schallfeldern in der Akustik wird der Schalldruck als maßgebliche charakterisierende und messbare Größe herangezogen, da sich die Schalldichte nur indirekt aus dem Druck bestimmen lässt. Die Schalldichte wird daher mit dem Druck ausgedrückt

$$\rho = \frac{p}{c^2} \quad (3.1.1.5)$$

mit

$$c^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} = \frac{\kappa * R * T_0}{M_{mol}} \quad (3.1.1.6)$$

Mit der linearisierten Darstellung der Formel 3.1.1.6 ist ein weiteres charakteristisches Merkmal von Schallfeldern in Gasen beschrieben. Bekanntlich breitet sich der Schall mit der Schallgeschwindigkeit c in Dilatationswellen aus (vgl. [Sinambari 2020], Kap.2.3). In der Literatur wird für die Schallgeschwindigkeit auch Ausbreitungsgeschwindigkeit oder Wellengeschwindigkeit verwendet (vgl. [Möser 2003], Kap. 1.4). Somit gilt für die Schallgeschwindigkeit der Zusammenhang aus Formel 3.1.1.6:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\kappa * R * T} \quad (3.1.1.7)$$

3.1.2 Ein- und dreidimensionale Schallfelder

Neben den thermodynamischen Eigenschaften von Schallfeldern in Gasen und der Beschreibung der physikalischen Zustandsgrößen Schalldruck, Schalldichte und Schalltemperatur sind zur Beschreibung der Wellenausbreitung von Schall in Gasen weitere theoretische Grundlagen zu erläutern. Nach [Möser 2017] ist die zentrale Fragestellung der Akustik die physikalische Beschreibung des Phänomens der (nicht-dispersiven) Wellenausbreitung von Schall in Gasen.

Zu vereinfachten Betrachtung werden im Folgenden zunächst eindimensionale Schallfelder, quasi mit einer Raum-Koordinate, erläutert. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, kann Schall als Ausbreitung mechanischer Schwingung in einem elastischen Medium aufgrund von örtlichen Druck- und Dichteschwankungen definiert werden. Mathematisch vereinfacht ausgedrückt bezeichnet dies die Ausbreitung einer eindimensionalen ebenen Kompressionsstörung (vgl. [Hering 2021], Kap. 7.2.1). Das 1. Axiom besagt, dass wenn ein Körper nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird seinen Bewegungszustand zu ändern, so bleibt seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung gleich. (vgl. [Mayr 2012], Kap.1). Bei der Betrachtung eines Kettenleiters (vgl. Abbildung 1) kann die vorangegangenen These visualisiert werden, um diese auf die Akustik zu übertragen.

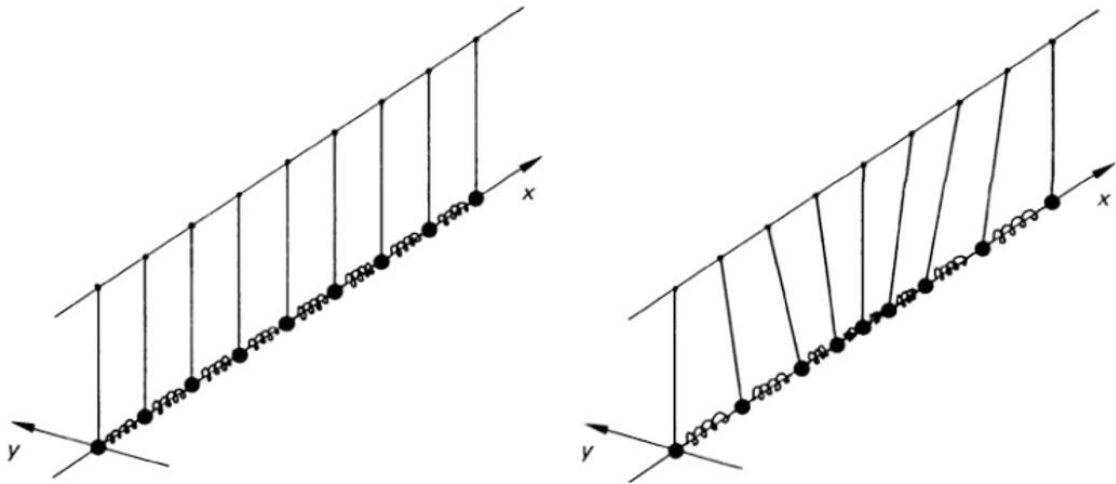


Abbildung 1: Kettenleiter aus Massen und Federelementen, links in Ruhe, rechts Longitudinalwellenform [Böge 2008]

Der Kettenleiter besteht aus mehreren Hintereinander geschalteten Massen mit dazwischen liegenden Federn. Trifft nun eine Kraft F auf eine Masse, so wird die zweite Masse aufgrund der dazwischenliegenden Feder verzögert weitergeleitet. Hierbei findet eine „Wanderbewegung“ mit endlicher Geschwindigkeit statt (vgl. [Möser 2017], Kap. 2.2.1). Übertragen auf die Akustik schwingen die Luftmoleküle bzw. Luftteilchen um Ihren Ruhelage und dienen so als Transportmedium für eine Wellenbewegung. Die Luftteilchen bewegen sich in der Ausbreitungsrichtung der Welle hin und her. Diese Wellen werden als Longitudinalwellen bezeichnet (vgl. [Hopkins 2014], Kap. 1.2.1). Nachfolgende Abbildung 2 zeigt die Kompression und Dekompression einer Longitudinalwelle anhand von Luftteilchen:

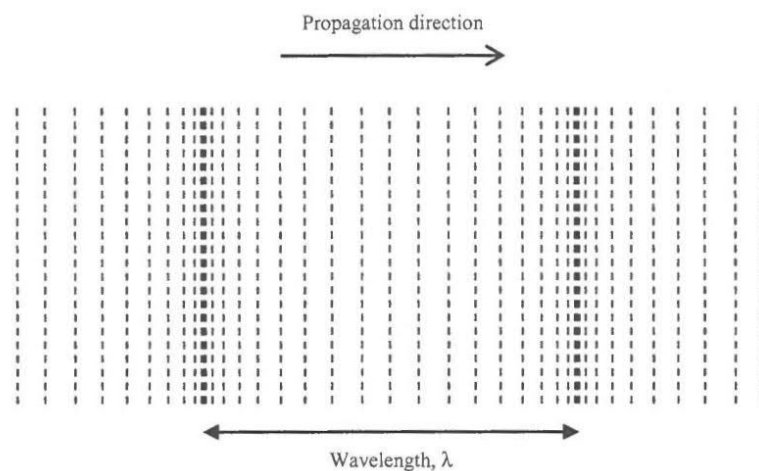


Abbildung 2: Kompression und Dekompression einer Longitudinal Welle [Hopkins 2014]

Auf Basis der vorangegangenen Erläuterungen wird deutlich, dass sich zwei unterschiedliche Geschwindigkeitstypen beschreiben lassen. Zum einen die Geschwindigkeit der Auslenkung der Luftteilchen und zum anderen die Geschwindigkeit der Welle. Der Bezug zur Wellengeschwindigkeit wurde bereits in Kapitel 3.1.1 behandelt. Die Geschwindigkeit der lokalen Gasteilchen wird als Schnelle v bezeichnet. (vgl. [Möser 2017], Kap. 2.2.1). Weiterhin zeigt die Schallschnelle v eine Proportionalität mit der Amplitude und der Frequenz (vgl. [Böge 2008], Kap. 8.4):

$$v = 2\pi * A * f \quad (3.1.2.1)$$

Um nun ein lineares Wellenfeld im eindimensionalen Raum beschreiben zu können, sind notwendige Beziehungen zwischen der Trägheit, der Massenerhaltung und der isentropen Beziehung (siehe Gleichung 3.1.1.6) herzustellen. Die Trägheit verknüpft hierbei den Wechseldruck mit der Schnelle (vgl. [Skudrzyk 1954], Kap.4.7). Unter Berücksichtigung des 1. Newtonschen Gesetzes wird das Trägheitsgesetz der Akustik nach [Möser 2017] wie nachfolgend notiert:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.1.2.2)$$

Für den idealisierten einfachen Fall fortschreitender Wellen kann angenommen werden, dass die Signalform von Druck und Schnelle gleich sind, sodass die Teilchenauslenkung ξ durch die Schallschnelle v ausgedrückt werden kann (vgl. [Möser 2017], Kap. 2.2.1).

$$v(x, t) = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (3.1.2.3)$$

Somit ergibt sich für das Trägheitsgesetz der Akustik nach Formel 3.1.1.2 und unter Einbeziehung von 3.1.1.3:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (3.1.2.4)$$

Zur Beschreibung der Kompression des elastischen Kontinuums Gas, der Schalldichte, ist davon auszugehen, dass die vorhandene Masse unveränderlich bleibt. Durch Verformung eines Luftpaketes geht damit eine Veränderung der Dichte einher. Die Stetigkeit der Massenbeziehung zeigt einen kontinuierlichen Zusammenhang auf, der in der Akustik als Kontinuitätsgleichung nach [Möser 2017] bezeichnet wird:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = -\frac{\partial \xi(x)}{\partial x} \quad (3.1.2.5)$$

Wird die Teilchenauslenkung wiederum mit der Schallschnelle ausgedrückt, kann die Kontinuitätsgleichung nach [Sinambari 2020] wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3.1.2.6)$$

Mit den Gleichungen 3.1.2.4 und 3.1.2.6 können nun zwei Erklärungen für die Wellenausbreitung geliefert werden. Nach [Möser 2017] wird durch zweifache Ableitung nach der Zeit und der Ableitung nach dem Ort die Auslenkung eliminiert (vgl. [Möser 2017] Kap. 2.2). Hieraus folgt:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \quad (3.1.2.7)$$

In Kapitel 3.1.1 wurde der Zusammenhang der thermodynamischen Eigenschaften von Schall in Gasen aufgezeigt. Die hier erläuterte isentrope Beziehung wurde in Formel 3.1.1.6 beschrieben. Unter Einbeziehung der vorgenannten Formel, des Trägheitsgesetzes und der Kontinuitätsgleichung wird die Wellengleichung wie folgt beschrieben:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1.2.8)$$

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Schallfeldgleichungen ein Ausdruck von Impuls- und Masseerhaltung für Gase bei adiabatischen Zustandsänderungen sind. Um Schallfelder physikalischen zu beschreiben bzw. zu ermöglichen, definieren die Schallfeldgleichungen Mindestanforderungen. Wie vorangegangen aufgezeigt, beschreibt das eindimensionale Schallfeld die ebene Wellenausbreitung in einem idealisierten Modell. Um die Schallausbreitung im Freien zu beschreiben, wird die Wellengleichung in den Dreidimensionalen Raum übertragen. Hierfür wird lediglich die Formel 3.1.2.5 um die beiden Raumrichtungen y und z erweitert:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = -\frac{\partial \xi(x)}{\partial x} - \frac{\partial \xi(y)}{\partial y} - \frac{\partial \xi(z)}{\partial z} \quad (3.1.2.9)$$

Analog zur Herangehensweise für Formel 3.1.2.8 wird die Schnelle aus der Gleichung 3.1.2.9 durch Ableitung und Differenzierung eliminiert (vgl. [Möser 2017], Kap.2.3). Es folgt die dreidimensionale Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1.2.10)$$

Mit Hilfe des Laplace-Operators Δ lautet die Wellengleichung für den Wechseldruck:

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1.2.11)$$

Und für das Geschwindigkeitspotential φ :

$$\Delta \varphi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (3.1.2.12)$$

Hierin wird schließlich der Zusammenhang zwischen Schalldruck p und Schallschnelle v in einem gasförmigen Medium der Schallgeschwindigkeit c und der mittleren Dichte ρ_0 beschrieben (vgl. [Sinambari 2020], Kap. 2.2.2). In der ebenen Wellen werden somit orts- und zeitabhängige Schalldruckverläufe beschrieben, die sich mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c in x -Richtung fortbewegen, in den übrigen Raumkoordinaten (y und z) jedoch konstant bleiben. Zur Lösung der Wellengleichung wird nach [Sinambari 2020] von der partiellen Differentialgleichung des Geschwindigkeitspotentials nach Gleichung 3.1.2.12 ausgegangen und ein allgemeiner Ansatz für die freie fortschreitende und ebene Welle mittels einer beliebigen Kreisfrequenz ω inauguriert (vgl. [Sinambari 2020], Kap. 2.2.2):

$$\varphi = \hat{\varphi} \cos\left(\omega t \pm \frac{\omega}{c} x\right) \quad (3.1.2.13)$$

Die Kreisfrequenz ω stellt eine charakteristische Größe zur Beschreibung von harmonischen Schwingungen dar. Mithilfe Ihrer lässt sich der überstrichene Phasenwinkel der Schwingung pro Zeitspanne angeben. Eine Schwingungsperiode entspricht einem Phasenwinkel von 2π (vgl. [Guicking 2016], Kap. 1.2):

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.1.2.14)$$

Für die Schnelle v und den Wechseldruck p kann die Gleichung 3.1.2.13 ebenfalls angewendet werden, sodass sich der allgemeine Lösungsansatz wie folgt darstellt:

$$v = \hat{v} \cos\left(\omega t \pm \frac{\omega}{c} x\right) \quad (3.1.2.15)$$

$$p = \hat{p} \cos\left(\omega t \pm \frac{\omega}{c}x\right) \quad (3.1.2.16)$$

Um nun zur Ausbreitungsgeschwindigkeit (Formel 3.1.1.7) zu gelangen, wird der Ort als Konstante angenommen. Hierbei wird an einem Ort x des Schallfeldes die auftretende Schwingung beschrieben (vgl. [Sinambari 2020], Kap. 2.2.1). Für den Fall, dass die Zeit t konstant gesetzt wird, wird die Beziehung zwischen der Schallgeschwindigkeit, der Wellenlänge und der Frequenz sichtbar. In einer sinusförmigen Ausbreitung reproduziert sich eine Welle somit an einer bestimmten Stelle. Sie legt daher eine Strecke λ zurück. Unter Betrachtung der Periodendauer T und des Weges λ lässt sich nun eine Beziehung zur Schallgeschwindigkeit aufstellen (vgl. [Heckl 1994], Kap. 1.2.1.4):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1.2.17)$$

Die Wellenlänge kann ebenfalls über die sogenannte Wellenzahl k ausgedrückt werden. Sie drückt den pro Meter in eine bestimmte Beobachtungsrichtung zurückgelegten Phasenwinkel im Bogenmaß aus:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (3.1.2.18)$$

Darüber hinaus kann die Lösung im ebenen Wellenfeld unter Berücksichtigung einer gedämpften Ausbreitung (Dämpfungskoeffizient α_L) nach [Sinambari 2020] wie folgt notiert werden:

$$\underline{v} = \hat{v} e^{j(\omega t \pm kx)} e^{-\alpha_L x} \quad (3.1.2.19)$$

$$\underline{p} = \hat{p} e^{j(\omega t \pm kx)} e^{-\alpha_L x} \quad (3.1.2.20)$$

Neben der idealisierten Beschreibung des ebenen Wellenfeldes interessiert insbesondere die kugelförmige Ausbreitung unter realen Bedingungen. Das Kugelwellenfeld weist eine charakteristische kugelförmige Symmetrie des Schalldrucks und der Schallschnelle auf. Insbesondere in tieferen Frequenzbereichen entsprechen daher fast alle natürlichen Schallquellen näherungsweise einer Kugelquelle bzw. einem Monopol (vgl. [Hopkins 2014], Kap. 1.2.1.3). Um zu einer Lösung der allgemeinen Wellengleichung im Kugelwellenfeld zu kommen, sind die kartesischen Koordinaten in Kugelkoordinaten umzuwandeln (vgl. [Sinambari 2020], Kap. 2.2.3). Die Wellengleichung wird daher in folgender Form wiedergegeben:

$$\frac{\partial^2(r\varphi)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(r\varphi)}{\partial t^2} \quad (3.1.2.21)$$

Mit Hilfe des auf die Länge bezogenen Geschwindigkeitspotenzials φ' lautet die periodische Lösung in komplexer Schreibweise wie folgt (vgl. [Skudrzyk 1954], Kap. 4.8):

$$\underline{\varphi} = -\frac{\widehat{\varphi}'}{r} e^{jkr} e^{j\omega t} \quad (3.1.2.22)$$

Mit Hilfe des Geschwindigkeitspotenzials $\underline{\varphi}$ können nun die Feldgrößen \underline{p} und \underline{v} bestimmt werden:

$$\underline{p} = j\widehat{\varphi}' \frac{\omega \rho}{r} e^{-jkr} e^{j\omega t} \quad (3.1.2.23)$$

$$\underline{v} = \frac{\widehat{\varphi}'}{r^2} (1 + jkr) e^{-jkr} e^{j\omega t} \quad (3.1.2.24)$$

Es zeigt sich, dass der Druck und die Schnelle im Nahfeld des Zentrums der Kugelwelle konstante Amplituden und Phasengleichheit einnehmen, jedoch im Abstand zum Zentrum diese Gegebenheit nicht mehr zutrifft. Nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Ausbreitung einer Kugelwelle.

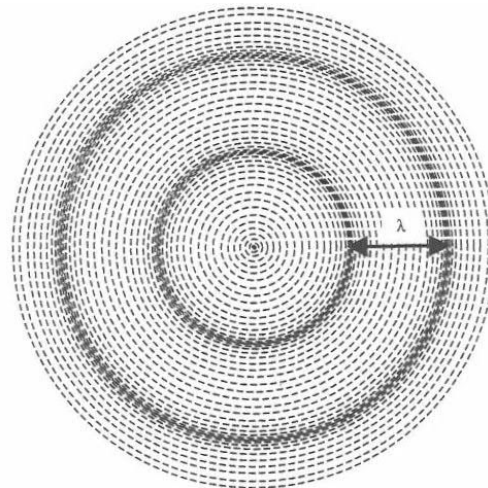


Abbildung 3: Kugelwellenausbreitung am Beispiel einer Punktschallquelle nach [Hopkins 2014]

Wie ersichtlich wird, breitet sich die von der Quelle erzeugte Schalleistung P auf konzentrischen Kreisen mit dem Radius r in den Raum aus. Nach [Möser 2015] wird daher der Ansatz für den Schalldruck wie folgt angegeben:

$$p = \frac{A}{r} e^{-jkr} \quad (3.1.2.25)$$

Der Faktor A beschreibt dabei die Amplitude, der Term e^{-jkr} den Phasenverlauf der Kugelwelle. Insgesamt zeigt sich, dass die Energie des Schalldrucks durch radial nach außen laufenden Wellen verdünnt wird (vgl. [Möser 2015], Kap. 3.3). Womit im Weiteren, die Kenngröße der Schallenergie und des Leistungstransportes im Schallfeld eine wichtige Komponente einnimmt.

3.1.3 Schallenergie und Leistungstransport

Im vorangegangenen Kapitel wurden die grundsätzlichen Beziehungen der Schallwellenausbreitung als lokale Verdichtungen eines Mediums mit den dazugehörigen Schwingungen der Gaselemente beschrieben. Durch die Kompression von Gasen wird daher ein Energieaufwand und eine beschleunigte Bewegung benötigt. Somit ist die in einem Schallfeld vorhandene Schallenergie als potenzielle Energie der Teilchenauslenkung ξ und als kinetische Energie der mit der Schallschnelle v bewegten Moleküle vorhanden (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 1.3.5). Die Teilchenauslenkung und die Schnelle unterliegen örtlichen Unterschieden, sodass auch die Schallenergie als lokale Größe betrachtet wird. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass jeder Punkt in einem Schallfeld als Energiespeicher mit der Energiedichte wirkt (vgl. [Heckl 1994], Kap. 1.2.1.3). Die Energiedichte w wird demnach aus zwei Komponenten zusammengesetzt:

$$w = \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} + \frac{\rho_0 |v|^2}{2} \quad (3.1.3.1)$$

Wie vorangegangen erläutert breiten sich die Feldgrößen p und v wellenförmig durch das Medium aus. Dies gilt ebenfalls für die Schallenergie. Im idealisierten Fall der ebenen fortschreitenden Welle ist der Verlauf der Energiedichte gleich den der Feldgrößen und breitet sich mit der Schallgeschwindigkeit aus. Bei stationären Quellen wird der Energietransport einfacher durch Leistungsgrößen beschrieben (vgl. [Möser 2015], Kap. 2.4). Um die Wirkung des Schallfeldes an einem Punkt im Raum zu beschreiben, beispielweise beim Empfänger, muss die Fläche S mitberücksichtigt werden. Die Schallleistungs-Flächendichte oder auch Schallintensität I gibt die durch die Fläche S hindurchtretende Leistung an. Die Schallintensität ist dabei eine gerichtete Größe. Nach [Möser 2015] ist die Intensität gleich dem Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle und gilt ebenso im allgemeinen dreidimensionalen Fall. Die hindurchtretende Leistung durch die Fläche S ist demnach das Integral der Schallintensität über die Fläche S (vgl. [Möser 2015] Kap. 2.4):

$$P = \int I dS \quad (3.1.3.2)$$

Es zeigt sich, dass die Schallintensität eine gerichtete Größe darstellt, die in der Richtung der Wellenausbreitung mitläuft. Hiermit wird nun der Schallenergie-Transport durch die Intensität $I = P/S$ beschrieben. Sie ist das Verhältnis aus der die Fläche S durchsetzenden Leistung P und der Fläche S in sich selbst (vgl. [Heckl 1994], Kap. 1.2.1.3). Hieraus kann allgemein gezeigt werden, dass die Intensität aus dem Produkt von Druck und Schnelle besteht:

$$I = p * v \quad (3.1.3.3)$$

Die dargestellte Beziehung aus Formel 3.1.3.3 findet insbesondere bei Messung zur Bestimmung der Schallleistung Anwendung. Hierbei gilt zu beachten, dass diese Messungen im Fernfeld der Quelle, also mit ausreichend großem Abstand und unter Freifeldbedingungen über die Ermittlung des Schalldruckpegels in Teilflächen S_i durchgeführt werden (vgl. [Heckl 1994], Kap. 1.2.1.3). Zur Ermittlung des Schalleistungs- und Schallenergiepegels sei an dieser Stelle auf die internationale Norm [DIN EN ISO 3744] verwiesen. Zur Beschreibung der Leistung und der Intensität wird ebenfalls der Pegel herangezogen. Mit den Bezugsgrößen $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ und $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ werden mit Hilfe der logarithmischen Pegelschreibweise die Intensitäts- und Leistungspegel beschrieben:

$$L_I = 10 \log \frac{\bar{I}}{I_0} \text{ dB} \quad (3.1.3.4)$$

$$L_W = 10 \log \frac{\bar{P}}{P_0} \text{ dB} \quad (3.1.3.5)$$

Da sich in einem kugelförmigen Schallfeld die Schallleistung auf konzentrischen Kreisen mit der Oberfläche $S = 4\pi r^2$ ausbreitet, kann davon ausgegangen werden, dass die Schallintensität bei konstanter Schallleistung der Quelle umgekehrt proportional zur Zunahme der Oberfläche mit einer Abnahme des Schallpegels für die Intensität und den Druck um 6 dB bei Verdopplung der Entfernung abnimmt (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 1.3.7). Mit Hilfe der Formel 3.1.3.2 kann nun das Abstandsgesetz für die Schallintensität bei einer Punktquelle definiert werden:

$$I \sim \frac{1}{r^2} \quad (3.1.3.6)$$

3.1.4 Schalldruckpegel

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, verringert sich der Schalldruck umgekehrt proportional zum Abstand. Da sich Kugelwellen im Fernfeld aufgrund der nachlassenden Krümmung der Wellenfront näherungsweise wie ebene Wellen verhalten, gilt für den Schalldruck unter Beachtung der Tatsache, dass sich die Schallquelle in einem Vollraum ohne reflektierende Oberflächen befindet, folgender Zusammenhang (vgl. [Heckl 1994], Kap. 18.2.1):

$$L_p = L_W - 20 \log \frac{r}{1m} - 11dB \quad (3.1.4.1)$$

Darin ist der Schalldruckpegel die Bezugs- und allgemeine Messgröße in der Akustik und wird mit der Bezugsgröße des Drucks in Pascal $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa mithilfe des dekadischen Logarithmus beschrieben (vgl. [DIN 45630-1]):

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} dB = 20 \log \frac{p}{p_0} dB \quad (3.1.4.2)$$

3.1.5 Einfluss von Reflexion, Bodenbeschaffenheit und Absorption in der freien Schallausbreitung

Die vorangegangenen Betrachtungen haben gemeinsam, dass Sie in idealisierten Schallfeldern stattfinden und dass Sie das Schallfeld im Allgemeinen beschreiben. Die tatsächliche Schallausbreitung im Freien wird dabei allerdings von weiteren Faktoren bestimmt. Der von einer Schallquelle im Freien in einem Punkt ihrer Umgebung erzeugte Schalldruckpegel wird neben der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Schallleistung und einer möglichen Richtcharakteristik durch die Geometrie des Schallfeldes, folglich der Lage der Schallquelle und des Empfängers zueinander, zum Boden und zu Gegenständen (Beugungskanten, Hindernisse, Oberflächen usw.) im Schallfeld beeinflusst (vgl. [Cremmer 1971], Kap. 3.1.2).

Ein entscheidender Faktor zur Beeinflussung des Schallfeldes bildet die Reflexion einer Schallquelle über dem Boden. Neben dem direkten Schall einer Schallquelle am Immisionsort kommt es aufgrund von Reflexionen am Boden zu sogenanntem reflektiertem Schallereignissen. Hierbei kommt es in Abhängigkeit der Material- und Bodeneigenschaften zu einer frequenzabhängigen Wechselwirkung zwischen den Materialien und dem Schall. Eine Modellannahme geht in Analogie zu dem bekannten Gesetz in der Optik davon aus, dass Einfallswinkel gleich dem Ausfallwinkel ist und sich der Schall-

strahl in einer Ebene befindet. Somit wird die Schallabstrahlung wesentlich über die Bodeneigenschaften in Form von Schallabsorptions- und Schallreflexionsgraden beeinflusst. Demnach erhöht sich entsprechend der direkte Schalldruckpegel zusätzlich durch den indirekten Schalldruckpegel. (vgl. [Möser 2004], Kap. 7.2.2). Bei einer bodennahen Schallquelle interferiert folglich der vom Boden reflektierte mit dem direkten Schall. Bei nahezu identischen Wegen zwischen der Originalquelle und der Spiegelquelle sind beide Quellen nicht mehr inkohärent. Dies bedeutet, dass der Phasenunterschied einen Einfluss auf den Schalldruck hat. Bei tiefen Frequenzen allerdings kann dieser Umstand zu einer Addition in Folge von Phasengleichheit der Schalldrücke haben, sodass beim Empfänger der Schalldruckpegel um bis zu 3 dB in diesen Frequenzbereichen ansteigt (vgl. [Möser 2004], Kap. 7.4.1).

Nachfolgende Abbildung soll unter der Annahme einer Spiegelschallquelle die vorangegangene Erläuterung verständlich visualisieren:

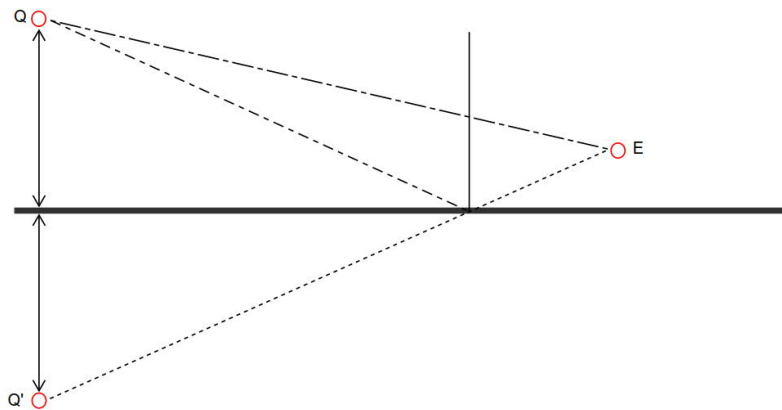


Abbildung 4: Spiegelung einer Schallquelle am Boden (eigene Darstellung)

Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Beeinflussung des Schallweges sind Abschirmungen durch natürliche und künstliche Hindernisse. Bekanntlich bildet sich ein sogenannter Schallschatten hinter schallundurchlässigen Hindernissen, welche groß gegenüber der Wellenlänge sind. Hierbei wird ein wichtiger Punkt deutlich, da sich dieser Schallschatten aufgrund von Beugungseffekten bei tiefen Frequenzen und auch insbesondere damit bei Infraschallfrequenzen weniger stark ausbildet als im höher frequenten Bereich (vgl. [Heckl 1994], Kap. 18.2.3). Ein Maß zur Bestimmung der Beugung bildet die Fresnel-Zahl N , in der Akustik üblicherweise in der Formel zur Bestimmung des Abschirmmaßes einer Lärmschutzwand enthalten:

$$D_z = \left(20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \right) \text{dB} \quad (3.1.5.1)$$

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (a + b - d) \quad (3.1.5.2)$$

Unter Betrachtung des Zusammenhangs der Fresnel-Zahl N in der Formel 3.1.5.1 lässt sich erkennen, dass bei tiefen Frequenzen das Abschirmmaß klein gegenüber höheren Frequenzen bleibt. Dieser Effekt verstärkt sich daher bei Frequenzen unterhalb von 20 Hz aufgrund der deutlich ansteigenden Wellenlängen weiter. Bei natürlichen Hindernissen, wie beispielsweise bei der Ausbreitung durch Bewuchs werden die Schallwellen durch Streuung um ein Vielfaches abgeschwächt. Hierdurch lässt sich festhalten, dass aufgrund einer bewaldeten Situation deutlich mehr Schallenergie auf dem Weg von Quelle zu Empfänger verloren geht, als es beispielsweise im freien Feld der Fall ist. Allerdings wird der Effekt erst bei sehr dichten und tiefen Bepflanzungen deutlich (vgl. [Cremer 1971], Kap. 3.1.1).

Ein weiter gewichtiger Einflussfaktor, insbesondere bei höheren Frequenzen, ist die Zusatzdämpfung durch die Absorption der Luft. Aufgrund der Eigenschaft von Luft eine Wärmeleitfähigkeit zu besitzen, erfährt der Schalldruckpegel Verluste. Diese Schalldispipation der Luft wird insbesondere durch [Cremer 1976] beschrieben. Hierbei wurde gezeigt, dass die Pegelabnahme von der relativen Feuchte und sehr stark von der Frequenz abhängig ist. Allerdings sind diese Betrachtungen für Frequenzen unterhalb von 100 Hz in der Praxis vernachlässigbar (vgl. [Cremer 1976]) und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

3.1.6 Einfluss von Inhomogenitäten der Luft

Die Luft stellt ein homogenes und bewegtes Medium dar. Vor diesem Hintergrund können in größeren Abständen zu Schallquellen gemessene Schallpegel unter Berücksichtigung von unterschiedlichen meteorologischen Einflüssen unterschiedliche Ergebnisse liefern. Hierbei zeigt die Windrichtung den stärksten Einfluss auf die Schallausbreitung im Freien. Bekanntlich werden Luftbewegungen am Boden durch Reibung und Hindernisse verringert, die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe über dem Boden zu (vgl. [Cremer 1971], Kap. 3.1).

In Gegenwindrichtung kommt es zur Bildung von sogenannten Schattenzonen, die nach [Fasold 2003] in 300 bis 1000 m Abstand zur Quelle Schalldruckpegelminderungen von 20 bis 30 dB am Immissionsort erfahren. Dem Gegenüber sind in Windrichtung bei ähnlichen Abständen Beugungsvorgänge an Hindernissen maßgeblich. In höheren Luftschichten nimmt die Bedeutung der größeren Windgeschwindigkeit und der Verlust der Bodeneinflüsse zu. Vor diesem Hintergrund breiten sich die Schallwellen mit dem Wind schneller und gegen den Wind langsamer in Höhenlagen aus (vgl. [Heckl 1994], Kap.

18.5.1). Verdeutlicht wird dieser Zusammenhang für hoch liegende Schallquellen in Abbildung 5. Während die Schallstrahlen mit dem Wind eine Beugung zum Boden hin erfahren, werden diese gegen den Wind weggebeugt.

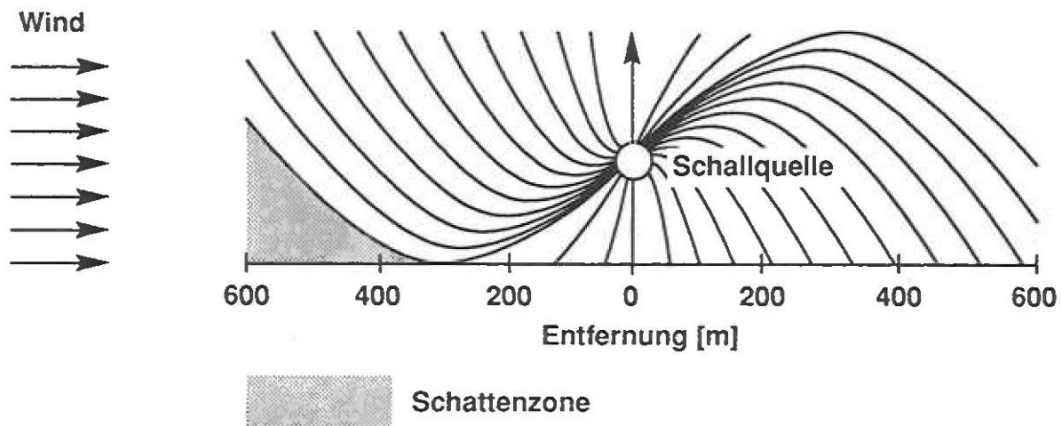
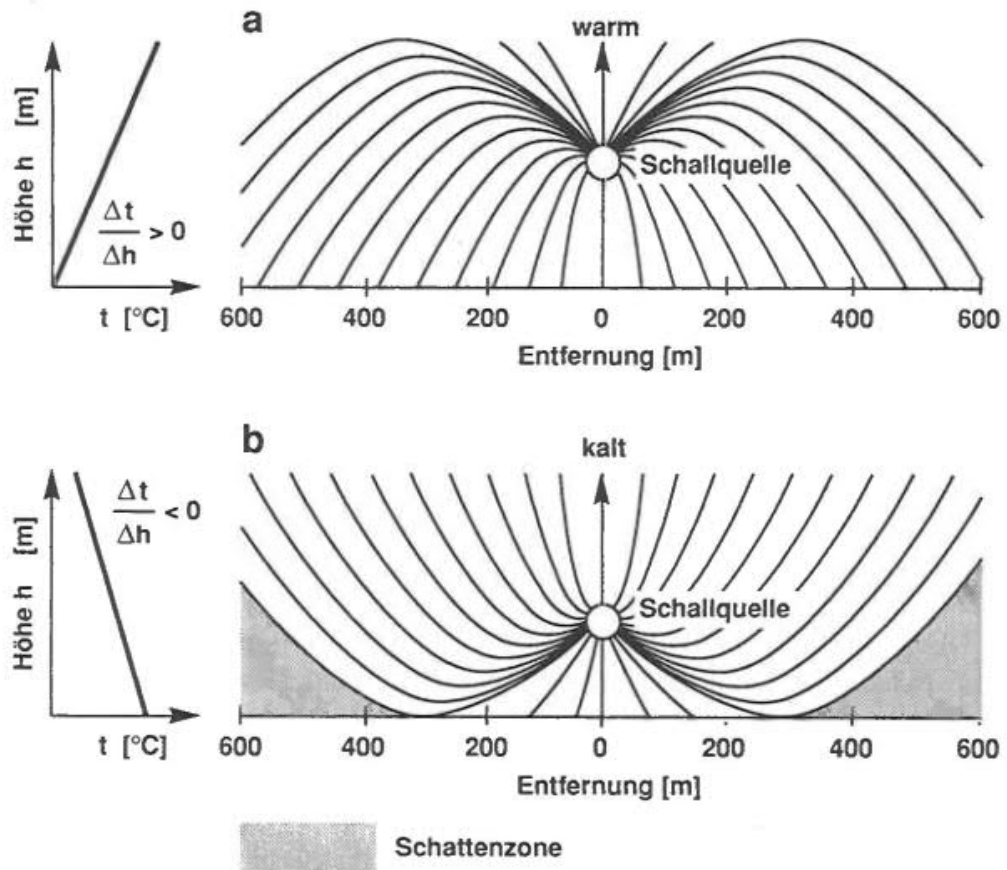


Abbildung 5: Windeinfluss auf die Schallausbreitung [Fasold 2003]

Der Temperaturgradient ist ein weiterer gewichtiger Einflussfaktor bei der Schallausbreitung im Freien, insbesondere bei größeren Abständen zwischen Quelle und Empfänger. Folglich beeinflussen unterschiedliche Temperaturschichtungen die Schallausbreitung. Bei abkühlendem Boden, insbesondere im Nachtzeitraum, tritt Temperaturinversion auf. Durch Abkühlungsprozesse des Bodens nimmt die Temperatur und zeitgleich die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zu. Hieraus folgt in Analogie zur Windgeschwindigkeit, dass sich die Schallstrahlen zum Boden hin beugen (vgl. [Heckl 1994], Kap. 18.5.2). Bei Erwärmung des Bodens tagsüber nimmt die Temperatur mit der Höhe ab. Hierdurch wird die Schallausbreitungsgeschwindigkeit verringert und die Schallstrahlen erfahren eine Beugung vom Boden weg. Es kommt hier ebenfalls zu Bildung von Schattenzonen, ähnlich wie bei der Gegenwindsituation (vgl. [Fasold 2003], Kap. 2.3.2.3).



- a positiver Temperaturgradient (Inversionswetterlage)
 b negativer Temperaturgradient

Abbildung 6: Einfluss von Temperaturschichtungen auf die Schallausbreitung [Fasold 2003]

3.2 Infraschall

Die nachfolgenden Kapitel sollen einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu Infraschallimmissionen, die Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Infraschall und die Wirkung sowie die Wahrnehmung von Infraschall beim Menschen verschaffen.

3.2.1 Akustische Eigenschaften und Entstehung von Infraschall

Die vorangegangenen Kapitel sollen ein grundlegendes Verständnis von akustischen Vorgängen und deren physikalischen Eigenschaften und Eigenheiten aufzeigen. Eine wesentliche akustische Eigenschaft von Schall ist neben der Lautstärke (ausgedrückt durch den Schalldruckpegel) die Tonhöhe. Diese wird über die Frequenz beschrieben und spektral aufgetragen über die Zeit. Das akustische Spektrum wird dabei in unterschiedliche Bereiche aufgliedert. In Analogie zur Optik wird hierbei die Wellenlänge als Maßeinheit zur Beschreibung dieser Abgrenzungen untereinander in der Akustik ebenfalls angewendet. Neben dem Hörschall, der sich im Bereich von zirka 20 Hz-20 kHz bewegt, gibt es daher noch weitere Bereiche wie den Ultraschall (20 kHz-100MHz), Hyperschall ($10^9 - 10^{12}$) und den hier interessierenden Infraschall, der Frequenzen unterhalb der menschlichen Hörschwelle aufweist. Dieses Kapitel soll daher die akustischen Eigenschaften von Infraschall aufzeigen.

Infraschall wird nach der internationalen Norm [ISO 7196] als Luftschallwellen in den Frequenzbereichen von 1 bis 20 Hz definiert. Die Literatur gibt allerdings an dieser Stelle keine definitorisch exakte Antwort. Nach der [DIN 1320] wird Infraschall unterhalb des Hörfrequenzbereichs kleiner 16 Hz festgelegt. Das Wort Infraschall kommt aus dem lateinischen für „infra“ übersetzt „darunter“. Wie vorangegangen beschrieben, befindet sich Infraschall daher per Definition unterhalb der durchschnittlichen menschlichen Hörschwelle und kann daher nicht oder nur bedingt als Luftschall über die Ohren „gehört“ werden. Wie auch beim Hörschall gibt es auch bei der Wahrnehmungsschwelle spezifische Unterschiede von Mensch zu Mensch (vgl. [Kuehler 2015]).

Ein Ton, welcher für manche Menschen nicht hörbar oder leise ist, kann für den anderen laut und lästig sein. Es zeigen sich daher individuelle Unterschiede, sodass eine klare Abgrenzung zwischen tieffrequenten Geräuschen und Infraschall nicht möglich erscheint. Im Sinne der [DIN 45680] wird als tieffrequenter Schall der Bereich die Terzmitfrequenzen zwischen 8 Hz bis 100 Hz angegeben. In Abbildung 7 ist das akustische Spektrum dargestellt.

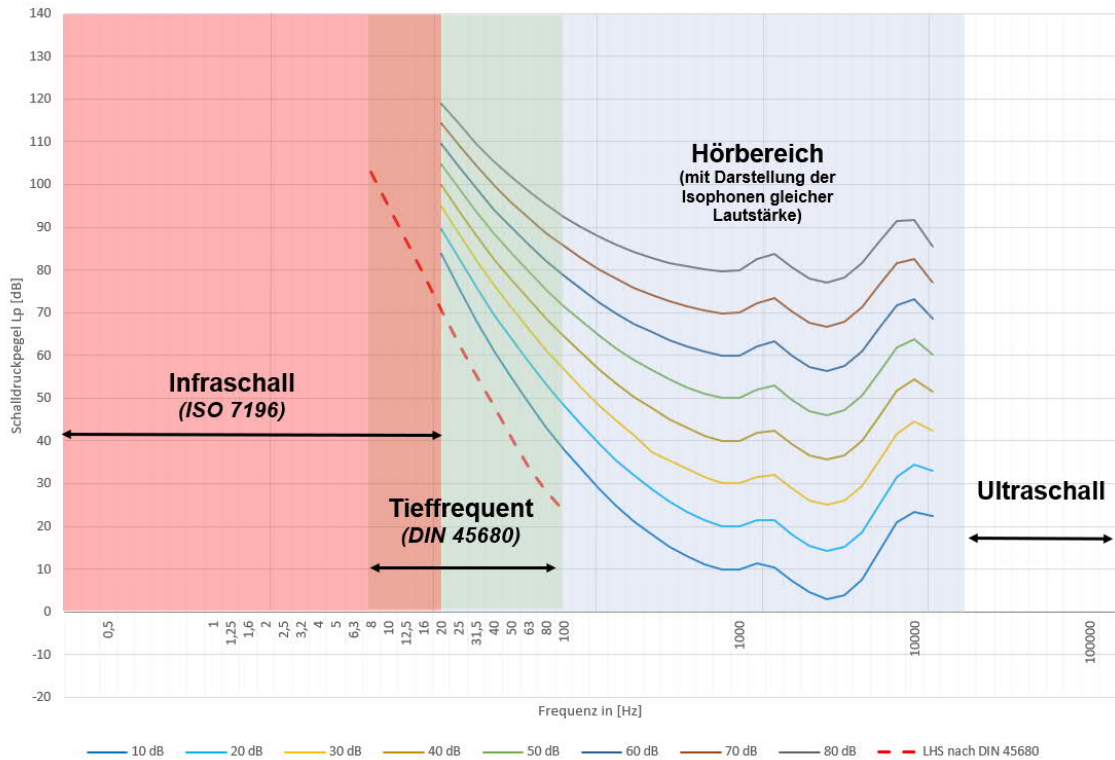


Abbildung 7: Frequenzbereiche der Akustik (eigene Darstellung)

Gegenüber dem mittel- und hochfrequenten Schallbereich sind die Wellenlängen des Infraschalls sehr groß. Nach der Formel 3.1.2.17 erstrecken sich die Wellenlängen im Terzmittenfrequenzbereich bei 20 Hz von 17 Metern bis hinab zu 1 Hz von 340 Metern.

Tabelle 1: Infraschallfrequenzbereich nach ISO 7196 und dazugehörige Wellenlängen λ von Infraschall in Abhängigkeit von den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 20 Hz (Wellenlängen gerundet) bei 20°C

f in [Hz]	1	1,25	1,6	2	2,5	3,2	4
λ in [m]	344	275	215	172	138	109	86
f in [Hz]	5	6,3	8	10	12,5	16	20
λ in [m]	69	55	43	34	28	22	17

Unter Betrachtung von typischen Wohngebäuden bzw. deren Aufenthaltsräumen können daher bei diesen großen Wellenlängen in der Regel keine Wellenfelder bzw. stehende Wellen in Räumen entstehen. Es bildet sich eine nahezu gleichmäßige Verteilung des Schallfeldes im Raum aus, die mit der Frequenz ansteigt und abschwilt. Aufgrund der großen Wellenlängen sind Infraschallgeräusche in großer Entfernung weniger von Dämpfungs- und Dämmungseffekten durch natürliche und künstliche Hindernisse betroffen als höherfrequente Geräuschanteile, was wiederum zur Folge hat, dass Infraschallemissionen auch über weite Distanzen noch einen hohen Energieanteil behalten und somit gut messbar sind. Wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, verursacht der Bodeneffekt einen charakteristischen Einbruch, welcher typischerweise im Frequenzbereich zwischen einigen hundert Hertz bis zu einigen Kilohertz liegt, aufgrund von partieller Auslöschung zwischen dem direkten und dem reflektierenden Schallweg. Dieser Effekt kommt bei Frequenzen im Infraschallbereich nicht zum Tragen, da die Impedanz normaler Böden unterhalb von 20 Hz liegt, was sich wiederum auf den Infraschall als akustisch hartes Gelände auswirkt (vgl. [Jakobsen 2005]). Die Eigenschaft der Langwelligkeit findet insbesondere im Tierreich Anwendung. Beispielsweise verwenden Elefanten und Blauwale den Infraschallbereich, um über größere Distanzen zu kommunizieren. Elefanten können Infraschallsignale mit einem Schalldruckpegel von über 100 dB in 5m Entfernung erzeugen. Mittels verhaltensphysiologischer Experimente, bei denen Infraschallrufe von Elefanten aufgezeichnet wurden und anschließend mittels spezieller Lautsprecher über den Boden als Substratschall in die Umgebung abgegeben wurden, konnte nachgewiesen werden, dass Elefanten auf diese Signale in einigen Kilometern Entfernung reagierten. (vgl. [Frings 2021], Kap. 6.2). Ähnlich wie bei Elefanten verwenden auch Wale Infraschall zur Kommunikation, wobei hier das Medium Wasser einen Vorteil in der Schallausbreitung gegenüber dem Medium Luft verschafft. Bei Messungen mit speziellen Unterwassermikrofonen - sogenannte Hydrophone - wurde festgestellt, dass Blauwale im Infraschallbereich von 1.000 bis 2.000 Kilometern hinweg kommunizieren können (vgl. [Mellinger 2003]).

Emittenten von Infraschall können in zwei unterschiedliche Klassen eingeteilt werden. Natürlicher Infraschall umgibt uns ständig. So können bei Gewitterlagen, Windströmungen, Meeresrauschen oder seismischen Plattenbewegungen Infraschallemissionen erzeugt werden. An einem Hindernis vorbeiströmender Wind kann je nach Beschaffenheit des Hindernisses prinzipiell ebenfalls Infraschall entstehen lassen. Ein extremes Beispiel für langwellige Infraschallquellen kann bei Vulkanausbrüchen nachgewiesen werden. Vulkanausbrüche können mittels Mikrobarometermesstechnik noch Tage nach der Haupteruption an Messstellen weltweit nachgewiesen werden (vgl. [Evers 2005]).

Eine weitere natürliche Infraschallquelle sind sogenannte Mikrobarome. Dies sind niederfrequente Überlagerungen des Luftdrucks. Diese atmosphärischen Ereignisse sind

auf das Wettergeschehen und Kopplungseffekten von hohem Seegang mit der Atmosphäre zurückzuführen. Aufgrund der geringen Dämpfung der Atmosphäre erreichen diese Infraschallereignisse große Reichweiten von mehreren tausend Kilometern. Ihre Hauptfrequenz liegt im Bereich 0,1 bis 0,5 Hz und spielen hauptsächlich bei der Deutung des Infraschalls zur Überwachung im Rahmen des Vertrages zum Verbot von Nuklearwaffentest eine Rolle (vgl. [Evers 2001]).

Demgegenüber steht der anthropogene Infraschall, welcher sich von natürlichen Quellen meist in charakteristischen Zeit- und Frequenzverläufen differenzieren lässt. Infraschall technischer Quellen sind oftmals Anlagen, die in Ihrer Dimension größere Luftmassen oder Oberflächen bewegen. Beispiele hierfür können industrielle Großanlagen wie Sieb- und Sortieranlagen, aber auch Anlagen zur Energieerzeugung sein. In einer Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall wurden neben den natürlichen Quellen elf weitere Gruppen von potenziellen Infraschallquellen klassifiziert (vgl. [Krahé 2014], Kap. 1). Diese Klassifizierung beruht auf einer bundesweiten Abfrage der Beschwerdesituation bei behördlichen Stellen zur Thematik Infraschall und tieffrequente Geräuschemissionen. Abbildung 8 zeigt die Auswertung dieser Befragung.

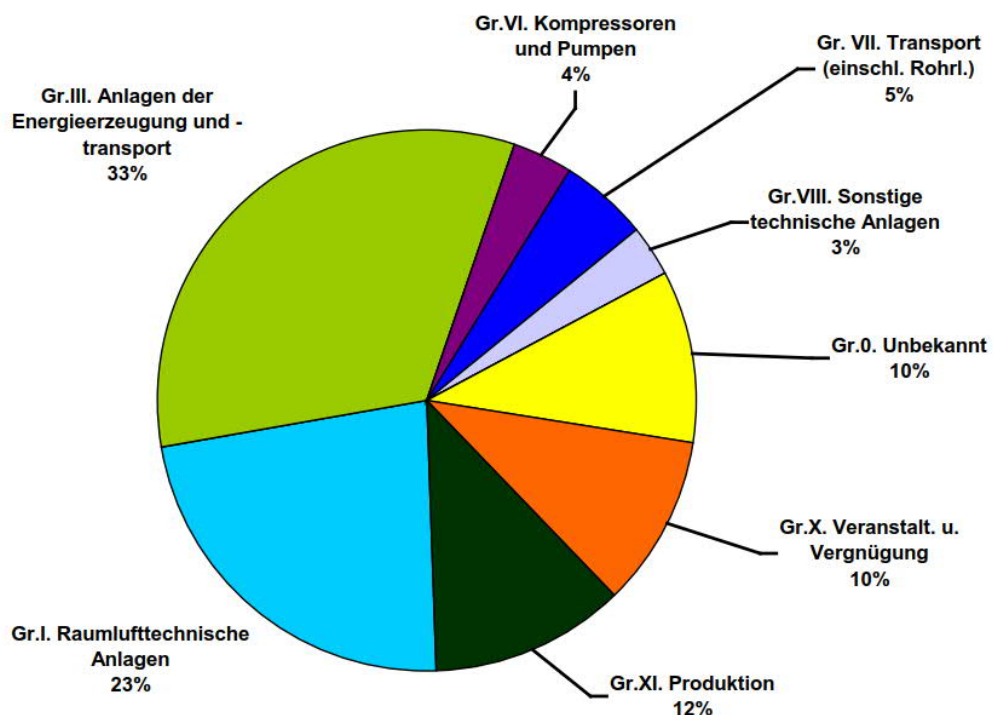


Abbildung 8: Prozentuale Verteilung von Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche aus [Krahé 2014]

Als Ergebnis wurde festgestellt, dass keine regionalen Schwerpunkte mit statistisch hinreichender Sicherheit identifizierbar waren. Der prozentualen Verteilung aus Abbildung 8 ist zudem zu entnehmen, dass Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche mit ca. 51% von Anlagen der Energieerzeugung und -transport, sowie der Gruppe von raumluftechnischen Anlagen zuzuordnen waren. Innerhalb dieser Gruppen wurden Wärmepumpen, Biogasanlagen, Blockheizkraftwerke und Windenergieanlagen als häufigste Quellenart durch die Beschwerdeführer benannt (vgl. [Krahé 2014], Kap.5.3.2). Die vorgenannten Quellgruppen haben gemeinsam, dass Sie über maßgebliche tieffrequente Geräuschquellen verfügen. Bei Luftwärmepumpen wird mittels eines Ventilators Umgebungsluft angesaugt, um diese zur Gebäudeheizung nutzbar zu machen. Kompressor- und Strömungsgeräusche sind hier die maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen. Als Hauptgeräuschquelle von Windenergieanlagen entstehen durch Verwirbelungen an den Hinterkanten der Rotorblätter aeroakustische Geräusche. Durch den Durchgang des Rotorblattes zwischen dem Turm und dem Blatt entstehen ebenfalls Druckschwankungen, die einen Wechseldruck im Infraschallfrequenzbereich erzeugen (vgl. [Møeller 2010] und [Schmitter 2022]). Dabei erzeugt die Grundfrequenz der Rotorbewegungen (sog. Flügelharmonische einer 3-Flügel-Windenergieanlage) bei ca. 1 bis 2 Hz im Hinblick auf die geringe Rotordrehzahl, meist im Bereich von ca. 15 bis 40 Umdrehungen pro Minute, Infraschall. Hierbei wird oftmals der gesamte Infraschallbereich mit den entsprechenden harmonischen Obertönen erzeugt. In einer 2014 bis 2015 durchgeführten Messkampagne zu Windenergieanlagen vom Landesumweltamt Baden-Württemberg wurde festgestellt, dass der Schalldruckpegel des Infraschalls im Nahbereich der Anlage zwar messbar ist, jedoch so gering, dass er weit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt (vgl. [LUBW 2016], Kap. 2).

Anthropogene Infraschallquellen sind daher vorwiegend bei Anlagen zu finden, welche aufgrund Ihrer Größe und Betriebsmodalität Erschütterungen verursachen können, sowie Anlagen, die energiehaltige Schallimpulse erzeugen. (vgl. [Krahé 2020], Kap. 2). Weiterhin können auch vielbefahrene Verkehrswege, wie Autobahnen, Infraschall emittieren.

Vor diesem Hintergrund lässt sich festhalten, dass bei vielen stationären technischen Anlagen neben den Hörschallanteilen auch Infraschall entsteht. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist bisher jedoch nicht bekannt, dass technische Schallquellen ausschließlich reinen Infraschall erzeugen können.

Verschiedene Laboruntersuchungen haben zudem gezeigt, dass die Erzeugung von reinem Infraschall auf einem Pegelniveau nahe oder oberhalb der Wahrnehmungsschwelle

des Menschen technisch sehr aufwendig ist. Für die künstliche Erzeugung von Infraschall gibt es jedoch spezielle Rotationstieftonlautsprecher mit deren Hilfe es möglich ist reine Infraschalltöne abzuspielen. In einer Laborstudie wurde dieses Verfahren angewendet, um Signale innerhalb eines Frequenzbereichs von 1 Hz bis 30 Hz mit einem Schalldruckpegel von bis zu 120 dB in einen Raum abzugeben (vgl. [Krahé 2020], Kap. 3.2.1).

In Deutschland gibt es derzeit keine gesetzliche Regelung bzw. Vorschrift zum Umgang von Infraschallemissionen unterhalb von 8 Hz (Terzmittenfrequenz), die von technischen Anlagen emittiert werden. Dies ist dadurch begründet, dass sich bisher keine Wirkrelevanz von Infraschallimmissionen auf einem geringen Pegelniveau praktischer Situationen nachweisen lies. Vorbehaltlich der Tatsache, dass dieser Themenbereich noch nicht vollumfänglich erforscht wurde, wird in Deutschland durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) die Handhabung mit schädlichen Umwelteinwirkungen, welche gefährlichen, erheblich nachteiligen oder erheblich belästigenden Immissionen hervorrufen, geregelt. Dem Lärmschutz bzw. dessen Vorsorge wird darin ebenfalls Rechnung getragen. Als Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz fungiert die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) als definitorisches Werk zum Umgang mit technischen Anlagen und erläutert die Begrifflichkeiten der schädlichen Umwelteinwirkung durch Lärm. Aussagen über tieffrequente Schallereignisse respektive Infraschall werden allerdings in diesem Regelwerk nicht getätigt, vielmehr wird auf die DIN 45680 verwiesen. Hintergrund dieser Tatsache ist, dass nach dem allgemeinen Beurteilungsverfahren der TA Lärm „A-bewertete“ Schallpegel anzuwenden sind. Mit Hilfe der A-Bewertung werden allerdings die hier interessierenden Frequenzbereiche nicht adäquat gewichtet. Die Beurteilung tieffrequenter Geräusche erfolgt auf Grundlage der DIN 45680 mit dem zugehörigen Beiblatt 1, in der Fassung von 1997 (vgl. [DIN 45680]). Diese Norm befindet sich bereits seit einigen Jahren in der Überarbeitung. In der derzeitigen Entwurfs-Fassung wird ein Standard-Verfahren zur Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche in den Terzfrequenzbereichen von 8 Hz bis 100 Hz beschrieben (vgl. [E DIN 45680:2020-06], Kap. 1). Wie bisher wird damit auch der oben definierte Infraschallbereich in den Frequenzen zwischen 8 Hz und 20 Hz (Terzmittenfrequenzen) erfasst und bewertet. In der aktuell gültigen Fassung der DIN 45680 von 1997 und auch in der Entwurfsfassung Infraschall als technische und natürliche Erscheinung beschrieben und aufgeführt. Die Entwurfsfassung macht darüber hinaus Hinweise zur gesonderten Erfassung der nominalen Mittenfrequenzen unterhalb von 8 Hz, wenn die Vermutung naheliegt, dass geräuschbestimmende Anteile im Infraschallbereich liegen.

3.2.2 Ausbreitungsmodelle für Infraschall

In Deutschland existiert derzeit kein normativ oder anderweitig festgelegtes Verfahren für Schallausbreitungsberechnungen von ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen oder Infraschall. Ausgehend von den Erkenntnissen aus der Schallfeldtheorie (Kap. 3.1) und dem Schallstrahlenverfahren (vgl. Kap. 3.1.6) zeigt sich, dass Ausbreitungsberechnungen in diesem Bereich noch nicht in anwendbarem Umfang umgesetzt wurden. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass bisher noch keine Anforderungen an Emissionsdaten im Infraschallbereich erfasst wurden. In den letzten Jahren sind hier jedoch Lösungsansätze, zumindest den Abdeckungsbereich der DIN 45680 betreffend, untersucht worden (vgl. [Schulze 2021], [Fritsche 2013], [Eulitz 2020]).

Bekannt ist, dass geometrische Berechnungsverfahren im tiefen Frequenzbereich bis ca. 63 Hz (vgl. [DIN ISO 9613-2]) bzw. ab 25 Hz (vgl. [Nord2000]) zu korrekten Berechnungsergebnissen für energieäquivalente Mittelungspegel führen. Nach der DIN ISO 9613-2 erfolgt eine genaue Beschreibung der Berechnung der Schalldruckpegelabnahme auf dem Ausbreitungsweg im Freien von Schallquelle (Emission, beschrieben durch die Schalleistung) zu Empfänger (Immission, beschrieben durch den Schalldruckpegel) für die Oktavbandmittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz. Da die Oktavband-Algorithmen zur Berechnung dieser Dämpfungsterme für Frequenzen unterhalb der 63 Hz Oktave nicht definiert sind, ist es fraglich, ob die Ermittlung der Dämpfung von tieffrequenten Geräuschen in den Terzmittenfrequenzen von 25 Hz bis 50 Hz mittels DIN ISO 9613-2 adäquat ist. Für geometrische Schallausbreitungsberechnungen bis zu einer unteren Grenzfrequenz von ca. 22 Hz (25 Hz Terzband) müssen deshalb die Unsicherheiten für die Terzbänder unterhalb 63 Hz Oktave berücksichtigt werden. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Dämpfungen aufgrund des Bodeneffekts und der Abschirmung zu legen, da hierbei mögliche Berechnungsungenauigkeiten die Ergebnisse vor allem im tieffrequenten Bereich beeinflussen können. Für die Ermittlung der Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts kann in der DIN ISO 9613-2 wahlweise ein frequenzabhängiges Berechnungsverfahren mit Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit (von $G = 0$ für schallharte Böden bis $G = 1$ für poröse Böden) oder ein alternatives Verfahren ohne Beachtung der Frequenz für vereinfachte Fälle angewendet werden. Unter Verwendung der erstgenannten Methode übernimmt die verwendete Software für den Bodeneffekt für alle Terzbänder unterhalb von 63 Hz den Dämpfungswert der 63 Hz Oktave. Dieser ist im Gegensatz zu den Bodeneffekten der Oktavbänder ab 125 Hz gemäß DIN ISO 9613-2 nicht mehr abhängig von der Bodenbeschaffenheit, sondern ausschließlich von der Emissions- und Immissionsorthöhe sowie von dem Quellenabstand.

Gegenüber dieser in der Praxis gängigen geometrischen Verfahren können gegebenenfalls zukünftig analytische oder numerische Verfahren zur Schallfeldsimulation bei tiefen

Frequenzen herangezogen werden (vgl. [Eulitz 2020], Kap. 2.3.2.4). Analytische Lösungen der Randwertprobleme sind hierbei physikalisch exakt, allerdings bei komplexen Problemen praktisch bzw. durch Computermodelle kaum beherrschbar.

Numerische Lösungen der Randwertprobleme sind Näherungslösungen, wobei analytische Zusammenhänge (z. B. Ableitungen, Integrale, DGL) in algebraische Zusammenhänge (z.B. Addition, Multiplikation, Matrizen) übergeführt werden. Es findet zudem eine Diskretisierung der Funktionswerte statt indem innerhalb eines Gitters nur die Stützstellen (Knoten) berechnet werden, wodurch eine Reduktion der Anzahl der zu berechnenden Elemente erfolgt. Als numerische Methoden stellen die Finite-Elemente-Method (FEM) und die Boundary-Element-Method (BEM) zwei Verfahren dar, die für akustische Fragestellungen geeignet sind. Zusätzliche numerische Berechnungsverfahren von Schallfeldern sind u.a. Fast Field Program (FFP), Parabolic Equation (PE) und Finite Difference Time Domain (FDTD).

Dabei bietet die BEM in der Akustik vor allem für die Ausbreitungsberechnung im Freien einen grundsätzlichen Lösungsansatz. Durch Lösung des Randwertproblems auf der Grenze des zu untersuchenden Gebiets kann auf Funktionswerte in dessen Umgebung geschlossen werden. Besonders die Möglichkeit Schallfelder außerhalb einer Randfläche zu berechnen macht dieses Verfahren besonders für die Schallausbreitungsberechnung im Freifeld interessant. Im Vergleich zur FEM müssen weniger Unbekannte bestimmt werden. Der Aufwand zur Lösung der Gleichungssysteme ist allerdings größer. FEM und BEM-Verfahren können auch kombiniert werden. Beide Verfahren eignen sich zur Berechnung tieffrequenter Phänomene bis zu einer oberen Frequenzgrenze von ca. 100 Hz bis 200 Hz (vgl. [Sarradj 2009]).

Weitere bereits gut untersuchte numerische Methoden zur Berechnung der Schallausbreitung im Freifeld, bzw. bei großen Ausbreitungswegen sind „Fast Field Program“ (FFP), die „Parabolic Equation“ (PE) und „Finite Difference Time Domain“ (FDTD). Nachteil der FFP ist vor allem, dass es auf einen homogenen bzw. flachen Untergrund beschränkt ist, d.h. unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten können nicht berücksichtigt werden (vgl. [Gilbert 1988]). Die PE ist nicht bzgl. einem homogenen Untergrund eingegrenzt, sondern kann auch variierende Bodeneffekte in Betracht ziehen. Dieses Verfahren hat allerdings den Nachteil, dass Reflexionen zurück zur Quelle nicht beachtet werden. Die FDTD hingegen kann Reflexionen, Beugungen und Streuungen sowie komplexe Bodeneffekte berücksichtigen und ist im Vergleich zur BEM eine vielversprechende numerische Alternative (vgl. [Eulitz 2020], Kap. 5.6.2).

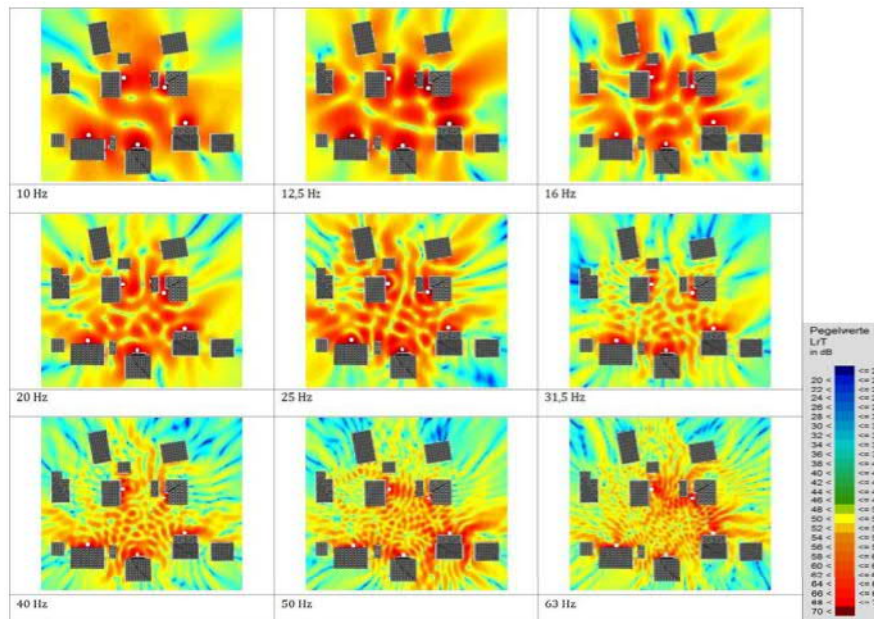


Abbildung 9: Beispielrechnung für eine Wohnsituation mittels BEM-Simulation [Eulitz 2020]

Da es sich bei allen vorgestellten Berechnungsverfahren um theoretische Ansätze im Infrasschallbereich handelt, sind derzeit zur Bestimmung und Ermittlung von Infrasschallimmissionen messtechnische Untersuchungen in der Praxis anzuwenden. Für großflächige Prognoseberechnungen ist vermutlich ein vereinfachtes Verfahren in Anlehnung ISO 9613-2/ Nord2000 anzuwenden, da für die Epidemiologie Bestandsermittlungen, rückwirkende Berechnungen und zukünftige Prognosen erforderlich sind.

3.2.3 Wahrnehmung und mögliche Auswirkungen von Infraschall

Zur Wahrnehmungsforschung von Infraschall sind in den vergangenen Jahren unterschiedliche Studien durchgeführt und publiziert worden. Im Vordergrund dieser Studien steht zum einen die Wahrnehmung bzw. im übertragenen Sinn die Hör- bzw. Fühlbarkeitsschwelle, also wie und wann wird Infraschall vom Menschen wahrgenommen, und zum anderen die gesundheitlichen und schädlichen Auswirkungen von Infraschallexposition. Bekannterweise wird der Hörschall direkt über das Gehör wahrgenommen. Hierfür muss der Schalldruckpegel die Hörschwelle des Menschen erreichen. Wie bereits in Abbildung 7 im Kapitel 3.2.1 aufgetragen, wurde die Hörschwelle beim Menschen in Richtlinien anhand von gemittelten Werten aus einer hohen Anzahl untersuchter Menschen ermittelt und festgelegt (vgl. [ISO 28961] und [DIN ISO 226]). Allerdings wird bei diesen definierten Hörschwellen ausschließlich der Hörbereich des Menschen ab 20 Hz und nicht der Infraschallbereich berücksichtigt. Anhand von statistischen Berechnungen und unterschiedlichen Probandenversuchen wurden Hör- und Fühlbarkeitsschwellen im Infraschallbereich ermittelt.

Über die Wahrnehmbarkeit in diesen Studien wurde von Probanden Infraschall mittels verbaler Beschreibungen als „Brummen“, „Dröhnen“ und „Wummern“ klassifiziert (vgl. [Møeller 2002]). Während der gewöhnliche Hörschall direkt über das Gehör wahrgenommen wird, zeigt sich das der Infraschall auch über eine diskontinuierliche Wahrnehmung von Pulsationen, Druckempfindungen und Vibrationen, also taktiler Wahrnehmungsmechanismen, wahrgenommen wird (vgl. [Kubicek 1989]). Nach [Møeller 2004] ist das Ohr dennoch das primäre Organ zur Wahrnehmung von Infraschall. Infraschall begegnet also dem menschlichen Körper in unterschiedlicher Form. Neben der Aufnahme über das Gehör spielen daher noch weitere Rezeptorsysteme eine Rolle. Zur taktilen sowie vestibulären Wahrnehmung sind insbesondere Mechanorezeptoren zur Vermittlung von Druck-, Berührungs- und Vibrationsempfindungen im menschlichen Körper zuständig. Dabei sind die Haut-, Muskel- und Sehnenrezeptoren für die Wahrnehmung von Körpervibrationen bei Frequenzen oberhalb von 15 Hz und der Vestibularapparat für Wahrnehmungen von Vibrationen unterhalb von 15 Hz verantwortlich (vgl. [Schmidt 2016] und [RKI 2007]).

Im Bereich der tiefen Frequenzen kleiner 100 Hz wird das Gehör allmählich unempfindlicher, sodass für die der Pegel für deren Wahrnehmbarkeit deutlich steigen muss. Allerdings nimmt nicht nur die Empfindlichkeit des Gehörs im Infraschallbereich ab, sondern auch der wahrgenommene Charakter eines Geräusches verändert sich (vgl. [Møeller 2004]). So werden reine Töne im tieffrequenten Bereich zunehmend diskontinuierlicher und erzeugen ein Druckempfinden auf dem Trommelfell. Von [Yeowart 1969] wurde beschrieben, dass reine Töne oberhalb 20 Hz bereits als tonal und weich und Töne im

Frequenzbereich zwischen 5 bis 15 Hz als rau und mit einem knalligen Ton empfinden werden. Bei Tönen unterhalb der 5 Hz Grenze wurde von Seiten der Probanden eine Bewegung des Trommelfells selbst beschrieben (vgl. [Yeowart 1969], Kap. 6). Beispielsweise wird ein Sinuston bei 4 Hz als getaktetes Signal und nicht mehr als Ton wahrgenommen. Neben der reinen Schallenergie, also dem Schalldruckpegelniveau, nehmen noch weitere Faktoren einen Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit von Infraschall. In Versuchen, bei denen Probanden unterschiedliche Modulationsszenarien von tieffrequenten Tönen vorgespielt wurden, zeigte sich, dass eine Vielzahl von Tönen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle zu einer überschwelligeren Wahrnehmung führt (vgl. [Watanabe 2002], Kap. 6). Ursächlich für dieses Phänomen können Schwebungen bzw. Modulationen sein, die aufgrund von einer Vielzahl von benachbarten Spektralkomponenten entstehen. (vgl. [Krahé 2020], Kap. 2.2).

Hierzu wurde in einer 2015 veröffentlichten Studie mittels speziell entwickelten Kopfhörern Probanden Reinton-Schalldruckpegel von bis zu 130 dB im Frequenzbereich von 2 bis 250 Hz mit sehr geringen harmonischen Verzerrungen dargeboten. Die daraus gewonnenen Verhaltenshörschwellen wurden mit den bisherigen Hör- und Fühlbarkeitschwellen aus der Literatur verglichen und es zeigte sich, dass diese weitestgehend übereinstimmen (vgl. [Kuehler 2015]). Aufbauend auf dieser Studie wurde einige Jahre später der Zusammenhang und der Einfluss der Anzahl spektraler Komponenten auf die Ruheschwelle von Infraschallreizen untersucht. Mittels eines verzerrungsarmen Infraschall-Wiedergabesystems wurde den Probanden Infraschallstimuli mit einer, zwei oder drei sinusförmigen Komponenten monoaural dargeboten. Dabei hatten alle Komponenten der komplexen Töne den gleichen Pegel relativ zu ihrer jeweiligen Reintonschwelle. Die gewonnenen Daten stimmen dabei mit der Annahme überein, dass eine wahrnehmungsgewichtete Intensitätsintegration an der Ruheschwelle besteht. Das heißt das, das der wahrgenommene Pegel an der Hörschwelle für jede Komponente um 3 dB niedriger wahrgenommen wird, wenn zwei Komponenten gleichzeitig dargeboten wurden. Weiterhin konnte ermittelt werden, dass die Schwellenwerte noch weiter sinken, wenn ein Dreiklangkomplex verwendet wurde. In Bezug auf die Bewertung von Infraschall auf den Umgebungslärm wird angeführt, dass es nicht ausreicht die Infraschallkomponenten anhand einzelner spektraler Reintonschwellen zu bewerten, sondern die spektrale Integration zu beachten (vgl. [Friedrich 2020]).

In der Veröffentlichung von Møeller und Pedersen wurde auf Basis von statistischen Berechnungen und einer umfangreichen Literaturrecherche eine Fortschreibung der Hörschwelle in Anlehnung an die ISO 226 für den Terzmittenfrequenzbereich kleiner 20 Hz getätigt. Die vorgeschlagene Hörschwelle entspricht etwa der Kurve eines G-bewerteten Schalldruckpegels von 97 dB(G). Weiterhin erläutern die Autoren, dass unter Berücksichtigung aller durchgeführten Versuche die Schwankungsbreite der Hör- bzw.

Fühlbarkeitsschwelle im Infraschallbereich gegenüber dem normierten Hörschall wesentlich größer ist. Dies lässt sich auch damit begründen, dass die gesichteten Studien einen eher geringen Probandenpool aufweisen (vgl. [Møeller 2004]). Weiterhin ist hierbei aber auch aufgefallen, dass die Empfindsamkeit gegenüber tiefen Frequenzbereichen einen größeren Unterschied aufweist als im normalen Hörbereich.

Vor diesem Hintergrund sind im Infraschallbereich größere individuelle Fühlbarkeitsschwellen und größere Unterschiede zu erwarten (vgl. [Krahé 2020], Kap. 2.2)). Daher wird in der ISO 28961 für circa ein Prozent der Bevölkerung eine um bis zu 15 dB höhere oder niedrigere Wahrnehmungsschwelle für 20 Hz angegeben.

Die DIN 45680 hingegen gibt zur Bewertung tieffrequenter Geräusche einen definierten „Hörschwellenpegel“ in den Terzmittenfrequenzen von 8 bis 100 Hz an, wobei das bisherige Beurteilungsverfahren die Terzbänder von 10 bis 80 Hz (8 bis 100 Hz im erweiterten Bereich) berücksichtigt. Zwischenzeitlich gibt es auch hier neue Ansätze. In seinem Abschlussbericht zum „Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkungen tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für die Neufassung der DIN 45680“ zeigt [Schmidt 2016], dass mittels der 1%-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 eine untere Wahrnehmungsgrenze für tieffrequenten Schall- respektive Infraschallanteile entwickelt werden kann, mit Hilfe derer die praxisnahe Beschwerdesituation von auch besonders empfindlichen Personen Berücksichtigung findet. Auf Basis von einer umfangreichen Analyse von Hörschwellendaten wird ein Vorschlag für eine neue Wahrnehmungsschwelle bestehend aus Teilen der 1 %-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 und einer Ergänzung durch Extrapolation für die Terzmittenfrequenzen zwischen 8 bis 16 Hz gemacht (vgl. [Schmidt 2016], Kap. 4.3.2).

Nach der ISO 7196 wird ausgeführt, dass Geräusche im normierten Frequenzbereich von 1 bis 20 Hz mit einem gewichteten Schalldruckpegel von 100 dB(G) von einem durchschnittlichen Hörer gerade so wahrgenommen werden. Bewertete Schalldruckpegel, die 90 dB(G) unterschreiten, sind normalerweise für die menschliche Wahrnehmung nicht mehr von Bedeutung. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Erkenntnisse, dass bei tieffrequenten Geräuschen die Streuung der Fühlbarkeits- bzw. Hörschwelle deutlich höher ist als im Normalschall, kann mit hinreichender Sicherheit ein Wert von 85 dB(G) als untere Wahrnehmungsschwelle herangezogen werden. Dieser Grenzwert wird auch in der Literatur als umweltverträglicher Infraschallpegel empfohlen (vgl. [Jakobsen 2001]).

Nachfolgende Abbildung zeigt die auf Grundlage der vorangegangenen Erläuterungen maßgeblichen Hörschwellenerweiterungen im Infraschallbereich. Diese definierten Fühl- bzw. Wahrnehmbarkeitsschwellen geben daher ein grundlegendes Indiz über die „Hörbarkeit“ eines Geräusches im Infraschallbereich.

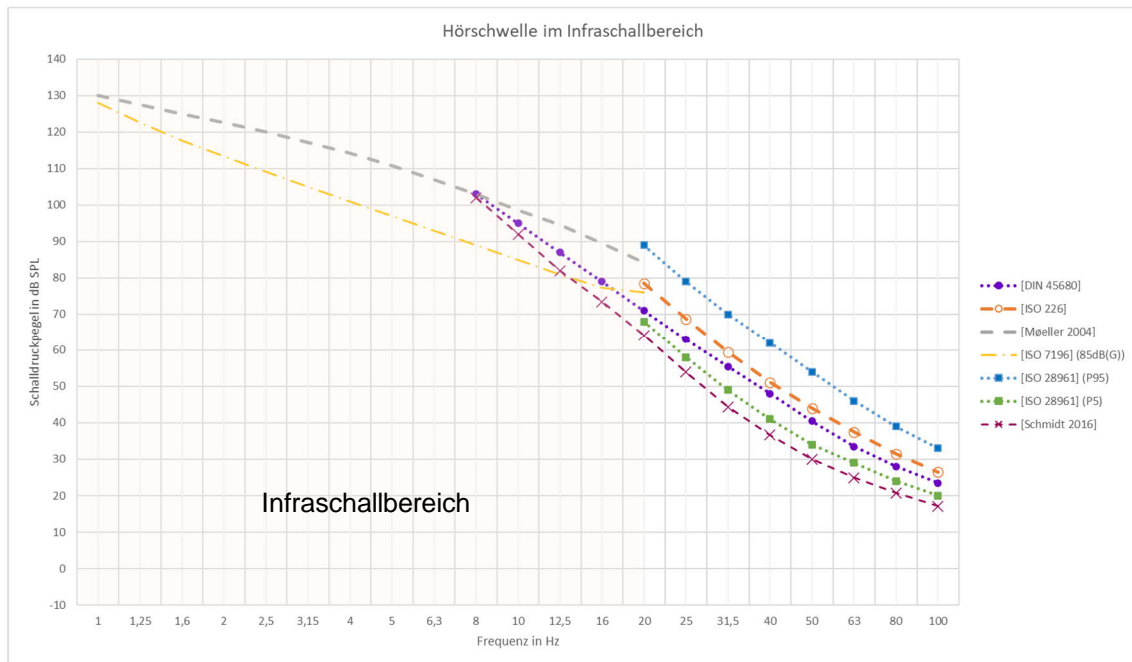


Abbildung 10: Hörschwelle Infrashall in den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 100 Hz (Eigene Darstellung)

Als zentrale Fragestellung in der Forschung zum Infrashall werden neben der Wahrnehmbarkeit insbesondere die gesundheitlichen Auswirkungen beim Menschen durch Infrashallexpositionen betrachtet. Die medizinische Forschung zu Lärm, vordergründlich Verkehrslärm, zeigt, dass beim Menschen nachteilige gesundheitliche Beeinträchtigungen oder Schäden durch Langzeitexpositionen weithin bekannt sind. Nach aktuellem Forschungsstand sind langfristige Risiken von Lärm Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Schlafstörungen. Zurückzuführen ist dies auf körperliche Stressreaktionen.

Zur Lärmwirkungsforschung bei Infrashall wurden ebenfalls mehrere Studien und Forschungsprojekte in den vergangenen Jahren durchgeführt und publiziert. Hintergrund ist zum einen die Lärmwirkungsforschung an sich aber auch vermehrt Beschwerden über Schwindel und Unbehaglichkeitsempfinden von Bürgerinnen und Bürgern in Deutschland, welche mit dem Thema bzw. Begriff Infrashall assoziiert wurden (vgl. [Krahé 2014]). Als Begründung für diesen Umstand wird in der Literatur angeführt, dass die Konzentration von tieffrequentem Schall respektive Infrashall im Alltag häufiger aufgrund von vermehrtem Vorhandensein tieffrequenter Quellen, der günstigen physikalischen Ausbreitungsbedingungen und der Tatsache, dass die heutige konventionelle Bautechnik kaum wirksam gegen tieffrequente Schallpegel wirkt, auftritt (vgl. [Krahé 2014], Kap. 5.3.3). In der 2014 durchgeführten Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infrashall wurde anhand von exemplarischen Untersuchungsergebnissen aus der Literatur zusammengefasst, dass die Literatur kein einheitliches Bild über Infrashallwirkungen auf Menschen im Pegelbereich um die Wahrnehmungsschwelle zeigt und das

Infraschall ab zirka 75 dB(Z) unterschiedlichste negative Auswirkungen auf den menschlichen Körper nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden können. Diese Auswirkungen zeigen sich in den Bereichen des Herz-Kreislaufsystems, der Konzentrations- und Reaktionsfähigkeit, der Gleichgewichtsorgane, des Nervensystems und der auditiven Sinnesorgane. Zusätzlich zu dieser Feststellung wird benannt, dass im Frequenzbereich unter 10 Hz negative Auswirkungen von Infraschall resultieren, wenn der Schalldruckpegel gerade so unterhalb der Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt. Einhergehend mit den physiologischen Wirkungen konnte festgestellt werden, dass psychovegetative Störungen in Form von Unbehaglichkeitsgefühlen wie Schwindel, Müdigkeit oder Benommenheit auftraten.

Aufbauend aus den gewonnenen Erkenntnissen der Literaturrecherche aus dieser Machbarkeitsstudie wurde in einem Laborexperiment an zirka 44 Probanden die Lärmwirkung von reinem Infraschall in Form von kurzzeitigen dargebotenen Infraschallreipegeln getestet (vgl. [Krahé 2020]). Ziel dieser Untersuchung war es, ob diese kurzzeitigen dargebotenen Expositionen einen Einfluss auf akute physiologische Reaktionen des Körpers haben. Unter kontrollierten und ruhigen Messbedingungen wurden den Probanden in einen Versuchsraum mit Hilfe eines speziell abgestimmten Rotationstieftöners unterschiedliche Szenarien vorgespielt. Neben physiologischen Untersuchungen, wie Blutdruck, WachEEG und neurologischen Testungen wurden anschließend Befragungen zu den Szenarien durchgeführt. Hervorzuheben ist, dass von den 44 Testpersonen 16 Personen bereits durch nachgewiesene Lärmbelastigungen durch Infraschall vorbelastet waren. Es wurden vier verschiedene Geräuschszenarien mit einem Sinuston von 3 Hz mit 105 dB, von 5 Hz mit ebenfalls 105 dB, 10 Hz mit 95 dB, 18 Hz mit 85 dB und eine Ruhebedingung zu Kontrollzwecken an den Probanden getestet. Die Pegel wurden so ausgewählt, dass diese im Bereich unterhalb und oberhalb der Hörschwelle nach DIN45680 lagen. Im Ergebnis (siehe Abbildung 11) der psychologischen Untersuchung wurde festgestellt, dass die Geräuschszenarien unterschiedlich wahrgenommen und im Hinblick auf die Belästigungswirkung ebenfalls unterschiedliche beurteilt wurden.

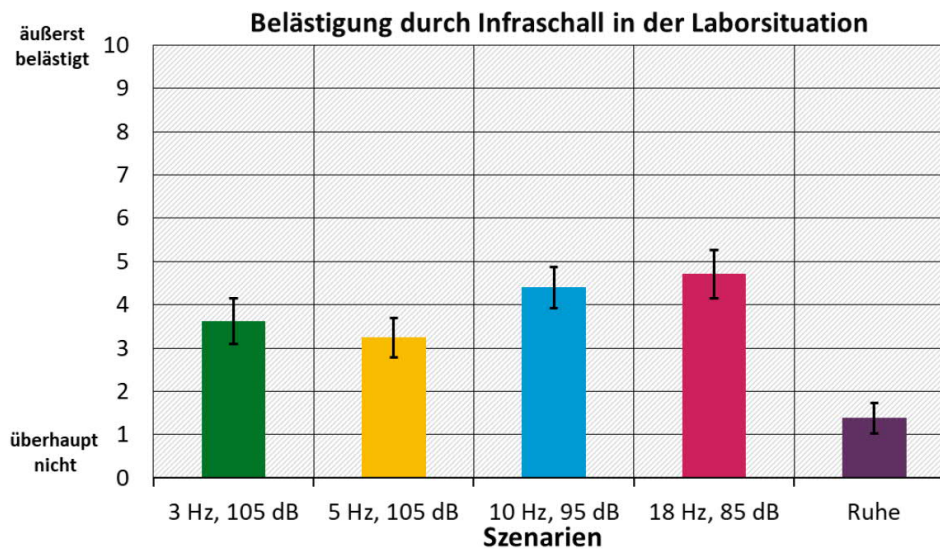


Abbildung 11: Belästigung durch Infraschall in der Laborstudie [Krahé 2020]

Das 10 Hz und 18 Hz Szenario wurde dabei am unangenehmsten empfunden. Von Seiten der Probanden wurden Vibrationen am Körper, ein allgemeines Unwohlsein und Vibration und Druck im Kopfbereich beschrieben. Demnach werden eingespielte Infraschallgeräusche an und oberhalb der Hörschwelle als unangenehm erlebt und beurteilt und das eine Korrelation zwischen Vibrations- und Druckgefühl und dem empfundenen Unwohlsein besteht. Zwischen den vorbelasteten und unbelasteten eingestuft Personen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden, woraus sich zumindest für diese Untersuchung kein Zusammenhang zwischen geäußerten Beeinträchtigungen von Infraschall im Wohnumfeld von Betroffenen ableiten lässt. Allerdings wird angemerkt, dass auf die Expositionszeit unter Langzeitbedingungen kein Rückschluss gezogen werden kann. Vielmehr wird als Diskussion angebracht, dass beispielsweise eine Sensitivierung von Betroffenen erst nach längerer Lärmexposition erfolgen könnte (vgl. [Krahé 2020], Kap. 5 und 6).

Untersuchungen zur Reaktion des Gehirns bei Infraschallexpositionen nahe und knapp über der Infraschallhörschwelle mittels MRT haben gezeigt, dass eine signifikant höhere lokale Konnektivität im rechten superioren temporalen Gyrus neben dem primären auditorischen Kortex und in der rechten Amygdala vorgefunden wurde. Anhand dieser Erkenntnisse wird festgestellt, dass Infraschall in der Nähe der Hörschwelle Veränderungen der neuronalen Aktivität in mehreren Hirnregionen, von denen einige bekanntlich an der Hörverarbeitung beteiligt sind, hervorruft. Damit lässt sich ein pathogener Einfluss auf den menschlichen Organismus nicht grundsätzlich ausschließen (vgl. [Weichenberger 2017]).

Dem gegenüber untersucht eine andere kürzlich erschienene Studie mit einem Probandenpool von 38 Personen Infraschallexpositionen über einen Zeitraum von einem

Monat. Hierbei wurden ein speziell konstruiertes Infraschallgerät und ein Placebo-Gerät in den Schlafräumen aufgestellt. Die Teilnehmer wurden dabei nicht informiert, ob es sich um ein Placebo-Gerät handelt. Laut dem Studienbericht wurde das Infraschallgerät auf eine Frequenz von 6 Hz bei einem variierenden Pegel von 80 bis 90 dB(Z) für den Zeitraum des Schlafens auf jeden Probanden eingestellt. Ziel der Studie war es, langfristige Auswirkungen von Infraschall auf das Gehirn und das Verhalten der Menschen zu untersuchen. Dabei wurden somatische und psychiatrische Symptome, die Geräuschempfindlichkeit, die Schlafqualität und die kognitive Leistungsfähigkeit in einer Prä-/Post-Evaluation untersucht. Die Ergebnisse der somatischen und psychiatrischen Analysen zeigten, dass unhörbarer Infraschall keinen Einfluss auf die Teilnehmer hatte. Allerdings deuten sondierende Analysen darauf hin, dass empfindliche Teilnehmer nach dem Test in geringen Maße Schwächegefühle gezeigt haben. Weiterhin wurden anhand von MRT Untersuchungen Hirnstrukturanalysen durchgeführt. Auf Basis dieser Analysen scheint es, dass die Infraschallexposition mit einem Rückgang der grauen Substanz in dem Hirnareal zusammenhängt, welches mit somatomotorischen und kognitiven Funktionen, wie dem Arbeitsgedächtnis und auditorischer Verarbeitungsprozesse, wie Sprachverstehen oder semantische/lexikalische Verarbeitung, verbunden ist. Allerdings wurden alle Versuche an jungen und nicht vorbelasteten Probanden durchgeführt (vgl. [Ascone 2021]).

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine beeinträchtigende und schädliche Infraschallexposition von vielen Faktoren, wie Modulation und Schalldruckpegel abhängen. Langzeitstudien bzw. ausführliche medizinische Untersuchungen auf diesem Themengebiet gibt es kaum. Die Vielzahl der gesichteten Untersuchungen deutet jedoch darauf hin, dass ab einem Pegelniveau von 75 dB(Z) physiologische Wirkungen und psychovegetative Störungen durch Infraschall auftreten.

3.2.4 Diskussion des aktuellen Forschungsstandes von Infraschallimmissionen und weitergehende Forschungsfragestellungen

Im vorangegangenen Kapitel konnte anhand von unterschiedlichen Studien bereits ein breites Spektrum des aktuellen Forschungsstandes zu Infraschallimmissionen aufgezeigt werden. Wie wissenschaftliche Untersuchungen zu extra-auralen Wirkungen von Infraschallgeräuschen zeigen, gibt es physiologische Auswirkungen bei hinreichendem Pegelanteilen. Allerdings sind all diese Erkenntnisse Gegenstand von Querschnitts- und Laboruntersuchungen. Zur Beurteilung der Wirkung von Infraschallimmissionen scheinen die Ergebnisse aus der Mehrzahl der bisherigen Studienergebnisse auf Grund ihres Forschungsdesigns und der geringen ökologischen Validität ungeeignet zur Einschätzung von langfristigen Expositionen durch anthropogenen Infraschall im Alltag zu sein.

Um ein hinreichendes Bewertungsverfahren im Zusammenhang mit Infraschallemissionen und Immissionen entwickeln und beurteilen zu können, bedarf es noch weiterer wissenschaftlicher Erkenntnisse in diesem Bereich. Dies kann beispielsweise mit Langzeitstudien in einem Kohorten-Design erfolgen. Eine solche Untersuchung mit einer hinreichenden Probandenanzahl mit einem ausreichend qualitativen Zeitraum wurde bisher noch nicht durchgeführt oder veröffentlicht.

Sowohl inhaltliche, methodologische und verfahrenstechnische Grundlagen zur Erforschung und Beschreibung von Langzeitstudien im Hinblick auf die Infraschallwirkung beim Menschen sind derzeit noch offene Fragestellungen. Hierzu zählen auch quantitative und qualitative Messungen von natürlich vorkommendem und anthropogenem Infraschall. Oftmals wird aufgrund von medialen Beeinflussungen, wie beispielsweise im Zusammenhang mit gesundheitlichen Auswirkungen von Windenergieanlagen Studien durchgeführt, die nur einen kleinen Teil der noch ausstehenden Infraschallforschung anführen und ergründen.

Weiterhin hat die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Literaturrecherche zu Messungen des natürlichen Infraschalls ergeben, dass in diesem Themenbereich noch kaum Veröffentlichungen zu finden sind.

3.3 Messung von Infraschall

Dieses Kapitel stellt die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Messmethoden vor und betrachtet weitere Methoden zur Messung im Bereich von Infraschallemissionen.

3.3.1 Messtechnik

Grundlage für die Messung von Geräuschen bilden üblicherweise sogenannte Schallpegelmesser. Physikalisch betrachtet wird der wechselnde Luftdruck gemessen. Für Messmikrofone und Schallpegelmesser sind verschiedene Genauigkeitsklassen und Spezifikationen in der [DIN EN 61094-1] und der [DIN EN 60268-4] festgelegt. Am häufigsten finden in der modernen Messtechnik Mikrofone mit einer Membran Anwendung. In der akustischen Messtechnik zur Erfassung von Schalldruck und Schallschnelle ist das Kondensatormikrofon in Hochfrequenz- und Niederfrequenztechnik Vorreiter. Hintergrund ist, dass das Kondensatorprinzip die höchsten Anforderungen hinsichtlich Linearität des Frequenzgangs und Verzerrungsfreiheit bietet (vgl. [Weinzierl 2008], Kap. 7.4.1). Durch die auf sie einwirkende Kraft (Druckänderung) wird die Membran aus Ihrer Ruheposition ausgelenkt. Die Abstandsänderung zur Gegenelektrode verursacht eine Kapazitätsänderung, die in ein elektrisches Signal umgewandelt wird und dann mit Hilfe von Signalverarbeitungsprozessoren zu den gewünschten Ergebnissen führt. Die für den üblichen Anwendungsbereich konzipierten Messmikrofone haben einen Frequenzgang, der unterhalb von 100 Hz oder spätestens bei 20 Hz steil abfällt. Um im Infraschallbereich messen zu können, bedarf es daher speziellen Wandlerarten, die durch geeignete Maßnahmen den Frequenzgang nach unten erweitern. Grundsätzlich bietet die Auswertung von Kapazitätsänderungen durch den Schalldruck die Möglichkeit bis hin zum Frequenznullpunkt zu gelangen. Mit Hilfe eines definierten Zugangs zur Rückseite der Membran wird mit dieser technisch-mechanischen Konstruktionsweise das untere Ende des Übertragungsbereichs bis auf wenige hundertstel Hertz erweitert (vgl. [Möser 2010], Kap. 1.4.1.2).

Demnach besteht messtechnisch die Möglichkeit Infraschall ähnlich zu erfassen wie mittel- und hochfrequente Geräusche. Üblicherweise wird die Leistungsfähigkeit eines Mikrofones und damit dessen Einsatzbereich über den Frequenzgang ausgedrückt. Dieser beginnt bei handelsüblichen $\frac{3}{4}$ " Kondensatormikrofonkapseln der eichfähigen Klasse 1 Schallpegelmesser meist oberhalb von 3,5 Hz. Für die in der vorliegenden messtechnischen Untersuchung eingesetzten Mikrofone wurden mit speziellen $\frac{1}{2}$ " Kondensatormikrofonkapseln ausgestattet, die eine Messung im Frequenzbereich bis 0,5 Hz erlauben. Nachfolgende Abbildung zeigt den herstellerseitig angegebenen Frequenzgang eines der verwendeten Mikrofone:

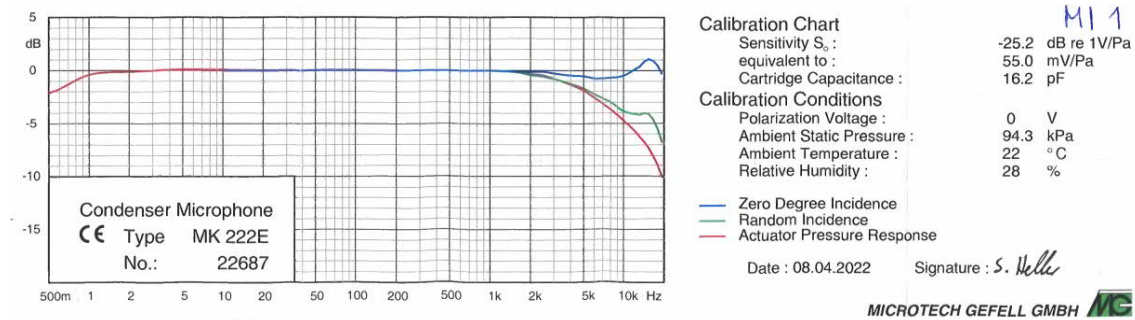


Abbildung 12: Frequenzgang des verwendeten Infraschallmikrofon MK222E des Hersteller Microtech GEFELL

Zusätzlich sind bei Schallmessungen unter Freifeldbedingungen weitere spezifische Anforderungen zu beachten. Der Anhang A der [DIN 45645-1] macht indes Hinweise auf windinduzierte Schallpegel an einem $\frac{1}{2}$ " Mikrofon mit Schaumstoff-Windschirm. Anhand des dort aufgezeigten Graphen wird verdeutlicht, dass bei Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s sogenannter „Pseudoschall“ am Messmikrofon induziert wird und Messungen bei höheren Windgeschwindigkeiten zu nicht plausiblen Messergebnissen führen können. Da dieser Punkt insbesondere auch bei anderen Messverfahren, wie beispielsweise nach der [DIN EN 61400-11] bei Schallmessverfahren für Windenergieanlagen angesprochen wird, sollten neben der Verwendung eines Mikrofonschirms bei der Messung von Infraschallpegel im Außenbereich die Wetterdaten zwingend mit aufgezeichnet werden.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass für Messungen von Infraschall derzeit noch keine spezielle Norm zur Klassifizierung von Messgeräten existiert. Vor diesem Hintergrund sind bei solchen Messungen die Reproduzierbarkeit, aber auch die zu verwendende Messtechnik auf den Speziellen Einsatz auszulegen.

Da die vorliegende Arbeit sich mit der Messung von sehr ruhigen Pegeln beschäftigt, wurde die Empfindlichkeit der Messkette in einer sogenannten Druckkammermessung bestimmt. Dies ist notwendig, um die Messdaten zu plausibilisieren und nicht an der Rauschgrenze der speziellen Infraschall-Mikrofone zu messen. Nachfolgende Abbildung zeigt die Druckkammermessung und das Eigenrauschen des Messsystems:

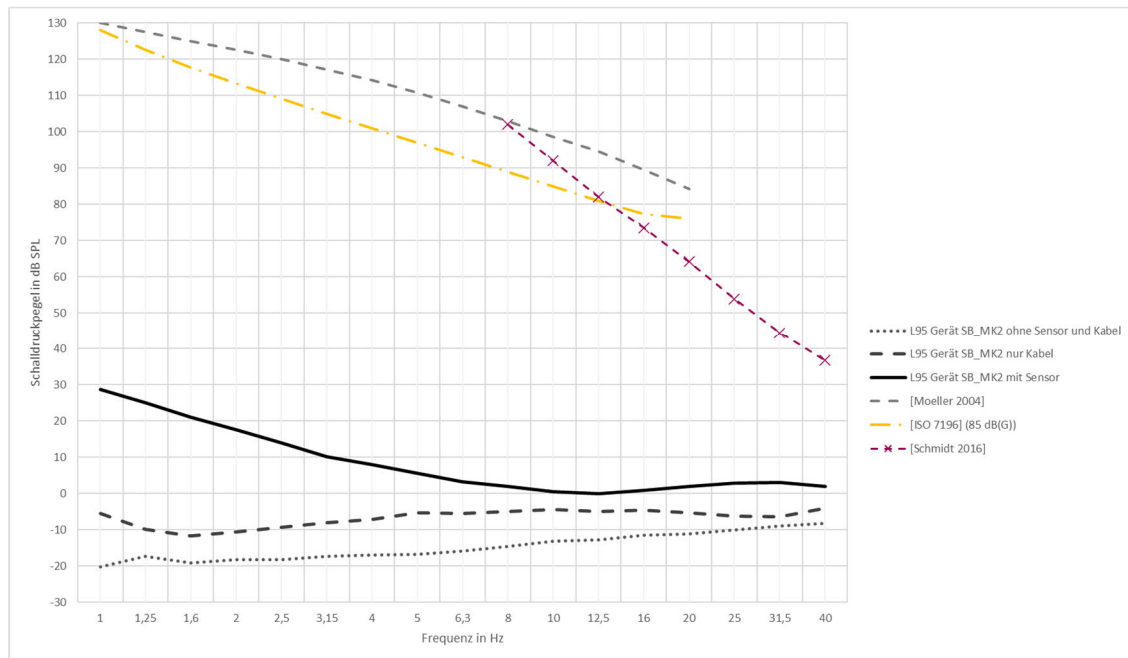


Abbildung 13: Ergebnisse der Druckkammermessung der verwendeten Messkette im Vergleich zu Wahrnehmungsschwellen aus der Literatur (eigene Darstellung)

Eine alternative Messtechnik im Infraschallbereich bildet die sogenannte mikrobarometrische Messtechnik. Die Funktionsweise eines Mikrobarometers basiert auf der Erfassung von sehr langsamen Druckveränderungen in der Atmosphäre. Mikrobarometer besitzen eine Überströmöffnung, welche vor Überlastung durch meteorologische Schwankungen des Luftdrucks schützt. Mittels sternförmig ausgelegter schlauchförmigen Kapillarrohren können mehrere Messpunkte kombiniert werden, um durch Druckausgleich im Kapillarsystem Feldinkohärenzen zu kompensieren. Es ist nicht bekannt, ob ein Mensch nur auf einen bestimmten soz. gefilterten Teil des Infraschalls reagiert. Mikrobarometer werden vor allem zur Ortung von Infraschallereignissen in weiter Entfernung, wie Atomwaffentests, verwendet. Mit Hilfe eines Mikrobarometers können allerdings nur Schallereignisse mit einer Frequenz bis maximal 30 Hz gemessen werden, sodass der Einsatz von Mikrobarometern für ganzheitliche immissionsschutzfachliche Fragestellungen ungeeignet scheint.

3.3.2 Bewertungsverfahren

Ein normiertes Beurteilungsverfahren für Infraschallimmissionen existiert derzeit noch nicht. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, gibt es auf dem Gebiet der Infraschallforschung noch zu klärende Fragen.

Nach der ISO 7196 können Infraschallpegel mit der dort eingeführten G-Bewertung gewichtet bzw. bewertet werden. Die G-Bewertung ist so definiert, dass Sie bei 10 Hz eine

Verstärkung von 0 dB hat, d.h. der G-bewertete Schalldruckpegel eines reinen Tons bei 10 Hz ist gleich dem unbewerteten Schalldruckpegel. Zwischen 1 Hz und 20 Hz nähert sich die Kurve einer Geraden mit einer Steigung von 12 dB pro Oktave an. Laut der ISO 7196 soll auf diese Weise jede Frequenz gemäß ihrem relativen Beitrag zu Wahrnehmung gewichtet werden. In der Praxis wird die G-Bewertung beispielsweise zur Definition von Störfestigkeiten von schwingungssensiblen Geräten angewendet. Pegel im Hörschallbereich haben praktisch keinen Einfluss auf den G-bewerteten Pegel. Daher scheint der G-bewertete Pegel nur in Verbindung mit anderen Schallpegeln zur Beschreibung von Geräuschen sinnvoll. Aus immissionsschutzfachlicher Sicht wird bisher in Deutschland die G-Bewertung in keinem praktischen Einsatzfall genutzt, da das Verfahren der DIN 45680 mit Terzbändern deutlich differenzierte Betrachtungen ermöglicht. Nachfolgende Abbildung zeigt die G-Bewertung im Vergleich zu anderen Frequenzbewertungskurven:

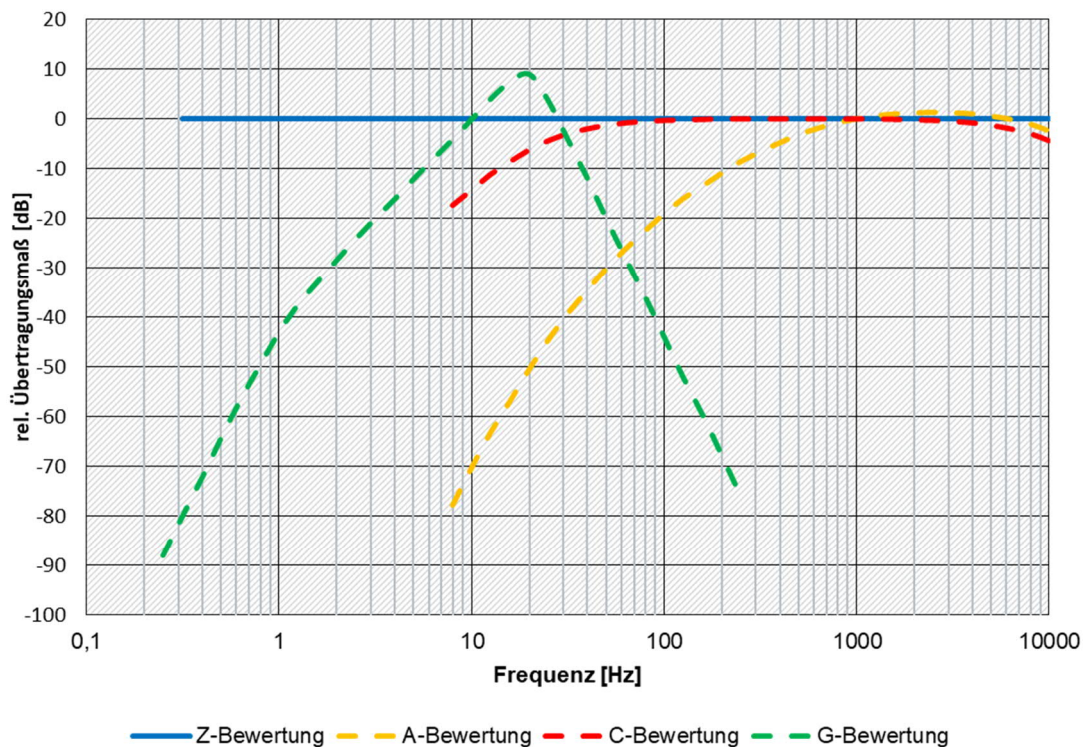


Abbildung 14: Frequenzbewertungskurven (eigene Darstellung)

Die C-Bewertung entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 80–90 phon und ist damit primär für die Beurteilung höherer Schalldruckpegel geeignet (z. B. im Arbeitsschutz, Schießlärm). In der TA Lärm und der DIN 45680 wird die Differenz von C-bewertetem Schalldruckpegel und A-bewertetem Schalldruckpegel ($LC - LA$) als Indikator für das Vorliegen von ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen verwendet. Dies ist

möglich, weil sich die beiden Bewertungskurven insbesondere im Frequenzbereich unter 200 Hz deutlich unterscheiden (siehe Abbildung 14).

Die A-Bewertung ist ein frequenzabhängiges Filter, das sich näherungsweise an der menschlichen Hörempfindung für Geräusche unterschiedlicher Frequenz orientiert. Sie entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 20 - 40 phon und ist damit primär für die Beurteilung niedriger Schalldruckpegel geeignet (z. B. im Umweltschutz).

Aufgrund der vorangegangenen Literaturrecherche und den daraus gewonnenen Erkenntnissen zur Hör- und Fühlbarkeitsschwelle ist es daher sinnvoll zur Beschreibung von noch unbekanntem Quellexpositionen den Z-bewerteten Pegel heranzuziehen. Mittels diesem ist ein direkter Vergleich aus den vorangegangenen Untersuchungen zur Hörbarkeit von Infraschall möglich. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Pegelgrößen werden deshalb als Z-bewertete Pegel dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine unbewertete Darstellung des physikalisch gemessenen Schalldrucks. Die Z-Bewertung kann auch als lineare Bewertung bezeichnet werden. Im tieffrequenten Bereich respektive dem Infraschallbereich zeigt die lineare Bewertung im Vergleich zum Hörschallbereich deutlich größere Schalldruckpegel. Denkbar wäre, dass bei Vorliegen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse eine neue Bewertungskurve für Infraschallpegel entwickelt wird.

4 Ergebnisteil

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur Bearbeitung der Aufgabenstellung und dokumentiert die ermittelten Ergebnisse, sowie die Lösung von aufgetretenen Problemen. Neben der Vorstellung der methodologischen Vorgehensweise werden die einzelnen Feldstudien vorgestellt und das Vorgehen bei der Auswertung erläutert. Am Ende erfolgt eine abschließende Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse.

4.1 Methodologisches Vorgehen

Um die in Kapitel 2 vorgestellte Forschungsfrage zu untersuchen, wurden drei Messkampagnen als Feldstudien durchgeführt. Im Folgenden soll das Vorgehen zu diesen drei Messkampagnen kurz erläutert werden.

Da natürlicher Infraschall ständig vorherrscht, jedoch auch von Wetterereignissen beeinflusst wird (vgl. Kap. 3.2.1), stand zu Beginn der Feldstudie die Ermittlung von Wetterphänomenen auf den Infraschallgrundpegel im Raum. Daher wurde ein geeigneter Messpunkt für eine Langzeitmessung für einen Zeitraum von mindestens zwei Wochen gesucht, um den Wettereinfluss zu erfassen. Gleichzeitig wurde ein Mikrofon innerhalb eines Gebäudes platziert, um den Wettereinfluss nicht zu gewichten. Es erfolgte ein Messaufbau mit zwei Mikrofonen. Dabei wurde ein Mikrofon außerhalb und ein Mikrofon innerhalb eines Wohngebäudes über einen Zeitraum von zwei Wochen aufgebaut und betrieben.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Langzeitmessung wurden anschließend Messbedingungen und Kriterien erarbeitet, um eine messtechnische Querschnittserhebung an unterschiedlichen Standorten innerhalb des Hoheitsgebiets von Deutschland durchzuführen. Dabei lag das Augenmerk darauf an unbelasteten, also möglichst unbeeinflusst von anthropogenen Infraschallquellen, wie Windenergieanlagen, Kraftwerken oder Verkehrswegen, zu messen.

Nach erfolgter Auswertung dieser Querschnittserhebung wurde mit derselben Messtechnik ein Kontrollversuch durchgeführt. Hierbei wurde an einem Außenmikrofon ein Sekundärluftschallschirm in einem eigens hergestellten Design im Vergleich zu dem in der Messkampagne verwendeten Luftschallschirm im Außenbereich aufgestellt. Zum einen soll der Kontrollversuch die bisher gewonnen Erkenntnisse prüfen, einen Vergleich zwischen den beiden Mikrofonaufsätzen aufzeigen und zum anderen einen Vorschlag zur

Verwendung zukünftiger Messungen im Freifeld für Infraschall darbieten. Mit dieser Methodik sollte die Forschungsfrage nach einer Querschnittsbelastung durch Infraschall als Alltagserscheinung geklärt werden.

4.2 Messtechnik und Messdaten

Zur Erfassung der Messdaten wurden zwei Messmikrofone des Typs MK222E der Firma Microtech Gefell verwendet. Die Mikrofone entsprechen der Genauigkeitsklasse 1 nach IEC 61672. Die Datenaufzeichnung wurde mit Hilfe eines geeichten Soundbook MK2 der Firma Sinus Messtechnik GmbH ermöglicht. Die Messkette ist Bestandteil des unter D-PL-19432-01-00 nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) akkreditierten Prüflaboratoriums der Möhler + Partner Ingenieure AG, wobei sich die DKD-Rückführung nicht auf den Infraschallbereich bezieht. In diesem Rahmen werden die Messgeräte regelmäßig überwacht und auf nationale Normale zurückgeführt. Zusätzlich wurde zur Erfassung von Wetterdaten ein 3D-Anemometer der Firma Thies Clima GmbH & Co. KG bei allen Messversuchen in unmittelbarer Nähe zum Mikrofon verwendet. Mit Hilfe der beschriebenen Messkette wurden bei allen durchgeführten Messungen folgende Daten kontinuierlich und zeitsynchron aufgezeichnet:

- Kontinuierliche schmalbandige FFT-Spektren, Pegel-Zeitverläufe, L_{Zeq} -Spektren, Terzspektren, Audiodateien
- Meteorologische Daten: Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Regen, relative Luftfeuchte, Luftdruck und Temperatur

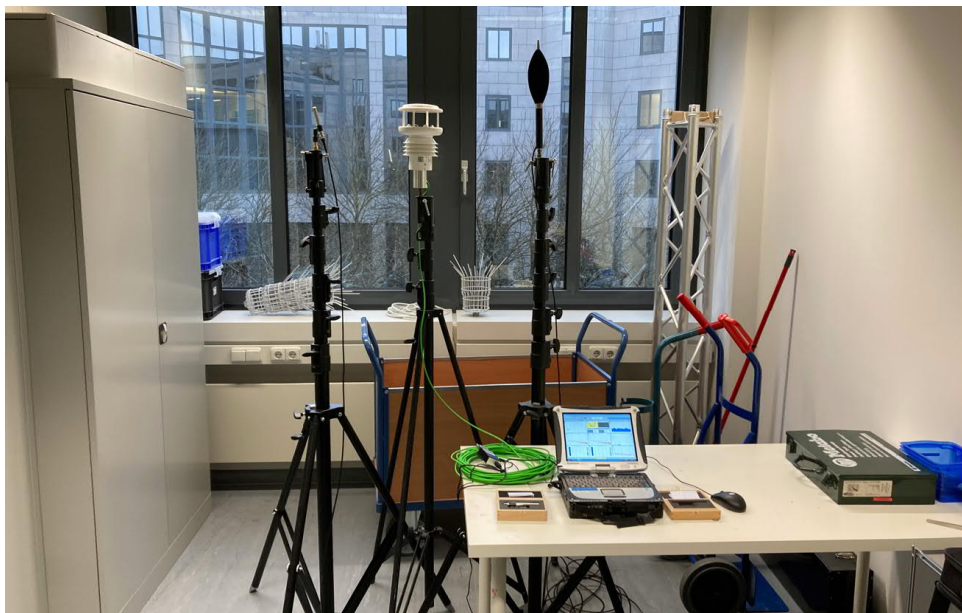


Abbildung 15: Messtechnikaufbau im Labor

4.3 Langzeitmessung

4.3.1 Versuchsort und Versuchsaufbau

Auf Basis von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes wurde sich dazu entschlossen die Durchführung der Langzeitmessung im Norddeutschen Raum zu machen. Zur Vermeidung von möglichen Störeinflüssen (z.B. Umgebungsgeräusch, Straßenverkehr etc.) wurde eine ländliche Gegend ausgewählt. Um eine möglichst „normale“ Wohnsituation bereits in der Langzeitmessung aufzunehmen, wurde ein geeignetes Gebäude in Luhdorf bei Winsen in Niedersachsen verwendet. Das Gebäude wurde zum Zeitpunkt der Messung als Wohngebäude genutzt. Potenzielle Infraschallquellen wurden im Vorfeld der Langzeitmessung identifiziert und auf einen ausreichend großen Abstand zum Messort untersucht. Das verwendete Gebäude wurde im Jahr 1958 gebaut. Der Wandaufbau der Außenfassade wurde anhand des Baujahrs und nach Rücksprache mit dem Eigentümer wie folgt beschrieben:

- 11,5 cm Klinker, 3-4 cm Luftraum, 24 cm Tragende-Ziegel-Mauerwerkswand

Der vorgefundene Raum war ein Wohnzimmer mit Esszimmer und hatte eine Breite von 3,7m und eine Länge von 7,4m. Die Deckenhöhe wurde mit 2,5m ausgemessen. In Kapitel 3.2.1 wurde erläutert, dass sich in der Regel keine Wellenfelder in typischen Wohnräumen aufgrund der großen Wellenlängen im Infraschallbereich ausbilden. Um diese These auf den vorliegenden Fall zu überprüfen, wurden daher für den vorgefundenen Raum, in welchem die Langzeitmessung stattgefunden hat, die Raummoden berechnet. Die Berechnung von obliquen Raum-Moden erfolgt nach Gleichung 4.2.1.1. (vgl. [Everest 2009] Kap. 13):

$$f_{(n_x, n_y, n_z)} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (4.2.1.1)$$

Bei einer Gesamtlänge von $l_x = 7,4\text{m}$ besitzt der Raum nach Formel 4.2.1.1 seine erste Raummode bei einer Frequenz von $f_{(1-0-0)} = 23,2\text{ Hz}$, sodass folglich keine stehenden Wellen im Infraschallbereich zu erwarten waren.

Die Messungen fanden im Zeitraum 08.08.2022-25.08.2022 statt. Während der Messungen wurde das Gebäude nicht bewohnt, sodass Fremdgeräuscheinwirkungen durch Personen innerhalb des Hauses ausgeschlossen werden konnten. Es wurde ein Messmikrofon vom Typ MK222 in Raummitte innerhalb des Gebäudes aufgestellt. Außerhalb des Gebäudes wurde ein gleiches Messmikrofon mit Wetterschutzeinrichtung platziert. Das Stativ wurde in einem Abstand von 5m zur Hausfassade und in einer Höhe

von $h = 4\text{m}$ aufgestellt. Zirka einen halben Meter unterhalb des Mikrofons wurde das 3D-Anemometer zur Erfassung aller Wetterparameter am Stativ fixiert.

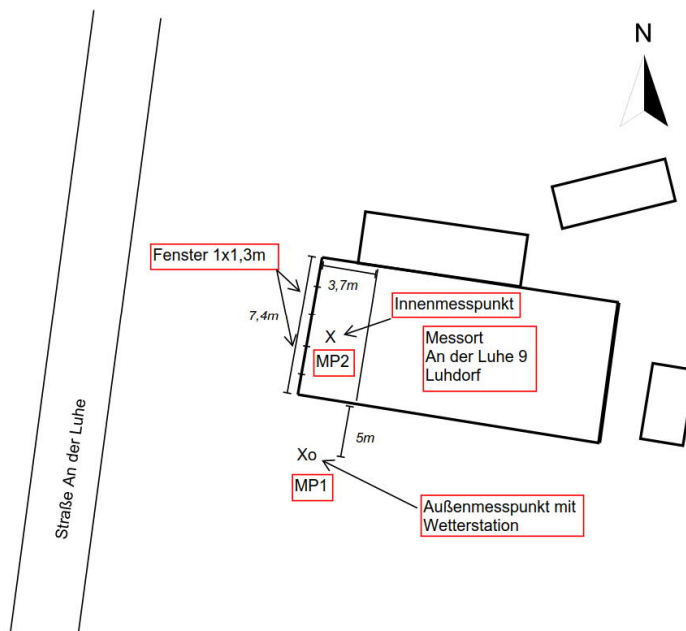


Abbildung 16: Links: Außenmesspunkt, Rechts: Innenmesspunkt, unten: Schematischer Messaufbau

4.3.2 Messergebnisse und Auswertung

Um eine möglichst große Bandbreite an Informationen aus den Messdaten der Langzeitmessung zu generieren, wurden verschiedene Auswertungen und Abhängigkeiten der aufgenommenen Daten analysiert. Im Vordergrund der Analyse stand zum einen der Einfluss von meteorologischen Ereignissen an den Messpunkten und zum anderen wie sich der Infraschall innerhalb eines Gebäudes und damit im Wohnumfeld verhält. Für die Auswertung der Schallmessdaten wurden 1-Minuten- und 10 Minuten-Mittelwerte verwendet. Diese Mittelwerte wurden anschließend mit den Wetterdaten in Verhältnis gesetzt. Abbildung 17 zeigt die meteorologischen Daten aus der Langzeitmessung am Außenmesspunkt. Dargestellt sind der Luftdruck in hPa, die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent, die Temperatur in Grad Celsius und die mittlere Windgeschwindigkeit in m/s als 1-Minuten-Mittelwerte über den Zeitraum der Messung. Grundsätzlich haben an beinahe allen Messtagen ähnliche Wetterbedingungen geherrscht, sodass die Wetterbedingungen zur Erhebung als günstig einzustufen sind. Die Temperatur und die vorherrschende Windgeschwindigkeit stehen in Zusammenhang. Mit Fallen der Temperatur im Nachtzeitraum sinken die Windgeschwindigkeiten ebenfalls. Die Luftfeuchtigkeit bewegte sich dabei in entgegengesetzter Richtung. Im Nachtzeitraum ist die relative Luftfeuchtigkeit angestiegen.

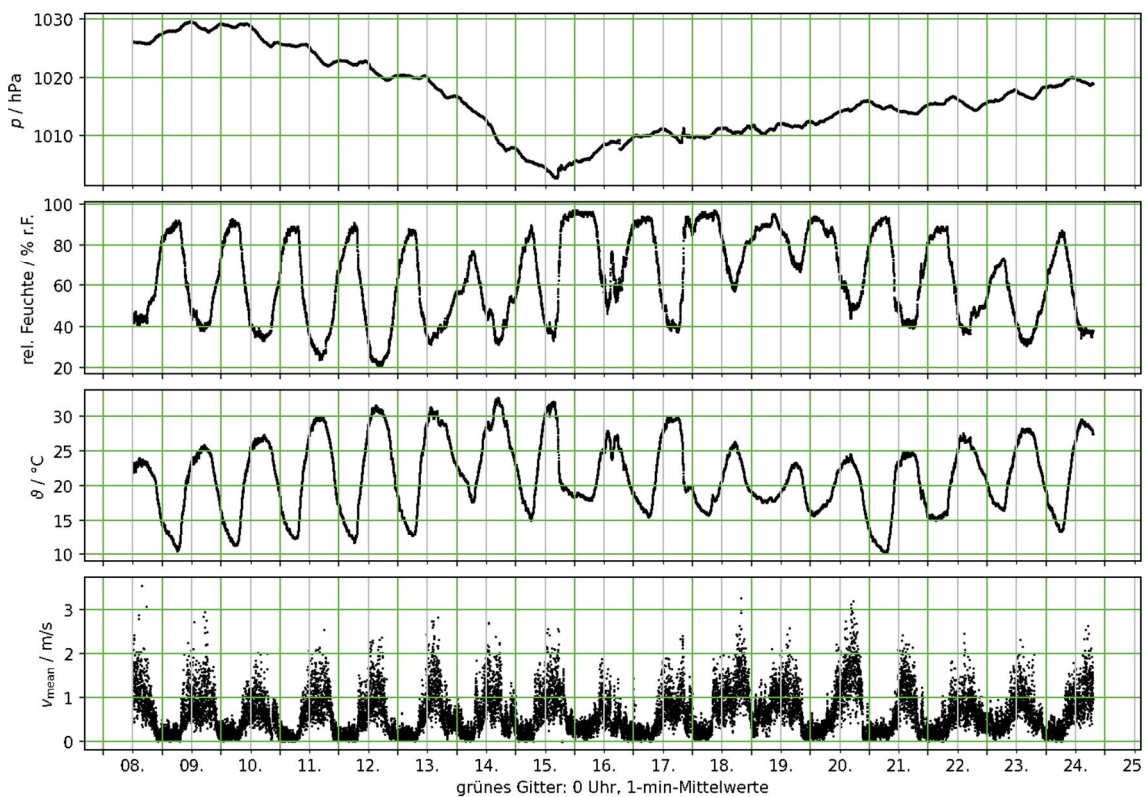


Abbildung 17: Meteorologische Daten der Langzeitmessung

Bewertung der gemessenen Daten

Zur Bewertung der gemessenen Daten wurde das L_{Zeq} -Spektrum über den gesamten Zeitraum herangezogen. Hierbei zeigt sich, dass grundsätzlich ruhige Verhältnisse am Messort vorherrschten. Tabelle 2 und Abbildung 18 zeigen die Einzahlwerte und die Pegelzeitverläufe des unbewerteten L_{Zeq} und der bewerteten L_{Geq} , L_{Ceq} und L_{Aeq} Pegelzeitverläufe.

Tabelle 2: Einzahlwerte Langzeitmessung

Messung	L_{Zeq} in dB(Z)	L_{Zeq} (1-16Hz) in dB(Z)	L_{Zeq} (20-100Hz) in dB(Z)	L_{Geq} in dB(G)	L_{Ceq} in dB(C)	L_{Aeq} in dB(A)
K1 (Außen).	75,3	75,2	56,5	61,7	59,9	48,0
K2 (Innen)	59,1	58,9	45,5	55,7	51,3	36,7

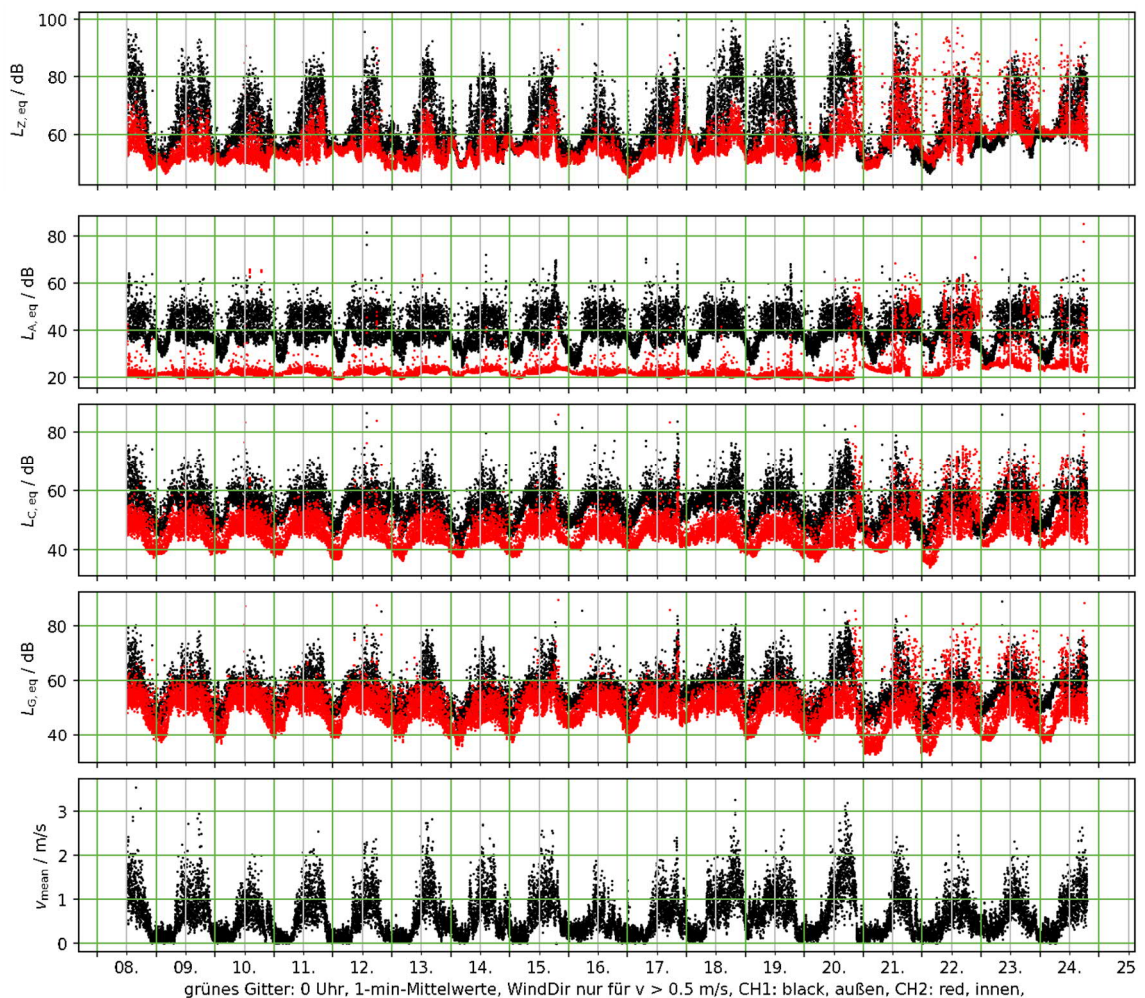


Abbildung 18: L_{Zeq} , L_{Geq} , L_{Ceq} und L_{Aeq} und die Windgeschwindigkeit Langzeitmessung

Anhand der Einzahlwerte und dem Pegelzeitverläufen wird ersichtlich, dass es im Messzeitraum zu keinen Auffälligkeiten im Umfeld der Messung gekommen ist. Lediglich ab dem 20.08. sind unterschiedliche Pegel bei Kanal 2 festzustellen. Dies ist auf die Wiederbenutzung des Gebäudes zurückzuführen. In den Tagen davor waren keine Personen in den Räumen anwesend. Für die weitere Auswertung werden die letzten vier Messtage nicht herangezogen. Weiterhin zeigen die Einzahlwerte keinen Hinweis auf das Vorhandensein einer unentdeckten anthropogenen Quelle. Der L_{Aeq} mit einem Pegelwert von $L_{p(A)} = 48,0 \text{ dB(A)}$ am Außenmikrofon gibt einen gewichtigen Hinweis, dass es sich im gesamten Messumfeld um eine ruhige Gegend mit einer geringen Geräuschvorbelastung handelt.

Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, wird im Immissionsschutz die Differenz von L_{Ceq} - L_{Aeq} als Indikator für das Vorhandensein von tieffrequenten Geräuschen herangezogen. Nach dem Wortlaut der Norm wird erst dann eine Terzanalyse erforderlich, wenn die Differenz zwischen L_{Ceq} und L_{Aeq} größer 20 dB ist. Im vorliegenden Fall liegt der Differenzpegel am Außenmesspunkt bei $\Delta L_1 = 11,9 \text{ dB}$ und am Innenmesspunkt bei $\Delta L_2 = 14,6 \text{ dB}$. Einzel hervortretende Töne sind auch anhand der Terzmittenfrequenzen im Infraschallbereich nicht erkennbar:

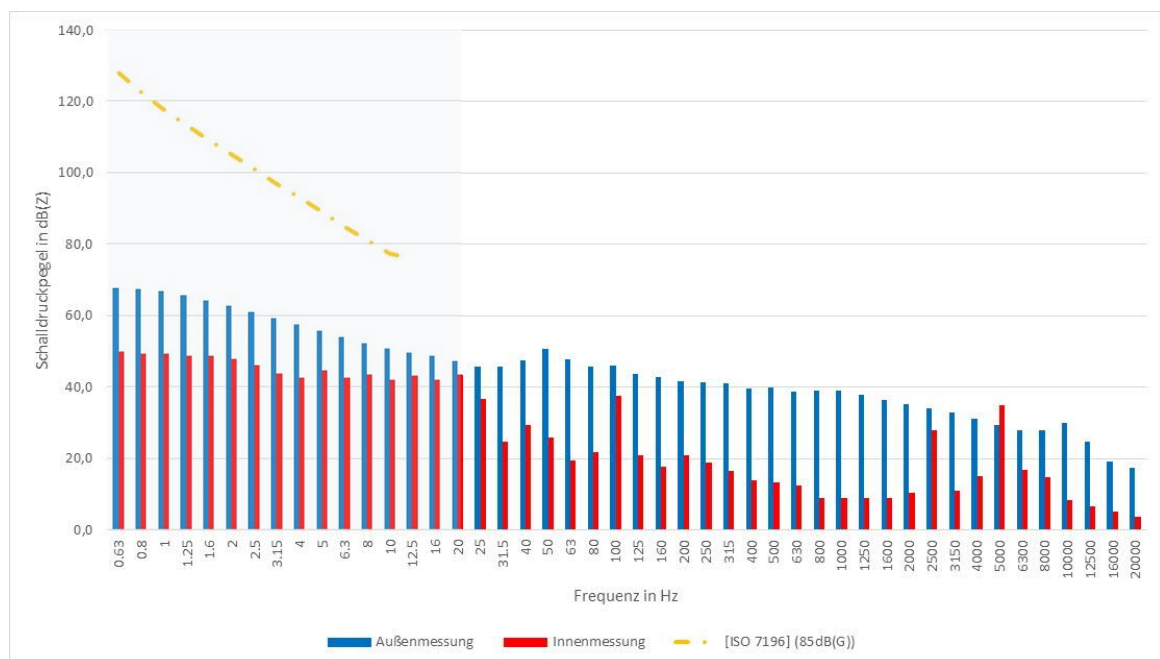


Abbildung 19: Terzmittenfrequenzen des L_{Zeq} Außen (blau) und Innen (rot)

Eine erste Einschätzung der Beurteilungstärke der gemessenen Pegel im Infraschallbereich zeigt der G-bewertete Beurteilungspegel von $L_{Geq} = 61,7 \text{ dB(G)}$ am Außenmesspunkt und $L_{Geq} = 55,7 \text{ dB(G)}$. Deutlich erkennbar aus Abbildung 19 ist, dass der unbewertete L_{Zeq} an beiden Messpunkten weit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle

nach [Jakobsen 2001] im Infraschallbereich liegt. Anhand der oben beschriebenen Zusammenhänge zeigt sich, dass es sich bei der vorliegenden Messung um gewöhnlichen Infraschall handeln muss.

In Abbildung 19 wurde als unterster Graph die Windgeschwindigkeit im Messzeitraum dargestellt. Ein Vergleich der anderen Wetterparameter aus Abbildung 16 verdeutlicht, dass ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Pegeln und der gemessenen Windgeschwindigkeit bestehen muss. Vor diesem Hintergrund werden die weiteren Untersuchungen der Langzeitmessung im Hinblick auf die vorherrschende Windgeschwindigkeit ausgelegt.

Beschreibung und Vergleich der Terzfrequenzen von 0,5 Hz bis 40 Hz am Außen- und Innenmesspunkt in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Nachfolgende Abbildung zeigt die 1-Minuten-Pegelwerte (L_{Zeq} in dB(Z)) aufgetragen über die Windgeschwindigkeit im Intervall von 0 bis 2 m/s je Terzfrequenz von 0,5 Hz bis 4 Hz am Außen- und Innenmesspunkt. Höhere Windgeschwindigkeiten wurden nicht gemessen oder konnten aufgrund zu geringer Datenmengen nicht plausibel abgebildet werden:

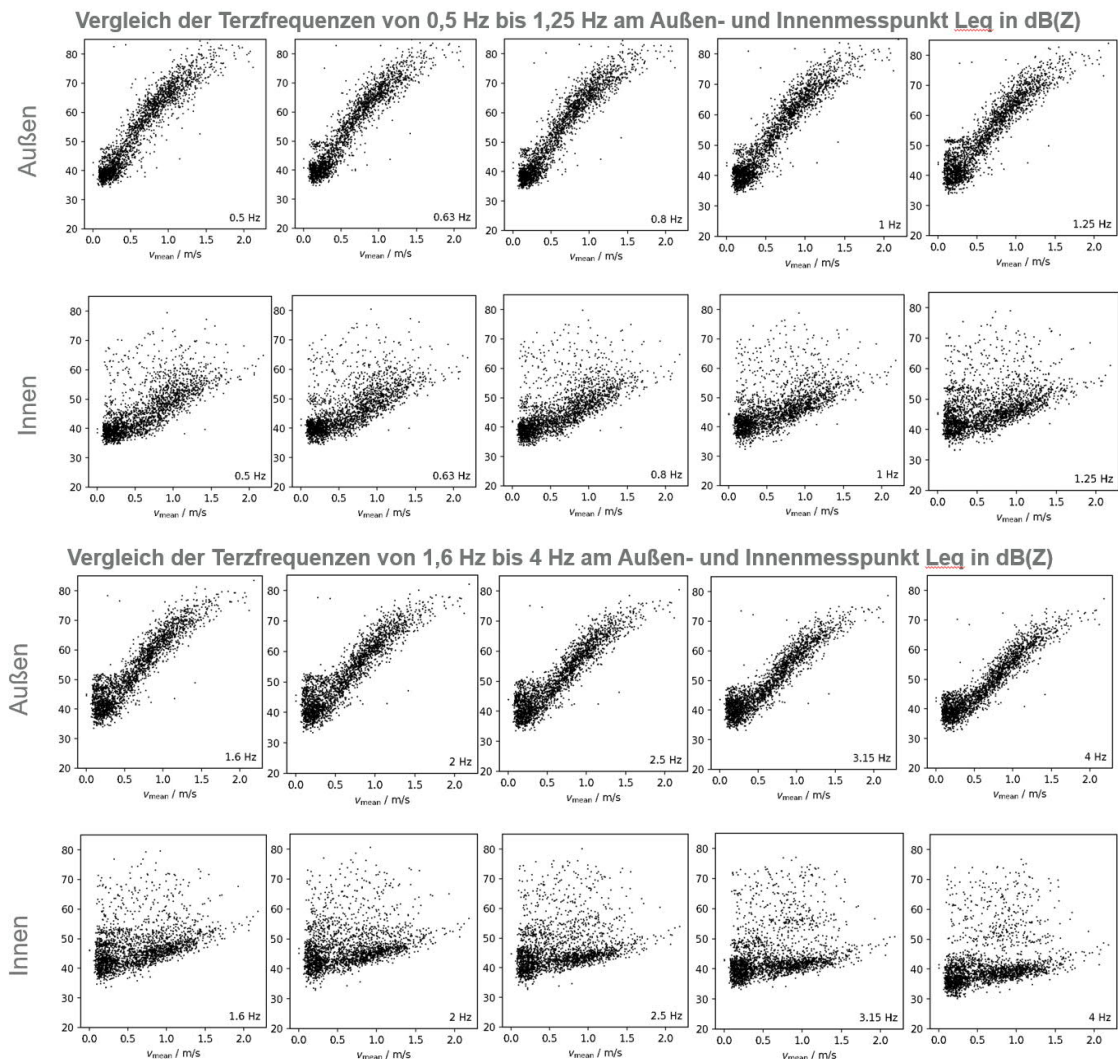


Abbildung 20: Vergleich der Terzfrequenzen im Infrarotbereich von 0,5 Hz- 4 Hz am Außen- und Innenmesspunkt

Aus Abbildung 20 wird ersichtlich, dass am Außenmesspunkt bei Windgeschwindigkeiten von 0,2 m/s bis zirka 2 m/s in den tiefen Frequenzen von 0,5 Hz bis 4 Hz eine starke Korrelation zwischen dem Anstieg der unbewerteten Pegel und dem Anstieg der Windgeschwindigkeit vorherrscht. Es lässt sich auch erkennen, dass eine Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten und dem Pegel an dem Messpunkt innerhalb des

Gebäudes, also ohne direkten Windeinfluss, in den Frequenzbereichen von 0,5 Hz bis 1,6 Hz besteht. Dieser Anstieg beginnt sich erst bei der Terzmittenfrequenz von 2 Hz einem linearen Verlauf anzupassen. Werden ausschließlich die Bereiche betrachtet, bei denen kaum bis keine Windgeschwindigkeiten am Außenmesspunkt vorherrschten (0,2 m/s bis 0,5 m/s) zeigt sich zudem, dass die Pegelwerte in den Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 3,15 Hz beinahe identisch bleiben, sodass es scheint das keine Dämpfungseffekte durch das Gebäudes in diesen sehr tiefen Frequenzen auftreten.

In nachfolgender Abbildung sind nun die Terzmittenfrequenzen von 5 bis 40 Hz aufgetragen:

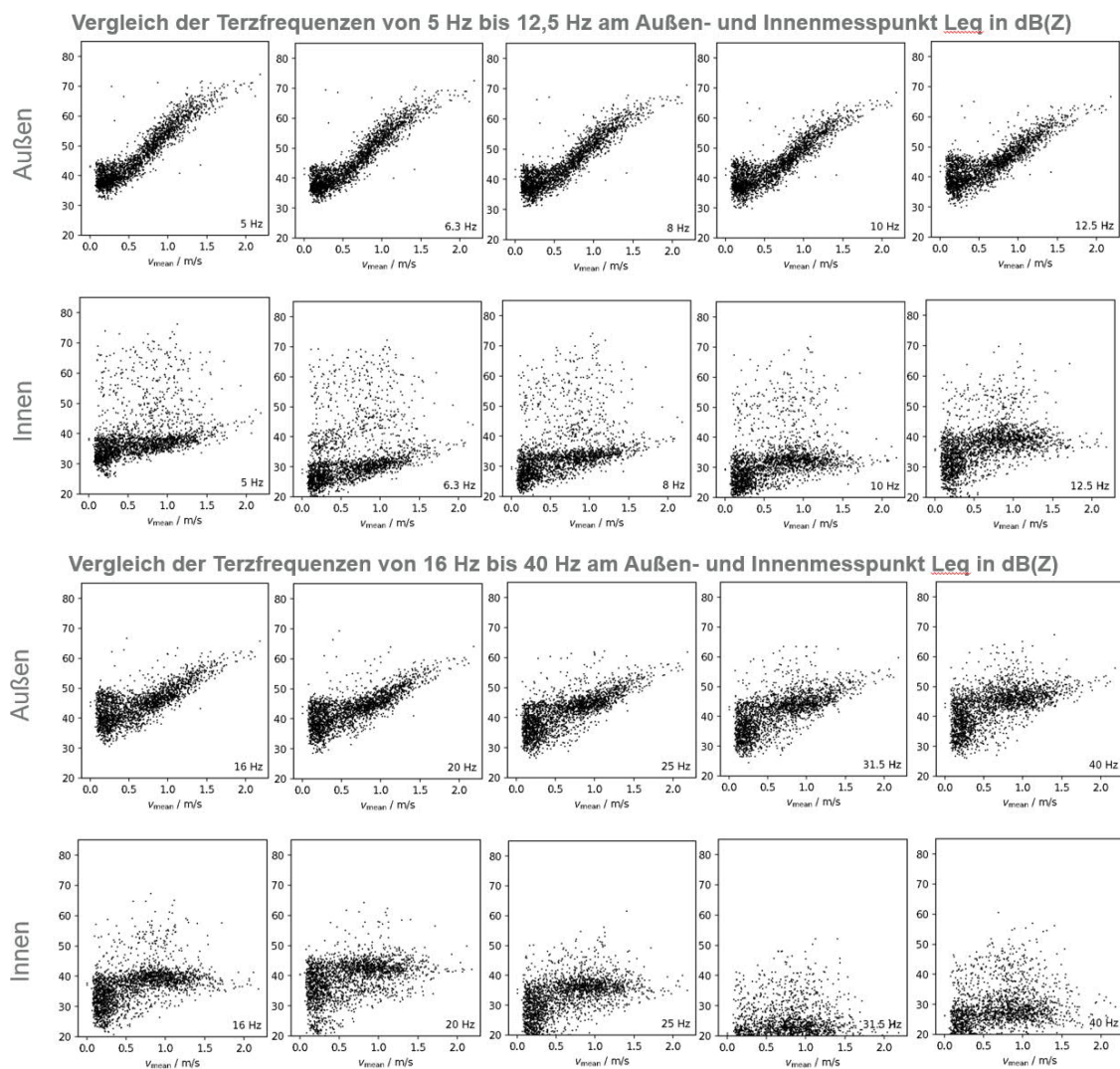


Abbildung 21: Vergleich der Terzfrequenzen im Infrasschallbereich von 5 Hz- 40 Hz am Außen- und Innenmesspunkt

Die voran beschriebene Korrelation in den sehr tiefen Terzmittenfrequenzen von 0,5 bis 4 Hz ist weiterführend auch in Abbildung 21 deutlich erkennbar. Ein Abflachen der Pegel in Darstellung einer Punktwolke am Außenmesspunkt zeigt sich erst bei 12,5 Hz.

Ab 20 Hz beginnt auch der Windeinfluss am Außenmikrofon sich auf einen gleichbleibenden Pegelwert einzustellen. Nach der [DIN 45645-1] Anhang A treten windinduzierte Schallpegel an einem 1/2" Mikrofon mit Schaumstoff-Windschirm erst bei zirka 2,5 m/s auf. Allerdings wird hier die Windgeschwindigkeit über dem A-bewerteten Schalldruckpegel L_{pA} aufgetragen. Die Vermutung liegt nun nahe, dass am Mikrofon windinduzierter Schall bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten gemessen wird. Die Messung zeigt aber auch, dass selbst im windstillen Szenario (Messpunkt innerhalb des Hauses) eine leichte Korrelation zwischen dem Infraschallhintergrundpegel und der Windgeschwindigkeiten detektiert wurde. Grundsätzlich zeigt diese Langzeitmessung eine repräsentative Darstellung des Infraschallhintergrundrauschens in einem Wohnumfeld, sodass zunächst davon ausgegangen wird, dass diese Pegel repräsentativ sowohl innerhalb als auch außerhalb von Wohngebäuden den Menschen umgeben und vorherrschen.

Statistische Auswertung und Bildung von Quantilen für die weitere Analyse

Um die Messdaten aus der nachfolgenden Querschnitterhebung mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Langzeitmessung zu vergleichen, wurde der Median der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 40 Hz vom Außenmesspunkt der Langzeitmessung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit gebildet. Zusätzlich wurden 4 Quantils-Bereiche ermittelt.

Zunächst wurden daher auf der Zeitachse die 1-min -Maximal- und Durchschnittswerte für die Windgeschwindigkeit und die Terzpegel abgebildet. Anschließend wurde die Windgeschwindigkeit in Intervalle mit einer Breite von 0,2 m/s diskretisiert. Für diese Intervalle wurden dann Quantile ermittelt. Diese Quantile sind in der Mitte des jeweiligen Windintervalls dargestellt und verbunden. In Abbildung 22 und Anlage Teil 2 wird die grafische Darstellung dieser Werte aufgezeigt. Dabei stellen die grauen Striche die Minimal und Maximal-Pegel, die schwarze Linie den Median und die roten Linien das 25% und 75% Quantil dar. Die hellgrauen Linien beschreiben die 5% und 95% Quantile. Liegen weniger als 50 Werte in einem Intervall vor, sind die Linien jeweils heller dargestellt, 5 % und 95 %- Quantil entfallen. Aufgrund einer zu geringen Anzahl an Werten oberhalb von 3 m/s konnte keine vernünftige Quantils-Darstellung ermittelt werden. Daher wird für die grafische Beurteilung nur Werte mit einer maximalen Windgeschwindigkeit von 3 m/s herangezogen.

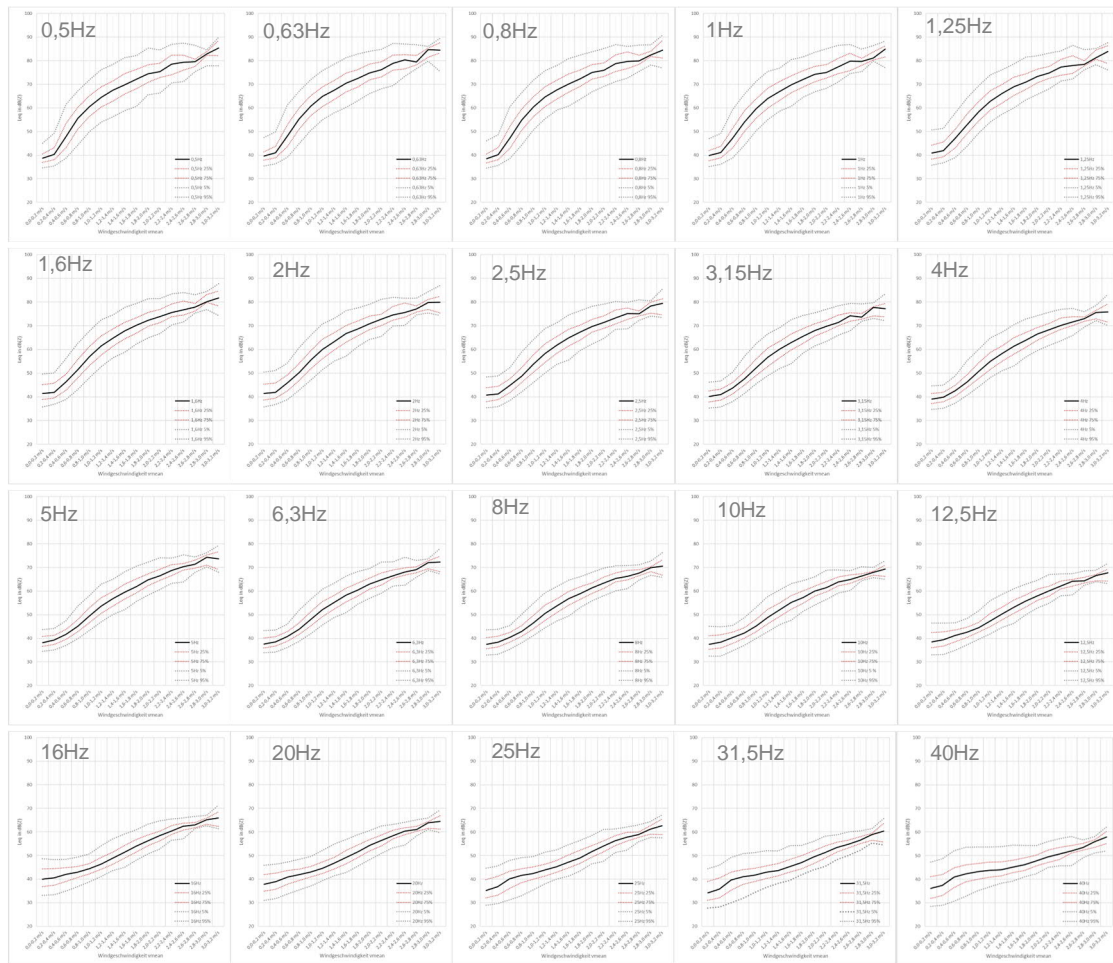


Abbildung 22: Darstellung der Messwerte am Außenmikrofon in den Terzmittenfrequenzen von 0,5Hz-40Hz als Median (schwarz), 25% und 75% Quantile (Rot) und 5% und 95% Quantil (Grau)

Mit Hilfe dieser Darstellungsform sollen die Messungen aus der Querschnittserhebung validiert und plausibilisiert werden. Liegen beispielsweise die 1-Minuten Takte des L_{Zeq} aus einer Messung außerhalb der Quantile aus der Langzeitmessung liefert dies ein Indiz darauf ob an dem spezifischen Messort ein anderes Infraschallgrundpegelniveau vorherrscht oder ob an diesem Messort eine anthropogene Quelle in näherer Umgebung liegt. Diese Messung ist dann detailliert zu bewerten und ggfs. für die weitere Auswertung auszuschließen.

Übertragung außen zu innen

Ein gewichtiger Faktor im Lärmschutz ist der Schallschutz im Hochbau. Das Themengebiet der Bauakustik beschäftigt sich daher mit der messtechnischen und rechnerischen Bestimmung der Schalldämmung von Bauteilen. Die Kenntnis über die schalldämmenden Eigenschaften von Bauteilen ist zum Schutz vor Lärm sowohl bei der Planung als auch in der Praxis unabdingbar. Da sich die Bauakustik hauptsächlich mit dem Hörschall

im Frequenzbereich von 100Hz bis 3150Hz beschäftigt, besteht insbesondere im tieffrequenten Bereich noch wenig Erkenntnis über die Wirksamkeit von Bauteilen zum effektiven Schutz vor tieffrequentem Lärm. Wie in Kapitel 3.2.1 erläutert, erreichen die Wellenlängen im Infraschallbereich im Vergleich zum Hörschallbereich enorm große Ausdehnungen, sodass diese durch Hindernisse weniger gedämpft werden als höherfrequente Schallanteile. In der Bauakustik ist die Schalldämmung R_W oder das Bau-Schalldämmmaß R' das charakterisierende Maß von Bauteileigenschaften. Messtechnisch wird dieses Maß mittels einer Luftschallübertragungsmessung zwischen zwei Räumen oder einer Fassade durch Anregung mit einem breitbandigen Rauschen ermittelt. Bei diesem Verfahren wird in einem Raum das Geräusch mit einem Schalldruckpegel L_{p1} erzeugt und gemessen und im Nachbarraum der Schalldruckpegel L_{p2} ebenfalls gemessen. Hierbei wird die sogenannte Schalldruckpegeldifferenz D ermittelt, die neben der Wirkung des trennenden Bauteils auch die Eigenschaften der flankierenden Bauteile und die Raumeigenschaften enthält (vgl. [Fasold 2003], Kap. 5.1.1.1). Üblicherweise werden zur Schalldruckpegeldifferenz noch die Raumeigenschaften in Form der äquivalenten Schallabsorptionsfläche hinzugezählt, da sich der Schalldruckpegel in einem Raum aufgrund geänderter Eigenschaften verändern kann. Um jedoch an dieser Stelle eine Aussage über die Wirkung eines Gebäudes im Infraschallbereich zu erhalten, werden die Messdaten aus der Langzeitmessung zwischen außen und innen ins Verhältnis gesetzt. Nachfolgende Abbildung zeigt die Median- und Quantilswerte (25%-75%) exemplarisch für acht Terzmittenfrequenzen des Infraschallbereichs in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit. Für eine detaillierte Abbildung wird auf Anlage 2 verwiesen.

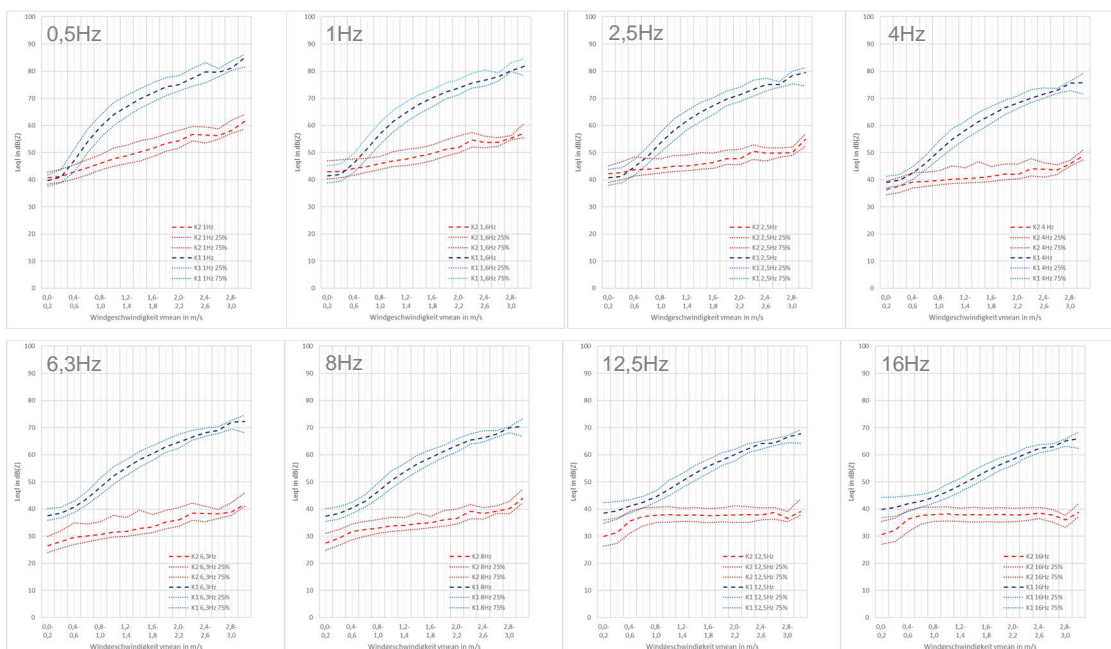


Abbildung 23: Vergleich L_{zeq} -Außen zu L_{zeq} -Innen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Bei Windgeschwindigkeiten von zirka 0 bis 1 m/s treten Überlappungsbereiche der L_{Zeq} Pegel zwischen Außen- und Innenmesspunkt auf. Der Vergleich zwischen dem L_{Zeq} am Außen und Innenmesspunkt zeigt weiterhin, dass bei Windgeschwindigkeiten im diskreditierten Bereich von 0 bis zirka 1 m/s der Einfluss der Windgeschwindigkeit vernachlässigbar ist. Daher wurde die Schalldruckpegeldifferenz ebenfalls aus den in 0,2 m/s Schritten diskreteren L_{Zeq} Pegeln und den 25 bis 75% Quantilsbereichen gebildet. Nachfolgende Abbildung zeigt daher die Übertragung im Infraschallbereich bei dem vorgefundenen Gebäude im diskreditierten Bereich von 0,0 bis 0,2 m/s Wind:

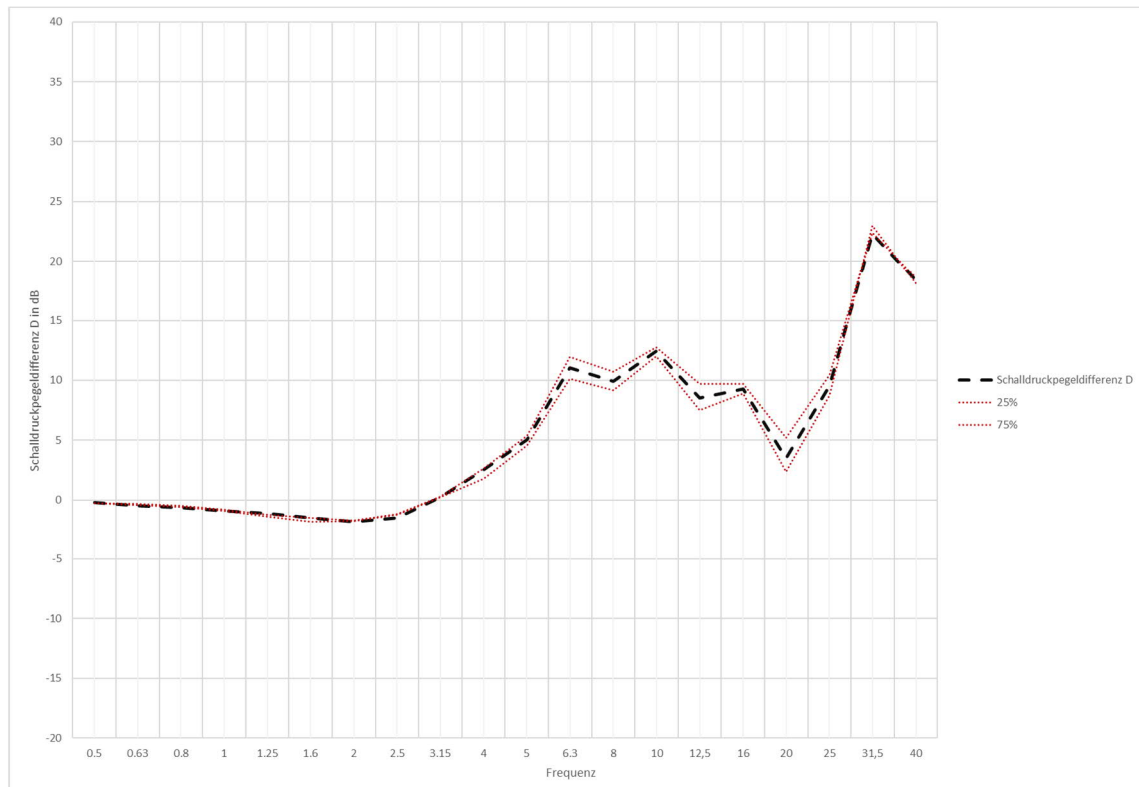


Abbildung 24: Schalldruckpegeldifferenz D gebildet aus dem L_{Zeq} vom Außen- zum Innenmesspunkt bei 0 bis 0,2 m/s Windgeschwindigkeit

Die Schalldruckpegeldifferenz aus den L_{Zeq} -Spektren zeigt das im sehr tiefen Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 4 Hz quasi keine Schalldämmung vorhanden ist. Erst bei der Terzmittenfrequenz von 5 Hz wird eine sehr langsam steigende Dämmwirkung sichtbar. Der Einbruch bei 20 Hz könnte auf die erste Raum-Mode bei $f_0 = 23,2$ Hz zurückzuführen sein. Insgesamt zeigt sich das kaum ein effektiver Schutz gegenüber Infraschall bzw. sehr tiefen Frequenzanteilen in der vorgefundenen Bauweise von Einfamilienhäusern besteht. Vielmehr wird ersichtlich, dass Infraschall kaum bedämpft innerhalb von Gebäuden auftritt.

4.4 Querschnittserhebung

4.4.1 Anforderungen und Umsetzung der Messkampagne

Auf Basis der Langzeitmessung wurde eine Messkampagne zur Erhebung des alltäglichen Infraschallgrundpegels in verschiedenen repräsentativen Gebieten in Deutschland geplant und durchgeführt. Um der Messkampagne einen quantitativen Charakter zu geben, wurden je Ort einstündige Messungen veranschlagt.

Dabei standen unterschiedliche Anforderungen zu Beginn der Planung im Raum. Hierbei sollte eine möglichst hohe Anzahl an Messungen in verschiedenen Gebieten in ganz Deutschland, in verschiedenen Siedlungsstrukturen sowie mit unterschiedlichen Witterungs- und Geländeeinflüssen enthalten sein. Es wurden folgende Siedlungsstrukturen ausgewählt:

- Großstadt (Stadt mit mindestens 100.000 Einwohnern)
- Mittelstadt (Stadt mit mindestens 20.000 – 100.000 Einwohnern)
- Kleinstadt (Stadt mit mindestens 5.000 - 20.000 Einwohnern)
- Dorf
- Einzelbebauungen (Einsiedlerhöfe)

Um an Orten zu messen an denen tatsächlich nur der natürliche Infraschall vorherrscht, mussten im Vorfeld der Durchführung geeignete Orte gefunden werden. Auf Basis der Literaturrecherche wurden für die anthropogenen Quellen Abstände definiert, die nochmals mit einem Sicherheitsabstand erweitert wurden. Dabei wurden folgende Quellen mit folgenden Abständen berücksichtigt:

Tabelle 3: Definierte Abstände zu anthropogenen Quellen für die Messkampagne

Quellen	Windenergie/ sonstige Kraftwerke	Industrielle Anlagen und Gebiete	Autobahnen	Hochfre- quentierte Eisenbahn- strecken	Flughäfen
Abstände	4 km	4 km	4 km	2 km	10 km

Grundsätzlich sollten mindestens 50 Einzelmessungen für den Vergleich zur Langzeitmessung durchgeführt werden, um einen quantitativen Charakter der Infraschallgrundbelastung zu erhalten. Die Messortplanung wurde daher mit einem GIS-Tool und Open-Data-Sources (<https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/>) für die oben genannten Quellen geplant. Nachfolgender Tabelle zeigt die verwendeten Datensätze und deren Aktualität:

Tabelle 4: Verwendete Open-Data-Source zur Messkampagnenplanung

Datensatz	Inhalt/ Grundlage	Quelle	Aktualität
Onshore Windkraftanlagen in Dtl.	Windkraftanlagen Punkt-Shape/ Geokodierte Liste der Onshore-Windanlagen in Deutschland	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/search?q=windkraft	05.06.2019
Kraftwerke in Dtl. Mit einer elektrischen Leistung von min. 10 MW	Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur als Punkt-Shape. Stand: 11.2021	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content:kraftwerke-in-deutschland-1/explore?location=51.138238%2C10.350483%2C-1.00	24.05.2022
Fossil-thermische Kraftwerke in Dtl.	Geokodierte Liste der fossil-thermischen Kraftwerke in Deutschland als Punkt-Shape	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content:fossil-thermische-kraftwerke-in-deutschland/explore?location=51.363387%2C10.442736%2C7.54	26.04.2022
Wasserkraftwerke in Dtl.	Geokodierte Liste als Punkt-Shape der Wasserkraftwerke vom Typ Laufwasserkraftwerk, Pumpspeicherkraftwerk und Speicherkraftwerk in Deutschland	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/search?q=kraftwerke	19.04.2022
Deutsche Bahn Netz in Dtl.	Geoinformationen zu Strecken der DB NETZ AG als Linien-Shape	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/maps/esri-de-content:deutsche-bahn-netz/explore?location=51.489923%2C7.411150%2C11.31	28.11.2022

Datensatz	Inhalt/ Grundlage	Quelle	Aktualität
Autobahnnetz	Kilometrierungen der Bundesautobahnen. Stand 06.2021	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content::kilometrierungen-der-bundesautobahnen/explore?location=51.120407%2C10.513348%2C7.43	10.11.2021
Internationale und regionale Flughäfen in Dtl.	Flughäfen Deutschland als Punkt-Shape. Stand 06.2021	https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/search?q=flugh%C3%A4fen	05.11.2021

Innerhalb des GIS-Programms wurde anschließend mit einer räumlichen Verschneidung der oben genannten Punkt- und Linien-Layern die in Tabelle 3 aufgeführten Abstände als Pufferzonen berechnet. Im Ergebnis dieser Pufferung wurden nachfolgende markierte Zonen bei der Messort-Planung ausgeschlossen:

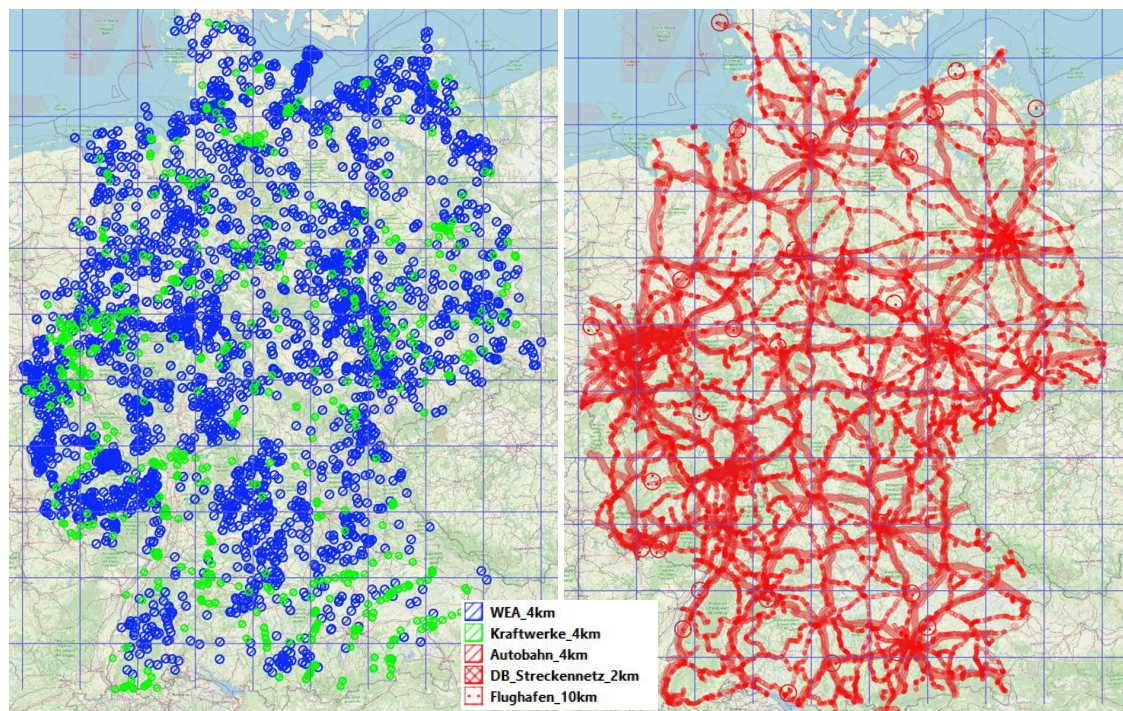


Abbildung 25: Pufferzonen für Routenplanung; Links: Windenergieanlagen und Kraftwerke; Rechts: Verkehrswege (Quelle: [Open-Data-Esri](#) und © [OpenStreetMap](#))

Anhang dieser ersten Einteilung in Gebiete mit potenziellen anthropogenen Quellen wurde eine Messroute mit Messorten geplant. Dabei wurde bewusst die Metropolregion Rhein-Ruhr ausgespart, da hier eine besonders hohe dichte an Quellen sichtbar wurde.

Zusätzlich zu der genannten Kategorisierung wurden die Messorte in 2 gebietsspezifische Kategorien unterteilt. Hierbei stand die Frage im Raum, ob in Küstennähe bzw. in Küstenregionen der Infraschallgrundpegel aufgrund von Gezeiten bzw. anderen ortsspezifischen Einflüssen Unterschiede zu Messungen in ländlichen Regionen aufweist. Daher wurde als Küstenregion ein Abstand von 30km ins Inland definiert. Im Ergebnis dieser Überlegungen und der Planung auf Basis der Open-Data-Sources wurde nachfolgende Route beginnend in Norddeutschland über Ost- nach West in Richtung Süden vorbereitet.

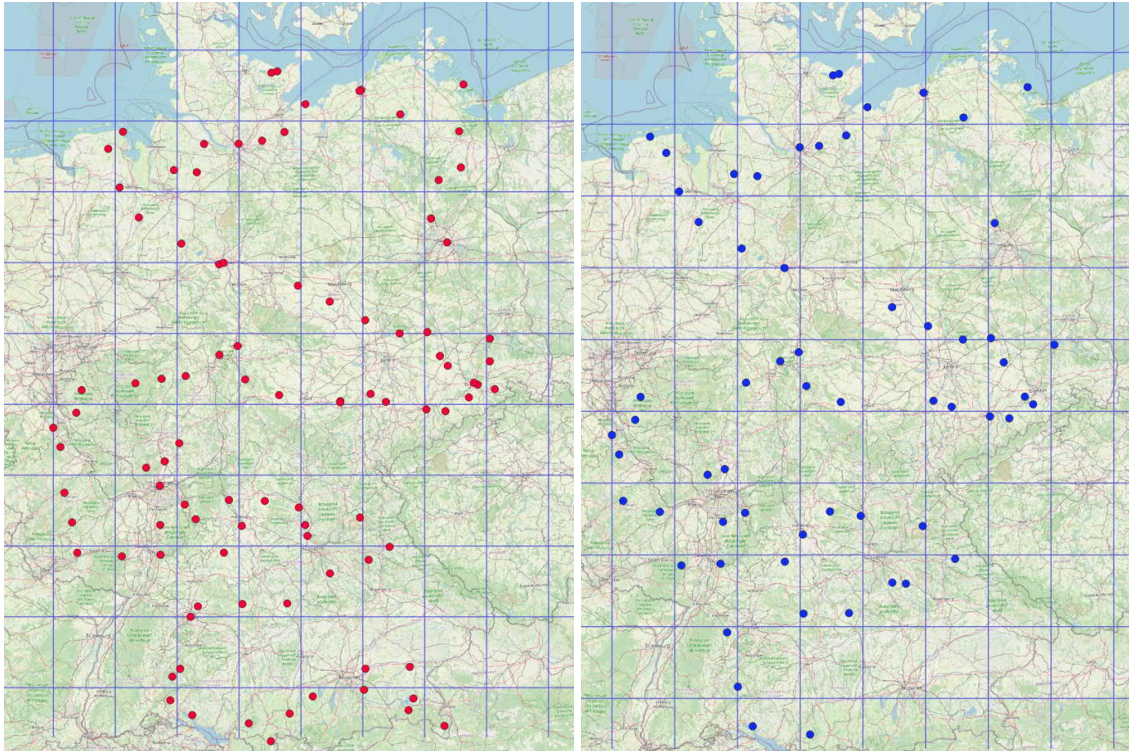


Abbildung 26: Routenplanung (links) und tatsächliche Messorte (rechts) (Quelle: [Open-Data-Esri](#) und © [OpenStreetMap](#))

Für die Messkampagne wurde ein Zeitfenster von zwei Wochen im September veranschlagt. Wie aus Abbildung 26 ersichtlich wird, wurden gegenüber der ursprünglichen Planung 96 Einzelmessungen durchzuführen, 62 Einzelmessungen durchgeführt. Dabei sind insgesamt 12 Einzelmessungen in der Küstenregion und 50 Messungen in ländlichen Gegenden erfolgt. Zusätzlich zu den einstündigen Messungen wurden in der ruhigen Nachtzeit Messungen mit 6-8 Stunden durchgeführt, sodass insgesamt 51 Tagemessungen mit ein Stunden-Blöcken und 11 Nächte mit 6-8 Stunden-Blöcken für die Auswertung vorliegen.

4.4.2 Auswertung der Querschnittserhebung

Anhang 3 enthält das Messprotokoll der zweiwöchigen Querschnittserhebung und in Anhang 4 befindet sich die Messauswertung für jeden einzelnen Ort. Grundsätzlich waren die Messbedingungen während der Tages- und Nachtmessungen die meiste Zeit günstig. Im konkreten heißt dies, dass die Messorte zum Messzeitpunkt ohne nennenswerte Fremdgeräusche angetroffen wurden und die vorherrschenden Wetterlagen vergleichbar zu den Wetterereignissen aus der Langzeitmessung waren. Für die Realisierung und Umsetzung der Querschnittserhebung wurden durchschnittlich 5-6 Messungen im Tagzeitraum an unterschiedlichen Orten gemäß der Routenplanung aus Abbildung 26 durchgeführt. Dabei wurde immer in einem realen Wohnumfeld ein Mikrofon auf einer Höhe von $h = 4\text{m}$ neben dem Messfahrzeug aufgestellt. Die Auswahl des genauen Ortes erfolgte durch subjektive Empfindung. Wie in der Langzeitmessung wurde auch das 3D-Anemometer am Mikrofonstativ befestigt. Nachfolgende Abbildung zeigt die gemessenen Windgeschwindigkeiten im Zeitraum 09.09-21.09.2022:

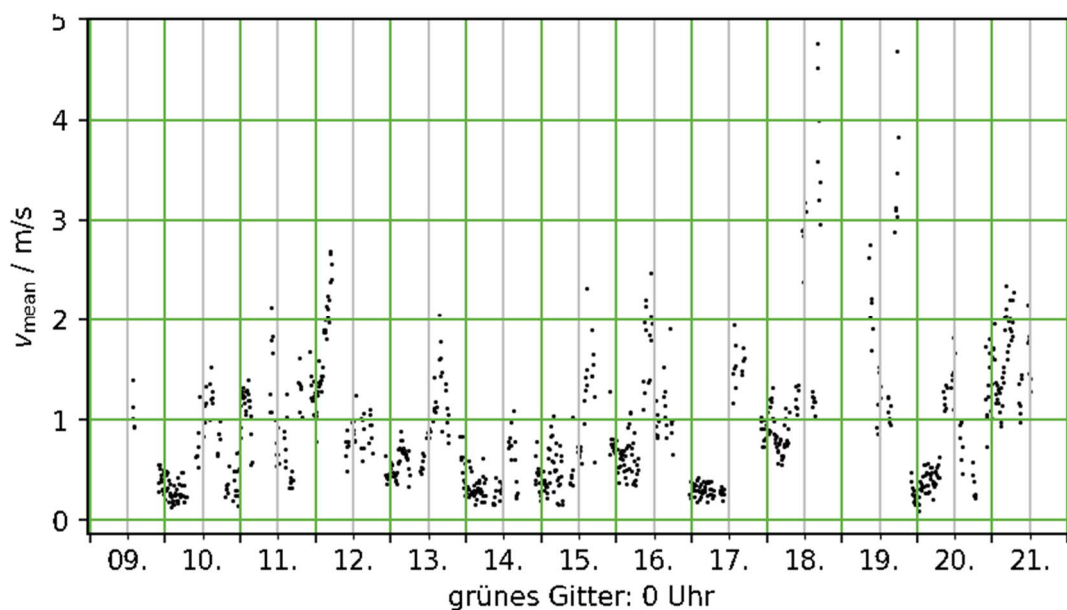


Abbildung 27: Windgeschwindigkeiten Deutschlandtour 09.09.22-21.09.22

Die Tagesmessungen fanden als beobachtete Messungen statt. Hierbei wurden insbesondere auch die Sonogramme der FFT augenscheinlich analysiert, um etwaige Auffälligkeiten im Infraschallbereich während der Messungen feststellen zu können (vgl. Anlage 4). In Abbildung 28 sind die L_{Zeq} Verläufe aller 62 Einzelmessungen als Kurvenschar im Vergleich zur Hörschwelle nach [Jakobsen 2001] aufgetragen. Die Rot-markierten L_{Zeq} sind dabei Einzelmessungen, welche aufgrund hoher Einzahlwerte oder unplausibler Pegelzeitverläufe für die weitere Auswertung nicht herangezogen werden. Ersichtlich wird, dass sich die L_{Zeq} -Pegel-Verläufe bis zu 40 dB(Z) unterscheiden, wobei die L_{Zeq} -Pegel noch unterhalb der Hör- und Wahrnehmbarkeitsschwelle liegen.

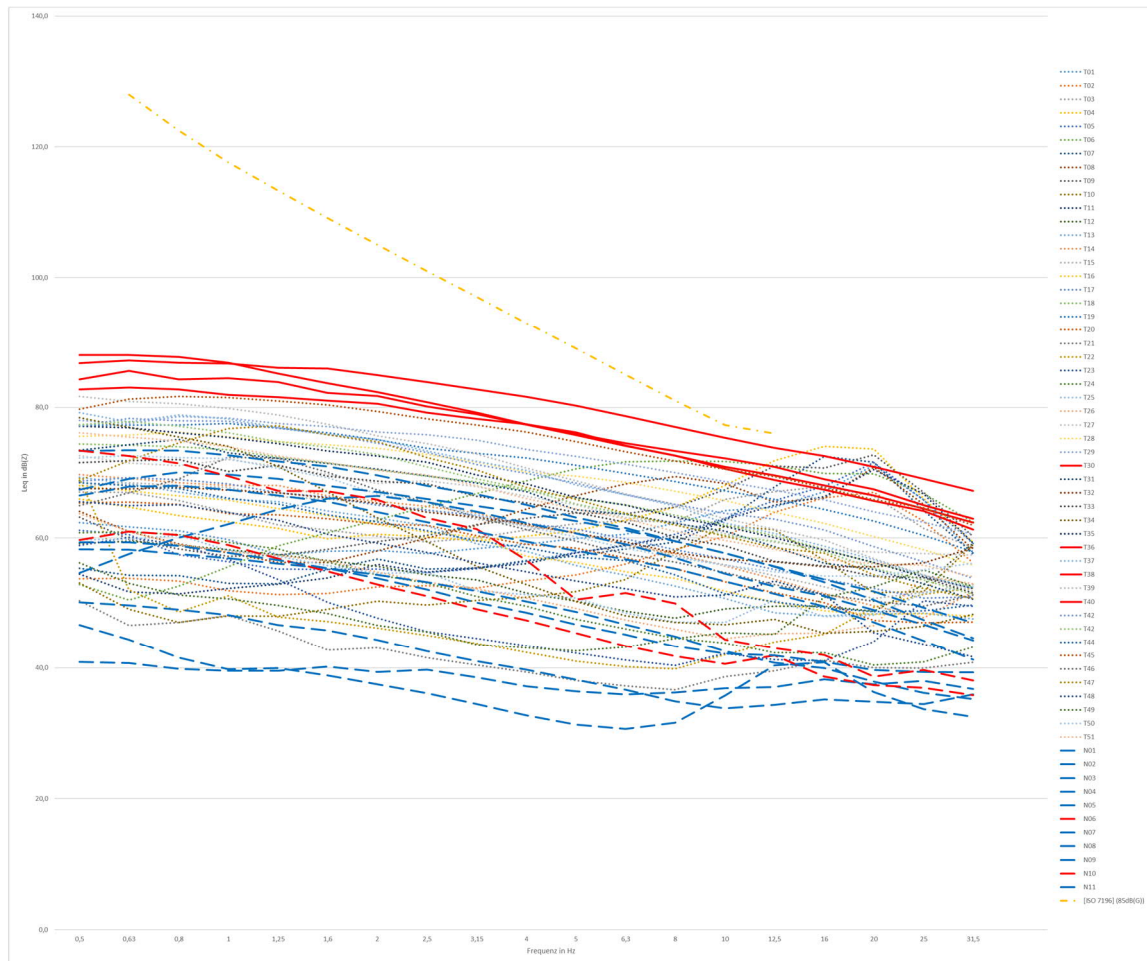


Abbildung 28: L_{Zeq} aller Messungen zwischen 0,5 Hz bis 40 Hz Querschnittserhebung

Mit den Erkenntnissen aus der Langzeitmessung wurde daher jede einzelne Tages- und Nachtmessung als 1-Minuten-Takt ausgewertet und zum Vergleich in die grafische Quantilsauswertung von Abbildung 22 geplottet, um die Windabhängigkeit zu verdeutlichen. Hierbei erfolgte eine erste Auswertung hinsichtlich der Fragestellung, ob die Einzelmessungen an den unterschiedlichen Orten innerhalb der 25-75%-Quantile und innerhalb der 5%-95%-Quantile zur Langzeitmessung lagen. Bei 8 Messungen am Tag und bei 2 Messungen in der Nacht war dies nicht der Fall, sodass diese Messungen aufgrund von Messunsicherheiten oder unbekanntem anthropogenen Quellen nicht für die weitere Auswertung herangezogen werden können. Siehe hierzu auch Abbildung 28, die rot markierten L_{Zeq} Verläufe zeigen diese Messungen.

Es zeigt sich, dass 45 Messungen am Tag und 8 Nachtmessungen mit vergleichbaren Windgeschwindigkeitseinflüssen innerhalb der oben beschriebenen Quantile liegen. Insgesamt zeigen die Messdaten eine gewisse Homogenität, wobei die Nachtmessungen aufgrund der geringeren Temperatur und damit einhergehender Windstille im Mittel unterhalb des Medians liegen. Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft den Unterschied

zwischen einer übereinstimmenden Messung und einer Messung, welche nicht für die Auswertung herangezogen wurde:

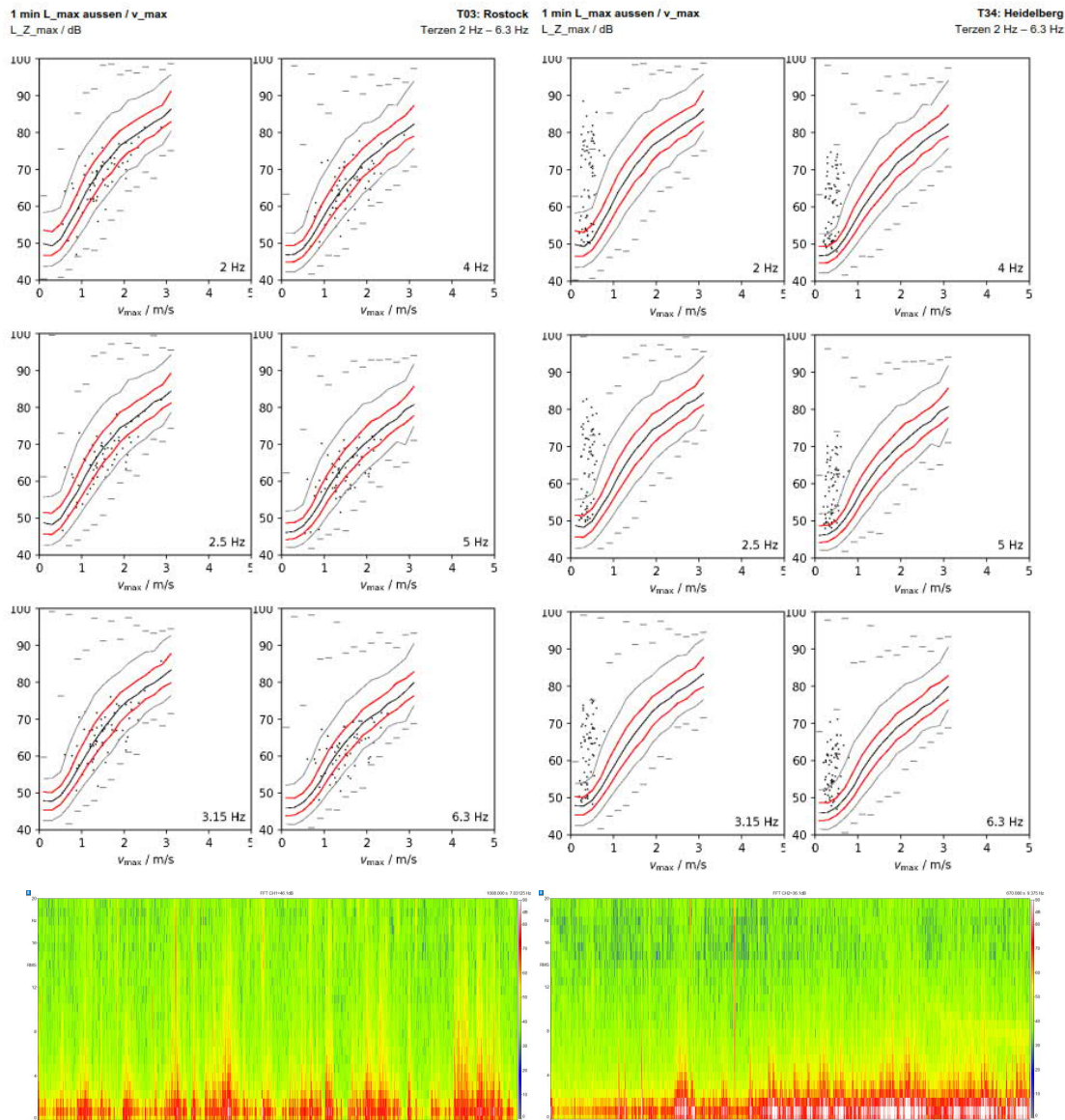


Abbildung 29: Vergleich zweier Messorte anhand der Quantile aus der Langzeitmessung und Sonogrammausschnitten Links: T03 Rostock, Rechts: T34 Heidelberg

Darüber hinaus wurden für alle Messungen die in Kapitel 3.3.2 erläuterten Bewertungskurven auf den L_{Zeq} angewendet, um im Weiteren den Einzahlwert aus der Langzeitmessung mit jeder Einzelmessung vergleichbar zu machen und gegebenenfalls anhand dieser Darstellung bereits ungewöhnliche hohe oder niedrige Mittelungspegel und damit einzelne Ausreißer visualisieren zu können. Alle L_{Geq} Pegel lagen deutlich unterhalb von 85dB(G), sodass auch hier davon ausgegangen werden kann das keine Fremdgeräuschbelastung durch Infraschall am Messort vorlag und der Messort mit den Ergebnissen aus der Langzeitmessung übereinstimmt (vgl. Anlage 4).

Regionale Unterschiede

Wie bereits analysiert, zeigen die verwendeten Messungen eine gewisse Homogenität. Im Hinblick auf die Fragestellung zu regionalen Unterschieden konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Siedlungsstrukturen oder topografischen Gegebenheiten aus den Messdaten ermittelt werden. Vielmehr scheint es das die Infraschallgrundbelastung, zumindest zu den Zeitpunkten der Messung, eher ein einheitliches Bild abzeichnet. Ein Unterschied zwischen der Küstenregion und ländlichen Gegenden konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Die Nachtmessungen N01 (Ostsee), N02 (Ostsee) und N03 (Nordsee) direkt in Meeresnähe zeigen kein eindeutiges Bild. Die Vermutung lag zu Anfang darin, dass hier gegebenenfalls höhere Infraschallhintergrundpegel aufgrund der Meeresbewegungen vorliegen. Dies konnte mit den drei Nächten zumindest nicht bestätigt werden. Auch die 9 Tagesmessungen, die innerhalb eines Radius von 30km zum Meer lagen, zeigen keine erhöhte Hintergrundbelastung. Um an dieser Stelle eine dezidierte Aussage treffen zu können, müssten mehr Daten über einen längeren Zeitraum erhoben und ausgewertet werden.

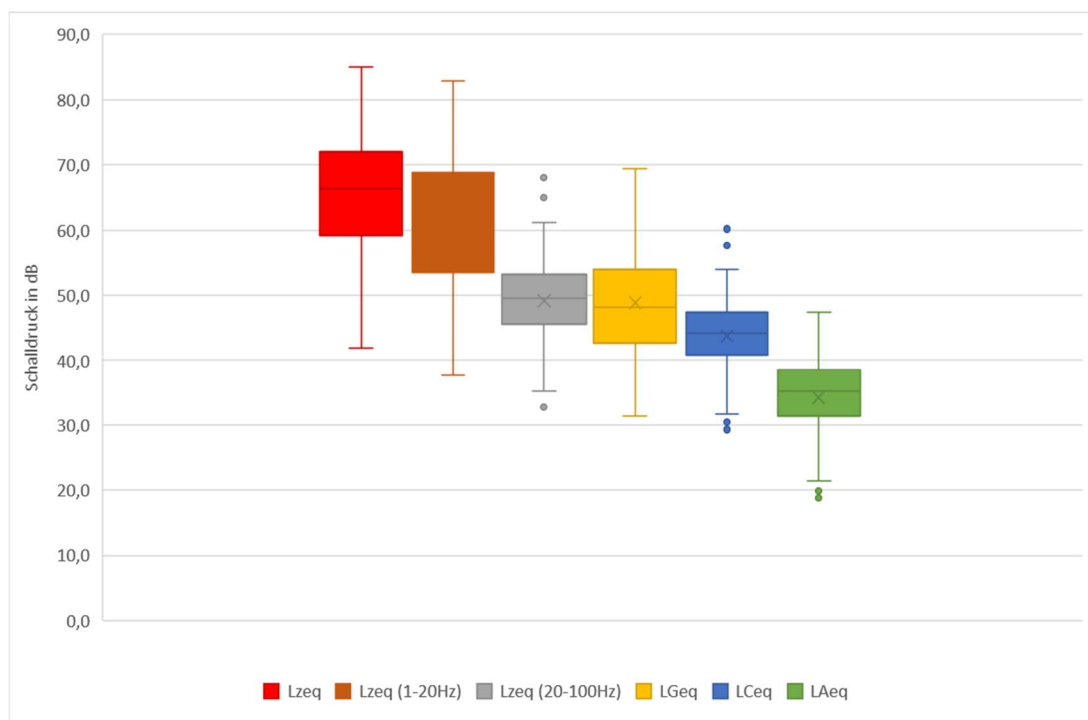


Abbildung 30: Box-Plot mit unterschiedlichen Bewertungskurven (Nachtpegel) Querschnittserhebung

Um nun die Forschungsfrage zu klären, wurden die gewonnen Messdaten in einem einzigen Datensatz zusammengefasst und erneut mittels der Quantilsauswertung der Langzeitmessung verglichen. Nachfolgende Abbildung zeigt daher alle 1-Minuten Takte der Deutschlandmessung als Scatterplot gegen die Windgeschwindigkeit in den Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz. Eine detaillierte Darstellung befindet sich in Anlage 5.

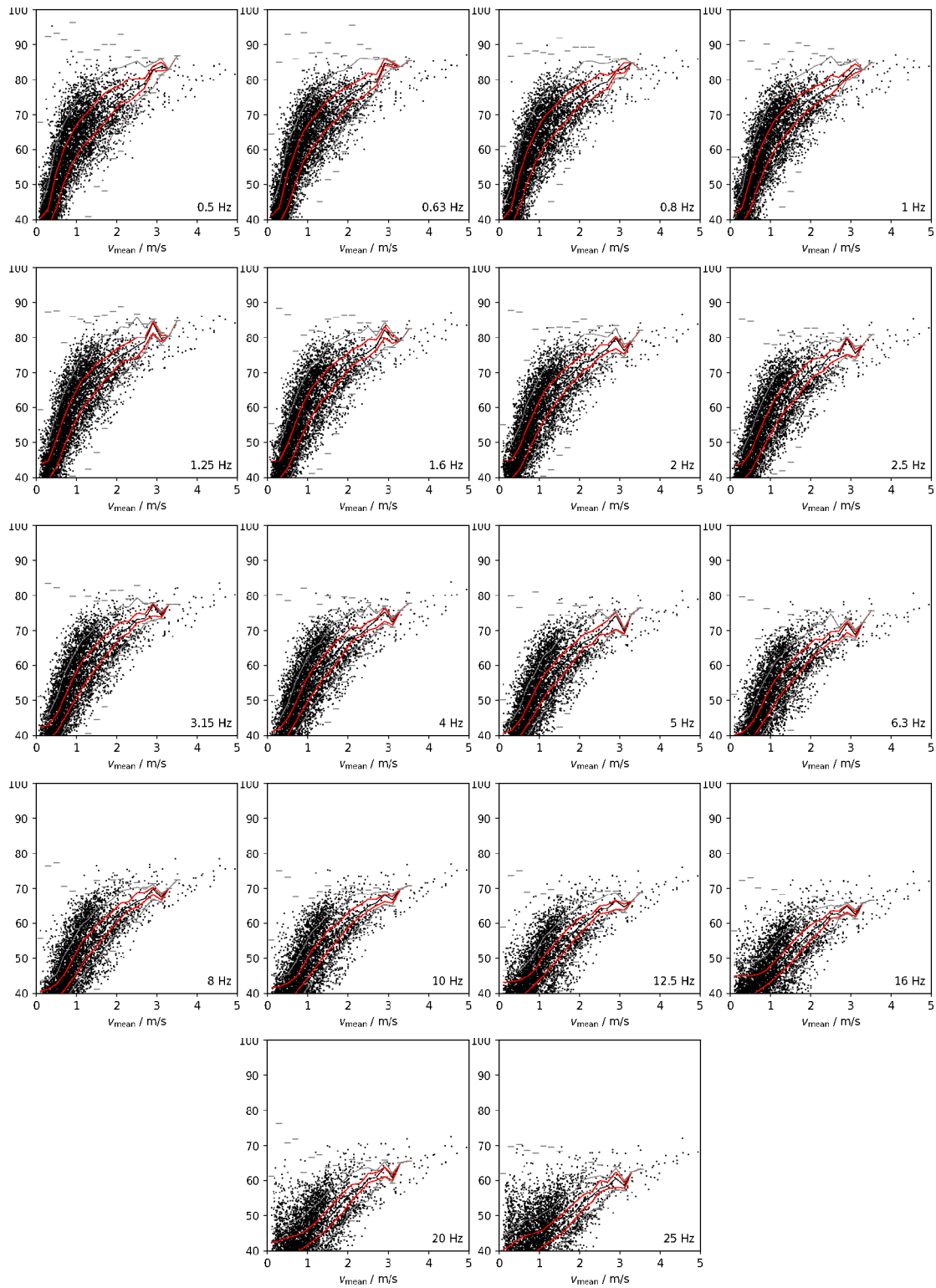


Abbildung 31: Vergleich L_{Zeq} -1-Minuten Takte Deutschlandtour mit L_{Zeq} -Quantilen der Langzeitmessung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Die Auswertung über alle durchgeführten Einzelmessungen hinweg zeigt, dass an unterschiedlichen Orten vergleichbare Pegelwerte zur Langzeitmessung auftreten. Vor diesem Hintergrund scheint der Infraschallgrundpegel in den Terzmittenfrequenzen von

0,5 Hz bis 20 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit ein einheitliches und reproduzierbares Ereignis Landesweit zu sein.

Insofern werden alle unter Freifeldbedingungen gewonnenen Messdaten (Langzeitmessung und Querschnittserhebung) in einem Datensatz zusammengefasst und analysiert. Nachfolgende Abbildung zeigt dabei die diskreditierten Windbereiche und die Anzahl der zur Auswertung zur Verfügung stehenden 1-Minuten-Takte aus der Langzeitmessung und der Querschnittserhebung. Hieraus geht hervor, dass eine ausreichend große Datenlage zur Mittelwertbildung aus den 1-Minuten-Takten in den interessierenden Windgeschwindigkeitsbereichen bis 2 m/s vorliegen.

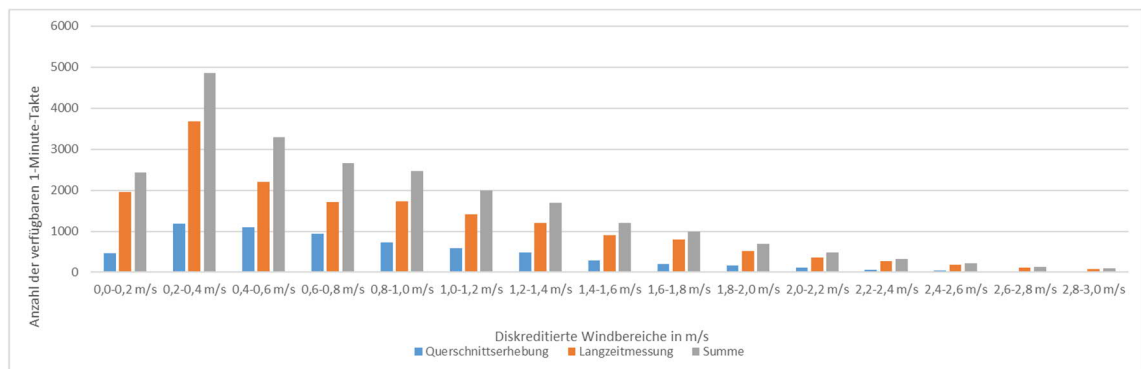


Abbildung 32: Anzahl der verfügbaren 1-Minuten-Takte aus der Langzeitmessung und der Querschnittserhebung in den diskreditierten Windgeschwindigkeiten

In der Zusammenfassung liegt nun der Infraschallgrundpegel in Abhängigkeit von diskreditierten Windbereichen bis zu einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 2,0 m/s als Querschnitt innerhalb von Deutschland vor:

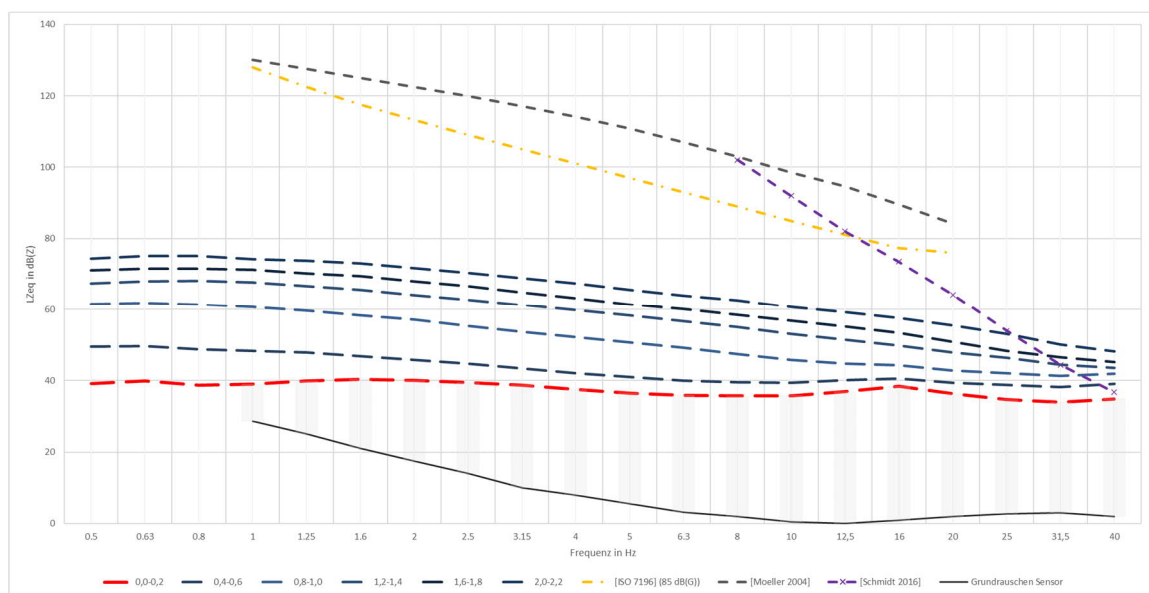


Abbildung 33: Infraschallgrundpegel in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

4.5 Messung mit sekundärem Mikrofonschirm

4.5.1 Versuchsort und Versuchsaufbau

Zur Plausibilisierung der gewonnenen Erkenntnisse aus der Langzeitmessung und der Querschnittserhebung wurde im Anschluss eine Kontrollmessung und zusätzlich eine Messung mit sekundärem Luftschirm vorbereitet und durchgeführt. Ähnlich wie bei Messungen mit dem Grenzmikrofon-Verfahren (vgl. [DIN EN 61400-11]) wird dabei ein zusätzlicher „Windschirm“ über den Mikrofonwindschutz zur besseren Determinierung von Windeinflüssen gespannt. Da es derzeit keine handelsüblichen „sekundären Windschirme“ mit einer klassischen Stativaufnahme auf dem Markt zu kaufen gibt, wurde dieser Sekundärschirm eigens angefertigt. Hierbei wurde, wie bei handelsüblichen Mikrofonschirmen, ein akustisch durchlässiges Material mit einer Dicke von 12mm verwendet und auf eine runde Käfigkonstruktion mit Stivadaptierung aufgenäht.

Die Messungen fanden im Zeitraum 01.01.2023-04.01.2023 statt. Nachfolgende Abbildung zeigt den Messaufbau:

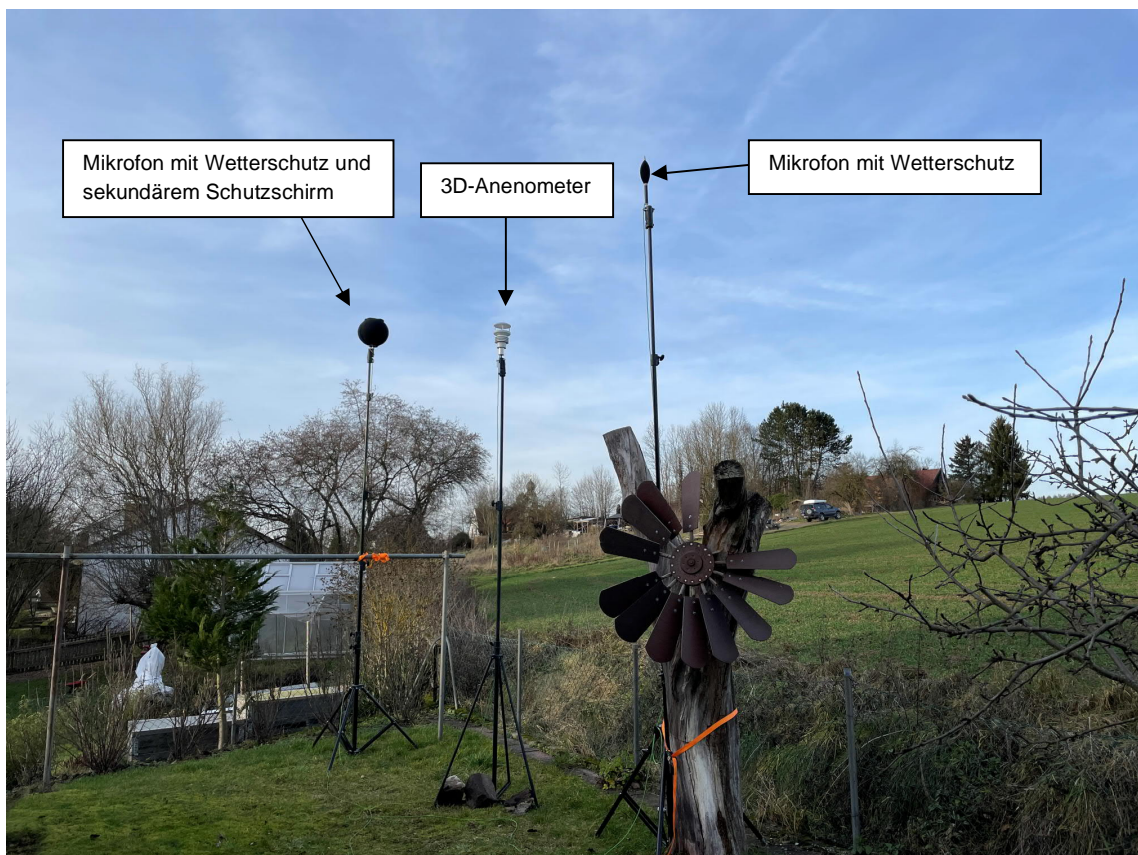


Abbildung 34: Messaufbau Kontrollmessung mit sekundärem Luftschirm

Die Mikrofone wurden in einem Abstand von zirka 4m zueinander in einer Höhe von $h = 4\text{m}$ positioniert. Dazwischen wurde das Stativ mit dem 3D-Anemometer auf einer Höhe von $h = 3,5\text{m}$ gestellt.

4.5.2 Auswertung der Messung mit Sekundärschirm

In Analogie zur Auswertung der Langzeitmessung wurden die Messdaten im Zeitraum 01.01.2023-04.01.2023 analysiert. Abbildung 35 stellt die gemessenen meteorologischen Daten dar. Im Vergleich zur Langzeitmessung variieren der Luftdruck, die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur. Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten erstrecken sich im Bereich von 0 bis 2 m/s, wobei der Messtag 04.01.2023 aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten nicht für die Auswertung herangezogen wird.

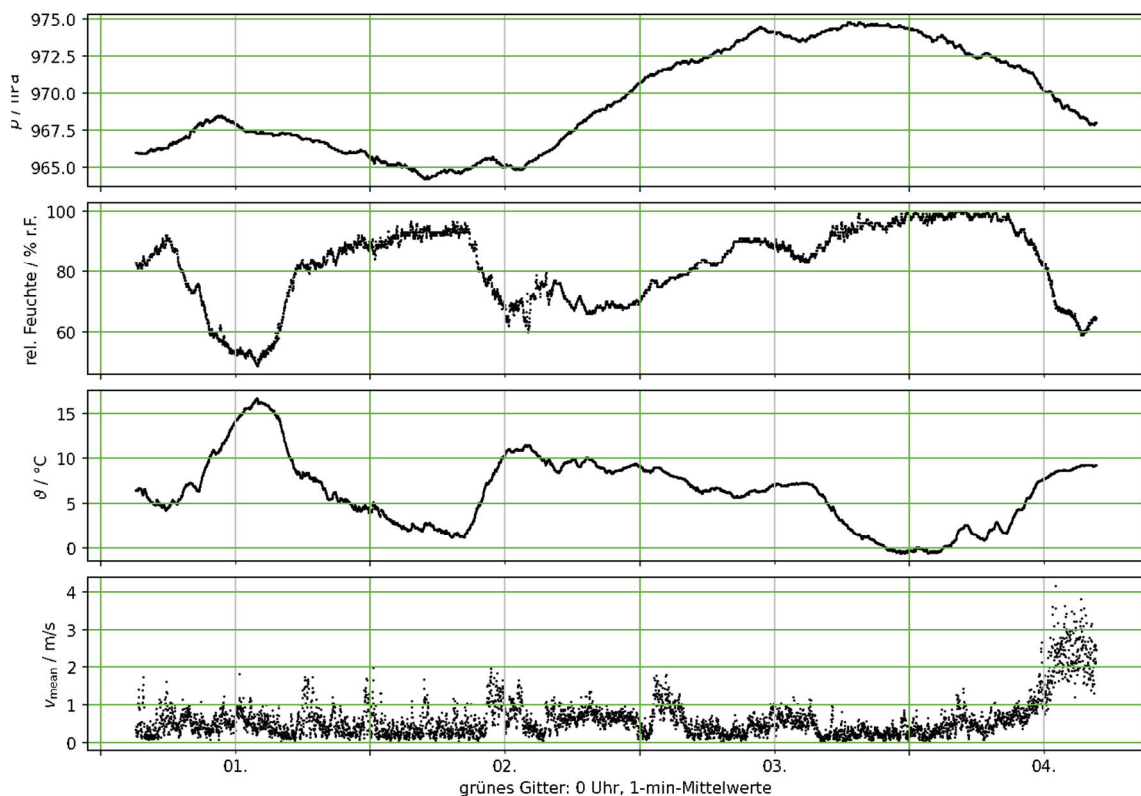


Abbildung 35: Meteorologische Daten der Kontrollmessung

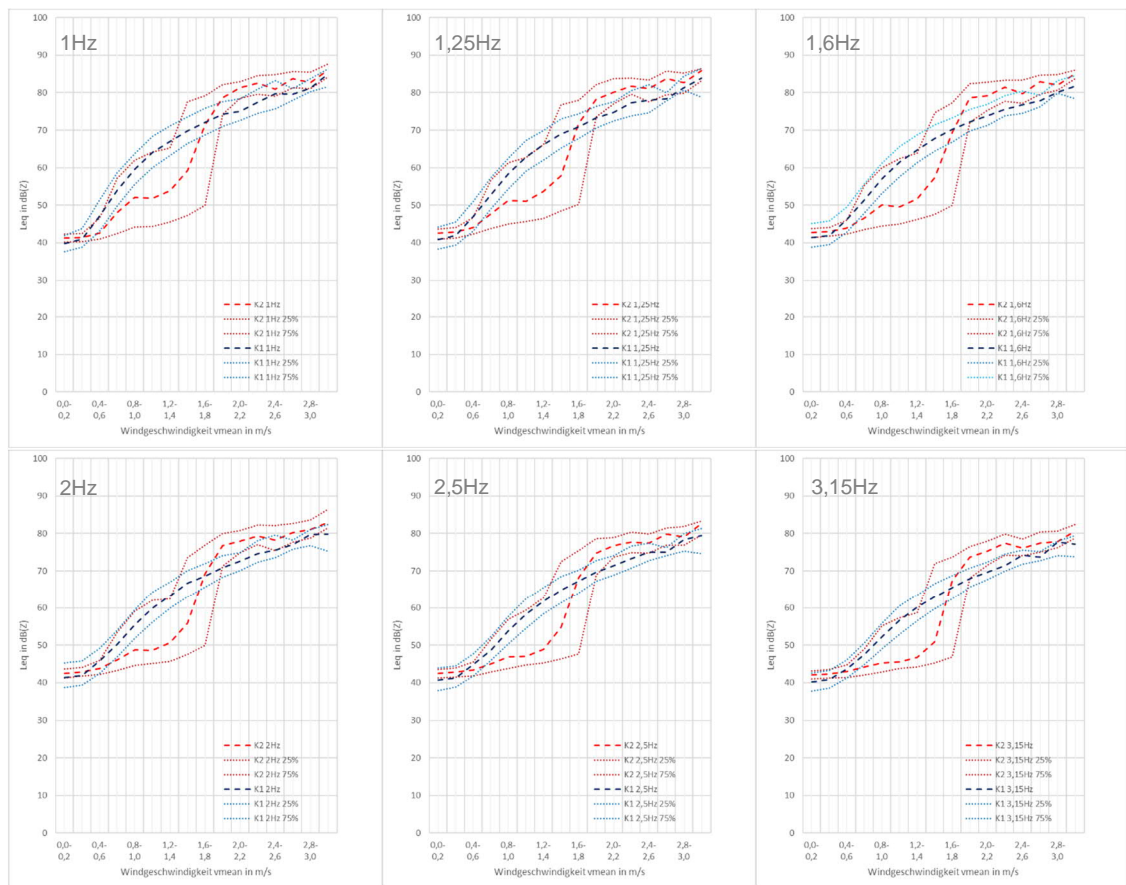
Nach Sichtung der Messdaten wurde festgestellt, dass am Kanal 1 (Außenmikrofon mit Wetterschutz) ein Messfehler (siehe Anlage 6) in unregelmäßigen Abständen aufgetreten ist, sodass der Kanal 1 nicht für die Auswertungen herangezogen werden kann. Die Pegelzeitverläufe und auch die Einzahlwerte der Messdaten aus Kanal 2 (Außenmikrofon mit Wetterschutz und Sekundärschirm) zeigten hingegen plausible Verläufe und

Werte. Während des Messzeitraums konnten folgende Pegelwerte und Beurteilungspiegel am Kanal 2 (Außenmikrofon mit Wetterschutz Sekundärschirm) gegenüber der Langzeitmessung festgestellt werden:

Tabelle 5: Messergebnisse Vergleich Messung Außenmikrofon mit Sekundärschirm Kanal 2 und Außenmikrofon Langzeitmessung Kanal 1

Messung	L_{Zeq} in dB(Z)	L_{Zeq} (1-16Hz) in dB(Z)	L_{Zeq} (20-100Hz) in dB(Z)	L_{Geq} In dB(G)	L_{Ceq} in dB(C)	L_{Aeq} in dB(A)
K2 Sek.	62,3	61,8	50,7 dB	54,7	51,5	43,7
K1 Langzeit	75,3	75,2	56,5	61,7	59,9	48,0

Vor diesem Hintergrund wurde ein Pegel-Windvergleich mit den L_{Zeq} Werten des Außenmikrofon aus der Langzeitmessung durchgeführt. Nachfolgende Abbildung zeigt die Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 6,3 Hz des L_{Zeq} in Abhängigkeit mit der Windgeschwindigkeit des Kanal 1 (blau) der Langzeitmessung und des Kanal 2 (rot) der Kontrollmessung mit den dazugehörigen 25% und 75% Quantilen:



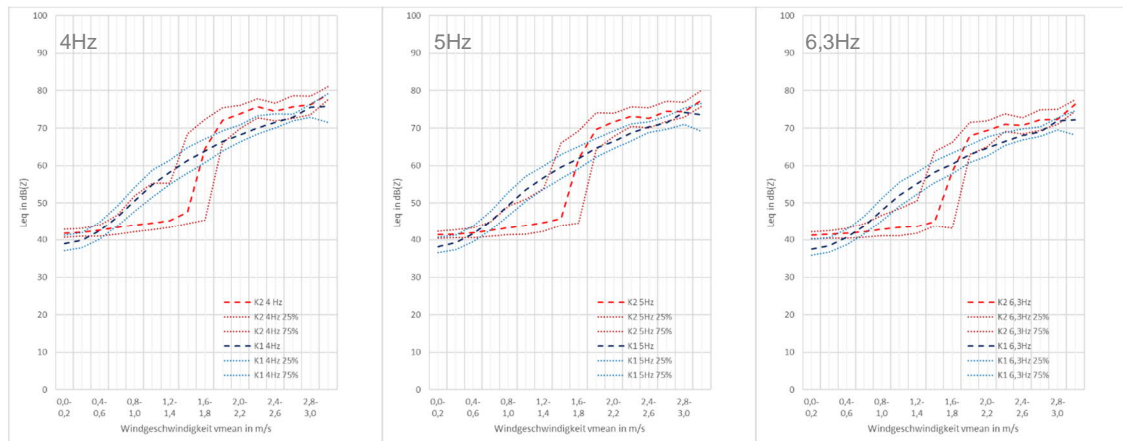


Abbildung 36: Vergleich Messung mit Sekundärschirm und Langzeitmessung in den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 6,3 Hz

Anhand der Abbildung 36 und Abbildung 37 wird deutlich, dass die L_{Zeq} -Pegel bei durchschnittlichen Windstärken zwischen 0 bis 0,6 m/s nahezu gleich sind, sodass eine vergleichbare Situation des Infraschallhintergrundpegels bei unterschiedlicher Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit in diesem diskreditieren Windbereich gegeben ist. Die Abbildungen zeigen aber auch, dass die Windgeschwindigkeit am Mikrofon einen deutlichen Einfluss bezüglich der Wahl der Schutzschirme hat. In den Terzmittenfrequenzen von 1 Hz bis 6,3 Hz erzeugt die Messung mit Sekundärschirm bis zu einer Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s einen in etwa linearen Verlauf der windabhängigen Pegel.

Ab einer Windgeschwindigkeit von zirka 1,6 bis 2,0 m/s wird der Pegel durch einen starken Anstieg in den Terzmittenfrequenzen charakterisiert. Anschließend bei Windgeschwindigkeiten von 2,0 bis 3,0 m/s gleicht sich der Pegel den Erkenntnissen aus der Langzeitmessung an. Dies lässt sich bis zu einer Terzmittenfrequenz von zirka 16 Hz weiter beobachten. Erst außerhalb des Infraschallbereichs ab 20 Hz zeigt die Messung mit Sekundärschirm, dass sich kaum Unterschiede zwischen der Messung mit einem normalen Windschirm und der Messung mit einem normalen Windschirm und einem zusätzlichen Sekundärschirm einstellen. Auf Basis dessen bestätigt sich die Annahme, dass unterschiedliche Windgeschwindigkeiten einen erheblichen Einfluss auf Messungen unter Freifeldbedingungen im Infraschallbereich haben. Grundsätzlich verdeutlichen die Abbildung 36 und Abbildung 37 das sich der messbare Bereich, also die Möglichkeit Freifeldmessungen bei etwas höheren Windgeschwindigkeiten als 0,6 m/s durchzuführen, mit Hilfe eines Sekundärschirms auf Stativ erweitern lässt. Anhand dieser Erkenntnis könnten für zukünftige Messungen unter Freifeldbedingungen gegebenenfalls Hinweise für Infraschallmessungen gegeben werden.

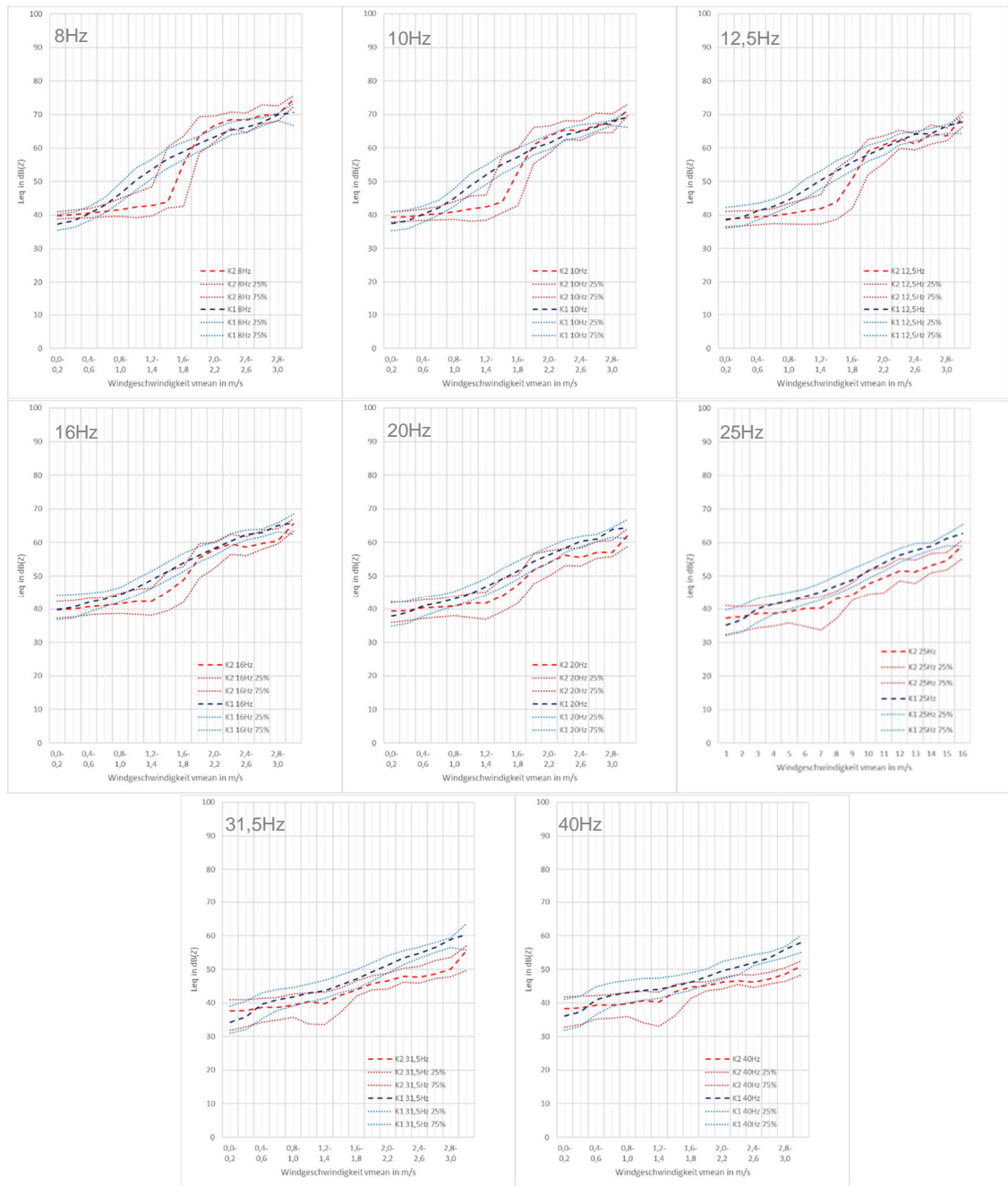


Abbildung 37: Vergleich Messung mit Sekundärschirm und Langzeitmessung in den Terzmittenfrequenzen von 8Hz bis 40Hz

4.6 Ergebnis und Bewertung

Es konnte gezeigt werden, dass das vorherrschende Infraschallpegel-Grund-Niveau sich nicht durch ortsspezifische Bedingungen unterscheidet. Vielmehr wurde festgestellt, dass ein Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und dem natürlich vorherrschenden Infraschallpegel besteht.

Die Messungen fanden unter Freifeldbedingungen mit einem speziellen Infraschallmikrofon statt. Die Messbedingungen waren an den meisten Messtagen günstig, d.h. es wurden Windgeschwindigkeiten von 0 bis 3 m/s gemessen. Fremdgeräuscheinwirkungen wurden auf ein Mindestmaß begrenzt.

Die Daten wurden auf Ihre Plausibilität hin geprüft und mit verschiedenen Auswertungen analysiert. Dabei wurden die Terzmittenfrequenzen zwischen 0,5 Hz bis 40 Hz untersucht. Vordergründlich der Tatsache, dass die Terzmittenfrequenzen ab 20 Hz nicht mehr dem Infraschallbereich zuzuzählen sind, wurden diese Bereiche zur Plausibilisierung stets mit angegeben. Die Terzmittenfrequenzen zwischen 0,5 Hz bis ausschließlich 1 Hz sind ebenfalls als informativer Bereich anzusehen, da bei derart tiefen Frequenzen die Genauigkeit des verwendeten Messsystems nicht vollumfänglich prüfbar ist. Alle Messungen waren darauf ausgelegt einen repräsentativen Querschnitt in unserem alltäglichen Wohnumfeld zu erfüllen. Die durchgeführten Infraschallmessungen lagen deutlich unter den in der Literatur angegebenen Hörschwellen, sodass davon ausgegangen werden kann dass es sich um gewöhnliche und natürlich vorkommende Pegel handelt.

Hierbei wurden die gemessenen durchschnittlichen und maximalen Infraschallhintergrundpegel in 1-Minutentakten auf der Windgeschwindigkeit aufgetragen (vgl. Anlage 1 und Anlage 4). Im Ergebnis wurde festgestellt, dass eine Korrelation zwischen der Windgeschwindigkeit und dem Infraschallgrundpegel sowohl im Außenbereich als auch bei der Messung im Gebäude, wenn auch deutlich geringer, vorliegt. Die Messungen im Außenbereich folgen einer stärkeren Korrelation in den tiefen Frequenzen von 0,5 Hz bis 6,3 Hz. Die Vermutung liegt nahe, dass dies auf windinduzierte Schallereignisse an der Mikrofonskapsel zurückzuführen ist. Allerdings zeigt der Vergleich zum Innenbereich (quasi ohne Windeinfluss), dass diese Korrelation, wenn auch nicht so stark, ebenfalls besteht. Grundsätzlich ist der windinduzierte Pegelanstieg bereits ein bekanntes Thema. Daher wurde ein Kontrollversuch mit einem „Sekundärschirm“ im Außenbereich durchgeführt. Hierbei hat sich gezeigt, dass obwohl durch eine ausreichend hohe Dämpfung der Windgeschwindigkeiten am primären Luftschirm trotz allem bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten eine Korrelation zwischen der Infraschallhintergrundbelastung und den vorherrschenden Windgeschwindigkeiten bestehen bleibt.

Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Hintergrundbelastung an unterschiedlichen Orten festgestellt wurde, wurde eine Mittelwertbildung über alle erhobenen und verwendbaren Messdaten durchgeführt. Diese Mittelung soll Aufschluss über mögliche Hinweise von zukünftigen Infraschallmessungen unter Freifeldbedingungen geben und das Ergebnis der Forschungsfragestellung widerspiegeln.

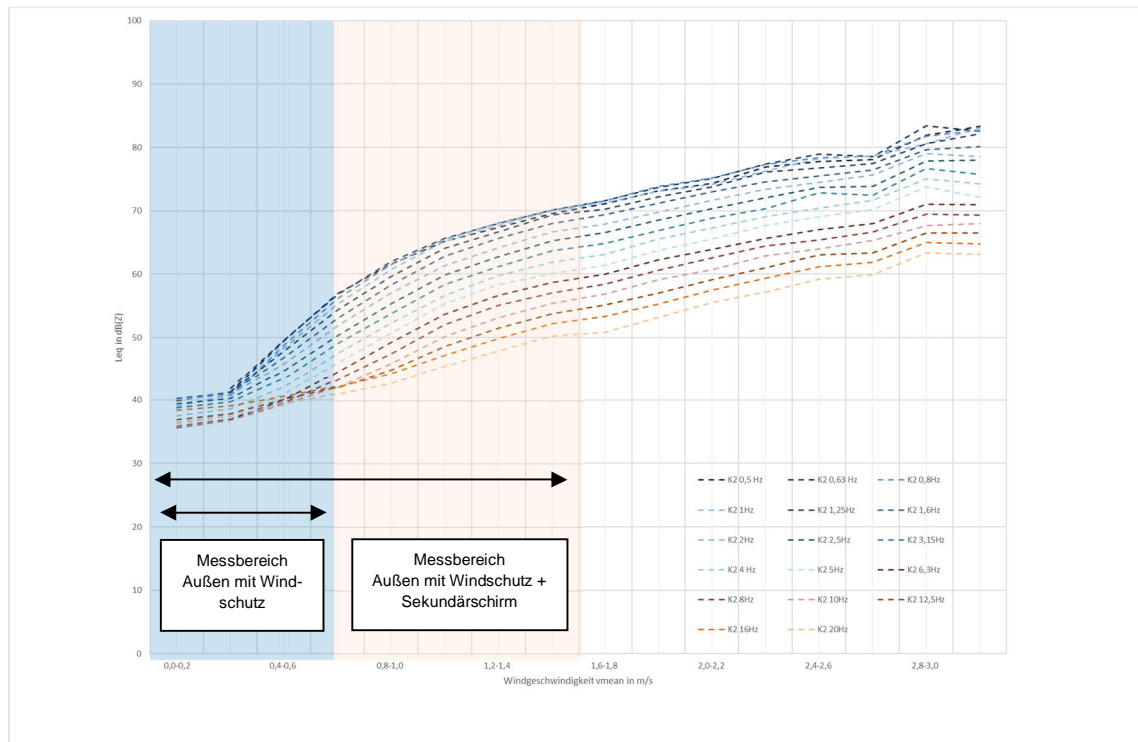


Abbildung 38: Vorschlag für zukünftige Messungen unter Freifeldbedingungen

Aus der Darstellung in Abbildung 38 wird ersichtlich, dass eine Vielzahl der Messungen sich in den Terzfrequenzen von 1 Hz bis 20 Hz bis Windgeschwindigkeiten von 0,6 m/s überschneiden, sodass dieser Bereich als möglicher zukünftiger Messbereich ausgelegt wird. Bei höheren Windgeschwindigkeiten ab 0,6 bis 1,5 m/s sollten zusätzlich bei Messungen eine Verwendung eines Sekundärschirms angestrebt werden. Die Streuung der Pegel im Infraschallbereich nimmt insbesondere bei den sehr tiefen Frequenzen bei höheren Windgeschwindigkeiten zu, sodass die Empfindlichkeit der Mikrofone und damit einhergehend die Plausibilität der Messergebnisse deutlich sinkt. Weiterhin sind bei allen Messungen unter Freifeldbedingungen die meteorologischen Daten mit zu erheben.

Im Ergebnis der Gesamtmittelung aller durchgeführten Messungen wird der terzfrequenzabhängige Infraschallhintergrundpegel ohne Windabhängigkeit den aus der Literatur bekannten Hör- und Fühlbarkeitsschwellen im Bereich von 1 Hz bis 20 Hz (orientierend bis 40 Hz) dargestellt. Abbildung 39 zeigt den terzfrequenzabhängigen Infraschallhintergrundpegel in Deutschland:

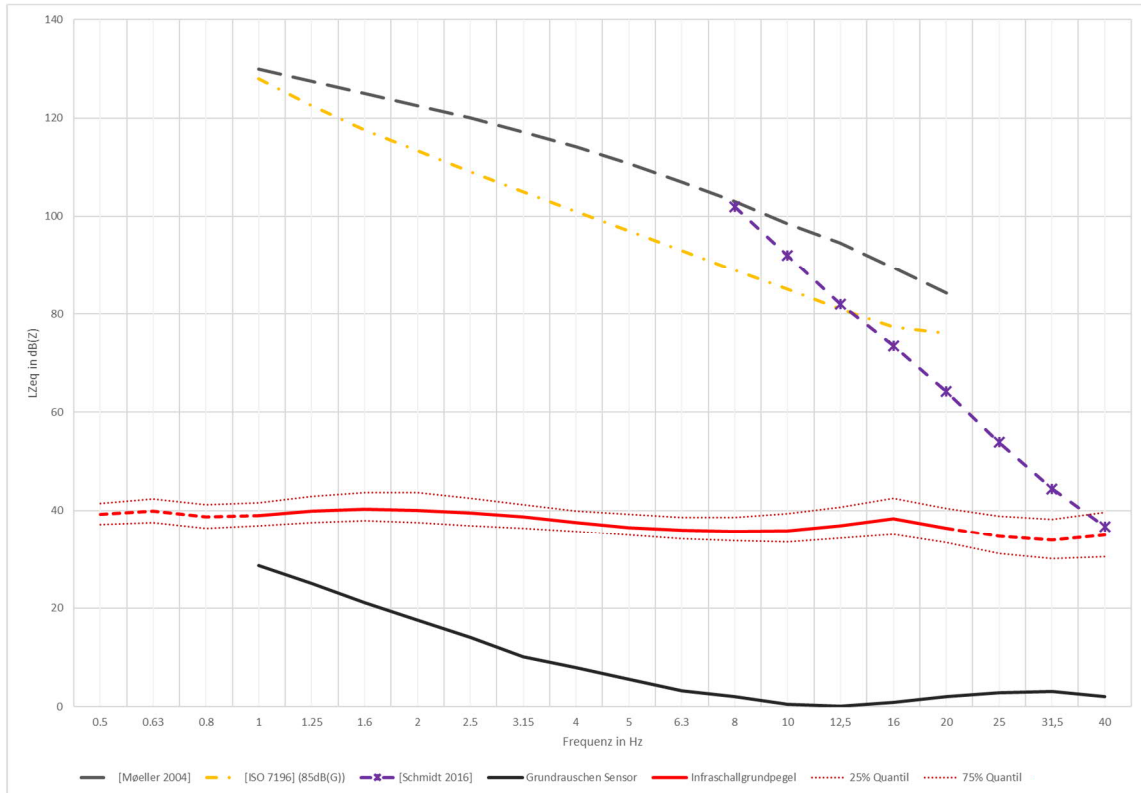


Abbildung 39: Infraschallgrundpegel in dB(Z) in Deutschland

Aus der Summe der Messungen wird ersichtlich, dass sich das Hintergrundpegelniveau des natürlichen und gewöhnlichen Infraschalls im Pegelbereich um die 40 dB(Z) bewegt.

4.7 Fazit und Ausblick

Mit der vorliegenden messtechnischen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass das Infraschallgrundpegelniveau innerhalb von Deutschland keine signifikanten regionalen Unterschiede aufweist. Vielmehr ist bei den durchgeführten Messungen deutlich geworden, dass die Windgeschwindigkeit einen gravierenden Einfluss auf die Messungen mit konventioneller Messtechnik unter Freifeldbedingungen haben. Anhand der Datenmenge konnten jedoch Bereiche gefunden werden, bei denen kein relevanter Einfluss des Windes auf die gemessenen Infraschallpegel zu verzeichnen war. D.h. in der Arbeit konnte gefunden werden, dass bis zu Windgeschwindigkeiten von 0,0-0,6 m/s am Mikrophon kein signifikanter Einfluss des Windes vorherrscht. Als Ergebnis liegt die durchschnittliche Infraschallgrundbelastung also der natürliche vorkommende Infraschall im Wohnumfeld vor. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den durchgeführten Innenraummessungen, bei denen je nach Dichte des Gebäudes auch höhere Windgeschwindigkeiten im Freien zulässig sind.

Um bei zukünftigen Messungen im Sinne des Immissionsschutzes anthropogene Quellen mit messtechnischen Mitteln zu erfassen und zu beschreiben, dienen die hier gewonnenen Erkenntnisse über den Grundpegel und eventuelle Messprozedere als Basis. Für die Plausibilisierung der Ergebnisse dieser Arbeit wäre denkbar, dass neben weiteren Langzeitmessungen auch Messungen mit einem speziell für diese Aufgabenstellung designten Mikrobarometeraufbau die Luftschallmessungen im Infraschallbereich gestützt beziehungsweise geprüft werden. Um hier zu einer getreuen Nachbildung der Wirkung auf den Menschen zu gelangen, wäre der Aufbau an einer menschlichen Puppe mit den Barometerkapillaren vorstellbar.

Wie in Kapitel 3.2.4 erläutert, wurden derzeit noch keine wissenschaftlichen Ergebnisse anhand von Langzeitstudien im Bereich auf Infraschallwirkung auf den Menschen durchgeführt oder publiziert. Die Erkenntnisse dieser Arbeit werden Bestandteil der derzeit laufenden Voruntersuchung für eine umweltepidemiologische Langzeitstudie zur Entwicklung eines Studiendesigns im Hinblick auf die Erforschung der Wirkung von Infraschallemissionen. Neue Erkenntnisse auf diesem Themengebiet werden allerdings erst in ein paar Jahren ausgewertet sein und vorliegen.

Literaturverzeichnis

- [Ascone 2021] ASCONE L., KLING C., WIECZOREK J., KOCH C., et. al.: A longitudinal, randomized experimental pilot study to investigate the effects of airborne infrasound on human mental health, cognition, and brain structure. *Sci. Rep.* 11, 3190. 2021. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82203-6>
- [Böge 2008] BÖGE Alfred, EICHLER Jürgen: Physik für technische Berufe. 11., aktualisierte und erweiterte Auflage. Vieweg Teubner Verlag. Wiesbaden, 2008
- [Cremer 1971] CREMER L. Prof. Dr.-Ing.: Vorlesungen über Technische Akustik. 2. durchgesehene Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. Berlin, 1971.
- [Cremer 1976] CREMER L Prof. Dr.-Ing., MÜLLER H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik Band II – Teil 4 Wellentheoretische Raumakustik. 2., völlig neubearbeitete Auflage. S. Hirzel Verlag Stuttgart. Stuttgart, 1976.
- [DIN 1320] DIN 1320:2009-12, Akustik - Begriffe. Beuth Verlag. Berlin, 2009-12.
- [DIN 45630-1] DIN 45630 Blatt 1 - Grundlagen der Schallmessung - Physikalischen und subjektive Größen von Schall. Beuth Verlag. Berlin, 1971.
- [DIN 45645-1] DIN 45645-1:1996-07, Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Beuth-Verlag. Berlin 1996-07.
- [DIN 45657] DIN 45657:2014-07, Schallpegelmesser – Zusatzanforderungen für besondere Messaufgaben. Beuth-Verlag. Berlin, 2014-07.
- [DIN 45680] DIN 45680:1997-03, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Beuth-Verlag. Berlin, 1997.
- [DIN EN 60268-4] DIN EN IEC 60268-4:2019-08, Elektroakustische Geräte – Teil 4. Mikrofone (IEC 60268-4:2018). Beuth-Verlag. Berlin 2019-08.
- [DIN EN 61094] DIN EN 61094-1:2001-08, Messmikrofone – Teil 1: Anforderungen an Laboratoriums-Normalmikrofone (IEC 61094-1:2000). Beuth-Verlag. Berlin 2001-08.
- [DIN EN 61400-11] DIN EN 61400-11:2013-09, Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2012); Deutsche Fassung EN 61400-11:2013. Beuth-Verlag. Berlin, 2013-09.
- [DIN EN ISO 3744] DIN EN ISO 3744:2011-02, Akustik – Bestimmung der Schalleistungs- und Schalenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:2012). Beuth-Verlag. Berlin, 2011.-02.
- [DIN ISO 226] DIN ISO 226:2006-04, Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003). Beuth-Verlag. Berlin, 2006-04.

- [DWD 2022] URL: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html, Stand: 12.10.2022.
- [E DIN 45680:2020-06] E DIN 45680:2020-06, Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen – Entwurf. Beuth-Verlag, Berlin, 2020-06.
- [Eulitz 2020] EULITZ Christian, ZOBEL Paul, OST Larissa, MÖHLER Ulrich, et. al.: Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2020.
- [Everest 2009] EVEREST F. Alton, POHLMANN Ken C.: Master Handbook of Acoustics. 5. Auflage. The McGraw-Hill Companies. New York, 2009.
- [Evers 2001] EVERS Láslo: Infrasound measurements in the Netherlands by the KNMI. Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI. De Bilt, 2001. URL: <http://www.knmi.nl/>
- [Evers 2005] EVERS Láslo: Infrasound Monitoring in the Netherlands. Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI. NAG-Journal nr. 176. De Bilt, 2005.
- [Fasold 2003] FASOLD Wolfgang, VERES Eva: Schallschutz + Raumakustik in der Praxis, Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2. Auflage. Huss Medien, Verlag für Bauwesen. Berlin, 2003.
- [Freiberg 2019] FREIBERG A., SCHEFTER C., GIRBIG M., MURTA V.C., et. al.: Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. Environ. Res. Dresden, 2019. URL: <https://docs.wind-watch.org/Freiberg-et-al-2018.pdf>
- [Friedrich 2020] FRIEDRICH Björn, JOOST Holger, FEDTKE Thomas, VERHEY Jesko L.: Spectral integration of infrasound threshold. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Section 1.61 – Sound in Air. The Journal of Acoustical Society of America 147. Braunschweig und Magdeburg, 2020. URL: [Spectral integration of infrasound at threshold: The Journal of the Acoustical Society of America: Vol 147, No 3 \(scitation.org\)](https://www.scitation.org/journal/jasa/article/10.1121/1.5061000/1473)
- [Frings 2021] FRINGS Stephan: Die Sinne der Tiere. Lehrbuch der vergleichenden Sinnesphysiologie. Springer Verlag GmbH Deutschland. Heidelberg, 2021.
- [Fritzsche 2013] FRITZSCHE Christoph: Ein Ansatz für Schallimmissionsprognosen tieffrequenter Geräusche. Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. Jena, 2013.
- [Gilbert 1988] GILBERT K., WHITE M.: Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere, Journal of Acoustic Society, Vol. 85, No. 2, p. 630-636. Mississippi und Illinois, 1988.
- [Guicking 2016] GUICKING Dieter: Schwingungen. Theorie und Anwendungen in Mechanik, Akustik, Elektrik und Optik. Springer Vieweg Verlag. Wiesbaden, 2016.
- [Heckl 1994] HECKL M. Prof. Dr. rer. nat., MÜLLER H. A.: Taschenbuch der technischen Akustik. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, 1994.

- [Hering 2021] HERING Ekbert, MARTIN Rolf, STÖHRER Martin: Physik für Ingenieure. 13. Auflage. Springer Vieweg Verlag. Aalen und Esslingen, 2021.
- [Hopkins 2012] HOPKINS Carl: Sound Insulation. 2. Auflage. Routledge. New York, 2012.
- [ISO 28961] ISO 28961:2012(E). Acoustic – Statistical distribution of hearing thresholds of otologically normal persons in the age range from 18 years to 25 years under free-field listening conditions. International Organization for Standardization. Genf, 2012.
- [ISO 7196] ISO 7196:1995(E). Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements. International Organization for Standardization. Genf, 1995.
- [ISO 9613-2] ISO 9613-2:1996(E). Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation. International Organization for Standardization. Genf, 1996.
- [Jakobsen 2001] JAKOBSEN Jørgen: Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. Journal of low frequency noise, vibration and active control. Vol. 20 No. 3, 141-148. Copenhagen, 2001.
- [Jakobsen 2005] JAKOBSEN Jørgen: Infrasound Emission from Wind Turbines. Danish Environmental Protection Agency. Journal of low frequency noise, vibration and active control. Copenhagen, 2005.
- [Krahé 2014] KRAHÉ Detlef Prof. Dr.-Ing., SCHRECKENBERG Dirk Dr. rer. nat., EBNER Fabian, EULITZ Christian, et. al.: Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall. Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen durch unterschiedliche Quellen. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2014.
- [Krahé 2020] KRAHÉ Detlef Prof. Dr.-Ing., ALAIMO DI LORO Alexander, MÜLLER Uwe Dr. rer. nat., ELMENHORST Eva-Maria Dr. med., et. al.: Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2020.
- [Kubicek 1989] KUBICEK R. Dr.-Ing.: Vorkommen, Messung, Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall in der kommunalen Wohnwelt. Dissertation TH Zwickau. Zwickau, 1989.
- [Kuehler 2015] KUEHLER Robert, FEDTKE Thomas, HENSEL Johannes: Infrasonic and low-frequency insert earphone hearing threshold. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Section 1.61 – Sound in Air. The Journal of Acoustical Society of America 137. Braunschweig, 2015. URL: <https://asa.scitation.org/toc/jas/137/4>
- [Kurakata 2008] KURAKATA Kenji, MIZUNAMI Tazu: The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones. Journal of low frequency noise, vibration and active control, vol. 27. Multi-Science Publishing Co. Ltd.. Essex, 2008.
- [LUBW 2016] RATZEL U., BAYER O., BRACHT P., HOFFMANN M., et. al.: Tieffrequente Geräusch inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen. Bericht über

- Ergebnisse des Messprojekts 2013-2015. LUBW Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg. Karlsruhe, 2016.
- [Maijala 2020] MAIJALA P., TURUNEN A., KURKI I. VAINIO L. et. al.: Infrasound Does not Explain Symptoms Related to Wind Turbines. Publications of the Government's analysis, assessment and research activities. Helsinki, 2020.
- [Mayr 2012] MAYR Martin Prof. Dr.: Technische Mechanik. Statik – Kinematik -Kinetik – Schwingungen – Festigkeitslehre. 7., überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien. Augsburg, 2012.
- [Mellinger 2003] MELLINGER David K., CLARK Christopher W.: Blue whale (*Balaenoptera musculus*) sound from the North Atlantic. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. Oregon, 2003. URL: <ftp://newportftp.pmel.noaa.gov/newport/mellinger/papers/Mellinger+Clark03-AtlanticBlues.pdf>
- [Møeller 2002] MØELLER Henrik, LYDOLF Morten: A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. Department of Acoustics, Aalborg University. *Noise and Health*. Aalborg, 2004. URL [Hearing at low and infrasonic frequencies Moller H, Pedersen C S - Noise Health \(noiseandhealth.org\)](http://www.noiseandhealth.org)
- [Møeller 2004] MØELLER Henrik, PEDERSEN Christian Sejer: Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. Department of Acoustics, Aalborg University. VC 2011 Acoustical Society of America. [DOI: 10.1121/1.3543957]. Aalborg, 2010.
- [Møeller 2010] MØELLER Henrik, PEDERSEN Christian Sejer: Low-frequency noise from large wind turbines. Department of Acoustics, Aalborg University. VC 2011 Acoustical Society of America. [DOI: 10.1121/1.3543957]. Aalborg, 2010.
- [Möser 2004] MÖSER Michael, MÜLLER Gerhard: Taschenbuch der Technischen Akustik. 3., erweiterte und überarbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Planegg und Berlin, 2004.
- [Möser 2010] MÖSER Michael: Messtechnik der Akustik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, 2010.
- [Möser 2015] MÖSER Michael: Technische Akustik. 10. Auflage. Springer Vieweg Verlag. Berlin, 2015.
- [Möser 2017] MÖSER Michael, MÜLLER Gerhard: Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer Vieweg Verlag. Heidelberg, 2017.
- [NORD 2000] DELTA: Report. Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000. Summary Report. General Nordic Sound Propagation Model and Applications in Source-Related Prediction Methods. Lyngby, 2002. URL: <https://forcetechnology.com/-/media/force-technology-media/pdf-files/projects/nord2000/nordic-environmental-noise-prediction-methods-nord2000-summary-report---prediction-methods.pdf>

- [RKI 2007] ROBERT-KOCH-INSTITUT: Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland? Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“. Springer Medizin Verlag. Berlin, 2007.
- [Sarradj 2009] SARRADJ E.: Numerische Akustik. Beitrag aus der Vortragsreihe „Medizinische Akustik und Audiologie. Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH. 2009. URL: <http://medi.uni-oldenburg.de/download/docs/lehre/pichl09/pichl09.pdf>
- [Schmidt 2016] SCHMIDT Manfred Dr.: Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680. Müller-BBM GmbH. Planegg bei München, 2016.
- [Schmitter 2022] SCHMITTER Sebastian, DI LORO Alexander Alaimo, HEMMER Dominic, SCHRECKENBERG Dirk Dr., GROßARTH Stephan, et. al.: Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land. Herausgeber: Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, 2022.
- [Schulze 2021] SCHULE Christian Dr.-Ing., ECKERT Lucas, HÜBELT Jörn Prof. Dr.-Ing.: Untersuchungen zur Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen. Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Dresden, 2021.
- [Sinambari 2020] SINAMBARI Gh. Reza, SENTPALI Stefan: Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Übungen. 6., überarbeitete Auflage. Springer Vieweg Verlag. Weisenheim am Berg und München, 2020.
- [Skudrzyk 1954] SKUDRZYK E.: Die Grundlagen der Akustik. Volume 1. 1. Auflage. Springer-Verlag Wien GmbH. Wien, 1954.
- [Watanabe 2002] WATANABE Toshio, YAMADA Shinji: Study on Perception of Complex Low Frequency Tones. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 123-130. Iwaki, 2002.
- [Weichenberger 2017] WEICHENBERGER M., BAUER M., KÜHLER R., HENSEL J., et. al.: Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold – Evidence from fMRI. PloS One 12(4): e0174420. Berlin und Hamburg, 2017. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0174420>
- [Weinzierl 2008] WEINZIERL Stefan: Handbuch der Audiotechnik Band I. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, 2008.
- [Yeowart 1967] YEOWART N.S., BRYAN M.E., TEMPEST W.: The monaural M.A.P. Threshold of hearing at frequencies from 1.5 to 100 c/s, Journal Sound Vibration (1967), 6(3), 335-342. Washington, 1967.

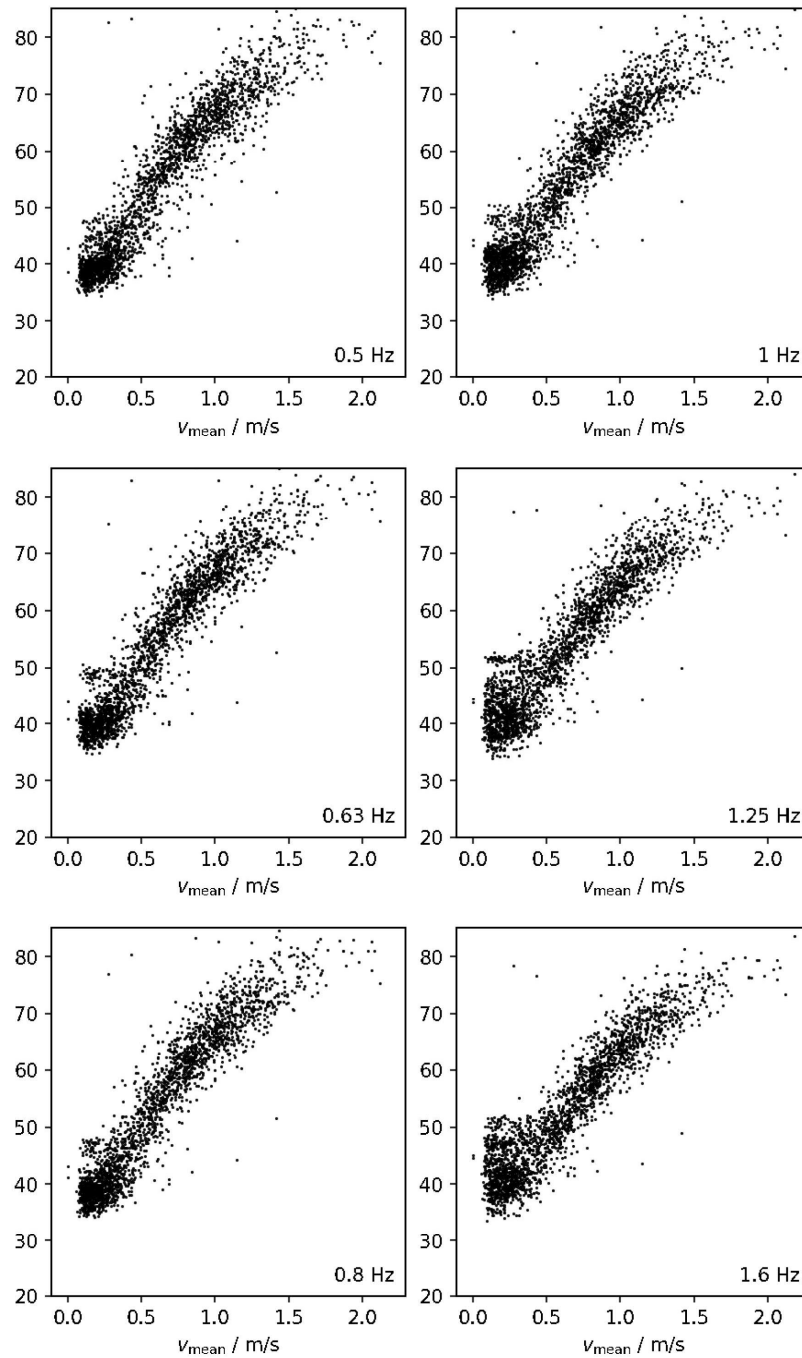
-
- [Yeowart 1969] YEOWART N.S., BRYAN M.E., TEMPEST W.: Low-Frequency Noise Thresholds. *Journal Sound Vibration* (1969), 9(3), 447-453. Washington, 1969.
- [Zagubień 2016] ZAGUBIEŃ A., WOLNIEWICZ K.: Everyday Exposure to Occupational/Non-Occupational Infrasound Noise in Our Life. PAN-IPPT. *Archives of Acoustics* Vol. 41, No. 4, p. 659-668. Koszalin, 2016.

Anlagen, Teil 1: Messauswertung Versuch 1

L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon): Terzen 0,5 Hz-1,6 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:

10 min $LeqCH1 / v_{mean}$
ungefiltert

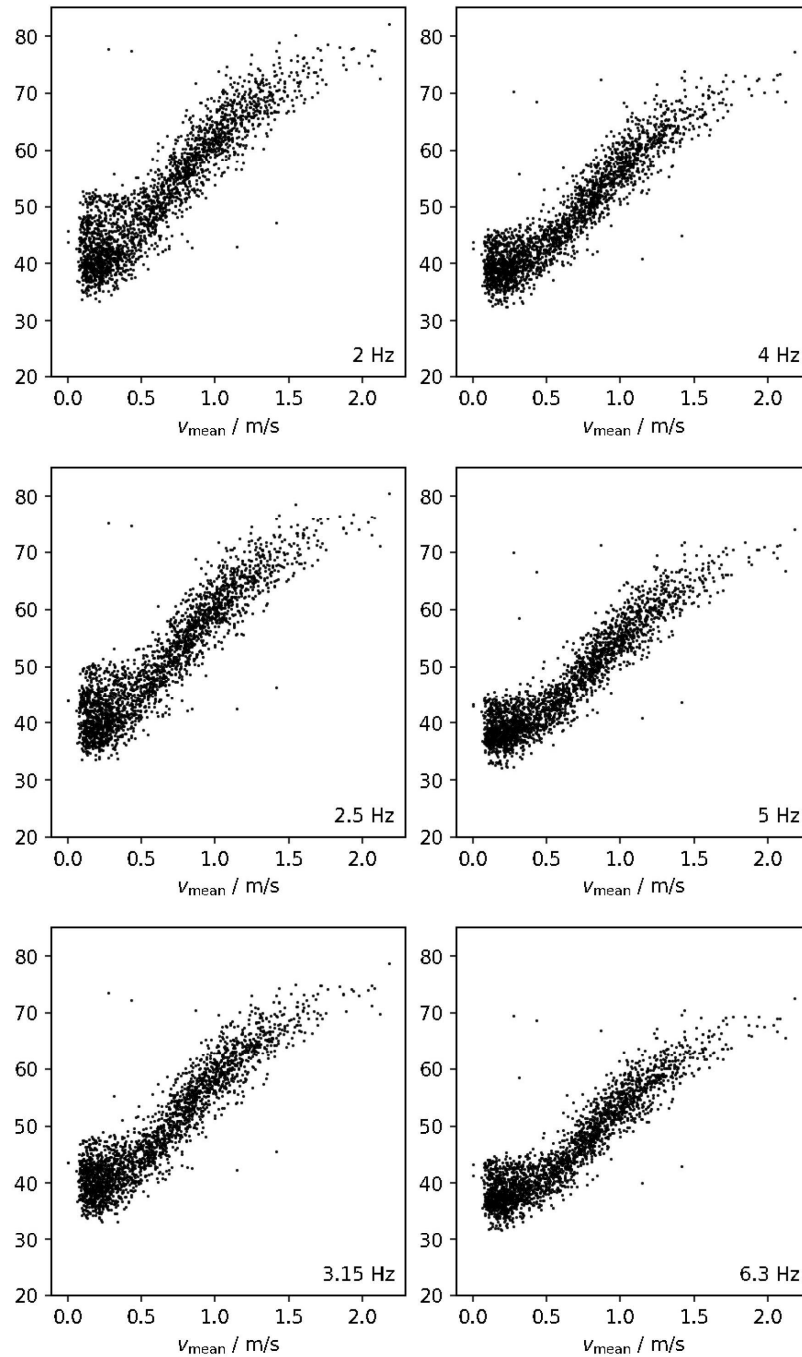
Terzen 0.5 Hz – 1.6 Hz
 Leq in dB(Z)



L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon): Terzen 2 Hz-6,3 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:

10 min $LeqCH1 / v_{mean}$
ungefiltert

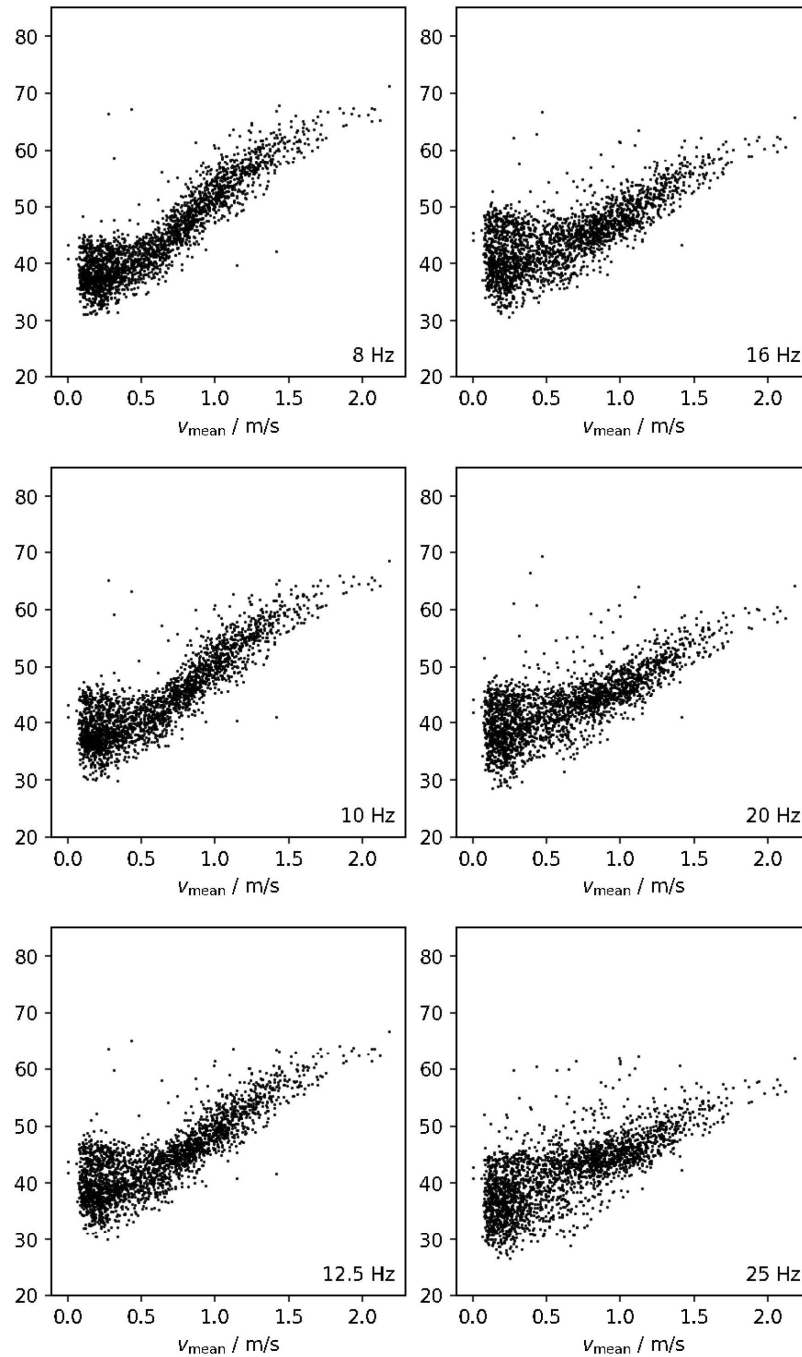
Terzen 2 Hz – 6.3 Hz
 Leq in dB(Z)



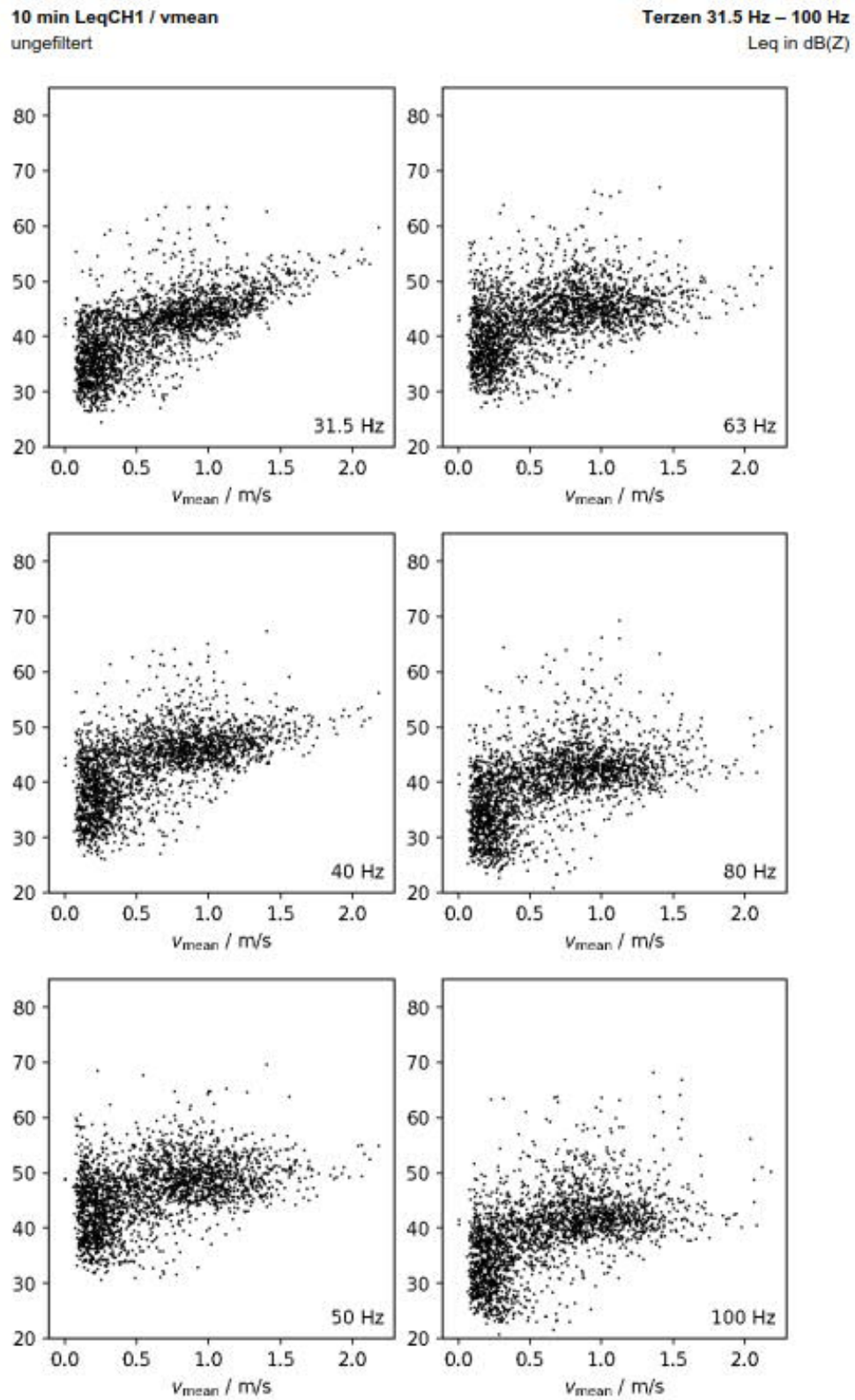
L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon): Terzen 8 Hz-25 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:

10 min $LeqCH1 / v_{mean}$
ungefiltert

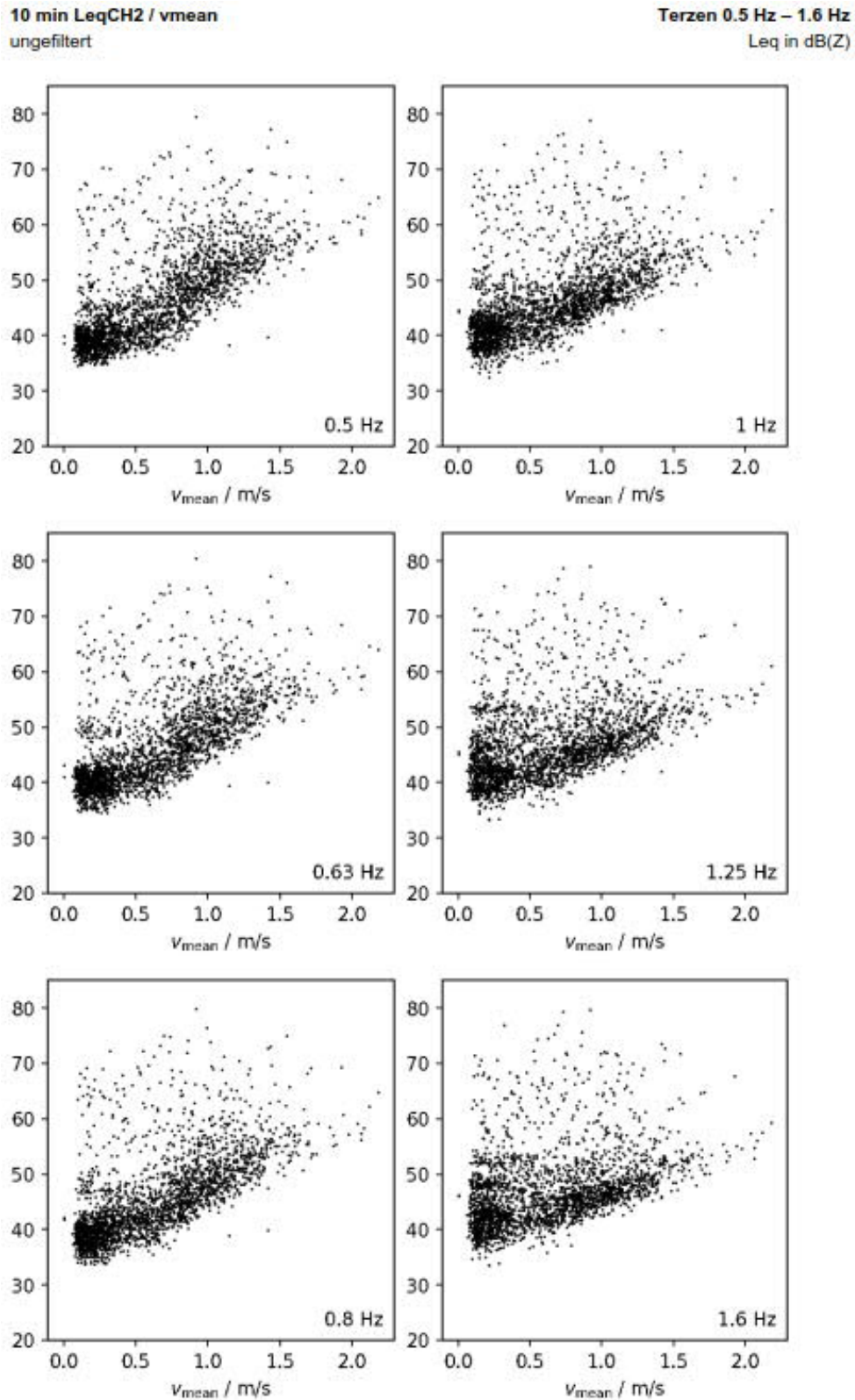
Terzen 8 Hz – 25 Hz
 Leq in dB(Z)



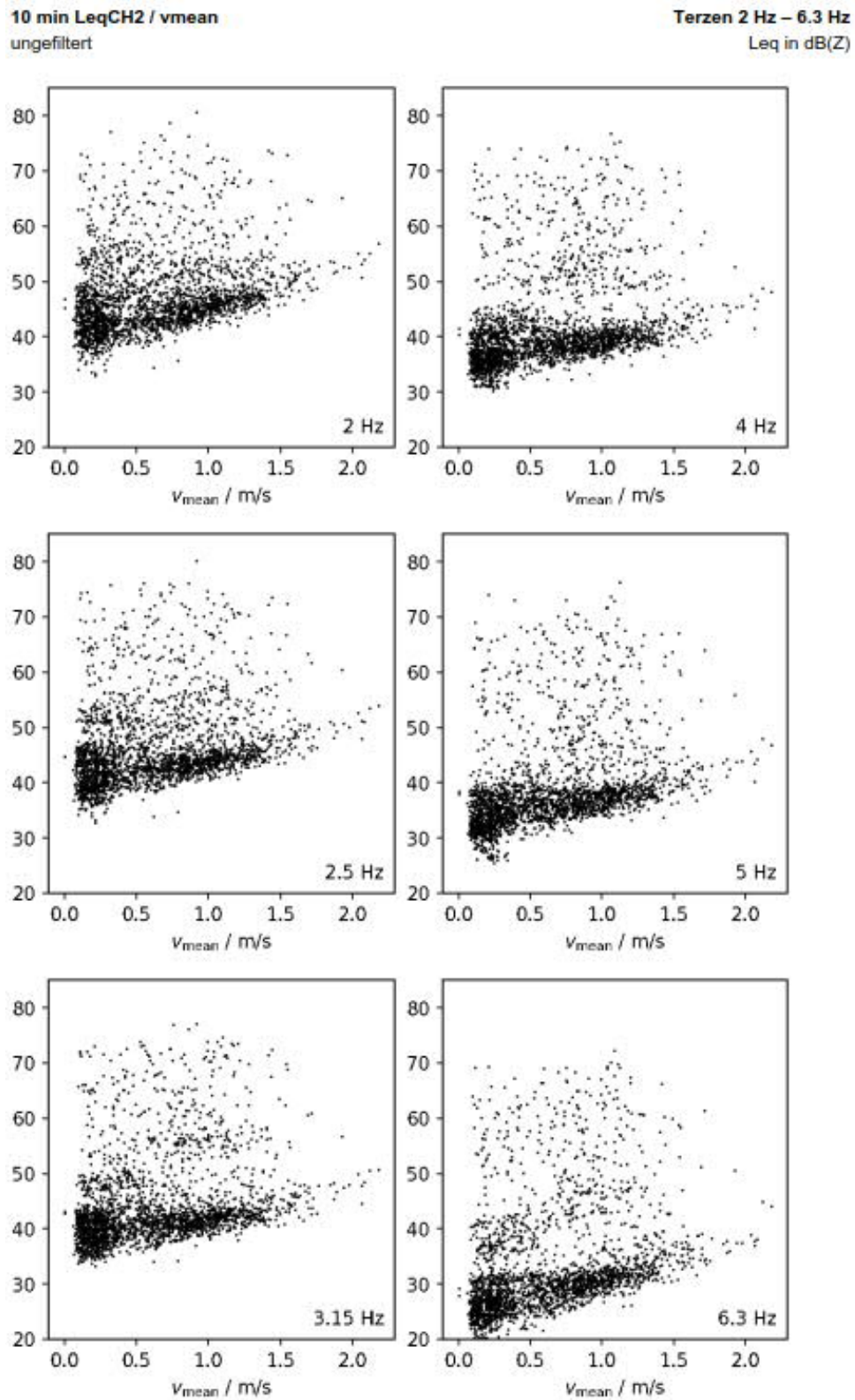
L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon): Terzen 31,5 Hz-100 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



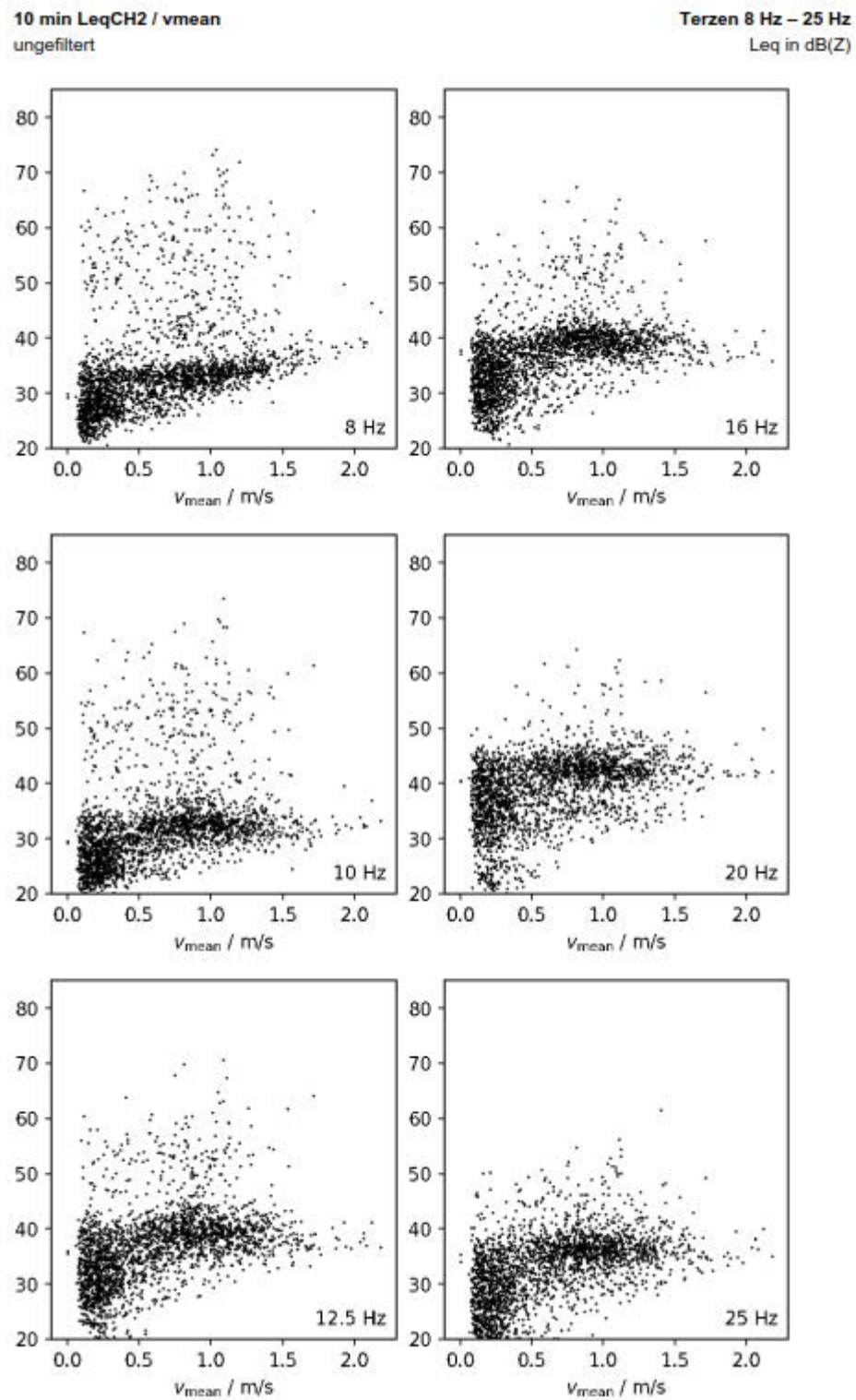
L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 2 (Innenmikrofon): Terzen 8 Hz-25 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



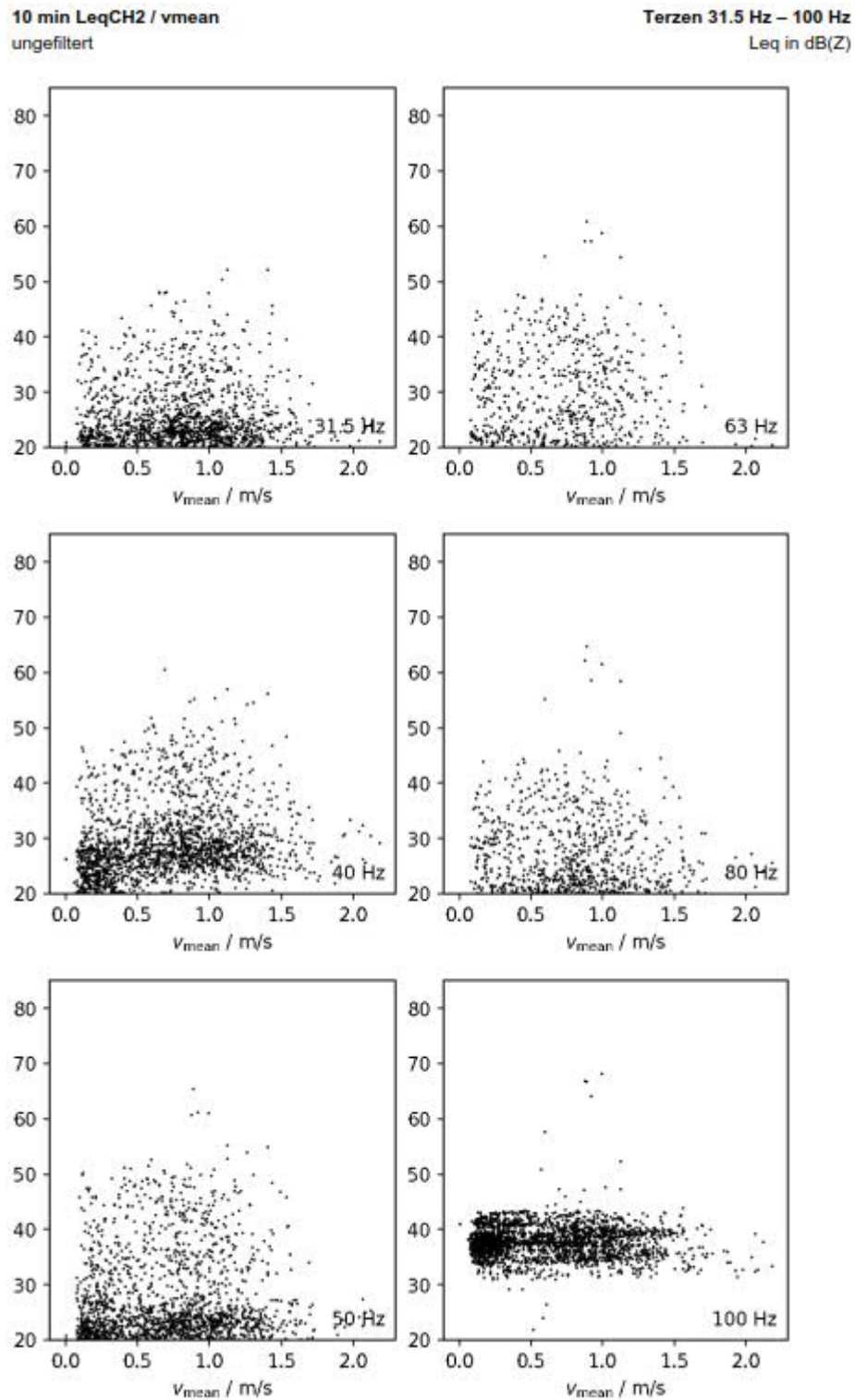
L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 2 (Innenmikrofon): Terzen 2 Hz-6,3 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 2 (Innenmikrofon): Terzen 8 Hz-25 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:

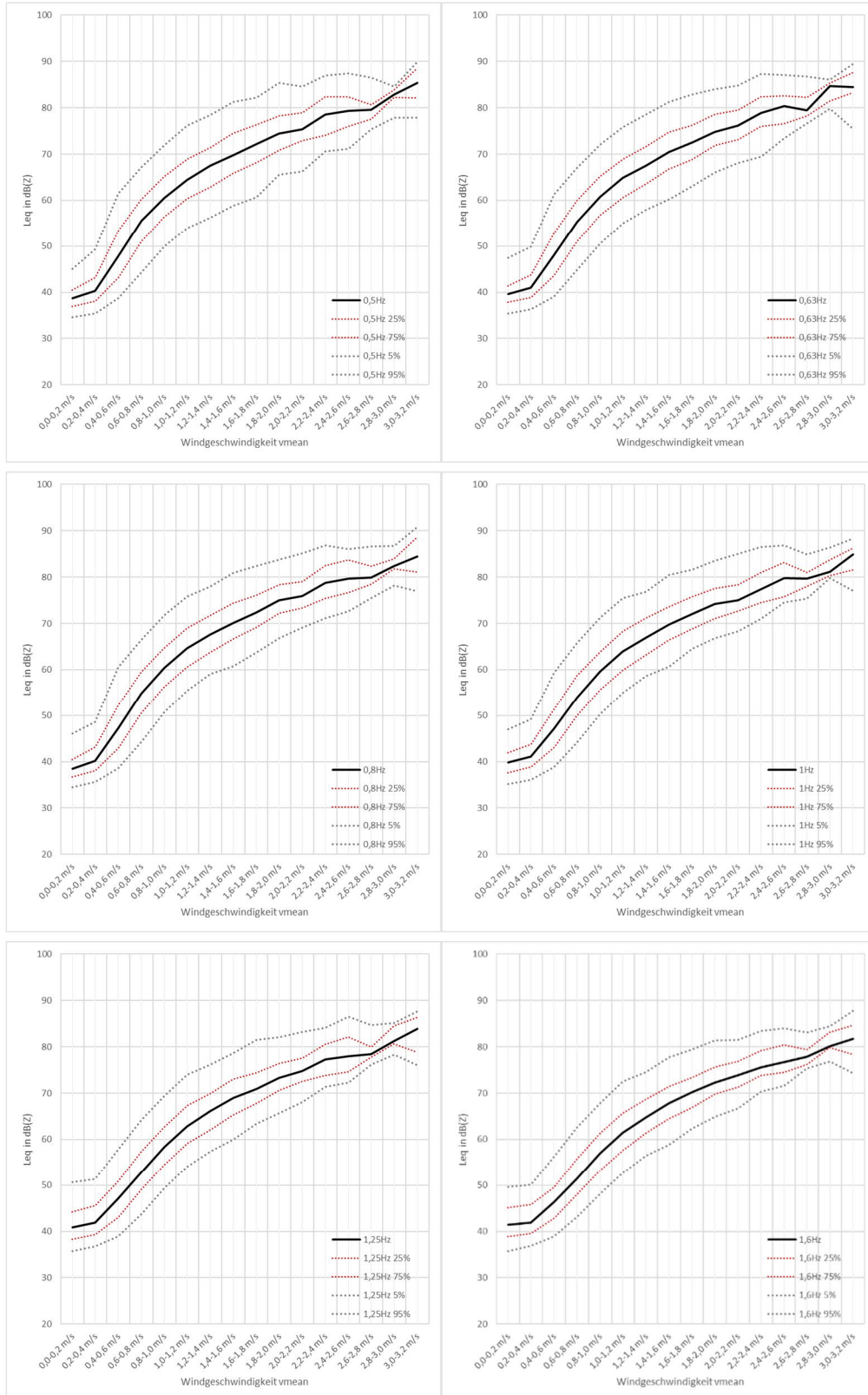


L_{Zeq} in dB(Z) Kanal 2 (Innenmikrofon): Terzen 31,5 Hz-100 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:

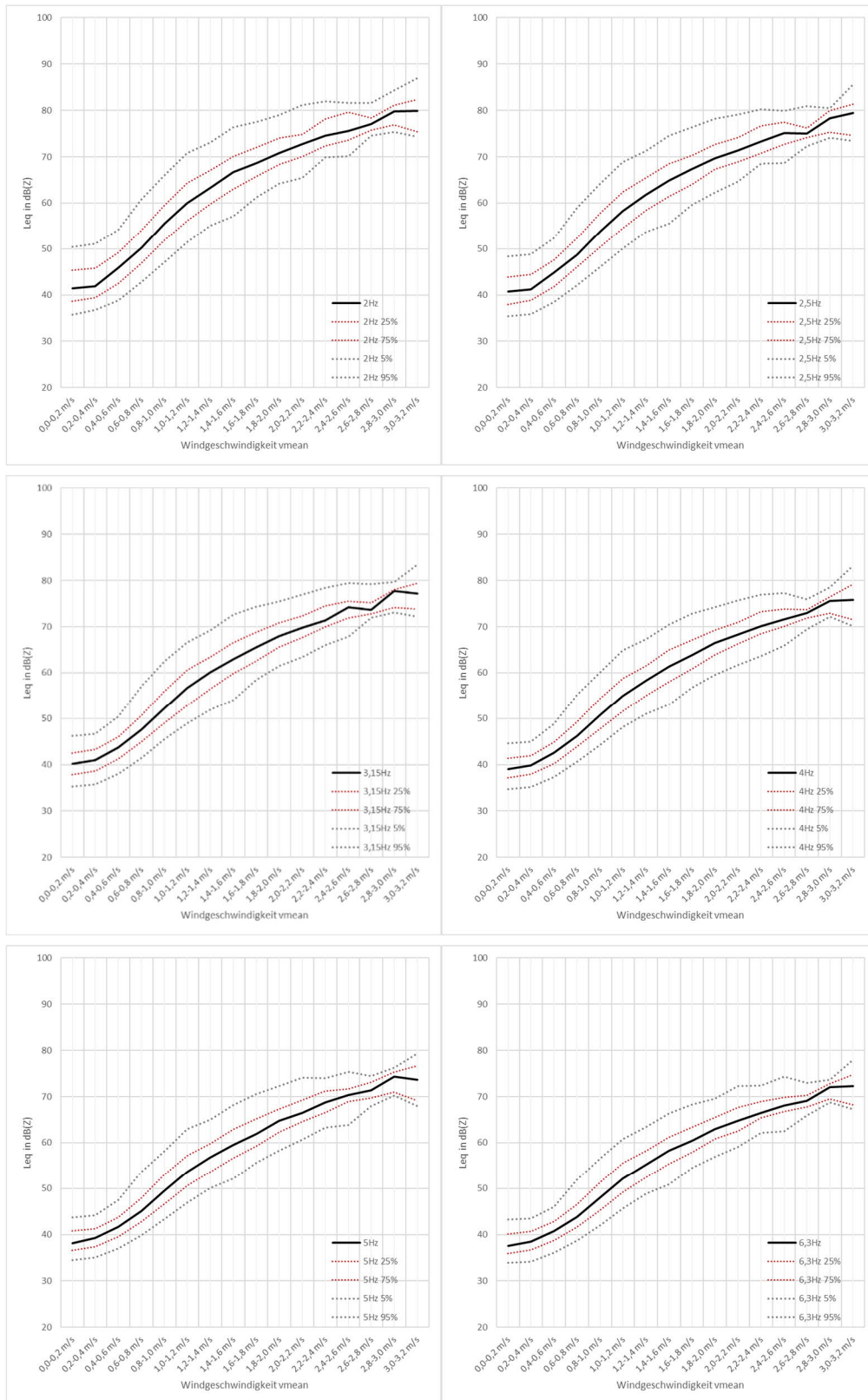


Anlagen, Teil 2: Statistikauswertung Versuch 1

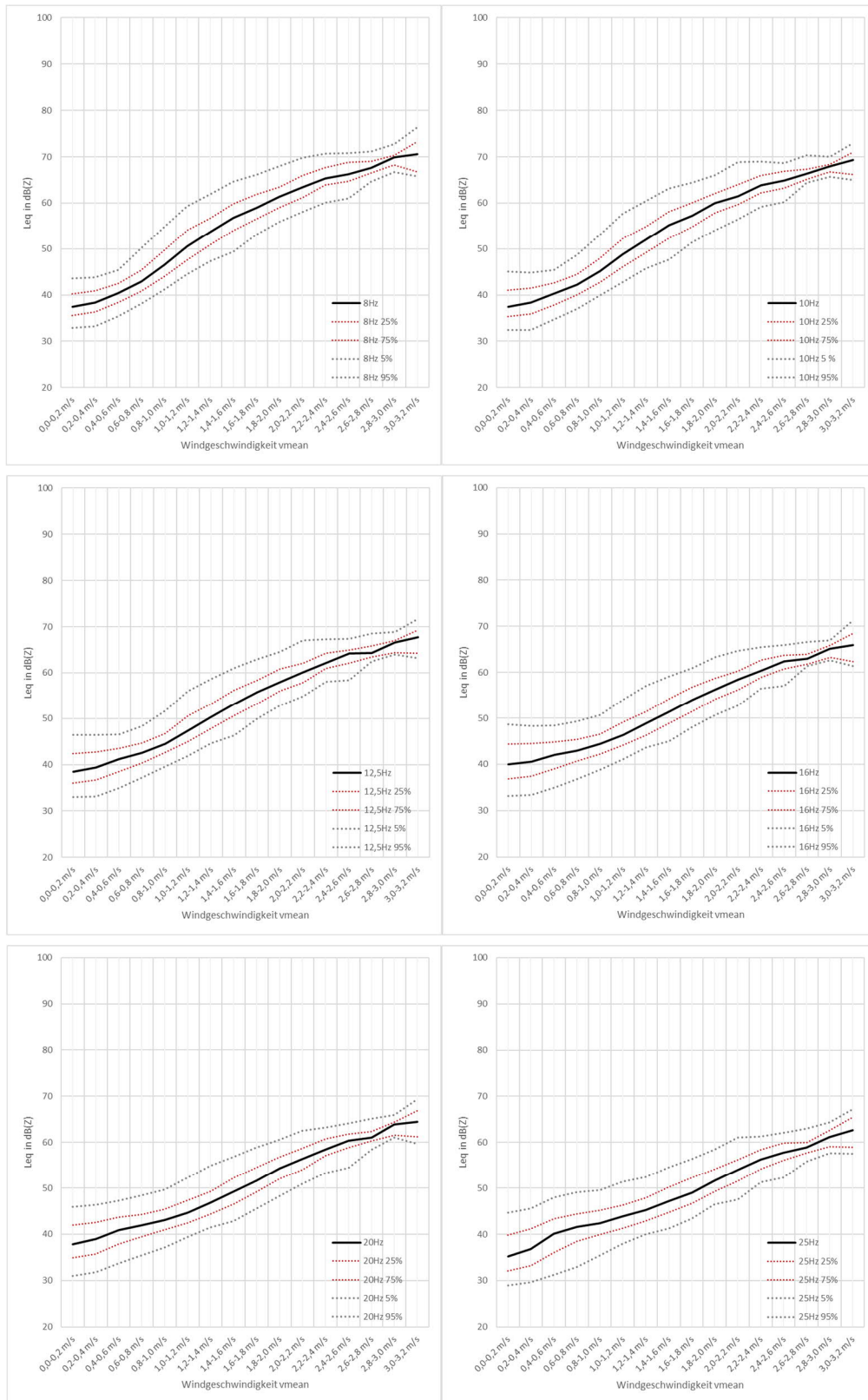
L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon) Terzen 0,5 Hz- 1,6 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



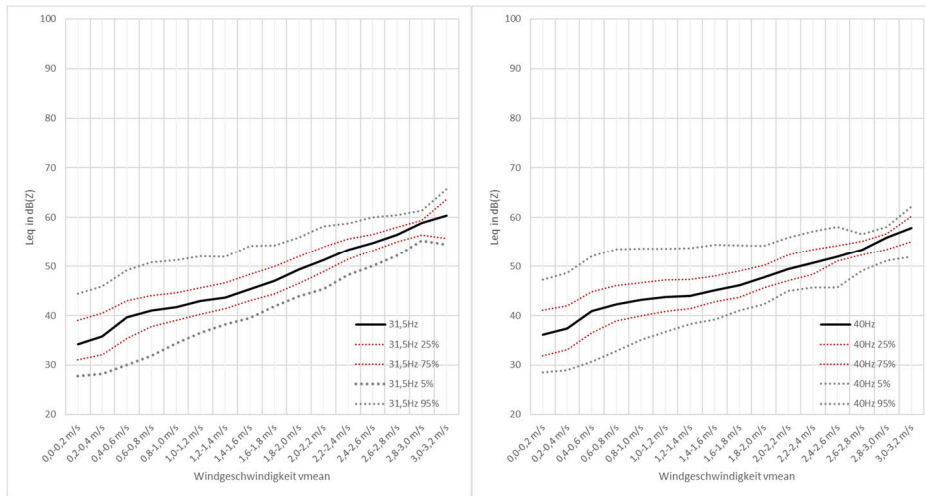
L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon) Terzen 2 Hz- 6,3 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



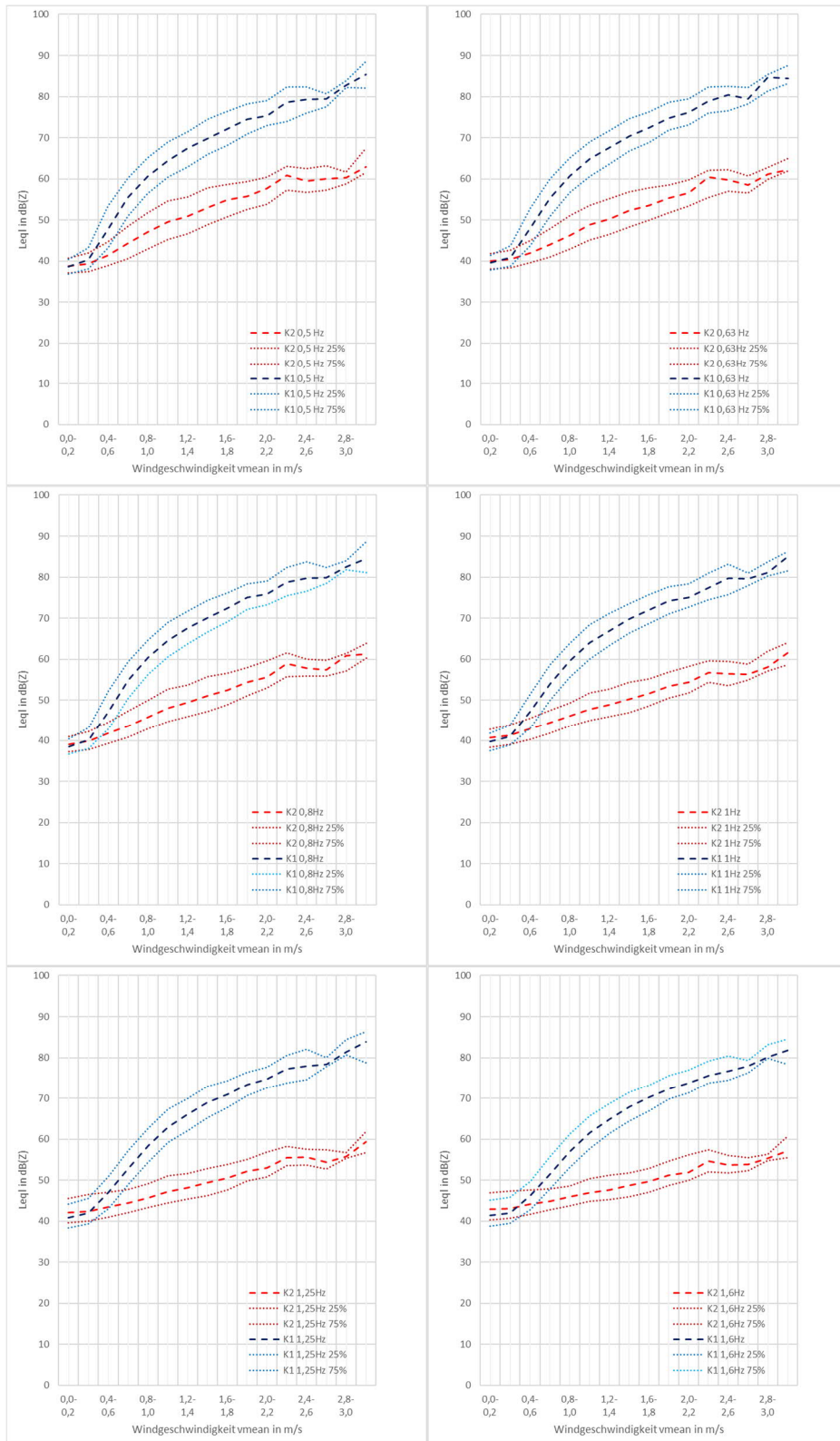
L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon) Terzen 8 Hz- 25 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



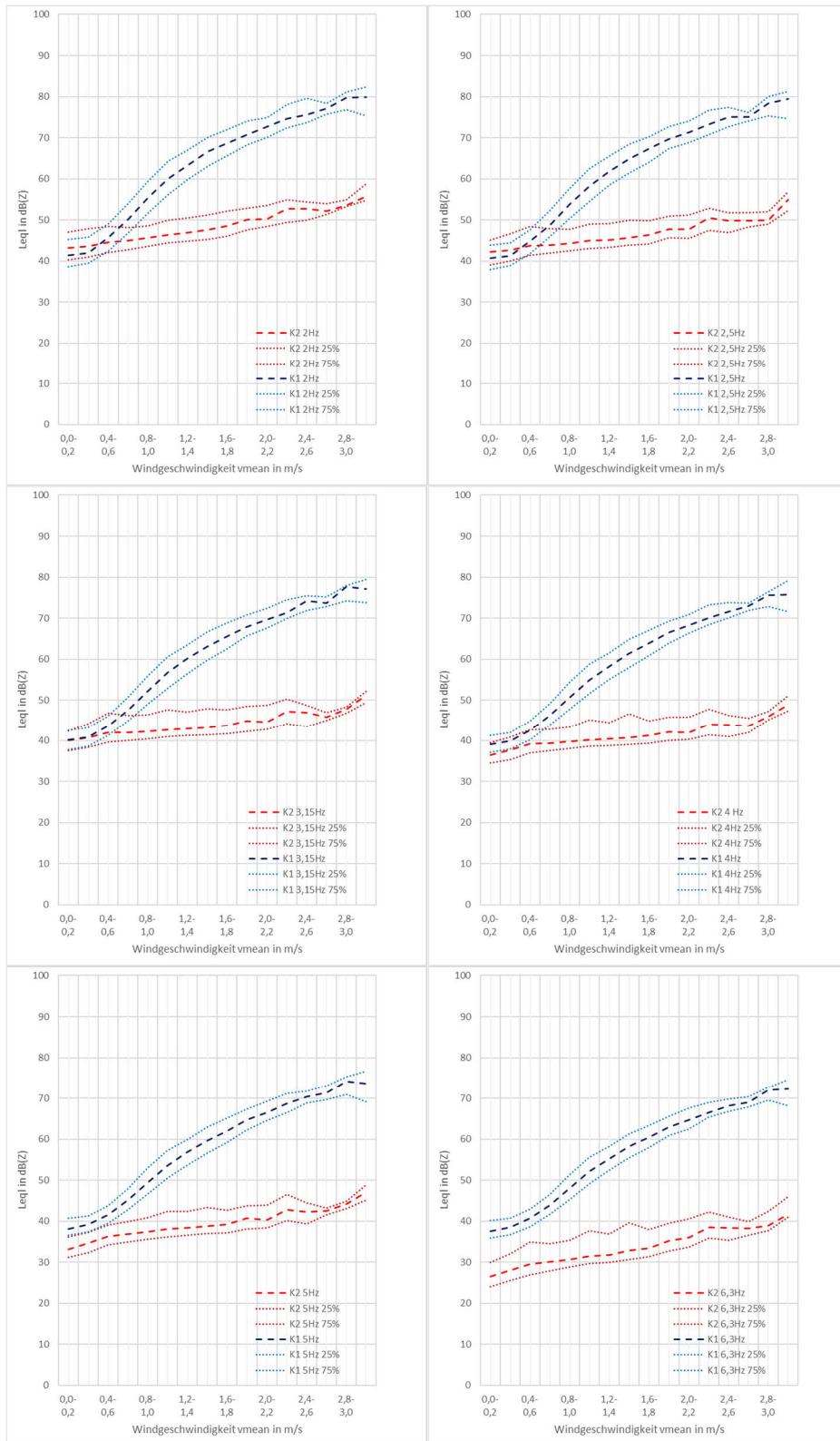
L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon) Terzen 31,5 Hz- 40 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



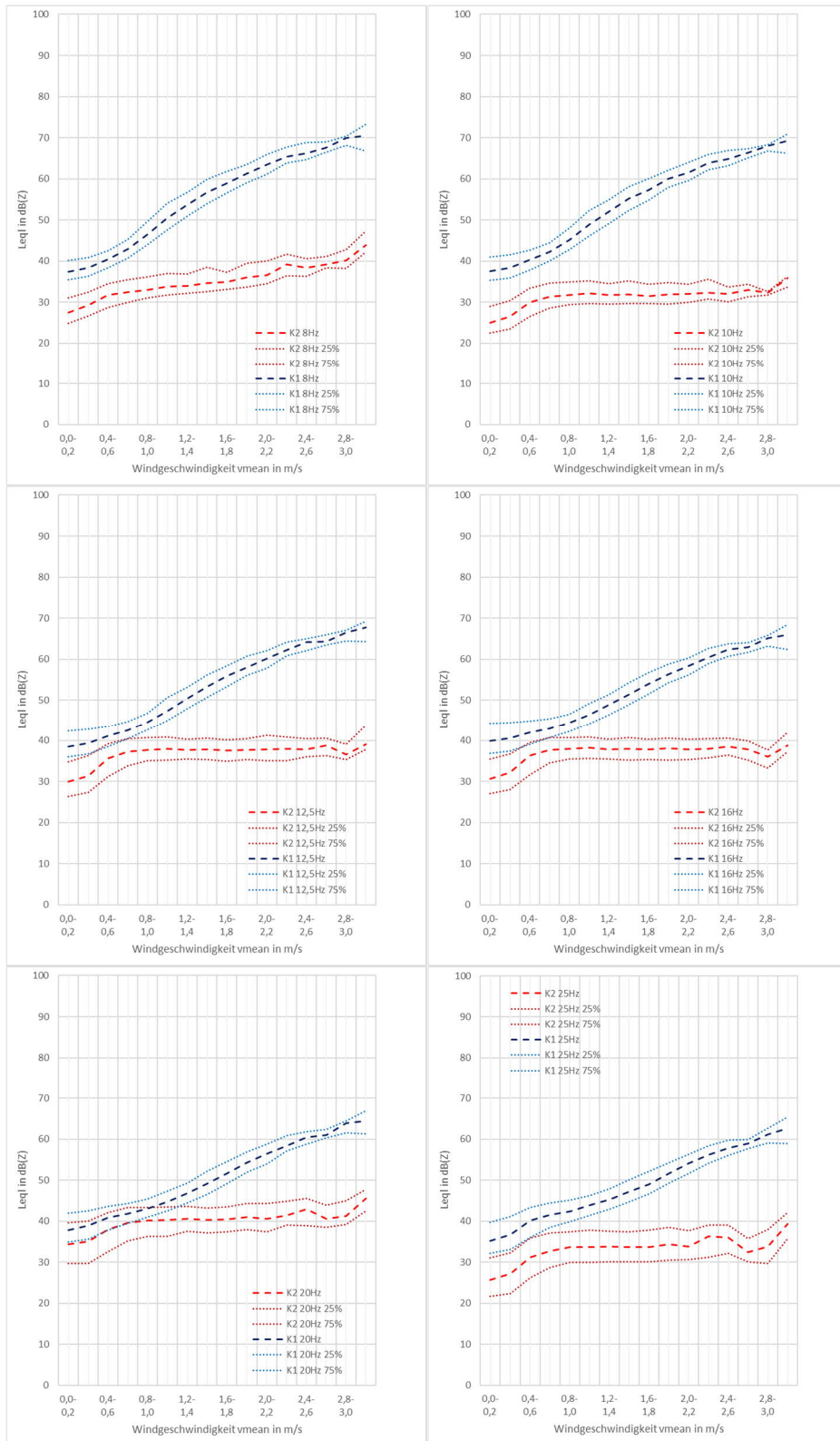
L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon = blau) und Kanal 2 (Innenmikrofon = rot)
 Terzen 0,5 Hz- 1,6 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



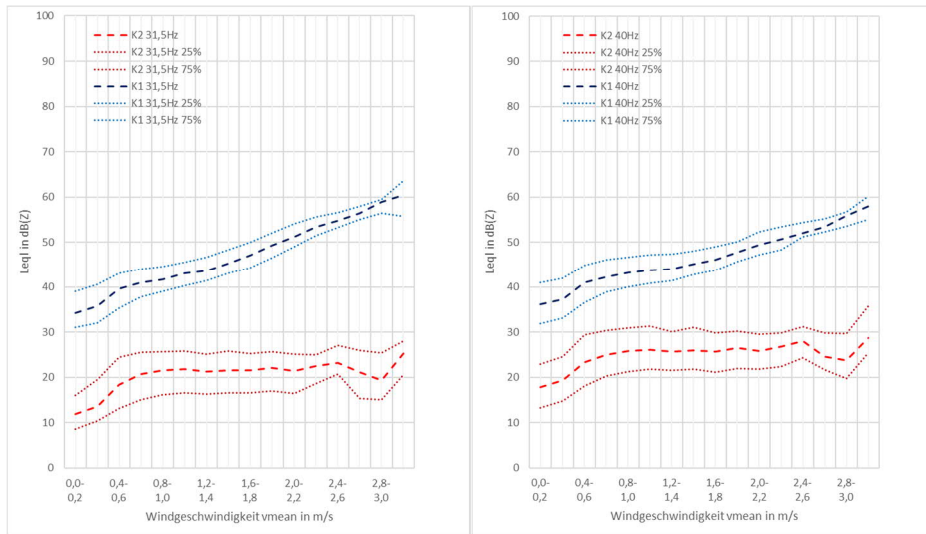
L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon = blau) und Kanal 2 (Innenmikrofon = rot)
 Terzen 2 Hz- 6,3 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon = blau) und Kanal 2 (Innenmikrofon = rot)
 Terzen 8 Hz- 25 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:



L_{Zeq} Quantile in dB(Z) Kanal 1 (Außenmikrofon = blau) und Kanal 2 (Innenmikrofon = rot)
 Terzen 31,5 Hz- 40 Hz in Abhängigkeit der Wind-geschwindigkeit:


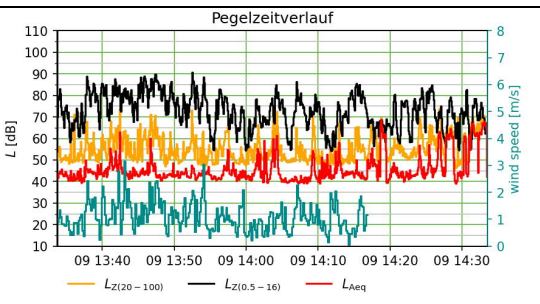
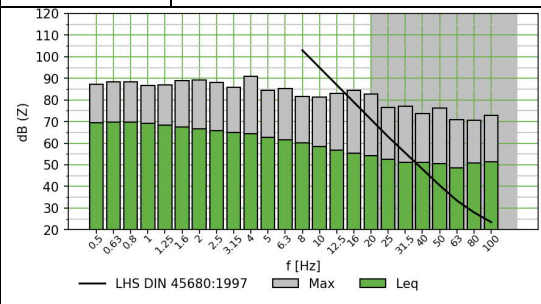
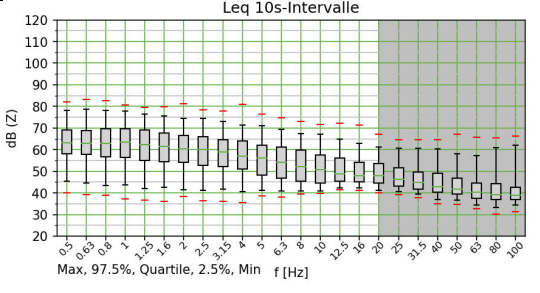
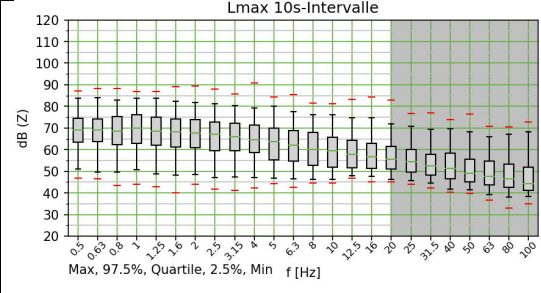
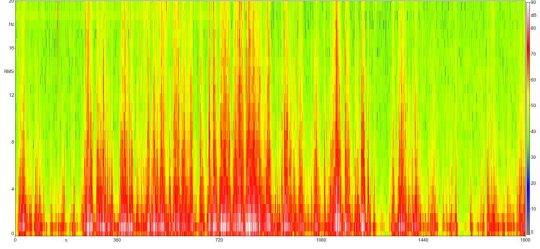
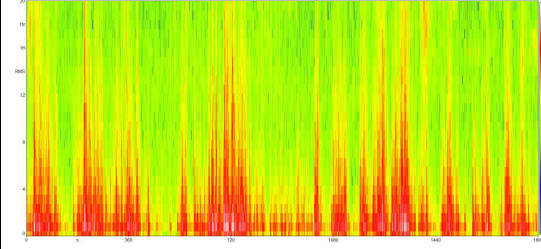


Anlagen, Teil 3: Messprotokoll Querschnittserhebung

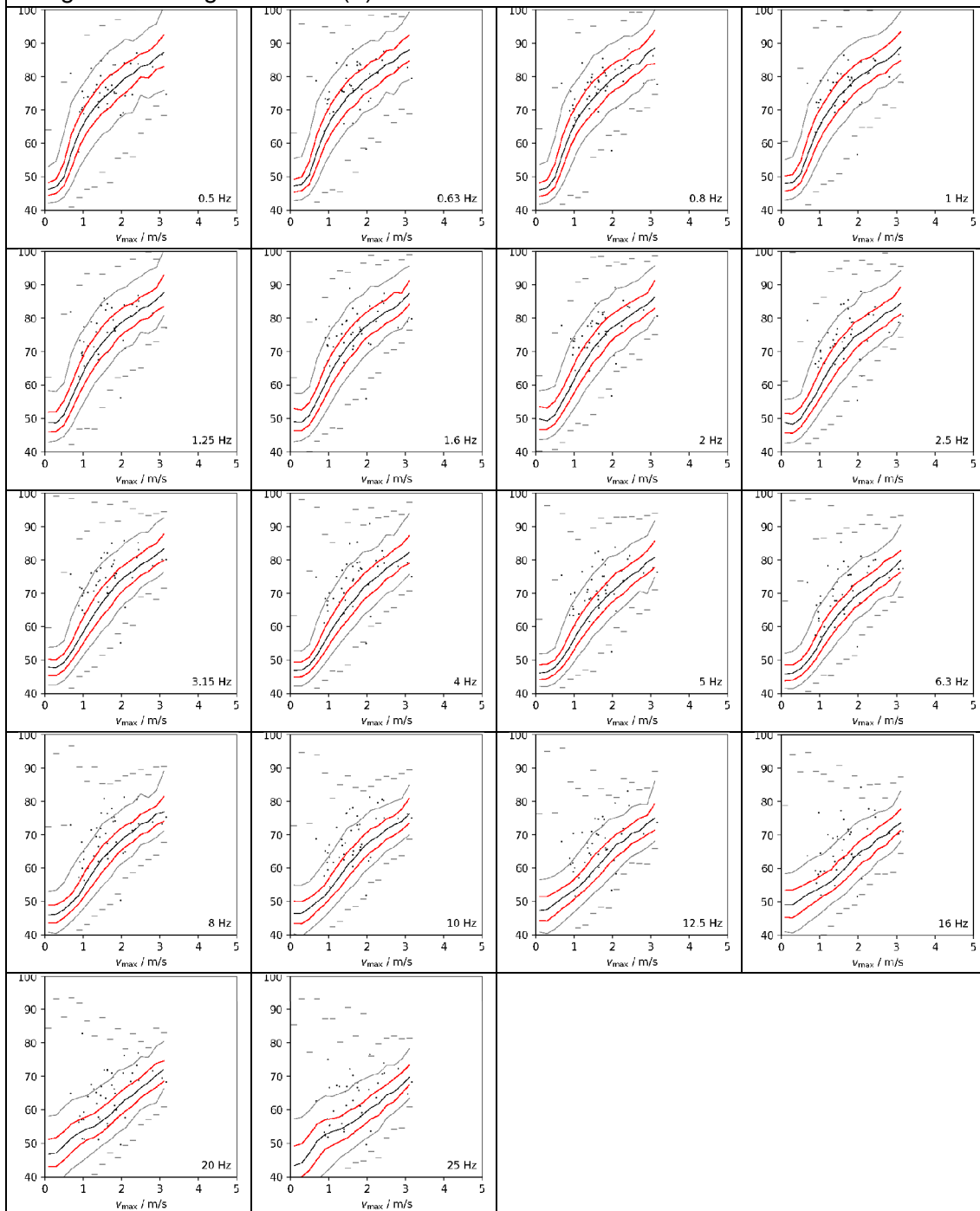
Messung Nr.	Messzeit	Messdatum	Messort	Witterung	Bemerkung
T01/ 0001	13:00-14:00	09.09.2022	Oranienburg	sonnig	Mittelstadt
N01/ 0002	21:41-06:41	09.09.2022	Usedom	bedeckt	Küste/ Kleinstadt
T02/ 0003	09:51-10:51	10.09.2022	Neukalen	sonnig	Dorf
T03/ 0004	12:05-13:05	10.09.2022	Rostock	sonnig	Küstenregion/ Großstadt
T04/ 0005	14:15-15:15	10.09.2022	Klütz	bedeckt	Küstenregion/ Dorf
T05/ 0006	16:30-17:30	10.09.2022	Ratzeburg	bedeckt	Küstenregion/ Kleinstadt
T06/ 0007	19:00-20:00	10.09.2022	Lütjenburg	bedeckt	Küstenregion/ Kleinstadt
N02/ 0008	21:41-03:41	10.09.2022	Sehendorf	bedeckt	Küste/ Dorf
T07/ 0009	09:25-10:25	11.09.2022	Rausdorf	sonnig	Küstenregion/ Dorf
T08/ 0010	12:00-13:00	11.09.2022	Hamburg	sonnig	Küste/ Großstadt
T09/ 0011	13:56-14:56	11.09.2022	Zeven	sonnig	Küstenregion/ Mittelstadt
T10/ 0012	15:45-16:45	11.09.2022	Vollersrode	sonnig	Küstenregion/ Dorf
T11/ 0013	18:37-19:37	11.09.2022	Muggenkrüge	sonnig	Küstenregion/ Einsiedlerhof
N03/ 0014	22:00-6:00	11.09.2022	Dornumersiel	sonnig	Küste/ Dorf
T12/ 0015	09:36-10:36	12.09.2022	Edewecht	bedeckt	Mittelstadt
T13/ 0016	11:41-12:41	12.09.2022	Visbek	bedeckt	Kleinstadt
T14/ 0017	14:36-15:36	12.09.2022	Steyerberg	bedeckt	Kleinstadt
T15/ 0018	17:08-18:08	12.09.2022	Hannover	bedeckt	Großstadt
N04/ 0019	22:00-06:00	12.09.2022	Egeln	bedeckt	Dorf
T16/ 0020	09:32-10:32	13.09.2022	Merzien	bedeckt	Dorf
T17/ 0021	11:38-12:38	13.09.2022	Bad Dübén	bedeckt	Kleinstadt
T18/ 0022	13:34-14:34	13.09.2022	Beilrode	bedeckt	Dorf
T19/ 0023	15:23-16:23	13.09.2022	Strehla	bedeckt	Dorf
T20/ 0024	17:37-18:37	13.09.2022	Pohrsdorf	bedeckt	Dorf
N05/ 0025	22:00-6:00	13.09.2022	Pauldorf	bedeckt	Dorf
T21/ 0026	08:36-09:36	14.09.2022	Eppendorf	bedeckt	Dorf
T22/ 0027	10:39-11:39	14.09.2022	Chemnitz	regen	Großstadt
T23/ 0028	13:37-14:37	14.09.2022	Röthenitz	regen	Dorf
T24/ 0029	15:26-16:26	14.09.2022	Wetterzeube	regen	Dorf
N06/ 0030	22:00-06:00	14.09.2022	Nesetal	Achtung	Dorf/ WEA
T25/ 0031	09:13-10:13	15.09.2022	Eschwege	bedeckt	Mittelstadt


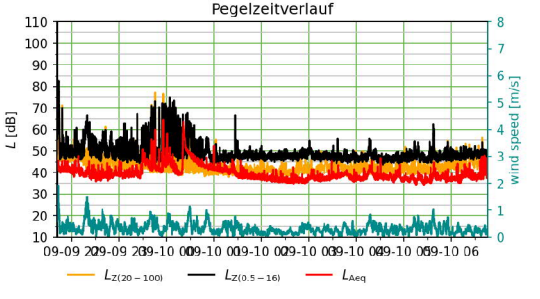
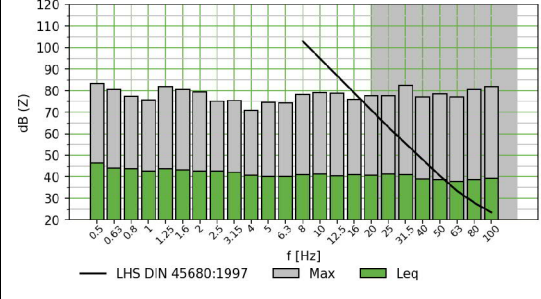
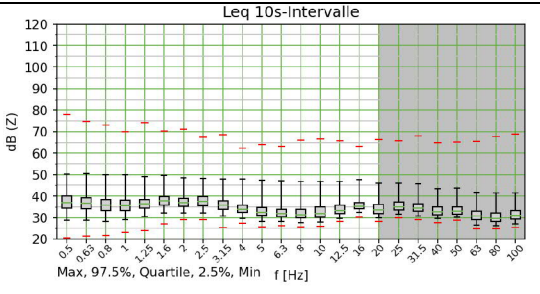
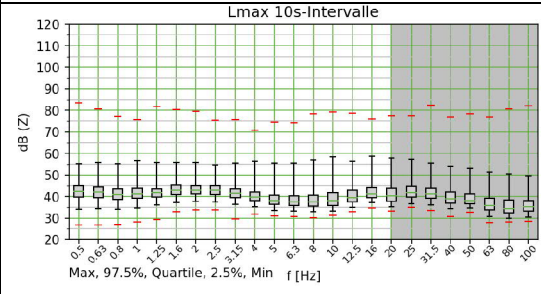
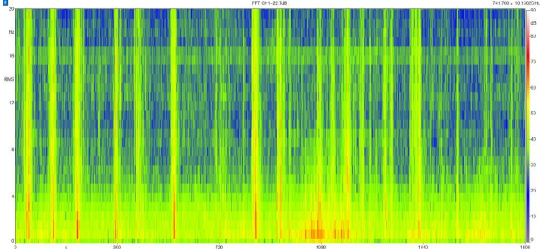
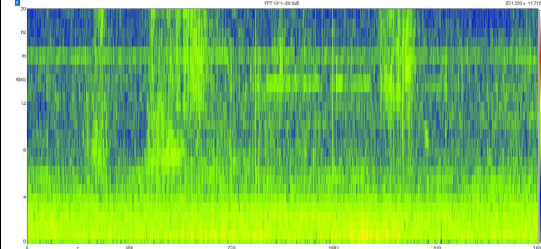
Messung Nr.	Messzeit	Messdatum	Messort	Witterung	Bemerkung
T26/ 0032	11:42-12:42	15.09.2022	Göttingen	bedeckt	Großstadt
T27/ 0033	13:43-14:43	15.09.2022	Haan-Münden	Sonnig	Mittelstadt
T28/ 0034	16:01-17:01	15.09.2022	Waldeck	Sonnig	Dorf
N07/ 0035	22:00-06:00	15.09.2022	Oberbüschem	bedeckt	Dorf
T29/ 0036	08:35-09:35	16.09.2022	Neukirchen	Bedeckt	Dorf
T30/ 0037	10:25-11:25	16.09.2022	Swistal	windig	Dorf
T31/ 0038	12:22-13:22	16.09.2022	Ramersbach	bedeckt	Dorf
T32/ 0039	15:05-16:05	16.09.2022	Zell/Mosel	sonnig	Dorf
T33/ 0040	17:09-18:09	16.09.2022	Schöneberg	bedeckt	Dorf
N08/ 0041	23:00-06:00	16.09.2022	Lindenberg (Pfalz)	bedeckt	Dorf
T34/ 0042	09:08-10:08	17.09.2022	Heidelberg	bedeckt	Großstadt
T35/ 0043	13:11-14:11	17.09.2022	Ober-Ramstedt	bedeckt	Kleinstadt/ WEA 2km
T36/ 0044	16:07-17:07	17.09.2022	Neu-Anspach	windig	Kleinstadt
N09/ 0045	22:00-06:00	17.09.2022	Bad Nauheim	bedeckt	Kleinstadt
T37/ 0046	09:02-10:02	18.09.2022	Bad Nauheim	windig	Kleinstadt
T38/ 0047	11:29-12:29	18.09.2022	Großostheim	Windig	Kleinstadt
T39/ 0048	14:22-15:22	18.09.2022	Assamstadt	Windig	Kleinstadt
T40/ 0049	16:08-17:08	18.09.2022	Fuchsstadt	Windig	Dorf
T42/ 0050	08:43-09:43	19.09.2022	Bischwind	regen/wind	Dorf
T43/ 0051	11:07-12:07	19.09.2022	Bamberg	Windig	Großstadt
T44/ 0052	14:39-15:39	19.09.2022	Weiden	Windig	Dorf
T45/ 0053	16:59-17:59	19.09.2022	Fronhof	Windig	Dorf/ Dauergeräusch 25Hz
N10/ 0054	22:00-06:00	19.09.2022	Rieden	regen/wind	Dorf
T46/ 0056	08:21-09:21	20.09.2022	Freystadt	bedeckt	Dorf
T47/ 0057	10:59-11:59	20.09.2022	Munningen	sonnig	Dorf/ Dauergeräusch 16Hz
T48/ 0058	13:38-14:38	20.09.2022	Wöllingen	sonnig	Dorf
T49/ 0059	17:44-18:44	20.09.2022	Althengstedt	sonnig	Dorf
N11/ 0060	22:00-06:00	20.09.2022	Meißen	sonnig	Kleinstadt
T50/ 0061	08:28-09:28	21.09.2022	Überlingen	sonnig	Mittelstadt
T51/ 0062	11:11-12:11	21.09.2022	Isny	sonnig	Kleinstadt

Anlagen, Teil 4: Messauswertung Querschnittserhebung

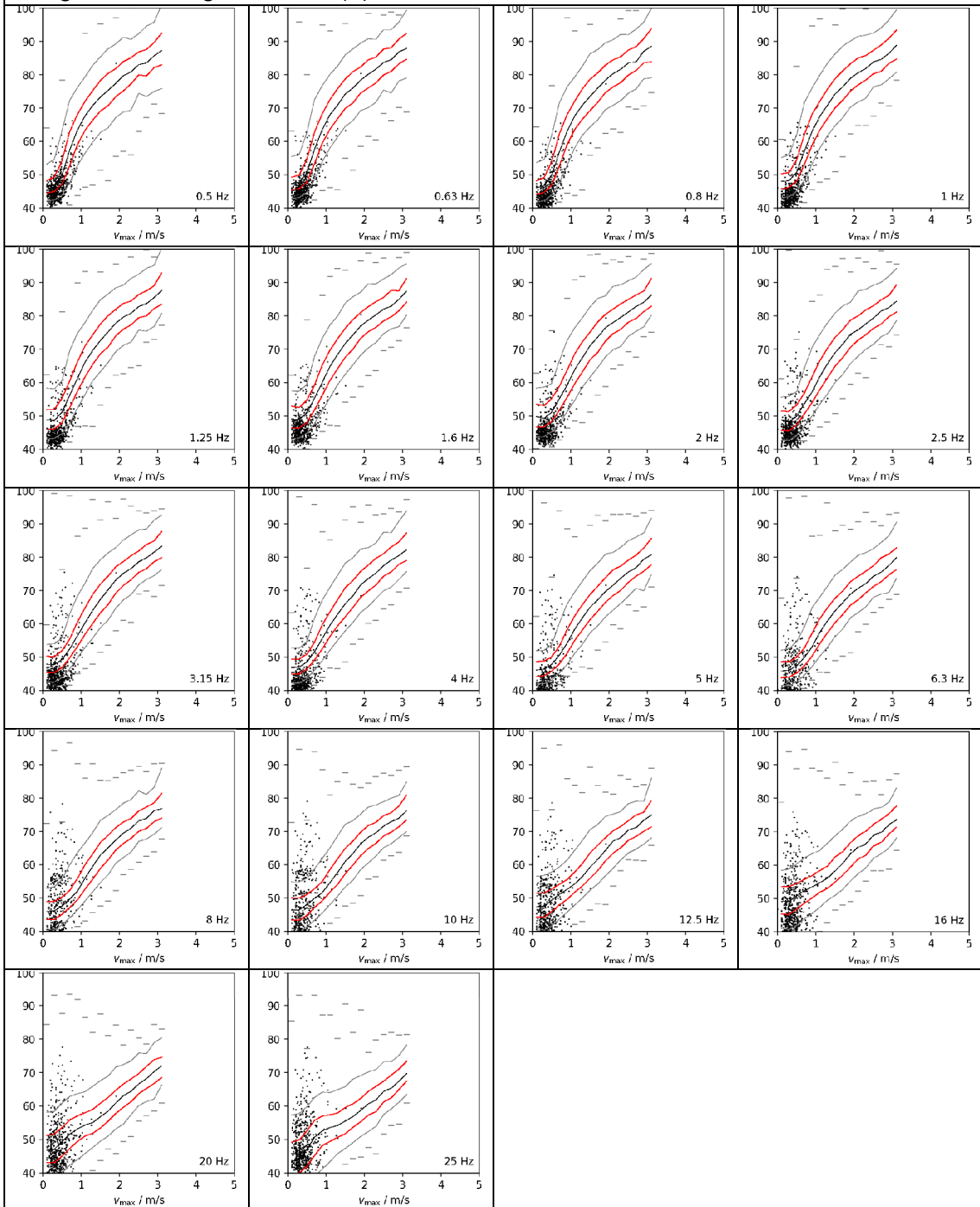
T01: Oranienburg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Oranienburg	
			Datum:	09.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Mittelstadt	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
78,5 dB(Z)	76,1 dB(Z)	60,6 dB(Z)	68,4 dB(G)	61,6 dB(C)	53,5 dB(A)


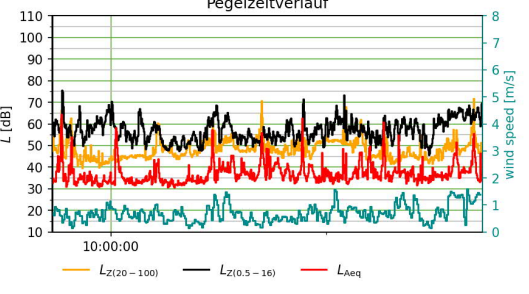
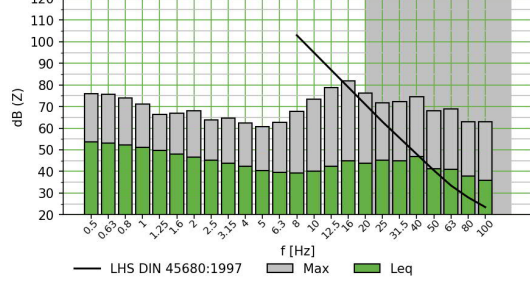
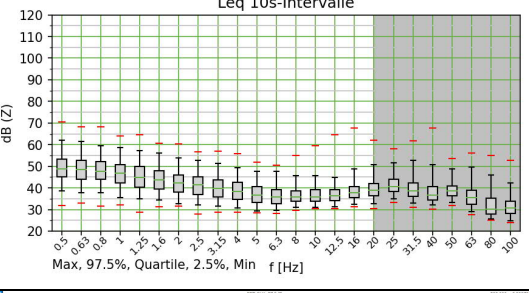
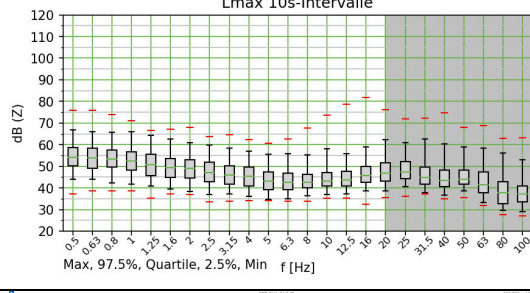
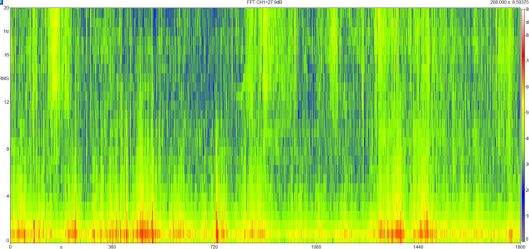
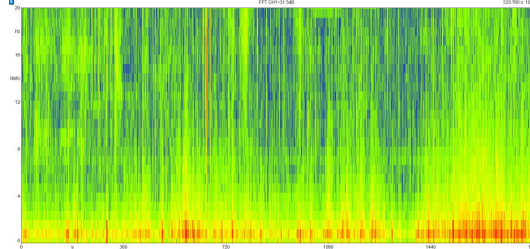
T01: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



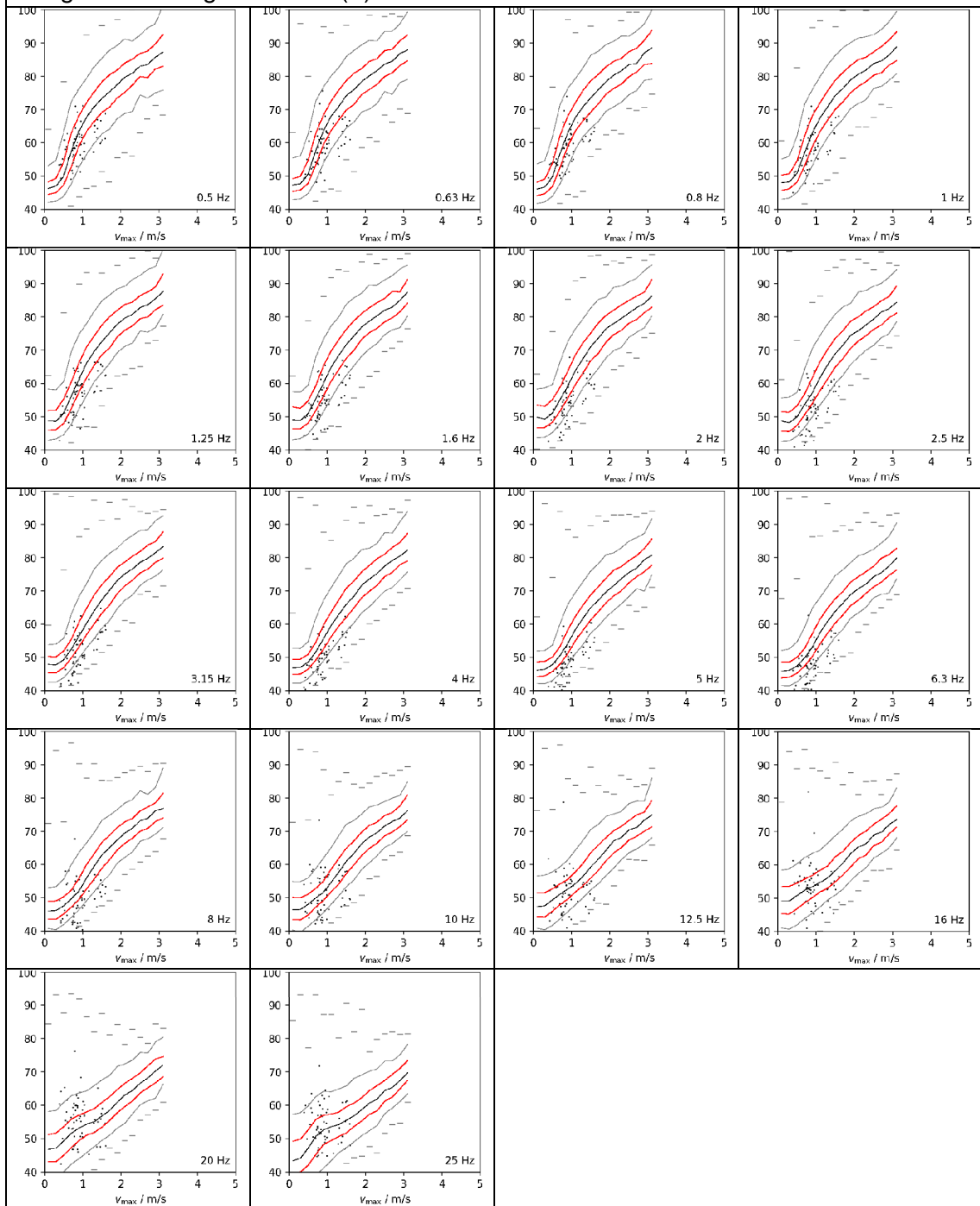
N01: Usedom					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Usedom (Heringsdorf)	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Küste	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
54,9 dB(Z)	51,7 dB(Z)	45,4 dB(Z)	50,7 dB(G)	46,7 dB(C)	42,5 dB(A)


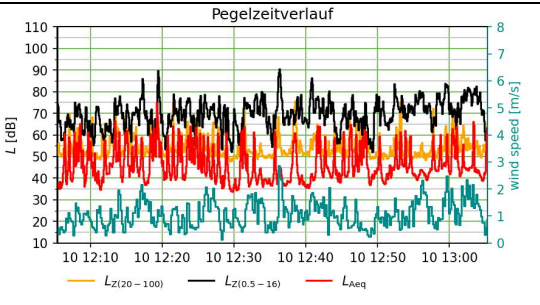
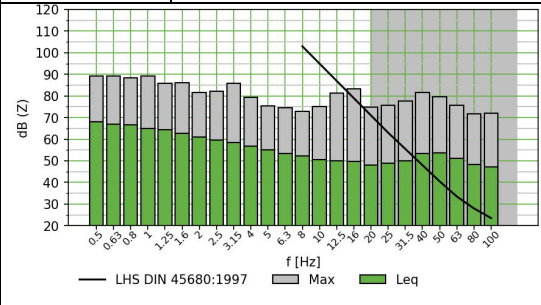
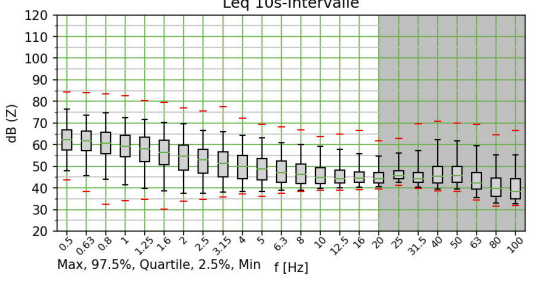
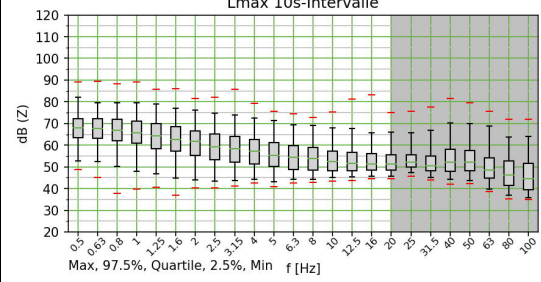
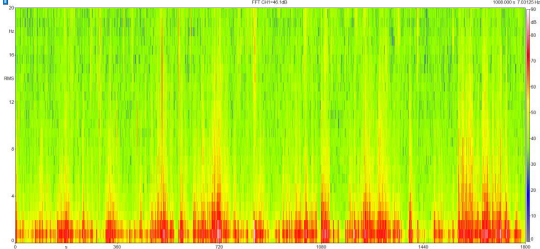
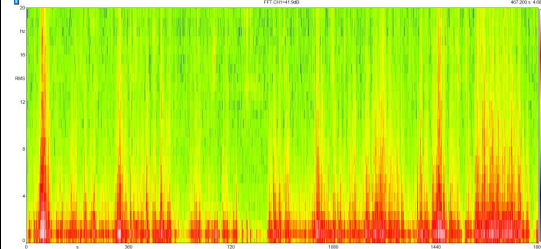
N01: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



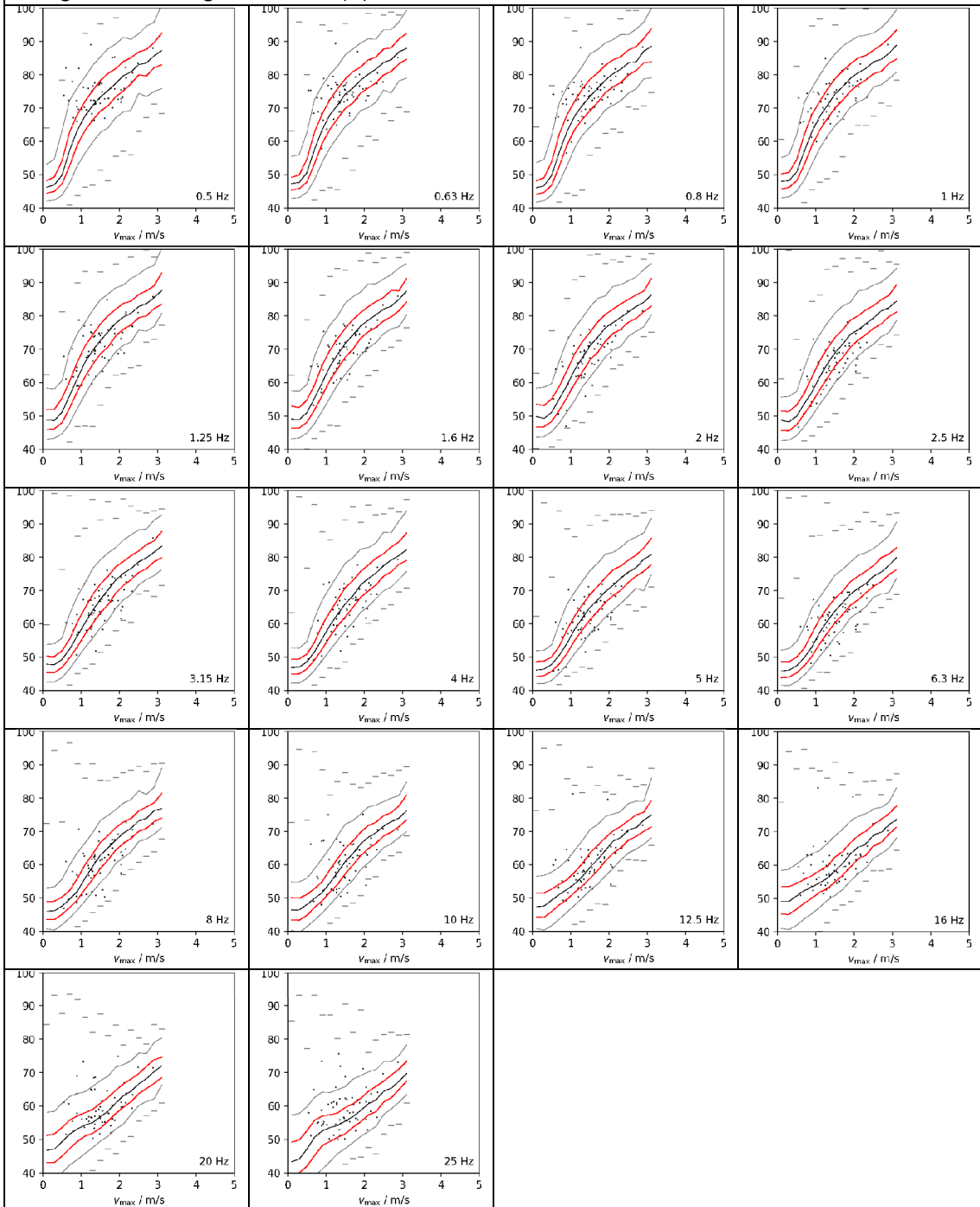
T02: Neukalen					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Neukalen	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Dorf	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
61,1 dB	56,8 dB	52,4 dB	56,4 dB(G)	51,3 dB(C)	43,5 dB(A)


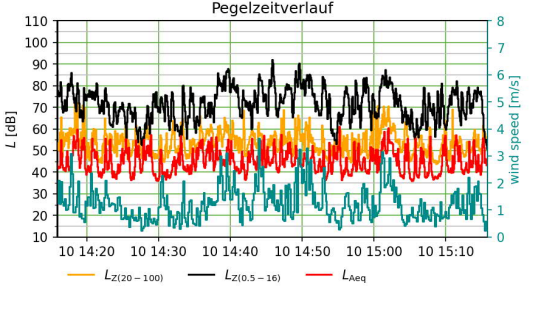
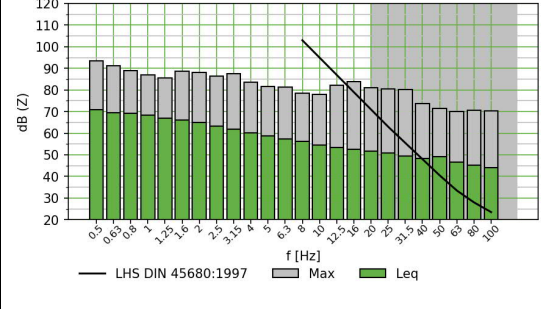
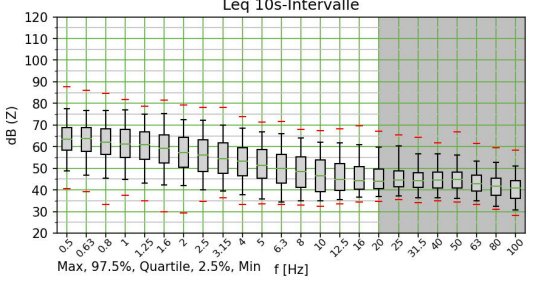
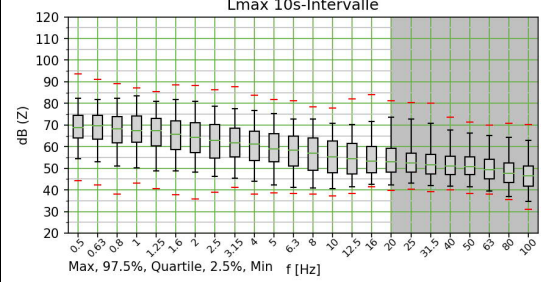
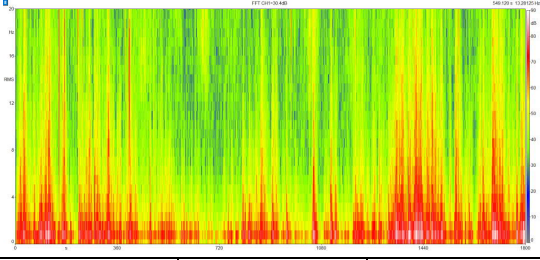
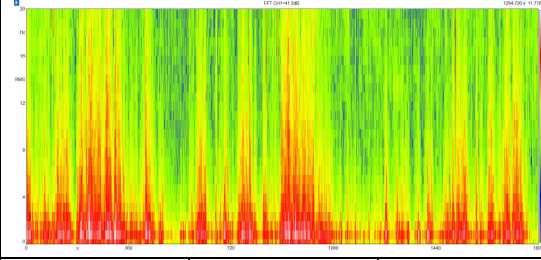
T02: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



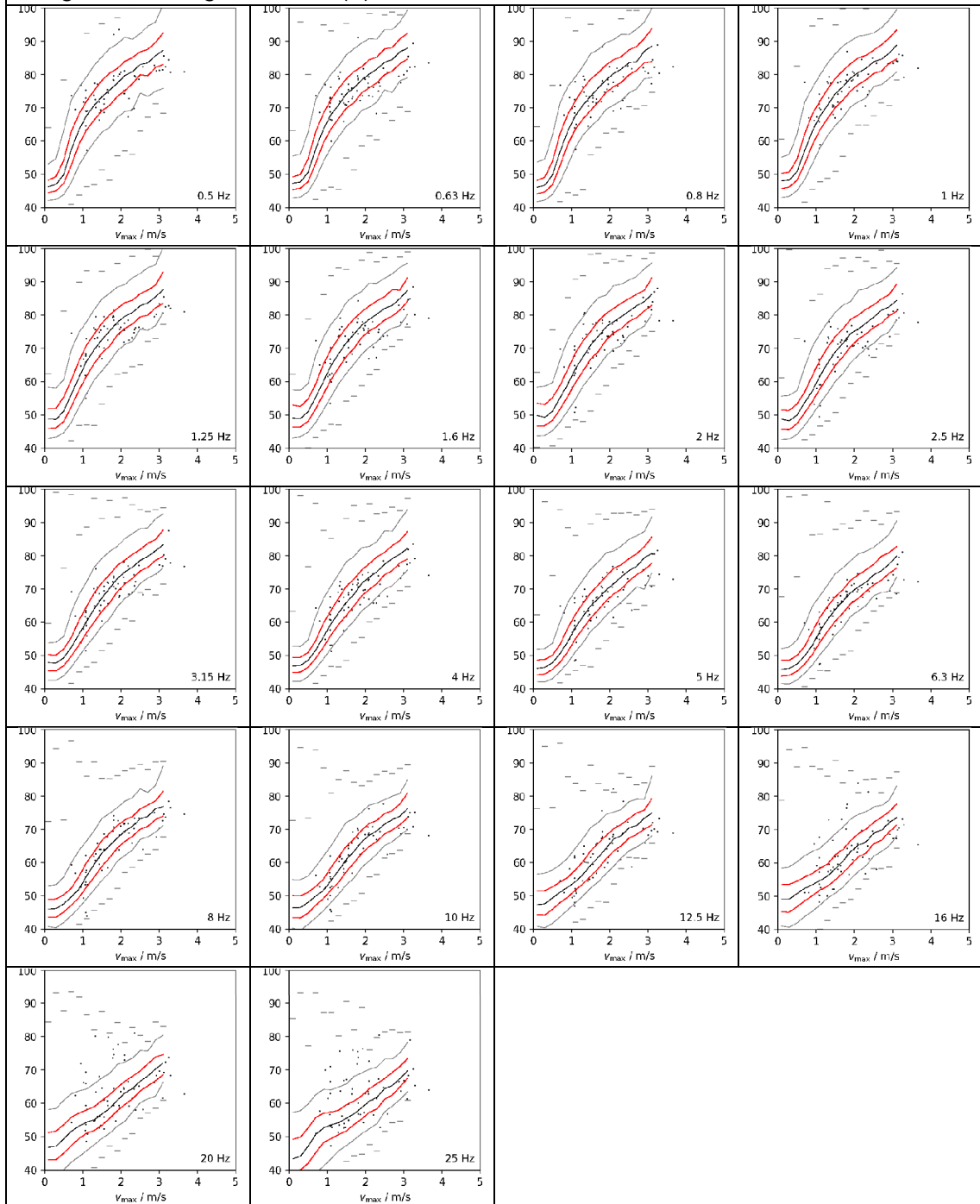
T03: Rostock					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Rostock	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Großstadt, Küste	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
74,7 dB(Z)	70,8 dB(Z)	59,7 dB(Z)	61,9 dB(G)	61,1 dB(C)	54,3 dB(A)


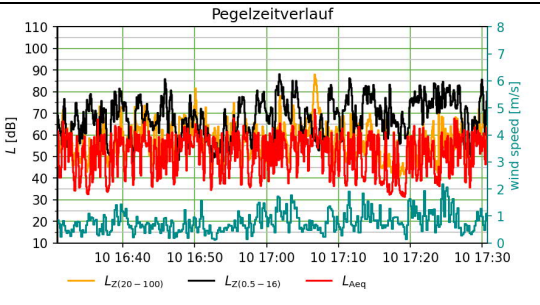
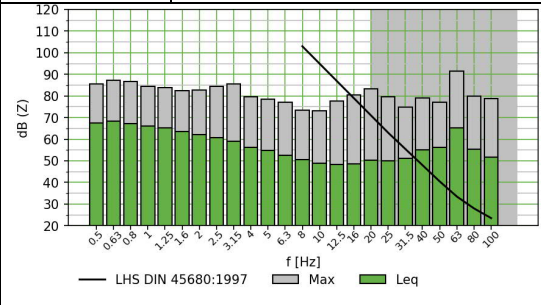
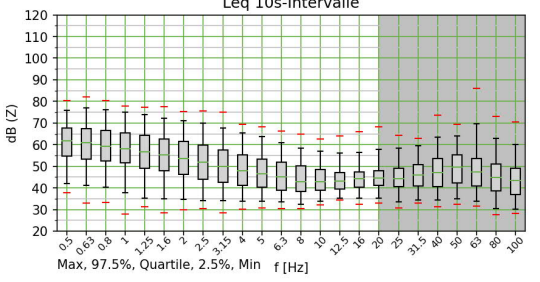
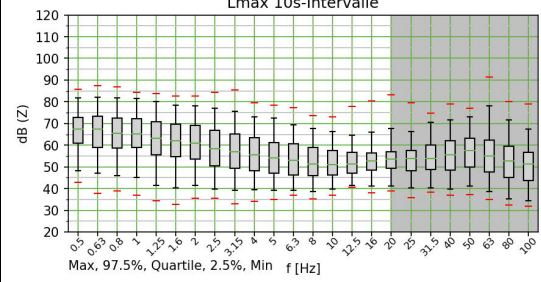
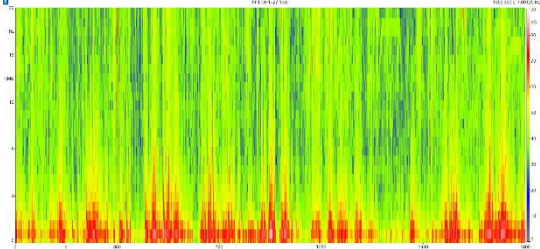
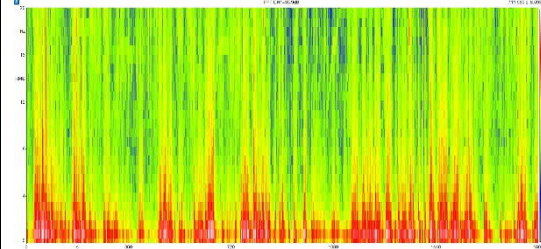
T03: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



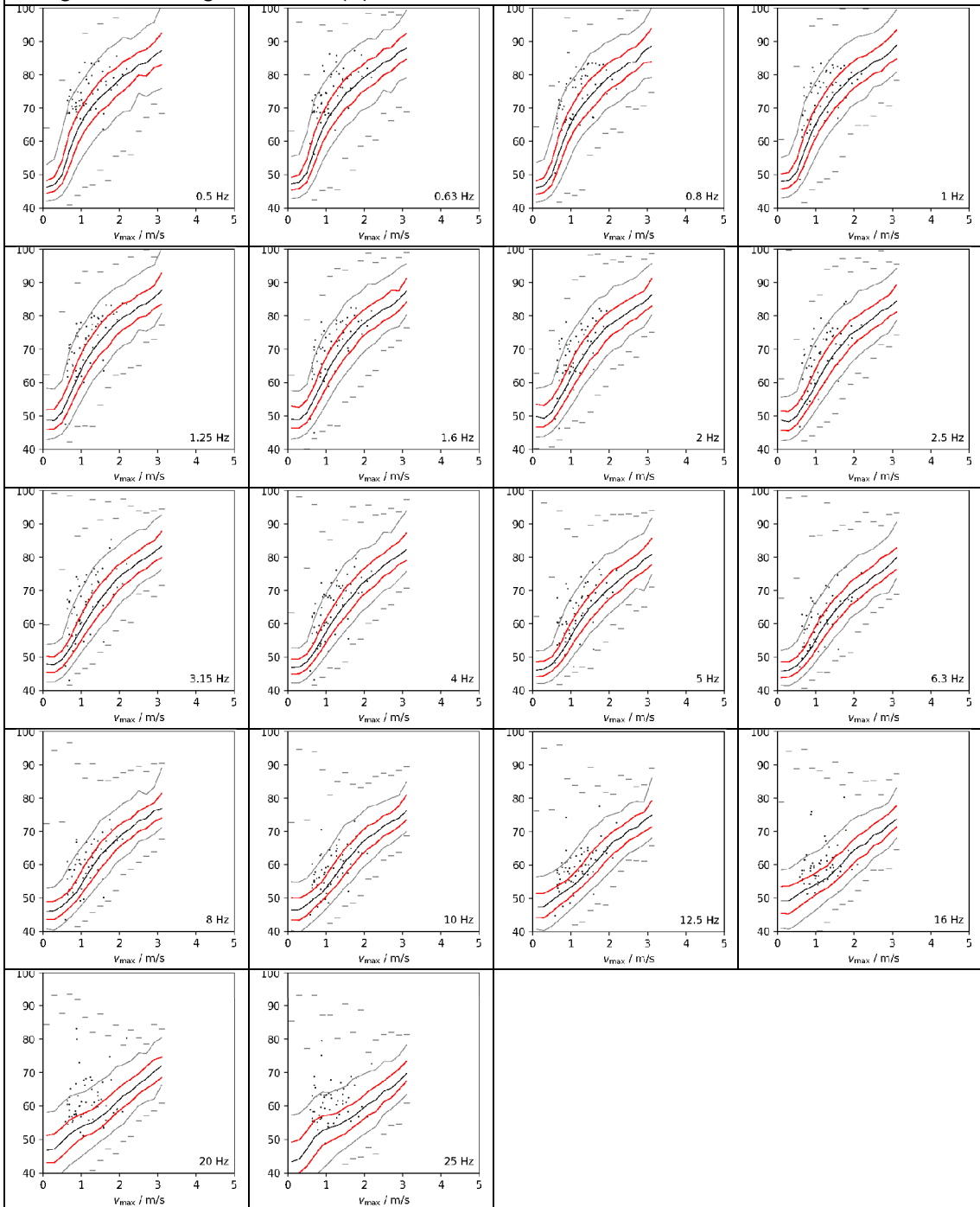
T04: Klütz					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Klütz	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Dorf, Küste	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
77,3 dB(Z)	74,1 dB(Z)	57,9 dB(Z)	65,4 dB(G)	57,0 dB(C)	48,6 dB(A)


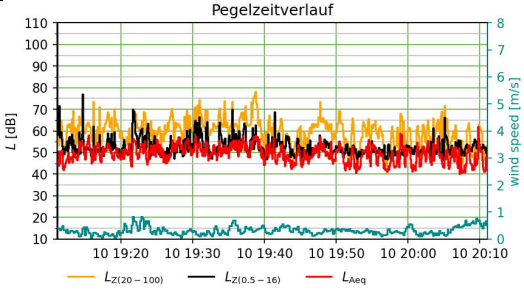
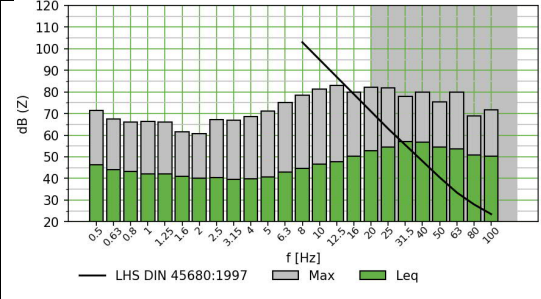
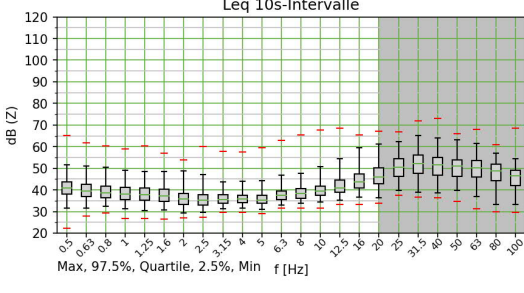
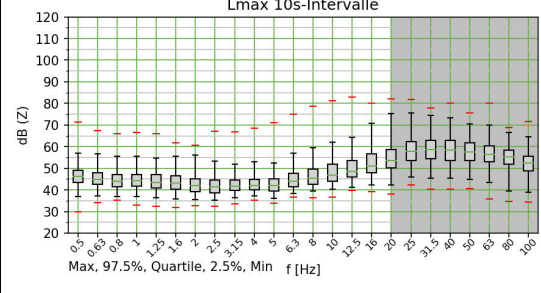
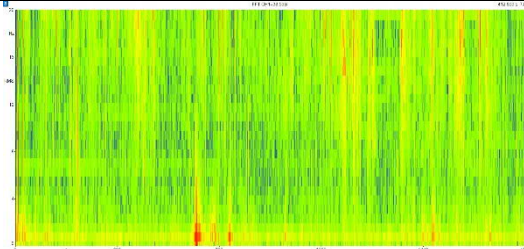
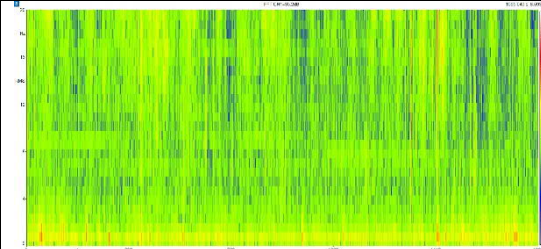
T04: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



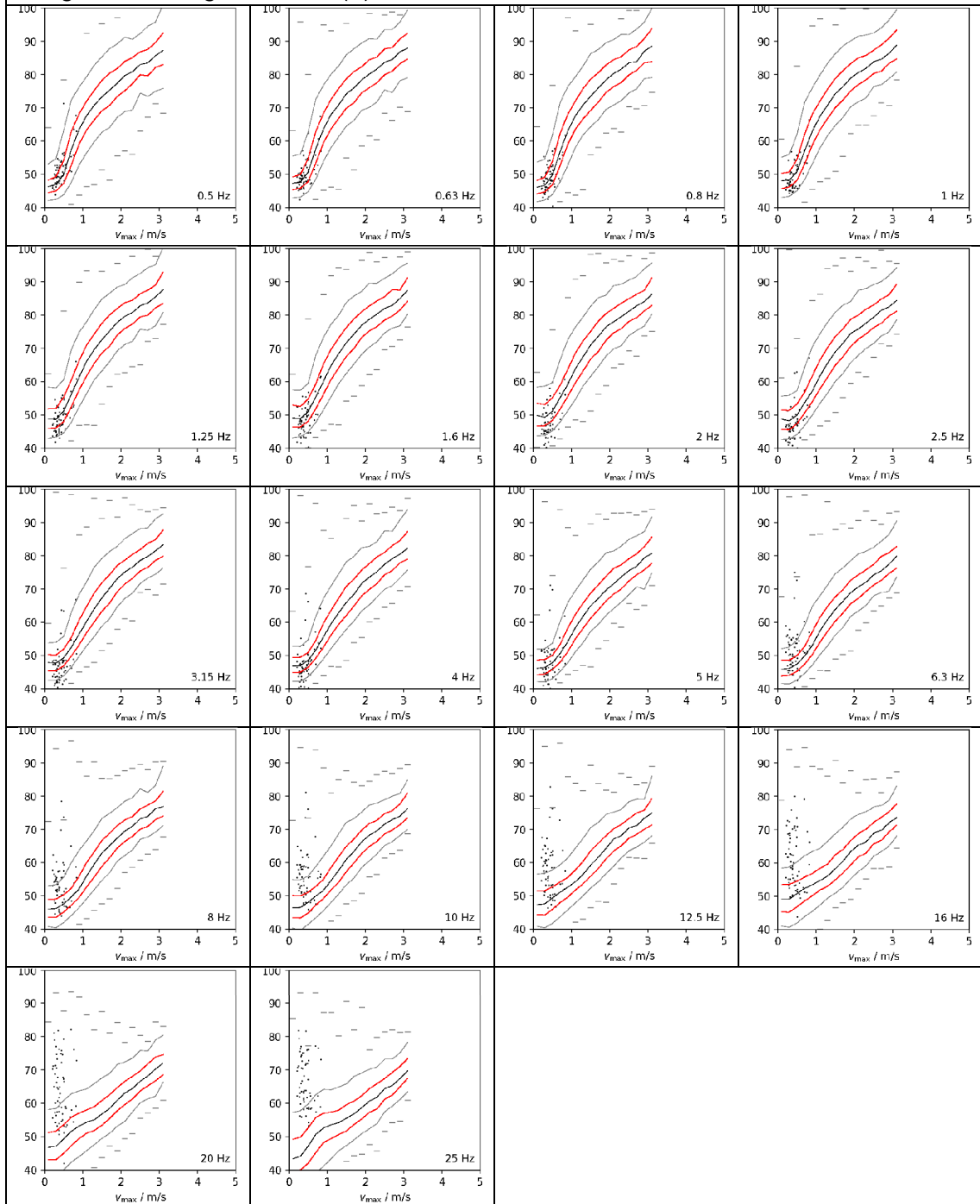
T05: Ratzeburg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Ratzeburg	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
75,8 dB(Z)	74,1 dB(Z)	57,9 dB(Z)	65,4 dB(G)	57,0 dB(C)	48,6 dB(A)


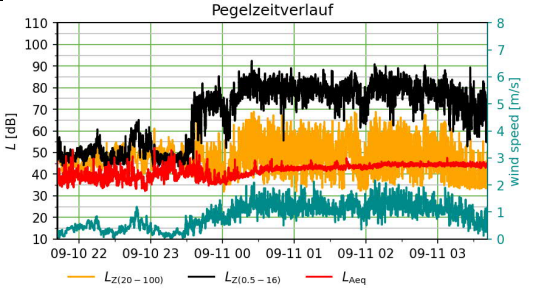
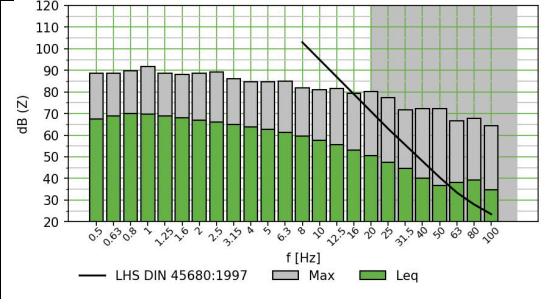
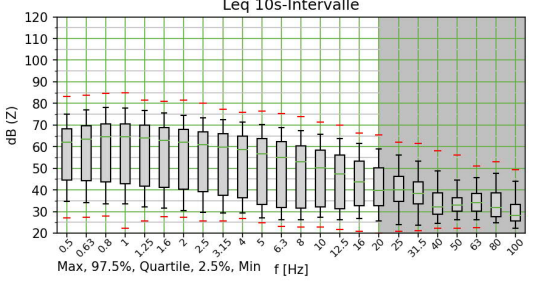
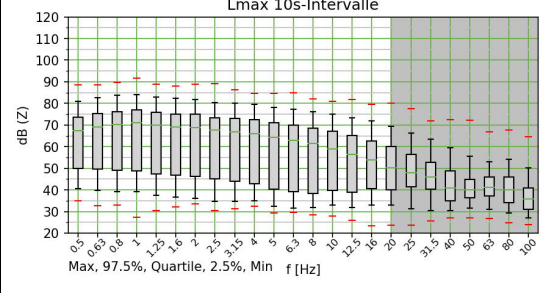
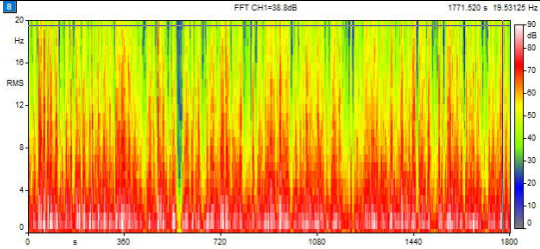
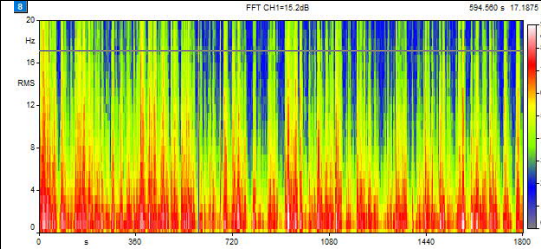
T05: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



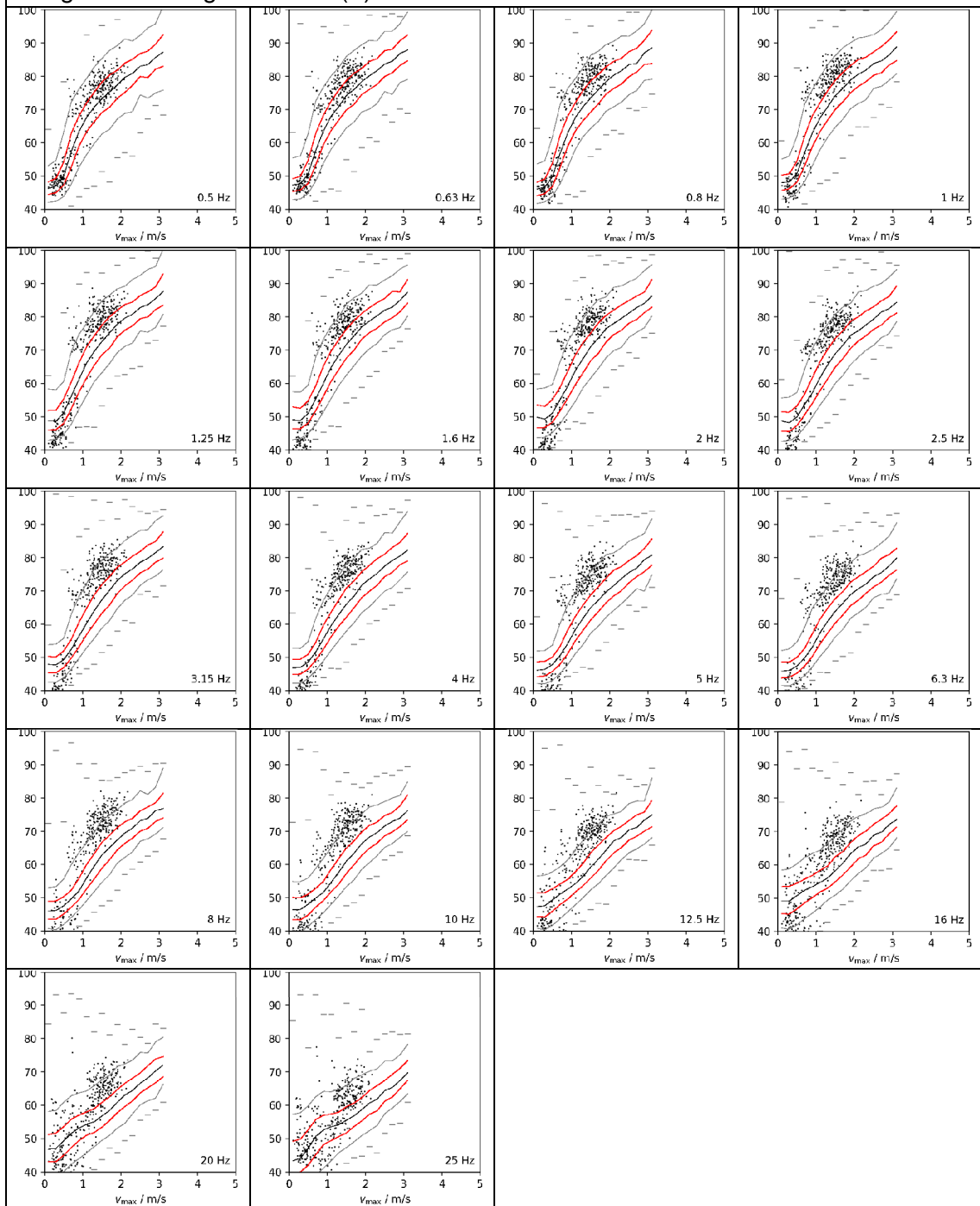
T06: Lütjenburg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Lütjenburg	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
64,7 dB(Z)	55,5 dB(Z)	63,4 dB(Z)	63,7 dB(G)	62,1 dB(C)	51,0 dB(A)


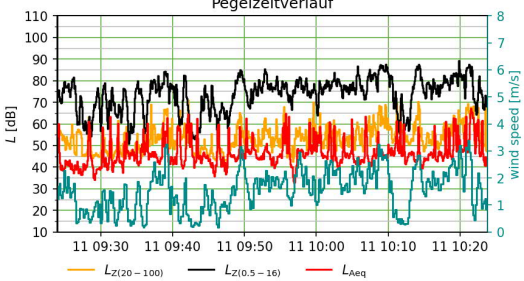
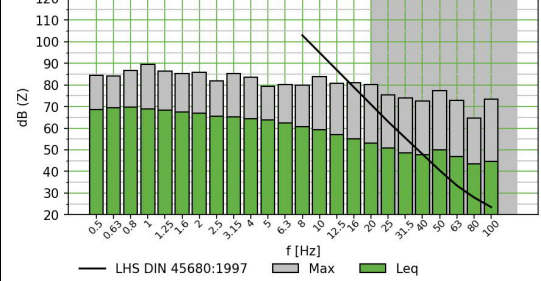
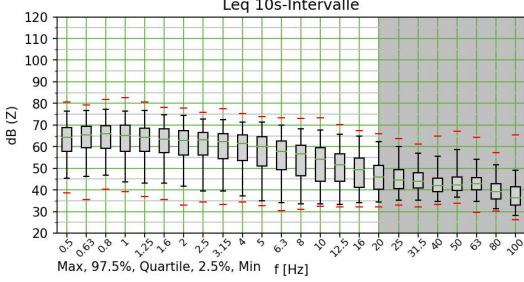
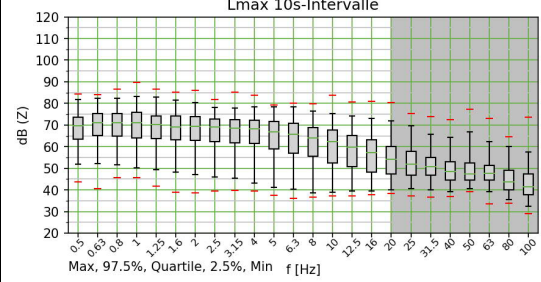
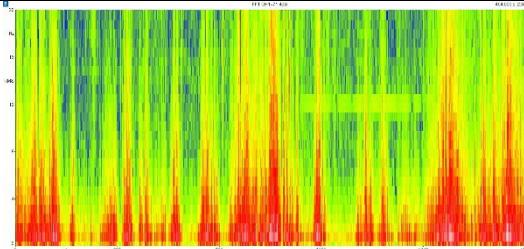
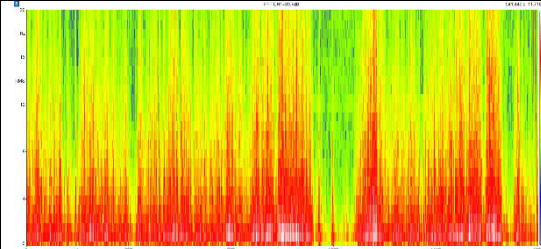
T06: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



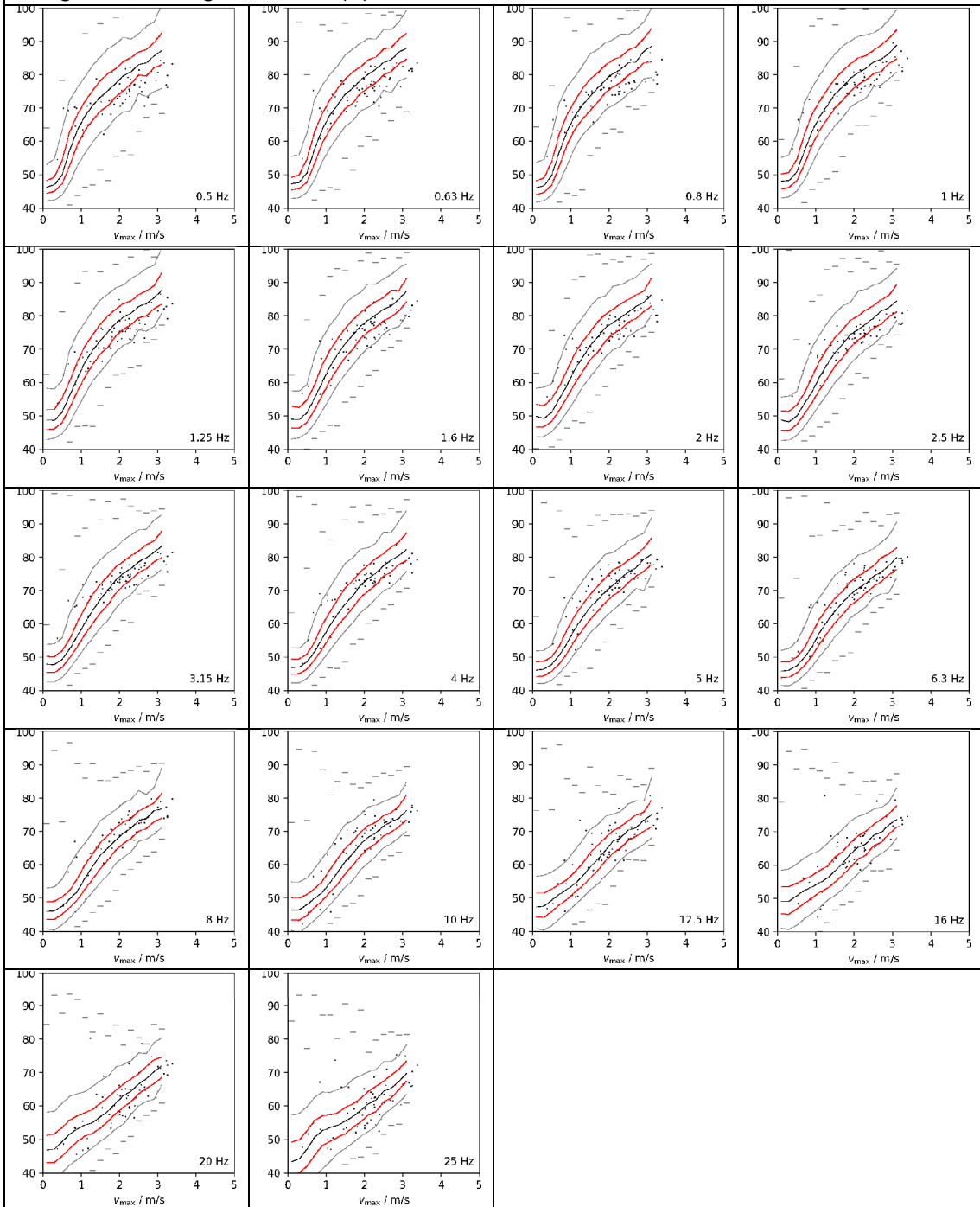
N02: Sehelendorf					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Sehelendorf	
			Datum:	10.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Dorf, Küste	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q	L_{Ze}q	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
78,3 dB(Z)	76,4 dB(Z)	53,6 dB(Z)	66,5 dB(G)	52,8 dB(C)	42,5 dB(A)


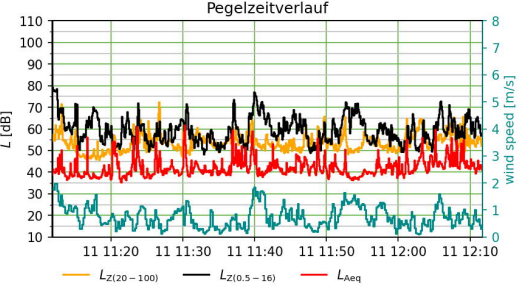
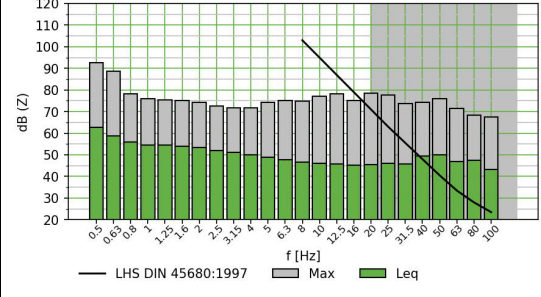
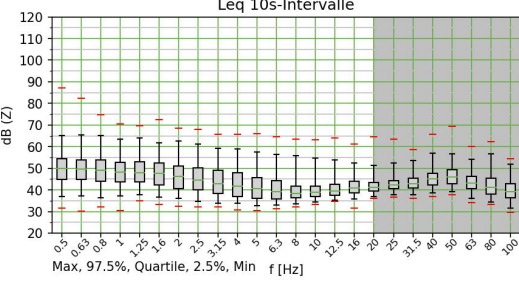
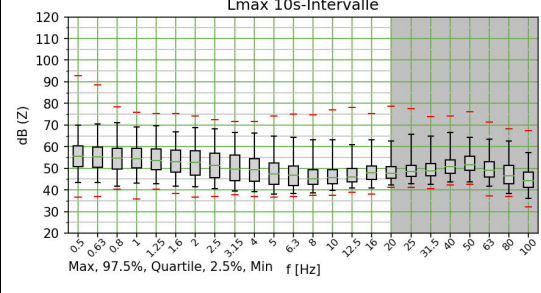
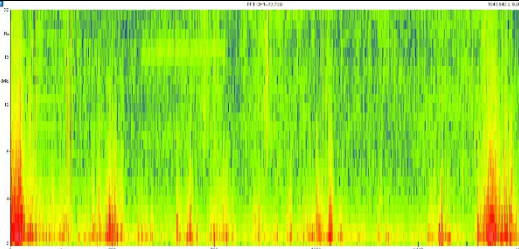
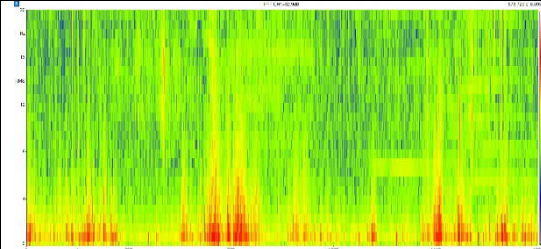
N02: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



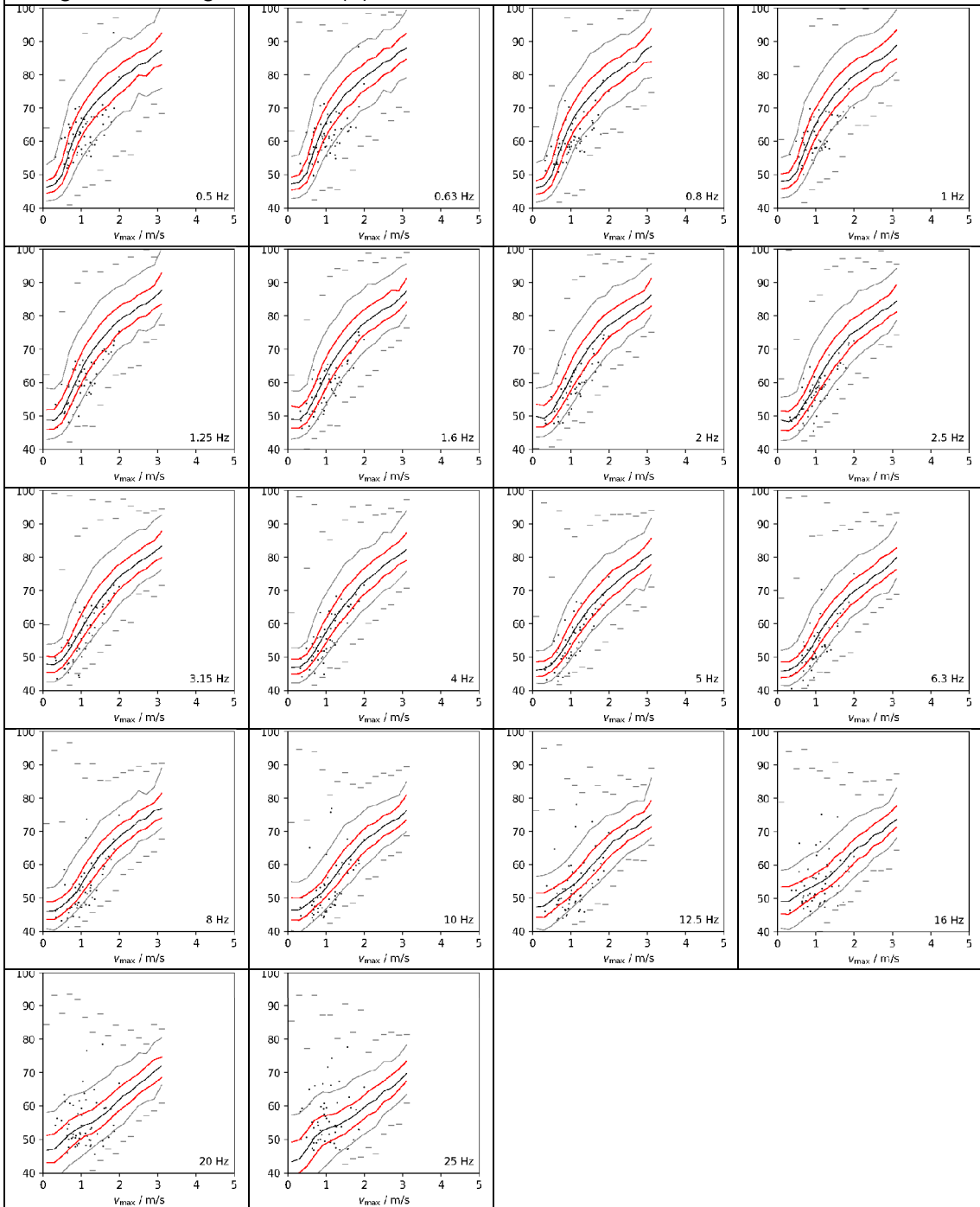
T07: Rausdorf					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Rausdorf	
			Datum:	11.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Einsiedlerhöhe	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
78,3 dB(Z)	76,2 dB(Z)	58,1 dB(Z)	68,3 dB(G)	59,0 dB(C)	52,5 dB(A)


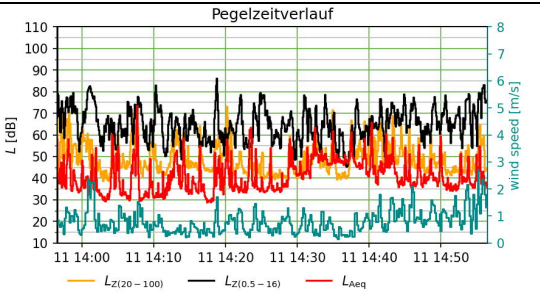
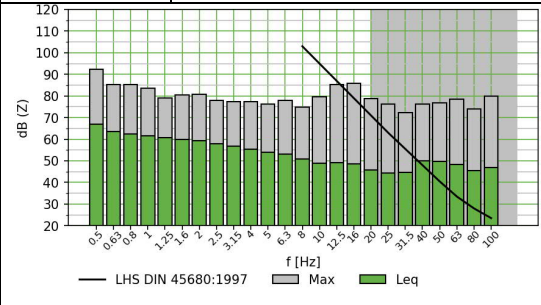
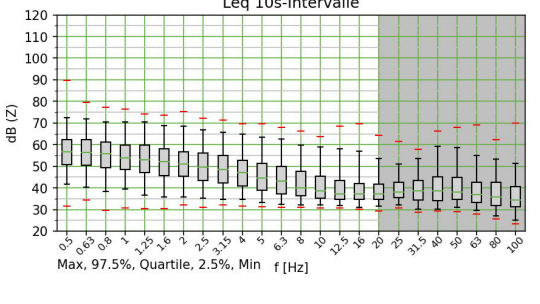
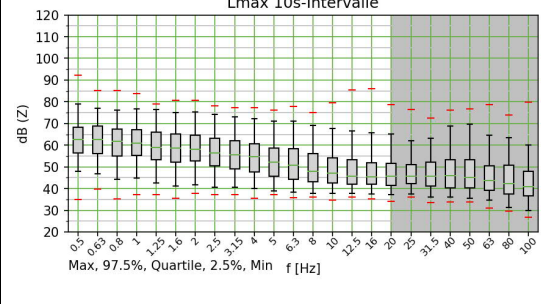
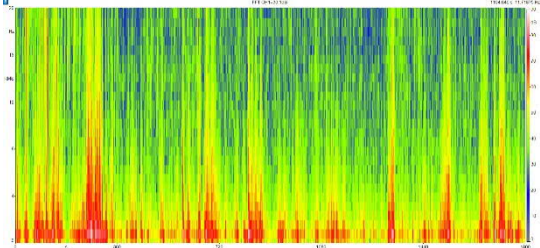
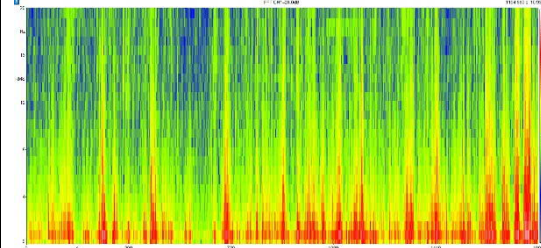
T07: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



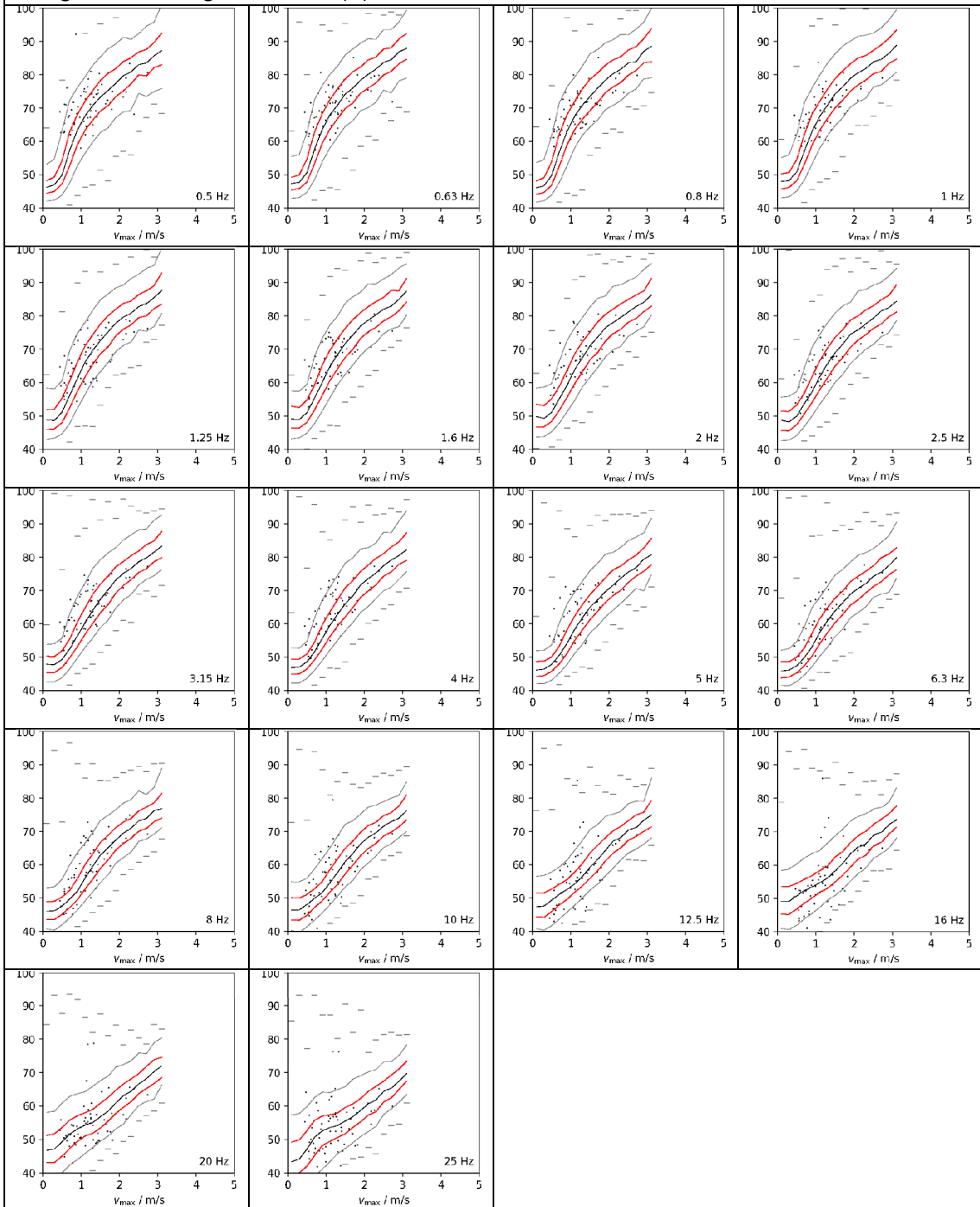
T08: Hamburg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Hamburg	
			Datum:	11.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Großstadt	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
67,1 dB(Z)	62,3 dB(Z)	56,3 dB(Z)	58,0 dB(G)	55,9 dB(C)	45,9 dB(A)


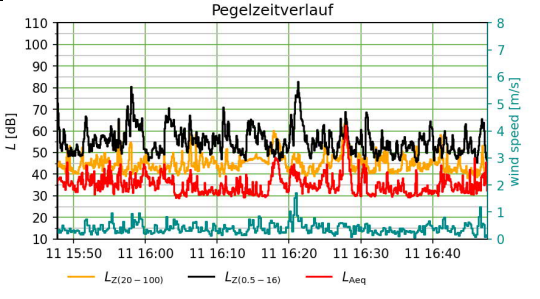
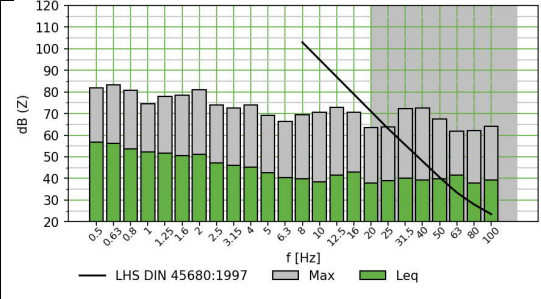
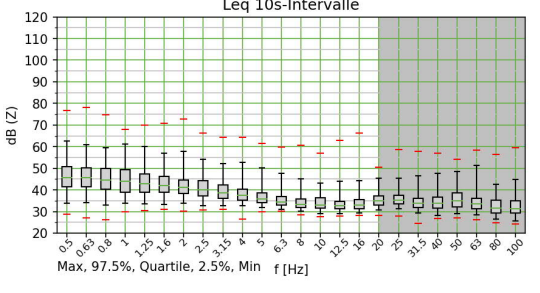
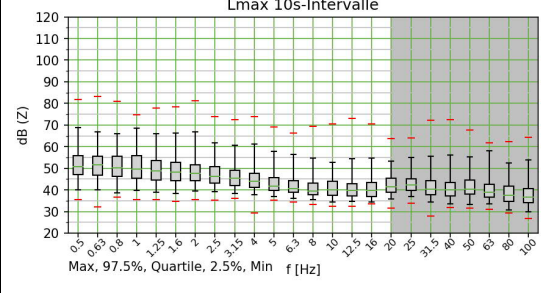
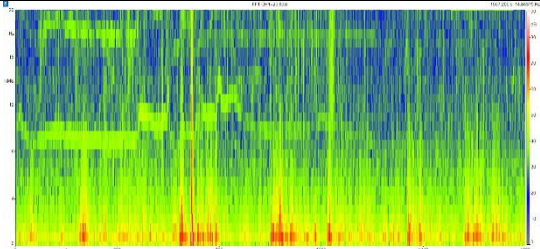
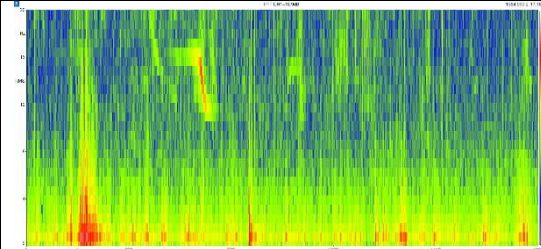
T08: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



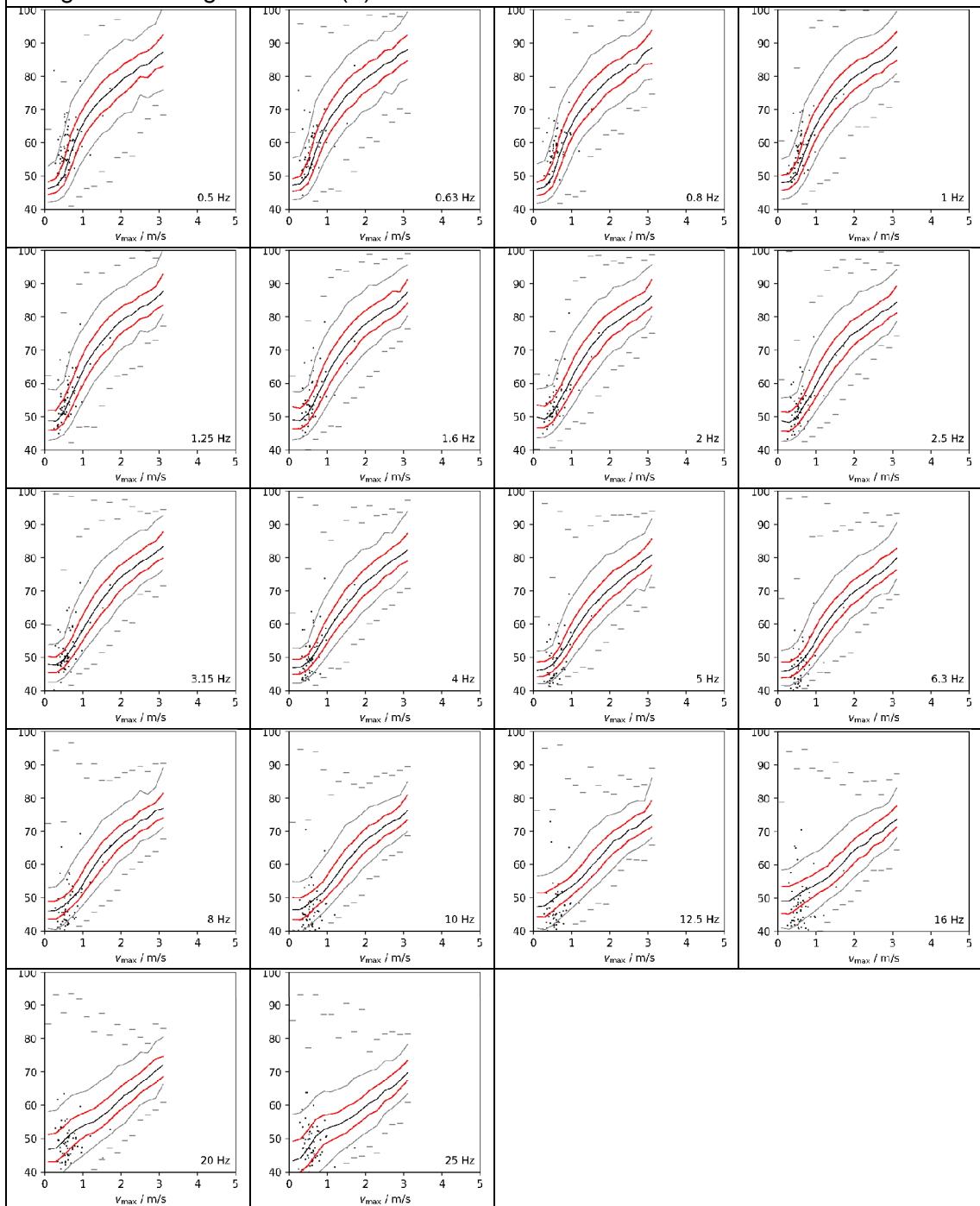
T09: Zeven					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Zeven	
			Datum:	11.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Mittelstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
71,7 dB(Z)	68,2 dB(Z)	56,4 dB(Z)	60,6 dB(G)	57,6 dB(C)	50,3 dB(A)


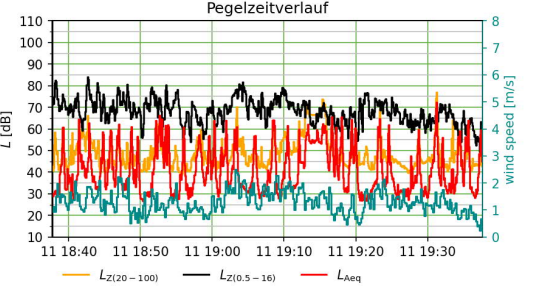
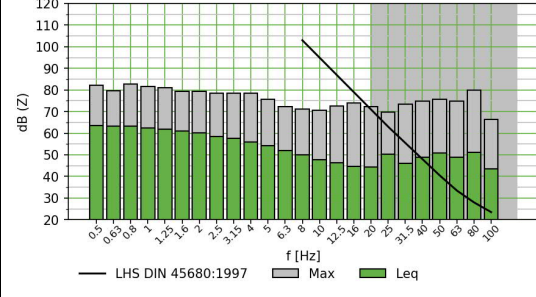
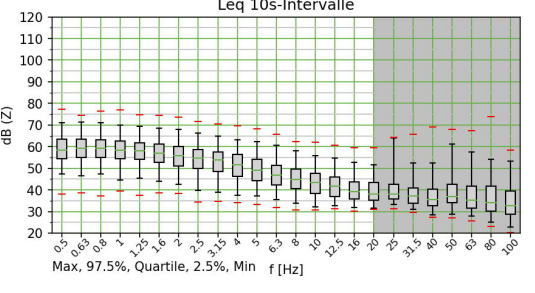
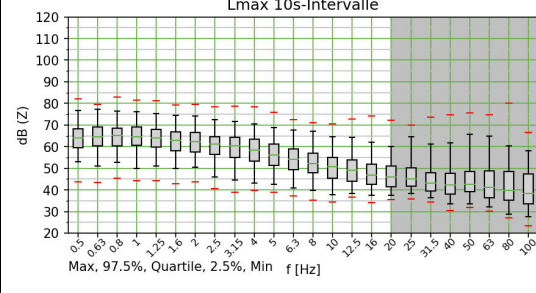
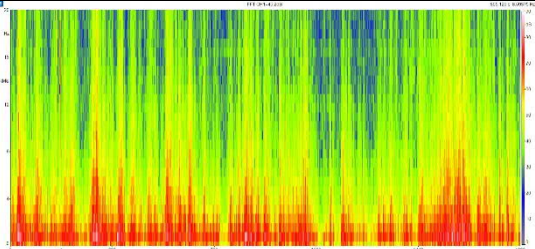
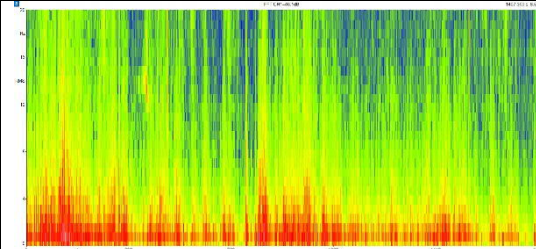
T09: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



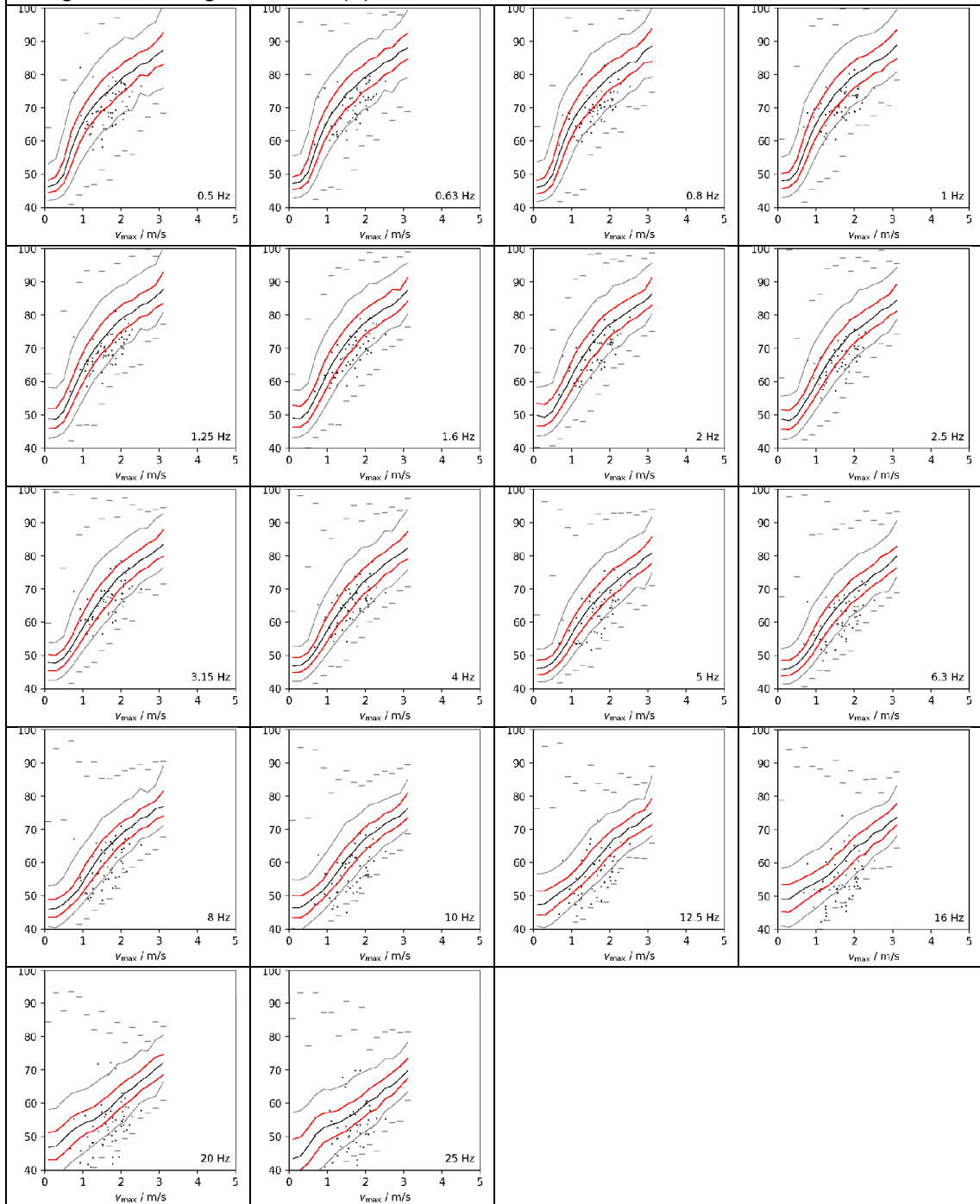
T10: Vollersrode					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Vollersrode	
			Datum:	11.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
63,0 dB(Z)	58,8 dB(Z)	48,5 dB(Z)	53,3 dB(G)	49,8 dB(C)	41,1 dB(A)

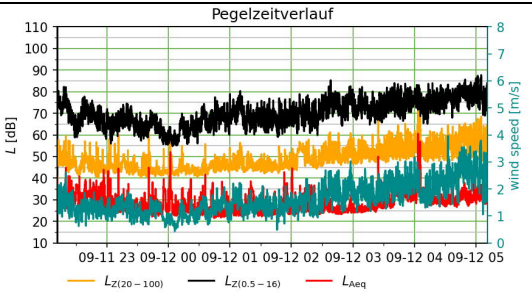
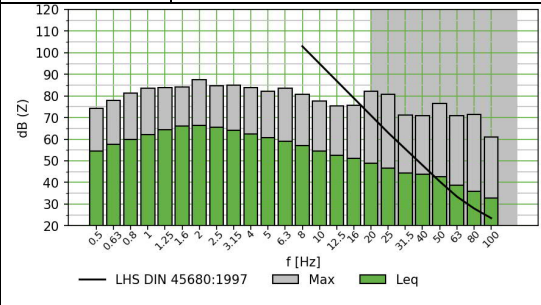
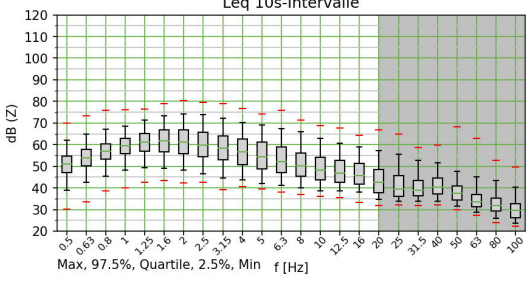
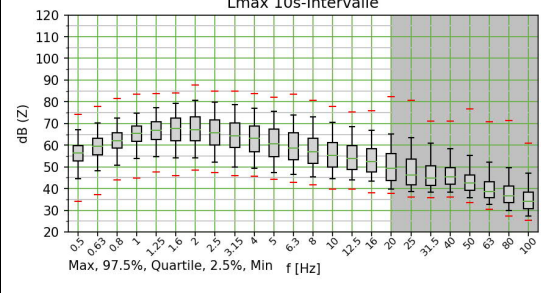
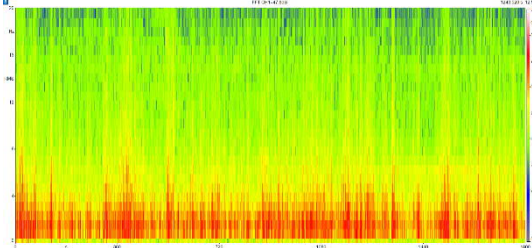
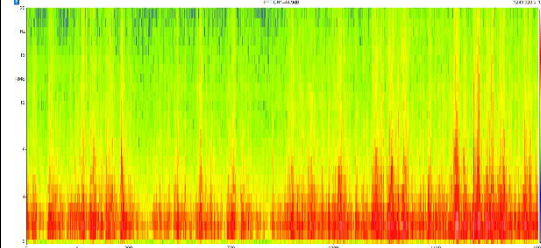
T10: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



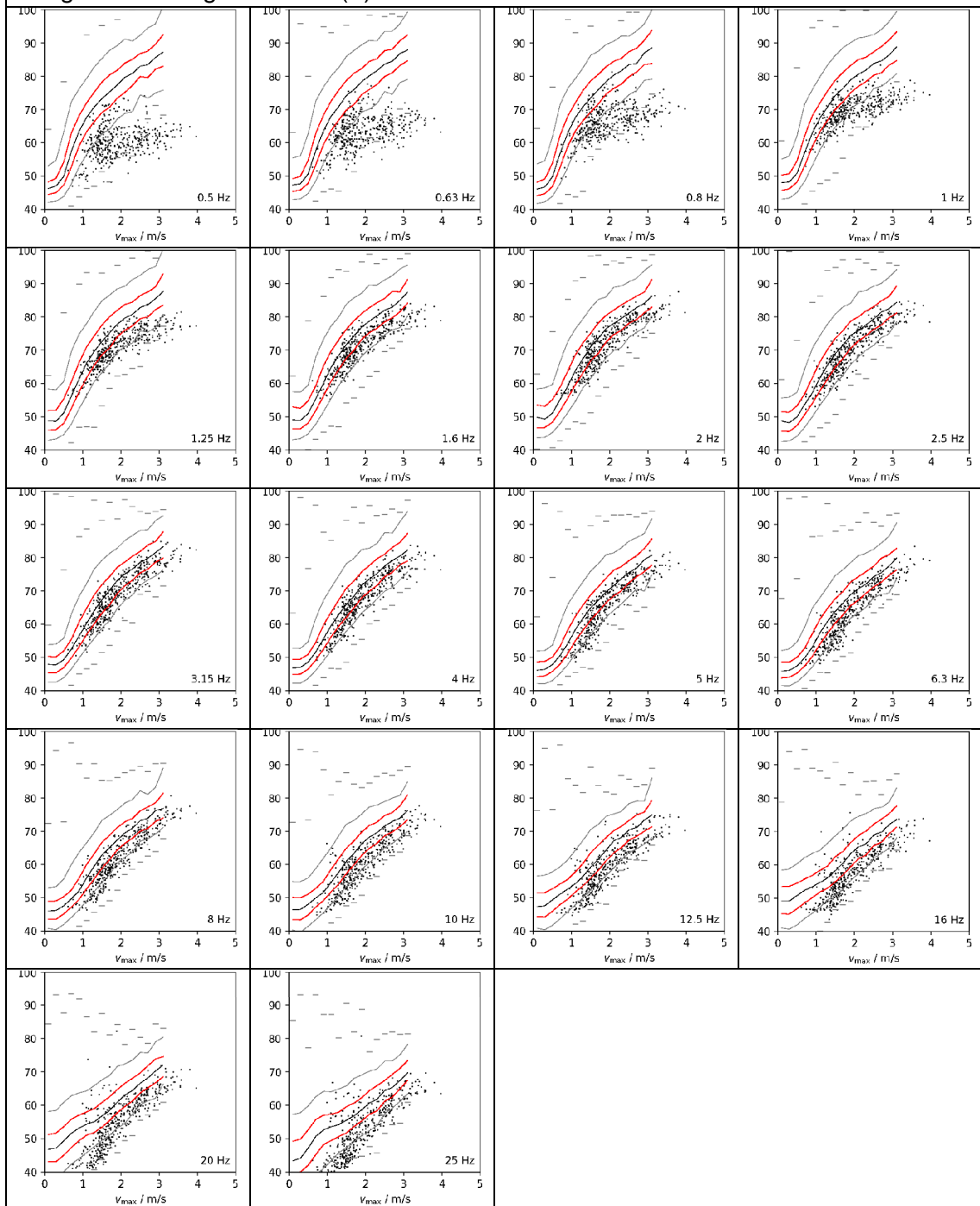
T11: Muggenkrug					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Muggenkrug	
			Datum:	11.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Einsiedlerhof	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
71,9 dB(Z)	69,0 dB(Z)	57,9 dB(Z)	58,2 dB(G)	58,9 dB(C)	53,3 dB(A)


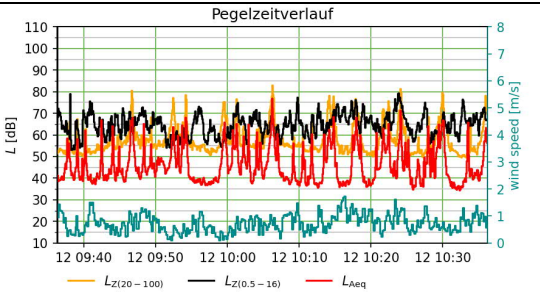
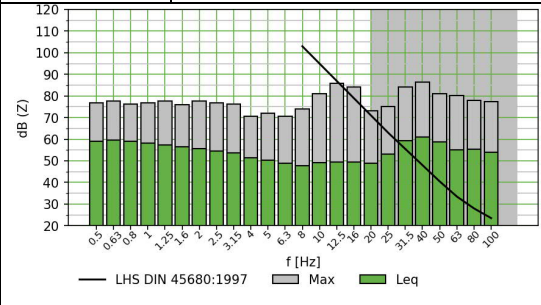
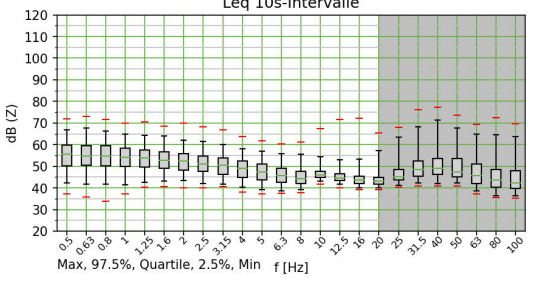
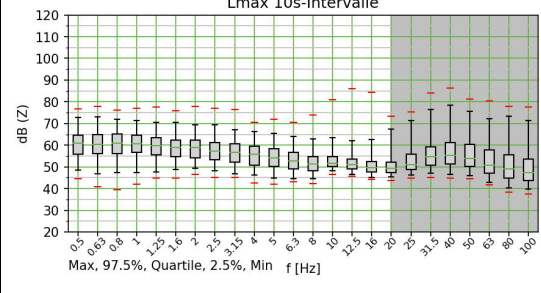
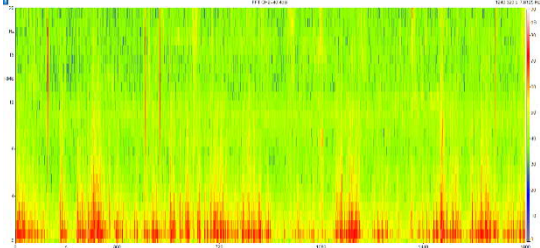
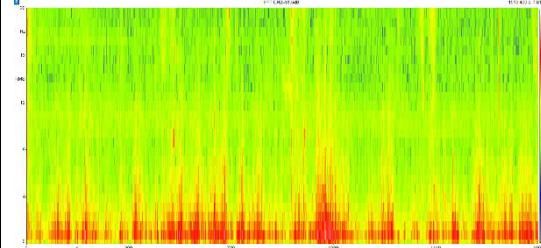
T11: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



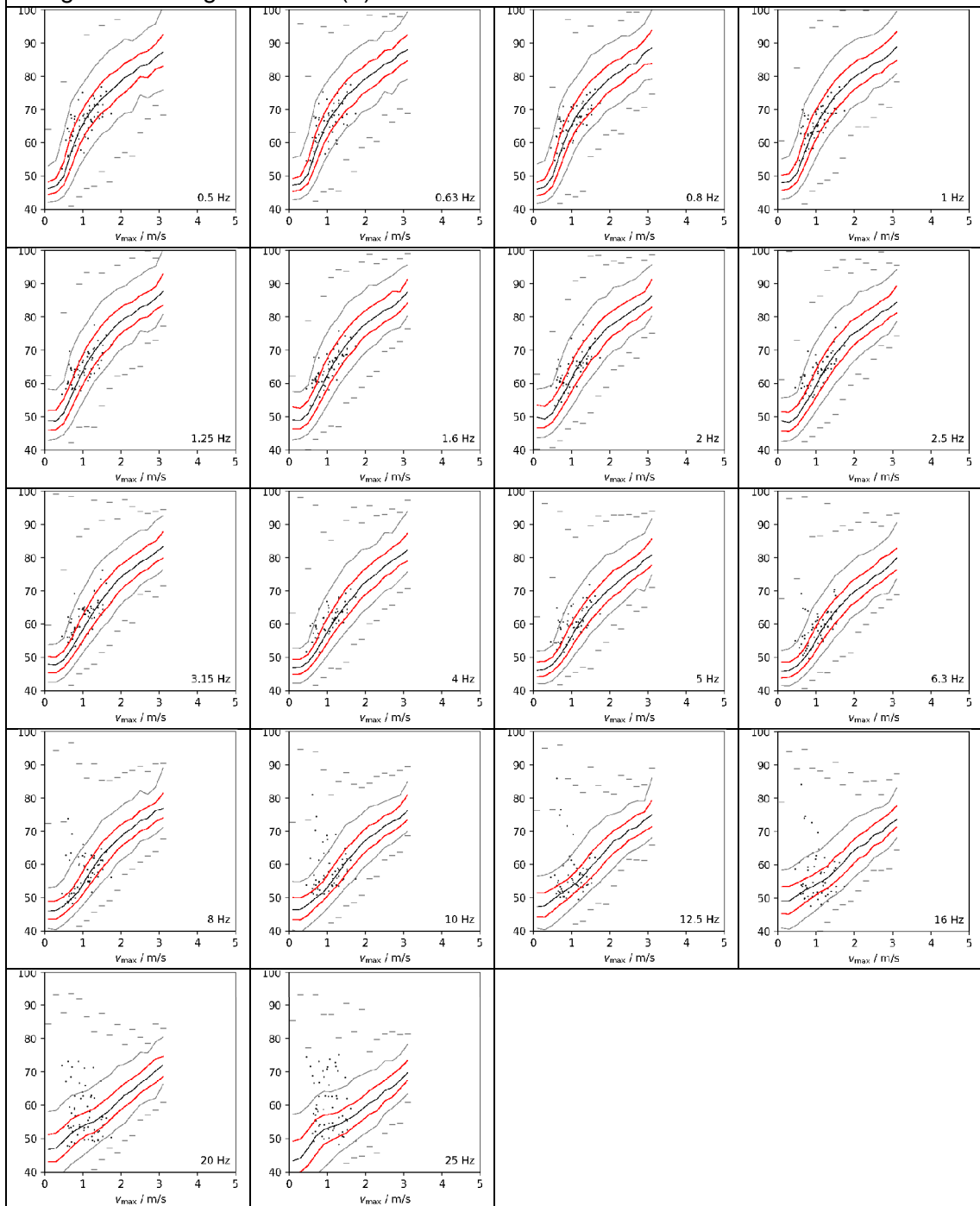
N03: Dornumersiel					
Foto:			Informationen zur Messung:		
Kein Foto			Ort:	Dornumersiel	
			Datum:	11.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Küste/ Nordsee/ Dorf	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
74,1 dB(Z)	73,7 dB(Z)	53,2 dB(Z)	64,2 dB(G)	51,4 dB(C)	32,8 dB(A)


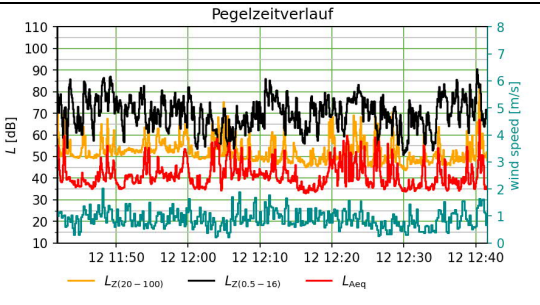
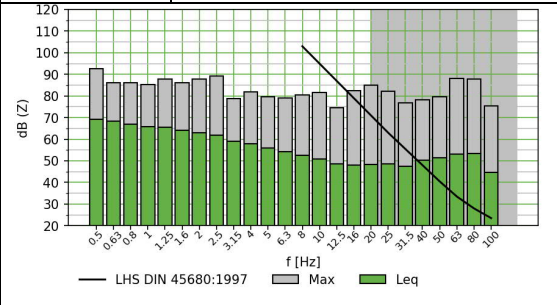
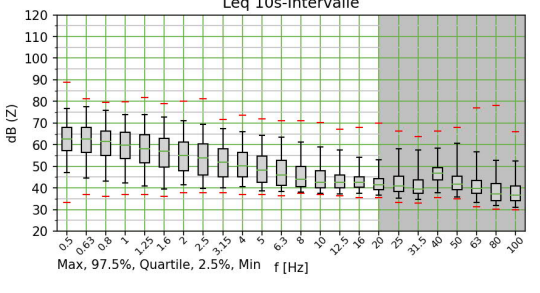
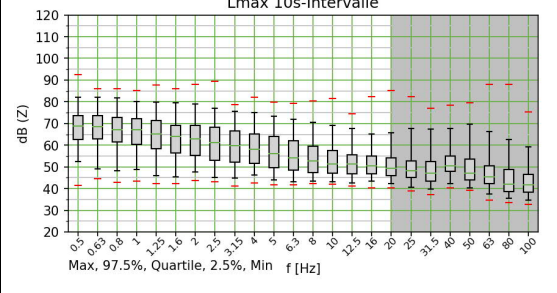
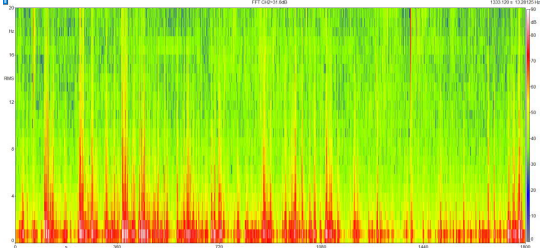
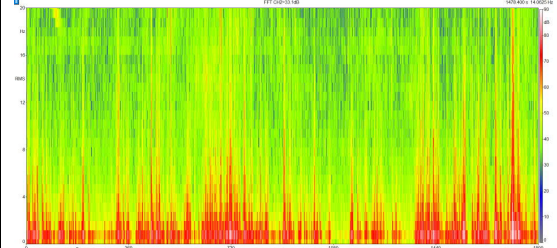
N03: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



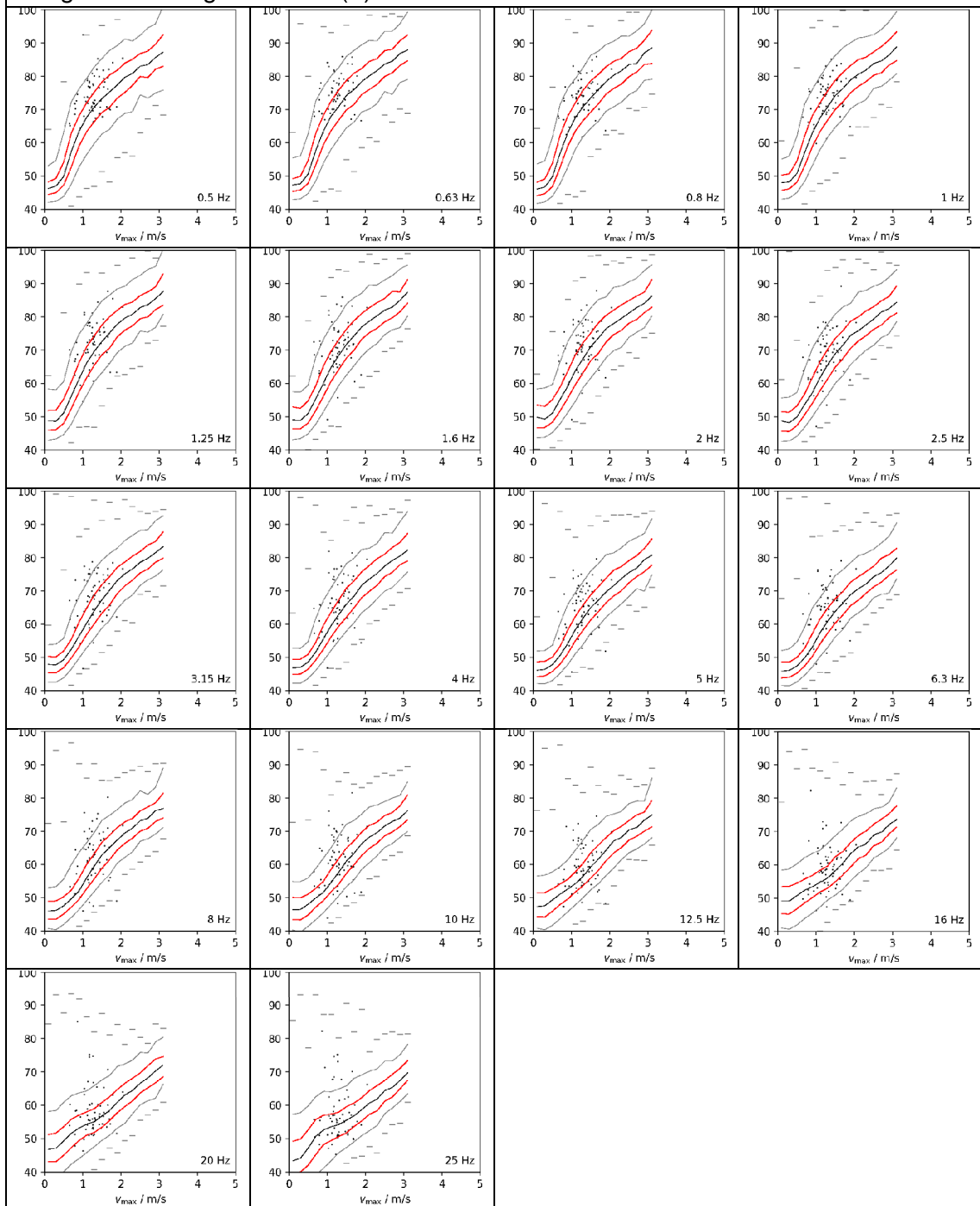
T12: Edewecht					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Edewecht	
			Datum:	12.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Mittelstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
70,3 dB(Z)	65,0 dB(Z)	66,0 dB(Z)	61,7 dB(G)	65,6 dB(C)	55,8 dB(A)


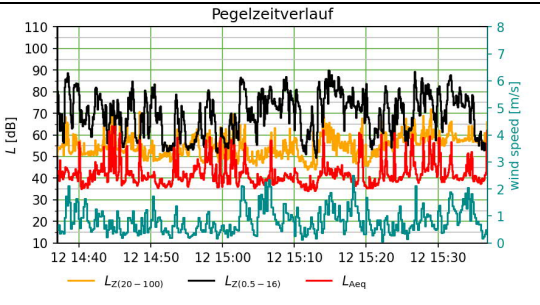
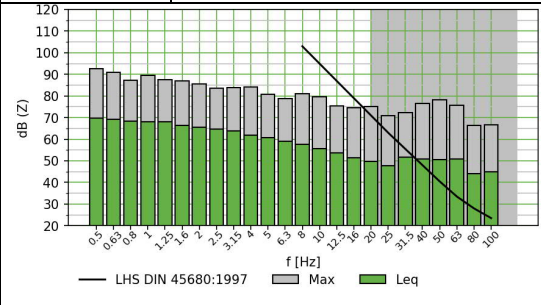
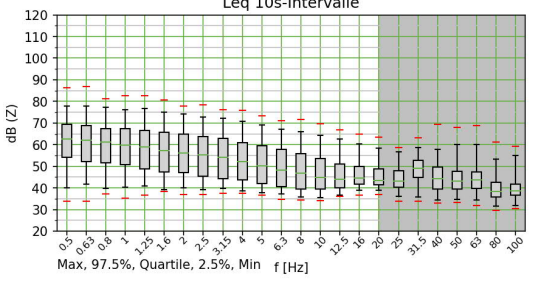
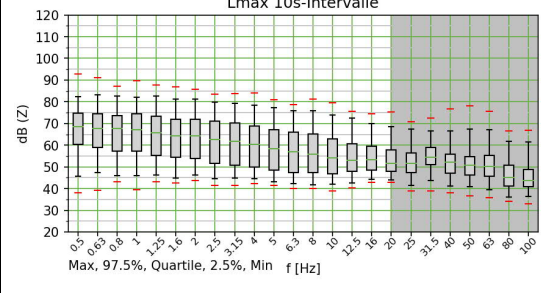
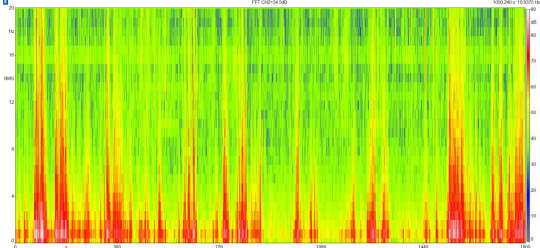
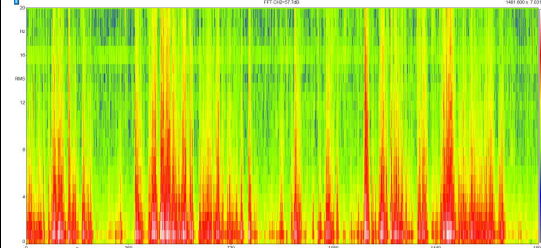
T12: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



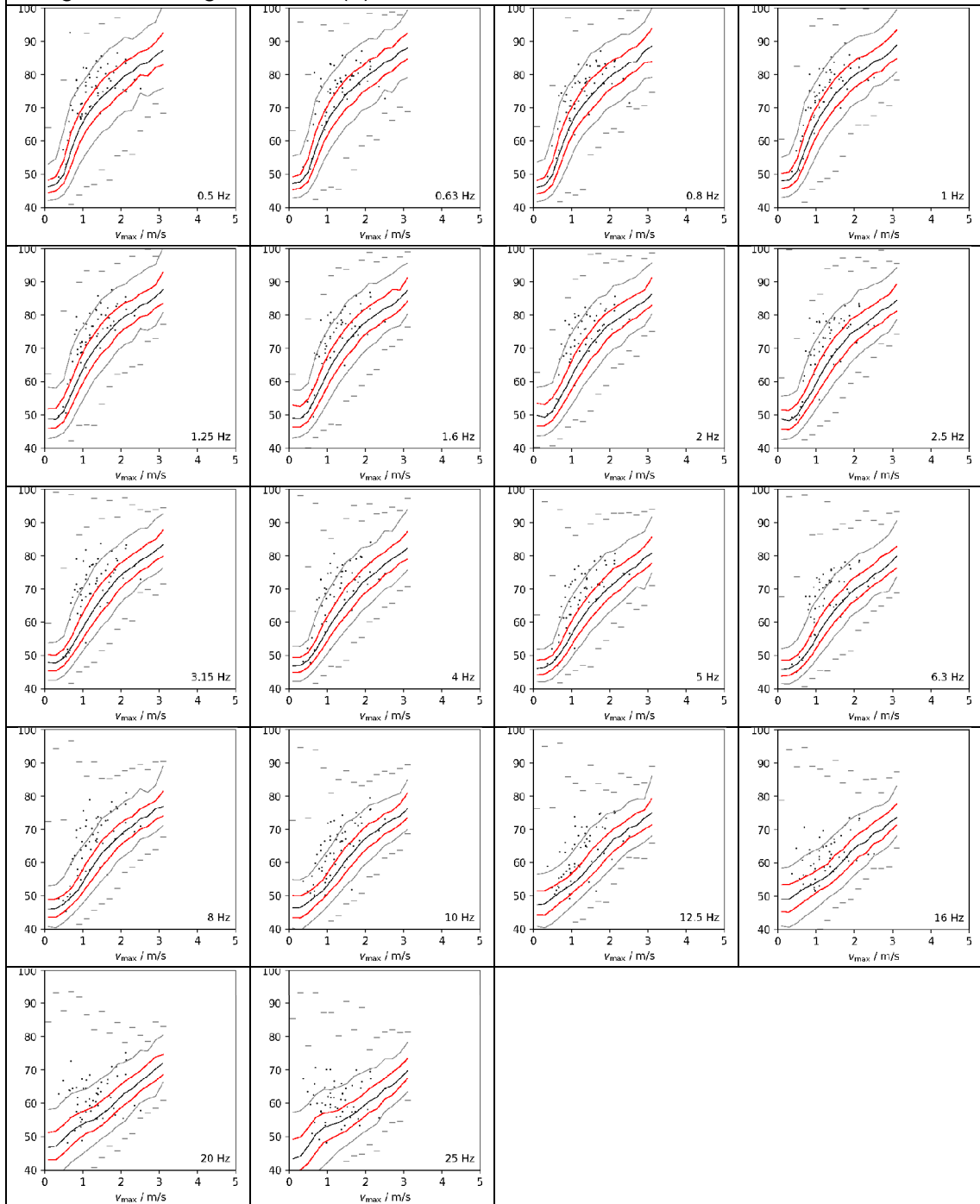
T13: Visbeck					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Visbeck	
			Datum:	12.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
75,8 dB(Z)	72,1 dB(Z)	59,5 dB(Z)	61,5 dB(G)	59,3 dB(C)	47,0 dB(A)


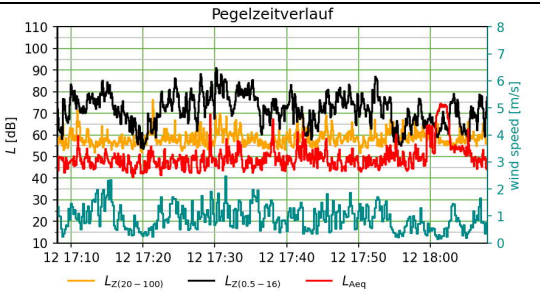
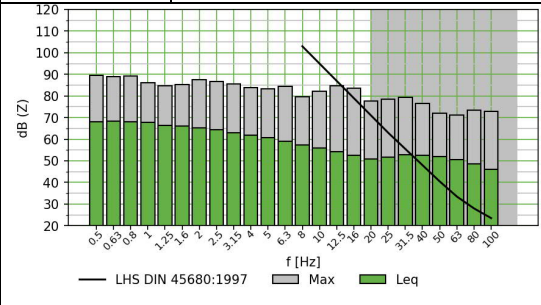
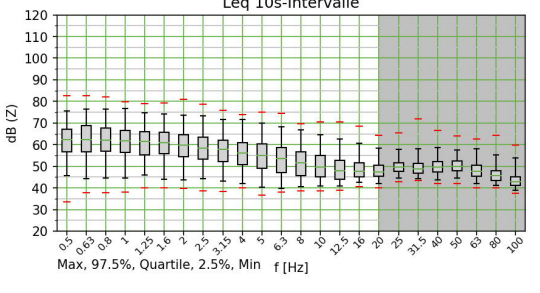
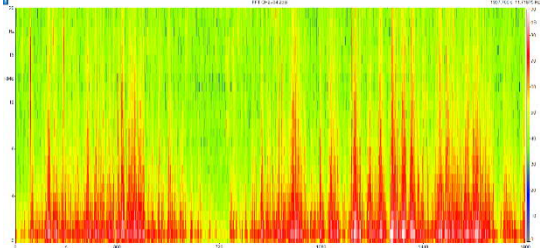
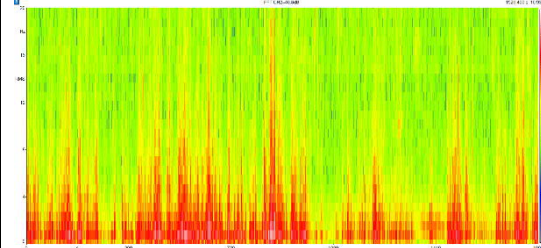
T13: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



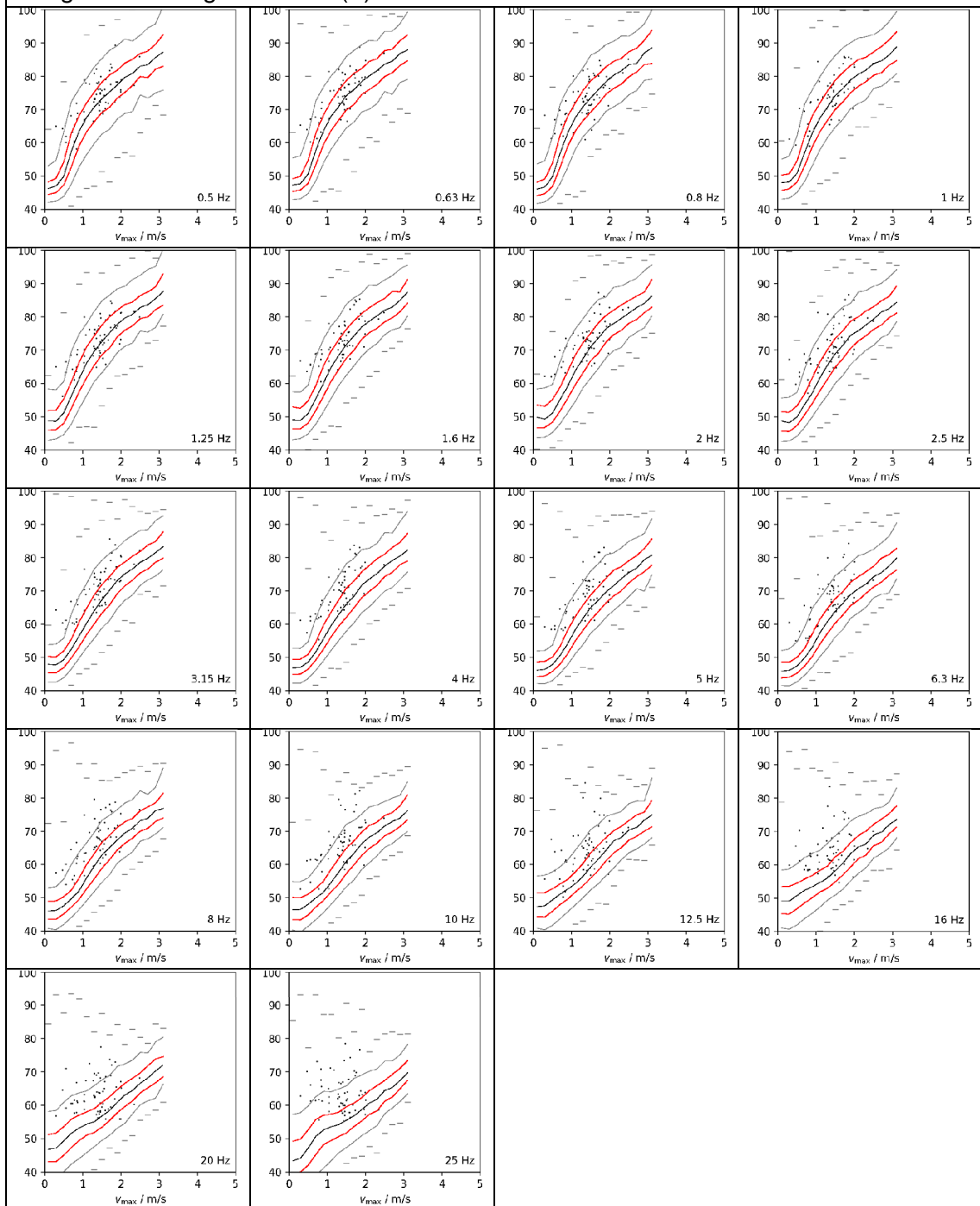
T14: Steyerburg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Steyerburg	
			Datum:	12.09.2022	
			Messbed.	Sonnig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
77,5 dB(Z)	74,9 dB(Z)	58,6 dB(Z)	64,8 dB(G)	57,9 dB(C)	48,4 dB(A)

T14: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



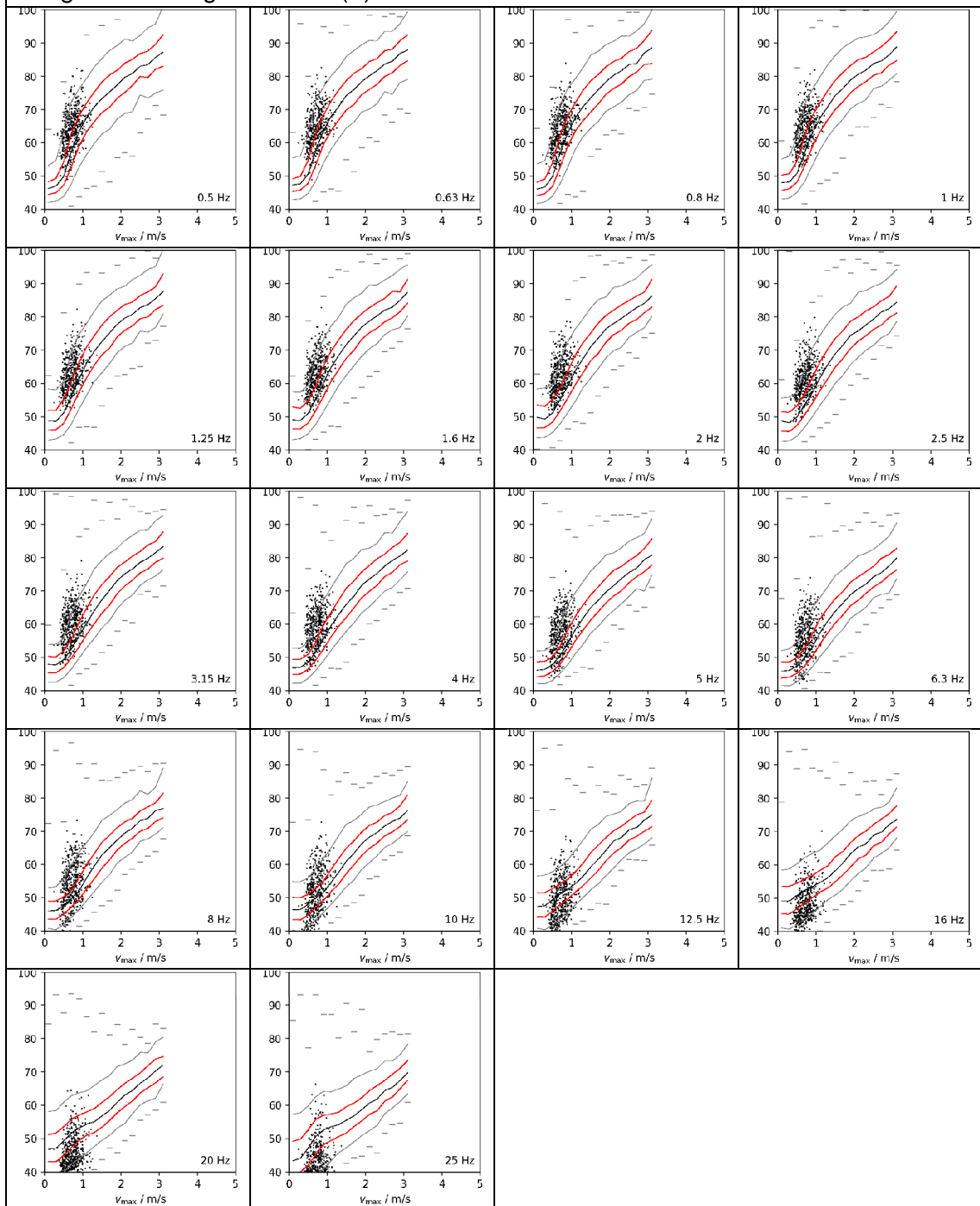
T15: Hannover					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Hannover	
			Datum:	12.09.2022	
			Messbed.	Sonnig	
			Sied.Struk	Großstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
76,9 dB(Z)	74,3 dB(Z)	60,1 dB(Z)	65,5 dB(G)	62,4 dB(C)	58,3 dB(A)


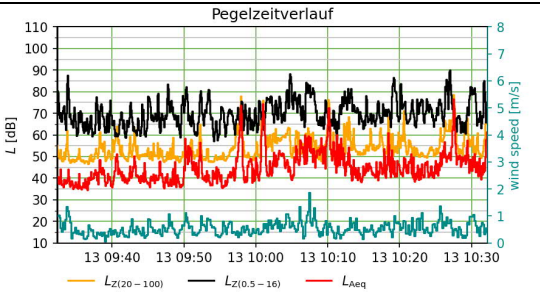
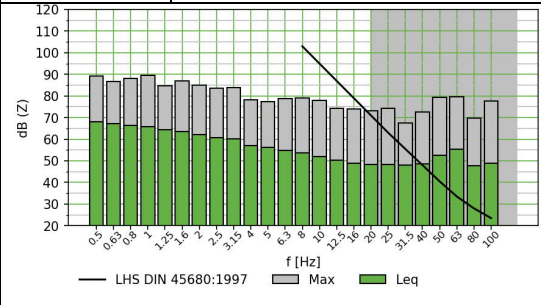
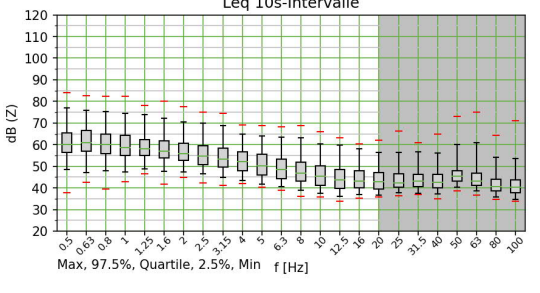
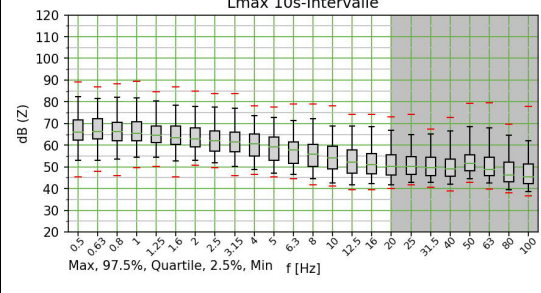
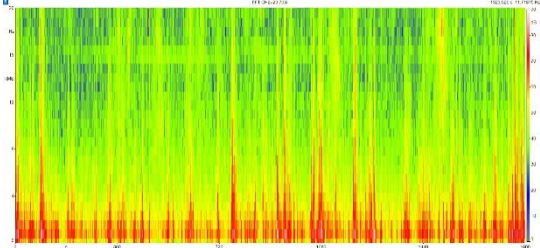
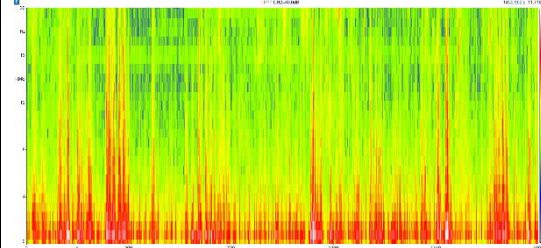
T15: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



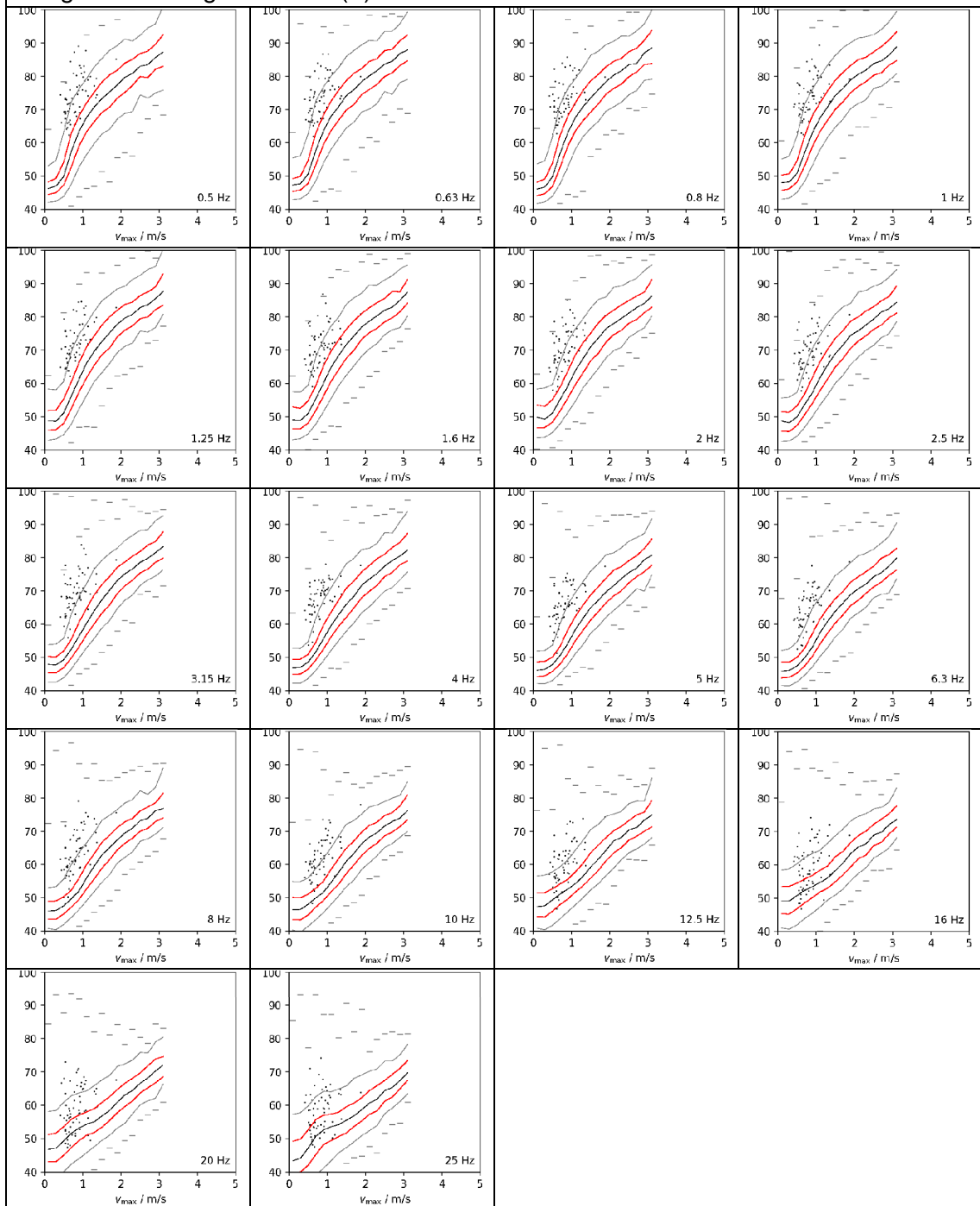
N04: Egeln					
Foto:			Informationen zur Messung:		
Kein Foto			Ort:	Egeln	
			Datum:	12.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
66,1 dB(Z)	63,4 dB(Z)	45,8 dB(Z)	52,7 dB(G)	45,8 dB(C)	39,0 dB(A)


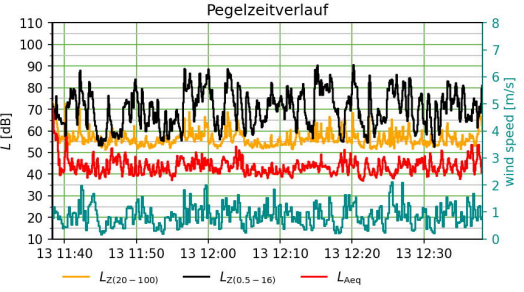
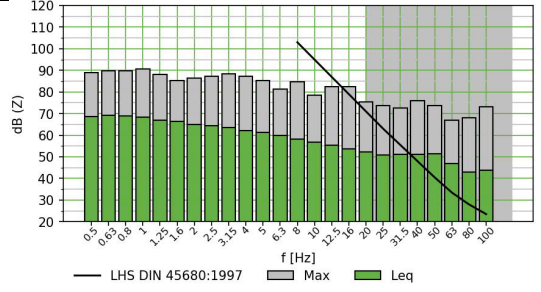
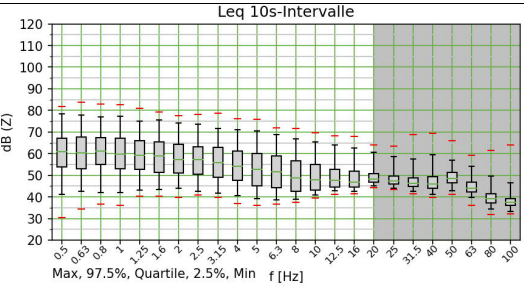
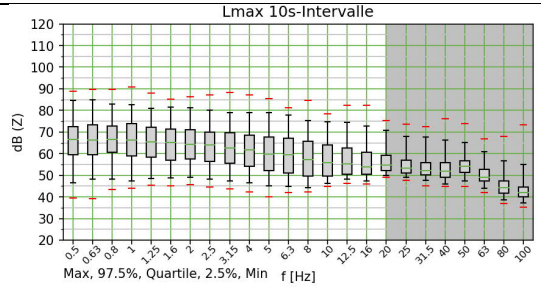
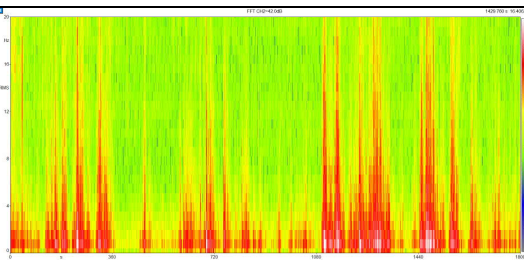
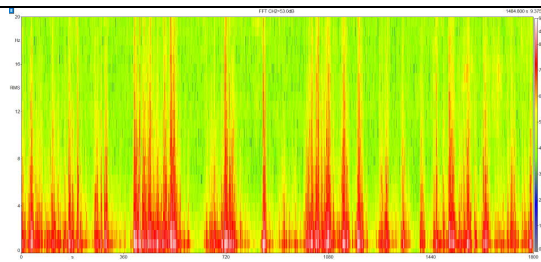
N04: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{\max} in dB(Z) zu v_{\max} in m/s



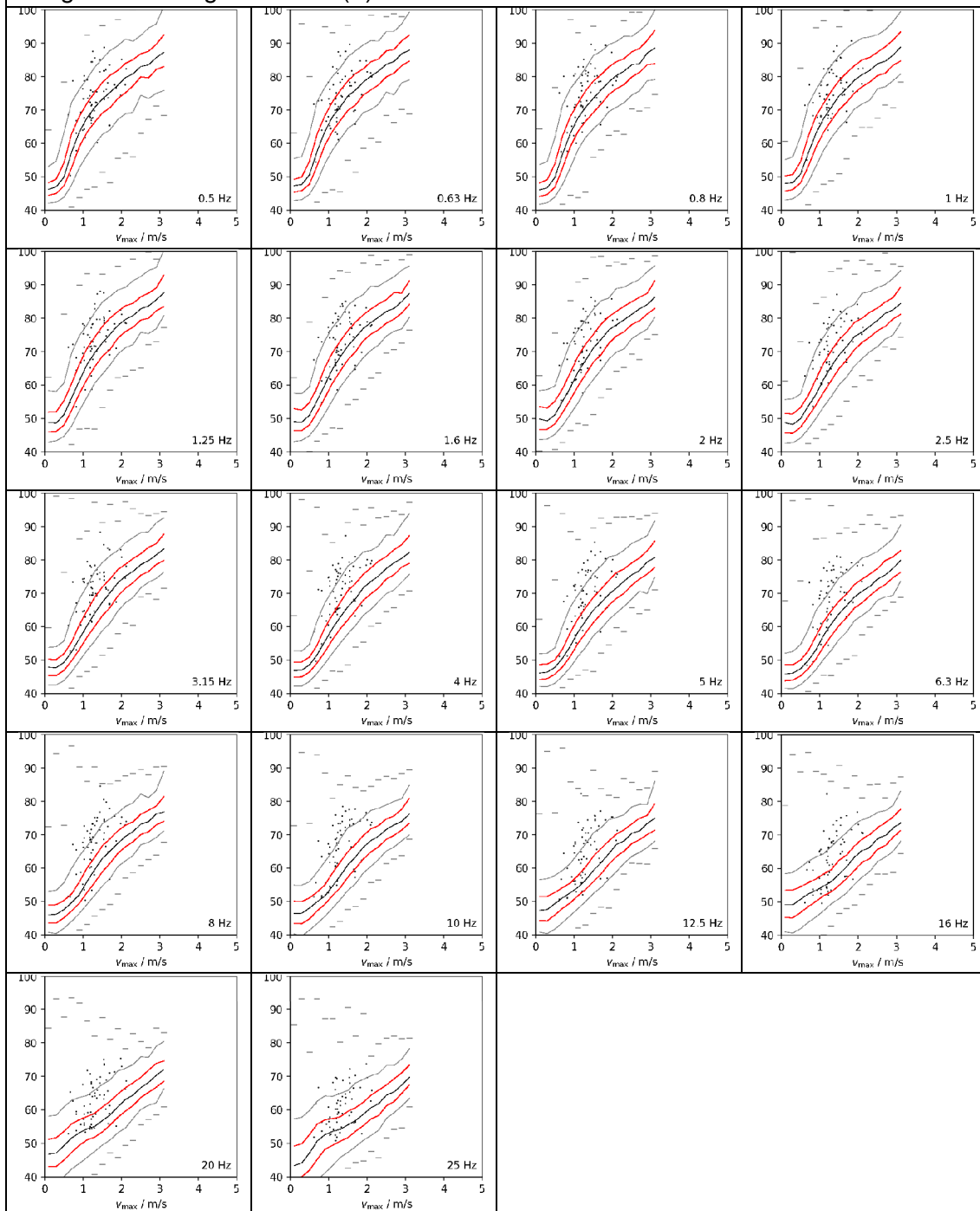
T16: Merzien					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Merzien	
			Datum:	13.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
75,1 dB(Z)	71,6 dB(Z)	59,7 dB(Z)	62,1 dB(G)	62,1 dB(C)	55,3 dB(A)


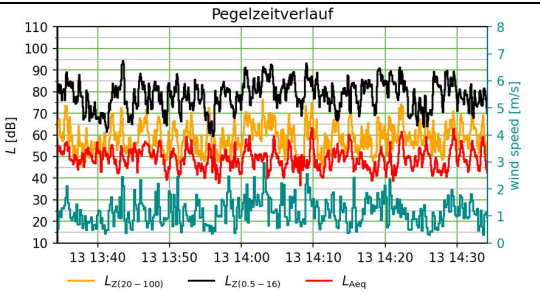
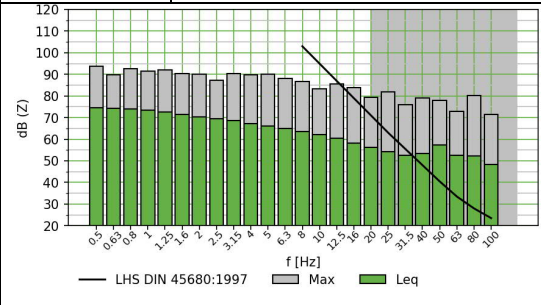
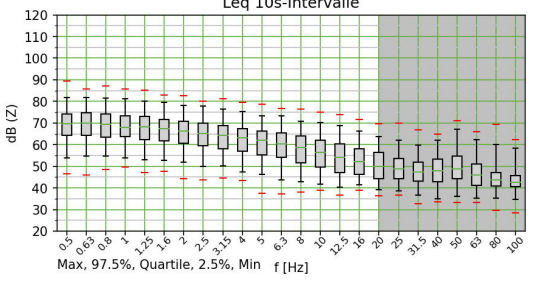
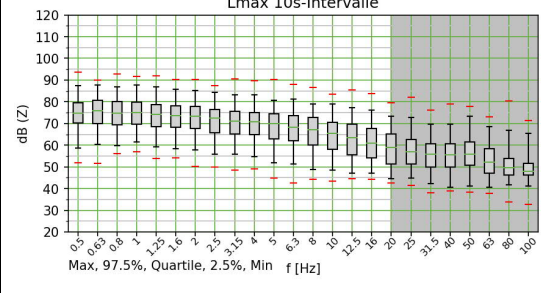
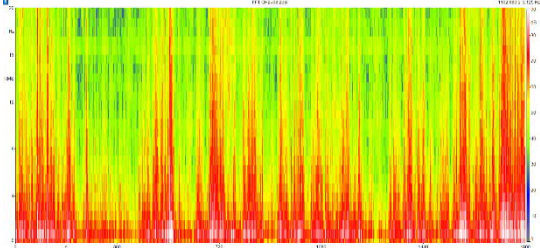
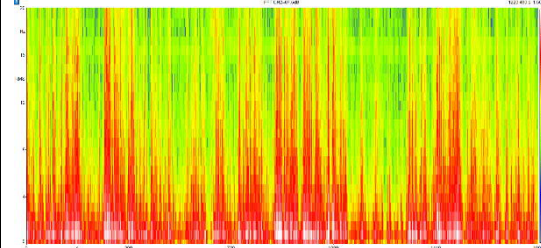
T16: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



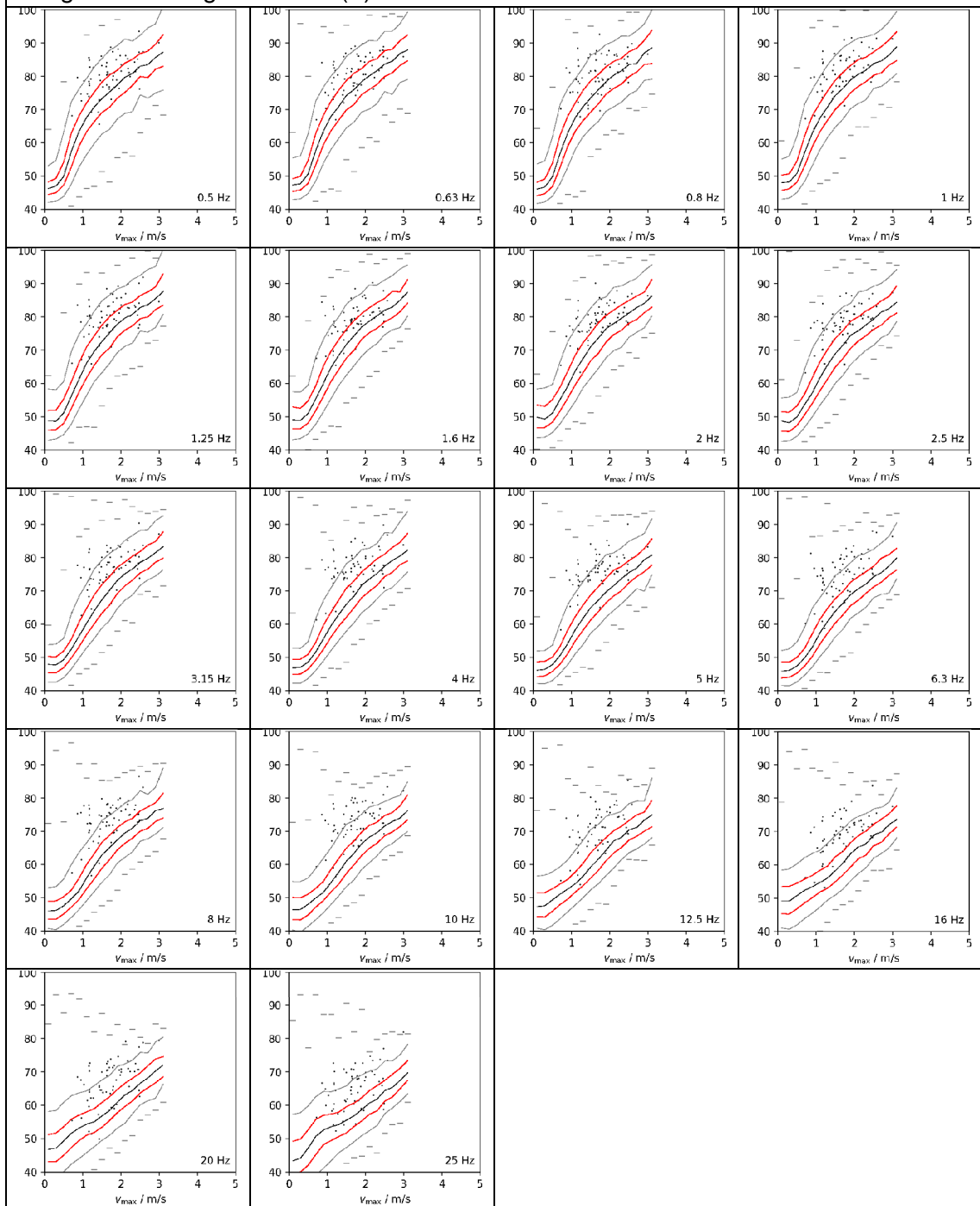
T17: Bad Döben					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Bad Döben	
			Datum:	13.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
77,3 dB(Z)	74,7 dB(Z)	58,9 dB(Z)	66,6 dB(G)	57,7 dB(C)	48,4 dB(A)


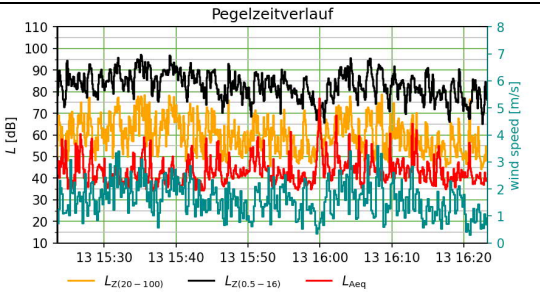
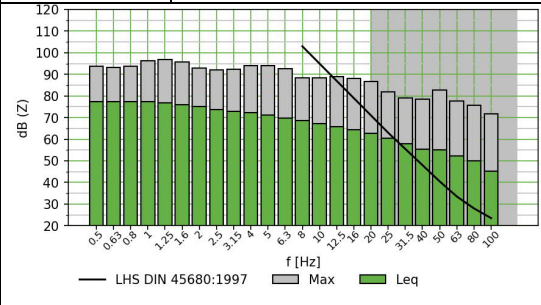
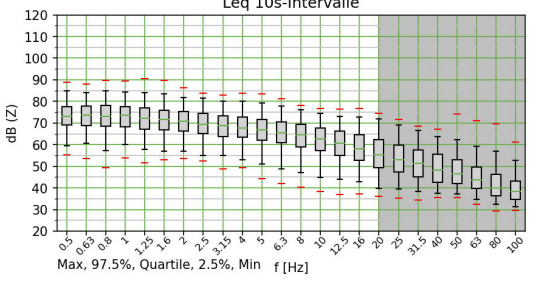
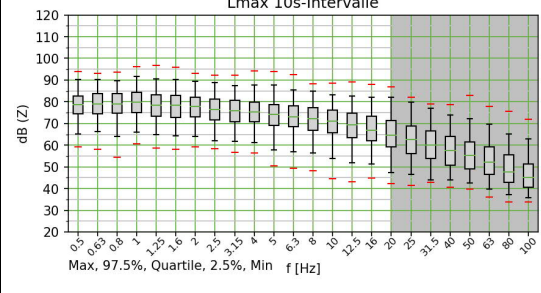
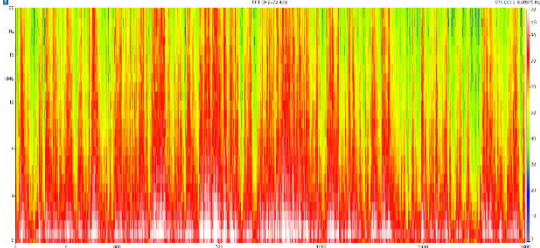
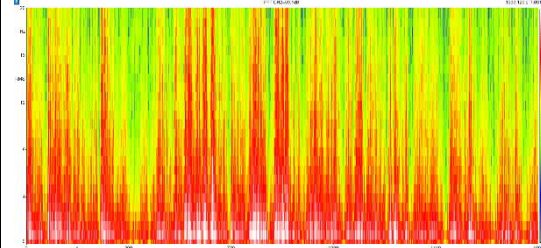
T17: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



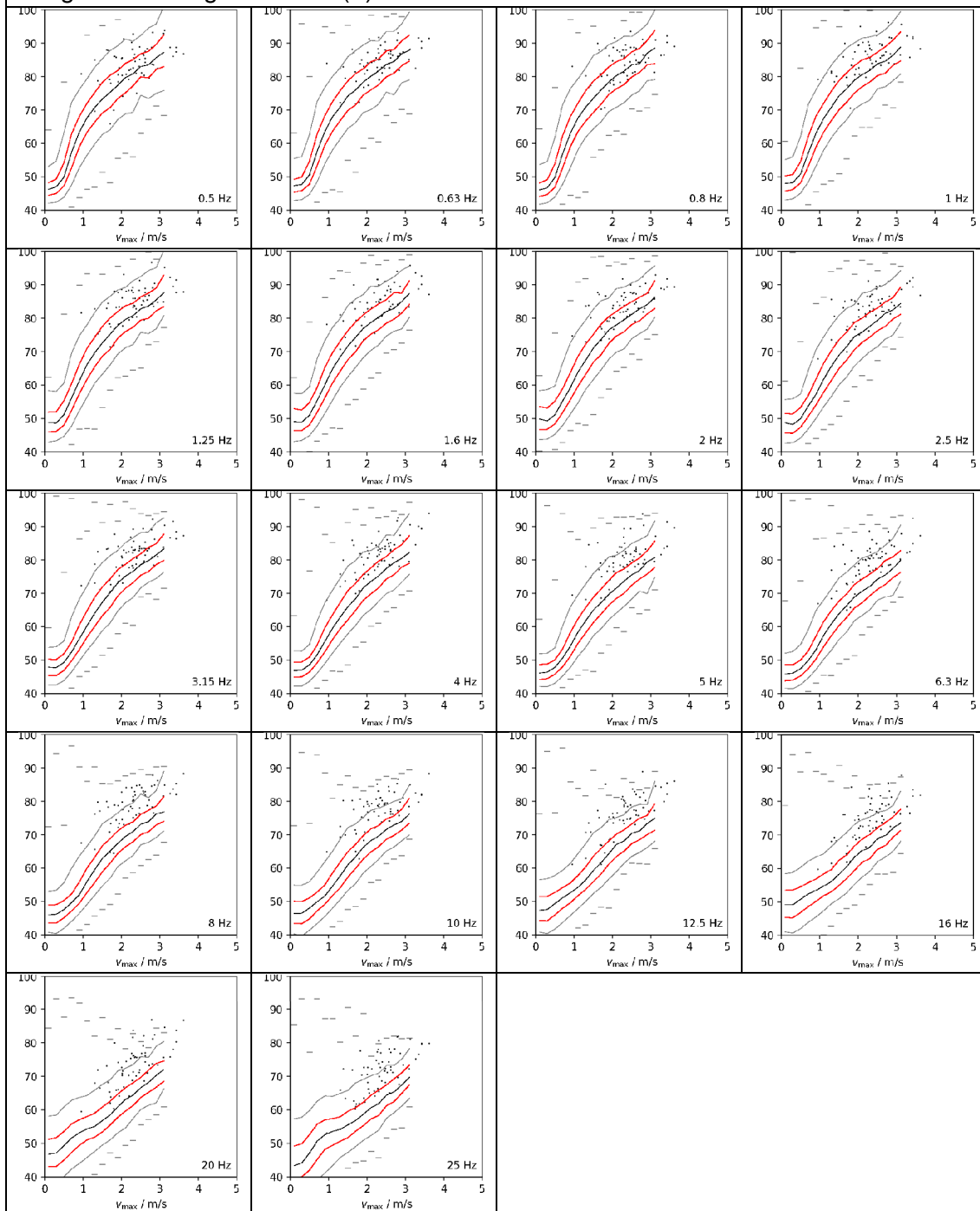
T18: Beilrode					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Beilrode	
			Datum:	13.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
82,5 dB(Z)	79,9 dB(Z)	63,2 dB(Z)	71,3 dB(G)	62,5 dB(C)	51,7 dB(A)


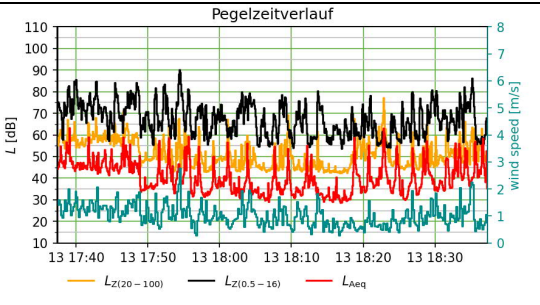
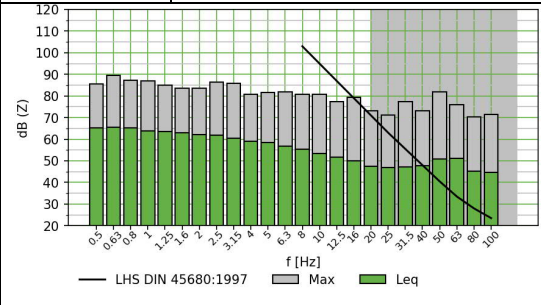
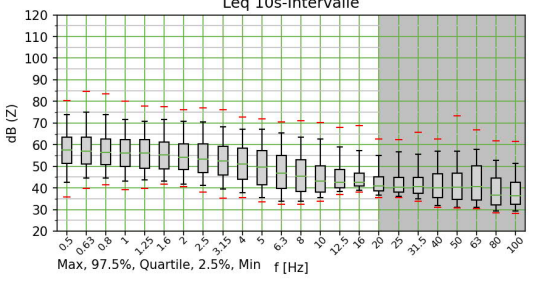
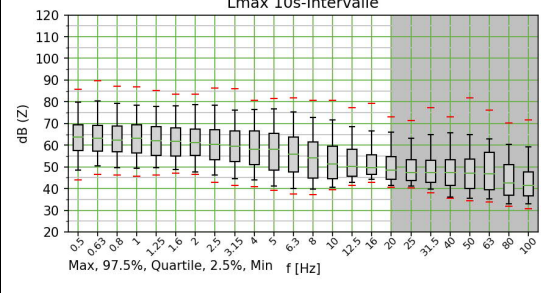
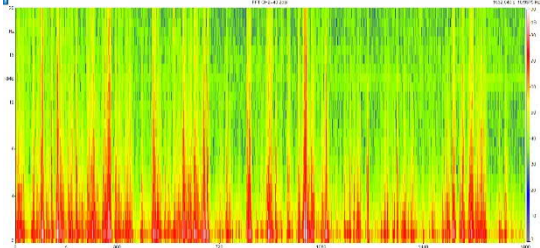
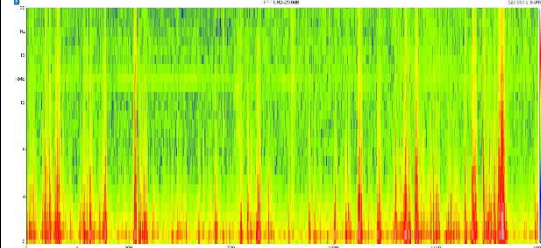
T18: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



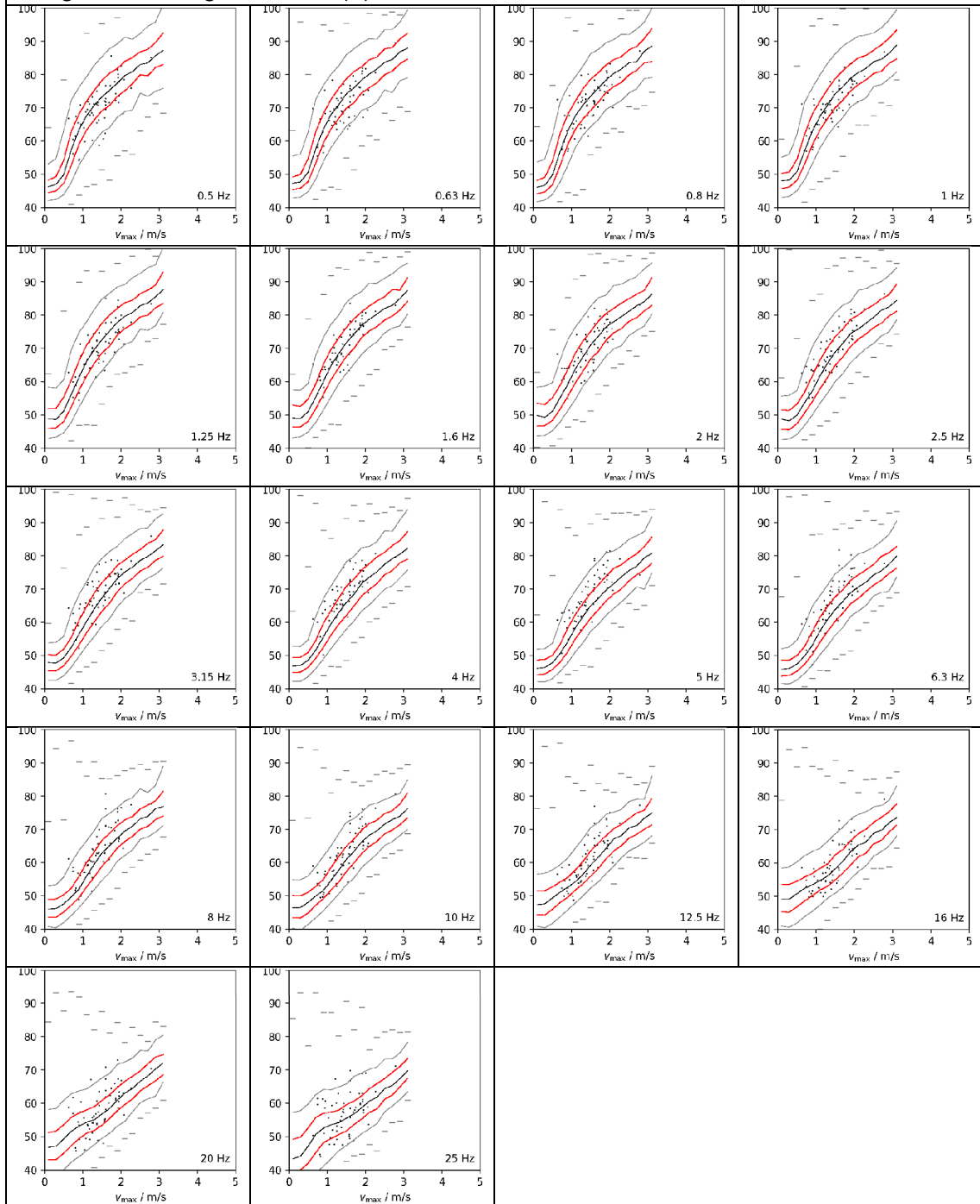
T19: Strehla					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Strehla	
			Datum:	13.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
86,5 dB(Z)	84,5 dB(Z)	66,5 dB(Z)	77,1 dB(G)	64,9 dB(C)	52,5 dB(A)


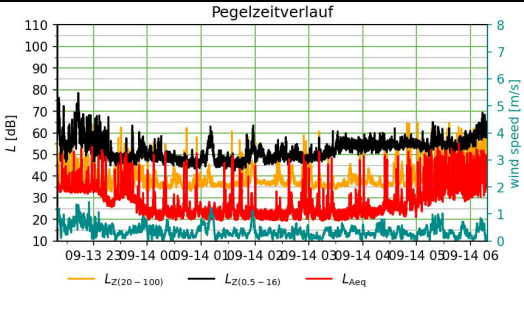
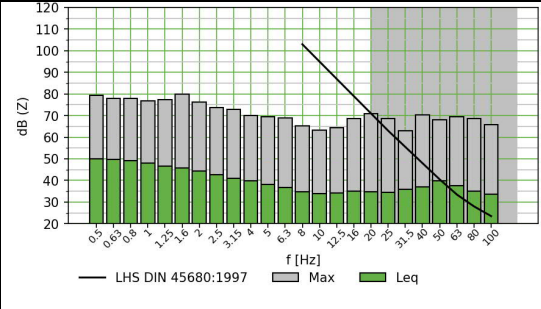
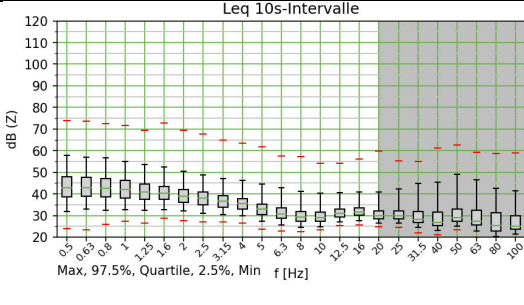
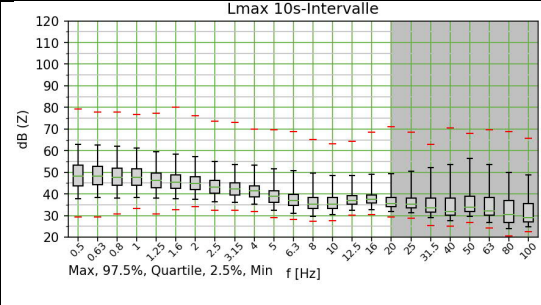
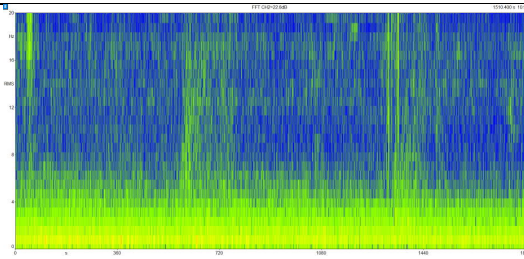
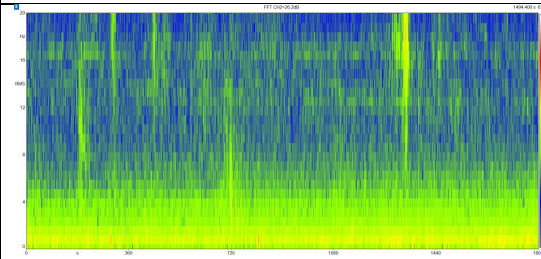
T19: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



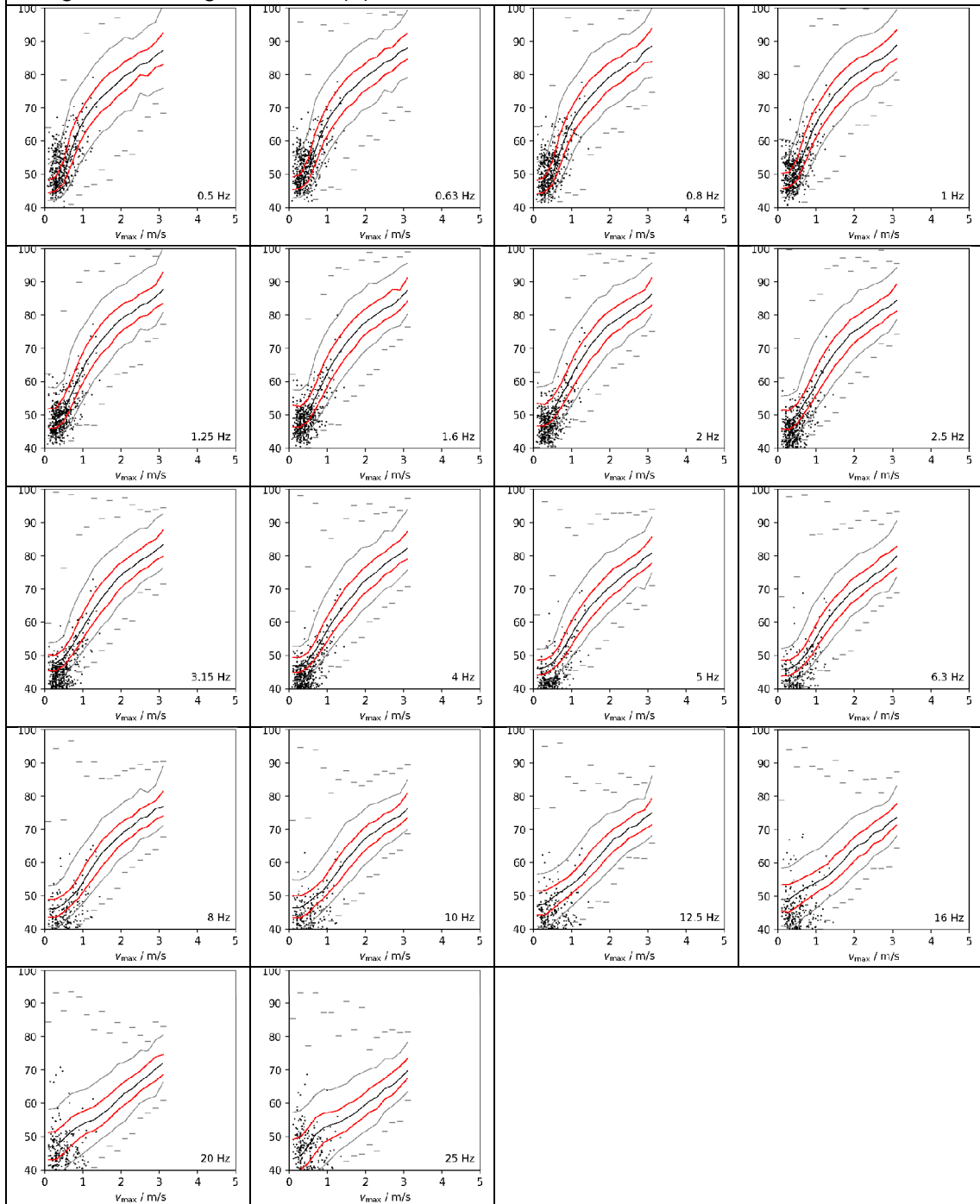
T20: Pohrsdorf					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Pohrsdorf	
			Datum:	13.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
73,9 dB(Z)	71,4 dB(Z)	57,2 dB(Z)	62,8 dB(G)	57,0 dB(C)	47,1 dB(A)


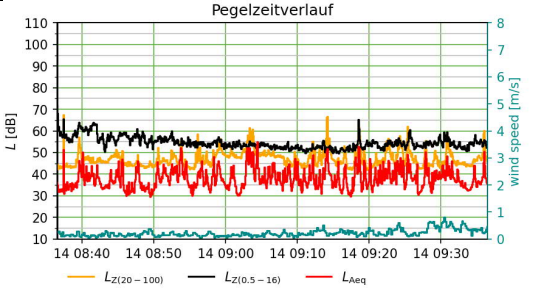
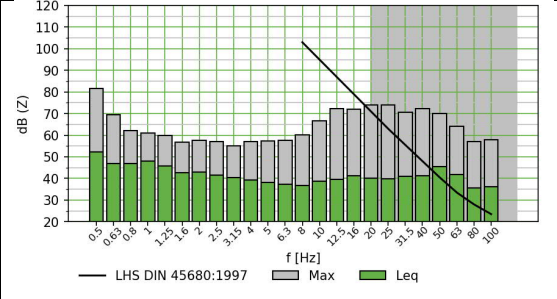
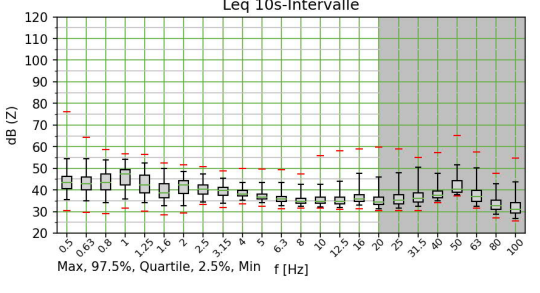
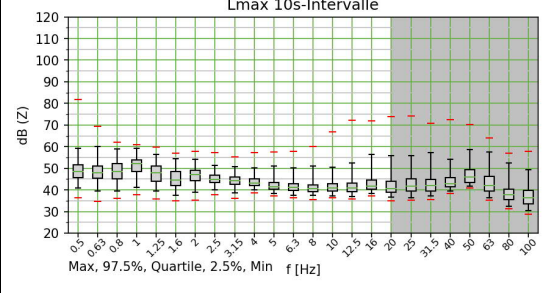
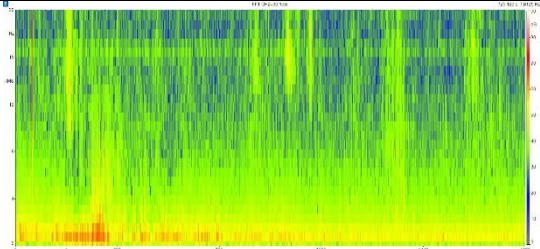
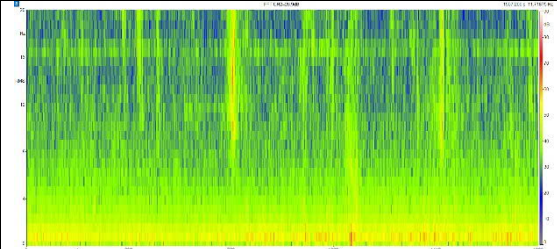
T20: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{\max} in dB(Z) zu v_{\max} in m/s



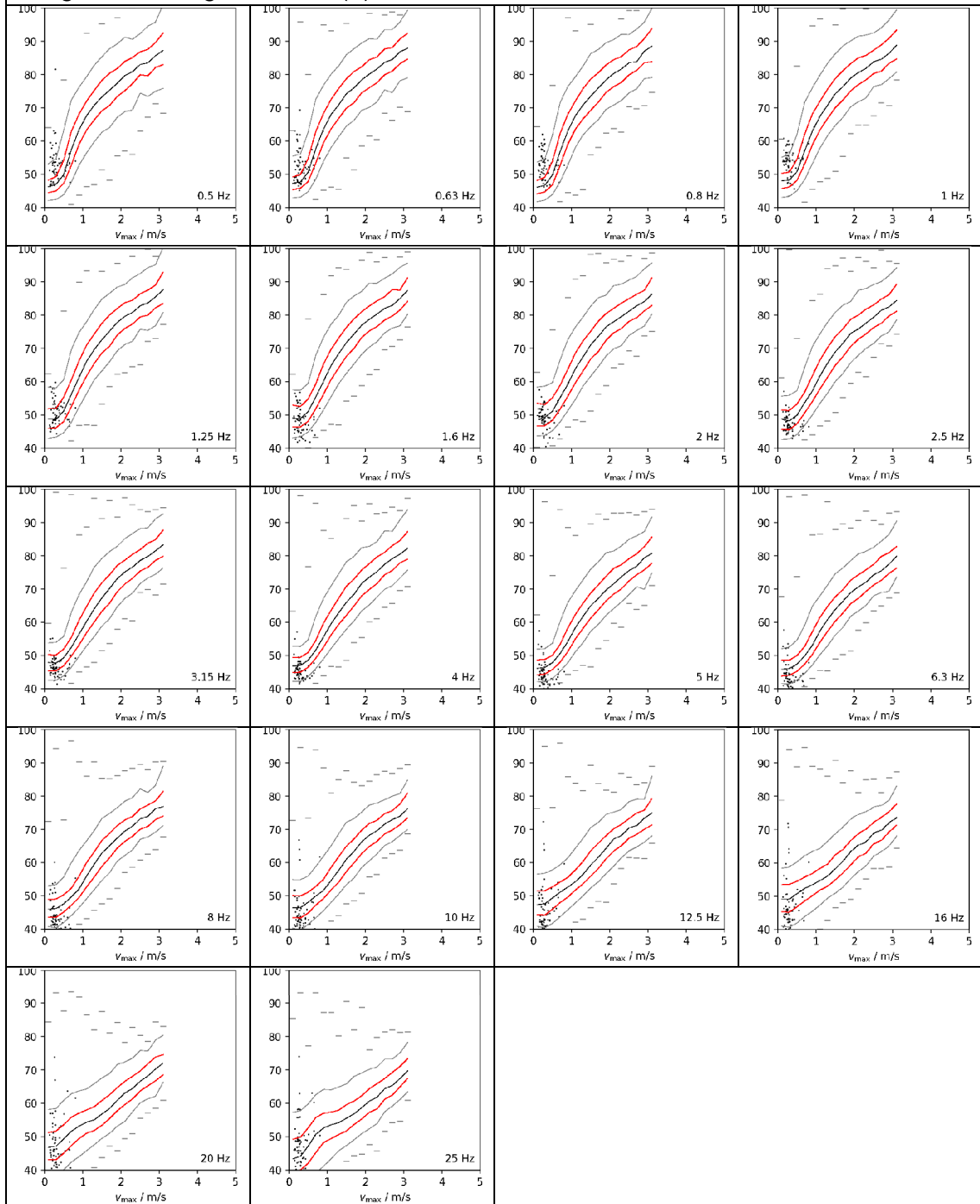
N05: Pauldorf					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Pauldorf	
			Datum:	13.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
57,5 dB(Z)	53,8 dB(Z)	45,6 dB(Z)	47,4 dB(G)	45,4 dB(C)	37,3 dB(A)


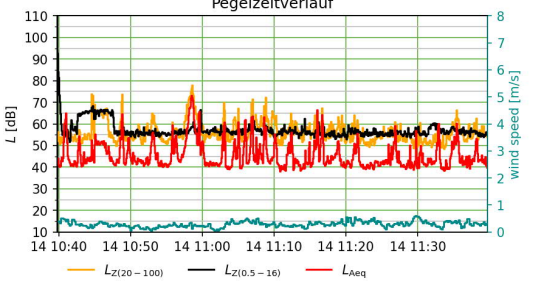
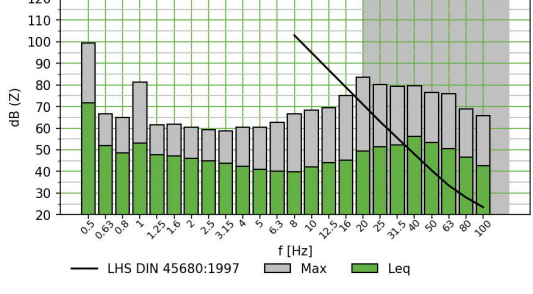
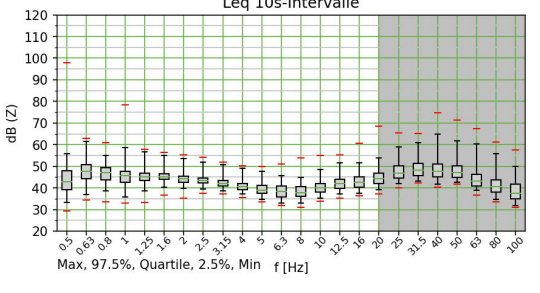
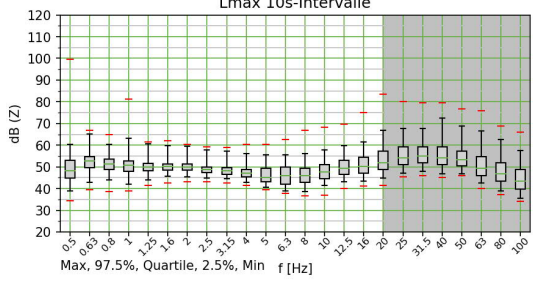
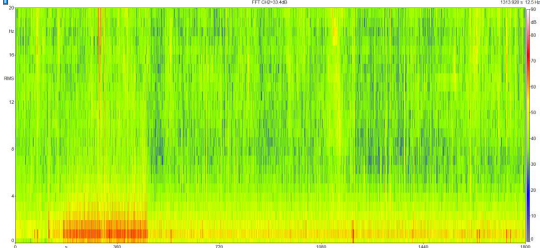
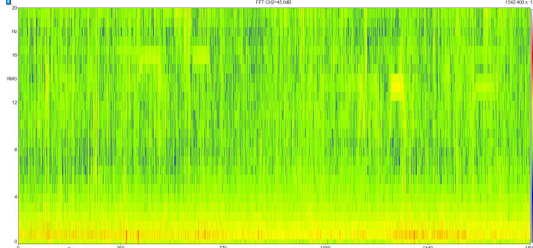
N05: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



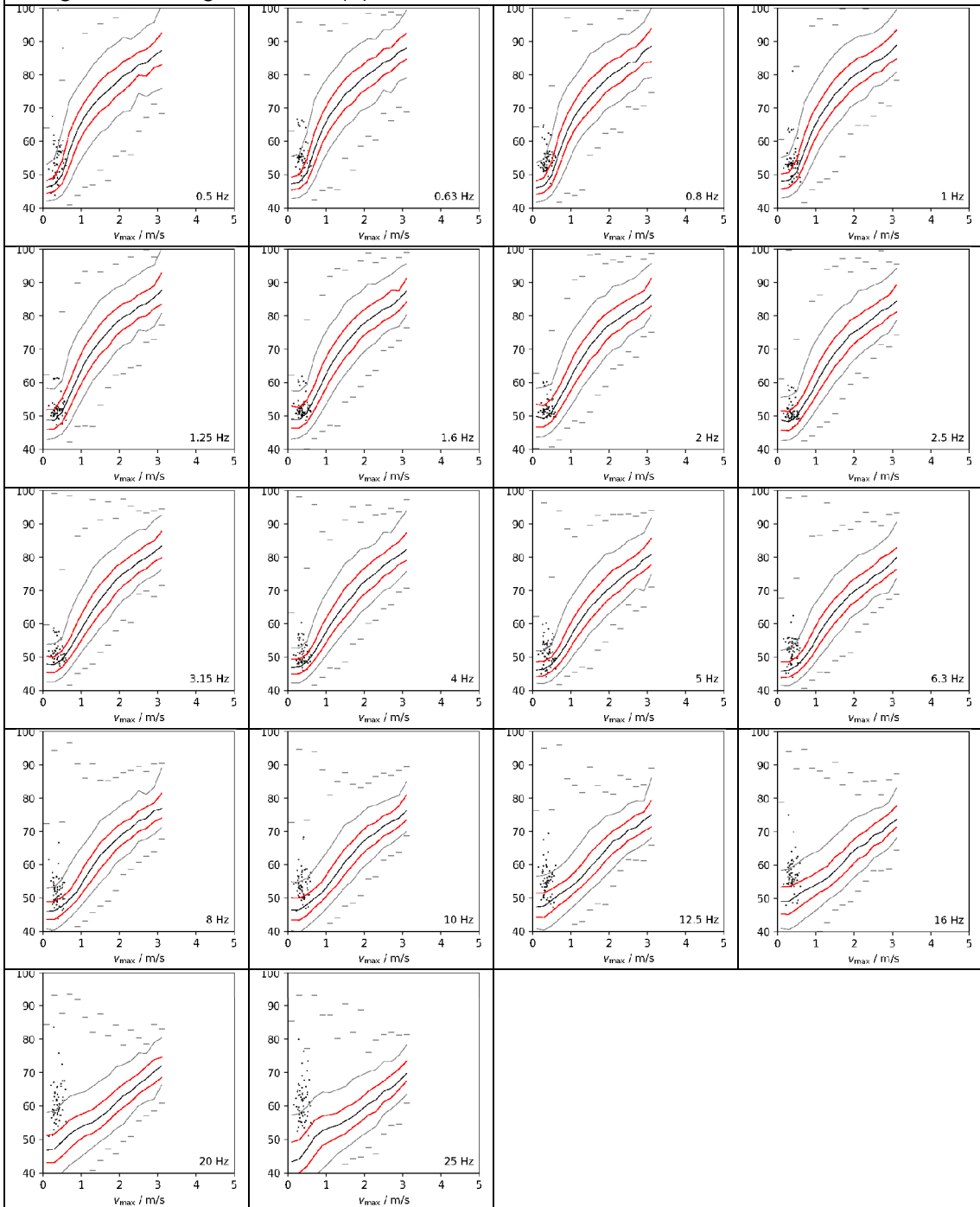
T21: Eppendorf					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Eppendorf	
			Datum:	14.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
57,5 dB(Z)	53,5 dB(Z)	50,2 dB(Z)	52,8 dB(G)	49,8 dB(C)	41,2 dB(A)


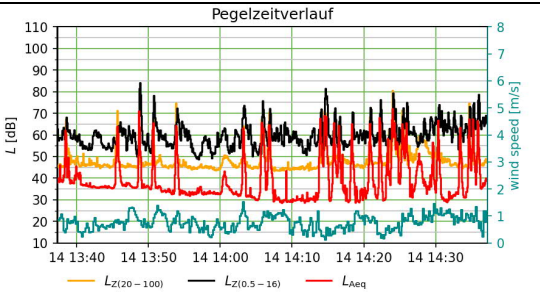
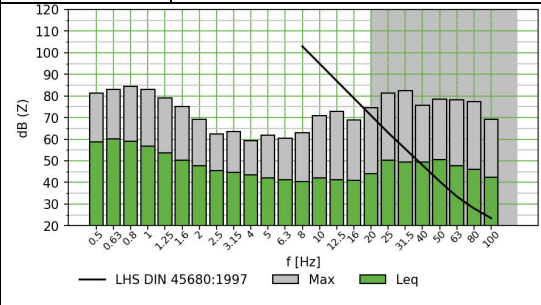
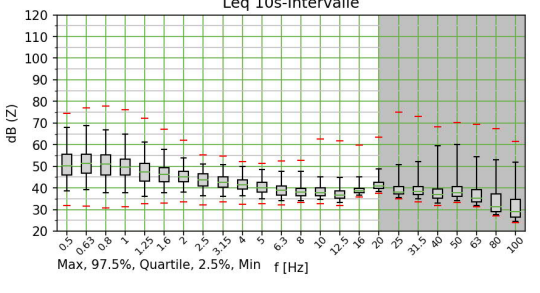
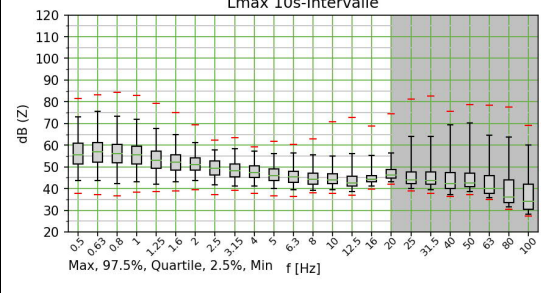
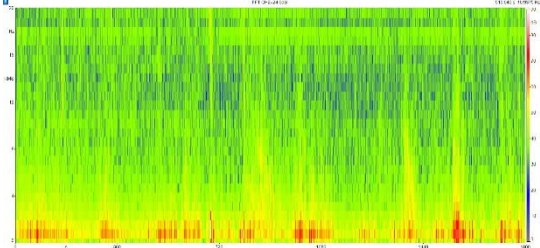
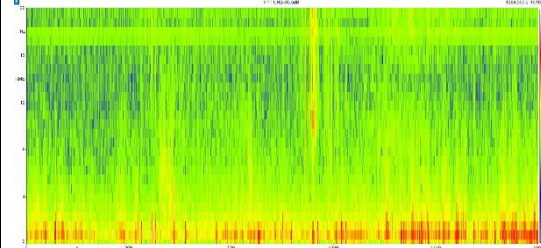
T21: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



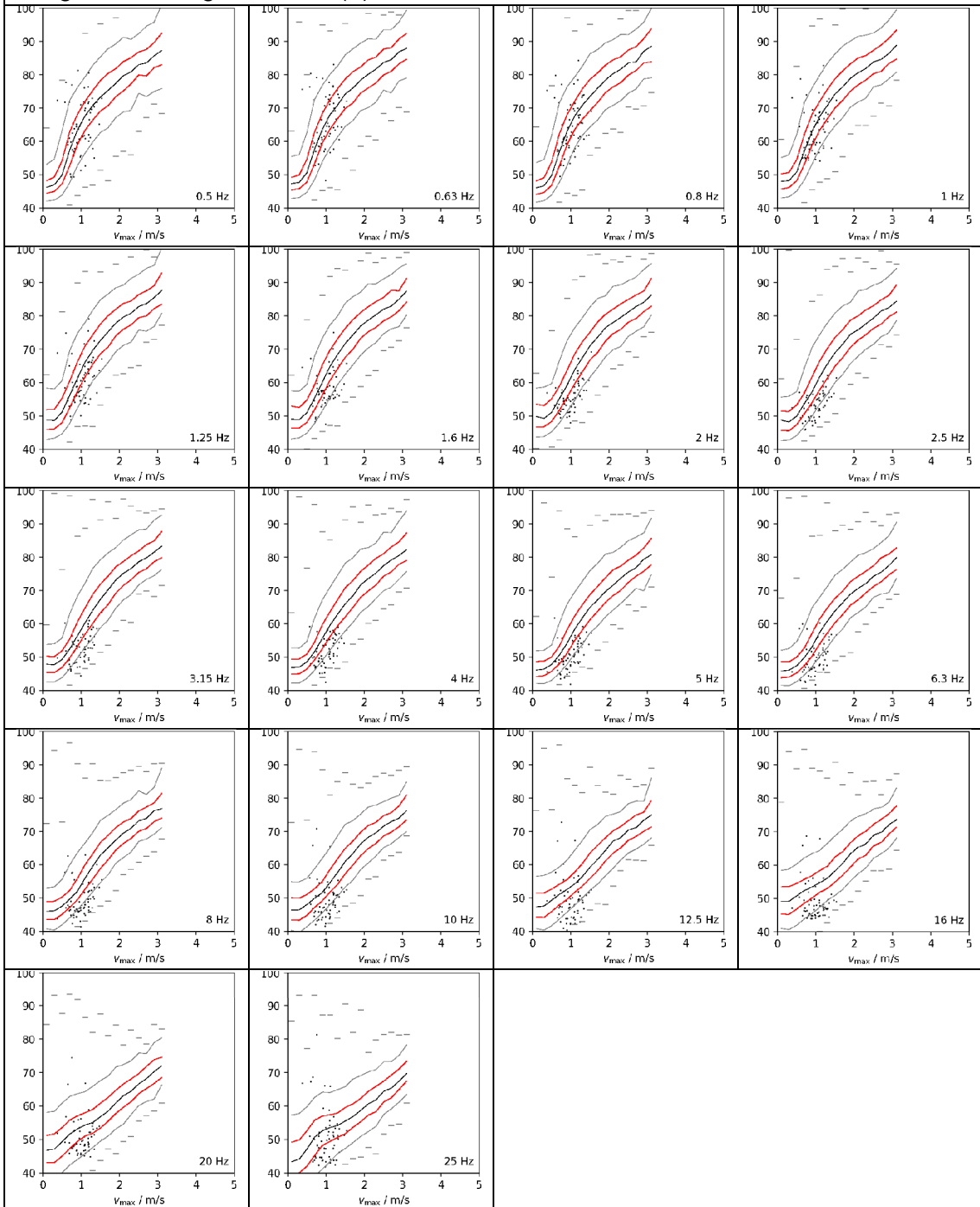
T22: Chemnitz					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Chemnitz	
			Datum:	14.09.2022	
			Messbed.	Regen	
			Sied.Struk	Großstadt	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
70,2 dB(Z)	56,7 dB(Z)	60,8 dB(Z)	59,9 dB(G)	60,3 dB(C)	53,8 dB(A)


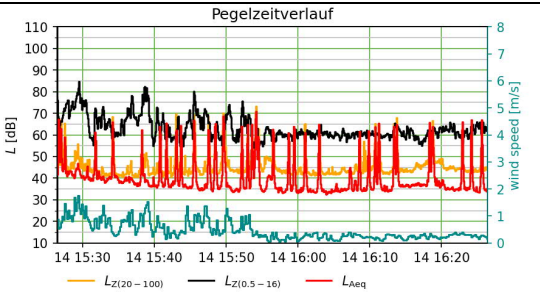
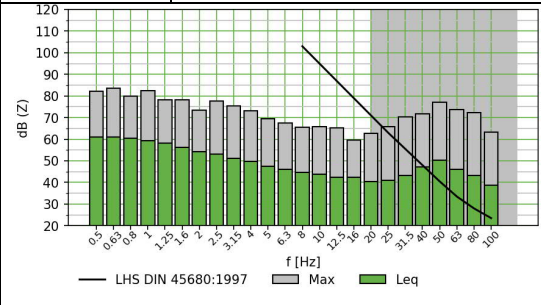
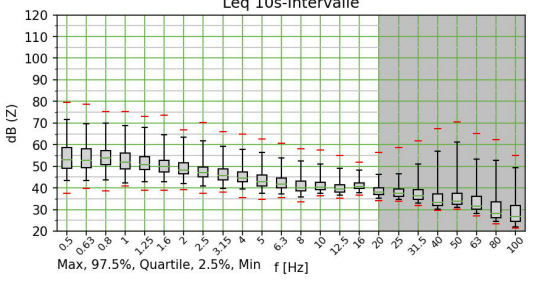
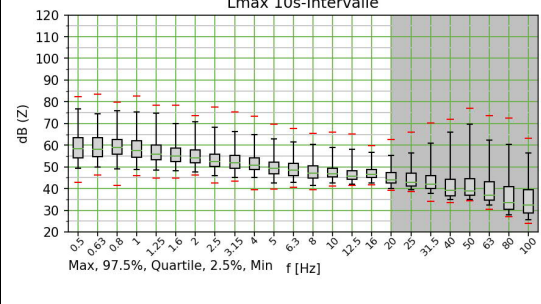
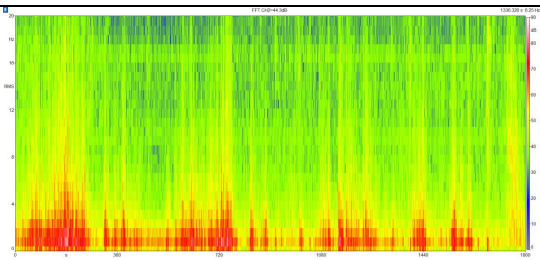
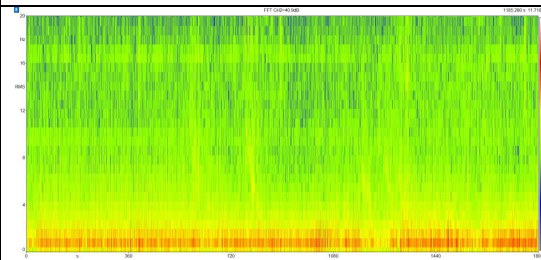
T22: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



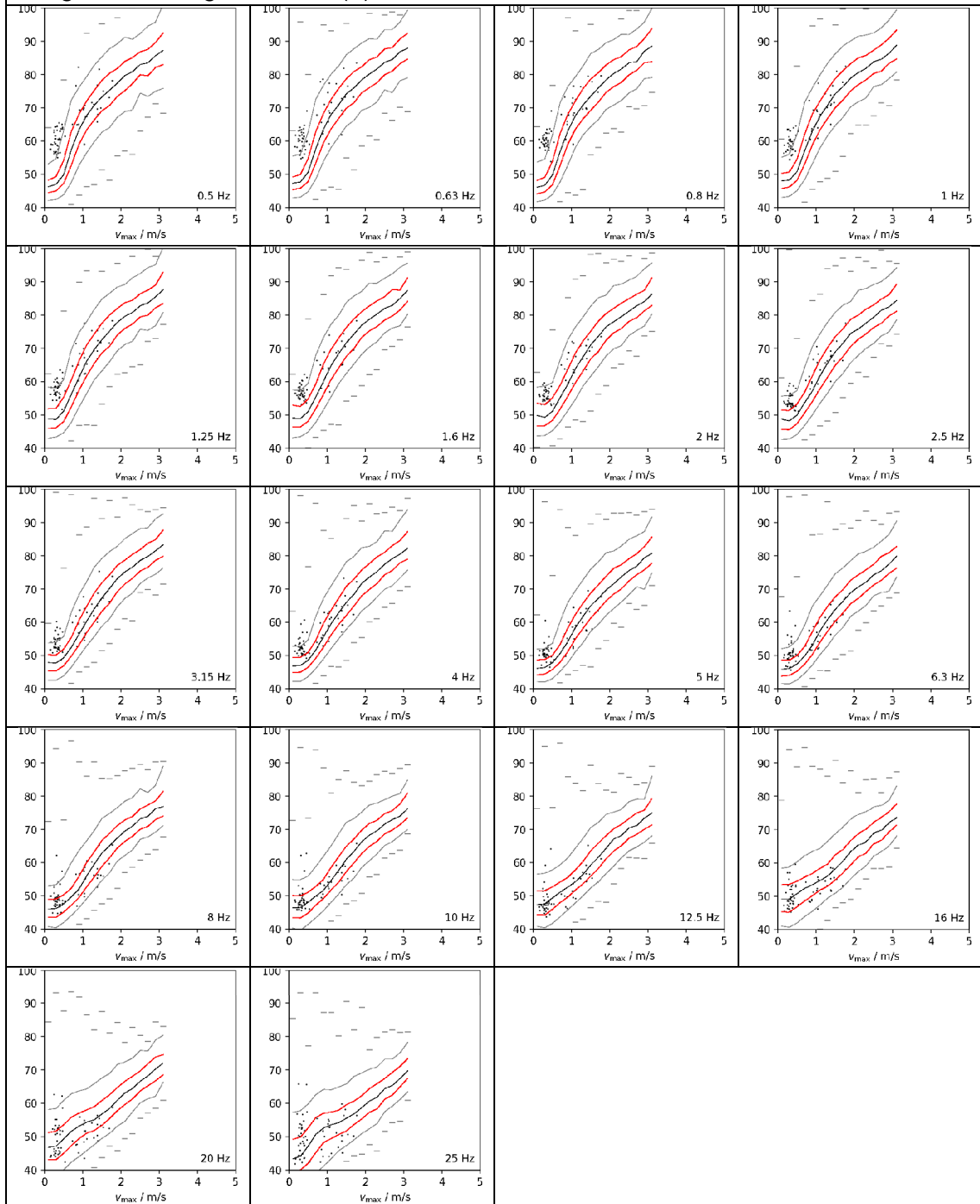
T23: Röthenitz					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Röthenitz	
			Datum:	14.09.2022	
			Messbed.	Regen	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
66,5 dB(Z)	60,2 dB(Z)	57,4 dB(Z)	55,3 dB(G)	57,9 dB(C)	54,1 dB(A)

T23: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



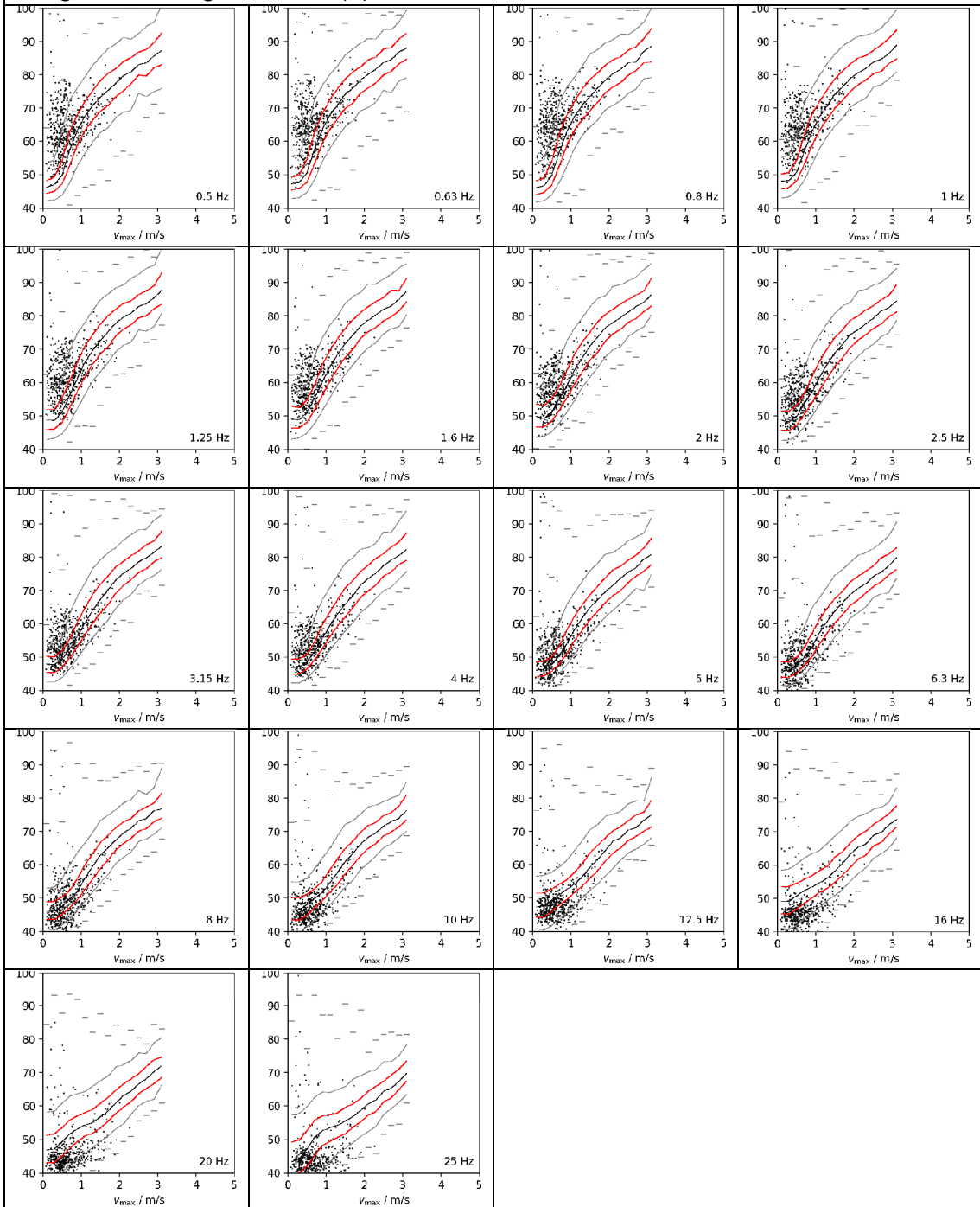
T24: Wetterzeube					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Wetterzeube	
			Datum:	14.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
68,4 dB(Z)	64,5 dB(Z)	54,4 dB(Z)	54,5 dB(G)	56,2 dB(C)	53,1 dB(A)


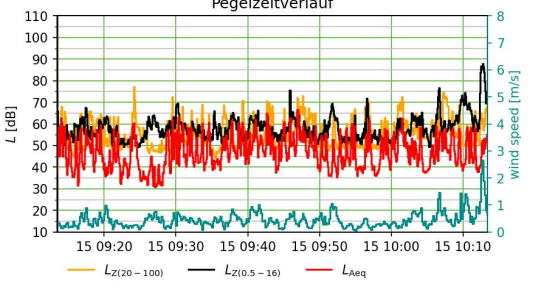
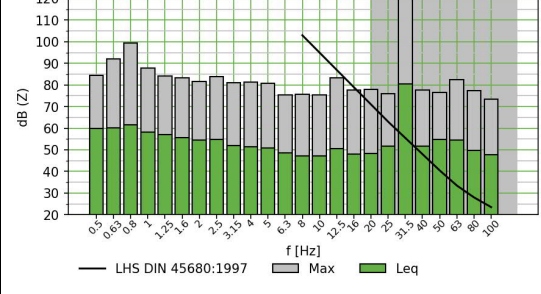
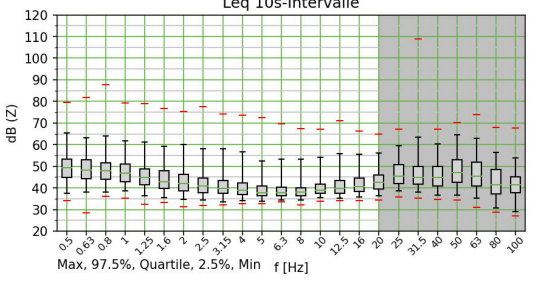
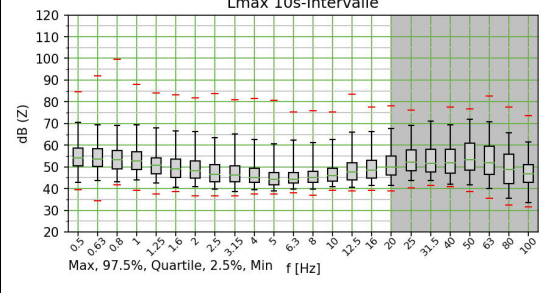
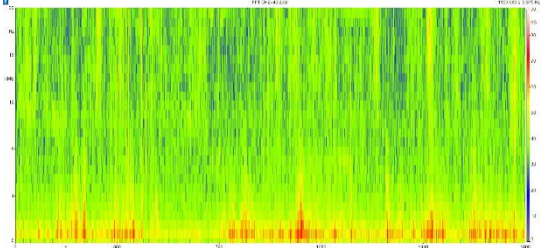
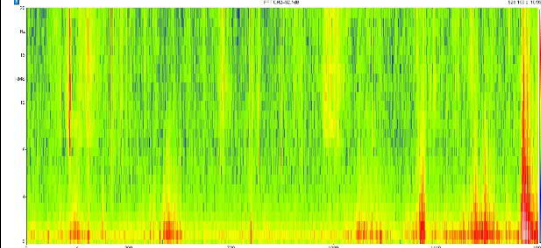
T24: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



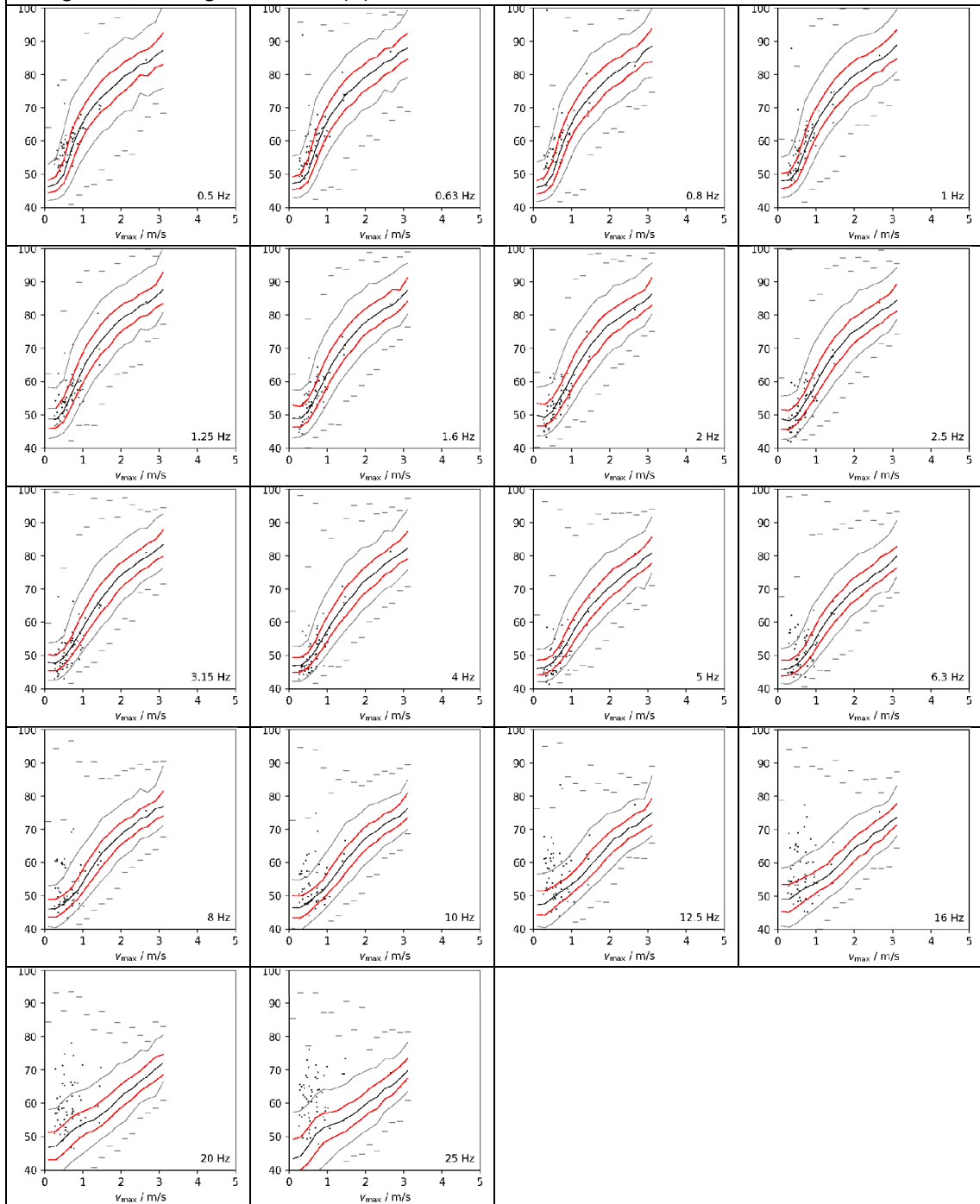
N06: Nesselal					
Foto:			Informationen zur Messung:		
Kein Foto			Ort:	Nesselal	
			Datum:	14.09.2022	
			Messbed.	Achtung WEA	
			Sied.Struk	Dorf	
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
67,4 dB(Z)	63,3 dB(Z)	45,1 dB(Z)	51,8 dB(G)	44,8 dB(C)	36,1 dB(A)


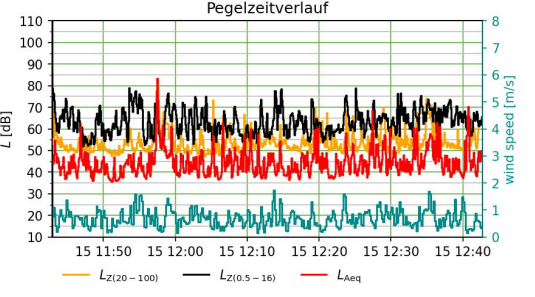
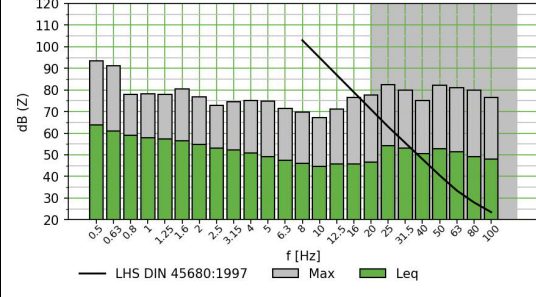
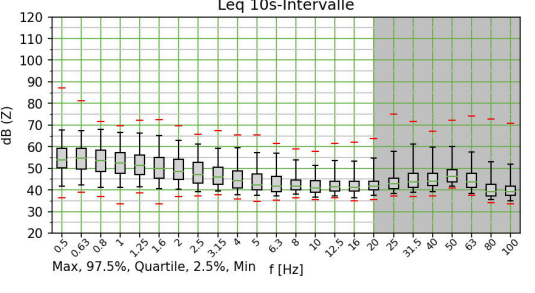
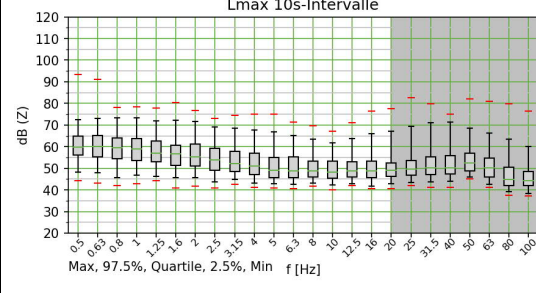
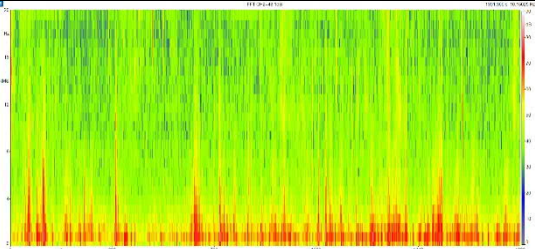
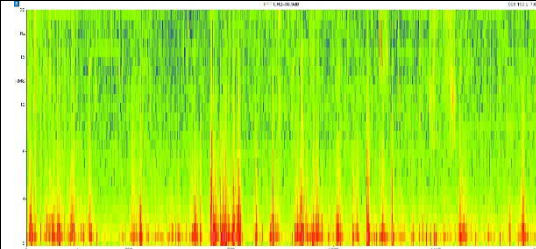
N06: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



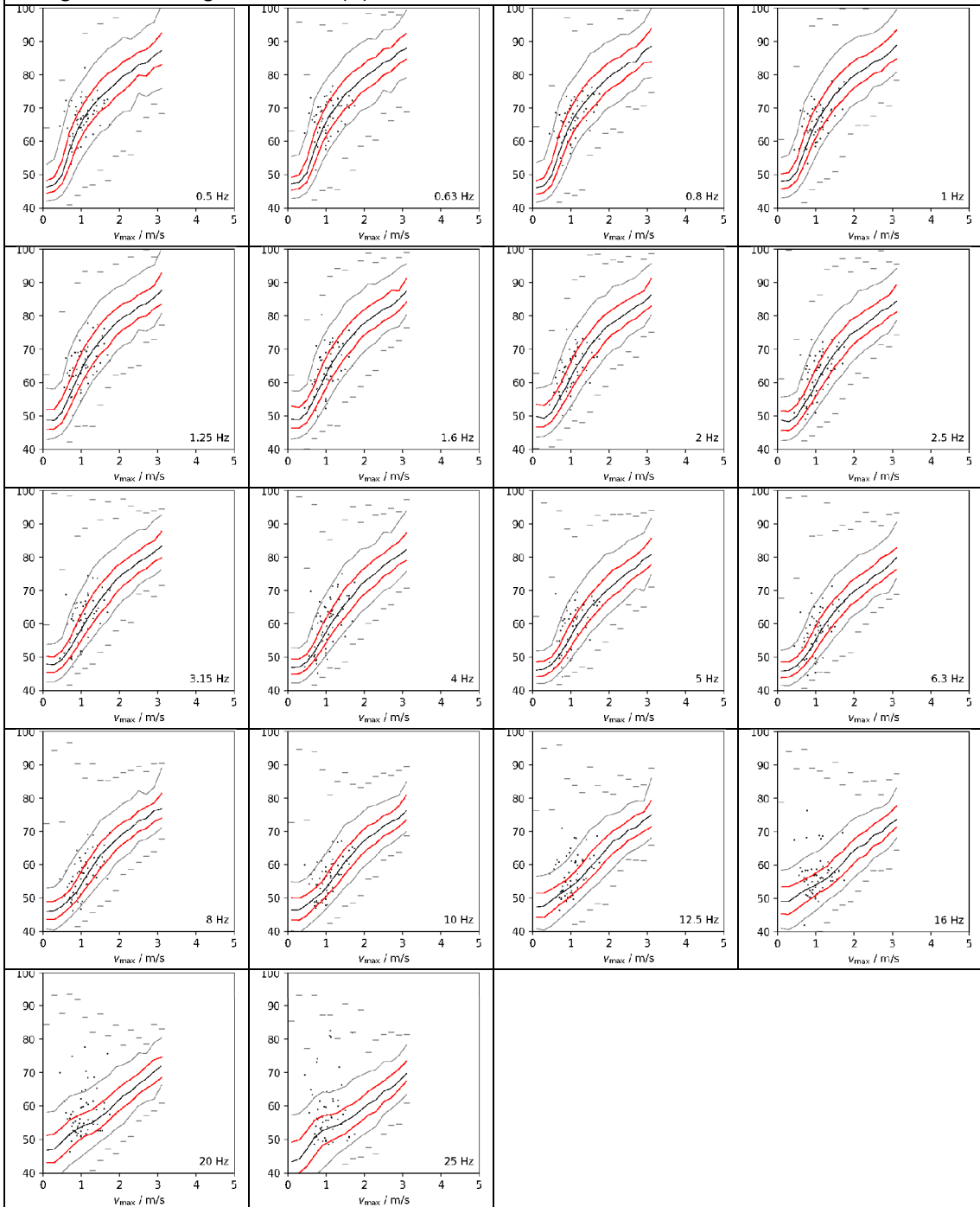
T25: Eschwege					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Eschwege	
			Datum:	15.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Mittelstadt	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
78,5 dB(Z)	64,6 dB(Z)	78,1 dB(Z)	61,0 dB(G)	75,2 dB(C)	52,7 dB(A)

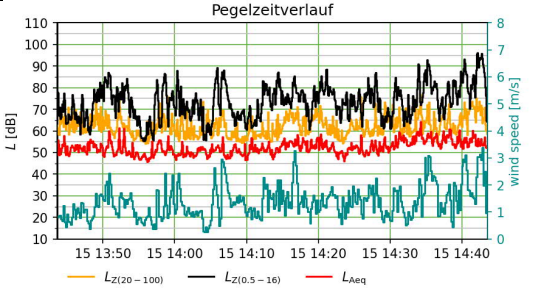
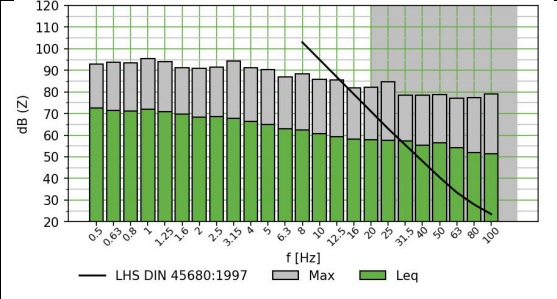
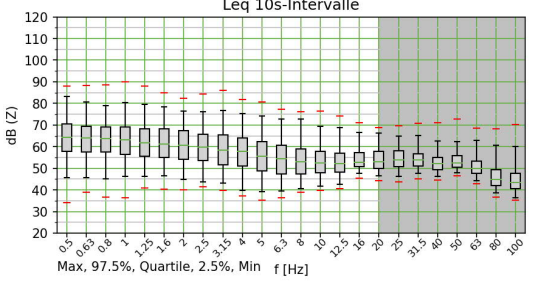
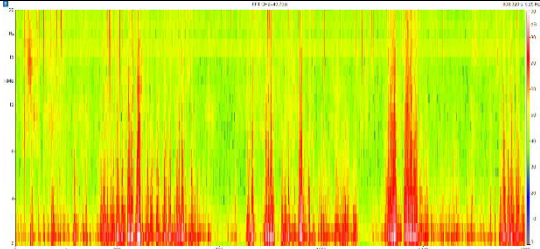
T25: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



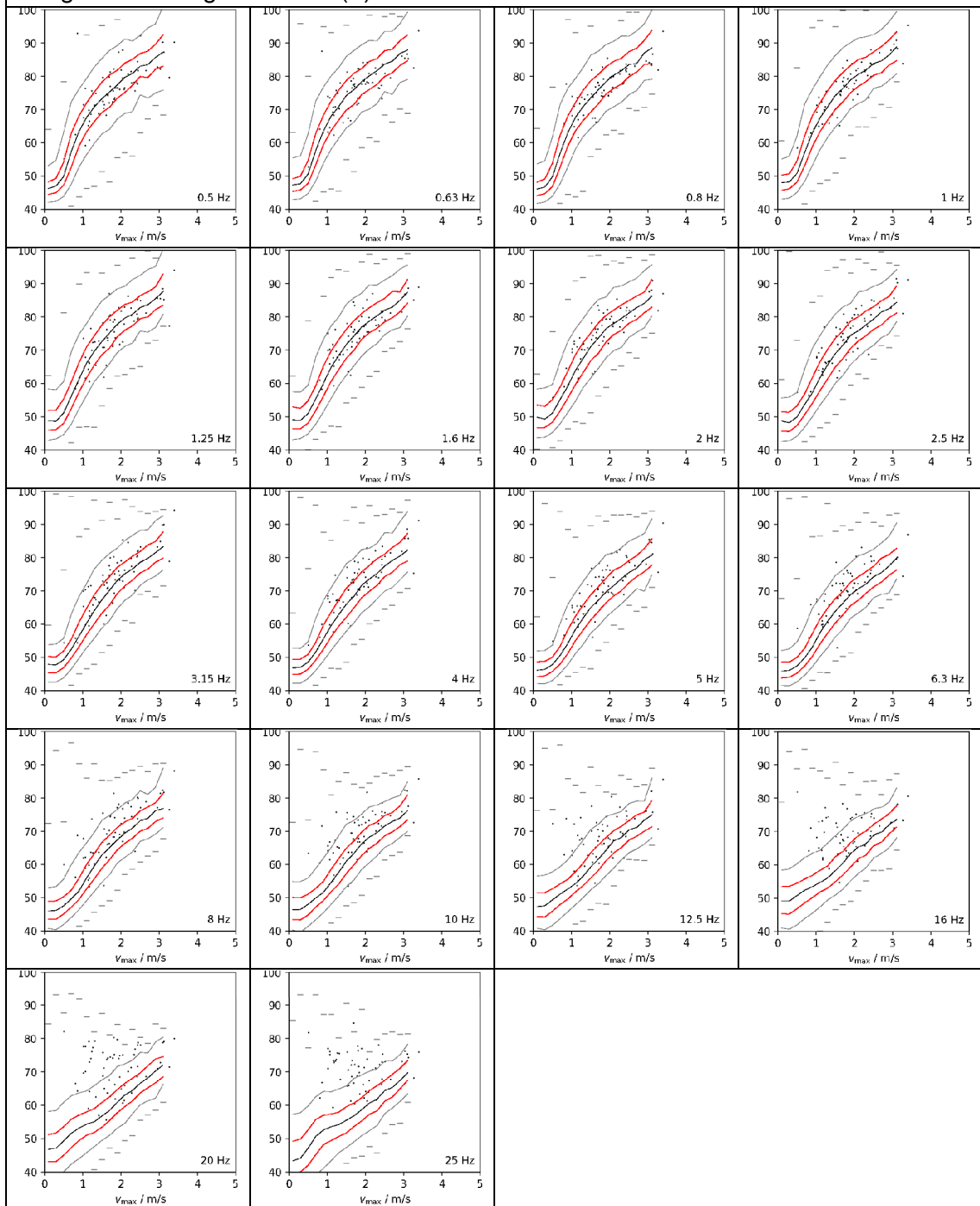
T26: Göttingen					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Göttingen	
			Datum:	15.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Großstadt	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
69,8 dB(Z)	64,3 dB(Z)	60,4 dB(Z)	58,6 dB(G)	63,0 dB(C)	57,1 dB(A)


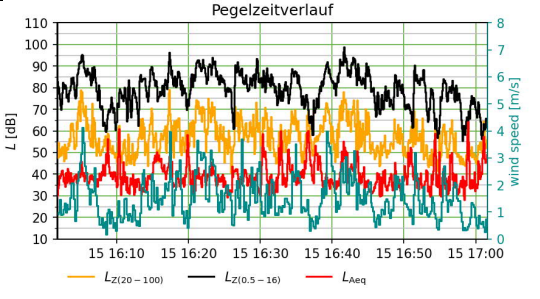
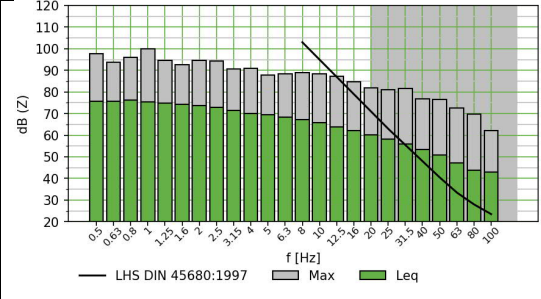
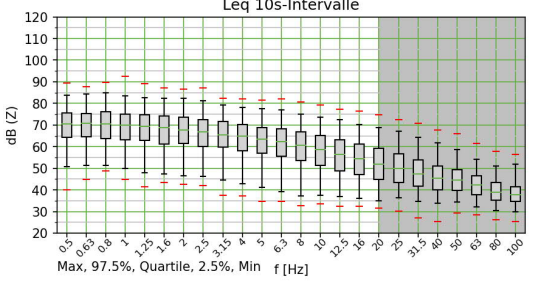
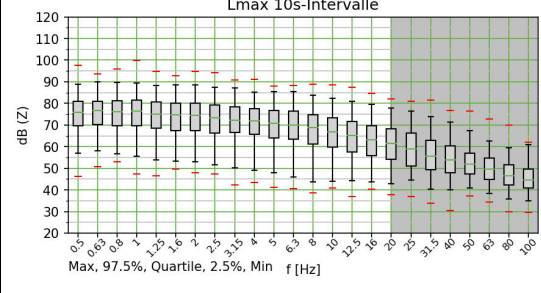
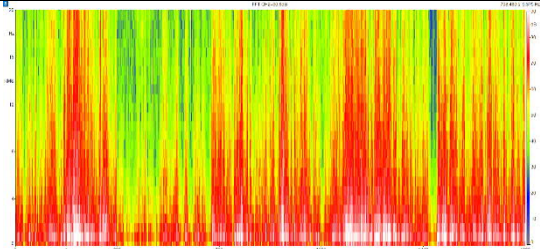
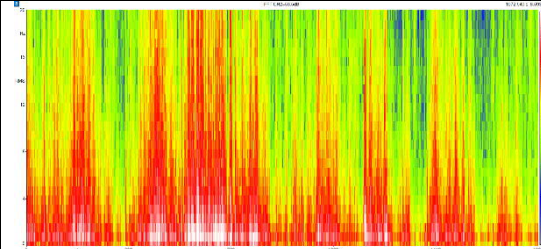
T26: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



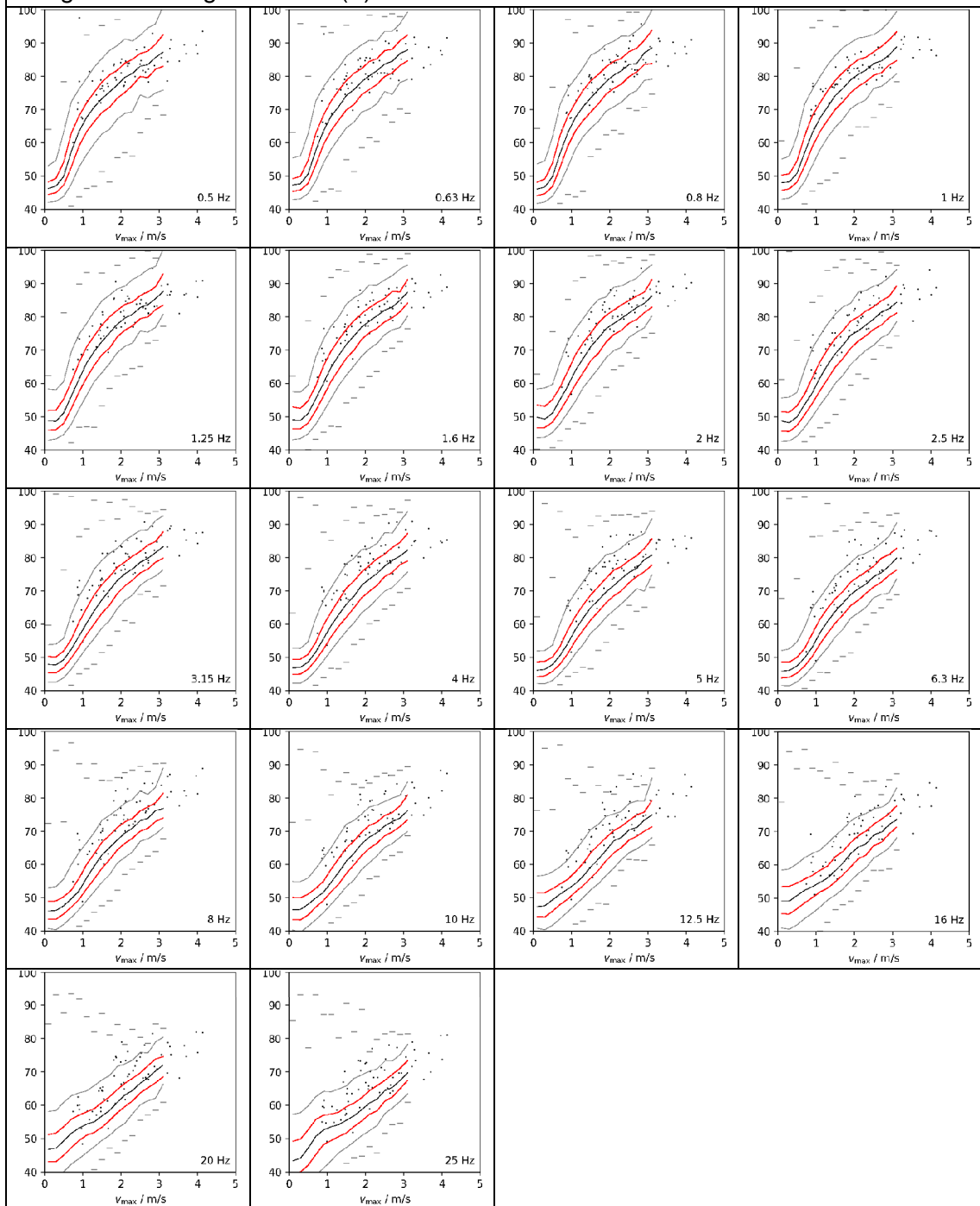
T27: Haan-Münden					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Haan-Münden	
			Datum:	15.09.2022	
			Messbed.	sonnig	
			Sied.Struk	Mittelstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
80,8 dB(Z)	78,6 dB(Z)	64,9 dB(Z)	71,3 dB(G)	63,7 dB(C)	53,5 dB(A)


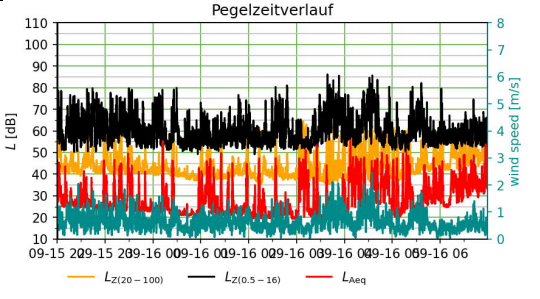
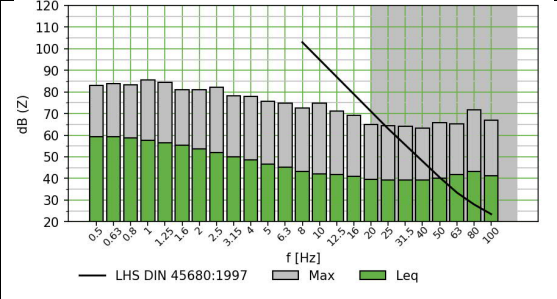
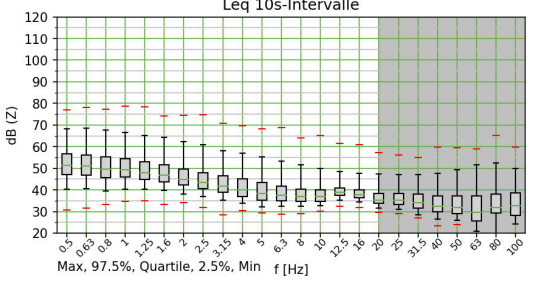
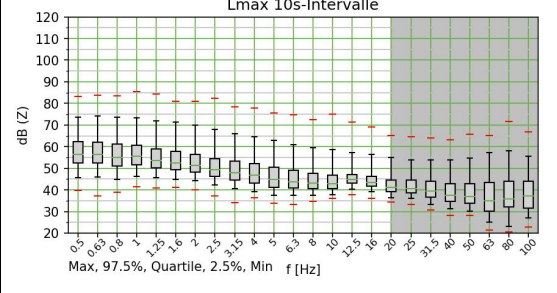
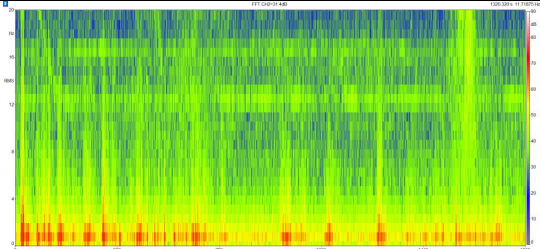
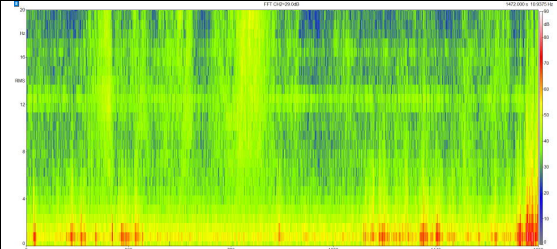
T27: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



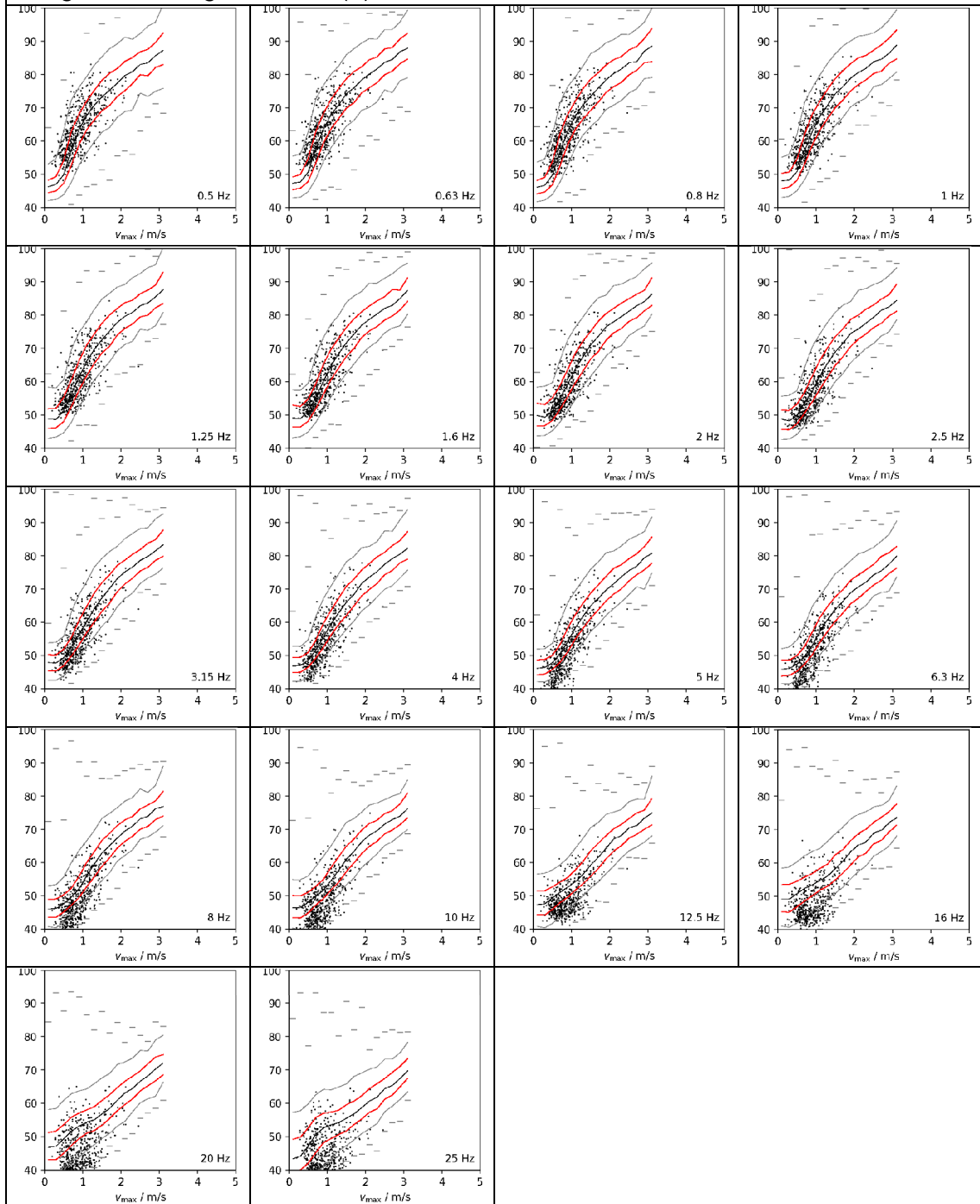
T28: Waldeck					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Waldeck	
			Datum:	15.09.2022	
			Messbed.	sonnig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
84,9 dB(Z)	82,7 dB(Z)	64,1 dB(Z)	75,1 dB(G)	62,2 dB(C)	45,3 dB(A)


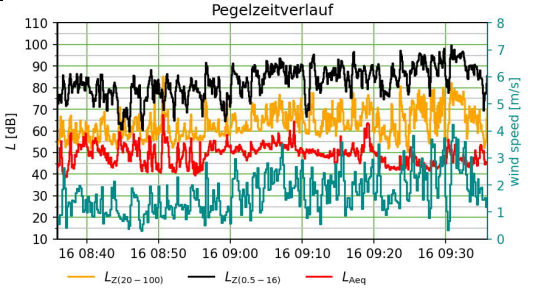
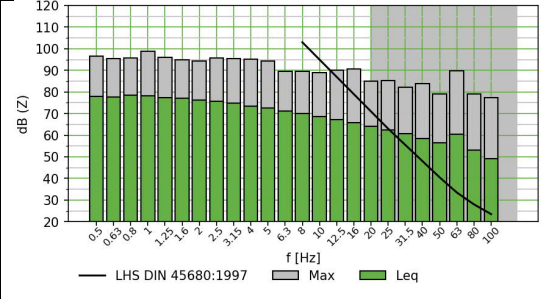
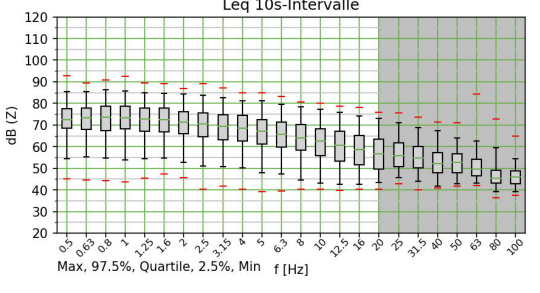
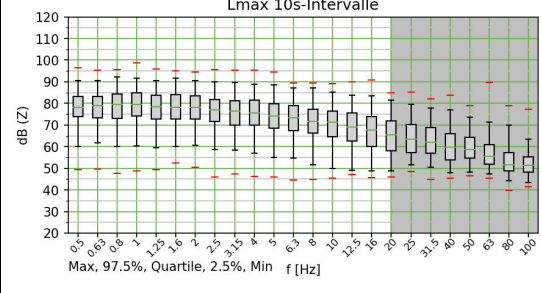
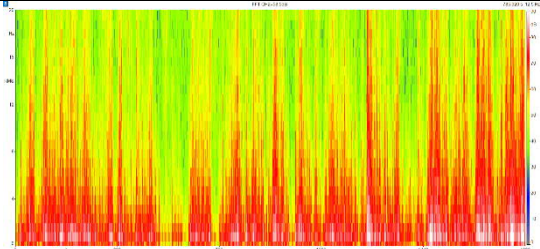
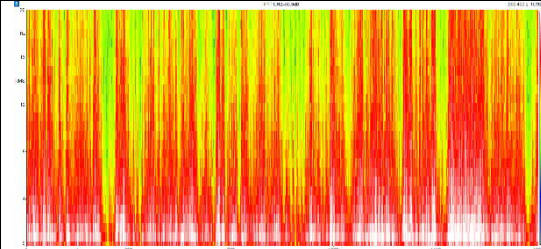
T28: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



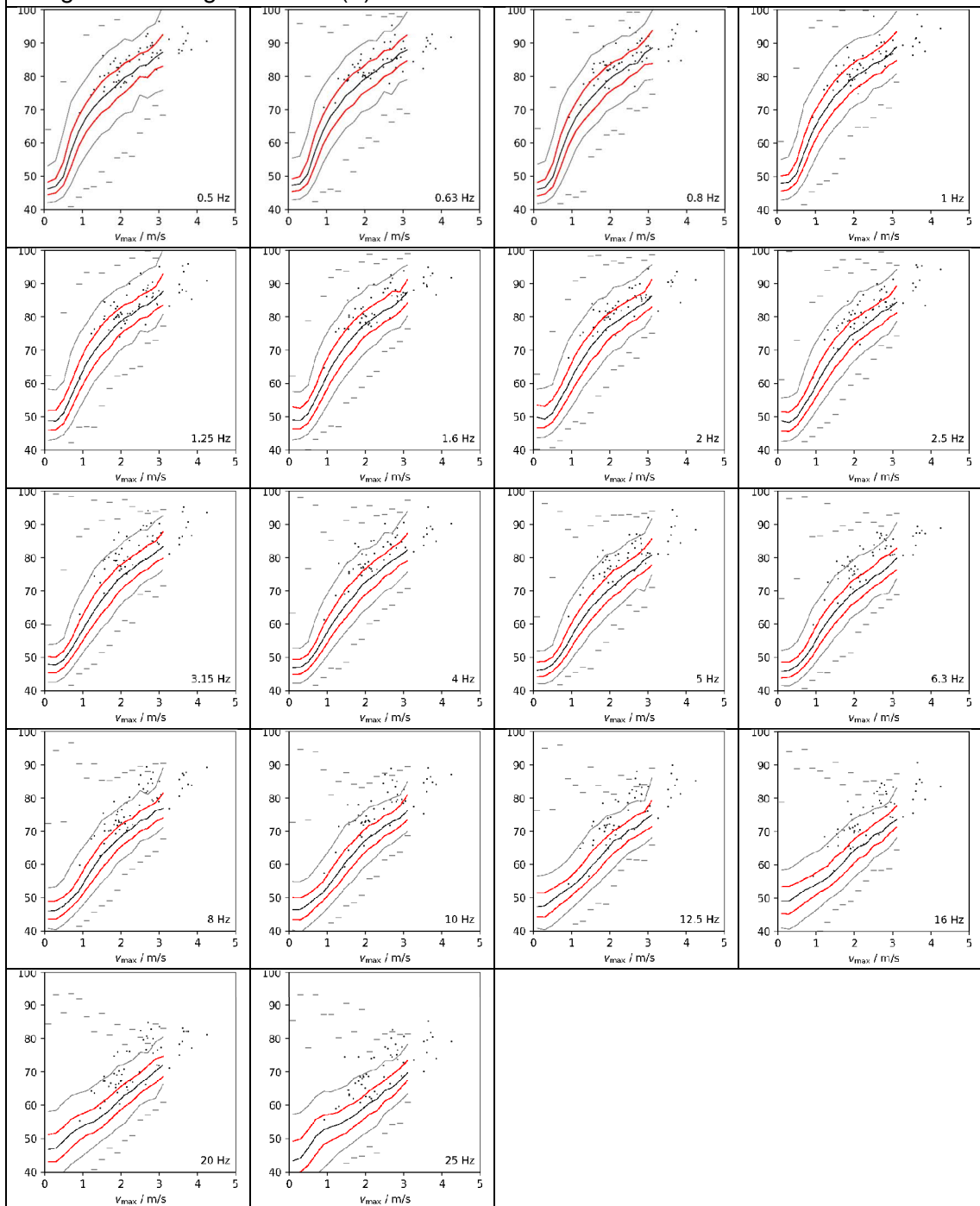
N07: Oberbüschem					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Oberbüschem	
			Datum:	15.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Einsiedlerhof	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
66,7 dB(Z)	63,3 dB(Z)	49,7 dB(Z)	53,5 dB(G)	50,1 dB(C)	36,3 dB(A)


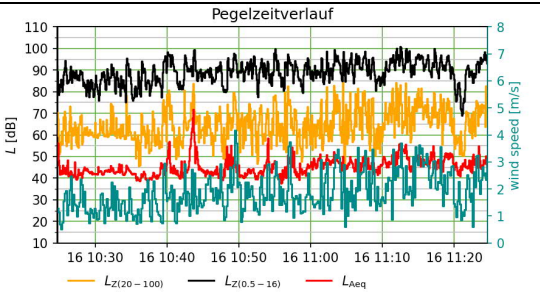
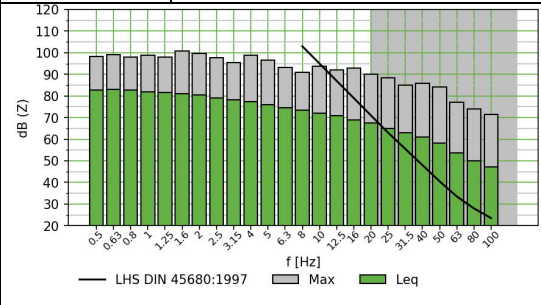
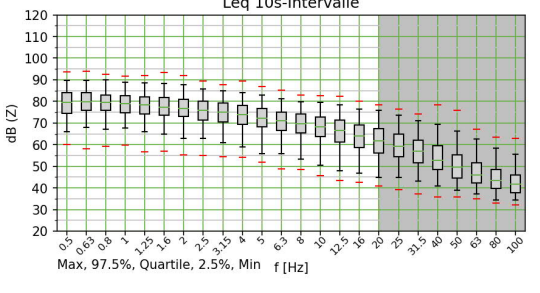
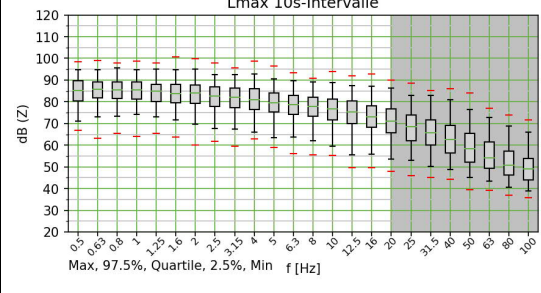
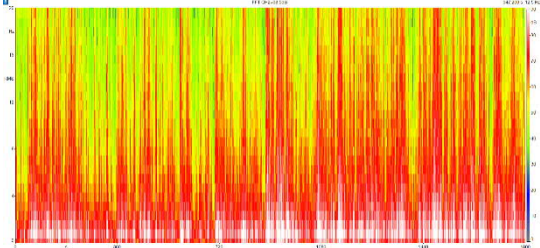
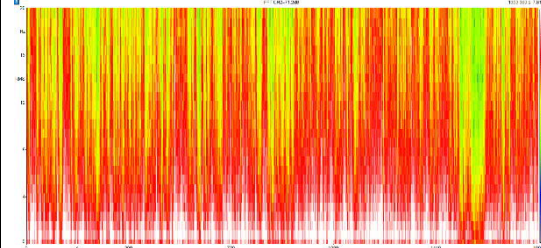
N07: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



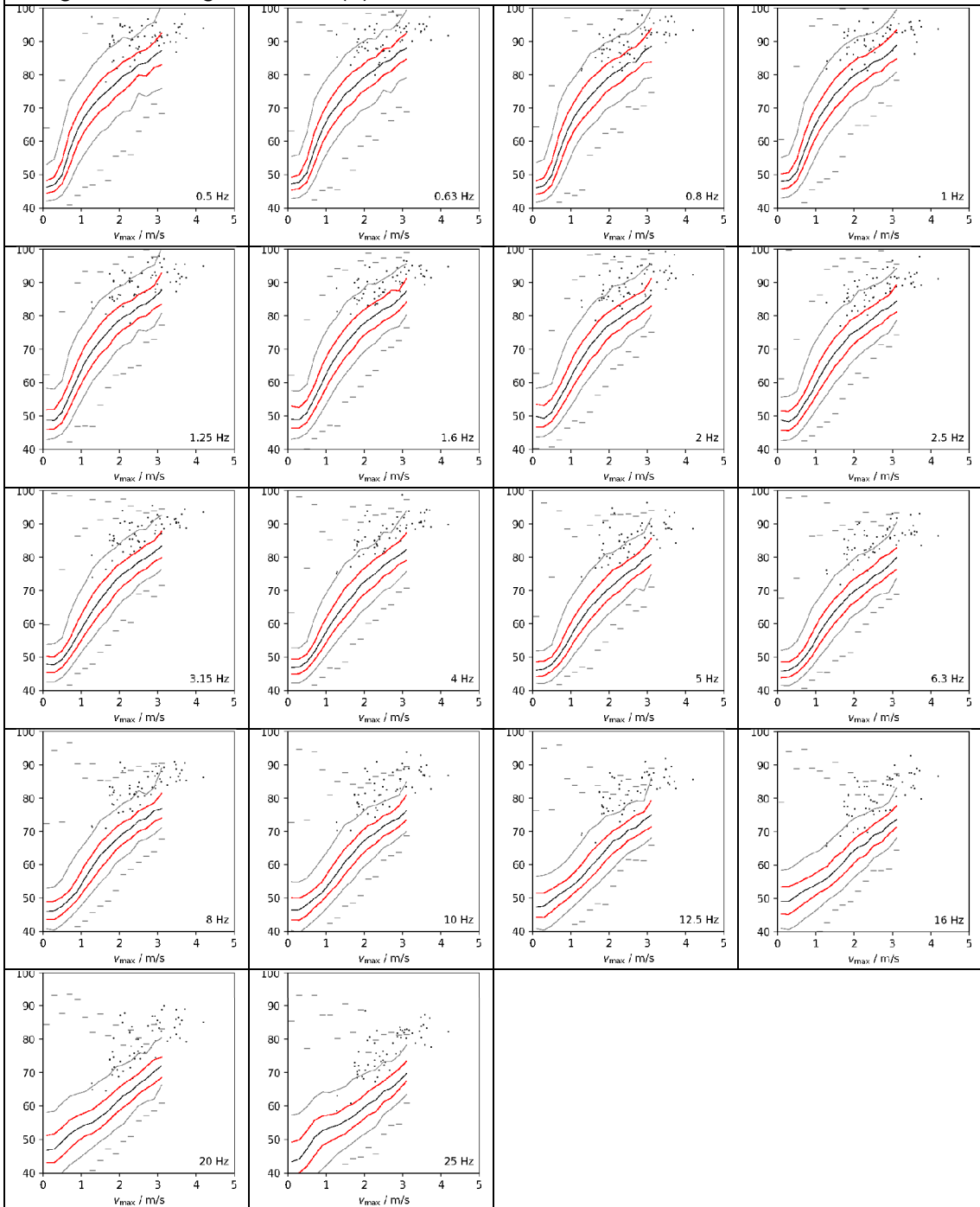
T29: Neukirchen					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Neukirchen	
			Datum:	16.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
87,5 dB(Z)	85,7 dB(Z)	69,0 dB(Z)	78,6 dB(G)	67,4 dB(C)	51,9 dB(A)


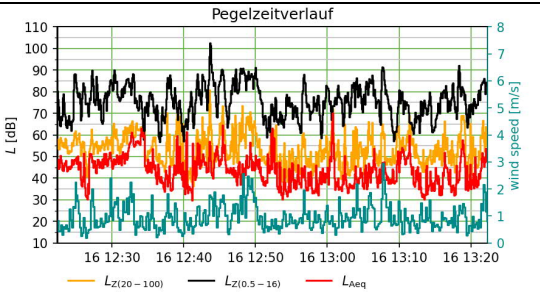
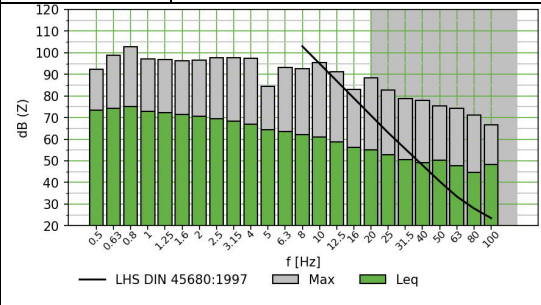
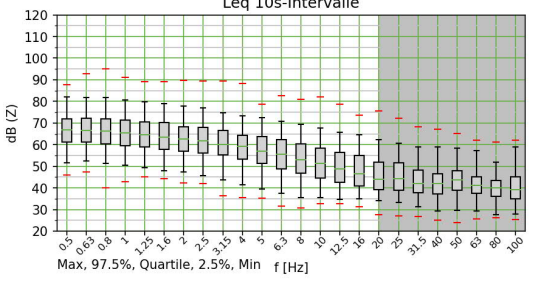
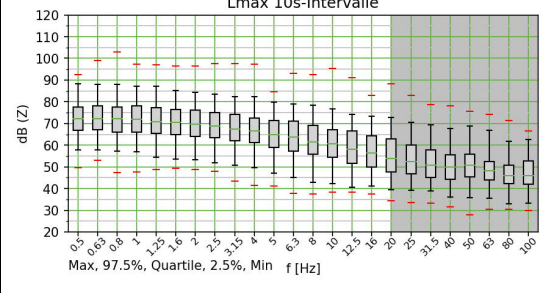
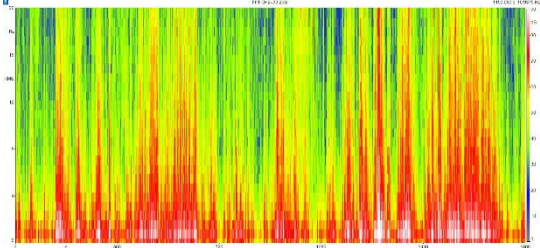
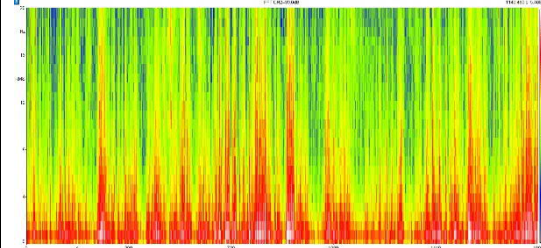
T29: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



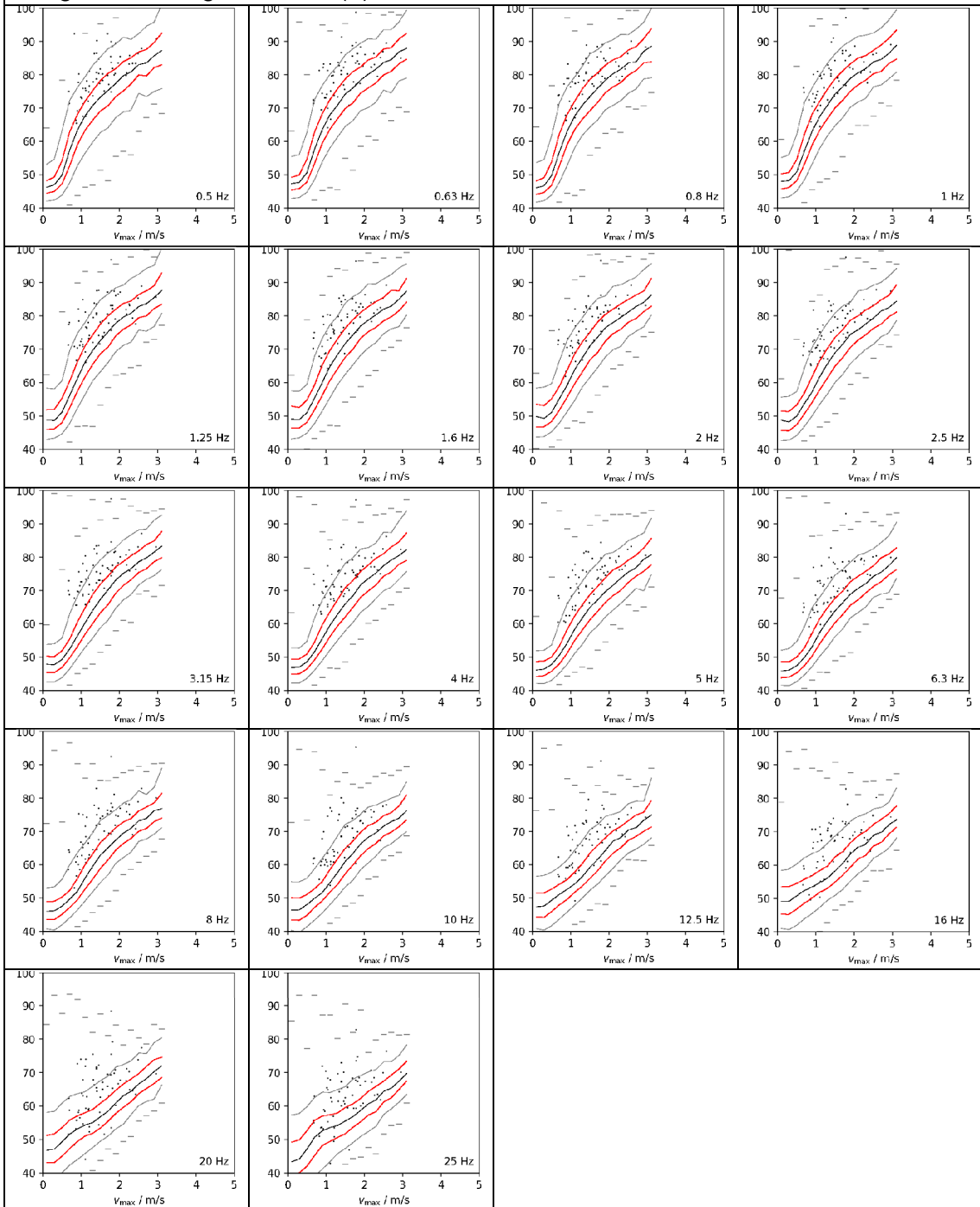
T30: Swistal					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Swistal	
			Datum:	16.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
91,6 dB(Z)	89,4 dB(Z)	71,1 dB(Z)	81,9 dB(G)	69,0 dB(C)	49,2 dB(A)


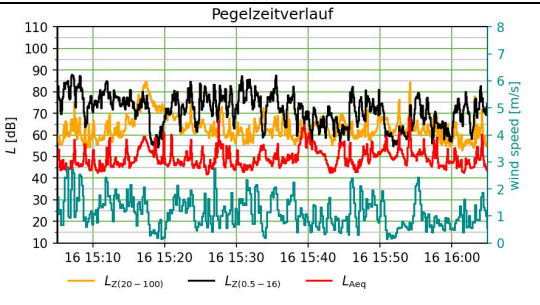
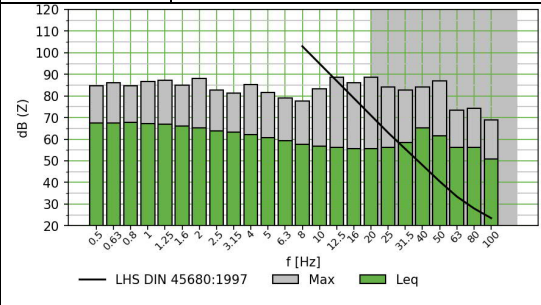
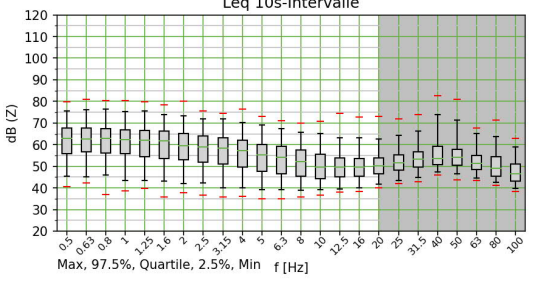
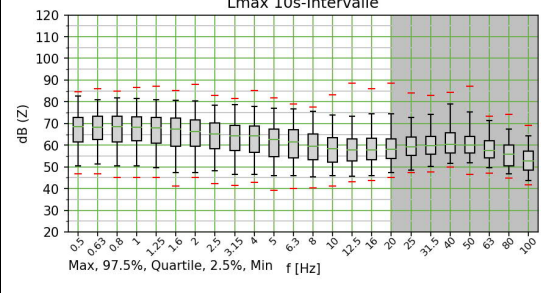
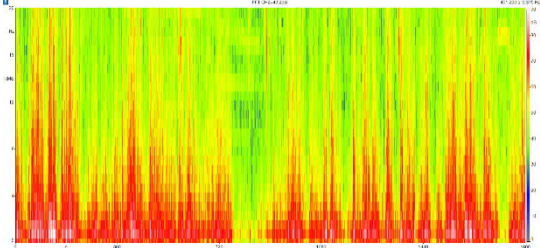
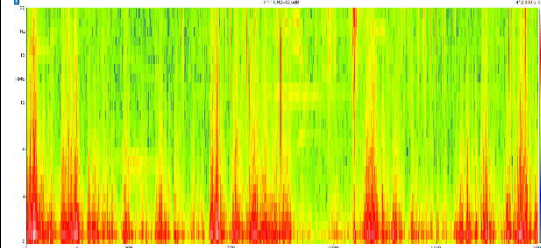
T30: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



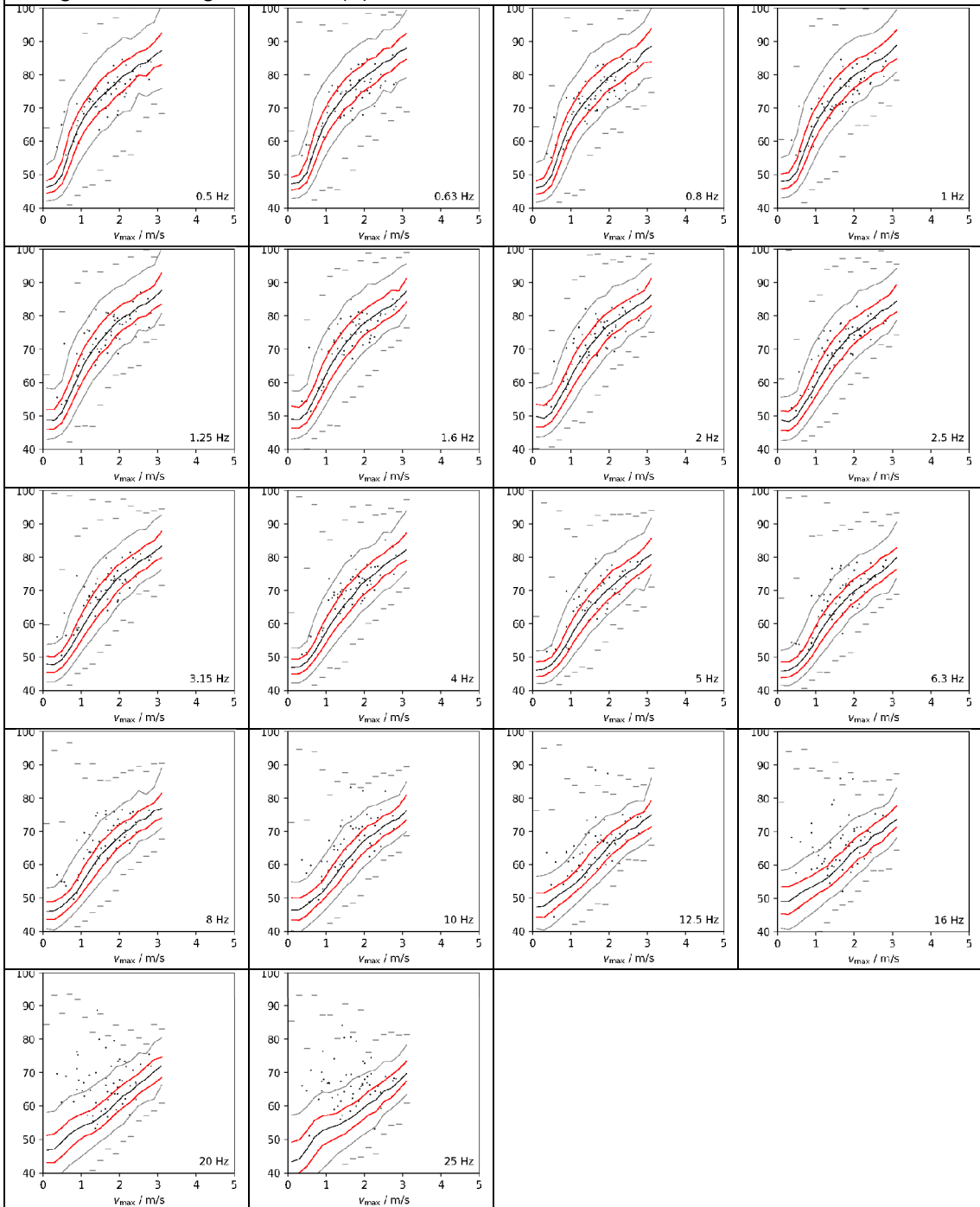
T31: Ramersbach					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Ramersbach	
			Datum:	16.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Ze}	L_{Ze} (1-16Hz)	L_{Ze} (20-100Hz)	L_{Ge}	L_{Ce}	L_{Ae}
82,4 dB(Z)	79,6 dB(Z)	60,0 dB(Z)	69,8 dB(G)	59,5 dB(C)	50,0 dB(A)


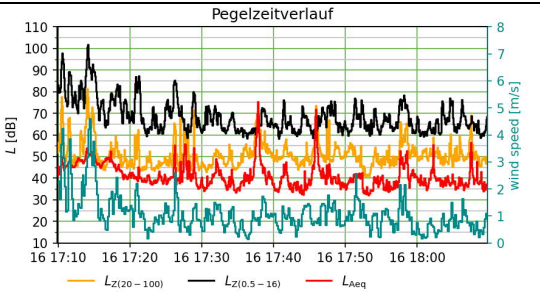
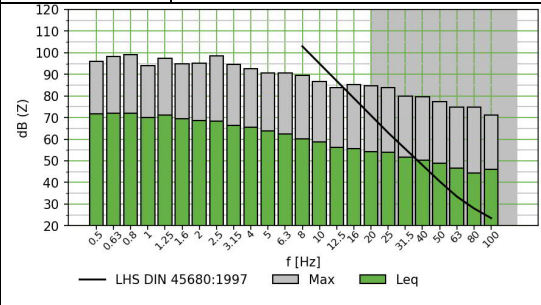
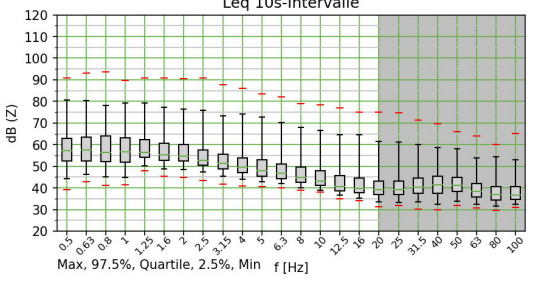
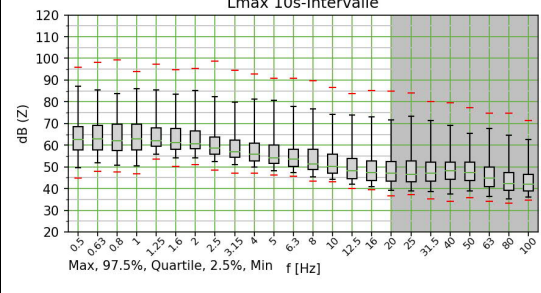
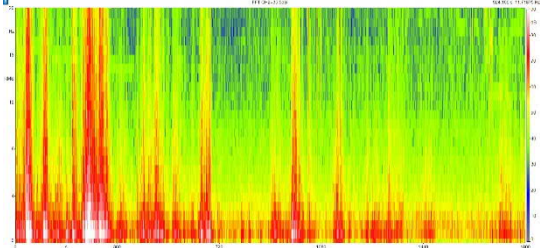
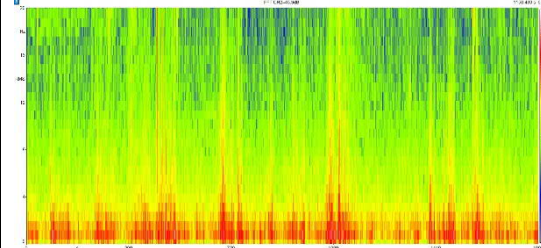
T31: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



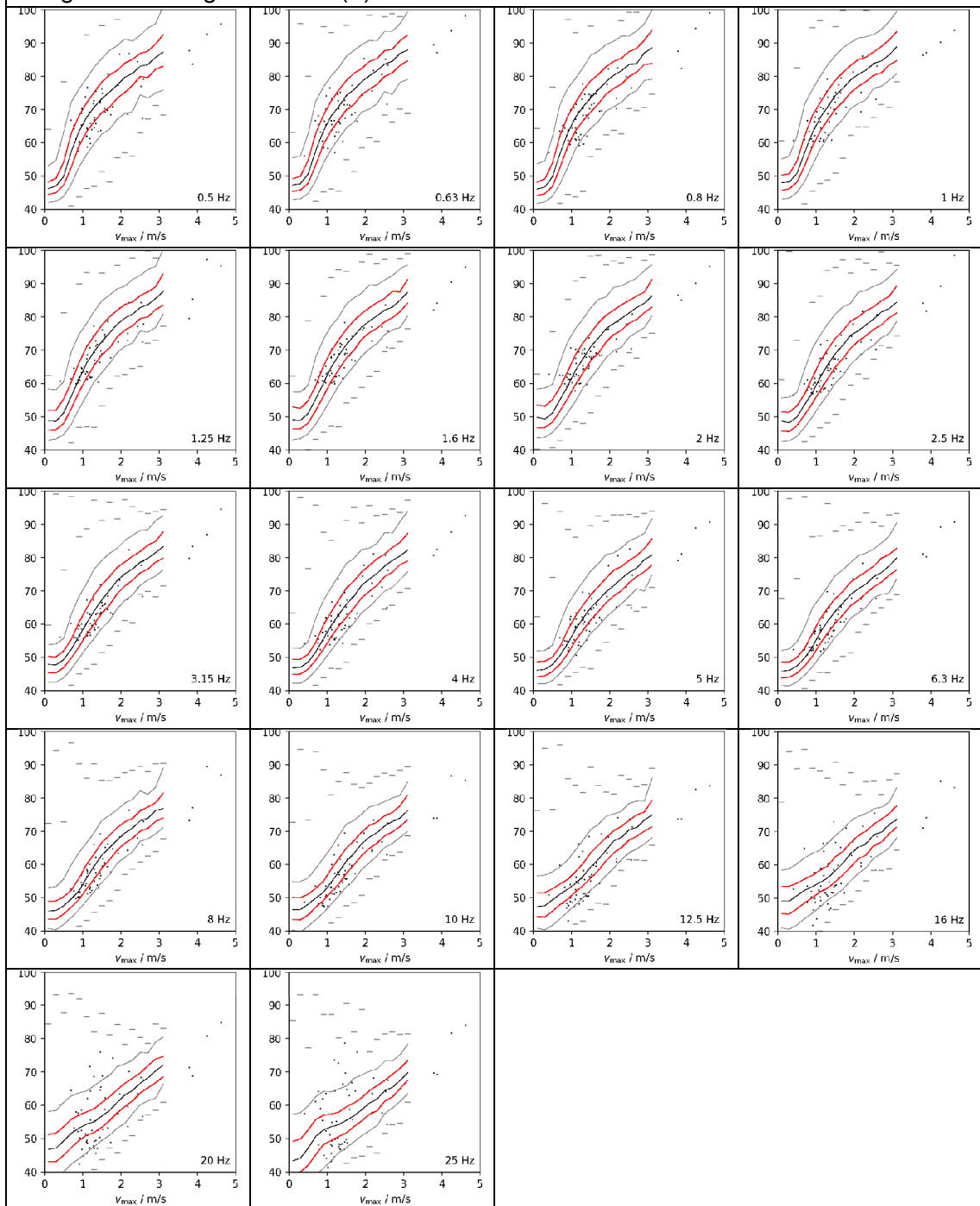
T32: Zell/Mosel					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Zell/Mosel	
			Datum:	16.09.2022	
			Messbed.	sonnig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
77,3 dB(Z)	74,5 dB(Z)	68,7 dB(Z)	68,5 dB(G)	67,3 dB(C)	52,4 dB(A)


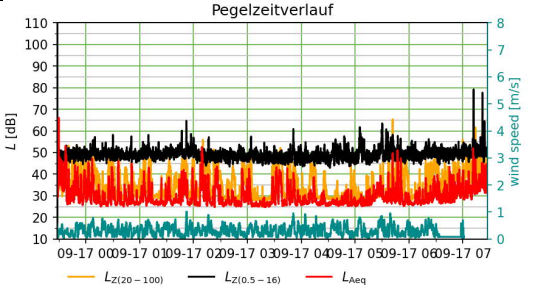
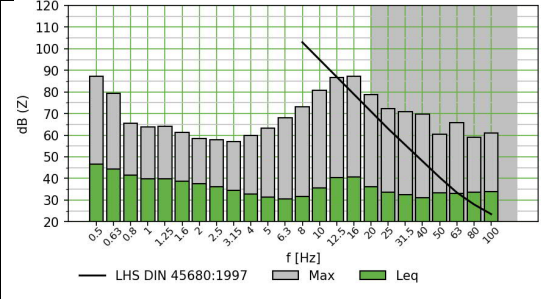
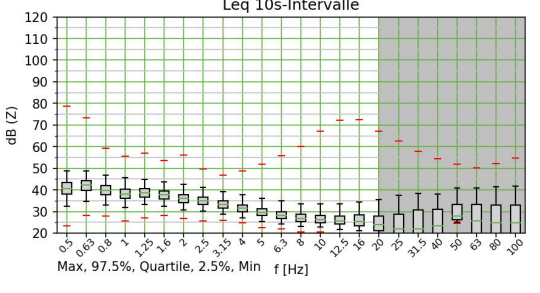
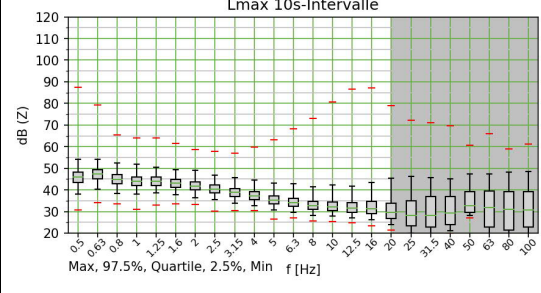
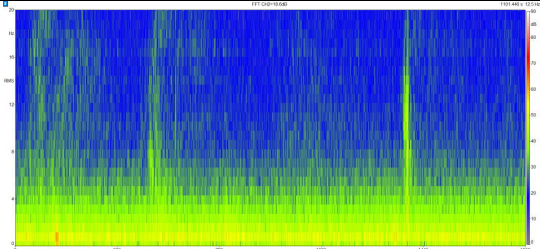
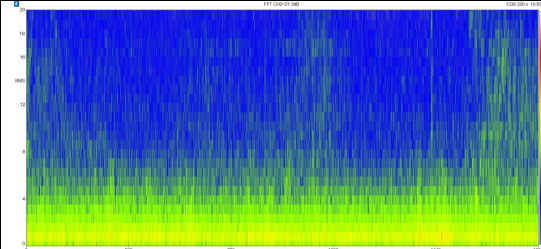
T32: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



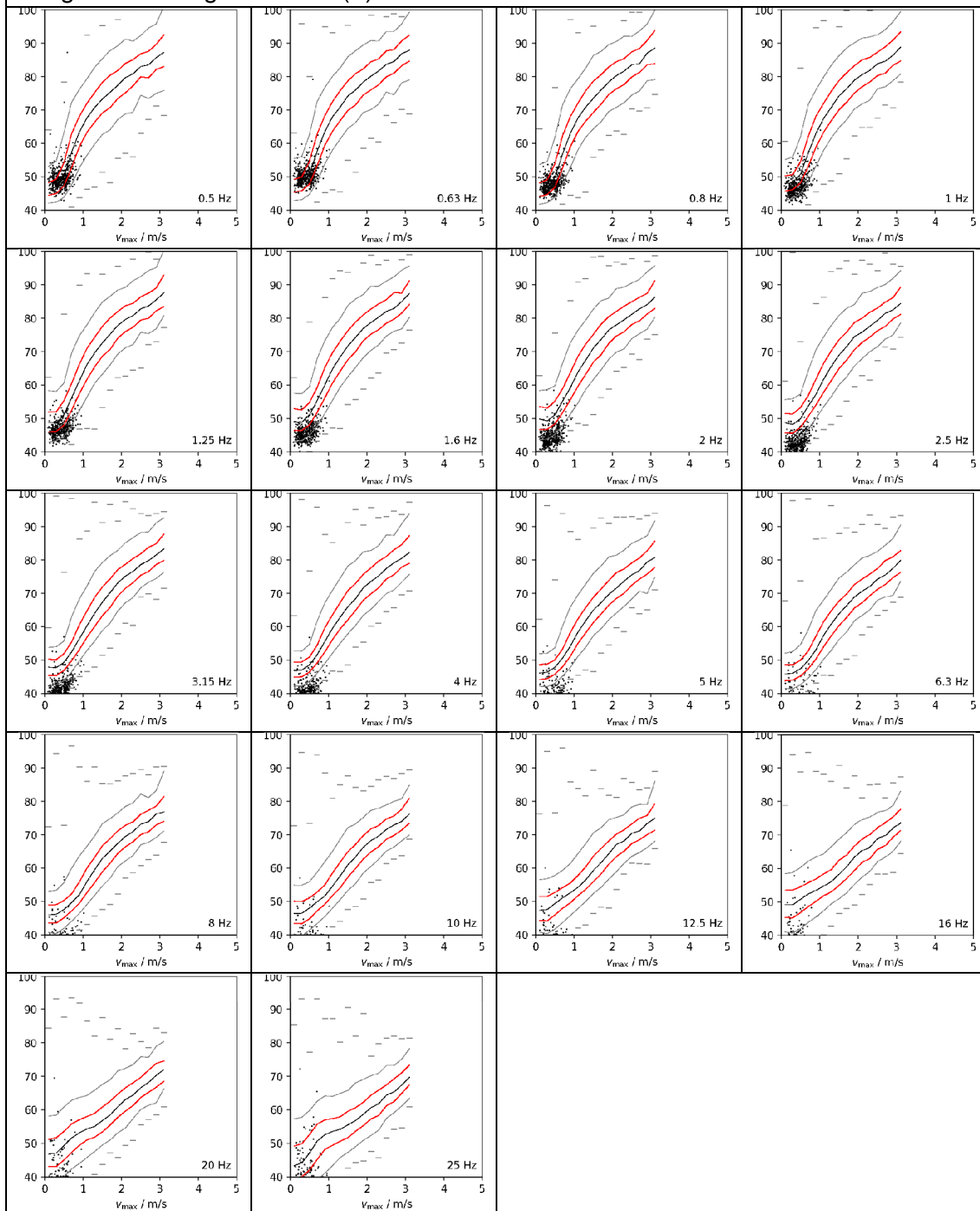
T33: Schöneberg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Schöneberg	
			Datum:	16.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
80,3 dB(Z)	77,8 dB(Z)	59,8 dB(Z)	68,5 dB(G)	59,5 dB(C)	51,2 dB(A)


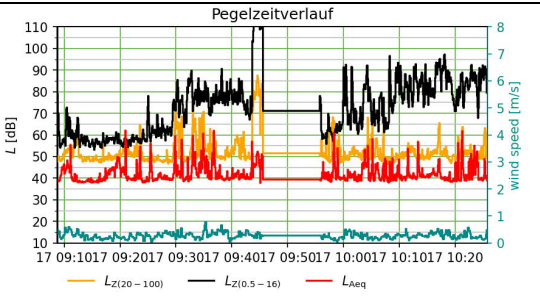
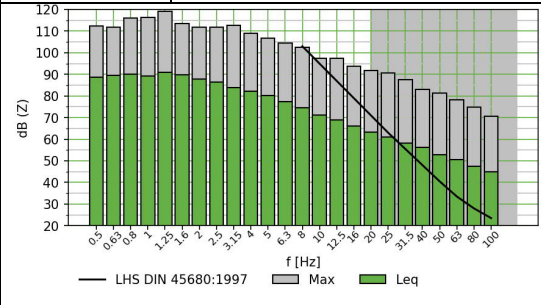
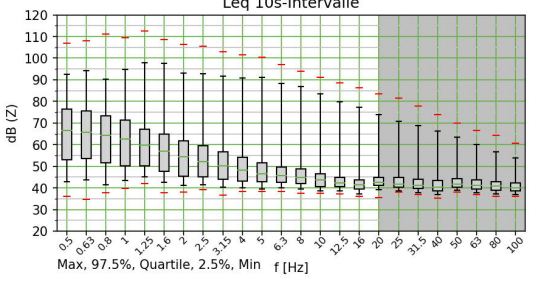
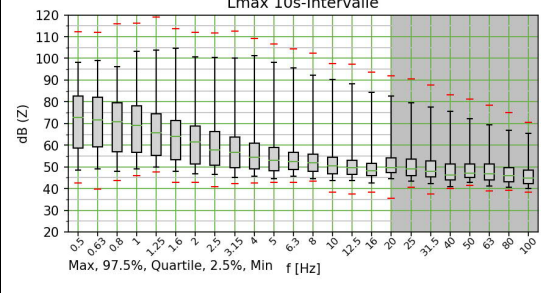
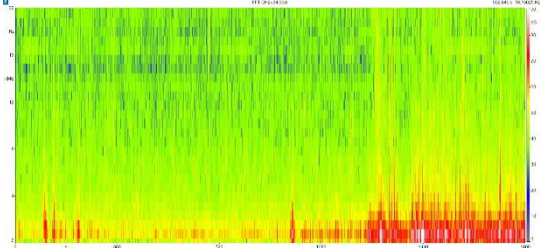
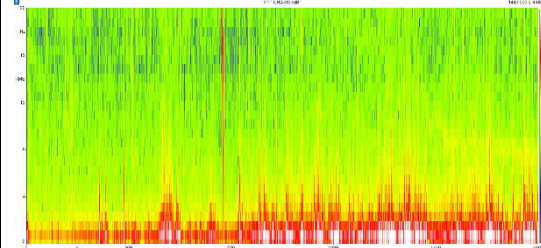
T33: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



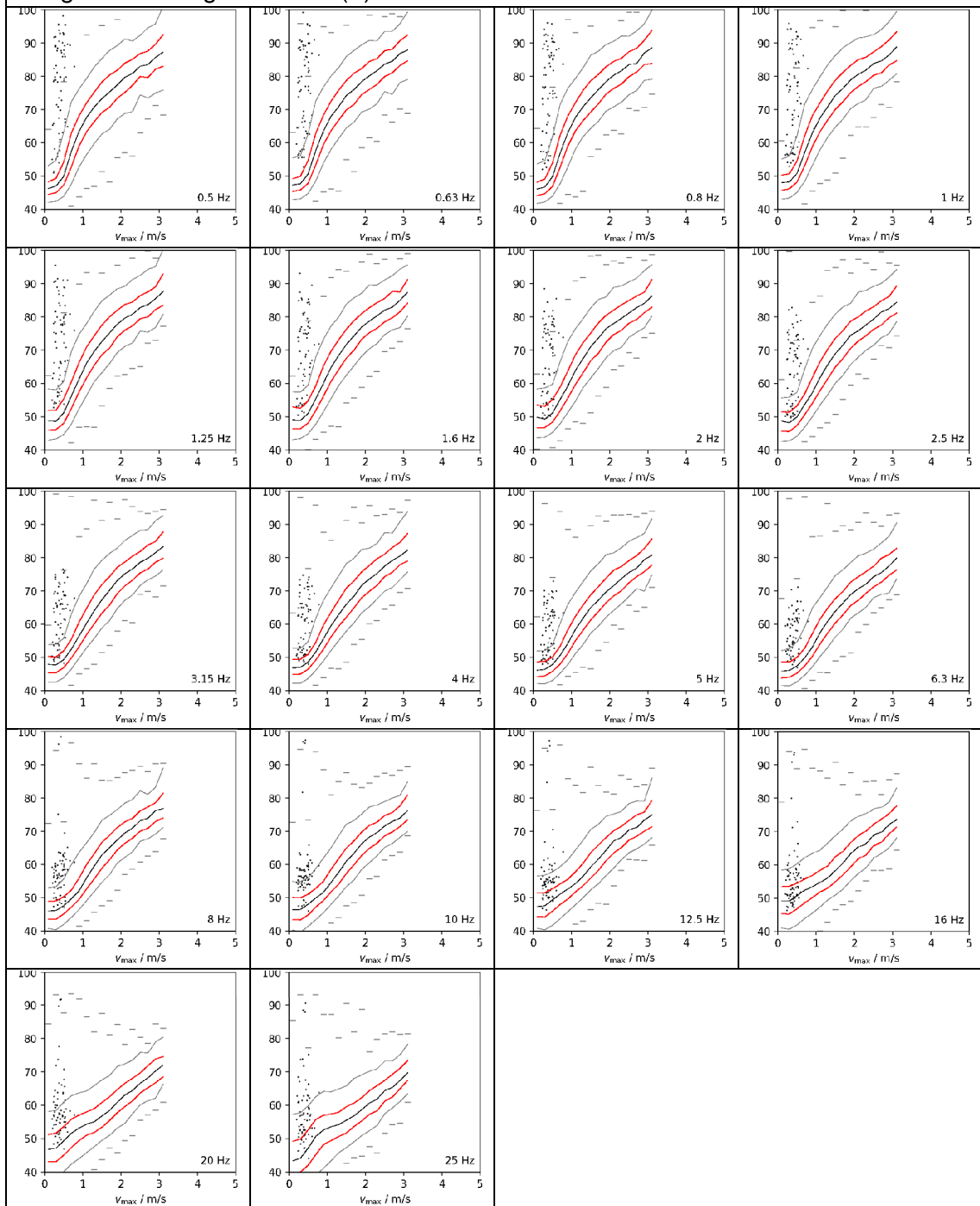
N08: Lindenberg (Pfalz)					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Lindenberg	
			Datum:	16.09.2022	
			Messbed.	Ruhig, Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
52,8 dB(Z)	48,6 dB(Z)	42,7 dB(Z)	51,4 dB(G)	44,3 dB(C)	35,4 dB(A)


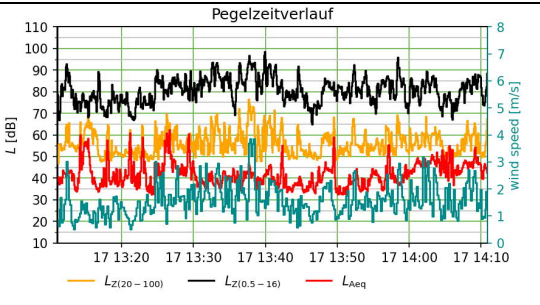
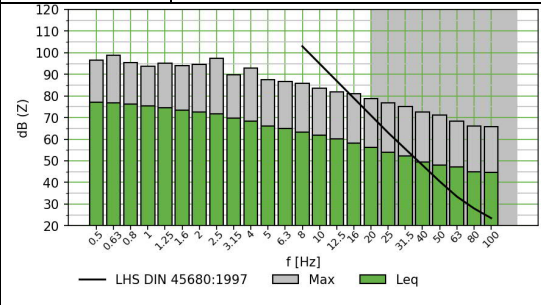
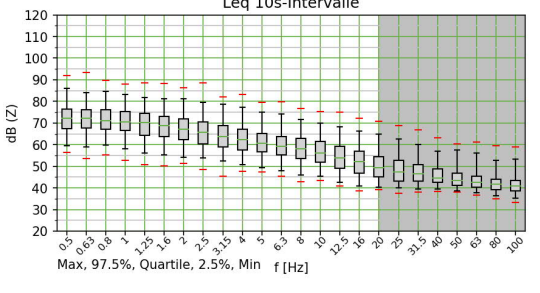
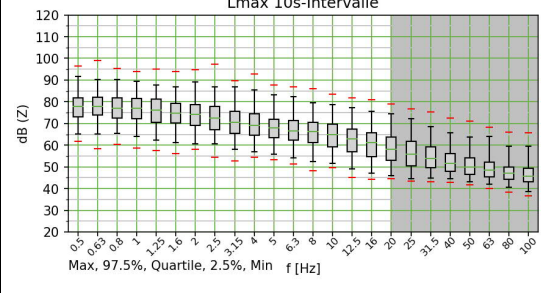
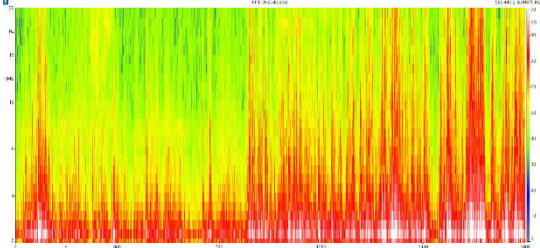
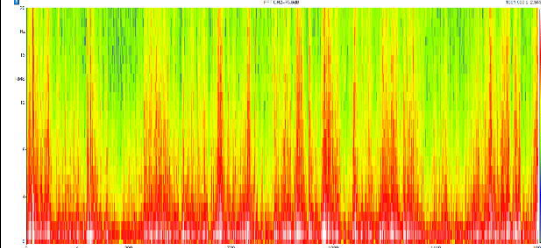
N08: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



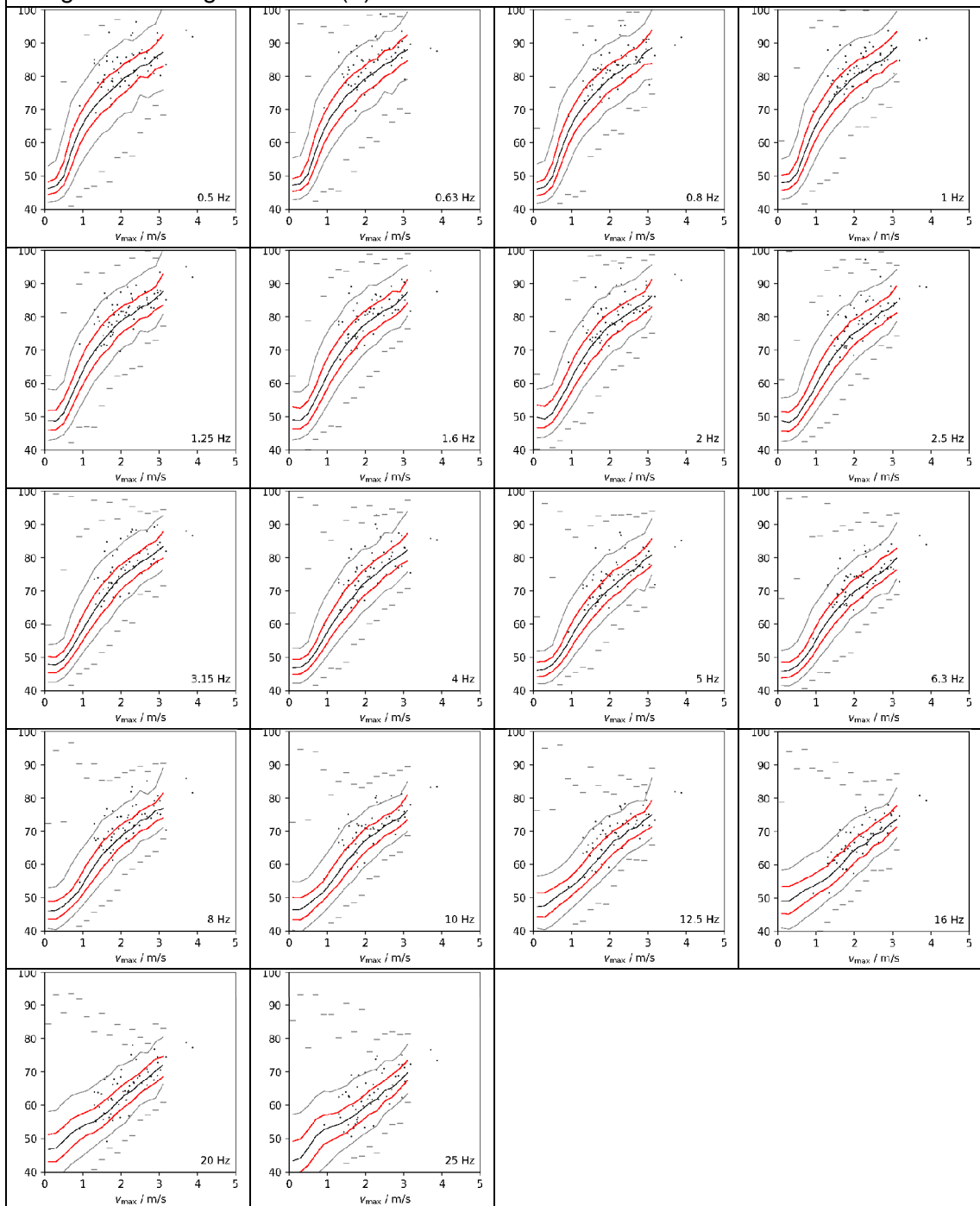
T34: Heidelberg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Heidelberg	
			Datum:	17.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Großstadt	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
83,0 dB(Z)	76,7 dB(Z)	56,9 dB(Z)	58,7 dB(G)	56,1 dB(C)	46,3 dB(A)


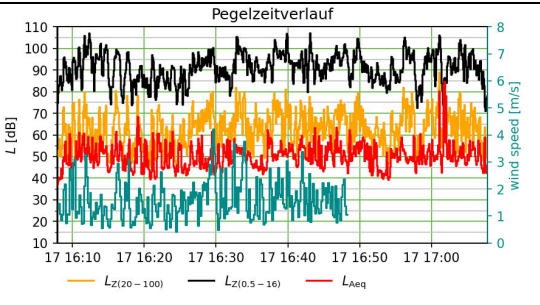
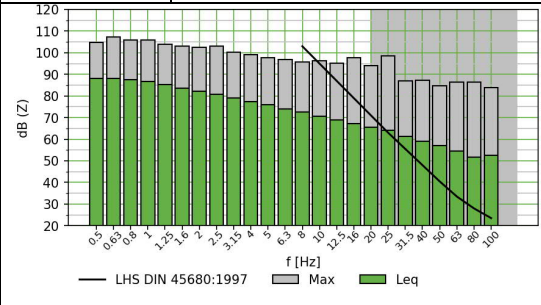
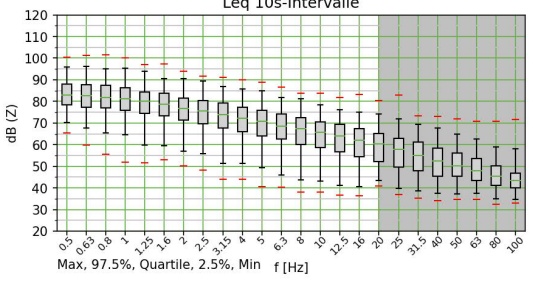
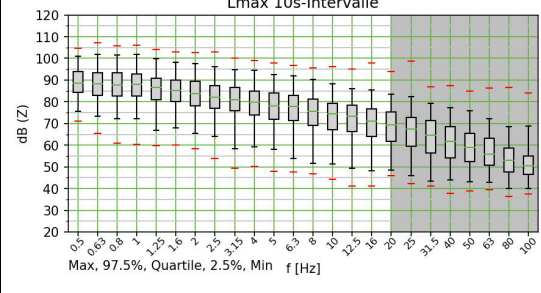
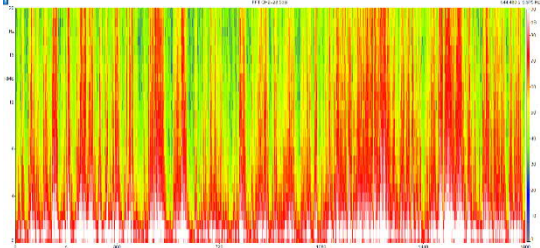
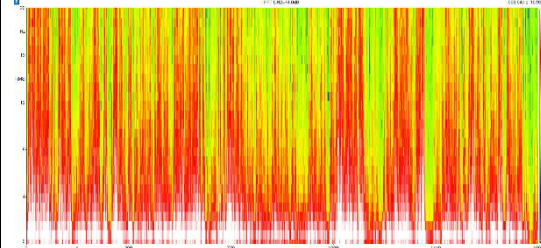
T34: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



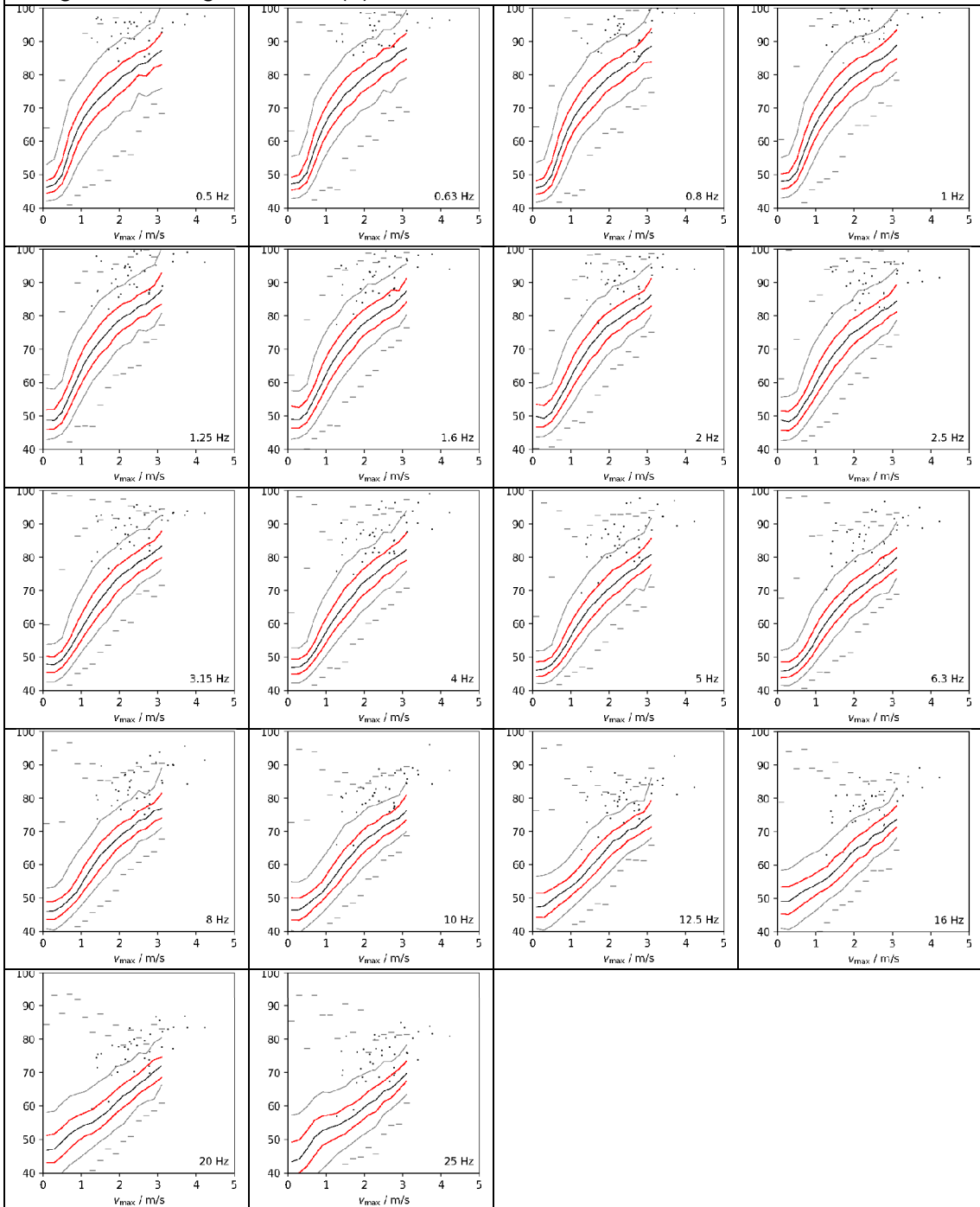
T35: Ober-Ramstedt					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Ober-Ramstedt	
			Datum:	17.09.2022	
			Messbed.	bedeckt	
			Sied.Struk	Kleinstadt/ WEA 2km	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
84,6 dB(Z)	81,6 dB(Z)	60,4 dB(Z)	71,2 dB(G)	59,2 dB(C)	46,7 dB(A)


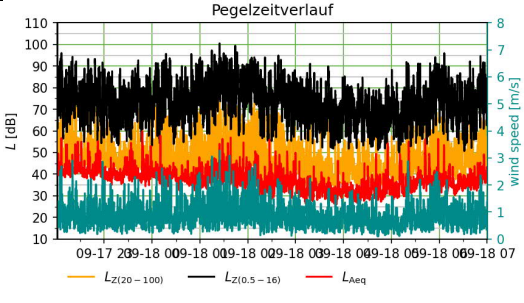
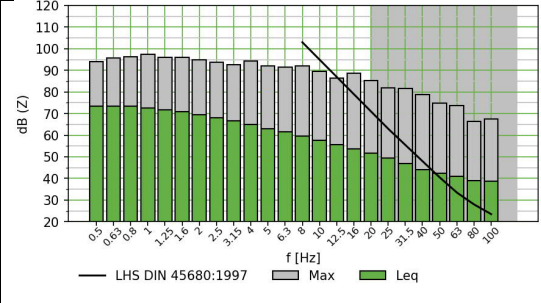
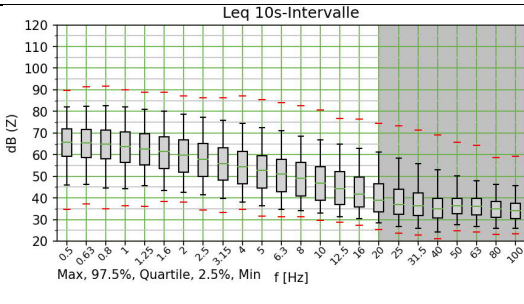
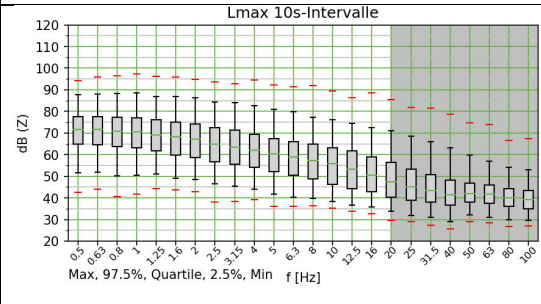
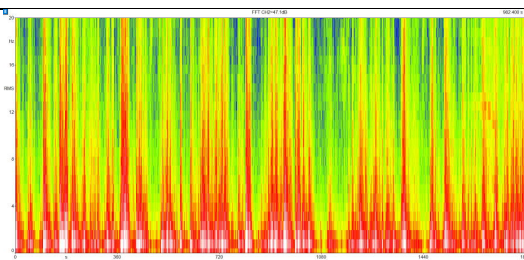
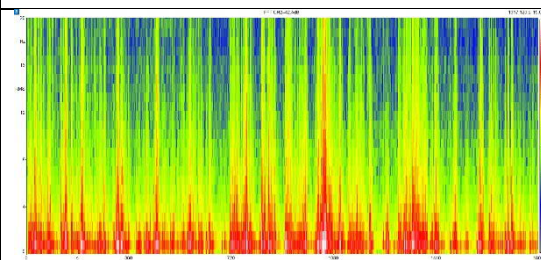
T35: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



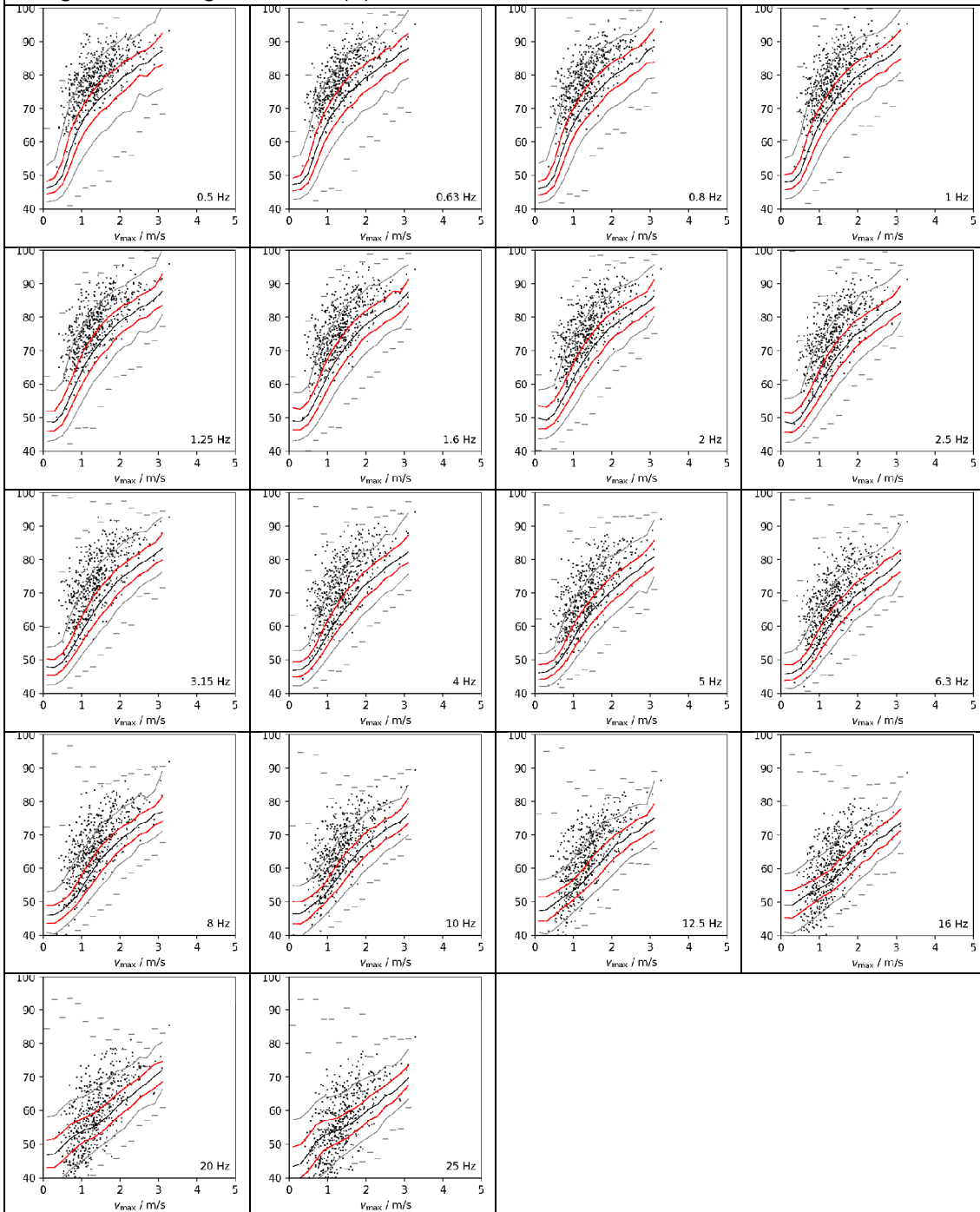
T36: Neu-Anspach					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Neu-Anspach	
			Datum:	17.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
95,4 dB(Z)	92,0 dB(Z)	69,8 dB(Z)	80,4 dB(G)	68,5 dB(C)	61,5 dB(A)

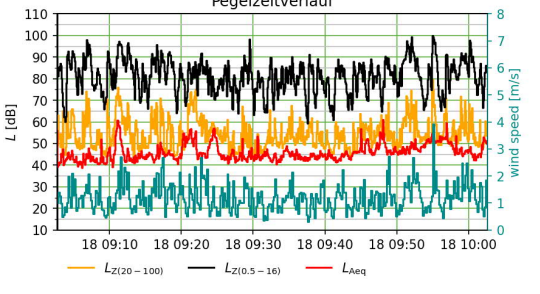
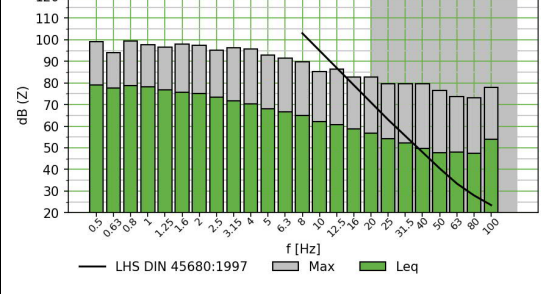
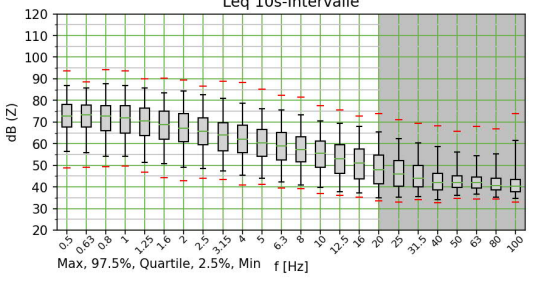
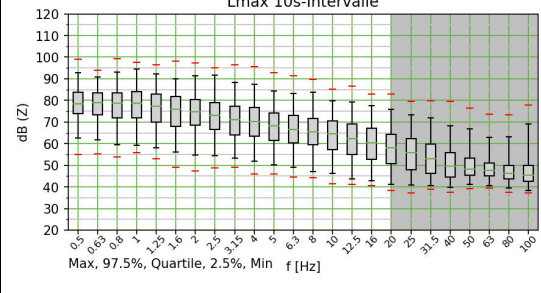
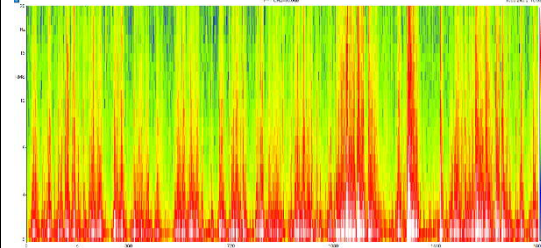
T36: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



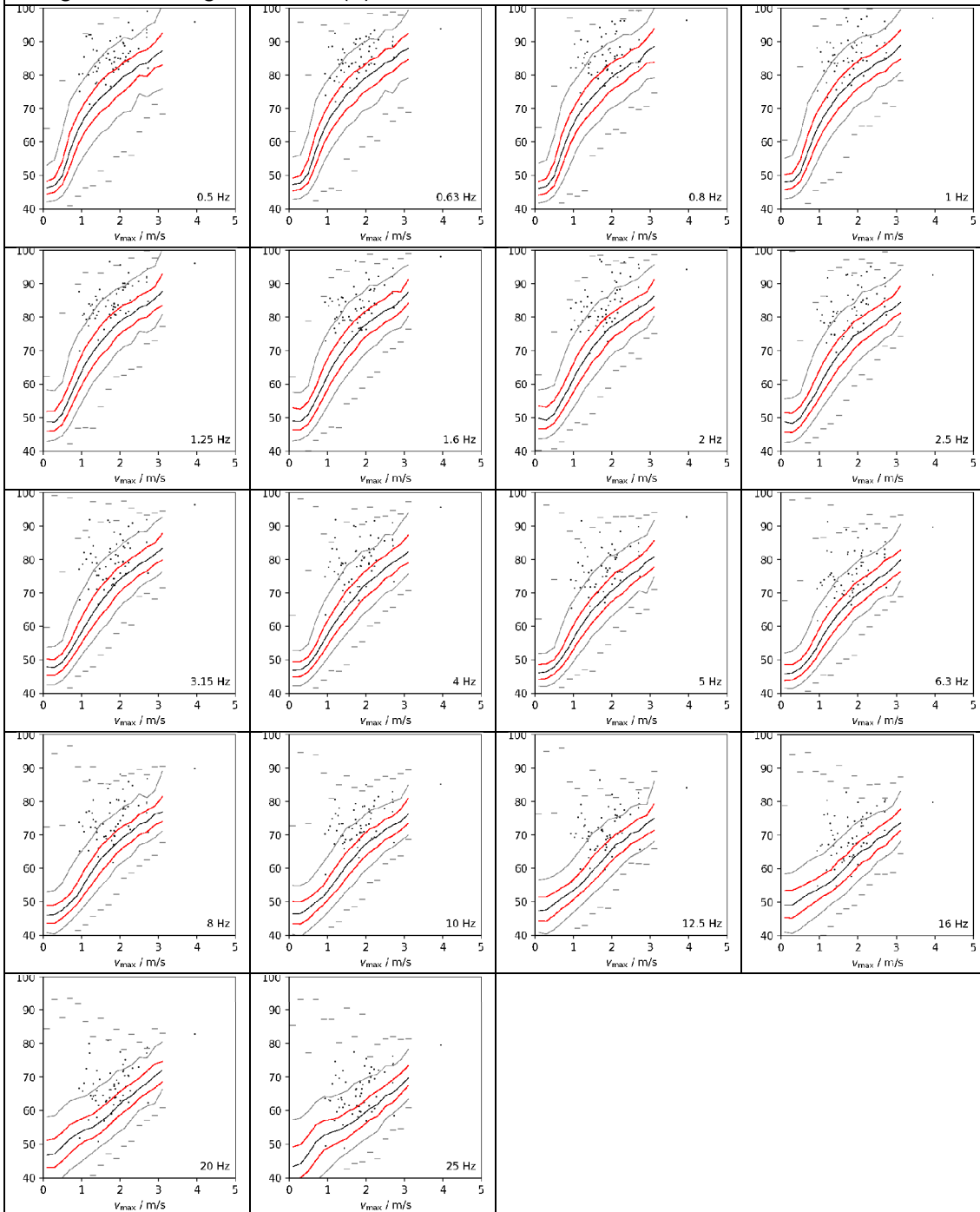
N09: Bad Nauheim					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Bad Nauheim	
			Datum:	17.09.2022	
			Messbed.	Regen, Wind	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
L_{Ze}	L_{Ze} (1-16Hz)	L_{Ze} (20-100Hz)	L_{Ge}	L_{Ce}	L_{Ae}
81,5 dB(Z)	78,7 dB(Z)	55,6 dB(Z)	67,0 dB(G)	54,2 dB(C)	41,0 dB(A)


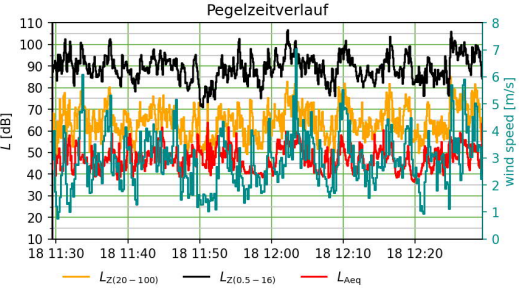
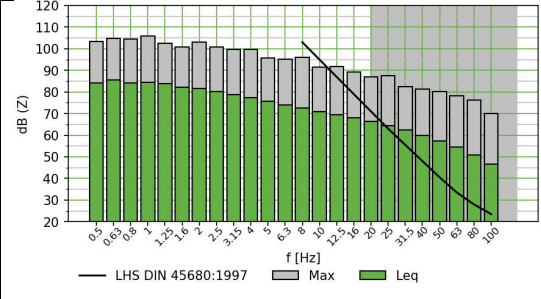
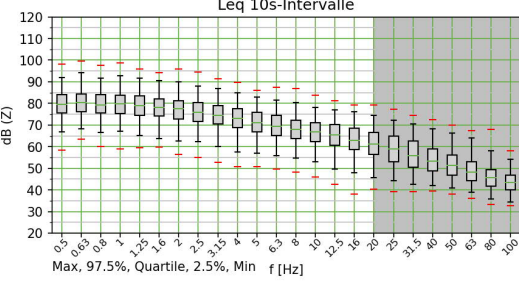
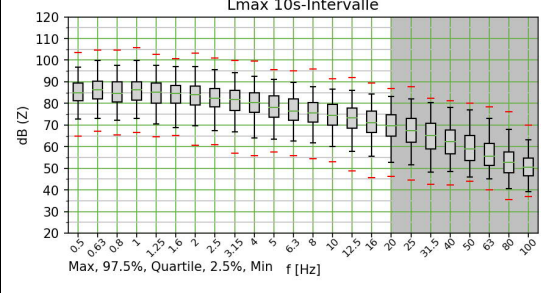
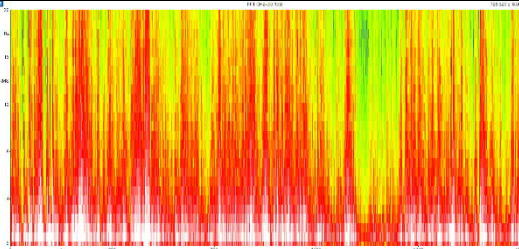
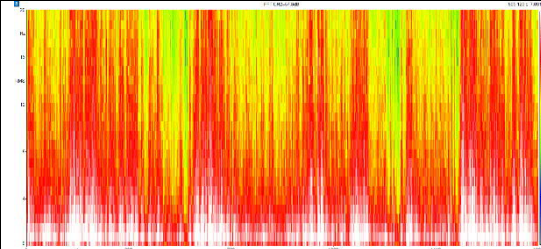
N09: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



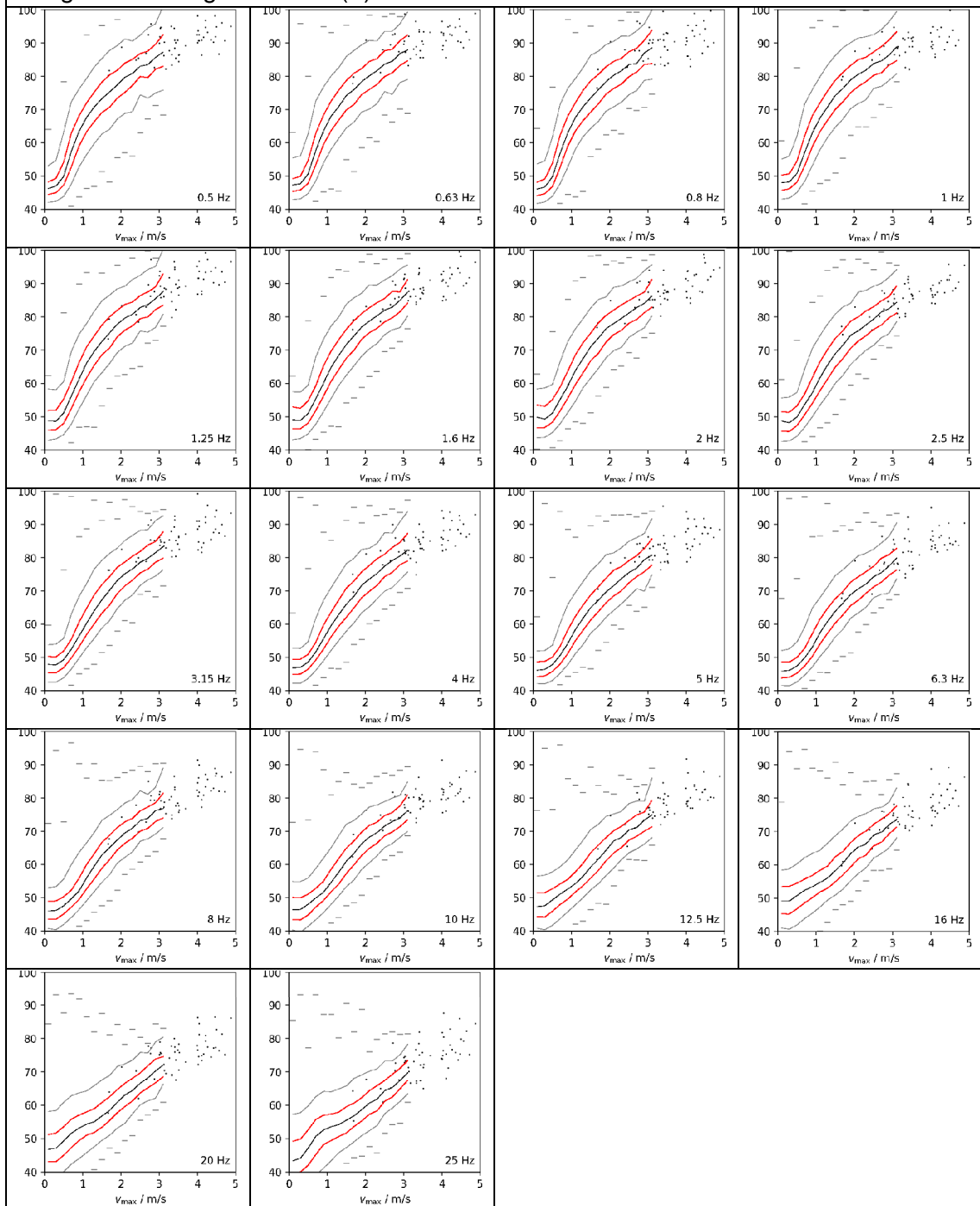
T37: Bad Nauheim					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Bad Nauheim	
			Datum:	18.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
63,0 dB(Z)	58,8 dB(Z)	48,5 dB(Z)	53,3 dB(G)	49,8 dB(C)	41,1 dB(A)


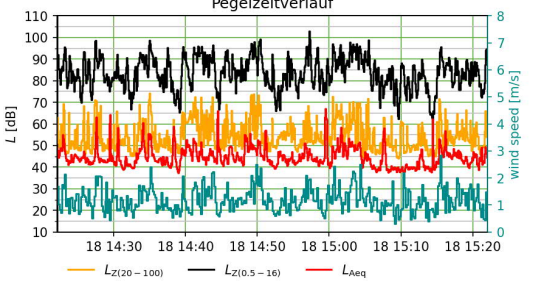
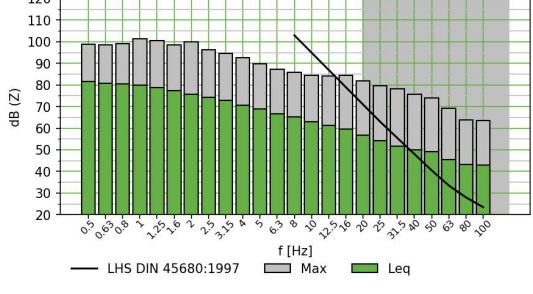
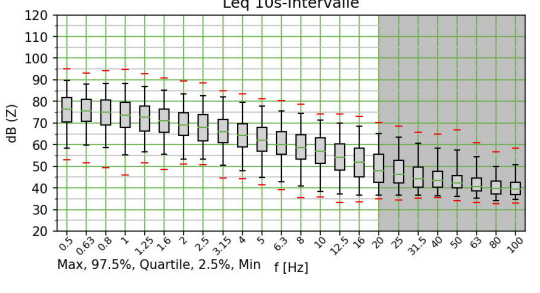
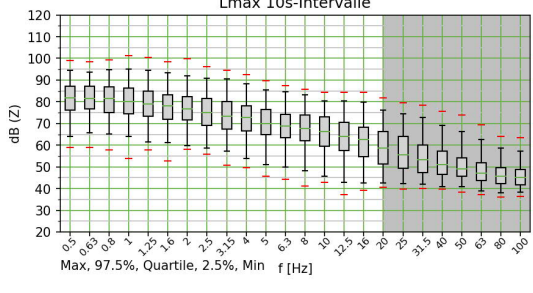
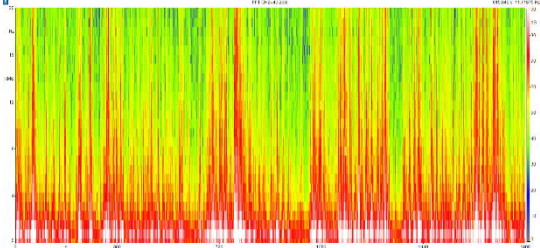
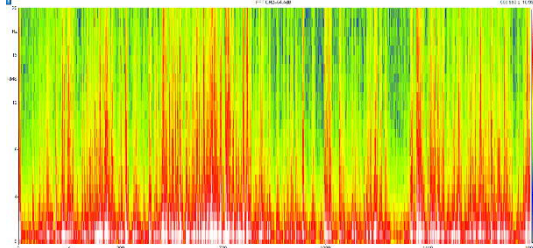
T37: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



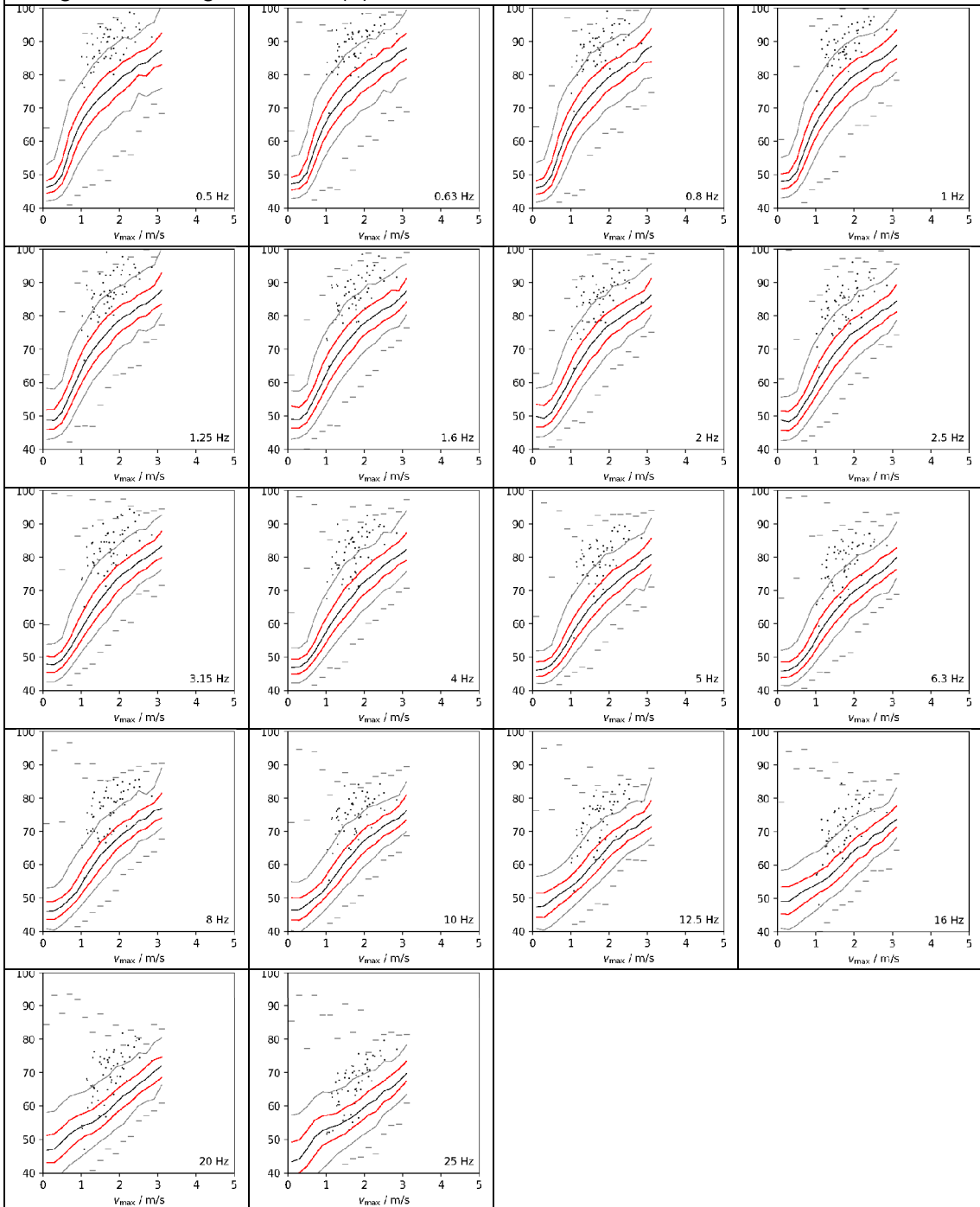
T38: Großostheim					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Großostheim	
			Datum:	18.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
93,2 dB(Z)	90,7 dB(Z)	70,4 dB(Z)	81,0 dB(G)	68,2 dB(C)	50,6 dB(A)


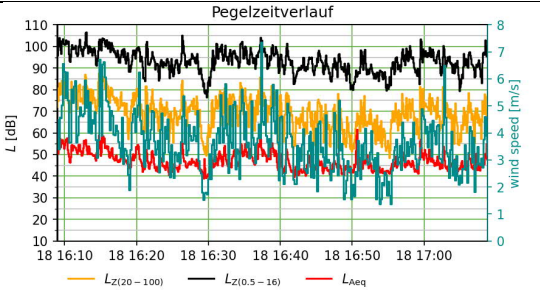
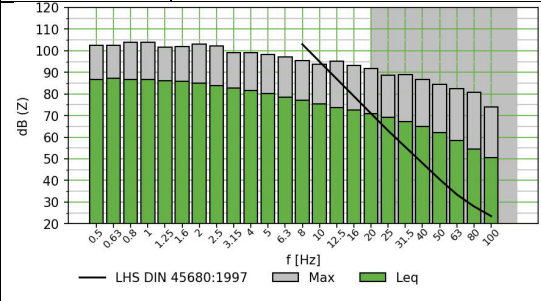
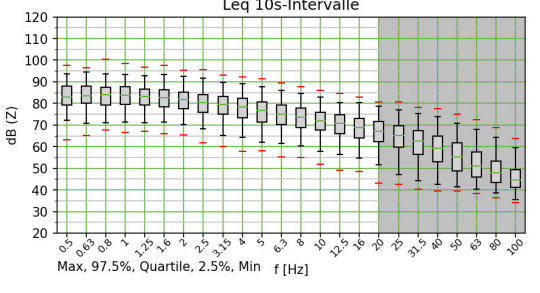
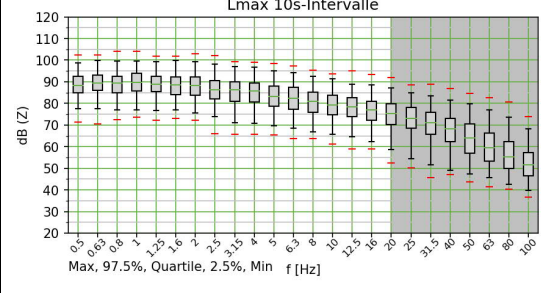
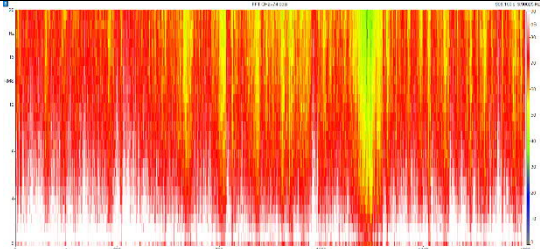
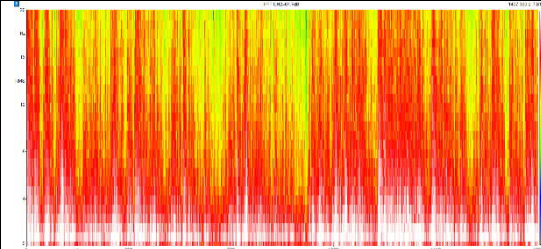
T38: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



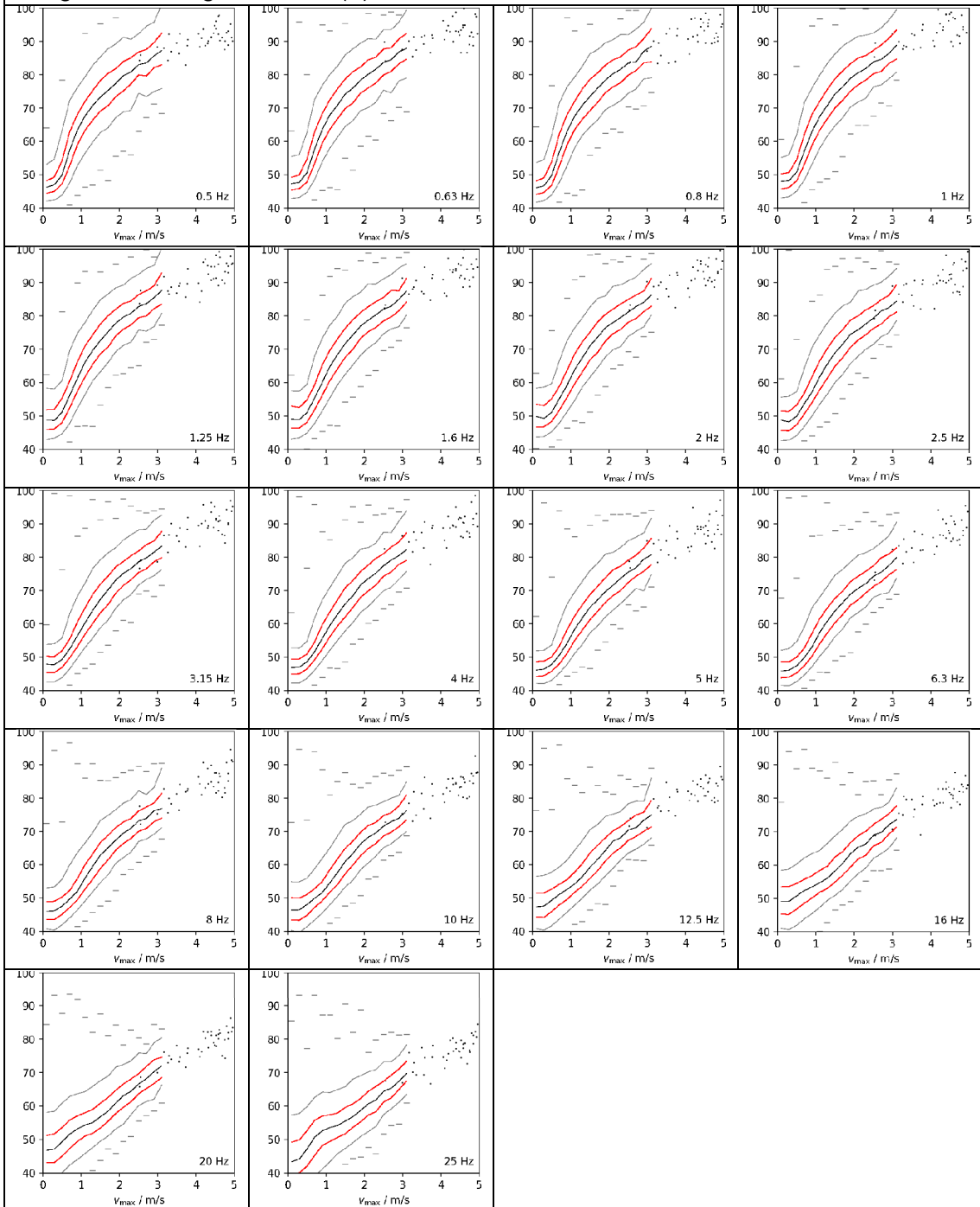
T39: Assamstadt					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Assamstadt	
			Datum:	18.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
88,6 dB(Z)	85,3 dB(Z)	60,7 dB(Z)	72,5 dB(G)	59,7 dB(C)	49,1 dB(A)


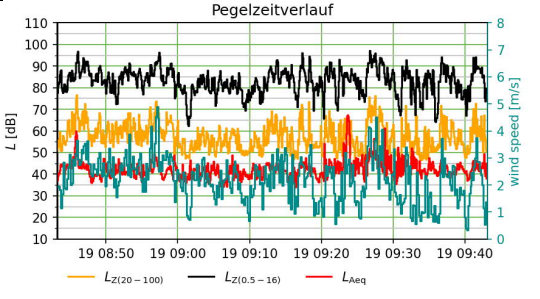
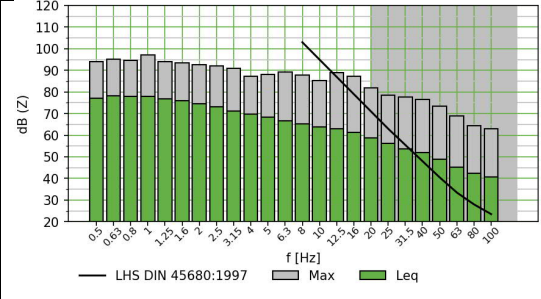
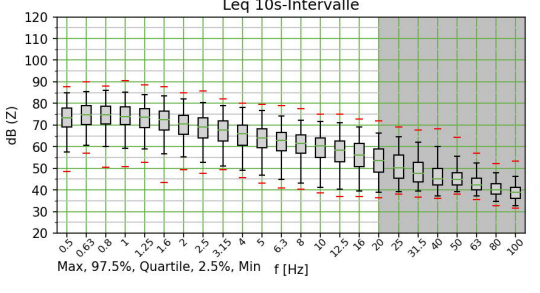
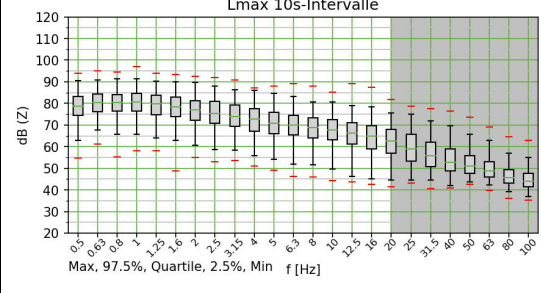
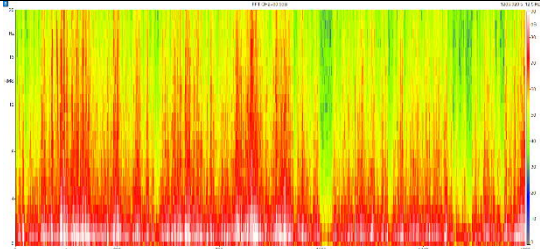
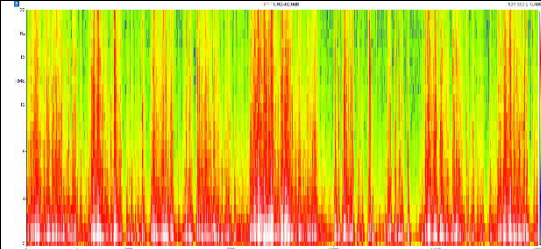
T39: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



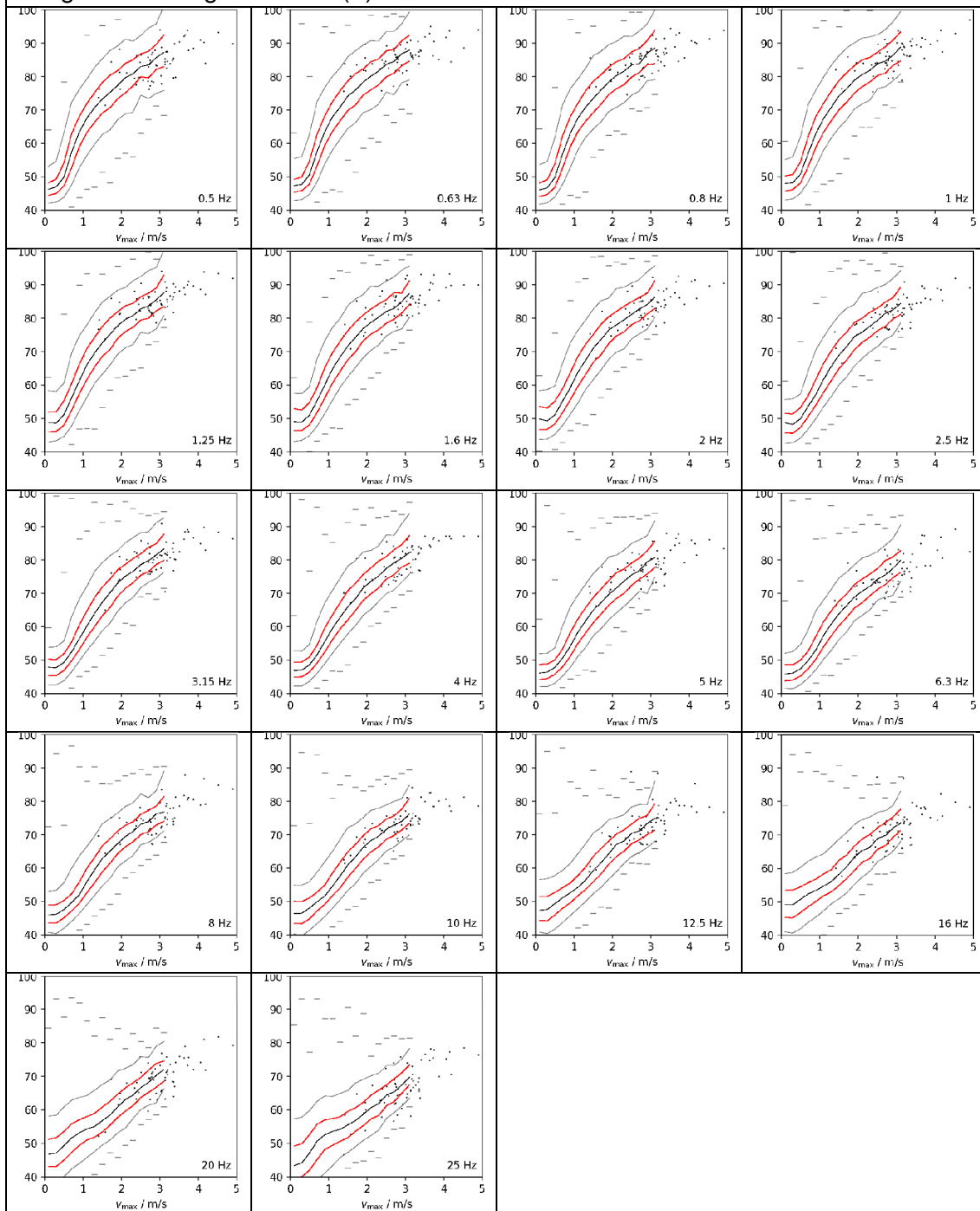
T40: Fuchsstadt					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Fuchsstadt	
			Datum:	18.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
96,0 dB(Z)	93,9 dB(Z)	75,0 dB(Z)	85,4 dB(G)	72,7 dB(C)	49,1 dB(A)


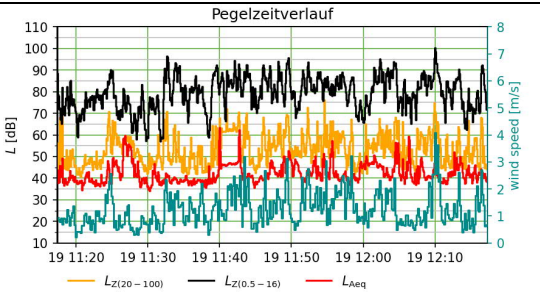
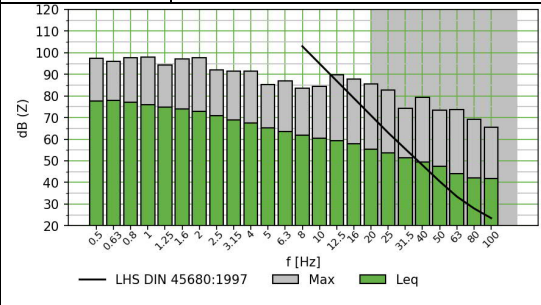
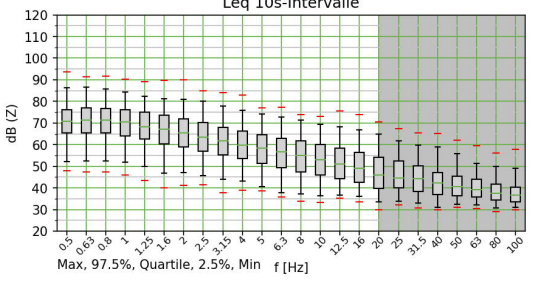
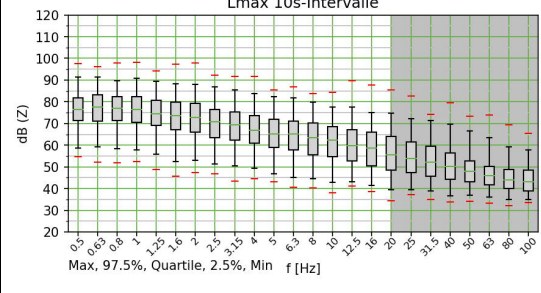
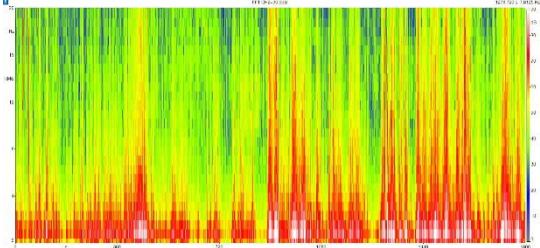
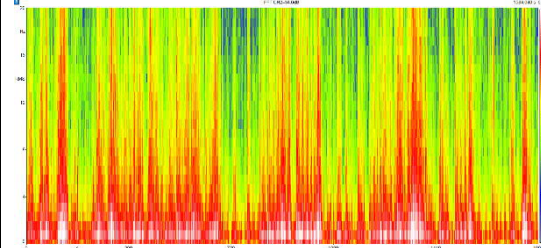
T40: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



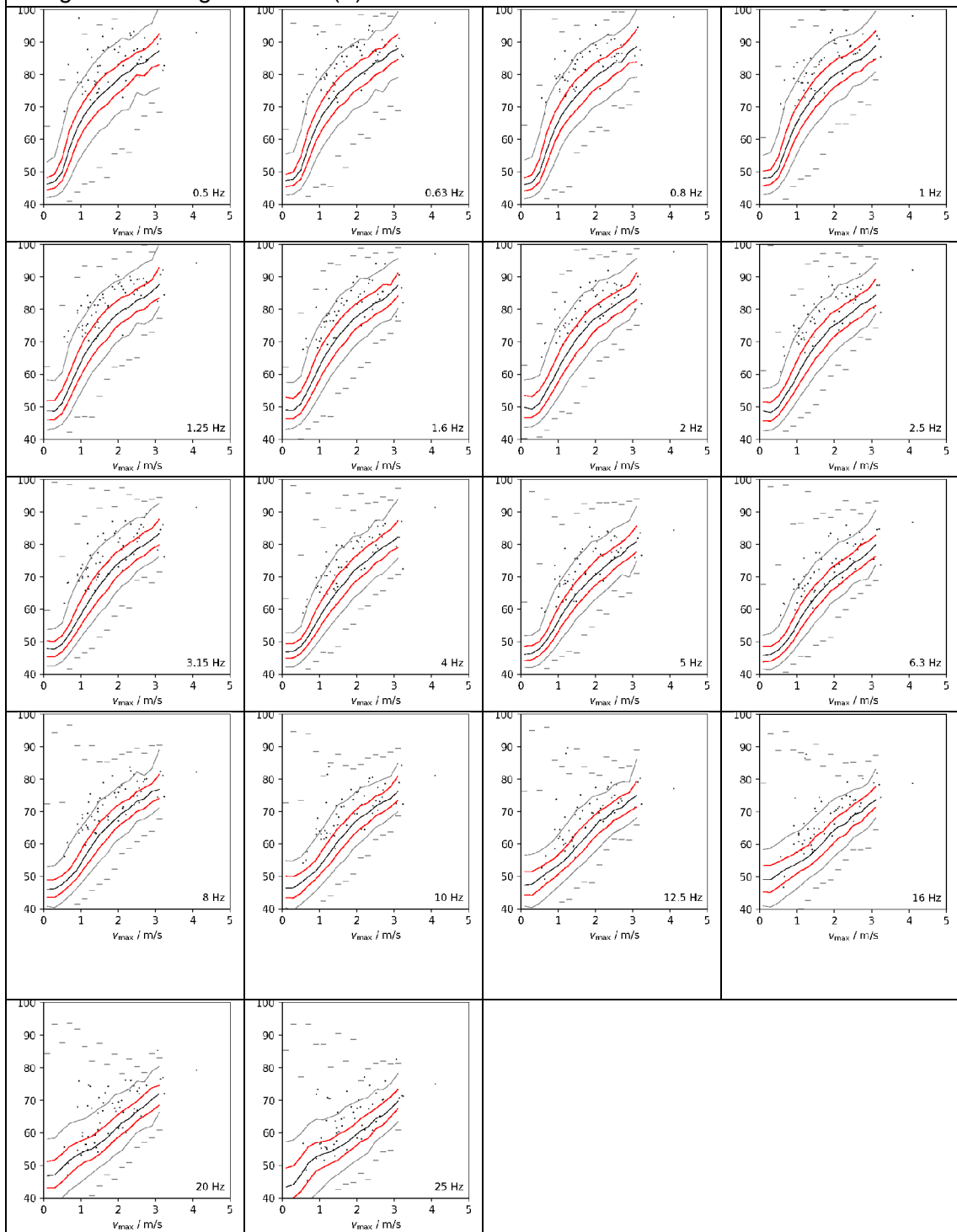
T42: Bischwind					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Bischwind	
			Datum:	19.09.2022	
			Messbed.	Regen/Wind	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
86,3 dB(Z)	83,8 dB(Z)	62,3 dB(Z)	73,8 dB(G)	60,8 dB(C)	47,3 dB(A)


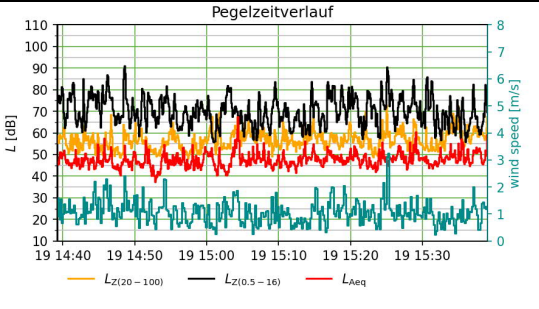
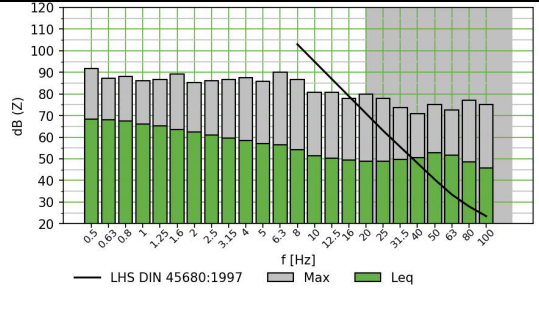
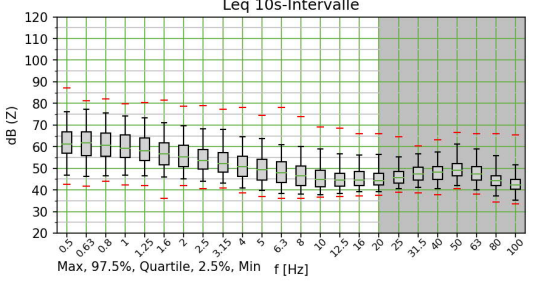
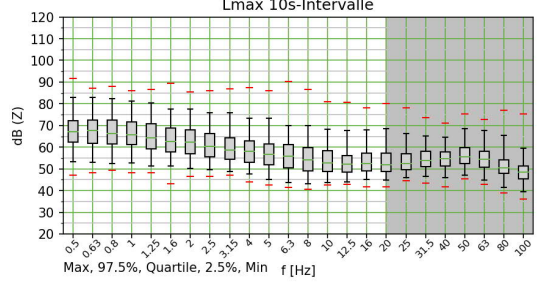
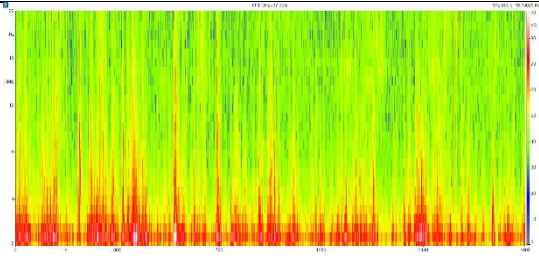
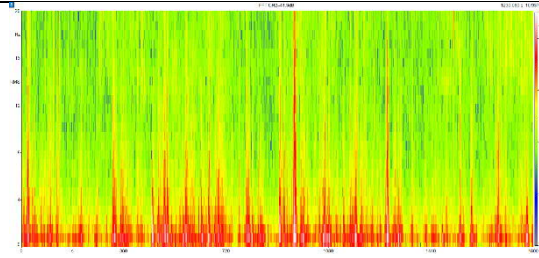
T42: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



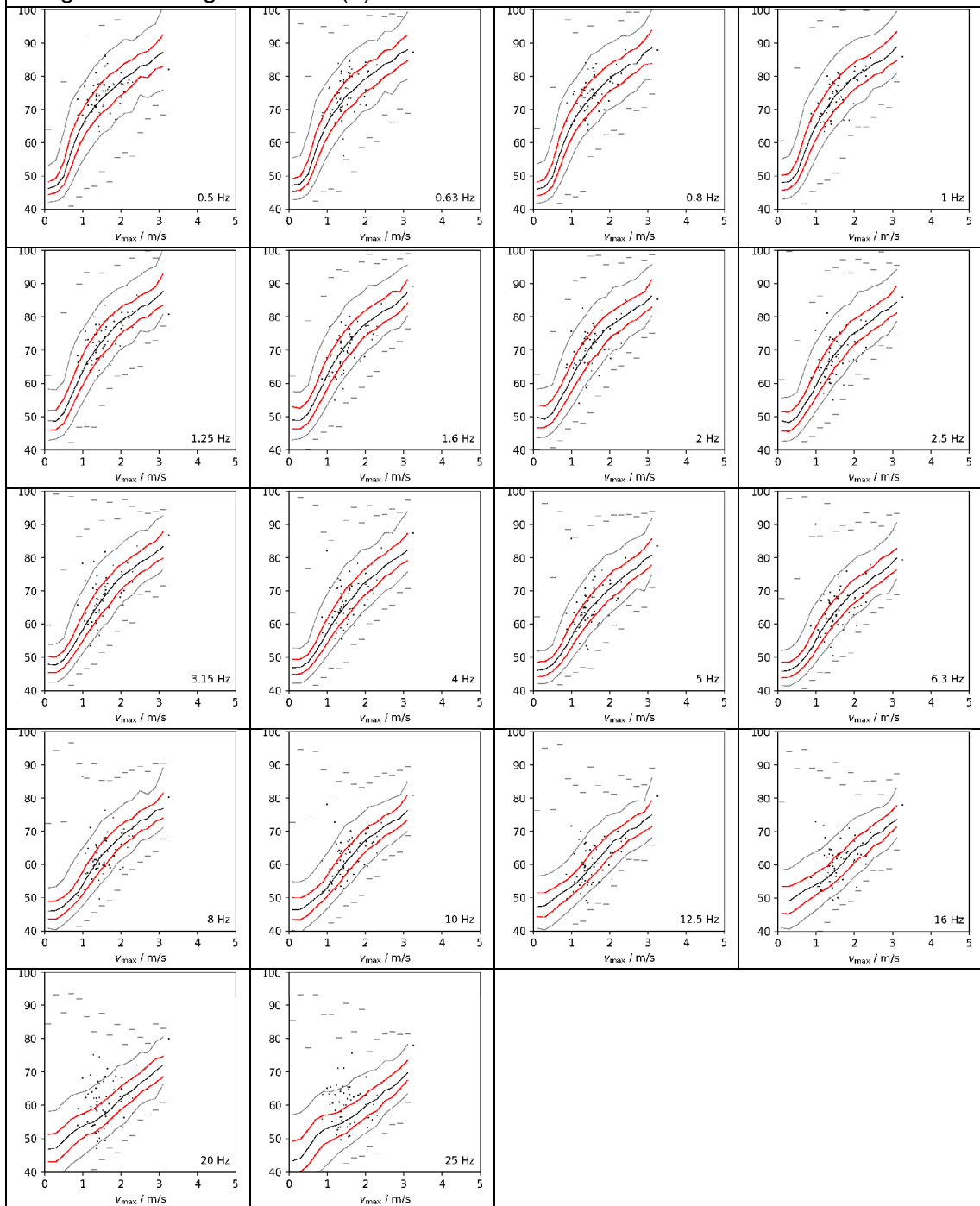
T43: Bamberg					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Bamberg	
			Datum:	19.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Großstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
85,0 dB(Z)	81,7 dB(Z)	59,6 dB(Z)	70,5 dB(G)	58,8 dB(C)	46,1 dB(A)

T43: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



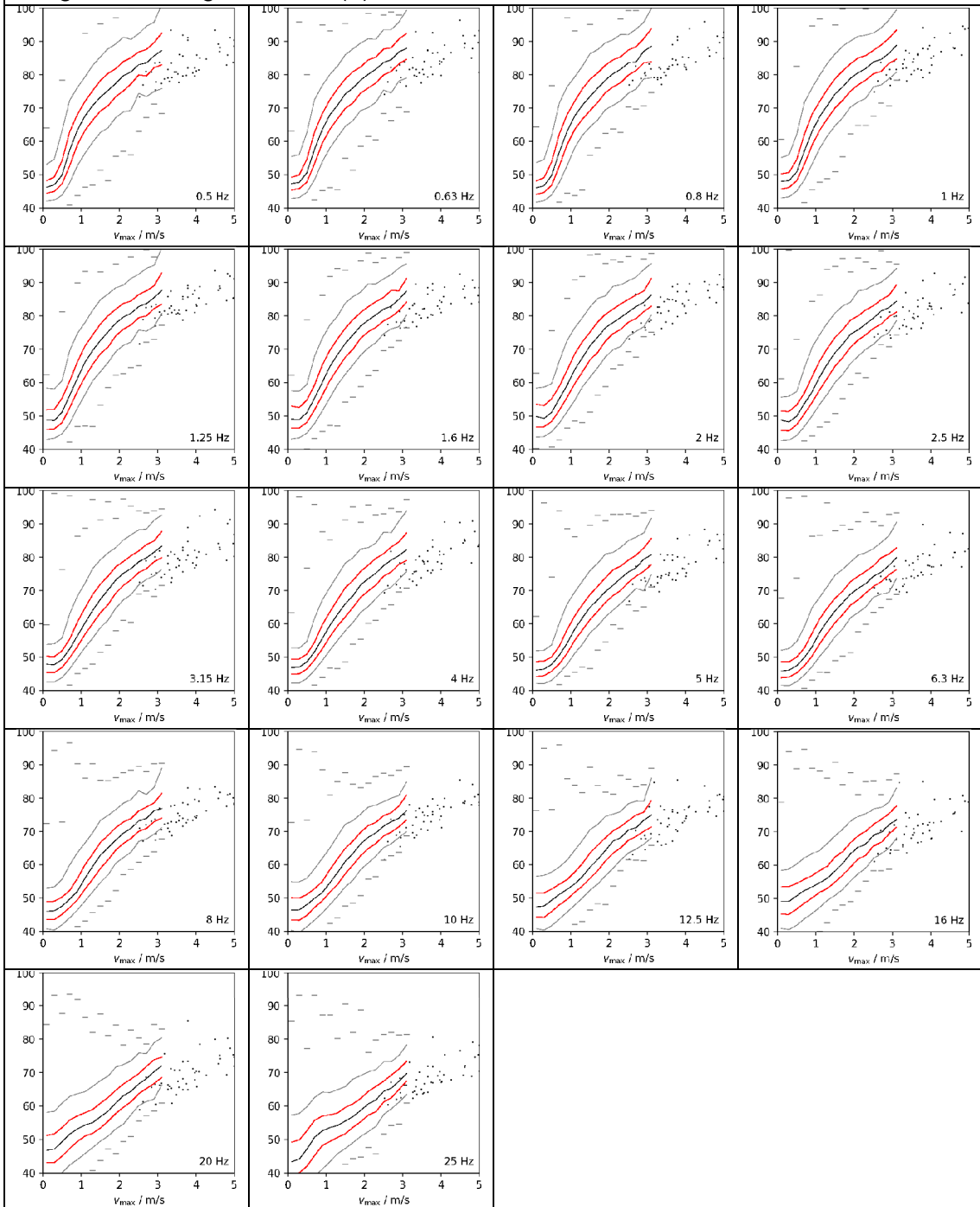
T44: Weiden					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Weiden	
			Datum:	19.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
75,5 dB(Z)	72,0 dB(Z)	59,1 dB(Z)	62,4 dB(G)	58,5 dB(C)	49,4 dB(A)


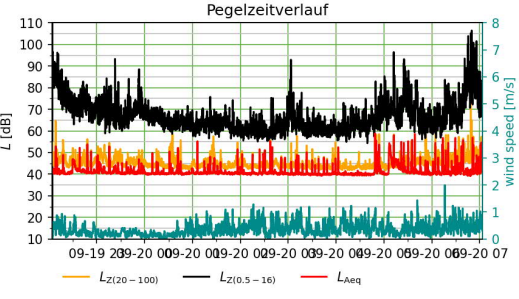
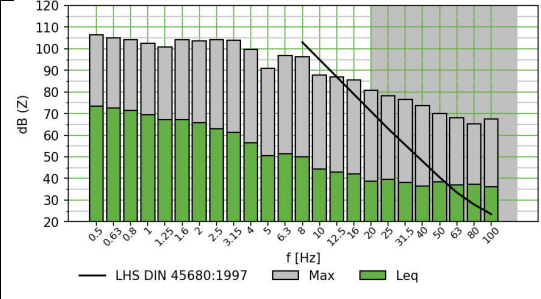
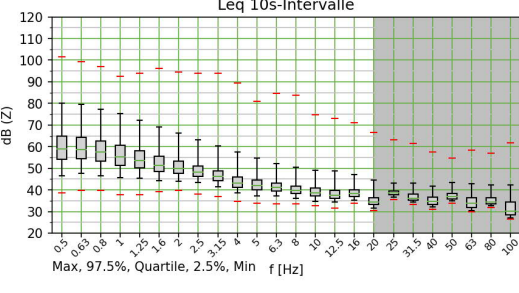
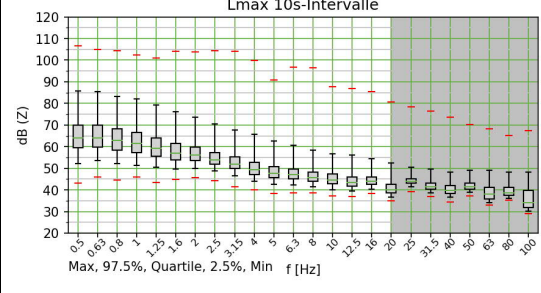
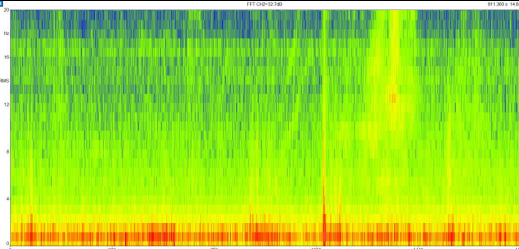
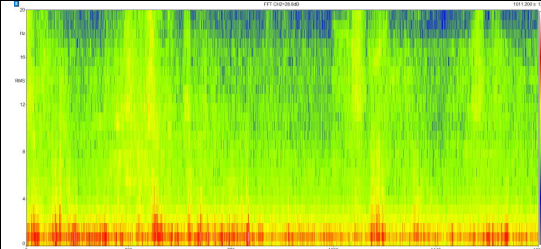
T44: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



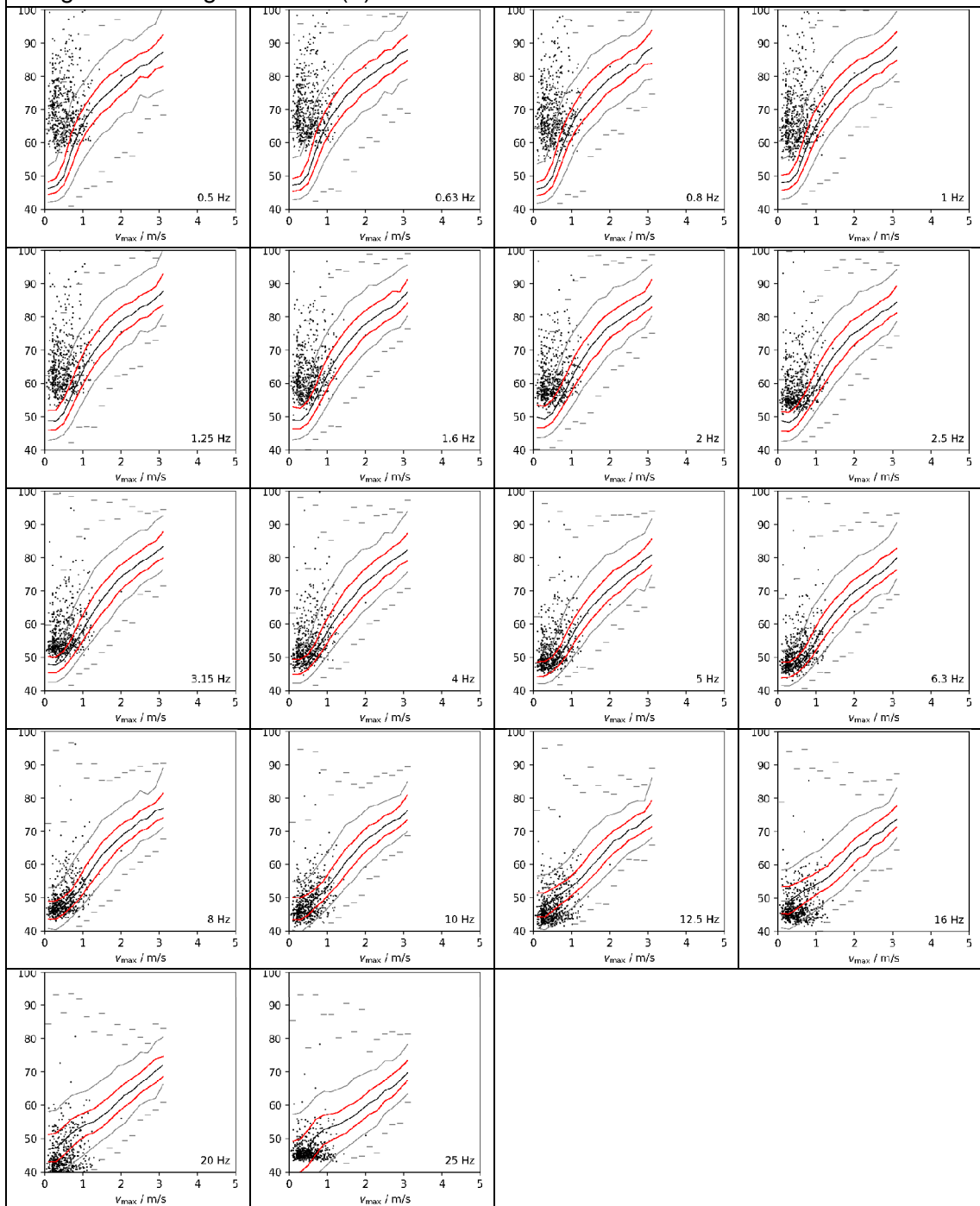
T45: Fronhof					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Fronhof	
			Datum:	19.09.2022	
			Messbed.	windig	
			Sied.Struk	Dorf/ Dauergeräusch 25Hz	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
90,4 dB(Z)	88,5 dB(Z)	70,1 dB(Z)	80,5 dB(G)	68,0 dB(C)	51,1 dB(A)


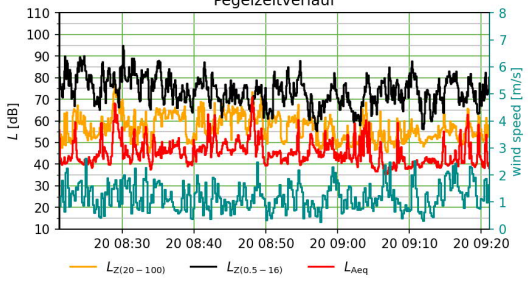
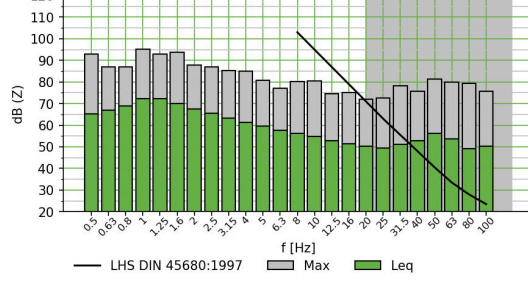
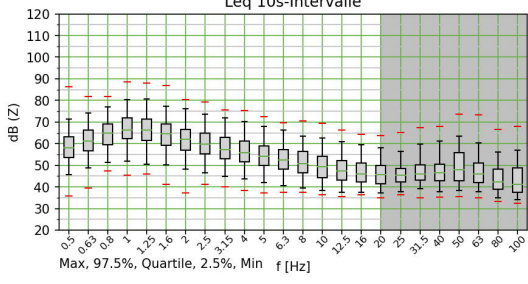
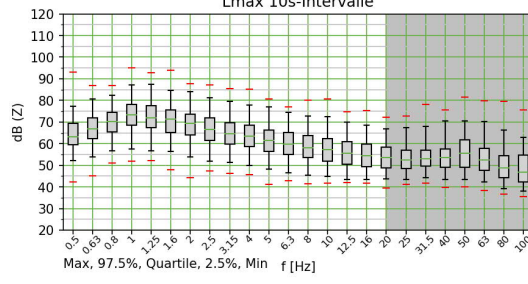
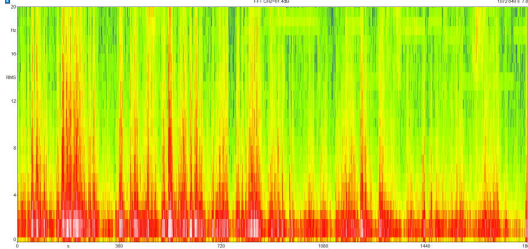
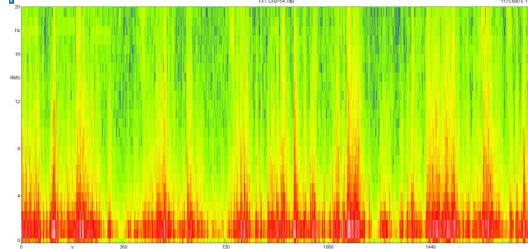
T45: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



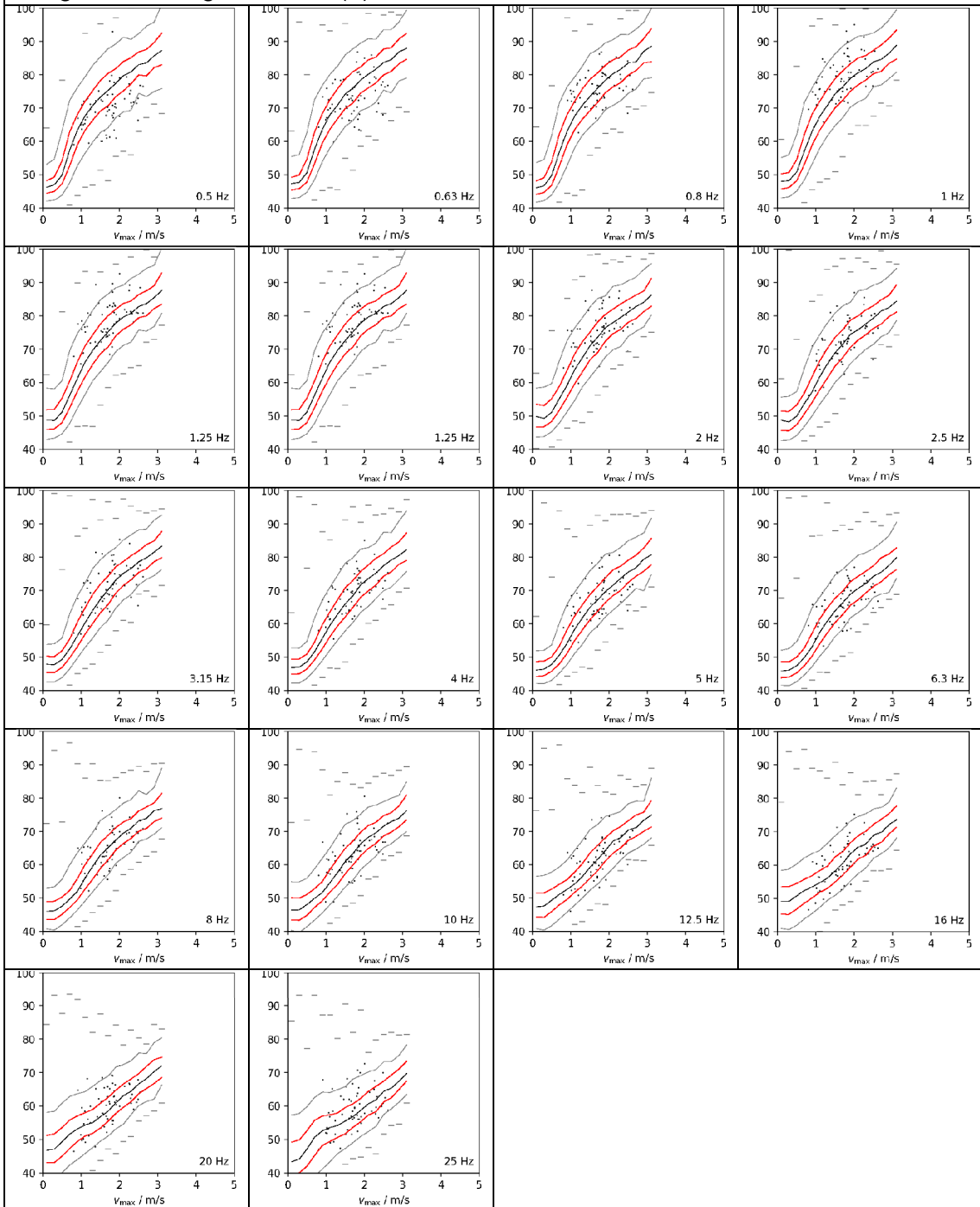
N10: Rieden					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Rieden	
			Datum:	19.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Einsiedlerhof	
					
					
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
79,1 dB(Z)	74,4 dB(Z)	46,9 dB(Z)	55,3 dB(G)	48,4 dB(C)	42,6 dB(A)


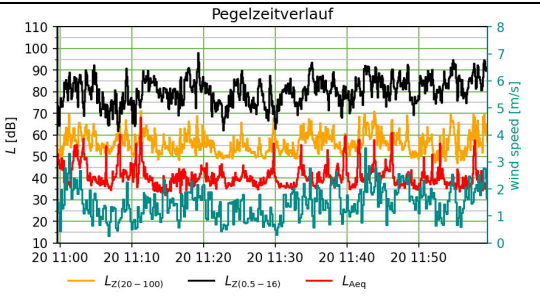
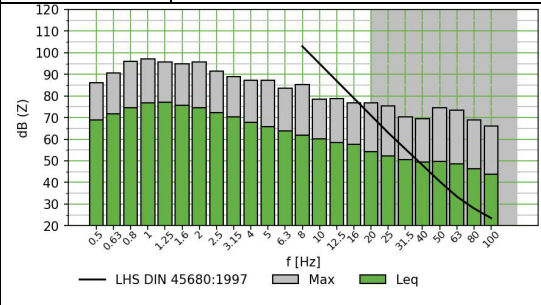
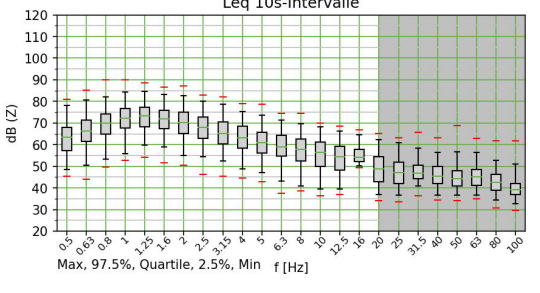
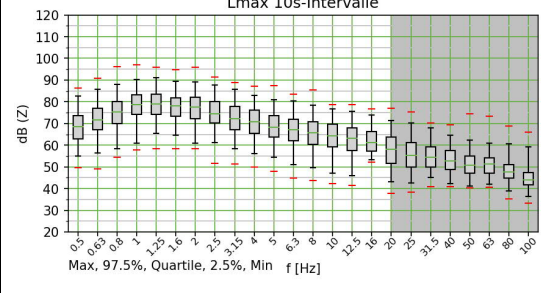
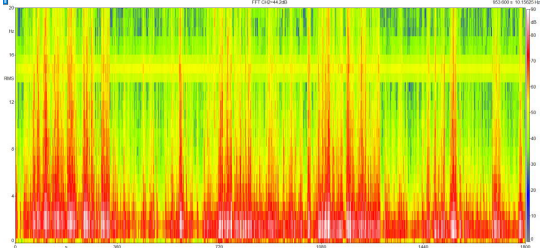
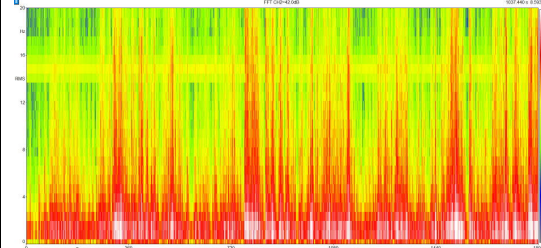
N10: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



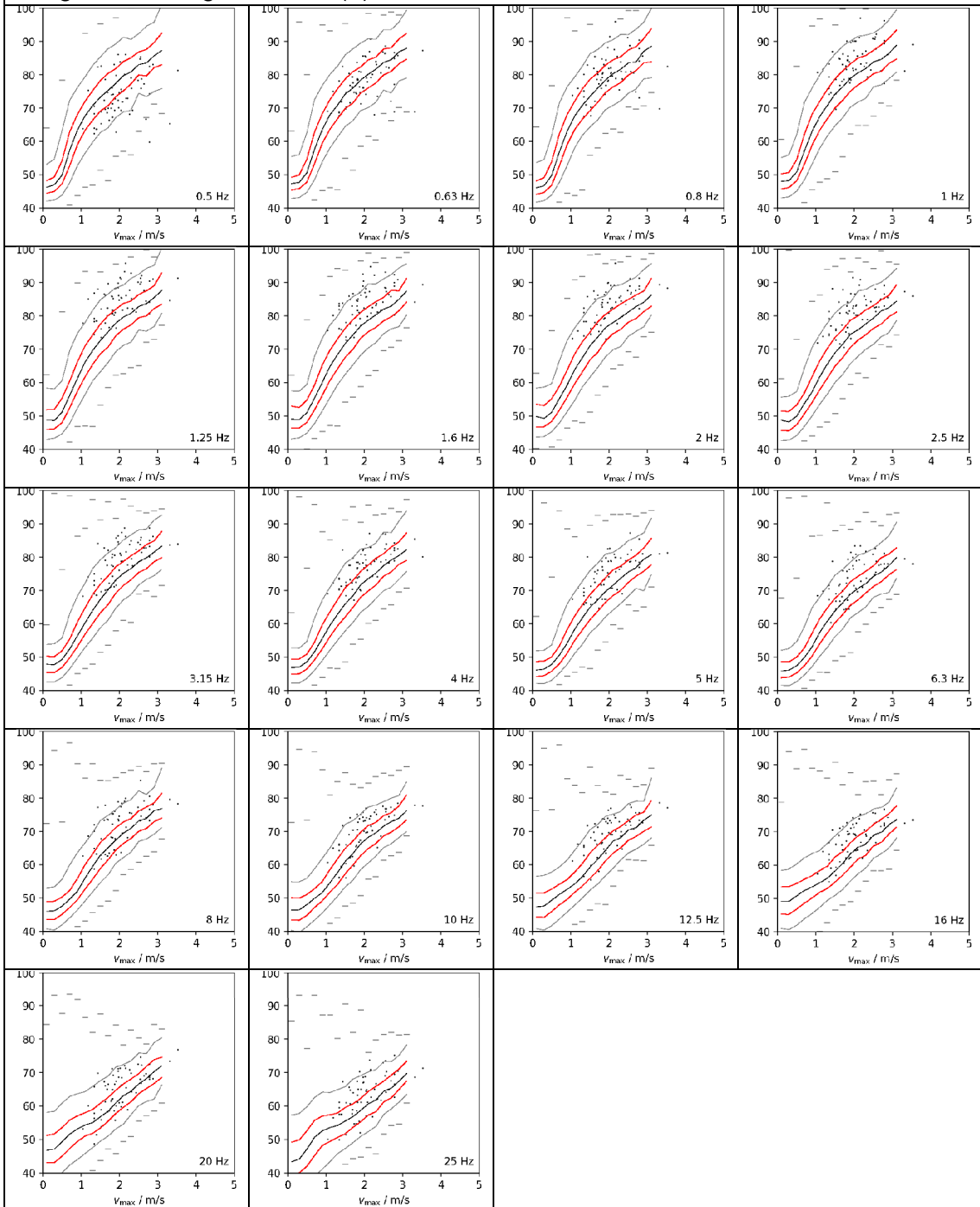
T46: Freystadt					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Freystadt	
			Datum:	20.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
78,8 dB(Z)	77,7 dB(Z)	61,4 dB(Z)	64,5 dB(G)	60,9 dB(C)	51,5 dB(A)


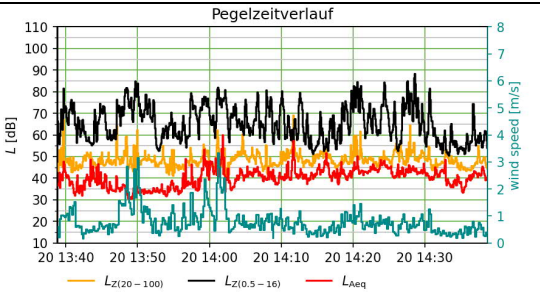
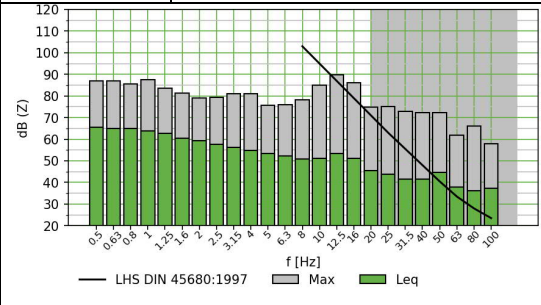
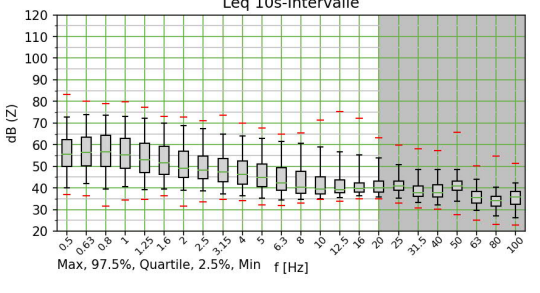
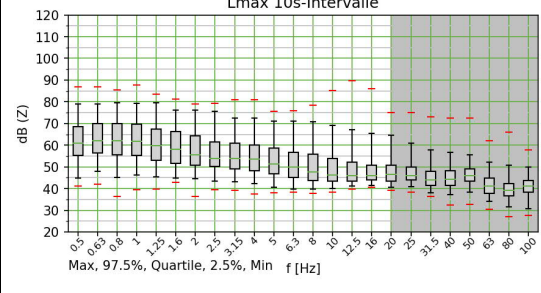
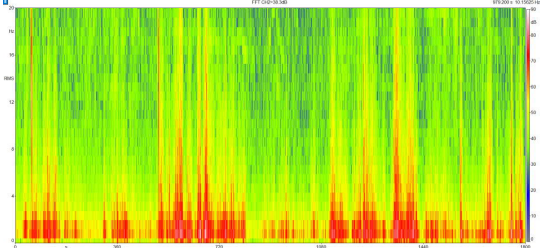
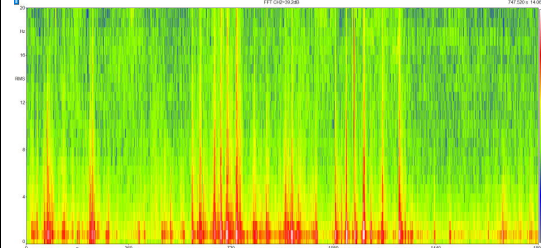
T46: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



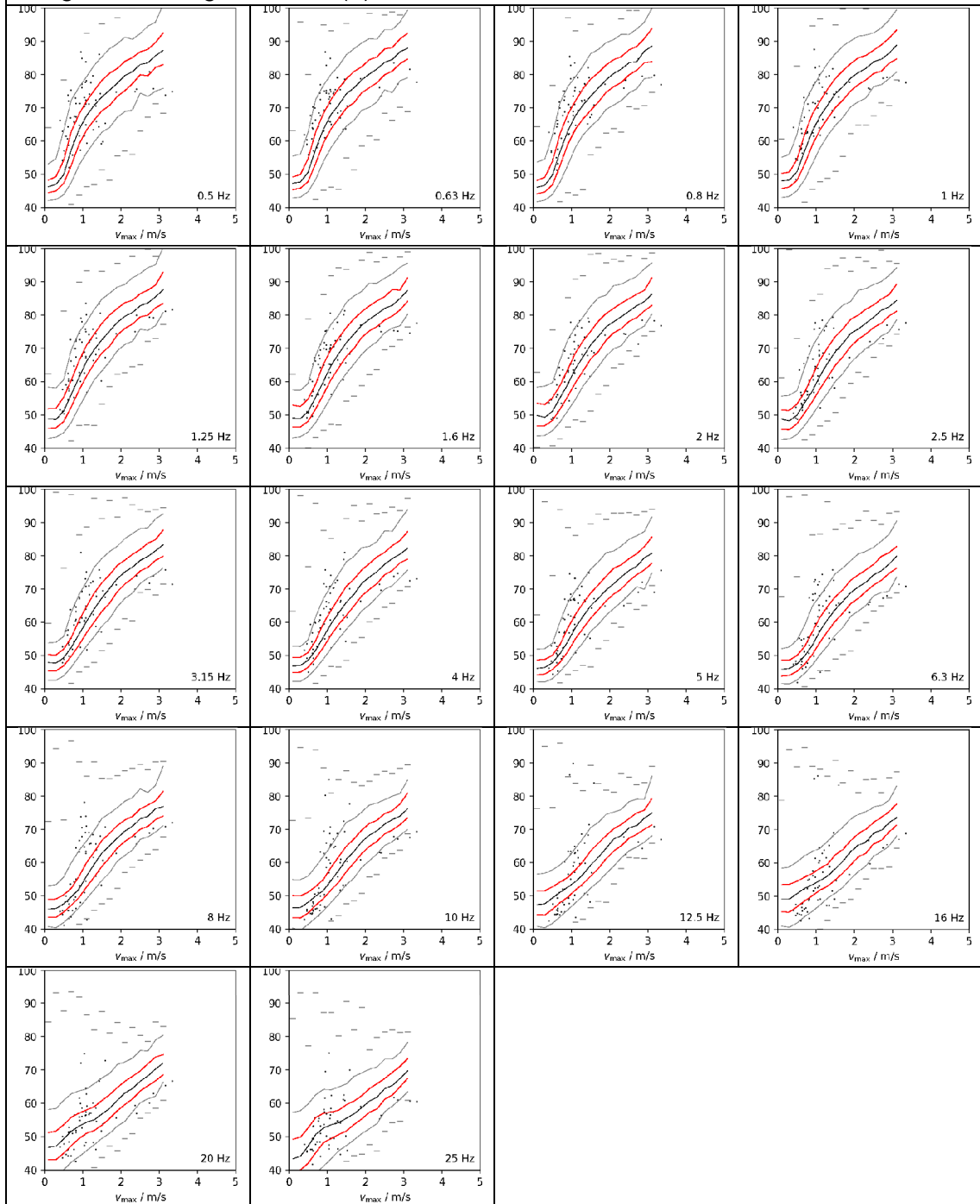
T47: Munningen					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Munningen	
			Datum:	20.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
84,2 dB(Z)	83,2 dB(Z)	59,5 dB(Z)	70,0 dB(G)	58,4 dB(C)	46,5 dB(A)


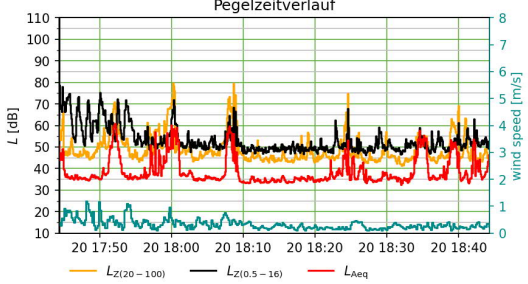
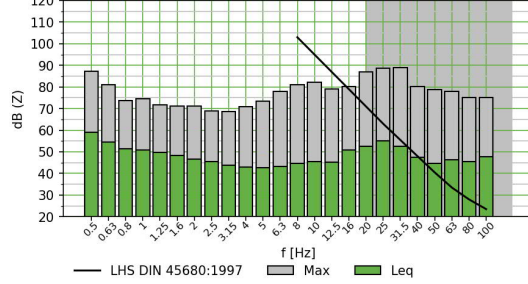
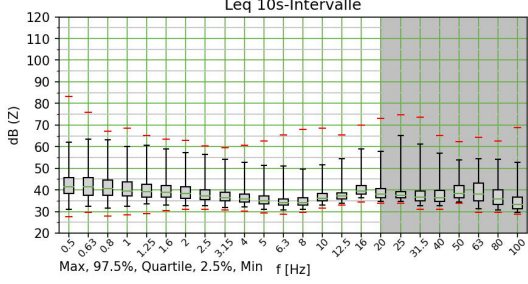
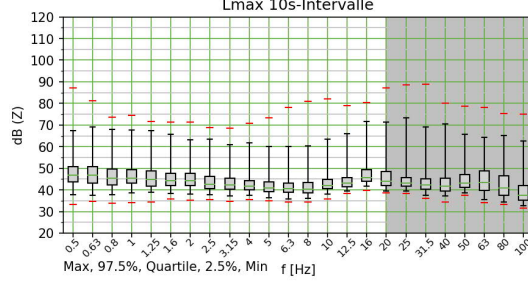
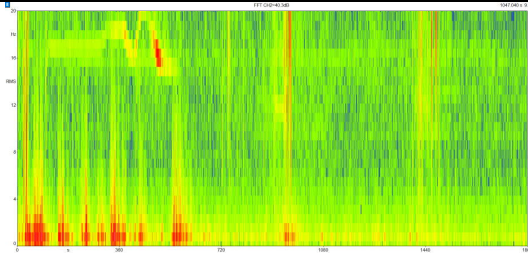
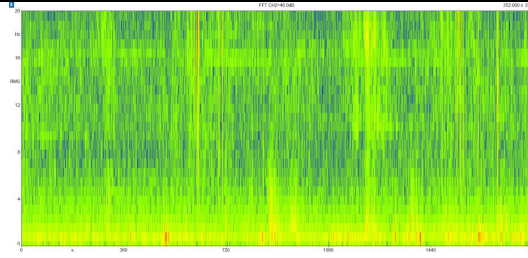
T47: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



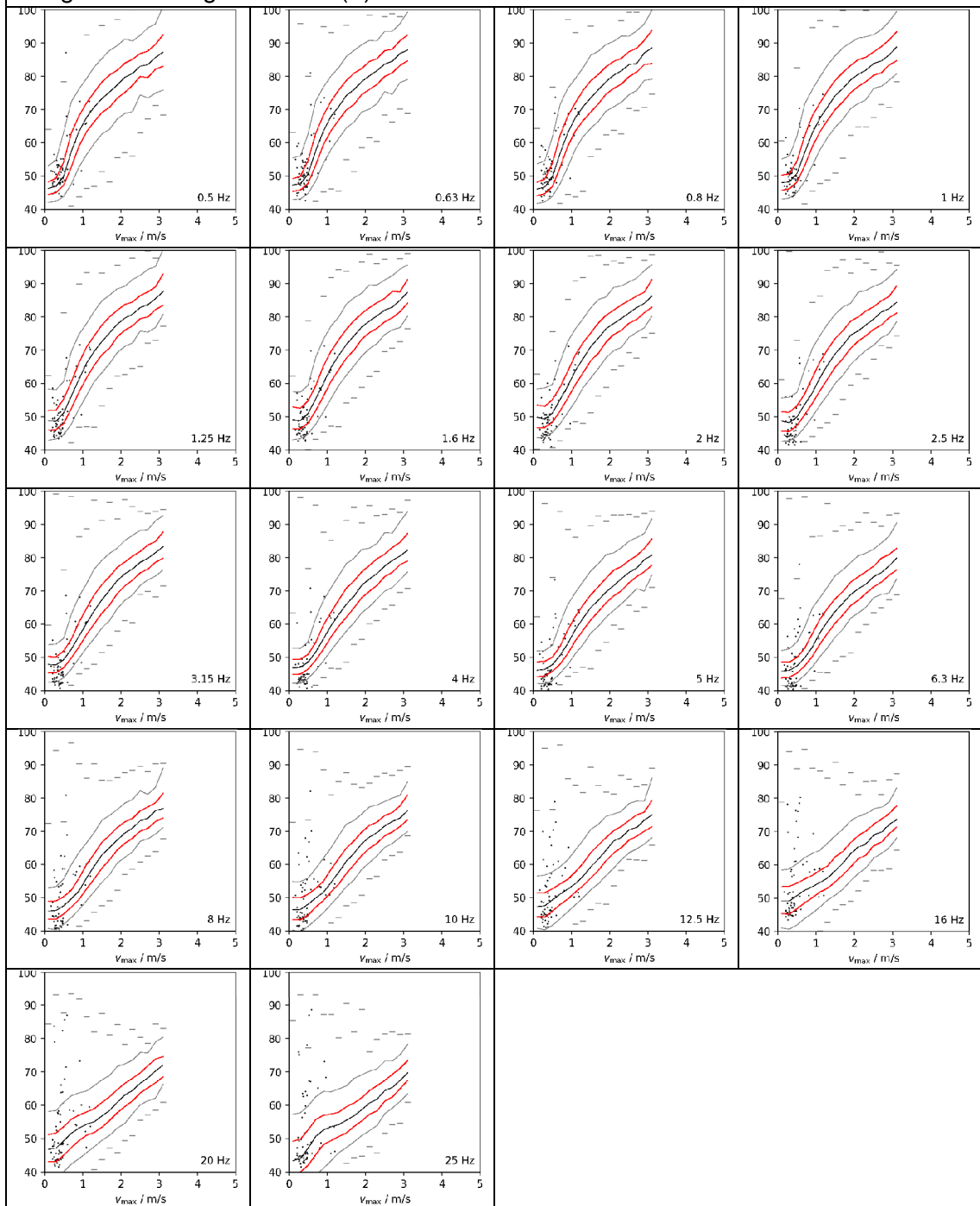
T48: Wöllingen					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Wöllingen	
			Datum:	20.09.2022	
			Messbed.	Sonnig	
			Sied.Struk	Dorf	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
72,7 dB(Z)	69,4 dB(Z)	51,2 dB(Z)	62,7 dB(G)	51,8 dB(C)	42,7 dB(A)


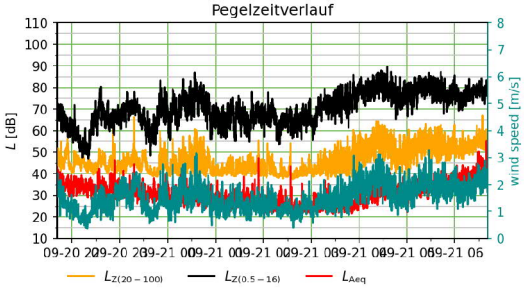
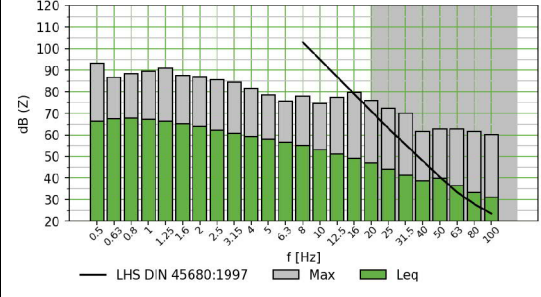
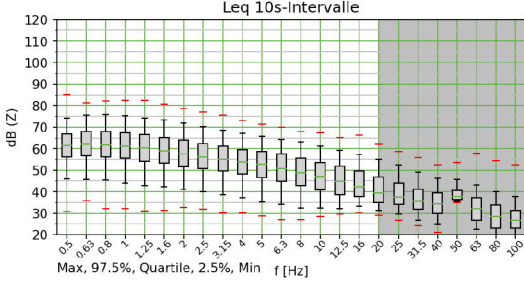
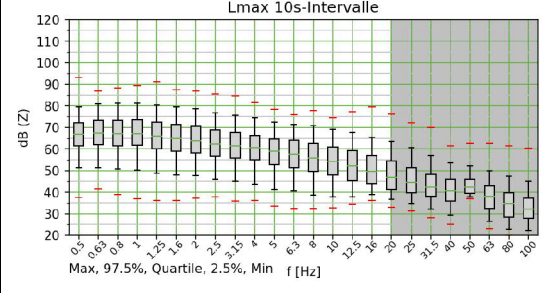
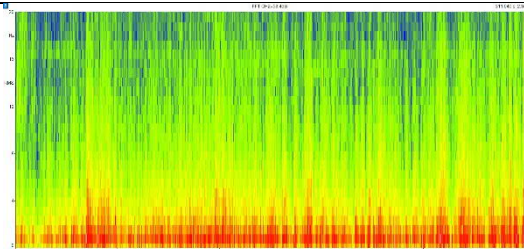
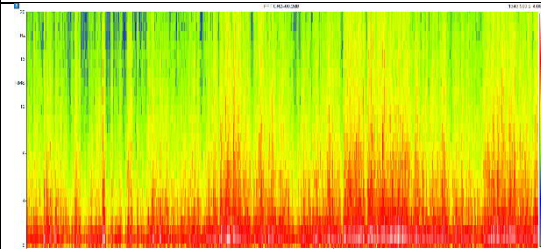
T48: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



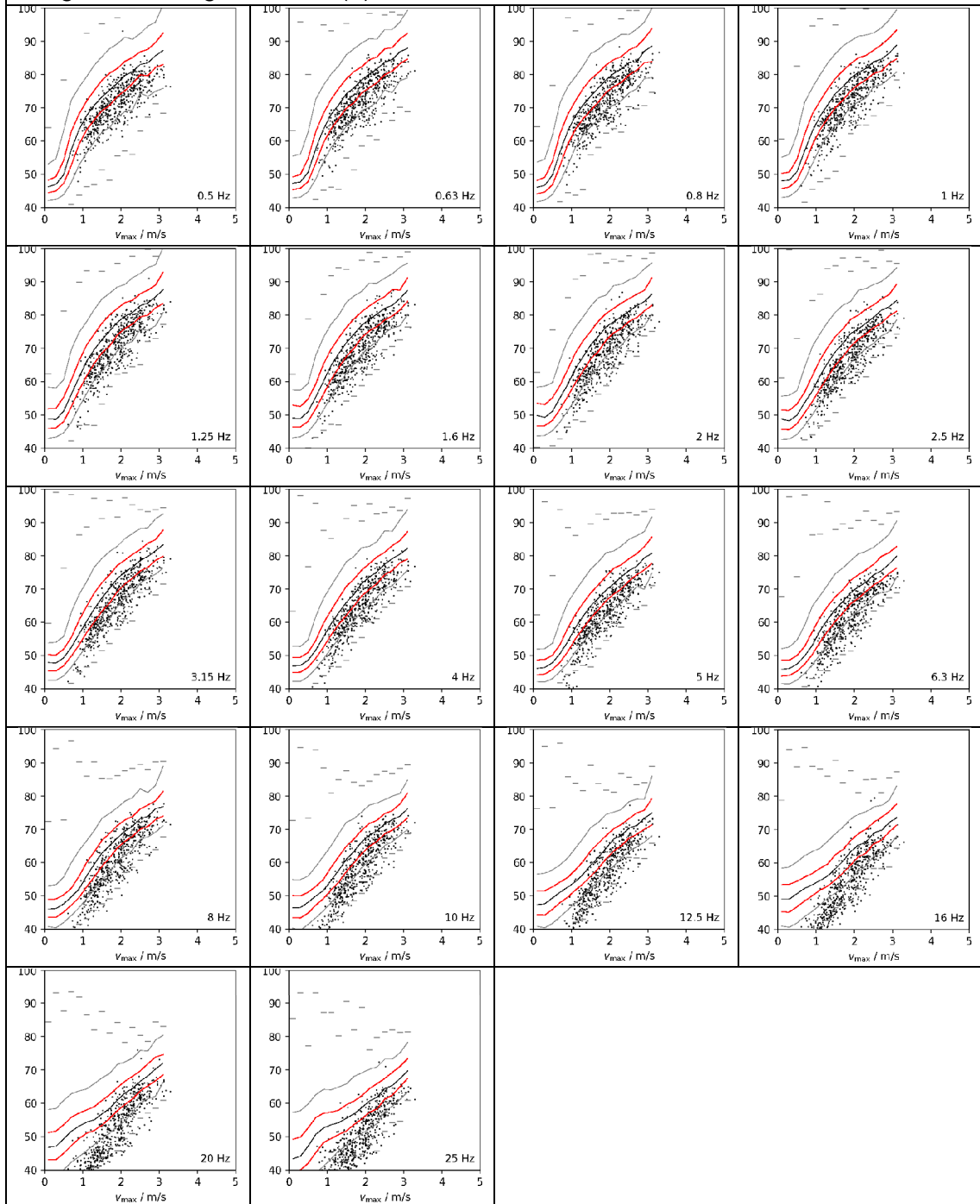
T49: Althengstedt					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Althengstedt	
			Datum:	20.09.2022	
			Messbed.	Bedeckt	
			Sied.Struk	Dorf	
<p>Pegelzeitverlauf</p> 					
<p>Leq 10s-Intervalle</p> 			<p>Lmax 10s-Intervalle</p> 		
					
L_{Zeq}	L_{Zeq} (1-16Hz)	L_{Zeq} (20-100Hz)	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}
63,9 dB(Z)	58,2 dB(Z)	59,6 dB(Z)	63,6 dB(G)	57,4 dB(C)	46,0 dB(A)


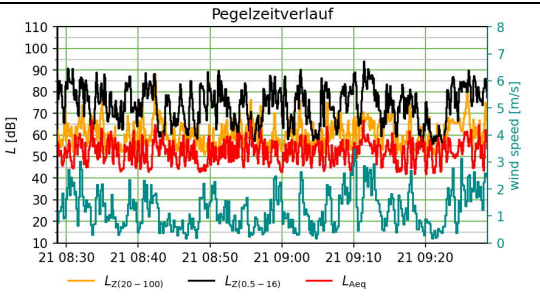
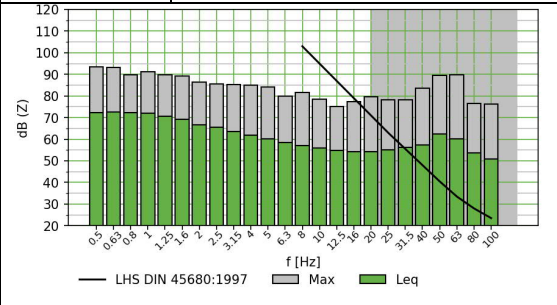
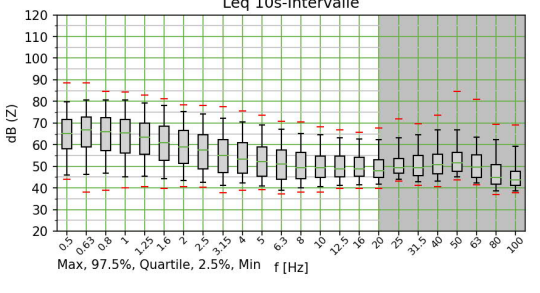
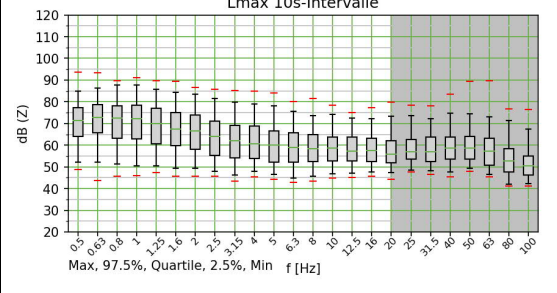
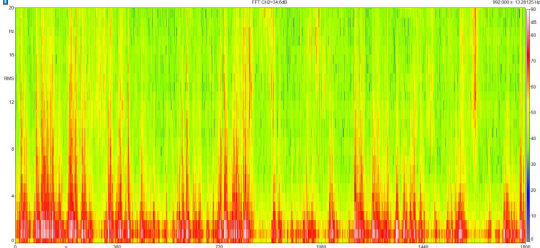
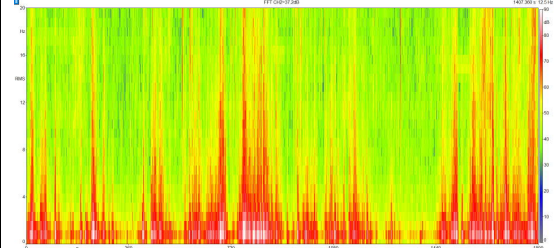
T49: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



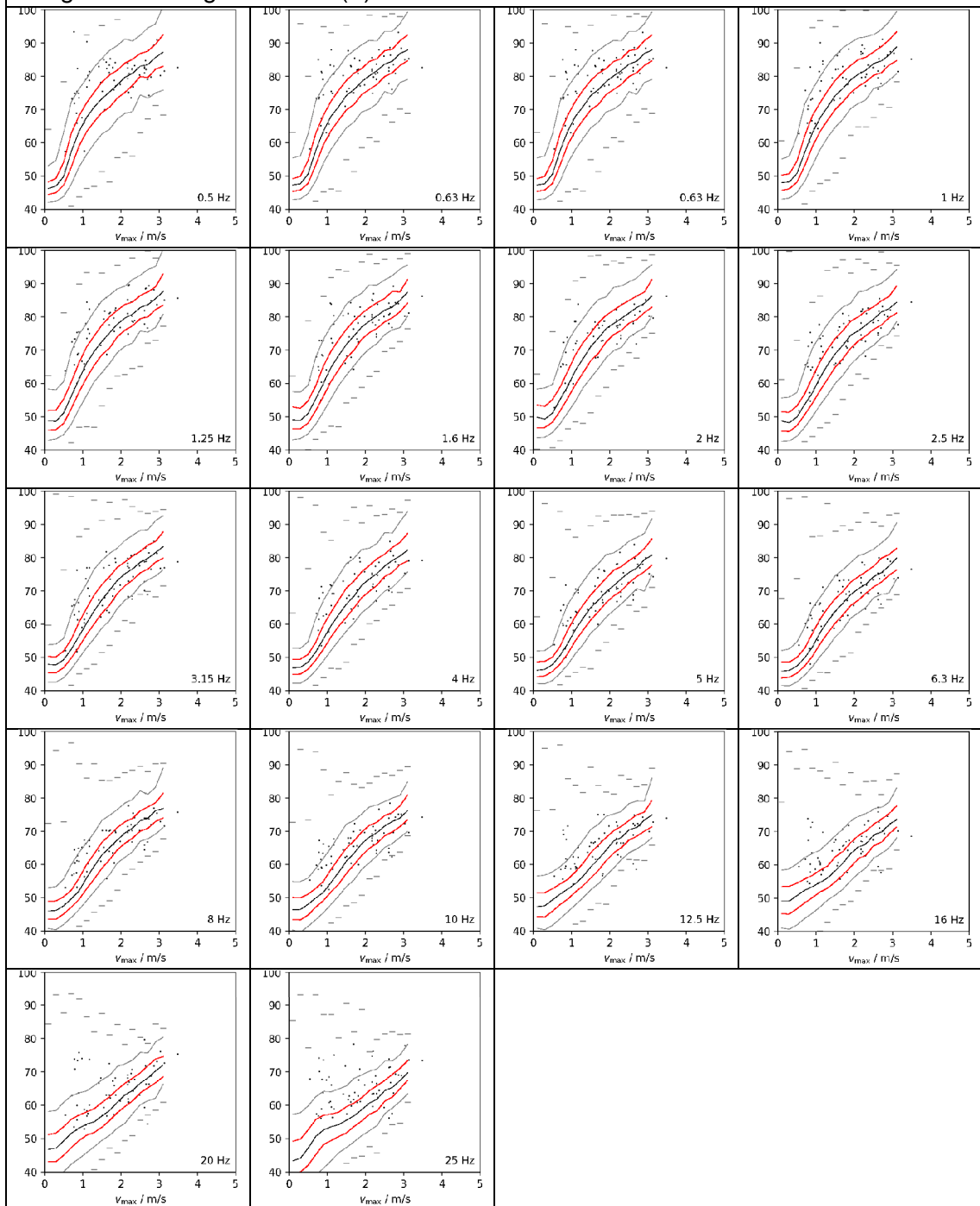
N11: Meßstetten					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Meßstetten	
			Datum:	20.09.2022	
			Messbed.	Sonnig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
					
					
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
75,9 dB(Z)	73,4 dB(Z)	50,7 dB(Z)	62,5 dB(G)	49,3 dB(C)	33,9 dB(A)


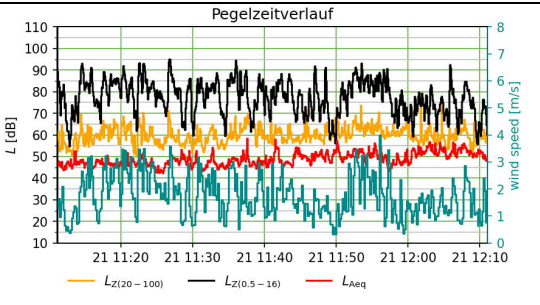
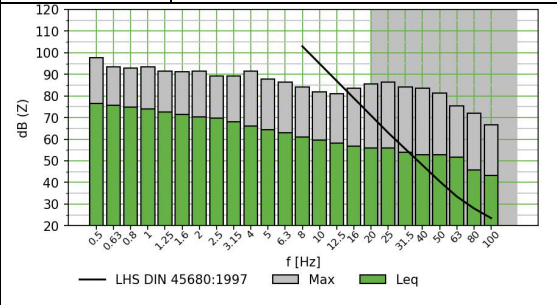
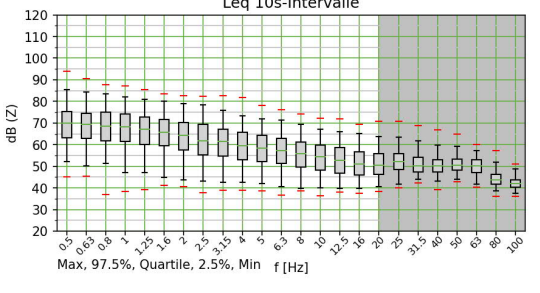
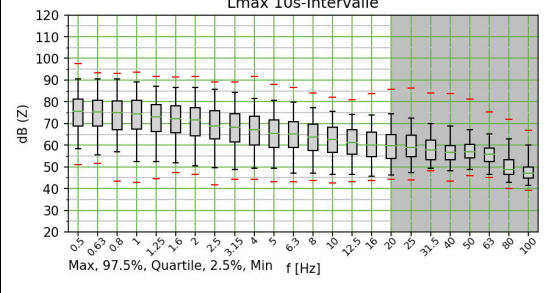
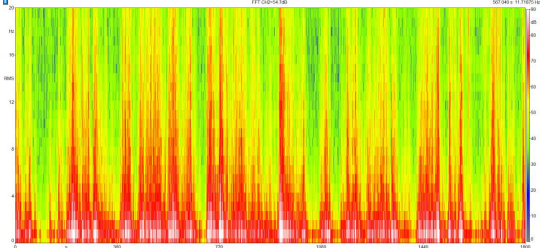
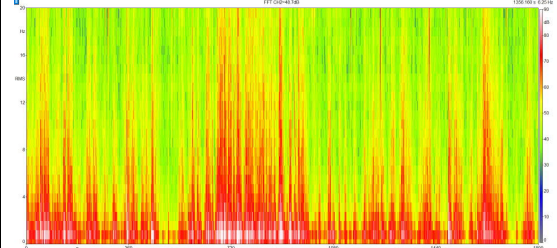
N11: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



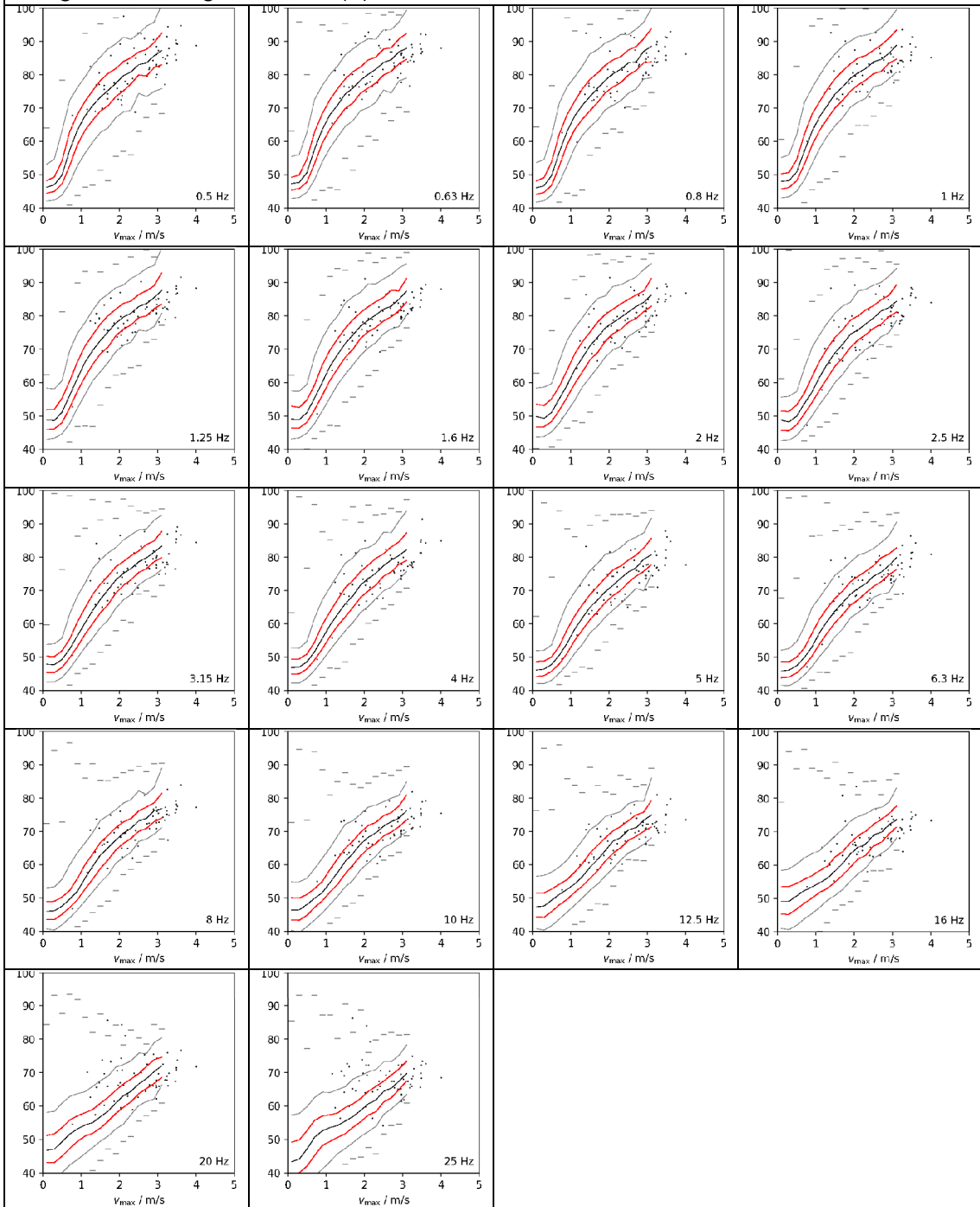
T50: Überlingen					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Überlingen	
			Datum:	21.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Mittelstadt	
					
					
					
L_{Ze}q	L_{Ze}q (1-16Hz)	L_{Ze}q (20-100Hz)	L_{Ge}q	L_{Ce}q	L_{Ae}q
80,4 dB(Z)	77,1 dB(Z)	66,7 dB(Z)	67,2 dB(G)	65,9 dB(C)	55,1 dB(A)

T50: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s



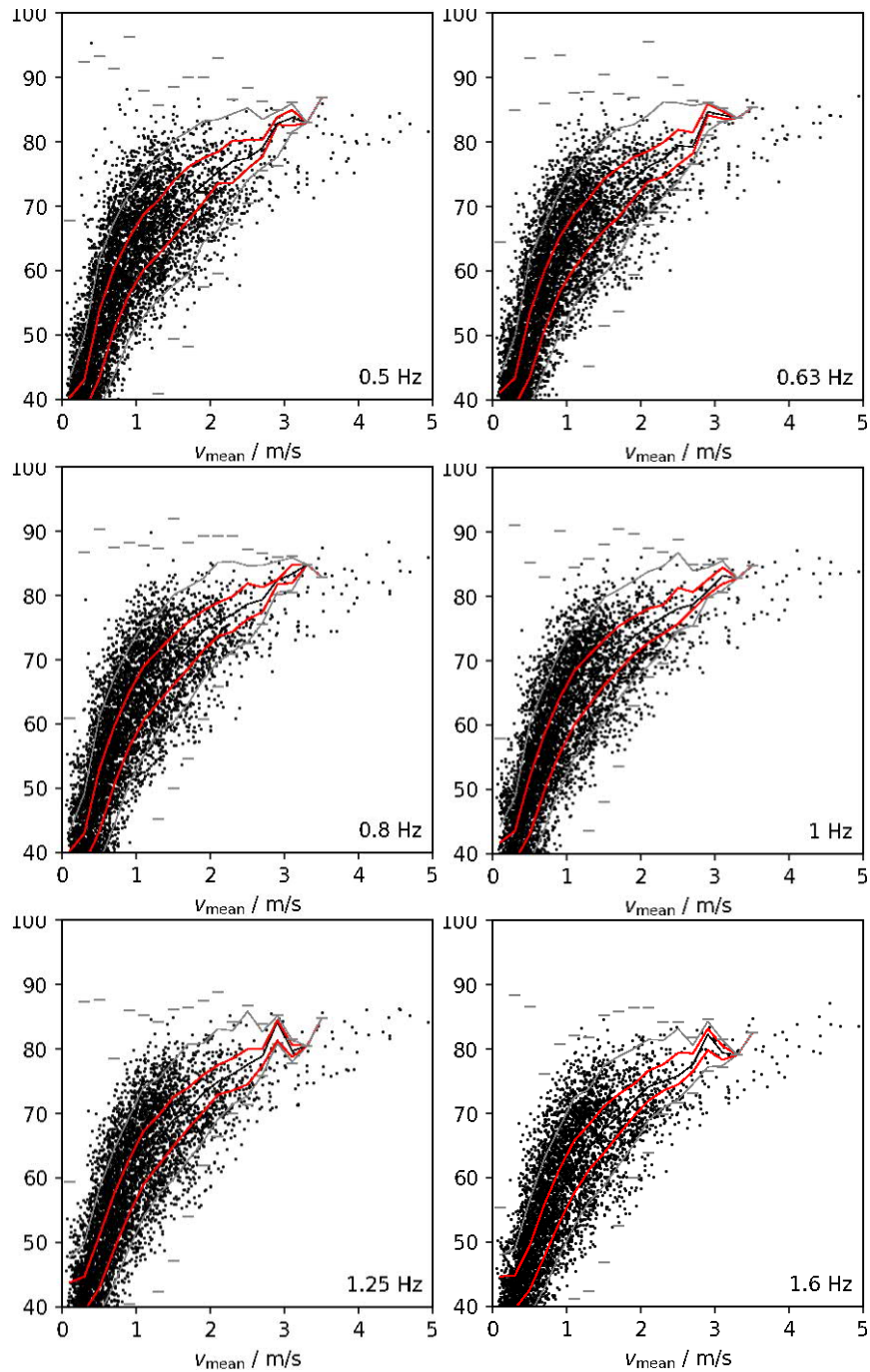
T51: Isny					
Foto:			Informationen zur Messung:		
			Ort:	Isny	
			Datum:	22.09.2022	
			Messbed.	Ruhig	
			Sied.Struk	Kleinstadt	
 <p>Pegelzeitverlauf</p>					
 <p>Leq 10s-Intervalle</p>			 <p>Lmax 10s-Intervalle</p>		
					
LZeq	LZeq (1-16Hz)	LZeq (20-100Hz)	LGeq	LCeq	LAeq
83,1 dB(Z)	79,8 dB(Z)	62,1 dB(Z)	69,9 dB(G)	60,6 dB(C)	49,9 dB(A)

T51: Auswertung der Terzmittenfrequenzen von 0,5 Hz bis 25 Hz im Vergleich zur Langzeitmessung: L_{max} in dB(Z) zu v_{max} in m/s

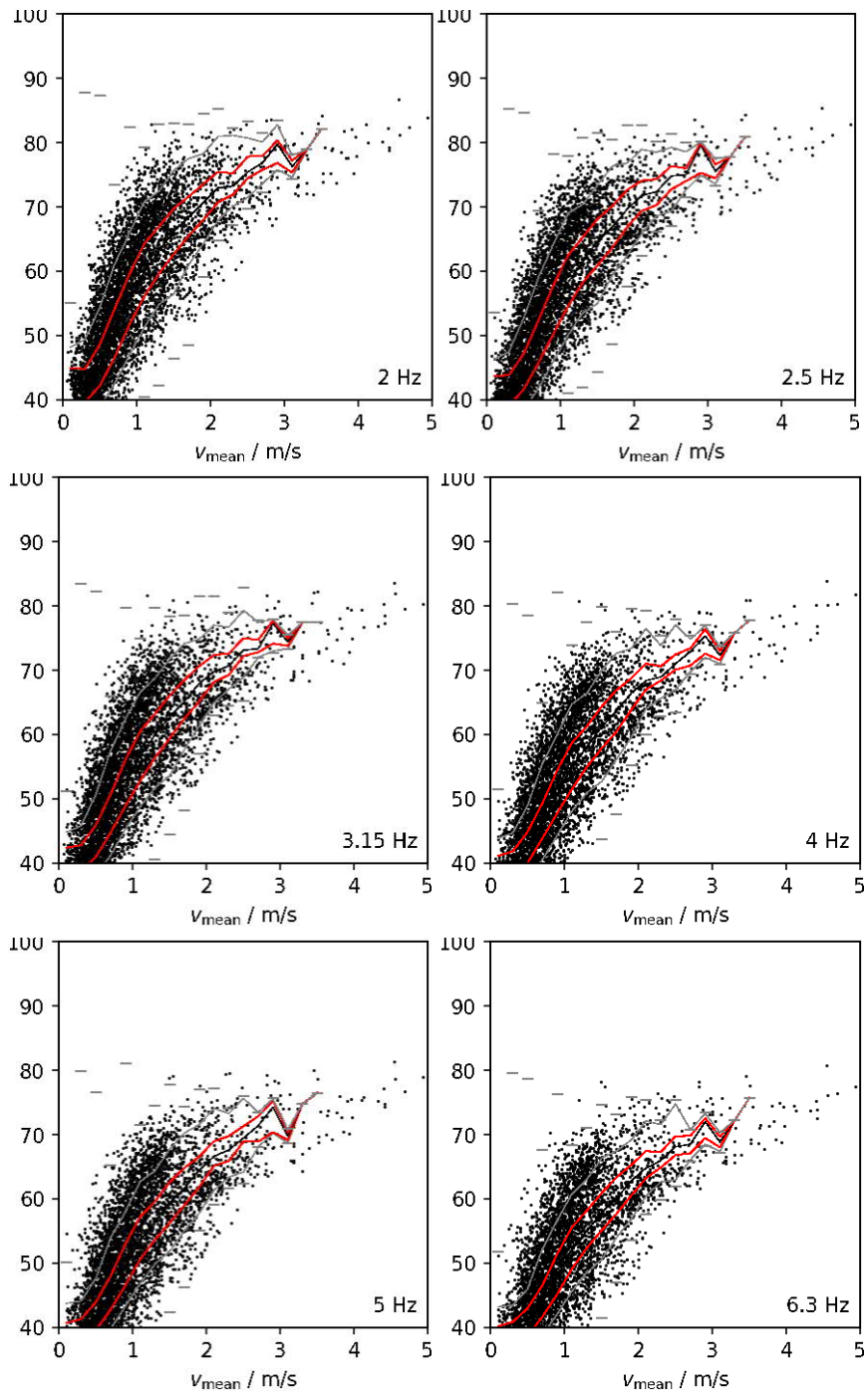


Anlagen, Teil 5: Statistikauswertung Querschnittserhebung

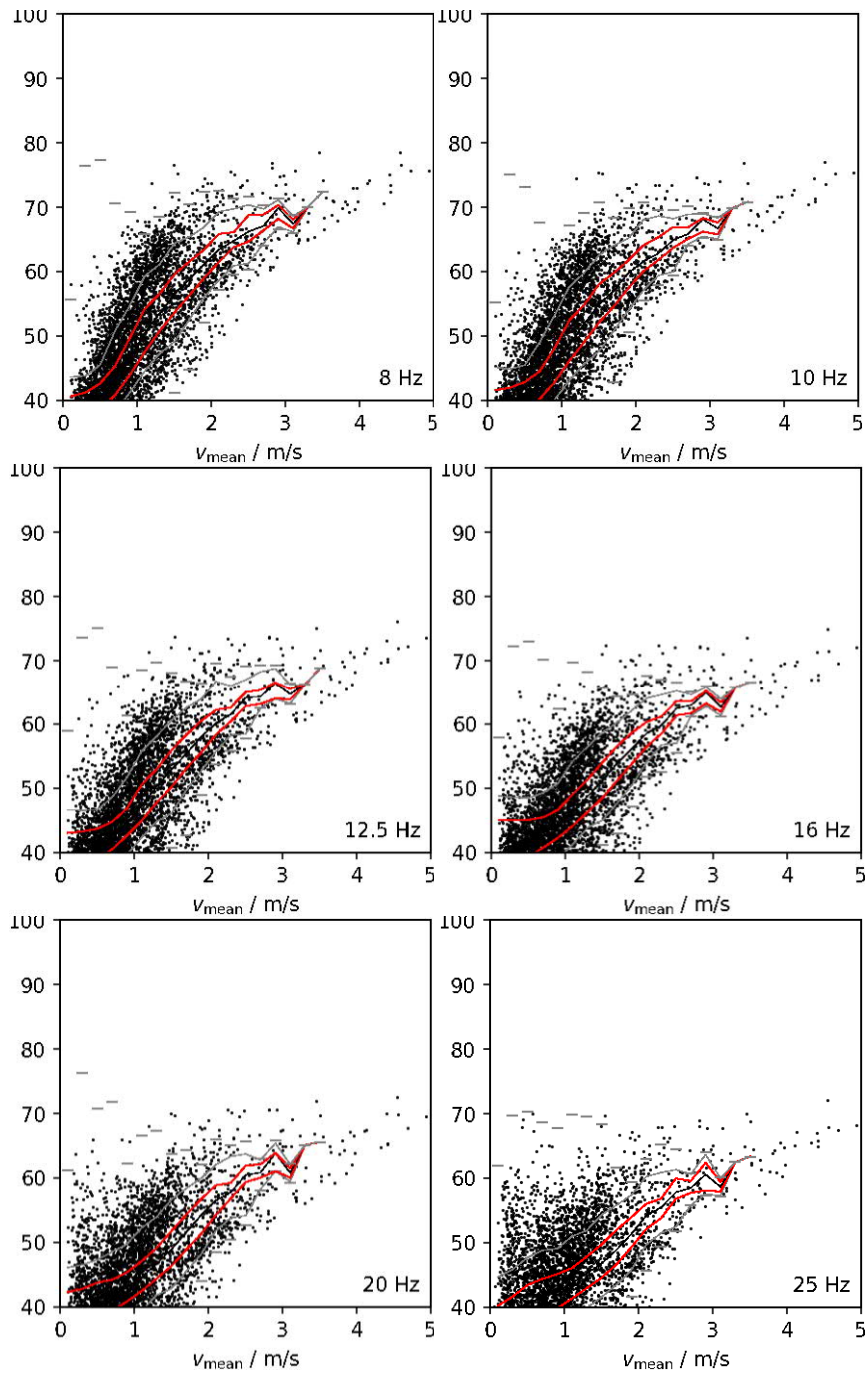
L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot aller Messdaten gegenüber der Langzeitmessung: Terzen 0,5 Hz-1,6 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit



L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot aller Messdaten gegenüber der Langzeitmessung: Terzen 2 Hz-6,3 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.

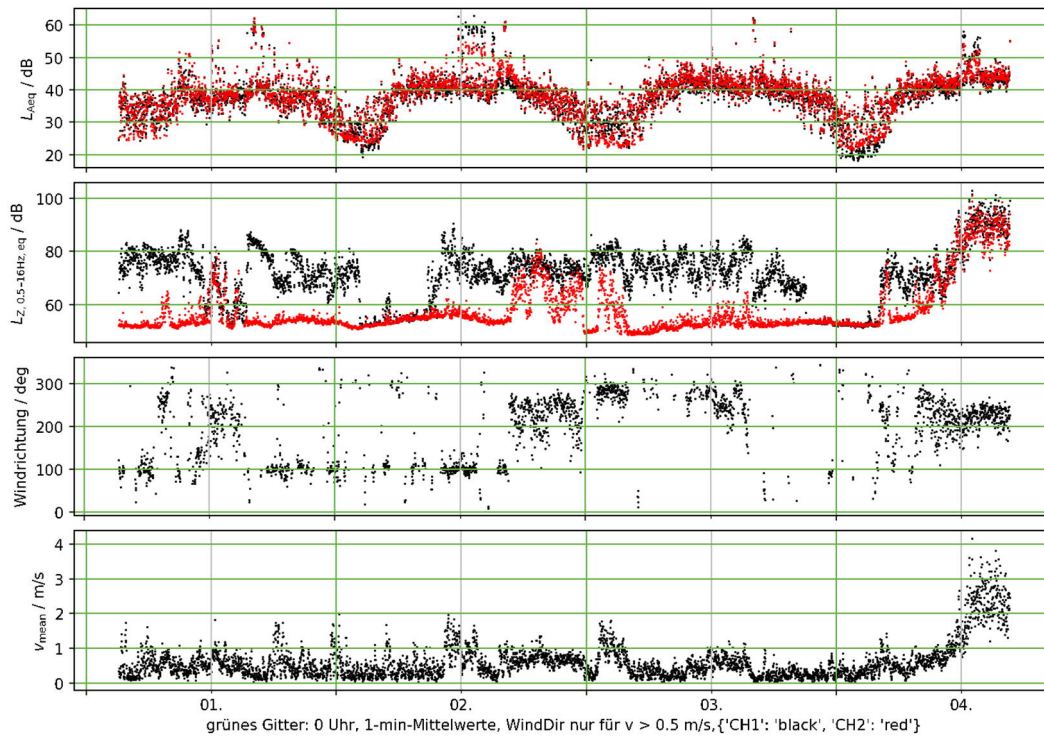


L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot aller Messdaten gegenüber der Langzeitmessung: Terzen 8 Hz-25 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

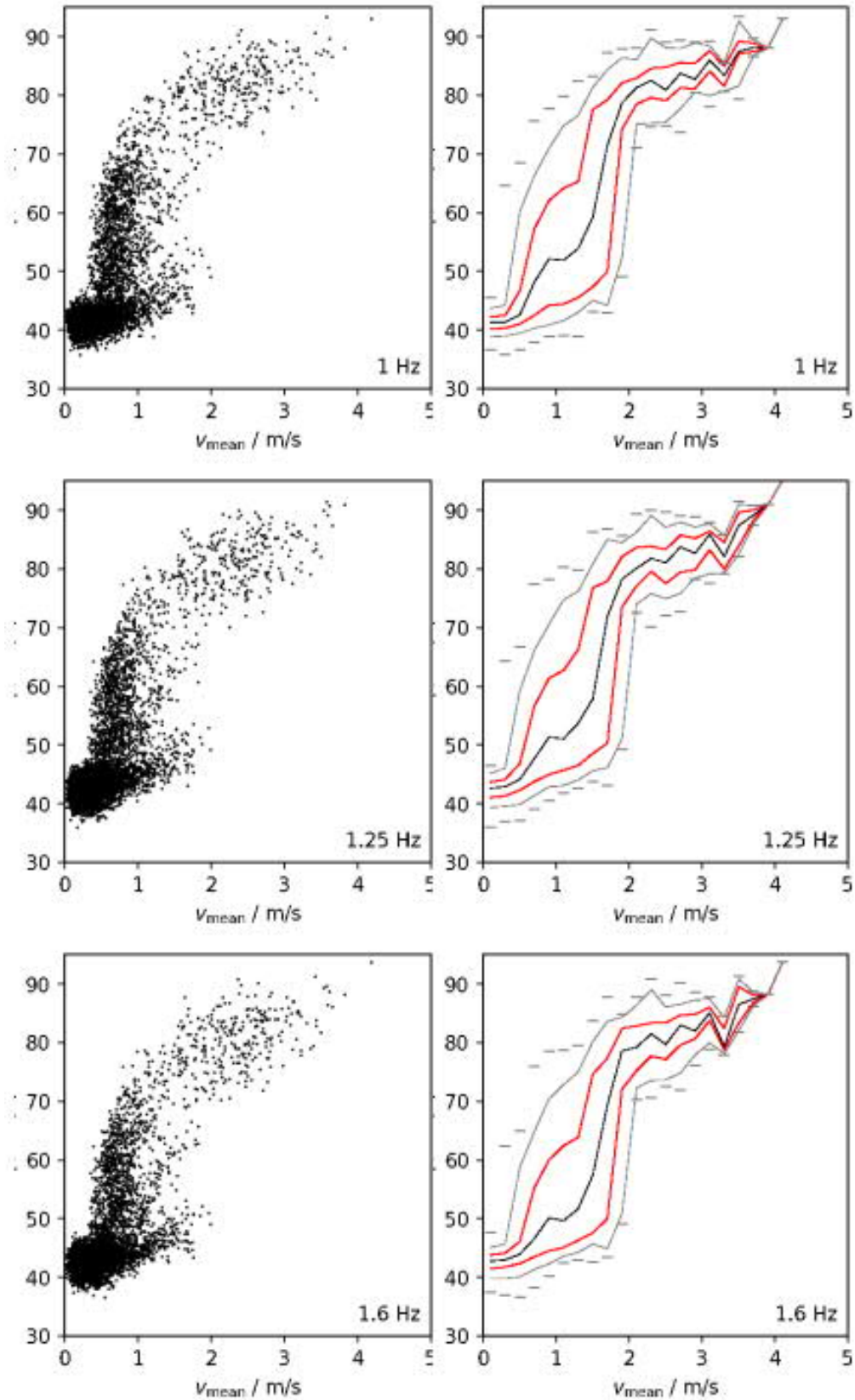


Anlagen, Teil 6: Messauswertung Versuch 2

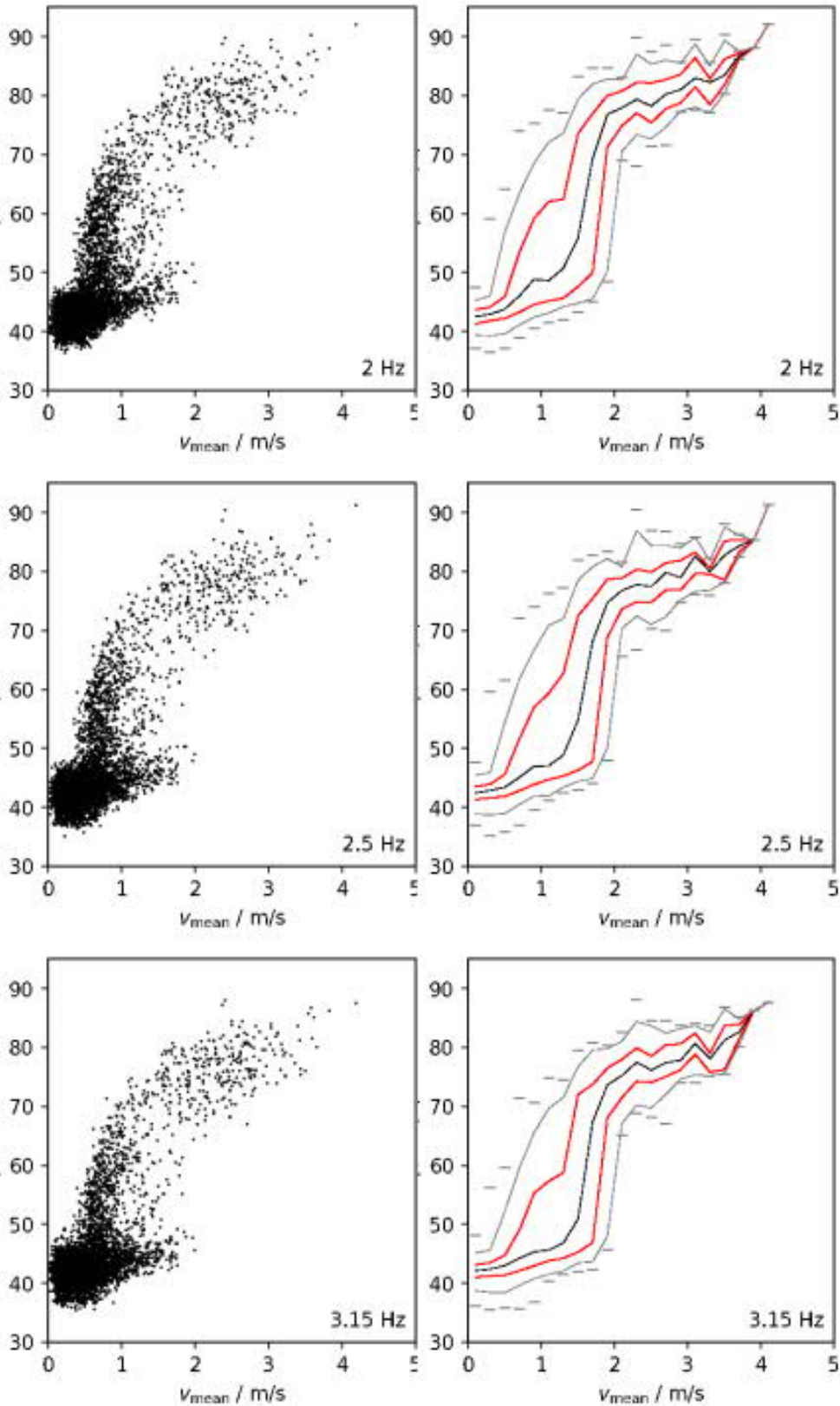
Pegelzeitverläufe L_{Aeq} , L_Z (0,5-16Hz) und Wetterdaten:



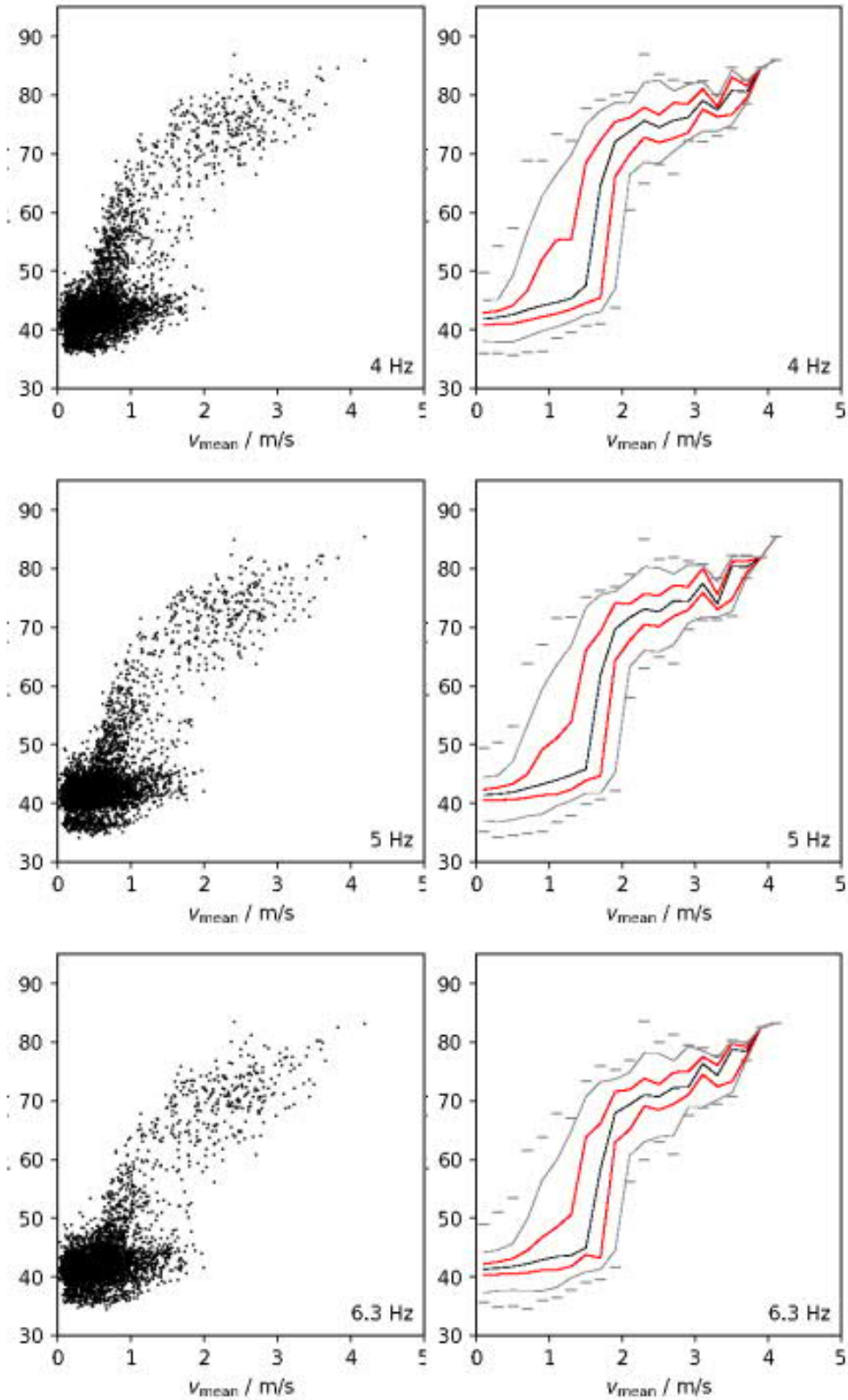
L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot und Quantile Messung mit Sekundärschirm: Terzen 1 Hz-1,6 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



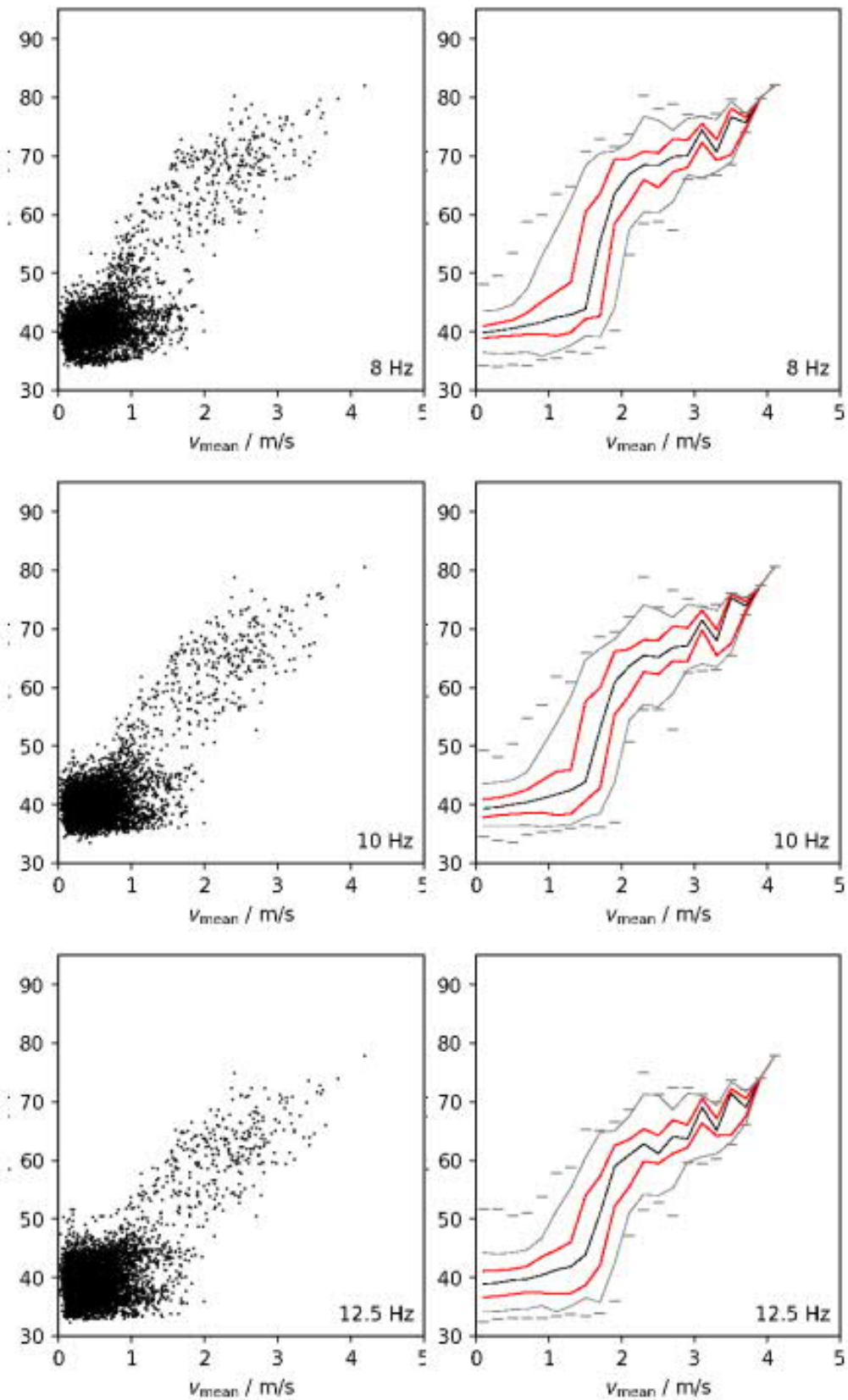
L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot und Quantile Messung mit Sekundärschirm: Terzen 2 Hz-3,15 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



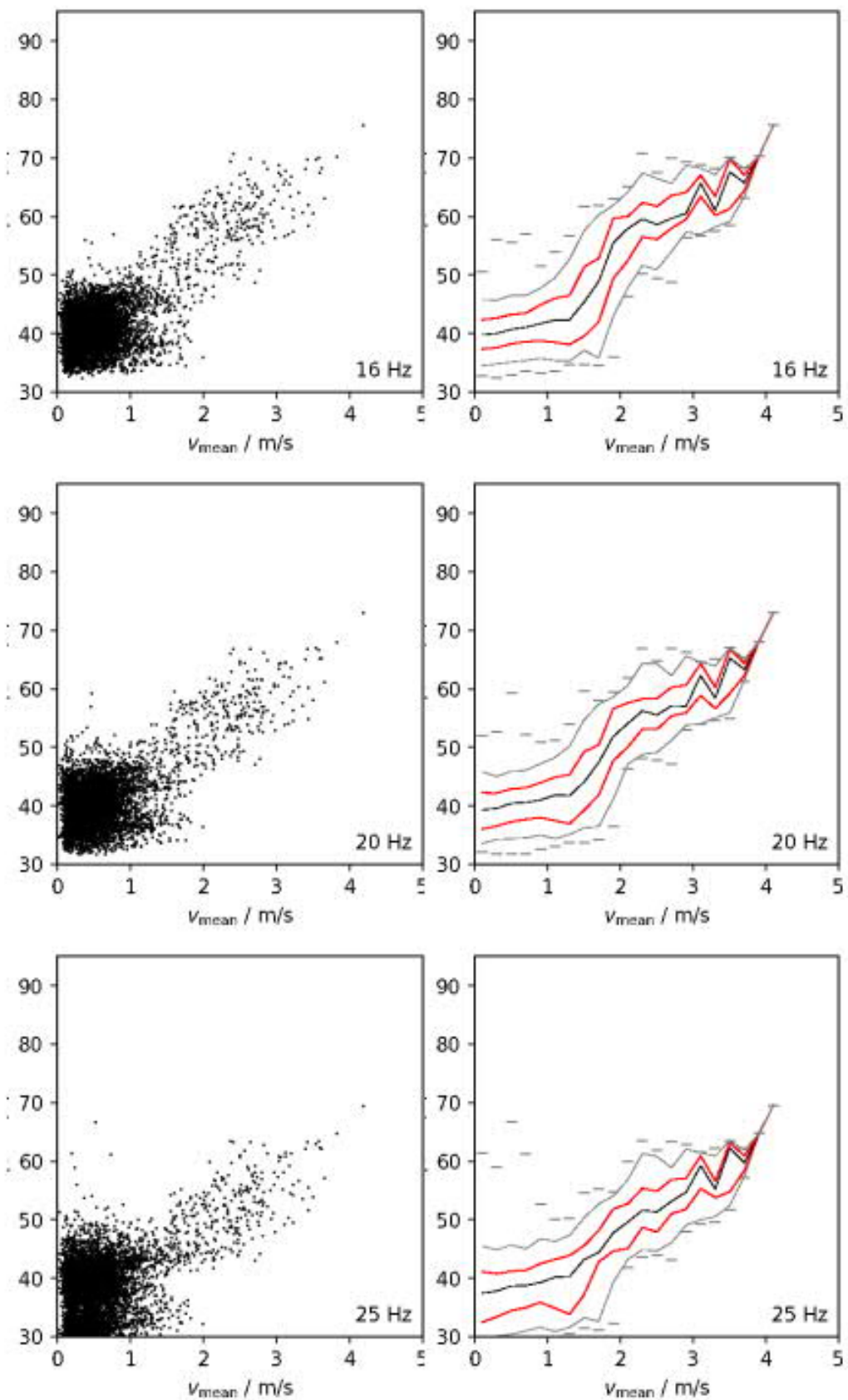
L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot und Quantile Messung mit Sekundärschirm: Terzen 4 Hz-6,3 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot und Quantile Messung mit Sekundärschirm: Terzen 8 Hz-12,5 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



L_{Zeq} in dB(Z) Scatterplot und Quantile Messung mit Sekundärschirm: Terzen 16 Hz-25 Hz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit:



Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

München, 31.01.2023

Ort, Datum

Vorname Nachname