

Masterarbeit

zum Thema

Lärmmanagement für Open Air Live-Veranstaltungen

am Beispiel des Fusion-Festivals in Lärz

Vorgelegt dem Fachbereich VIII für Maschinenbau, Veranstaltungstechnik
und Verfahrenstechnik der Berliner Hochschule für Technik zum Erreichen
des akademischen Grades Master of Engineering

von

Jonathan Schnell
Matrikelnummer: 896299

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau, BHT Berlin
Gutachter: Dipl. Ing. Steffen Körper
Studiengang: Veranstaltungstechnik und -management Master
Datum: 5. Juni 2022

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Schallausbreitung der Spielstätten des Plan:et C Beta Festivals von 2021 untersucht. Ziel ist es, eine solide Planungsgrundlage für die Positionierung und Bestückung der Spielstätten für die kommenden Fusion Festivals bereitzustellen. Es wird allgemeines Wissen zur Schallerzeugung und -ausbreitung sowie auf das Gelände des Kulturkosmos bezogene Erkenntnisse dargestellt. Relevante Normen, Richtlinien und Verordnungen werden erläutert. Der Prozess des Erstellens und der Validierung der Schallausbreitungssimulation mit SoundPLAN wird gezeigt. Die Messstationen für Schallpegel sowie für meteorologische Daten werden erläutert. Wo relevant wird auf Schwachstellen und mögliche Fehler in Messwerten und Simulation eingegangen. Da dieses Projekt mit der Abgabe dieser Arbeit nicht beendet ist, wird ein Ausblick auf nächste Schritte gegeben.

Abstract

In this thesis, the sound propagation of the 2021 Plan:et C Beta Festival is investigated. The goal is to provide a solid planning basis for the alignment and choice of sound system for the venues for the upcoming Fusion Festivals. General knowledge on sound generation and propagation as well as findings related to the Kulturkosmos site are presented. Relevant standards, guidelines and regulations are explained. The process of creating and validating the sound propagation simulation with SoundPLAN is shown. The measuring stations for sound levels as well as for meteorological data are explained. Where relevant, weak points and possible errors in measured values and simulation are discussed. Since this project is not finished with the submission of this thesis, an outlook on next steps is given.

Danksagungen

Diese Abschlussarbeit ist durch die Unterstützung und den Rat vieler Personen entstanden bei denen ich mich herzlich bedanken möchte. Ein großer Dank gilt Professor Dr. Alexander Lindau für die Betreuung dieser Arbeit. Die Verbindung fachlicher Kompetenz und Hilfsbereitschaft bei gleichzeitig großer Flexibilität legte die solide Basis dieser Arbeit. Ebenso danke ich Steffen Körper welcher als Gutachter in vielen Emails, Zoomcalls und Telefonaten seine Unterstützung bereitstellte. Daniel Belcher von D&B Audiotechnik danke ich für viele Telefonate und Zoomcalls in welchen er mir sein Wissen weitergab und mich auf wichtige Details sowohl in der praktischen Durchführung als auch in der Auswertung von Messwerten aufmerksam machte. Dem Verein Kulturkosmos e.V. und Eule als Vorstand möchte ich danken, das Experiment dieser Abschlussarbeit eingegangen zu sein und für die viele Unterstützung in allen Bereichen. Julian Kretschel möchte ich im Besonderen dafür danken, dass er mit diplomatischem Geschick diese Arbeit ermöglicht hat. Durch seine Leidenschaft zur ständigen Verbesserung der Tontechnik auf dem Fusion Festival konnte dieses Projekt entstehen. Dem Akustikbüro Dahms danke ich für die fachliche Unterstützung und der Bereitstellung der Messdaten der stationären Messpunkte in den umliegenden Gemeinden. Nille, Robert, Simon, Dirk und Elijah möchte ich für die tatkräftige Unterstützung vor und während der Festivals und die dadurch entstandene Freundschaft danken. Bine, Steffen und Daniel danke ich für das ausführliche und aufmerksame Korrekturlesen. Dem Unternehmen SoundPLAN GmbH möchte ich für die Bereitstellung der relevanten Software danken.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Ich habe alle Stellen, die ich aus den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommen habe, als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Jonathan Schnell, Berlin, den 5. Juni 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretischer Teil	4
2.1	Richtlinien, Verordnungen und Normen	4
2.1.1	Schutz der Anwohner:innen	4
2.1.2	Schutz der Besucher:innen	6
2.1.3	Schutz der Beschäftigten	7
2.2	Grundlagen des Schallfeldes	8
2.2.1	Addition von Schallpegeln	8
2.2.2	Addition kohärenter Schallquellen	9
2.2.3	Schallausbreitung im Freien nach DIN ISO 9613-2	10
2.2.4	NORD2000	15
2.3	Beschallungstechnik	16
2.3.1	Punktschallquellen	17
2.3.2	Linearrays	17
2.3.3	Tieffrequente Schallquellen	19
2.3.4	Hornlautsprecher	22
3	Geländemodell und Simulationen	25
3.1	Die Fusion und Plan:et C im Jahr 2021	25
3.2	Simulationssoftware	26
3.3	Erstellung des Geländemodells	27
3.4	Modellierung der Spielstätten	31
3.4.1	Seebühne	32
3.4.2	Turmbühne	33
3.4.3	Haupttresen	36
3.4.4	Dubstation	36
3.4.5	Luftschloss	37
3.5	Vergleich der DIN 9613-2 und NORD2000	38

4	Messungen von Schallpegeln und Wetterdaten	41
4.1	Messstationen	41
4.2	Schallpegelmesscrew	43
4.3	Wetterdaten	45
4.4	Frequenzspektren der Spielstätten	47
4.5	Richtwirkung der Turmbühne	49
5	Bewertung der Simulation anhand der Messwerte	51
5.1	Samstag 28.08.2021 von 03:00-04:00 Uhr	52
5.2	Samstag 28.08.2021 von 06:00-07:00 Uhr	54
5.3	Sonntag 29.08.2021 von 03:00-04:00 Uhr	56
5.4	Sonntag 29.08.2021 von 13:00-14:00 Uhr	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	61
A	Anhang	65

Abbildungsverzeichnis

1.1	Musikfestivals und -festspiele in Deutschland 2015 nach Besuchergröße in Prozent (n=554)	1
1.2	Umsätze im Markt für Livemusik in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2024	2
2.1	Schalldosis in Prozent der maximalen empfohlenen wöchentlichen Schallexposition	7
2.2	Komplexe Addition gegenüber energetischer Addition kohärenter Schallquellen	10
2.3	Absorptionskoeffizient Alpha pro Oktavband	12
2.4	Quell- Mittel- und Empfängerbereich zur Bestimmung der Bodendämpfung	13
2.5	Oktavabhängige Berechnung der Bodendämpfung	13
2.6	Draufsicht zweier Schallschirme zwischen Quelle S und Empfänger R	14
2.7	Relevante Länge zur Berechnung der Dämpfung in Waldgebieten	15
2.8	Oktavbandabhängige Dämpfung durch Bewaldung	15
2.9	Unterschiedliche Flächenverhältnisse bei Kugelwellen und Zylinderwellen	18
2.10	Wechselwirkung zwischen gekrümmten und ebenen Wellenfronten bei der Ausbildung einer Zylinderwelle	19
2.11	Unterschiedliche Gehäusearten für Basslautsprecher	20
2.12	Omnidirektionaler Tieftonlautsprecher B6 von D&B Audiotechnik	21
2.13	Polardiagramm für drei B6 von D&B in CSA Anordnung . . .	22
2.14	Innenansicht eines horngeladenen Subwoofers mit gefaltetem Horn	23
2.15	Gefaltetes Horn für den Mitten- und Hochtonbereich	24
3.1	Geländeplan Plan:et C mit rot hervorgehobenen Spielstätten .	26
3.2	Vogelperspektive des Kulturkosmos-Geländes aus Google Earth mit eingezeichneten Gebietsgrenzen	27
3.3	Digitales Geländemodell aus Soundplan mit Höhenlinien . . .	28

3.4	Relevante Immissionsorte um das Gelände des Kulturkosmos	29
3.5	3D Ansicht des simulierten Geländes inklusive der umliegenden Gemeinden	29
3.6	Lageplan des Festivalgeländes mit allen Dämpfungsbereichen und Gebäuden	30
3.7	3D Ansicht des Fusiongeländes in Soundplan mit Dämpfungsbereichen und Gebäuden ohne Spielstätten	30
3.8	Seebühne auf dem Plan:et C-Festival	32
3.9	Seebühnensimulation in ArrayCalc	33
3.10	Turmbühne von der Seite	34
3.11	Turmbühnensimulation in ArrayCalc	35
3.12	Polardiagramm des substituierten Bassarrays der Turmbühne	36
3.13	Anlage der Dubstation auf Plan:et C Gamma	37
3.14	Skizze der Spielstätte Luftschloss	38
3.15	Differenz der mit NORD2000 und DIN 9613-2 berechneten Summenpegel an fiktiven Immissionsorten zum Vergleich beider Berechnungsvorschriften	39
3.16	Differenz der mit NORD2000 und DIN 9613-2 berechneten Summenpegel an den relevanten Immissionsorten um das Festivalgelände	40
4.1	Messstation an stationärer Position in Retzow	42
4.2	A und C bewerteter energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel sowie deren Differenz in Lärz Sonntag 29.08.2021	43
4.3	Mobile Messpunkte der Schallpegelmesscrew	44
4.4	Temperatur und relative Luftfeuchte 28.08.21	45
4.5	Windrichtungen im Zeitraum der Plan:et C Beta	46
4.6	Windgeschwindigkeit auf dem Plan:et C Beta Festival	47
4.7	Frequenzspektrum während Auftritt "Carbon" am 29.08.21 auf der Turmbühne	48
4.8	Emissionsspektren der Turmbühne und der Seebühne im Vergleich zu dem Emissionsspektrum "elektronische Musik" in Soundplan	49
4.9	Aufgezeichnete Amplituden von drei Frequenzbereichen im Halbkreis um die Turmbühne im Livebetrieb	50
5.1	Rasterlärnkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Samstag 28.08.2021 03:00-04:00 Uhr	53

5.2	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach NORD2000 von Samstag 28.08.2021 03:00-04:00 Uhr	54
5.3	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Samstag 28.08.2021 06:00-07:00 Uhr	55
5.4	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach NORD2000 von Samstag 28.08.2021 06:00-07:00 Uhr	56
5.5	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Sonntag 29.08.2021 03:00-04:00 Uhr	57
5.6	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach NORD2000 von Sonntag 29.08.2021 03:00-04:00 Uhr	58
5.7	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Sonntag 29.08.2021 13:00-14:00 Uhr	59
5.8	Rasterlärmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach NORD2000 von Sonntag 29.08.2021 13:00-14:00 Uhr	60
A.1	Simulation der Seebühne in Soundvision.	65
A.2	Geländeplan des Plan:et C Festivals	66
A.3	Seitenansicht des Luftschlosses.	67
A.4	Timetable des Plan:et C Beta 1. Teil	68
A.5	Timetable des Plan:et C Beta 2. Teil	69

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
K_R	Korrekturpegel erhöhter Störwirkung	dB
K_I	Pegelschlag bei impulshaltigen Geräuschen	dB
K_T	Pegelschlag bei tonhaltigen Geräuschen	dB
L	Schalldruckpegel	dB
L_A	A-bewerteter Schalldruckpegel	dB(A)
L_{Aeq}	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel	dB(A)
L_{AFTeq}	Wirkpegel nach Taktmaximalverfahren	dB(A)
L_{Ar} / L_r	A bewerteter Beurteilungspegel	dB(A)
T_r	Beurteilungszeit für den Beurteilungspegel	h
L_W	Oktavband Schalleistungspegel	dB
L_{CPeak}	C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel	dB(C)
D_C	Richtwirkungskorrektur	dB
A_{ges}	Gesamte Oktavbanddämpfung	dB
A_{div}	Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung	dB
A_{atm}	Dämpfung aufgrund von Luftabsorption	dB
A_{gr}	Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts	dB
A_{bar}	Dämpfung aufgrund von Abschirmung	dB
A_{misc}	Dämpfung aufgrund anderer Effekte	dB
$L_{fT}(DW)$	Oktavband-Dauerschalldruckpegel bei Mitwind	dB
h_s	Höhe der Schallquelle	m
A_s	Bodendämpfung im Quellbereich	dB
h_r	Höhe des Empfängers	m
A_r	Bodendämpfung im Empfängerbereich	dB
A_m	Bodendämpfung im Mittelbereich	dB
d_p	Projizierter Abstand zwischen Quelle und Empfänger	m
G	Bodenfaktor zur Berechnung der Bodendämpfung	dimlos
λ	Wellenlänge	m
l_1 und l_r	Abstand eines Schallschirms zum Ausbreitungsweg	m
A_{fol}	Dämpfung aufgrund von dichtem Bewuchs	dB

Symbol	Bedeutung	Einheit
$f_{m_{\text{okt}}}$	Oktavbandmittenfrequenz	Hz
d_f	Länge zur Berechnung der Dämpfung durch Bewaldung	m
O_{Kugel}	Kugeloberfläche	m^2
M_{Zyl}	Zylinder-Mantelfläche	m^2

1. Einleitung

Nach Schätzung des statistischen Bundesamtes besuchten 2015 mehr als 38 Millionen Personen in Deutschland Musikfestivals und -festspiele [8, S. 28]. Die Mehrheit dieser Events, etwa 60%, fanden dabei auf öffentlichen Plätzen, in Parks und auf freiem Feld statt [8, S. 35]. Das Lärmmanagement ist dabei heutzutage kaum noch wegzudenken und spielt bereits im Genehmigungsprozess eine entscheidende Rolle. Abbildung 1.1 zeigt die prozentuale Größenverteilung von 554 befragten Musikveranstaltungen. Befragt wurden die bedeutendsten Musikfestivals und -festspiele Deutschlands mit einer Besucherzahl von ≥ 1000 Personen [8, S. 9]. Mit steigender Besucherzahl steigen in der Regel auch die Beschallungsleistung der Anlagen und die Größe des bespielten Geländes. Um Anwohner vor störenden Geräuschen zu bewahren, Mitarbeitende und Besucher nicht zu gefährden und gleichzeitig ein bestmögliches Klangerlebnis zu gewährleisten, sind entsprechende Schallausbreitungssimulationen ein bedeutsamer Faktor in der Planung.

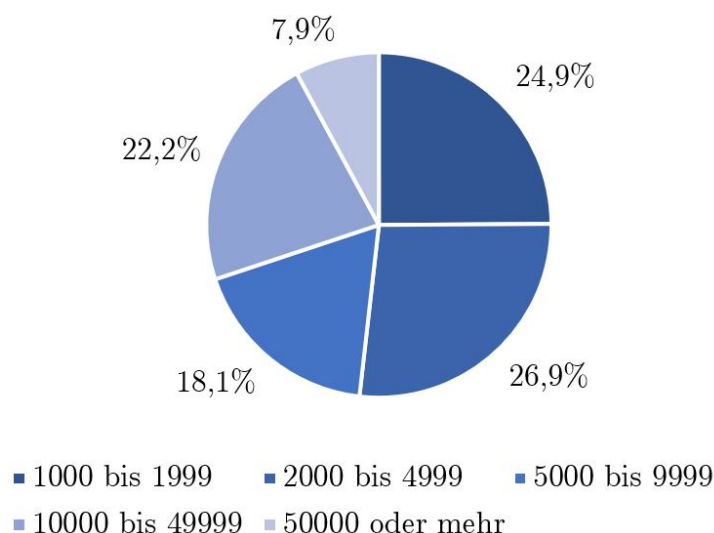


Abbildung 1.1: Musikfestivals und -festspiele in Deutschland 2015 nach Besuchergröße in Prozent (n=554) [8, S. 18]

Die PricewaterhouseCoopers GmbH (PwC), eine deutsche Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, veröffentlicht jedes Jahr im Oktober einen Bericht über die Entwicklung der deutschen Unterhaltungsbranche. Abbildung 1.2 zeigt die Umsätze der Livemusik von 2015 bis 2024. Für 2020 wurde ein Rückgang von 65% geschätzt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass bis 2022 wieder das Niveau von 2019 erreicht wird [18, S. 70][22, S. 18]. Der Sektor der Livemusik machte von 2015 bis 2019 etwa die Hälfte des gesamten Umsatzes der deutschen Musikbranche aus [18, S. 69]. Demnach hängen viele Jobs daran, dass die Livemusikbranche so bald wie möglich wieder auf ihr volles Potenzial anwächst.

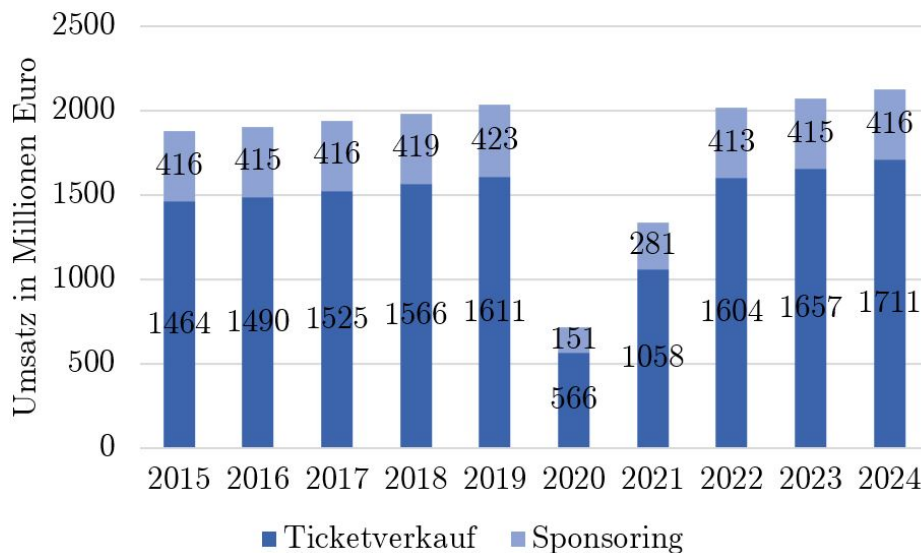


Abbildung 1.2: Umsätze im Markt für Livemusik in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2024 [18, S. 70] [22, S. 18]

Darüber hinaus gehen Besucher und Besucherinnen nicht nur aus Spaß auf Musikfestivals. Bei einer Umfrage der Festival-Marketing Agentur Festival Fire, gaben von 1358 Befragten, 70% an, aufgrund des "Ausgleichs" auf Festivals zu gehen [9, S. 14]. Die Coronapandemie zeigt, welchen bedeutsamen Einfluss die ganze Kulturbranche, zu der auch Musikfestivals zählen, auf die Gesellschaft hat. Im Rahmen des Genehmigungsprozesses der Fusion 2021 beschäftigte sich die Veranstalterin, der Kulturkosmos Müritz e.V. (KuKo) mit der Frage, warum Festivals, im Besonderen die Fusion, eine gesellschaftliche Relevanz haben. So heißt es auf ihrer Homepage in Auseinandersetzung mit der Sinnhaftigkeit der Coronamaßnahmen: "Der Gedanke, dass Kultur, soziale Interaktion oder gar Tanz grundrechtlich geschützt und wichtig für ein erfülltes und glückliches Leben sind, wird als verantwortungslos abgetan." [13]

Das spiegelt die Bedeutsamkeit von Liveveranstaltungen wider. Diese Arbeit soll dazu dienen, einen Teil des Planungsprozesses von Musikveranstaltungen zu unterstützen und somit ein schnelles Wiederaufnehmen dieser zu ermöglichen. Die Gäste auf den Floors sollen ein gutes Klangerlebnis haben und die Nachbarn sollen so wenig wie möglich gestört werden. Darüber hinaus sollen Grundlagen der Schallpegelmessung verständlich dargestellt werden, um Interessierte darin zu schulen und zu mehr Fachkompetenz beizutragen.

2. Theoretischer Teil

2.1 Richtlinien, Verordnungen und Normen

Die Begrenzung des Schallpegels soll drei verschiedene Personengruppen vor negativen Einflüssen schützen. Die Anwohner:innen, die Besucher:innen und die Beschäftigten. Die Anwohner:innen werden unter anderem durch die TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm [20]) vor schädlichen Umwelteinflüssen geschützt. Im Bereich des Freizeitlärms (darunter fällt ein Festival) werden die umliegenden Gemeinden durch die Freizeitlärm-Richtlinien der Länder geschützt. Im Falle der Fusion und der Plan:et C ist die Freizeitlärm-Richtlinie des Landes Mecklenburg-Vorpommern [19] relevant. Die Besucher:innen werden durch die DIN 15905-5 mit dem Titel "Veranstaltungstechnik – Tontechnik – Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemissionen elektroakustischer Beschallungstechnik" geschützt. Die Lärm-Vibrations- Arbeitsschutzverordnung [15] regelt den Schutz der Beschäftigten am Arbeitsplatz.

2.1.1 Schutz der Anwohner:innen

Die "Richtlinie zur Beurteilung der von Freizeitanlagen verursachten Geräusche in Mecklenburg-Vorpommern" (im Nachfolgenden Freizeitlärm-Richtlinie MV genannt) [17] leitet sich, wie die anderen länderspezifischen Freizeitlärm-Richtlinien, aus der Freizeitlärm- Richtlinie der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) [4] ab. Die Freizeitlärm-Richtlinie MV definiert maximale Beurteilungspegel für verschiedene Baugebiete, die ihrerseits in der Baunutzungsverordnung definiert sind. Für jedes Baugebiet wird unter Werktagen außerhalb der Ruhezeit, Werktagen innerhalb der Ruhezeit sowie Sonn- und Feiertagen und nachts unterschieden. Ruhezeiten sind an Werktagen von 06:00 bis 08:00 Uhr und von 20:00 bis 22:00 Uhr. Ruhezeiten an Sonn- und Feiertagen sind von 07:00 bis 09:00 Uhr, von 13:00 bis 15:00 Uhr und von 20:00 bis 22:00 Uhr [17, S. 4]. In den Ruhezeiten beträgt der Beurteilungszeitraum zwei Stunden und nachts ist der Beurteilungszeitraum

festgelegt als die ungünstigste volle Stunde. Der maximale Beurteilungspegel für Mecklenburg-Vorpommern für die verschiedenen Baugebiete und Zeiten ist nachfolgend aufgeführt [17, S. 5].

Industriegebiete	werktags tagsüber	70 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	70 dB(A)
	nachts	70 dB(A)
Gewerbegebiete	werktags tagsüber	65 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	60 dB(A)
	nachts	50 dB(A)
Kerngebiete Dorfgebiete Mischgebiete	werktags tagsüber	60 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	55 dB(A)
	nachts	45 dB(A)
Allgemeine Wohngebiete Kleinsiedlungsgebiete	werktags tagsüber	55 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	50 dB(A)
	nachts	40 dB(A)
reine Wohngebiete	werktags tagsüber	50 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	45 dB(A)
	nachts	35 dB(A)
Kurgebiete für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	werktags tagsüber	45 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	45 dB(A)
	nachts	35 dB(A)

Darüber hinaus können für seltene Ereignisse höhere Grenzwerte beantragt werden [17, S. 5 f.]. Die Fusion und auch die Plan:et C wurden in den letzten Jahren als ein solches seltenes Ereignis anerkannt.

seltene Ereignisse	werktags tagsüber	70 dB(A)
	werktags Ruhezeit und an Sonn- und Feiertagen	65 dB(A)
	nachts	55 dB(A)

Kontrolliert werden diese Grenzwerte mit stationären Messpunkten an den in der Genehmigung festgelegten Immissionsorten. Die fünf für die Fusion festgelegten Immissionsorte können in Abbildung 3.4 gesehen werden.

2.1.2 Schutz der Besucher:innen

Die DIN 15905-5 gibt Maßnahmen vor, die der Gehörgefährdung des anwesenden Publikums entgegenwirken sollen. Das Risiko für Gehörschäden hängt von der Lautstärke und der Dauer der Einwirkung ab. So führen gemäß DIN 15905-5 eine Exposition von 40 Stunden pro Woche mit 85 dB(A) zu der gleichen Gehörgefährdung wie 4 Stunden pro Woche mit 95 dB(A) [6, S. 13]. Der Richtwert für den A-bewerteten Beurteilungspegel beträgt 99 dB(A). Er wird über die Beurteilungszeit $T_r=30$ Minuten gebildet. Er soll an keinem für das Publikum zugänglichen Ort überschritten werden [6, S. 7]. Da es schwer umzusetzen sein kann, am lautesten Punkt im Publikumsbereich zu messen, kann ein Ersatzmessort herangezogen werden. Die Pegeldifferenzen zwischen lautestem Punkt und Ersatzmessort müssen durch einen Korrekturwert ausgeglichen werden. Es werden Korrekturwerte für den A-bewerteten Dauerschalldruckpegel L_{Aeq} und den C-bewerteten Spitzenschalldruckpegel L_{CPeak} benötigt. Die Korrekturwerte werden idealerweise im Vorfeld bei gleicher Beschallungsanlage an lautestem Punkt und Ersatzmessort bestimmt. Als Signal kann rosa Rauschen verwendet werden; die Beurteilungszeit für L_{Aeq} beträgt mindestens fünf Sekunden. Unabhängig vom Dauerschalldruckpegel können bereits kurze impulsartige Schalldruckspitzen zu sofortiger Gehörschädigung führen. Ist mit hohen Dauerschalldruckpegeln oder hohen Spitzenwerten des Schalldrucks zu rechnen, muss zur Wahrung der Verkehrssicherungspflicht das Publikum darüber informiert werden. Der Nahbereich der Lautsprecher sollte durch Absperrungen gesichert werden. Wird ein Beurteilungspegel von mehr als 85 dB(A) erwartet, sollen gemäß DIN 15905-5 protokollierte Messungen vorgenommen werden. Ab einem Beurteilungspegel von 95 dB(A) soll dem Publikum Gehörschutz angeboten und dessen Verwendung empfohlen werden. Abbildung 2.1 zeigt die entsprechende Schalldosis bei verschiedenen Einwirkzeiten im Bezug auf die wöchentlich zulässige Schalleexposition von 1820 Pa²s (dies entspricht 40 Stunden bei 85 dB(A)). Zu sehen ist, dass der maximal zulässige Dauerschalldruckpegel steigt, je kürzer die Einwirkzeit ist. Werte des Dauerschalldruckpegels über 99 dB(A) sollten nicht überschritten werden.

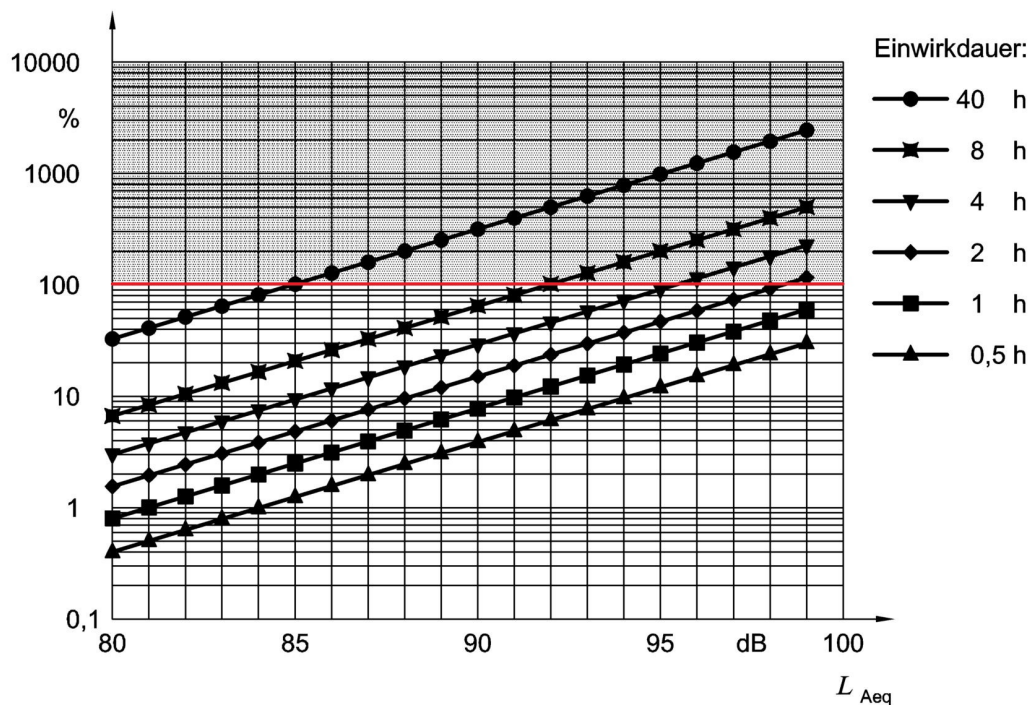


Abbildung 2.1: Schalldosis in Prozent der maximalen empfohlenen wöchentlichen Schallexposition [6, S. 14]

2.1.3 Schutz der Beschäftigten

Beschäftigte bilden die dritte schützenswerte Gruppe. Schallschutz am Arbeitsplatz wird in der "Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch Lärm und Vibrationen (kurz: LärmVibrationsArbSchV)" erläutert. Ähnlich wie bei der Freizeitlärm-Richtlinie und der DIN 15905-5 sollten Grenzwerte eingehalten und dokumentiert werden. Die Dokumentation über ermittelte Messergebnisse muss gemäß der LärmVibrationsArbSchV mindestens 30 Jahre zur Einsichtnahme bereitstehen [15, S. 4]. Die Messwerte müssen von einer fachkundigen Person erfasst werden. Die LärmVibrationsArbSchV definiert untere Grenzwerte von 80 dB(A) über den Zeitraum von 8 Stunden bzw. C-bewertete Spitzenwerte von 135 dB(C) und obere Auslösewerte von 85 dB(A) über den Zeitraum von 8 Stunden bzw. C-bewertete Spitzenwerte von 137 dB(C). Bei der Verringerung der Schallexposition ist folgende Maßnahmenhierarchie zu beachten:

- 1. Verminderung der Schallemission am Entstehungsort.
- 2. Verminderung der Schallexposition durch Gehörschutz.

Werden die oberen Auslöswerte überschritten, ist dieser Bereich als Lärm-bereich zu kennzeichnen und falls möglich abzugrenzen. Beschäftigte sollen sich dort nur aufhalten, wenn dies erforderlich ist und sie sollen persönliche Schutzausrüstung tragen. Werden die unteren Auslöswerte überschritten, muss der Arbeitgeber geeigneten Gehörschutz zur Verfügung stellen. Ebenso müssen betroffene Beschäftigte eine Unterweisung erhalten. Diese muss in regelmäßigen Abständen wiederholt werden. Diese Verordnung findet, aus eigener Erfahrung, in der Praxis eines Veranstaltungstechnikers selten Anwendung.

2.2 Grundlagen des Schallfeldes

2.2.1 Addition von Schallpegeln

Der Schallpegel ist eine logarithmierte Größe, weshalb dieser logarithmisch zu addieren ist. Werden zwei Schallpegel energetisch addiert, muss nach folgender Formel vorgegangen werden.

$$L_{\Sigma} = L_{1+2} = 10 \lg(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}) dB \quad (2.1)$$

L_1 und L_2 sind dabei die zu addierenden Schallpegel in dB [21, S. 111]. Werden beispielsweise zwei Schallpegel mit jeweils 60 dB addiert, so ergibt das:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg(10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{60}{10}}) dB = 63,01 dB \quad (2.2)$$

Die Steigerung des Schallpegels um 3dB ist dabei unabhängig von dem Ausgangswert der beiden gleichlauten Schallquellen. Eine besondere Form der Schallpegeladdition findet statt, wenn beide Schallquellen das gleiche Signal abgeben. Dann wird von kohärenter Addition gesprochen. Diese wird in Kapitel 2.2.2 behandelt. Bei der Addition von unterschiedlich hohen Pegeln kommt es aufgrund der Logarithmierung dazu, dass der höhere Pegel weitaus stärker in die Berechnung eingeht. Werden z.B. zwei Schallpegel addiert mit $L_1 = 50 dB$ und $L_2 = 60 dB$ ergibt das:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg(10^{\frac{50}{10}} + 10^{\frac{60}{10}}) dB = 60,41 dB \quad (2.3)$$

Das bedeutet, dass sobald eine Schallquelle an der Hörerposition deutlich lauter ist als die zweite, nur noch die erste wahrgenommen wird. Im Rahmen von Festivals mit mehreren gleichzeitig spielenden Bühnen wird sich dieser

Effekt zunutze gemacht: Direkt vor der einen Bühne kann die andere wenig bis gar nicht wahrgenommen werden, sofern der Pegelunterschied groß genug ist.

Bei dem Bestimmen von Beurteilungspegeln für den Immissionsschutz gibt es Zuschläge für die Tonhaltigkeit K_T und die Impulshaltigkeit K_I . Dabei ist der Korrekturpegel $K_R = K_T + K_I \leq 6dB(A)$. Diese Zuschläge sind, um den Beurteilungspegel L_R zu erhalten, zu addieren. Die Impulshaltigkeit berechnet sich nach untenstehender Gleichung [4, S. 5], [17, S. 4].

$$K_I = L_{AFTeq} - L_{Aeq} \quad (2.4)$$

Dabei ist L_{AFTeq} der Wirkpegel nach Taktmaximalverfahren und L_{Aeq} der Mittelungspegel über den Beurteilungszeitraum. Wird ein Wirkpegel $L_{AFTeq} = 65dB$ und ein Mittelungspegel von $L_{Aeq} = 60dB$ gemessen, berechnet sich der Impulszuschlag zu

$$K_I = L_{AFTeq} - L_{Aeq} = 65dB - 60dB = 5dB(A). \quad (2.5)$$

Der Korrekturfaktor K_R ist die Summe der Impulshaltigkeit K_I und der Tonhaltigkeit K_T . Die Tonhaltigkeit wird von der Person eingeschätzt, die die Messungen vornimmt. Bei der Berechnung des Korrekturfaktors wird nicht logarithmisch addiert. Der Korrekturfaktor kann 6dB nicht übersteigen [4, S. 6]. So beträgt der Korrekturfaktor K_R bei einer Impulshaltigkeit $K_I = 5dB$ und einer Tonhaltigkeit von $K_T = 3dB$

$$K_R = 5dB(A) + 3dB(A) = 6dB(A) \text{ weil } K_I + K_T \leq 6dB(A) \quad (2.6)$$

2.2.2 Addition kohärenter Schallquellen

Um die Schallausbreitung im Freien vorauszusagen, gibt es verschiedene, meist empirische Ansätze. Diese sind oftmals ausgelegt auf Schallquellen die unabhängig voneinander sind. Wenn zwei Maschinen mit der gleichen Lautstärke arbeiten addiert sich der Schalldruckpegel an einer gleichweit entfernten Hörposition um +3 dB, wie im letzten Kapitel ausgeführt. Anders bei Schallquellen die voneinander abhängige Signale abgeben. Durch die Abhängigkeit können Interferenzeffekte auftreten. Das führt dazu, dass an Orten gleicher Amplitude und Phasenlage der Pegel zu +6 dB addiert wird und an anderen theoretisch zu $-\infty$ dB [5, S. 25]. Abbildung 2.2 zeigt zwei Schallquellen die das gleiche Signal wiedergeben. An drei Positionen wird die Überlagerung der Schallwellen gezeigt. Der Punkt A ist gleichweit entfernt von

beiden Schallquellen. Daher treffen beide Signale phasengleich dort auf und der Schalldruckpegel erhöht sich um 6 dB und nicht nur um 3 dB wie bei einer rein energetischen Addition. Im Punkt B und C treffen die Signale nichtmehr phasengleich aufeinander. Dadurch kommt es ortsabhängig zu positiver und negativer Interferenz. Ein reales Verhalten von Lautsprechersystemen die kohärente Signale wiedergeben kann dadurch simuliert werden. In Kapitel 5 kann dieses Verhalten beispielsweise in Abbildung 5.3 und 5.4 gesehen werden. Klar zu erkennen ist eine Keule des Schallpegels in östliche Richtung sowie eine Einschnidung des Schallpegels orthogonal zu der Ausrichtung der Bühne. Die Ausbildung dieser Keule und der Einschnidung kann durch Interferenzeffekte erklärt werden.

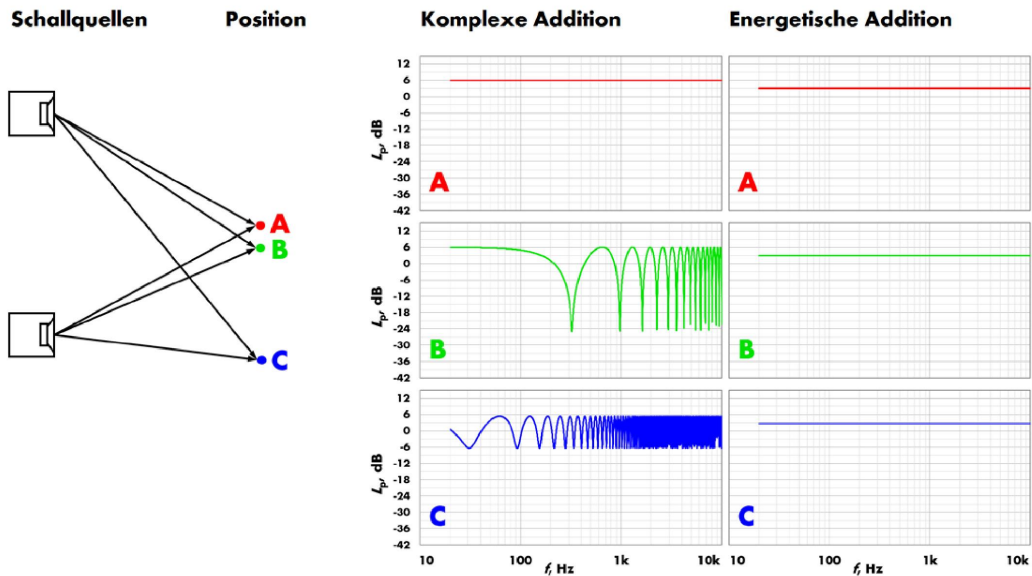


Abbildung 2.2: Komplexe Addition gegenüber energetischer Addition kohärenter Schallquellen. Gezeigt wird der Schalldruckpegel an drei verschiedenen Positionen für Frequenzen von zehn bis 10000 Herz [5, S. 25]

2.2.3 Schallausbreitung im Freien nach DIN ISO 9613-2

Die DIN ISO 9613-2 gibt einen anerkannten Weg vor die Ausbreitung von Schall im freien vorherzusagen. Der äquivalente Oktavband-Dauerschalldruckpegel $L_{fT}(DW)$ wird nach folgender Formel berechnet [7, S. 4]:

$$L_{fT}(DW) = L_W + D_C - A_{ges} \quad (2.7)$$

Dabei ist L_W der Schalleistungspegel des jeweiligen Oktavbandes, D_C ist die Richtwirkungskorrektur und A_{ges} ist die Oktavbanddämpfung.

Das vorliegende Frequenzband wird in acht Teile aufgeteilt, die Oktavbandpegel. Diese haben die Bandmittenfrequenzen 63 Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz und 8 kHz.

D_C , die Richtwirkungskorrektur in Dezibel, gibt an um wieviel ein gerichtetes Signal von einem ungerichteten abweicht. Die Richtwirkungskorrektur einer ungerichteten, ins freie abstrahlenden Punktschallquelle beträgt $D_C=0\text{dB}$.

A_{ges} setzt sich wiederum aus fünf unterschiedlichen Termen zusammen:

$$A_{ges} = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (2.8)$$

- A_{div} die Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung.
- A_{atm} die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption.
- A_{gr} die Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts.
- A_{bar} die Dämpfung aufgrund von Abschirmung.
- A_{misc} die Dämpfung aufgrund verschiedener anderer Effekte.

Die in der DIN 9613-2 dargelegten Verfahren zur Berechnung der Schallausbreitung gehen von Mittwindausrichtungsbedingungen aus. So wird für die Windrichtung immer ein Winkel von $\pm 45^\circ$ zur Geraden, die Schallquelle und Immissionsort miteinander verbindet, angenommen. Die Windgeschwindigkeit wird mit etwa $1\text{-}5\text{m/s}$ angenommen [7, S. 4].

A_{div} wird verwendet, um die geometrische Ausbreitung des Schalls zu berücksichtigen. Dabei wird angenommen, dass sich der Schall ungerichtet kugelförmig ausbreitet. Die folgende Formel wird berechnet um A_{div} in Dezibel anzugeben:

$$A_{div} = (20\lg(d/d_0) + 11)\text{dB} \quad (2.9)$$

Dabei ist d der Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger und d_0 der Bezugsabstand in dem der Schalldruckpegel gemessen wurde. Dieser soll einen Meter betragen.

Die Luftabsorption A_{atm} ist das Produkt der Oktavband abhängigen Absorptionskoeffizienten α (siehe Abb. 2.3) und der Distanz zwischen Schallquelle und Empfänger d .

$$A_{atm} = \alpha d / 1000 \quad (2.10)$$

Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, ist der Luftdämpfungskoeffizient von der Temperatur, der relativen Feuchte sowie der jeweiligen Frequenz abhängig.

Temperatur	Rel. Feuchte	Luftdämpfungskoeffizient α , dB/km							
		Bandmittenfrequenz, Hz							
°C	%	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Abbildung 2.3: Absorptionskoeffizient Alpha pro Oktavband bei verschiedenen Werten von Temperatur und Luftfeuchtigkeit nach DIN 9613-2 [7, S.5]

Die Bodendämpfung A_{gr} ergibt sich hauptsächlich aus dem Bereich nach der Schallquelle und dem Bereich vor dem Empfänger. Dies liegt daran, dass der Schallweg aufgrund des Mitwindes abwärts gekrümmt ist. So kann es passieren, dass sich die Schallausbreitung über Hindernisse beugt [21, S. 324]. Abbildung 2.4 zeigt, dass Quellbereich und Empfängerbereich abhängig von der Höhe der Schallquelle und des Empfängers sind. Die Bodenbeschaffenheit wird durch den Bodenfaktor G dargestellt. G kann Werte von 0 bis 1 annehmen. $G=0$ bei harten Böden wie Straßenpflaster, Wasser, Eis, Beton etc. $G=1$ bei porösen Böden wie Gras, Baumbewuchs und Flächen die für Pflanzenwachstum geeignet sind. Bei Mischböden muss ein der Strecke angemessener Wert zwischen 0 und 1 gefunden werden.

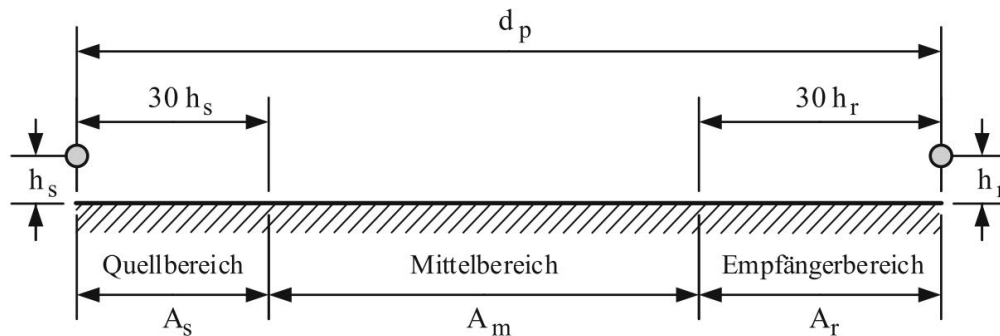


Abbildung 2.4: Quell- Mittel- und Empfängerbereich zur Bestimmung der Bodendämpfung [21, S.324]

Abbildung 2.5 zeigt die oktavabhängige Bodendämpfung in den drei Bereichen der Quelle, des Empfängers und zwischen diesen beiden. Der Term q repräsentiert die Strecke zwischen Quellbereich und Empfängerbereich. Es gilt: $q = 0$, wenn $d_p \leq 30(h_s + h_r)$; $q = 1 - \frac{30(h_s+h_r)}{d_p}$ wenn $d_p > 30(h_s + h_r)$.

Frequenz	A_s oder A_r	A_m	Anmerkungen
63	-1,5	$-3q$	$a'(h) = 1,5 + 3,0e^{-0,12 \cdot (h-5)^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$ $+ 5,7e^{-0,09 \cdot h^2} \left(1 - e^{-2,8 \cdot 10^{-6} \cdot d_p^2}\right)$
125	$-1,5 + G \cdot a'(h)$	$-3q(1 - G_m)$	
250	$-1,5 + G \cdot b'(h)$		$b'(h) = 1,5 + 8,6e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$
500	$-1,5 + G \cdot c'(h)$		
1000	$-1,5 + G \cdot d'(h)$		$c'(h) = 1,5 + 14,0e^{-0,46h^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$ $d'(h) = 1,5 + 5,0e^{-0,9h^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right)$
2000	$-1,5 (1 - G)$		
4000	$-1,5 (1 - G)$		
8000	$-1,5 (1 - G)$		

Abbildung 2.5: Oktavabhängige Berechnung der Bodendämpfung [21, S.325]

A_{bar} wird verwendet um die Auswirkung von Schallschirmen und Hindernissen abzubilden. Zu beachten sind Hindernisse sofern:

- ihre flächenbezogene Masse mindestens 10kg/m^2 beträgt.
- das Hindernis keine großen Risse oder Lücken enthält.
- die horizontale Abmessung des Objekts größer ist als die Wellenlänge λ der jeweiligen Oktavbandmittenfrequenz.

Um demnach auch für das tiefste Oktavband mit der Mittenfrequenz von 63 Hz als abschirmend zu gelten, muss das Hindernis nach Gleichung (2.11) mindestens 5,44 Meter lang sein. Hierbei gilt die, auf die Gerade zwischen Quelle und Empfänger rechtwinklig projizierte Länge in Abbildung 2.6 dargestellt durch die Längen l_l und l_r .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343m/s}{63\frac{1}{s}} = 5,4m \quad (2.11)$$

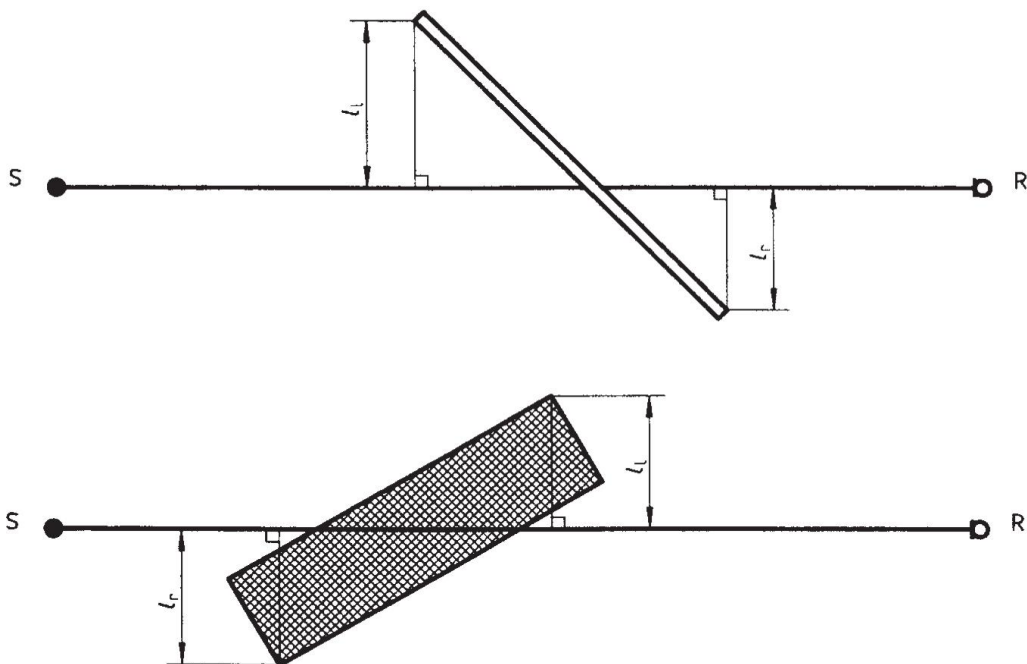


Abbildung 2.6: Draufsicht zweier Schallschirme zwischen Quelle S und Empfänger R [7, S.8]

Da die Dämpfung durch Abschirmung viele Spezialfälle hat wird hier von einer genaueren Beschreibung abgesehen. Alle relevanten Informationen finden sich in der DIN ISO 9613-2 von Seite sieben bis elf [7] oder in ausführlicherer Weise in Sinambari, Sentpali (2020) Ingenieurakustik (6. Auflage) Seite 328 bis 338 [21].

A_{misc} betrachtet weitere Dämpfung durch dichten Bewuchs, Industriegelände und Bebauung. Da auf dem Gelände des Kulturkosmos kein Industriegelände vorhanden ist, wird hier auf dieses nicht eingegangen. Die Dämpfung durch Bebauung ist abhängig von der Bebauungsdichte, welche definiert ist als die Gesamtgrundfläche der Häuser bezogen auf die Baugrundfläche [21, S. 328].

Auch diese ist auf dem Gelände des Kulturkosmos sehr gering. Daher wird nur auf die Dämpfung durch dichten Bewuchs näher eingegangen.

Die Pegelminderung durch dichten Bewuchs, A_{fol} tritt nur dann auf, wenn der Bewuchs so dicht ist, dass die Sicht entlang des Ausbreitungsweges blockiert ist. Abbildung 2.7 zeigt die Beugung des Schalls um ein Waldgebiet. Daher ist nur der Bereich nach der Quelle d_1 und vor dem Empfänger d_2 relevant für die Dämpfung durch Waldgebiete.

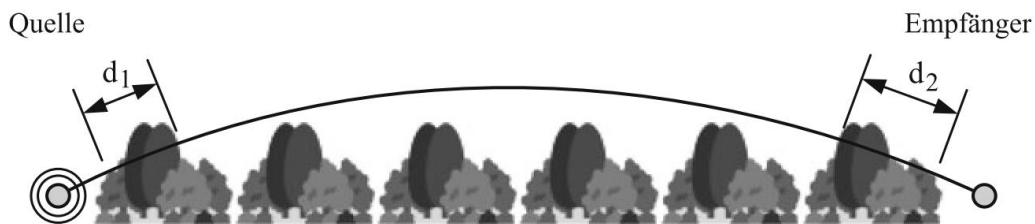


Abbildung 2.7: Relevante Länge zur Berechnung der Dämpfung in Waldgebieten [21, S. 326]

d_1 und d_2 können als Strahlen angenommen werden die einen Ausbreitungswinkel von 15° zum Boden haben. Abbildung 2.8 zeigt die Oktavband abhängige Dämpfung von Waldgebieten. Relevant ist außer der Frequenz die Länge d_f . Sie ist die Summe aus d_1 und d_2 .

f_{mOkt}	Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A_{fol} ($10 \leq d_f \leq 20$)	dB	0	0	1	1	1	1	2	3
A_{fol} ($20 \leq d_f \leq 200$)	dB/m	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

Abbildung 2.8: Oktavbandabhängige Dämpfung durch Bewaldung [21, S. 327]

Die Berechnung nach DIN ISO 9613-2 soll eine Genauigkeit von ± 3 dB bei einer Distanz von Quelle zum Empfänger bis 100 Metern aufweisen, sofern sich Quelle und Empfänger in weniger als fünf Metern Höhe befinden. Gleiches gilt für Entfernungen bis zu einem Kilometer [7, S. 12].

2.2.4 NORD2000

NORD2000 ist eine fortschrittliche Berechnungsvorschrift um die Schallausbreitung im Freien vorauszusagen. Sie wurde in Zusammenarbeit der Länder

Schweden, Dänemark, Norwegen, Island und Finnland angefertigt [12, S. 10]. Anders als in der DIN ISO 9613-2 geht die NORD2000 nicht direkt von günstigen Wetterbedingungen für die Schallausbreitung aus, sondern bietet die Möglichkeit Wetterdaten einzupflegen. In manchen Teilen baut die NORD2000 auf der DIN ISO 9613-2 auf. Die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption in der NORD2000 basiert beispielsweise auf den Gleichungen der DIN ISO 9613-2 [12, S. 12]. Parameter die in der Berechnung mit NORD2000 berücksichtigt werden sind:

- die Topografie des Geländes über das die Schallausbreitung berechnet werden soll
- die Höhe der Quelle und des jeweiligen Immissionsortes
- die aerodynamische Rauigkeitslänge (zur Berechnung des Windgeschwindigkeitsprofils)
- die durchschnittliche Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit
- die Temperatur entlang des Ausbreitungsweges am Boden
- die Standardabweichung des Temperaturgradienten
- Turbulenzstärkenparameter von Wind und Temperatur
- relative Luftfeuchtigkeit

NORD2000 wurde validiert durch Messungen bis 200 Metern bei welchen eine Genauigkeit von ± 2 dB(A) erreicht wurde [12, S. 11].

2.3 Beschallungstechnik

Anlagenhersteller sehen sich immer neuen Herausforderungen entgegen und finden neue Lösungen diesen Anforderungen gerecht zu werden. Es werden mehr Veranstaltungen, aufgrund der guten Verkehrsanbindung, in stadtnähe veranstaltet [5, S. 22]. Die Besucher wollen einen möglichst guten Klang vor der Bühne haben, die Anwohner aber empfinden diesen nicht selten als störend. Deshalb haben Anlagenhersteller versucht den Schall so gut es geht auf den Besucherbereich zu fokussieren und dort eine homogene Abdeckung zu erreichen. Wo bei kleineren Veranstaltungen oft Punktschallquellen zum Einsatz kommen hat sich auf größeren Produktionen der Einsatz von Line- und Bassarrays etabliert.

2.3.1 Punktschallquellen

Die meisten Lautsprecher machen sich das Prinzip des elektrodynamischen Wandlers zunutze. Dabei schwingt eine mit einer Membran verbundene Schwingspule in einem wechselnden Magnetfeld und erzeugt somit Druckänderungen in der angrenzenden Luftschicht. Die Bewegung der Schwingspule wird durch die Lorentz-Kraft bewirkt [11, S. 424]. Sie wirkt senkrecht zur Ausrichtung des Permanentmagneten im Zentrum des Lautsprechers. Im Gegensatz zu den tiefen Frequenzen (siehe 2.3.3) kann der abgegebene Schall von Mittel- und Hochtönern gut durch ihre Bauform gerichtet werden. Es gibt Punktschallquellen mit engen Abstrahlwinkeln von 10° bis zu 360° bei rundum abstrahlenden Systemen [11, S. 441]. Es können sogar Abstrahlwinkel realisiert werden die in horizontaler Ausrichtung andere Ausmaße haben wie in der Vertikalen. Dabei verhält sich der Schalldruckpegel an einem Empfänger proportional zu dem eingenommenen Raumwinkel des Lautsprechers. Wird ein Hochtöner mit einem Abstrahlwinkel von $30^\circ \times 30^\circ$ mit einem ansonsten baugleichen mit $120^\circ \times 90^\circ$ Abstrahlwinkel verglichen, so ist der Unterschied im Raumwinkel der Faktor zwölf [11, S. 441]. Bei Annahme gleichem Strahlungswiderstandes würde das am Empfänger einen Pegelunterschied von 10,8 dB ausmachen.

2.3.2 Linearrays

Muss eine Fläche über lange Distanzen beschallt werden, werden Systeme mit teilweise engen Abstrahlwinkeln und vielen Einzelquellen benötigt. Eine kontinuierlich steigende Bedeutung haben hierbei Linearrays. Es wird versucht aus der Anordnung mehrerer Punktquellen eine Linienquelle zu erzeugen. Unter anderem kann damit ein Pegelabfall von 3 dB pro Entfernungsverdopplung erreicht werden [11, S. 449]. Bei einer einfachen Punktschallquelle beträgt der Pegelabfall bei Entfernungsverdopplung 6 dB [11, S. 27]. Dies liegt daran, dass sich die Schallwellen einer Punktschallquelle ähnlich einer Kugeloberfläche ausbreiten. Die Kugeloberfläche ist quadratisch abhängig von ihrem Radius (siehe (2.12)). Bei doppeltem Radius steigt die Oberfläche mit dem Faktor vier.

$$O_{Kugel} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (2.12)$$

$$O_{Kugel} = 4 \cdot \pi \cdot 2^2 m^2 = 50,27 m^2 \quad (2.13)$$

$$O_{Kugel} = 4 \cdot \pi \cdot 4^2 m^2 = 201,06 m^2 \quad (2.14)$$

Da die beschallte Fläche mit Entfernungsverdopplung vervierfacht wird, nimmt auch der Schalldruckpegel aufgrund geometrischer Ausbreitung mit diesem

Faktor ab. Da Dezibel, wie in Kapitel 2.2.1 ausgeführt eine logarithmische Größe ist, bedeutet eine Abnahme um das Vierfache eine Pegelveränderung von -6 dB. Mit einem Linearray wird versucht aus der Punktquelle eine Linienquelle zu erzeugen. Die somit erzeugte Wellenfront wird zylinderähnlich. In der Formel der Mantelfläche eines Zylinders (2.15) geht der Radius nicht quadratisch, sondern nur einfach ein. Für die Beispielrechnungen wurde die Höhe des Zylinders als konstant vier Meter angenommen. Die von der Linienquelle beschallte Fläche nimmt bei Entfernungsverdopplung nur mit dem Faktor zwei zu. Daher ist die Schallpegelabnahme in diesem Fall nur 3 dB [11, S. 27].

$$M_{Zyl} = 2\pi \cdot r \cdot h \quad (2.15)$$

$$M_{Zyl} = 2\pi \cdot 2m \cdot 4m = 50,27m^2 \quad (2.16)$$

$$M_{Zyl} = 2\pi \cdot 4m \cdot 4m = 100,53m^2 \quad (2.17)$$

Abbildung 2.9 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Zu sehen sind jeweils eine Punktschallquelle und eine Linienquelle. Die Punktschallquelle strahlt eine Kugeloberfläche ab, bei der die Entfernungsverdopplung zu einer Vierfachung der Fläche A führt. Die Linienquelle strahlt zylinderförmig und daher führt die Entfernungsverdopplung nur zur Verdopplung der Fläche A.

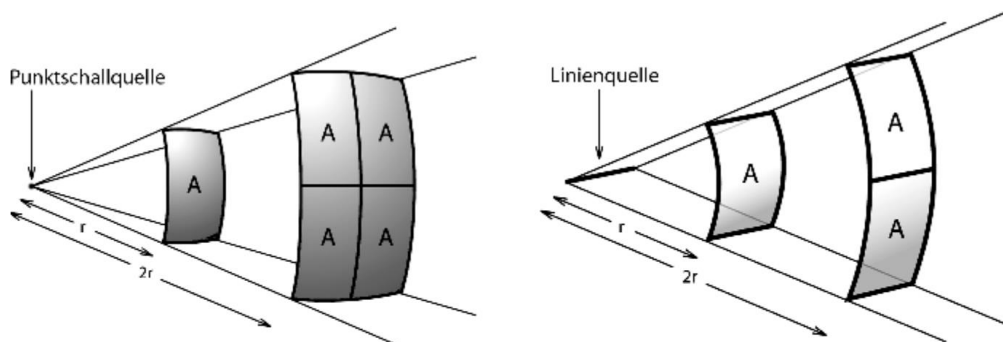


Abbildung 2.9: Unterschiedliche Flächenverhältnisse bei Kugelwellen und Zylinderwellen. Links die Ausbreitung einer Kugelwelle mit einer Punktquelle im Zentrum. Rechts die Ausbreitung einer zylinderförmigen Wellenfront mit einer Linienquelle im Zentrum [11, S. 26]

Für die Bildung einer geeigneten Zylinderwelle ist es von Nöten eine möglichst ebene Wellenfront der einzelnen Punktquellen zu erzeugen [11, S. 449]. Anders als bei normalen Lautsprechern, bei welchen die Wellenfront gekrümmt ist,

versuchen Linearrays diese Wellenfront möglichst eben abzugeben. Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von Wellenformern (Waveformer). Abbildung 2.10 zeigt die Bildung zweier Wellenfronten aus Einzelquellen mit und ohne Wellenformer.

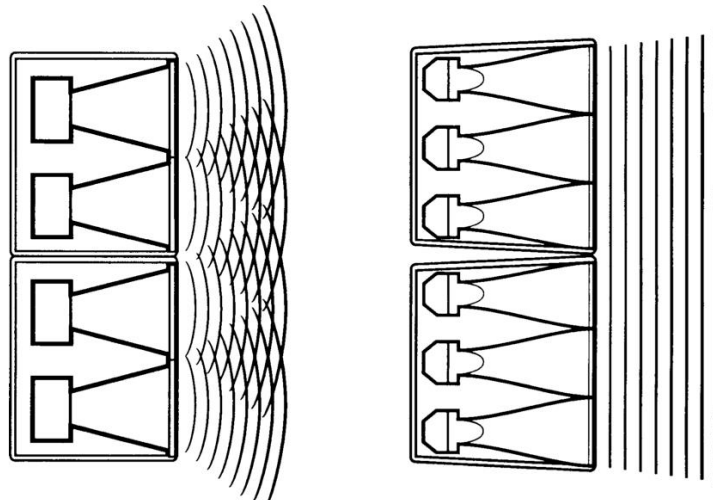


Abbildung 2.10: Links: Seitenansicht vertikal gestapelter Punktquellen ohne Wellenformer und die damit einhergehende Wellenfront mit Interferenzen; Rechts: Seitenansicht vertikal gestapelter Punktquellen mit Wellenformern und die sich damit ausbildende ebene Wellenfront [11, S. 449]

Wellenformer versuchen durch entsprechende Schallführung aus der sphärischen Wellenfront eine ebene Wellenfront zu erzeugen. Bändchenlautsprecher können ebenso verwendet werden, welche aufgrund ihrer Bauart eine ebene Wellenfront abstrahlen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung sehr kleiner Treiber die so nah wie möglich aneinander angereiht werden [11, S. 450].

2.3.3 Tieffrequente Schallquellen

Für die Wiedergabe von tiefen Frequenzen werden in aller Regel Basslautsprecher (Subwoofer) verwendet. Diese weisen häufig eine größere Membran als Hochtöner auf. Nachfolgend aufgelistet sind einige wichtige Gehäusetypen für Tieftonlautsprecher [11, S. 431]:

- Geschlossene Gehäuse
- Bassreflex-Gehäuse

- Bandpass-Gehäuse
- Hornlautsprecher

Abbildung 2.11 zeigt einige der verbreitetsten Gehäusearten. Bei dem geschlossenen Gehäuse A wirkt der abgeschlossene Bereich im Gehäuse als Feder, die hilft die Membran in die Ruhelage zu bringen. Das Volumen des Gehäuses nimmt Einfluss auf die Resonanzfrequenz des Subwoofers. Diese bestimmt maßgeblich den Schalldruck bei bestimmten Frequenzen. Gehäuse B, das Bassreflexgehäuse, macht sich den rückwertigen Weg der Membran zunutze um die Schallabstrahlung zu unterstützen. Dabei wird der direkt abgestrahlte Schall der Membran mit dem indirekt abgestrahlten des Resonators kombiniert. Die Geometrie des Gehäuses bestimmt dabei die Abstimmfrequenz des Resonators. Das Bandpassgehäuse Typ 1 ist eine Kombination aus einem geschlossenen Gehäuse mit Resonator. Es gibt keinen Direktschall von der Lautsprechermembran, sondern nur der indirekte durch den Resonator. Der Treiber wird dadurch entlastet da er weniger ausgelenkt werden muss. D zeigt das Bandpassgehäuse Typ 2 bei welchem sowohl die Vorder- als auch die Rückseite des Treibers einen Resonator antreiben.

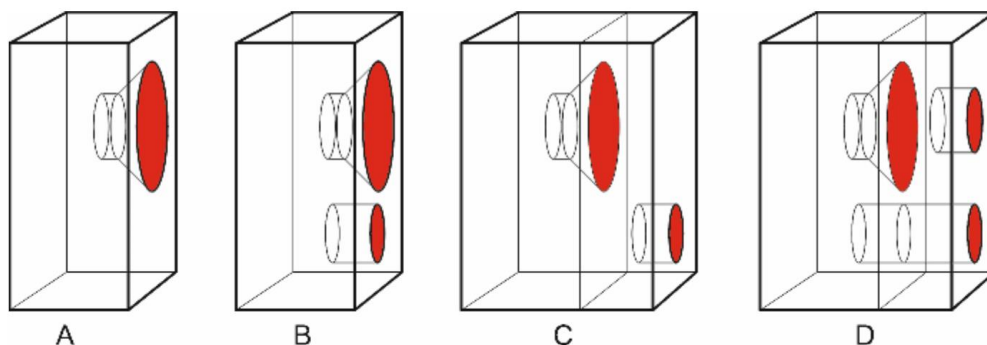


Abbildung 2.11: Unterschiedliche Gehäusearten für Basslautsprecher. A: Geschlossenes Gehäuse. B: Bassreflex-Gehäuse. C: Bandpassgehäuse Typ 1. D: Bandpassgehäuse Typ 2. [11, S. 432]

Die Wellenlänge einer Frequenz wird berechnet nach der Formel:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.18)$$

Lambda ist die Wellenlänge, c die Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium und f ist die Frequenz. Folgend werden einige Frequenzen mit zugehörigen

Wellenlängen aufgelistet. zur Berechnung wurde die Schallgeschwindigkeit $c=343\text{m/s}$ bei 20°C herangezogen [10, S. 561].

Frequenz f in 1/s	Wellenlänge λ in m
32	10,72
63	5,44
100	3,43
1000	0,343
4000	0,086

Zu sehen ist, dass die Wellenlänge zunimmt je tiefer die Frequenz wird. Aufgrund der großen Wellenlängen im Tieftonbereich passiert es, dass sich die Schallwellen zunehmend um das eigene Gehäuse beugen und sie Omnidirektional ausbreiten.

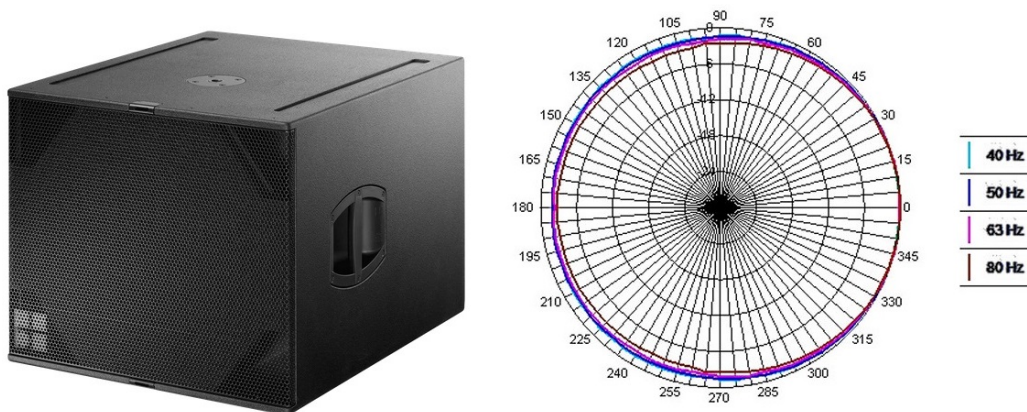


Abbildung 2.12: Links: Tieftonlautsprecher B6 von D&B Audiotechnik [2]; rechts: das Polardiagramm der horizontalen Abstrahlung des B6 für verschiedene Frequenzen in Anlehnung an dessen Daten aus ArrayCalc.

Abbildung 2.12 zeigt den Subwoofer B6 der Firma D&B Audiotechnik. Er ist bestückt mit einem 18 Zoll Treiber und ist als Bassreflex ausgelegt. Zu sehen ist, dass bei 0° (vor dem Subwoofer) für alle angegebenen Frequenzen (40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz) der relative Schalldruckpegel von 0 dB auftritt. Der Schalldruckpegel nimmt zu den Seiten hin ab, jedoch nur sehr gering. Selbst direkt hinter dem B6 erzeugt er noch ein Pegel von ca. -3 dB. Dieses Abstrahlverhalten tieffrequenter Lautsprecher ist oftmals nicht ideal, da sich der Schall unter der Bühne und in der Nachbarschaft ähnlich verbreitet wie unter den Besuchern. In gewissem Maße kann der Schall durch ein gefaltetes Hornsystem gerichtet werden (siehe Kapitel 2.3.4). Eine oft verwendete Methode tieffrequenten Schall zu richten ist ein korrekt aufgestelltes und eingestelltes

Bassarray. Dabei werden sich Interferenzeffekte zunutze gemacht, um den Schall an ungewünschten Orten möglichst auszulöschen und an gewünschten zu verstärken.

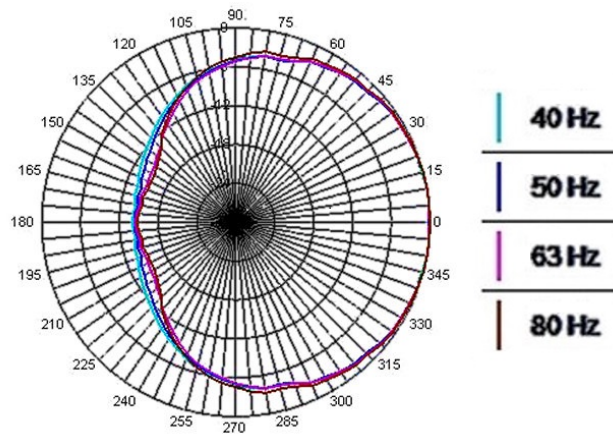


Abbildung 2.13: Polardiagramm für drei B6 von D&B in CSA Anordnung in Anlehnung an die Daten aus ArrayCalc.

Abbildung 2.13 zeigt ein Polardiagramm für drei B6 Lautsprecher in der CSA (Cardioid Subwoofer Array) Anordnung. Dabei werden die drei Lautsprecher aufeinandergestapelt und der mittlere um 180° gedreht. Durch die entsprechende Einstellung im Verstärker wird die korrekte Verzögerung eingestellt. Somit kann eine rückwertige Dämpfung des Schallpegels um ca. -14 dB erreicht werden. Diese Methodik kann weitergeführt werden indem große Bassarrays neben- und hintereinander (Endfire) aufgebaut werden. Mit lautsprecherabhängigen Delays kann die Form der Schallausbreitung weiter beeinflusst werden. Bei unpassenden Delays oder Positionierungen kann es an manchen Orten zu großen Unstetigkeiten im Frequenzverlauf kommen. Es bilden sich Bereiche in denen einige Frequenzen unproportional laut bzw. leise im Vergleich zu anderen auftreten. Das Ziel ist es eine möglichst homogene Lautstärkeverteilung im Zuschauerbereich zu erreichen bei gleichzeitiger größtmöglicher rückwärtiger Dämpfung. Oft ist ein Kompromiss aus beidem die beste Lösung.

2.3.4 Hornlautsprecher

Eine weitere Bauform ist die des horngeladenen Basses. Ein Bassarray aus solchen Subwoofern kam 2021 auf der Turmbühne des Plan:et C Festivals zum Einsatz. Es wurden 35 DH-18 der Firma Lambda Labs als dreireihiges Bassarray aufgebaut. Horngeladene Systeme versuchen über einen stetigen

Anstieg der Luftsäule vor der Membran den Strahlungswiderstand zu erhöhen und somit den Wirkungsgrad zu steigern. Die Hornlänge muss dabei in Relation zur Wellenlänge des abgegebenen Schalls stehen. Hohe Frequenzen abstrahlende Lautsprecher kommen daher mit kleineren Hörnern aus als Tieftonlautsprecher. Hörner im Tieftonbereich müssen bereits mehrere Meter lang sein. Da dies in der Praxis schwer umzusetzen ist, werden diese, wenn überhaupt gefaltet [11, S. 437].

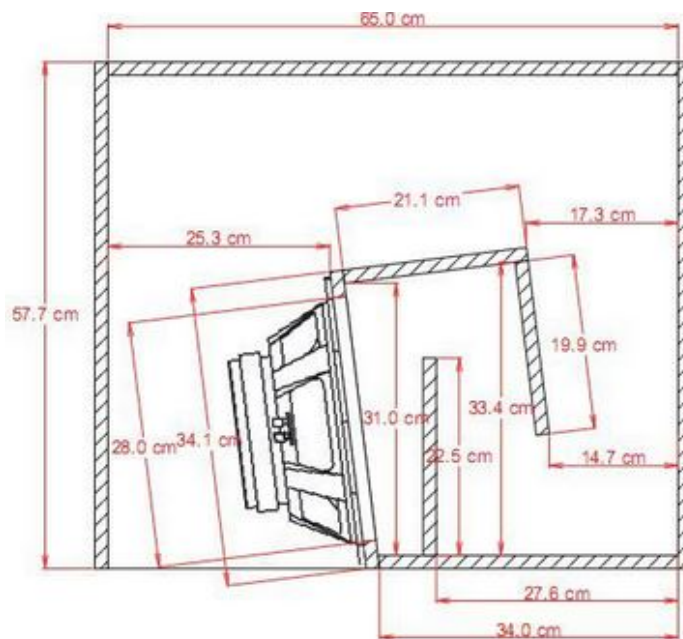


Abbildung 2.14: Innenansicht eines horngeladenen Subwoofers mit gefaltetem Horn [16]. Zu sehen ist der stetig steigende Querschnitt von der Membran bis zur Austrittsöffnung

Abbildung 2.14 zeigt einen solchen horngeladenen Subwoofer mit gefaltetem Horn. Entwickler müssen Kompromisse eingehen zwischen den akustischen Eigenschaften und der Größe und Form der Tieftonlautsprecher. Die Unregelmäßigkeiten im Hornverlauf können im Tieftonbereich vernachlässigt werden. Gefaltete Hörner für den Mittel- und Hochtonbereich kommen nur zum Einsatz, wenn kein hoher Anspruch an die Klangqualität gelegt wird. [11, S. 437 f]. Abbildung 2.15 zeigt auf der linken Seite einen Lautsprecher wie er z.B. in Stadien aber auch als Megafon gefunden wird. Rechts wird der schematische Aufbau des gefalteten Horns gezeigt. Der Schall wird Z-förmig von der Membran bis zum Trichtermund geleitet. Der mit dem längeren Horn verbundene höhere Strahlungswiderstand und damit der höhere Wirkungsgrad geht dabei auf Kosten der Klangqualität.

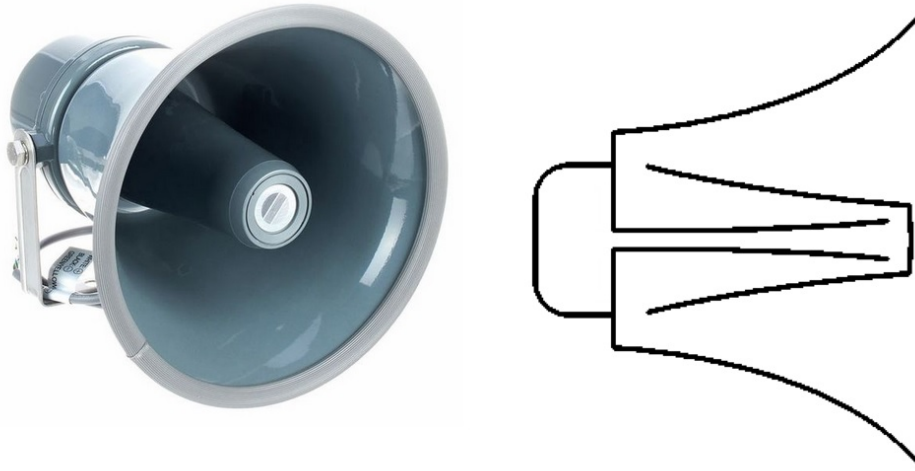


Abbildung 2.15: Links der Lautsprecher Visaton DK8 [24] und rechts ein schematischer Aufbau eines gefalteten Horns für den Mitten- und Hochtonbereich.

3. Geländemodell und Simulationen

3.1 Die Fusion und Plan:et C im Jahr 2021

Um eine Simulation anzufertigen, muss vorerst entschieden werden für welches Szenario diese erstellt wird. Normalerweise findet die Fusion mit 70.000 Personen und etwa 35 verschiedenen Spielstätten statt. Aufgrund der Maßnahmen zur Bekämpfung der Coronakrise musste sie 2020 und 2021 jedoch abgesagt werden. 2021 wurden im Herbst stattdessen unter strengen Hygienemaßnahmen und Testkonzept drei Festivalwochenenden mit jeweils 10.000 Gästen gefeiert (Kulturkosmos Newsletter Dezember 2021). Da nur für dieses Szenario Messungen gemacht werden konnten, wurde auch die Simulation daran angepasst. Die drei Festivalwochenenden wurden Plan:et C Alpha, Beta und Gamma genannt. Abbildung 3.1 zeigt den Geländeplan der Plan:et C. Rot gekennzeichnet sind die Spielstätten auf welchen die schallemissionsrelevantesten Anlagen standen. Für den vollständigen Geländeplan siehe Anhang A.2.

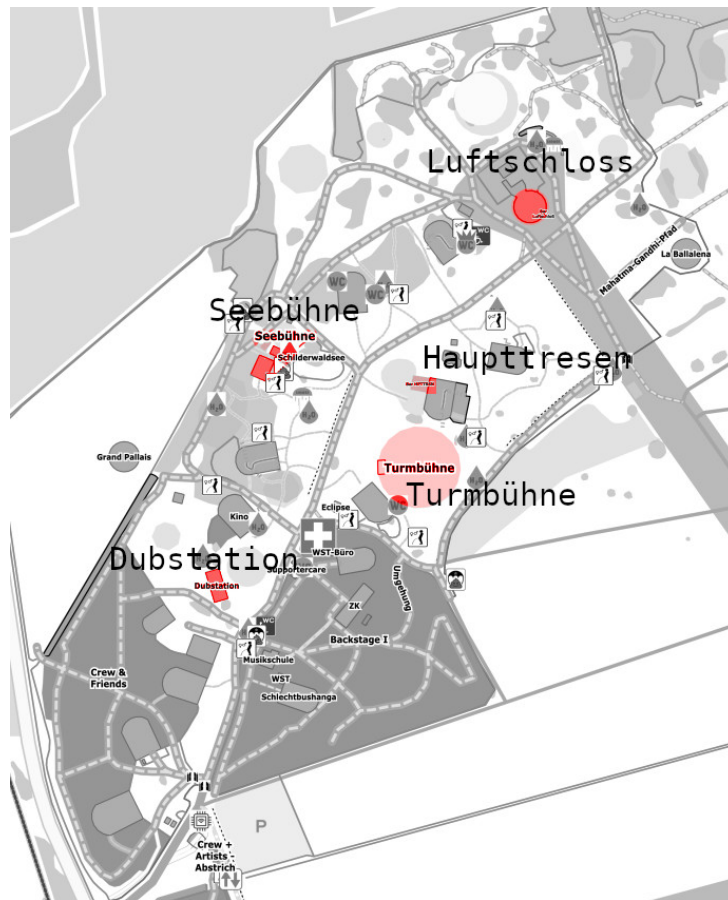


Abbildung 3.1: Geländeplan der Plan:et C Festivals mit rot hervorgehobenen Spielstätten

3.2 Simulationssoftware

Als Simulationssoftware wurde SoundPLAN der Firma SoundPLAN GmbH verwendet. Sie ermöglicht das präzise Erstellen von Geländemodellen und das Berechnen der Schallausbreitung nach verschiedenen Richtlinien wie der DIN 9613-2 oder NORD2000. Es gibt eine direkte Schnittstelle zum Systemtool ArrayCalc von d&b Audiotechnik GmbH & Co. KG. Damit können, anders als bei vielen anderen Anbietern, zusammenhängende Anlagen erstellt werden, die ein kohärentes Signal abgeben. Interferenzeffekte werden berücksichtigt. So kann die Realität der Schallausbreitung deutlich besser abgebildet werden als mit vielen anderen Produkten.

3.3 Erstellung des Geländemodells

Das Fusion Festival findet seit 1997 auf dem Privatgelände des Kulturkosmos e.V. nördlich des Flugplatz Müritz Airpark auf der mecklenburgischen Seenplatte statt. Das etwa 100 Hektar große Gelände ist überwiegend flach, mit wenigen Waldgebieten und den charakteristischen Flugzeughangars. Abbildung 3.2 zeigt die Draufsicht auf das Gelände des Kulturkosmos (gelb eingezeichnet). Das kleinere Gebiet süd-westlich wird während der regulären Fusion als ruhigerer Ort für Familien verwendet. Für die Plan:et C Festivals im Jahr 2021 wurde dieses Gebiet als Campingplatz für Gäste verwendet.



Abbildung 3.2: Vogelperspektive des Kulturkosmos-Geländes aus Google Earth mit eingezeichneten Gebietsgrenzen

Für die Erstellung des topografischen Geländemodells wurden die Höhenpunkte aus Google Maps importiert. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Abtastrate der Geländepunkte zum Festivalgelände hin zunimmt. Es wurde ein etwa 15 km auf 9 km großes Rechteck mit insgesamt 18372 Höhenpunkten erstellt, um das digitale Geländemodell zu berechnen.



Abbildung 3.3: Digitales Geländemodell aus Soundplan mit Höhenlinien. Abgebildet wird ein Gelände von etwa 15 km auf 9 km mit Höhenlinien mit 2,5 Metern Differenz. Dick eingezeichnet sind die Außengrenzen der Fusion.

Abbildung 3.3 zeigt das digitale Geländemodell auf Grundlage der importierten Höhenpunkte. Gezeigt sind die Höhenlinien mit einer Differenz von 2,5 Metern über das gesamte importierte Gelände. Dick eingezeichnet, etwa in der Mitte befindet sich das Gelände des Kulturkosmos. Die relevanten Immissionsorte wurden in den vergangenen Jahren bestimmt und werden vom genehmigenden Amt Röbel-Müritz in der Genehmigung aufgeführt. Der entsprechende Beurteilungspegel (siehe Kapitel 2.1.1) darf an diesen festgelegten Orten, oft sind dies die ersten Nachbarn in den entsprechenden Richtungen, nicht überschritten werden. Abbildung 3.4 zeigt die Position dieser Immissionsorte. Diese sind wie vom Amt festgelegt:

- IO 1 Granzow Seestraße 9
- IO 2 Lärz Lindenstraße 83
- IO 3 Vietzen Am Sumpfsee 4
- IO 4 Rechlin Müritzstraße 7
- IO 5 Retzow Dorfstraße 1

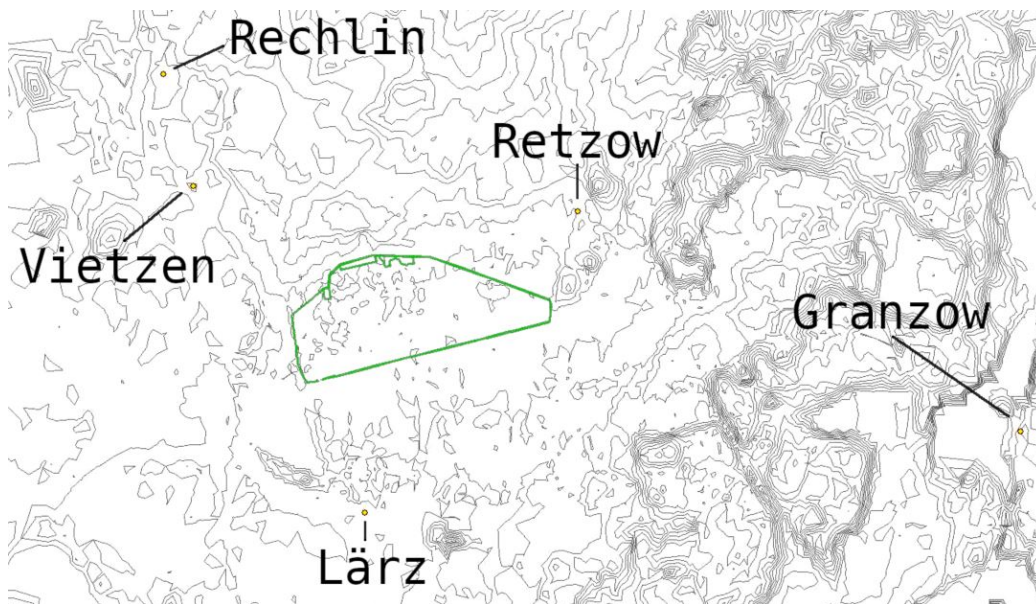


Abbildung 3.4: Relevante Immissionsorte um das Gelände des Kulturkosmos auf Höhenlinienkarte mit 2,5 Metern Differenz.

Nachdem die Höhenpunkte aus Google Maps importiert und das digitale Geländemodell (DGM) berechnet wurde, wurden Straßen, Gebäude und Waldgebiete aus Open Street Maps importiert und auf das DGM gesetzt. Das Resultat ist in Abbildung 3.5 als 3D-Ansicht zu sehen. Abbildung 3.7 zeigt das Gelände des Kulturkosmos in näherer Ansicht.

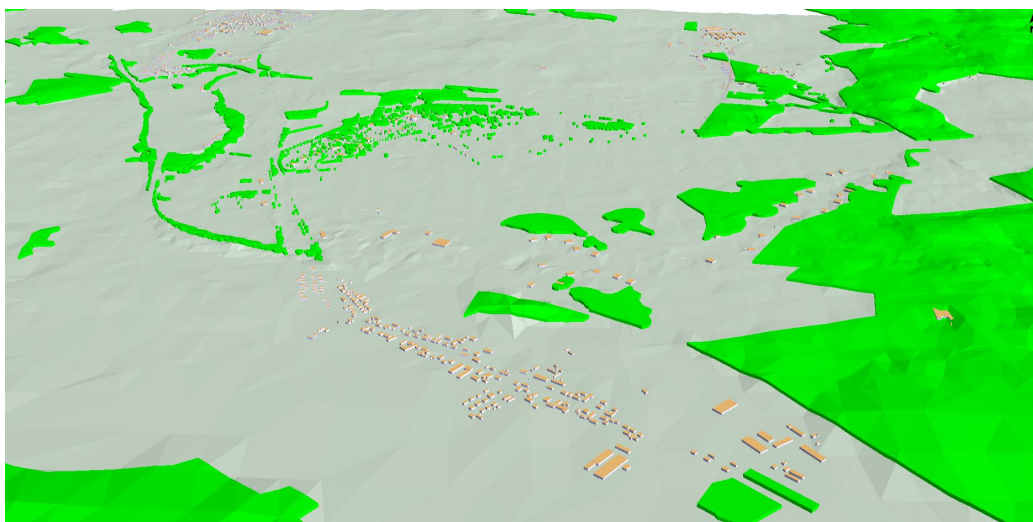


Abbildung 3.5: 3D Ansicht des simulierten Geländes inklusive der umliegenden Gemeinden Lärz, Retzow und Vietzen

Abbildung 3.6 zeigt den Lageplan des Fusiongeländes mit Dämpfungsbereichen, Gebäuden, Außengrenzen und dem, aus den Höhepunkten berechneten, Gitternetz. Abbildung 3.6 zeigt die aus diesen Daten generierte 3D-Ansicht.

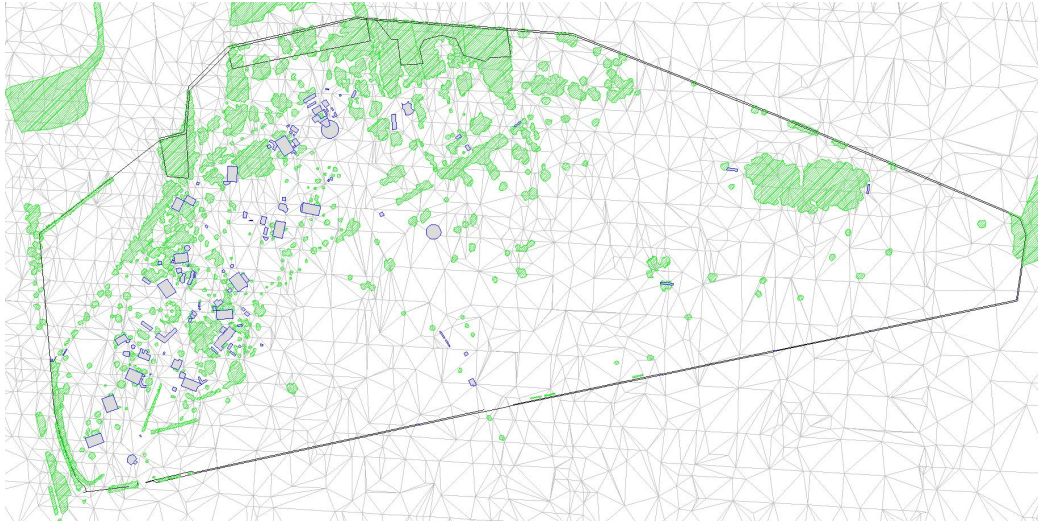


Abbildung 3.6: Lageplan des Fusiongeländes mit allen Dämpfungsbereichen und Gebäuden auf dem Gitternetz

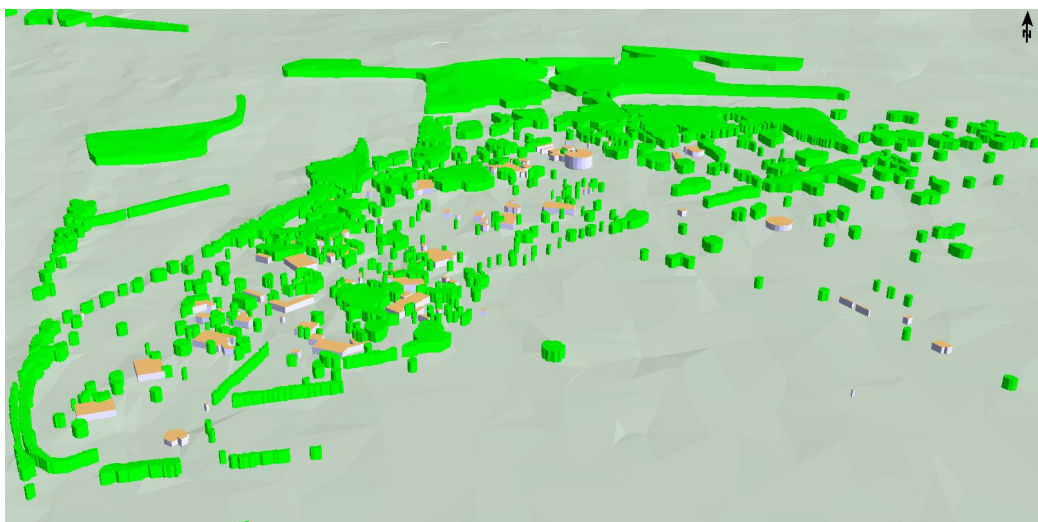


Abbildung 3.7: 3D Ansicht des Fusiongeländes in Soundplan mit Dämpfungsbereichen und Gebäuden ohne Spielstätten

3.4 Modellierung der Spielstätten

Um die kohärente Addition gekoppelter Schallquellen zu berechnen, ist es notwendig über das Abstrahlverhalten und die Position der Lautsprecher zu wissen. Das Zusammenspiel von Soundplan und ArrayCalc ermöglichen die in Unterkapitel 2.2.2 erläuterten Vorteile. Soundplan arbeitet derzeit nur mit d&b's ArrayCalc zusammen um Lautsprecheranlagen einzufügen. Daher müssen Anlagen anderer Hersteller bis jetzt in ArrayCalc möglichst genau nachgebaut werden. Hierfür können Parameter wie Bestückung, Frequenzgang, maximaler Schalldruckpegel und das Abstrahlverhalten zu Hilfe genommen werden. So könnte beispielsweise das K1 von L'Acoustic durch ein GSL8 von d&b angenähert werden.

	K1 L'Acoustic	GSL8 d&b
Bestückung	2×15", 4×6.5", 3×3"	2x14", 3x10", 3x1.4"
Maximaler Schalldruckpegel	149dB	150dB
Nennabstrahlwinkel hor.	90°	80°
Frequenzgang	35Hz-20kHz(-10dB)	45Hz-18kHz(-5dB)

Ein weiterer Vergleich wäre beispielsweise zwischen den A10 Wide von L'Acoustic zu den AL90 von d&b möglich.

	A10 L'Acoustic	AL90 d&b
Bestückung	1x10", 1x2,5"	2x10", 1x1,4"
Maximaler Schalldruckpegel	137dB	138-139dB
Abstrahlwinkel	30°x 70°/90°/110°	90°x30°
Frequenzgang	67Hz-20kHz(-10dB)	60Hz-18kHz(-5dB)

Die Turmbühne spielte, wie in Unterkapitel 3.4.2 erläutert, mit einer Anlage von Lambda Labs. Die Substitution des DH-18 von Lambda Labs ist schwieriger als die vorangegangenen Beispiele. Es handelt sich um einen Subwoofer mit gefaltetem Horn auf der Vorderseite des Treibers wie in Kapitel 2.3.4 ausgeführt. Dem DH-18 wird in seinem Werbevideo eine gute Richtwirkung zugesagt welche hauptsächlich geometrischer Natur und weniger dem Horn design geschuldet ist, da Horn und Hornmund zu klein sind um eine relevante Richtwirkung für tiefe Frequenzen zu erzeugen [3, S. 443]. Als Substitution wurden jeweils zwei B6'en von d&b herangezogen, um dem gesteigerten Wirkungsgrad des DH-18 durch die Strahlungsimpedanz des gefalteten Horns gerecht zu werden.

3.4.1 Seebühne

Abbildung 3.8 zeigt die Seebühne mit einem System von L'Acoustic. Zum Einsatz kamen sechs K3 als Linearrays pro Seite. Die Öffnungswinkel der oberen beiden betragen 90° , die unteren vier bekamen 110° . Als Bassarray wurden 14 KS28 jeweils zwei aufeinander mit dem oberen als Cardioid nach hinten zeigend verwendet. Abschließend wurden pro Seite zwei A15 als Nearfill aufgestellt. Dieses Modell in Soundvision kann im Anhang A.1 eingesehen werden.



Abbildung 3.8: Seebühne auf dem Plan:et C mit zwölf K3, 14 KS28 und vier A15 von L'Acoustic

Nachgebaut wurde diese Anlage mit vier KSL8 und acht KSL12 als Linearray. Die SB28 wurden durch die B22 ebenso in Cardioidaufbau und mit elektronischem Öffnungswinkel von 95° substituiert. Für das Nearfill wurden vier AL60 in horizontaler Ausrichtung verwendet. Abbildung 3.9 zeigt den Nachbau in ArrayCalc.

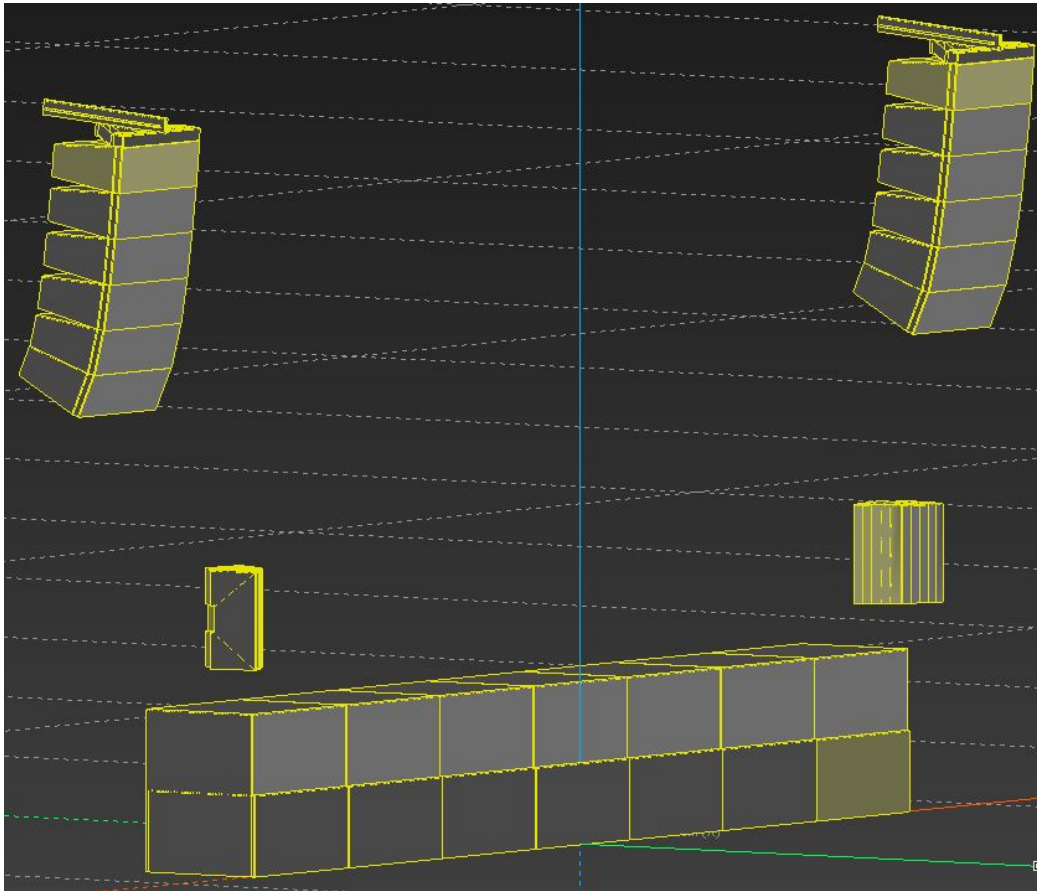


Abbildung 3.9: Seebühnensimulation in ArrayCalc

3.4.2 Turmbühne

Abbildung 3.10 zeigt die größte Bühne auf dem Plan:et C, die Turmbühne. Zum Einsatz kam eine Anlage von dem österreichischen Hersteller Lambda Labs. Pro Seite wurde ein QX-3 verbaut zu dem es zum jetzigen Zeitpunkt wenig technische Daten gibt [23]. Erweitert wurde das QX-3 durch darunter angebrachte weitere Lautsprecher. Das Bassarray bestand aus 35 DH-18 Subwoofern, ebenso von Lambda Labs. Diese wurden in einem dreireihigen Array aufgebaut. Zwei Reihen wurden nach vorne strahlend und eine nach hinten ausgerichtet.



Abbildung 3.10: Turmbühne mit Anlage von Lambda Labs mit 2 QX-3, 35 DH-18 und dem Nearfill

Abbildung 3.11 zeigt den Nachbau der PA der Turmbühne. Um die Punkt-lautsprecher des QX-3 abzubilden wurde die A-Serie von d&b herangezogen. Ebenso für das Nearfill und eine kleine Delayline. Das Bassarray wurde, wie bereits beschrieben, aus doppelten B6en nachgebaut. Die mittlere Reihe, bestehend aus 11 DH-18 wurde zur Bühne ausgerichtet.

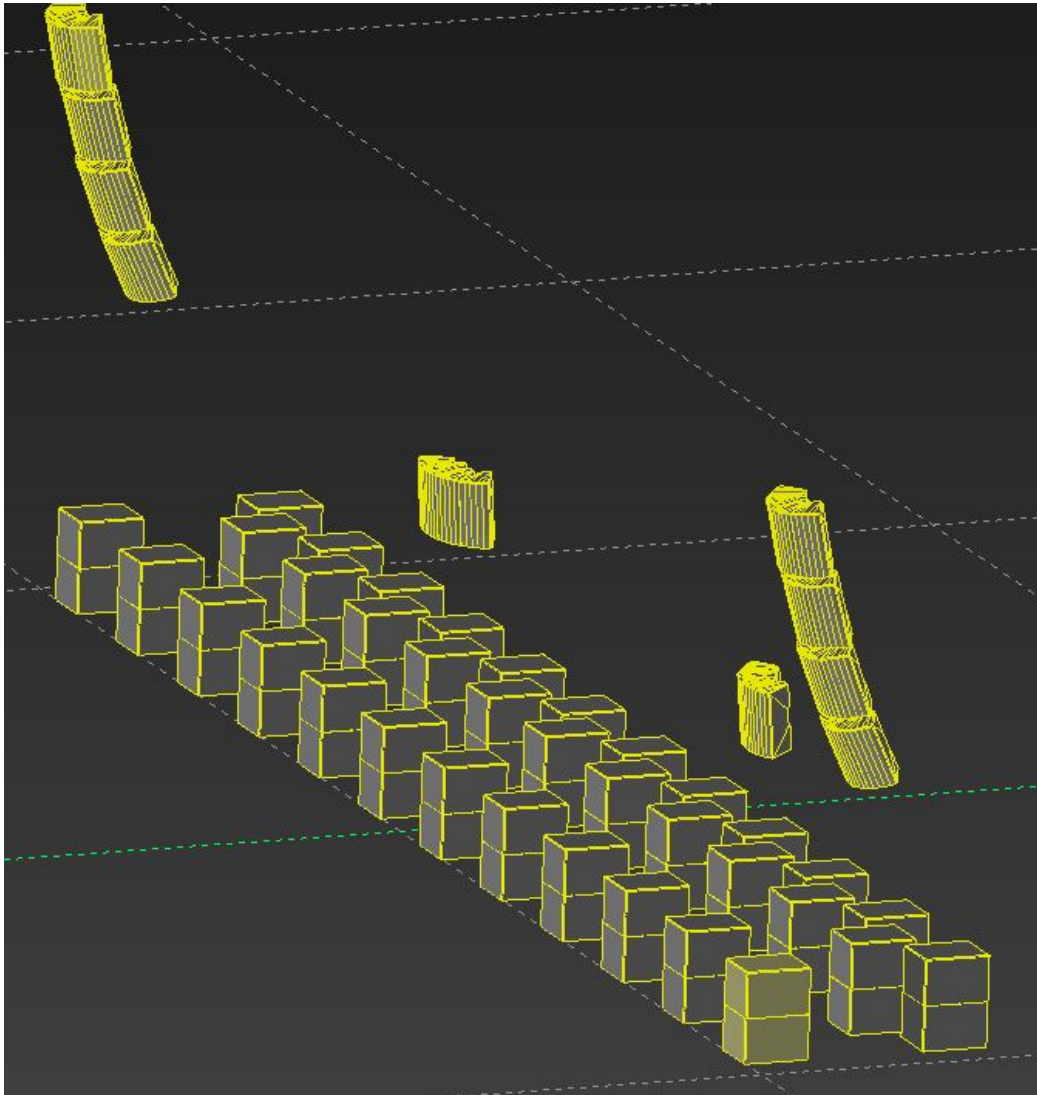


Abbildung 3.11: Turmbühnensimulation in ArrayCalc

Abbildung 3.12 zeigt das Polardiagramm des nachgebauten Bassarrays der Turmbühne mit angewandtem Delay um den Öffnungswinkel elektronisch zu weiten. Zu sehen ist bei 80 Hz bereits eine rückwärtige Dämpfung bei 180° von -6 dB. Dieser Wert steigert sich je tiefer die Frequenz wird. Bei 40 Hz beträgt die rückwertige Dämpfung bereits -14 dB bei homogener Ausbreitung im Zuschauerraum.

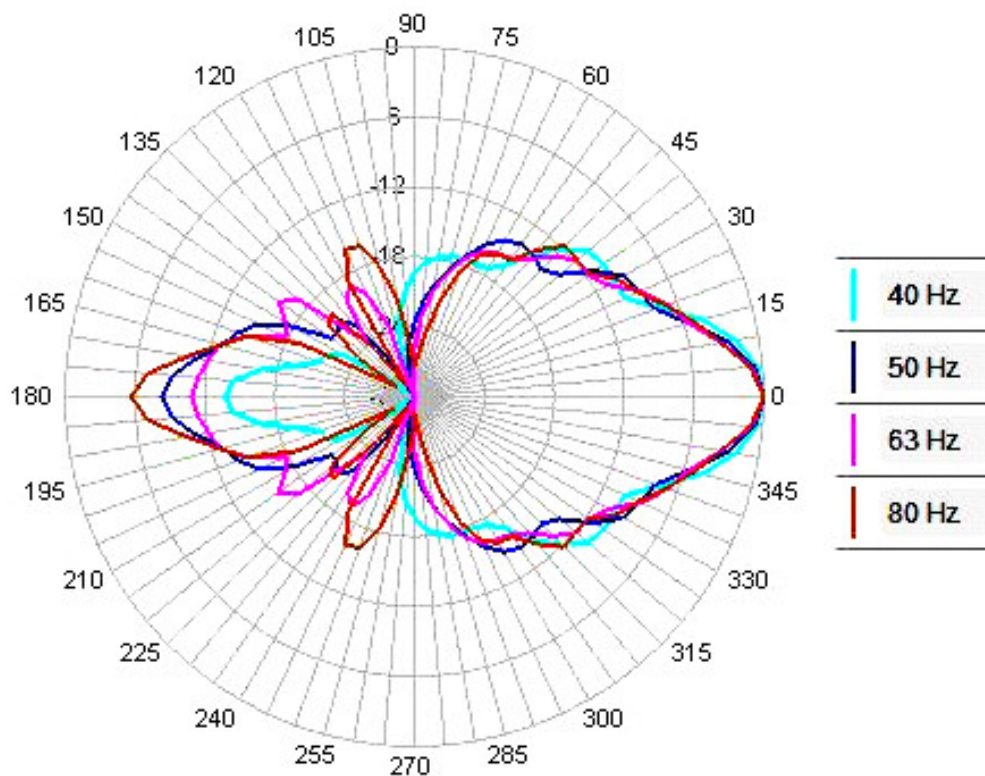


Abbildung 3.12: Polardiagramm des substituierten Bassarrays der Turmbühne in ArrayCalc

3.4.3 Haupttresen

Der Haupttresen ist eine langgezogene Bar mit Tanzbereich. Zur Beschallung wurden in den Ecken eines Rechtecks um den Tanzbereich jeweils ein TX-3A von Lambda Labs positioniert. Diese strahlten in die Mitte des Rechtecks. Seitlich standen zusammengestellt vier DH-18 von Lambda Labs im D-Mode zur Unterstützung im Tieftönenbereich.

3.4.4 Dubstation

Die Dubstation war ein Zelt am westlichen Ende des Festivalgeländes. Sie wurde auf der Plan:et C Alpha und Beta nur mit einer kleinen Anlage betrieben. Der durchschnittliche Schalldruckpegel belief sich auf 91,3 dB(A) am lautesten Punkt. Auf der Plan:et C Gamma wurde eine größere Anlage aufgebaut und diese auch lauter betrieben. Abbildung 3.13 zeigt die Anlage über die keine technischen Daten vorliegen. Auf der Plan:et C Gamma wurde

sie mit durchschnittlich 97,6 dB(A) am lautesten Punkt betrieben und spielte daher nur während dieses Festivals eine größere Rolle.



Abbildung 3.13: Anlage der Dubstation auf Plan:et C Gamma

3.4.5 Luftschloss

Abbildung 3.14 zeigt eine Darstellung des Luftschlosses mit seiner kugelförmigen Kuppel. Eine Photographie mit ähnlicher Ansicht findet sich im Anhang A.3. Abgesehen von den fünf Ein- und Ausgängen ist es rundum geschlossen. Es wurde untersucht wieviel des drinnen herrschenden Schalls nach Außen übertragen wird. Dafür wurden sowohl Innen als auch Außen Schallpegelmessungen gemacht. Innen wurde in zwei Minuten ein A-bewerteter Dauerschalldruckpegel $L_{Aeq} = 99,0$ dB(A) und ein C-bewerteter Dauerschalldruckpegel von $L_{Ceq} = 123,2$ dB(C) gemessen. Außen wurde ein Mittelwert von $L_{Aeq} = 78,3$ dB(A) und $L_{Ceq} = 101,2$ dB(C) gemessen. Der äußere Wert ist dabei ein Mittelwert aus Messungen entlang der Außenhülle. Es spielen daher sowohl geöffnete Türen als auch Wände eine Rolle. Auf diesem Weg wurde ein Schallpegelabfall von 20,7 dB(A) und 22,0 dB(C) zwischen drinnen und draußen ermittelt.

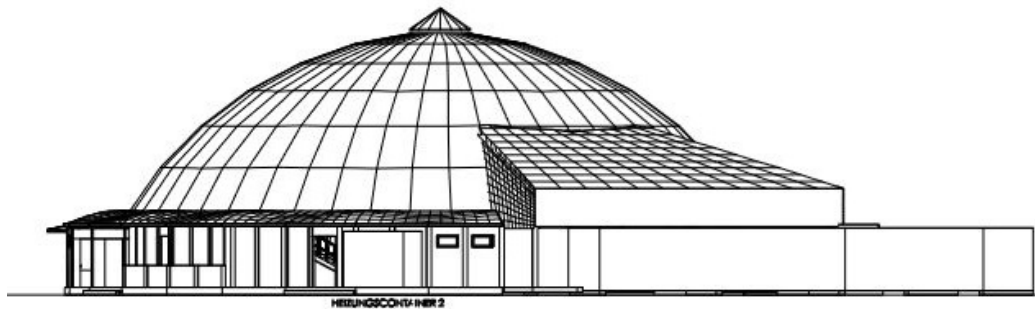


Abbildung 3.14: Skizze der Spielstätte Luftschloss, Seitenansicht.

Aufgrund des deutlich niedrigeren Schallpegels des Luftschlosses, im Vergleich zu den anderen Spielstätten, wurde von einer Integration des Luftschlosses als Schallquelle in die Schallausbreitungssimulation abgesehen.

3.5 Vergleich der DIN 9613-2 und NORD2000

Zur Berechnung der Schalldruckpegel an den Immissionsorten wurde in Soundplan sowohl die DIN 9613-2 als verbreitetste als auch NORD2000 als fortschrittlichste Berechnungsvorschrift gewählt. Um ein Gefühl dafür zu bekommen wie sich die Berechnungsvorschriften verhalten, wurde ein "Testaufbau" untersucht. Abbildung 3.15 zeigt die berechneten Summenpegel (linear) an vier fiktiven Immissionsorten. Die Immissionsorte sind 50 Meter, 100 Meter, 200 Meter und 1500 Meter mittig von der Turmbühne entfernt. Die Turmbühne war die einzige Schallquelle und ihr Emissionsspektrum wurde vereinfacht, indem jedes Terzband mit 100 dB(Z) beaufschlagt wurde. Das Gelände ist größtenteils flach und frei von Hindernissen. Beide Berechnungsvorschriften gehen von 70% Luftfeuchte, einem Druck von 1013 mBar und 15°C aus. NORD2000 geht zusätzlich von einer Inversionswetterlage aus. Die Ergebnisse sind durchweg sehr ähnlich. NORD2000 liegt leicht über den Ergebnissen von DIN 9613-2.

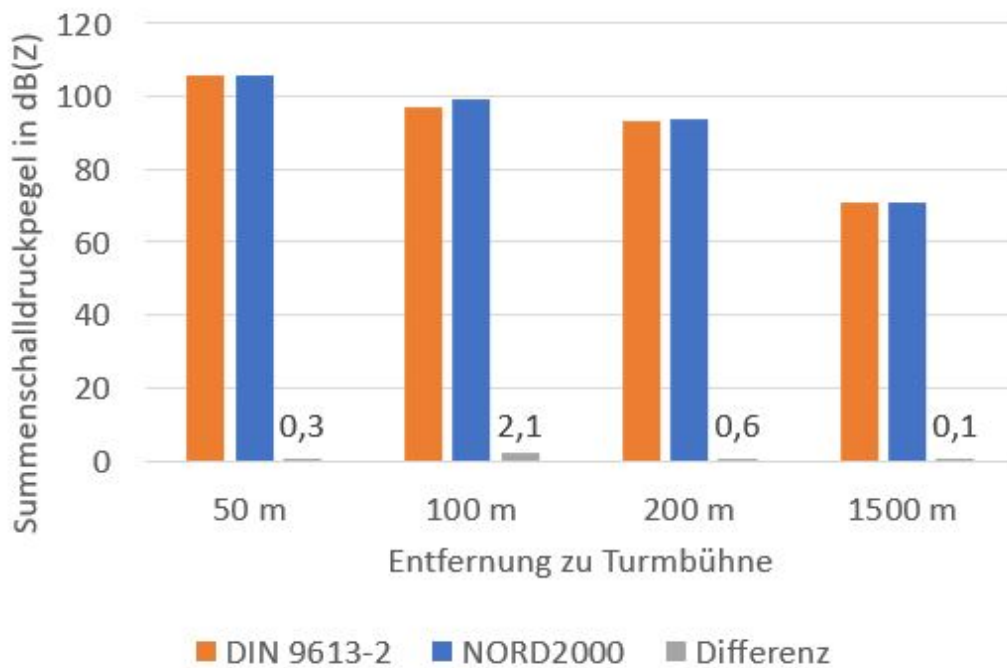


Abbildung 3.15: Differenz der mit NORD2000 und DIN 9613-2 berechneten Summenpegel an fiktiven Immissionsorten zum Vergleich beider Berechnungsvorschriften

Diese Übereinstimmung ändert sich an den wahren Immissionsorten. Abbildung 3.16 zeigt unter gleichen Emissionsbedingungen wie bei Abbildung 3.15 die berechneten Summenpegel an den wahren Immissionsorten. Die Luftlinie von der Turmbühne zu den Immissionsorten beträgt etwa:

- IO1 Granzow: 4500 Meter
- IO2 Lärz: 1300 Meter
- IO3 Vietzen: 1300 Meter
- IO4 Rechlin: 2000 Meter
- IO5 Retzow: 1500 Meter

Für die genauen Positionen der Immissionsorte siehe Abbildung 3.4 auf Seite 29.

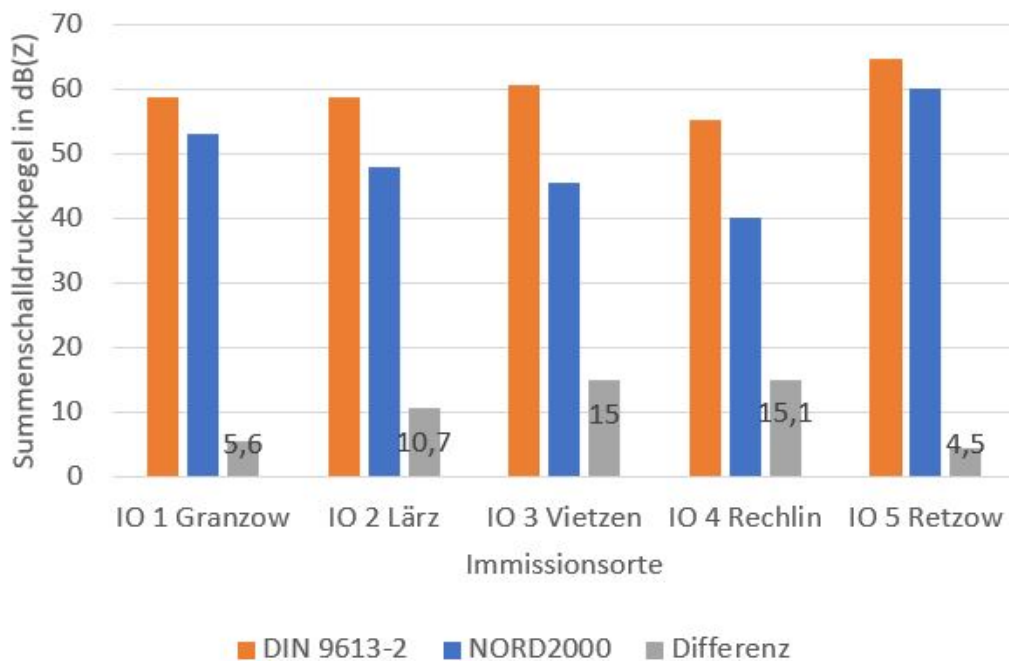


Abbildung 3.16: Differenz der mit NORD2000 und DIN 9613-2 berechneten Summenpegel an den relevanten Immissionsorten um das Festivalgelände

Die Ergebnisse der Berechnungen nach den Berechnungsvorschriften NORD2000 und DIN 9613-2 variieren. In Granzow und Retzow beträgt der Unterschied etwa 4-6 dB(Z). In Lärz bereits über 10 dB(Z) und in Vietzen und Rechlin sogar 15 dB(Z). Konstant ist, dass Berechnung mit der DIN 9613-2 höhere Werte ergeben als mit NORD2000. Diese Erkenntnisse werden in die Auswertung und den Vergleich mit den wahren Messwerten einbezogen.

4. Messungen von Schallpegeln und Wetterdaten

4.1 Messstationen

Zu den Plan:et C Festivals gab es insgesamt acht stationäre Schallpegelmesspunkte. Davon drei außerhalb des Festivalgeländes und fünf an den FOHs der Spielstätten. Die von dem Akustikbüro Dahms betriebenen Messpunkte waren:

- Immissionsort 2 in Lärz
- Immissionsort 3 in Vietzen
- Immissionsort 5 in Retzow
- FOH Turmbühne
- FOH Seebühne
- FOH Dubstation
- FOH Luftschloss
- FOH Haupttresen

Abbildung 4.1 zeigt eine der Messstationen außerhalb des Festivalgeländes in Retzow. Zu sehen ist eine Akkueinheit und das mit einem weißen Windschutz abgedeckte Mikrofon. Teilweise sind die Messdaten von einigen Fehlerquellen wie vorbeifahrende Autos, Vogelgezwitscher, Rasenmähern und ähnlichem betroffen. Dies muss in der Auswertung beachtet werden. Aufgenommen wurden unter anderem A und C bewertete Schalldruckpegel mit einem Intervall von fünf Sekunden.



Abbildung 4.1: Messstation an stationärer Position in Retzow, befestigt an einem Baum.

Abbildung 4.2 zeigt die A und C bewerteten Schallpegelverläufe für den 29.08.2021. Interessant ist hierbei, dass zwischen 12 und 14 Uhr fast alle Spielstätten eine Spielpause eingelegt haben. Ein klarer Einbruch des Schalldruckpegels ist zu erkennen. Ab 22:00 Uhr beendeten die zwei größten Bühnen ihr Programm. Auch dieser Einbruch ist erkennbar. Zwischen 00:00 und 12:00 beträgt der gemittelte A-bewertete Schalldruckpegel 45,1 dB(A). Zwischen 12:00 und 14:00 beträgt er noch 37,2 dB(A). Danach, zwischen 14:00 und 22:00 Uhr steigt er sogar auf 50,8 dB(A) und fällt ab 22:00 Uhr auf 44,9 dB(A) ab. Grau dargestellt ist die Differenz zwischen dem A und C bewerteten Schallpegel. Die A-Bewertung bedämpft die tiefen Frequenzen deutlich stärker als die C-Bewertung weshalb die Differenz beider eine Aussage über die Basshaltigkeit des Signals gibt. Der durchschnittliche Wert $\text{dB(C)}-\text{dB(A)}$ beträgt in diesem Zeitraum 14,0 dB. Dies ist daher relevant, da es oft die tiefen Frequenzen sind, die Anwohnern störend auffallen. Die tiefen Frequenzen verlieren über die Luftdämpfung weniger Energie als hohe Frequenzen. Außerdem sind tiefe Frequenzen durch ihre langen Wellenlängen in der Lage sich um Hindernisse zu beugen. Es kann sogar vorkommen, dass tieffrequente Geräusche in Wohnräumen durch Raummoden lauter wahrgenommen werden als draußen. Daher könnte argumentiert werden, dass die C-Bewertung in einem Fall wie der Fusion, sowie bei ähnlichen Festivals und Konzerten, eine aussagekräftigere Frequenzgewichtung darstellt. In der Praxis findet jedoch hauptsächlich die A-Bewertung Anwendung.

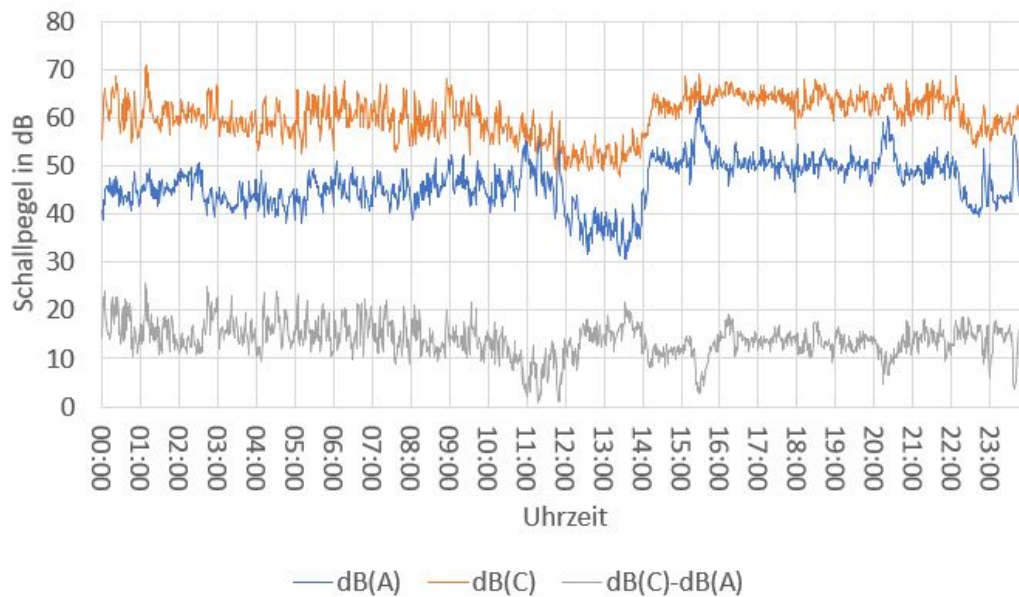


Abbildung 4.2: A und C bewerteter energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel sowie deren Differenz in Lärz Sonntag 29.08.2021

4.2 Schallpegelmesscrew

Zusätzlich zu den stationären Messpunkten gab es ein kleines Team welches mit Schallpegelmessgeräten ausgestattet war. Dieses patrouillierte jede Nacht über das Gelände und stellte sicher, dass die geforderten Pegelwerte eingehalten wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zusätzlich dokumentierte Messungen an vorher bestimmten Orten durchgeführt. Abbildung 4.3 zeigt die Positionen der Messpunkte der Schallpegelmesscrew (blau) und die Positionen der stationäre Messpunkte an den FOHs (rot).



Abbildung 4.3: Mobile Messpunkte der Schallpegelmesscrew (blau) und stationäre Messpunkte an den FOHs (rot)

Es war das Ziel, ein möglichst feinmaschiges Raster an Messwerten zu erhalten mit welchen die Simulation verifiziert werden kann. Es gibt jedoch einige signifikante Nachteile der mobilen Messpunkte gegenüber den Stationären. Der offensichtlichste Nachteil besteht darin, dass die Messpunkte nur zu bestimmten Zeitpunkten gemessen werden konnten. Je nach Nacht standen zwei bis drei Teams zur Verfügung weshalb ebenso viele Punkte gleichzeitig dokumentiert werden konnten. Danach wurden die nächsten Punkte angefahren was zwangshalber in einem Zeitversatz der Messwerte mündete. Der Zweite und gravierendere Nachteil besteht darin, dass die Teams mit Schallpegelmessgeräten ausgestattet waren, die weder effektiv loggen noch Terz- oder Oktavbandpegel aufzeichnen konnten. Daher wurden pro Messpunkt jeweils drei A-bewertete und drei C-bewertete Pegelwerte aufgeschrieben. Die geringe Anzahl an Messwerten lässt kaum statistische Auswertung zu, weshalb sie

zwar als Anhaltspunkte verwendet wurden, jedoch nicht um die Simulation zu verifizieren.

4.3 Wetterdaten

Zentral auf dem Gelände wurde eine Wetterstation installiert. Die Wetterstation gibt Auskunft über relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Regenmenge und einige weitere Werte. Die Daten wurden alle drei Minuten geloggt.

Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte am Samstag den 28.08.2021. Um etwa 14:00 setzte ein leichter Schauer ein, der den restlichen Tag über anhielt. Zu sehen ist, wie zu diesem Zeitpunkt die Temperatur abnimmt und die relative Luftfeuchtigkeit zunimmt.

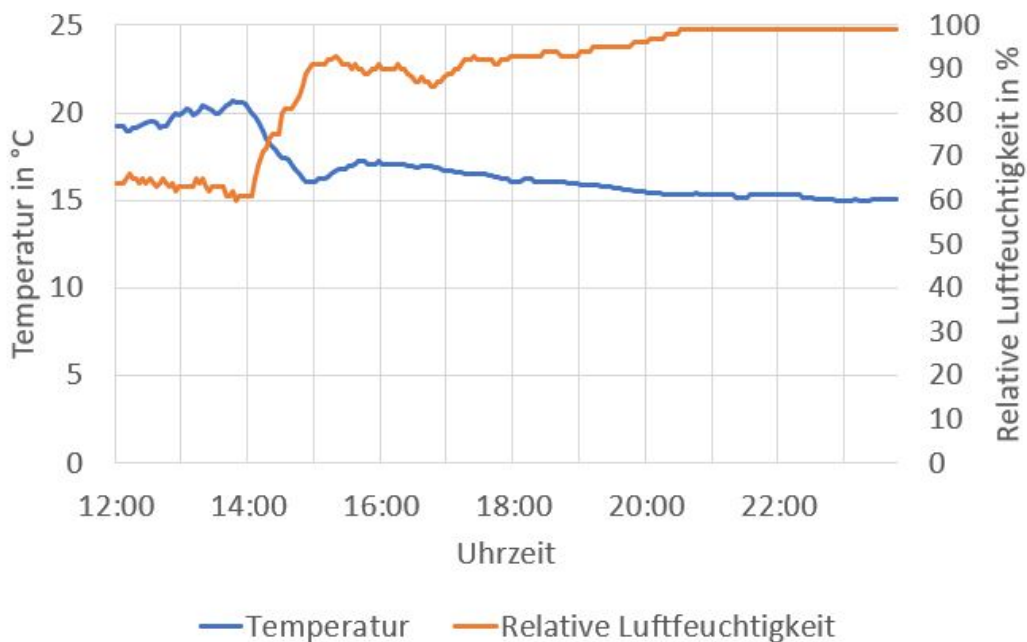


Abbildung 4.4: Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit 28.08.21

Abbildung 4.5 zeigt die Häufigkeit der aufgezeichneten Windrichtungen während des Plan:et C Beta Festivals. 75% der aufgezeichneten Windrichtungen während dieser Zeit sind in dem 90° Winkel zwischen Nordost und Nordwest angesiedelt. Das bedeutet, dass der Wind überwiegend in diese Richtung wehte.

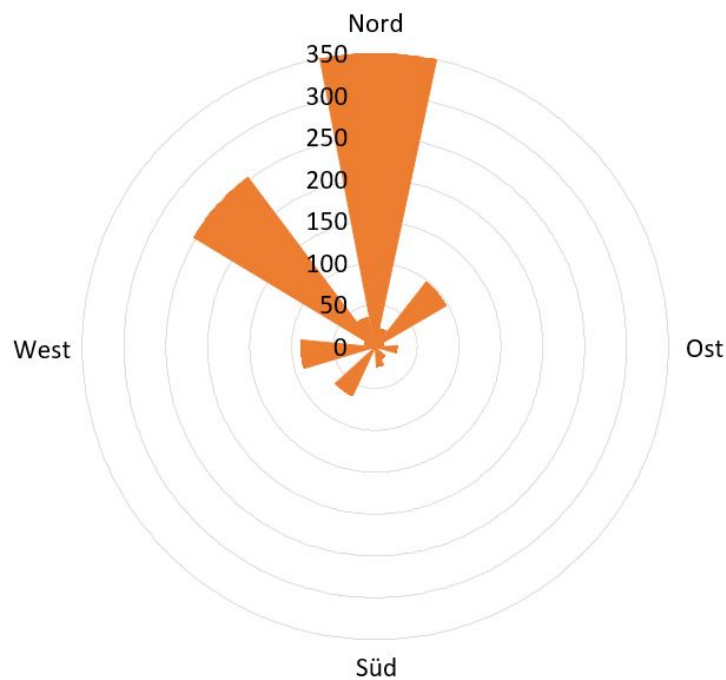


Abbildung 4.5: Windrichtungen im Zeitraum der Planet C Beta vom 27.08.2021 bis zum 30.08.2021. Aufgetragen ist die Anzahl der gemessenen Windrichtung bei einer Abtastung von 3 Minuten aufgetragen in einer Windrose.

Die Windgeschwindigkeit wurde ebenso aufgezeichnet. Abbildung 4.6 zeigt die Windgeschwindigkeit über den gesamten Planet C Beta Verlauf. Die Aufzeichnungsrate der Wetterdaten war zu Beginn des Festivals auf 30 Minuten eingestellt. Am 28.08.21 etwa um 12 Uhr wurde dies bemerkt und auf drei Minuten verkürzt. Dadurch erklärt sich das Unterschiedliche Aussehen des Graphs vor und nach diesem Zeitpunkt. Das Verbinden der einzelnen Abtastpunkte dient hierbei der besseren Veranschaulichung und soll nicht suggerieren, dass Informationen zwischen den Abtastpunkten vorgelegen haben.

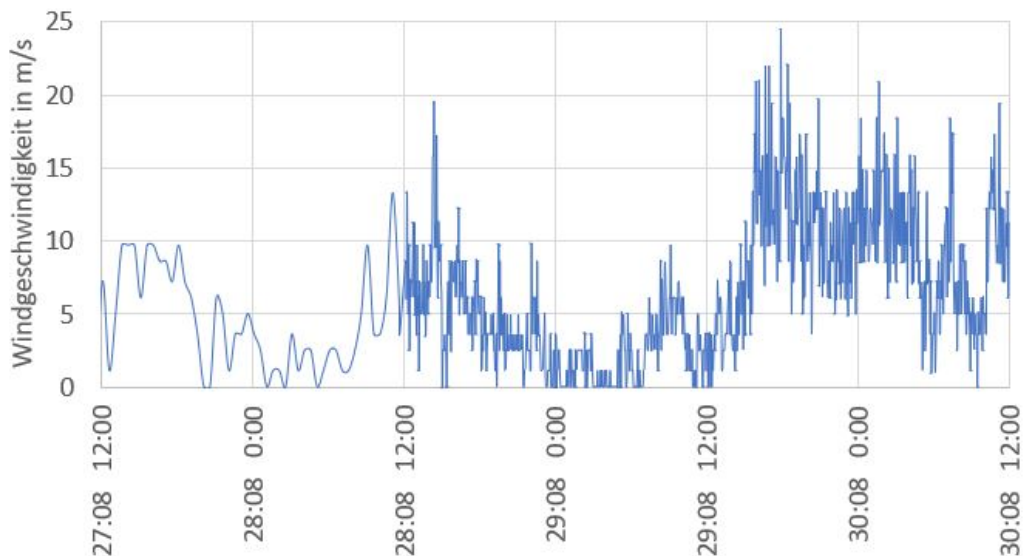


Abbildung 4.6: Windgeschwindigkeit auf dem Plan:et C Beta Festival.

4.4 Frequenzspektren der Spielstätten

An zwei Tagen wurden die Frequenzspektren an der Seebühne und der Turmbühne aufgezeichnet. Hierfür wurde ein NTi Audio XL2 mit M2230 Klasse 1 Messmikrofon verwendet. Es wurde der ungewichtete Schalldruckpegel in Terzband Auflösung aufgezeichnet. Das Log-Intervall betrug eine Sekunde. Abbildung 4.7 zeigt ein solches gemessenes Frequenzspektrum. Es wurden zwei Minuten etwa mittig im Zuschauerraum aufgezeichnet. Jede Linie stellt dabei alle geloggteten Terzbandwerte für eine Sekunde da. Es sei dabei darauf hingewiesen, dass die gemessenen Schalldruckpegel der angegebenen Frequenzbänder korrekterweise als Säulen oder Punkte dargestellt werden müssten, da keine Informationen zu den Frequenzen zwischen den Terzbändern vorliegen. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit und des intuitiveren Verständnisses wurden dennoch Linien verwendet, welche die einzelnen Messwerte verbinden. Fett in Rot dargestellt ist der Mittelwert. Deutlich ist zu sehen wie einige Linien im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und etwa 315 Hz weit unter dem Mittelwert liegen. Dies ist auf Passagen im DJ-Set zurückzuführen in welchen es wenig Bassanteile gab.

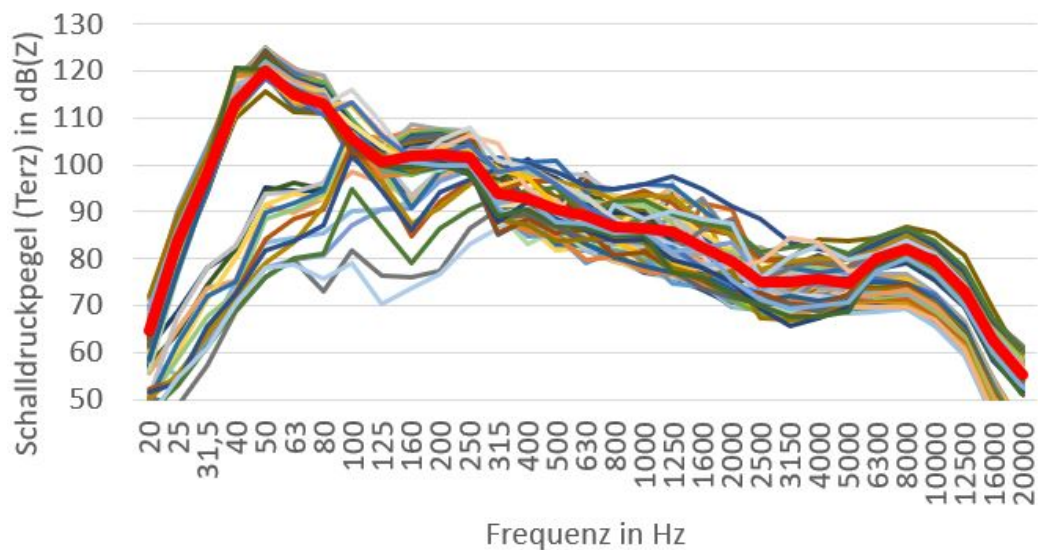


Abbildung 4.7: Frequenzspektrum mit drittel Oktav Auflösung während Auftritt "Carbon" am 29.08.21 auf der Turmbühne

Dieses Verfahren wurde für die schallemissionsrelevantesten Bühnen, Turmbühne und Seebühne jeweils zweimal angewandt. Abbildung 4.8 zeigt die Mittelwerte der vier Messungen der Emissionsspektren, sowie in dick und rot dargestellt das für die Simulation in Soundplan verwendete Emissionsspektrum "elektronische Musik". Weitere Emissionsspektren sowie weiterführende Literatur findet sich in [1] und [14]. Ebenso wie in Abbildung 4.7 gilt die Anmerkung, dass die Darstellung als Liniendiagramm nur zur intuitiveren Vergleichbarkeit verwendet wurde. Die Schalldruckpegel liegen nur in Terzbandauflösung vor.

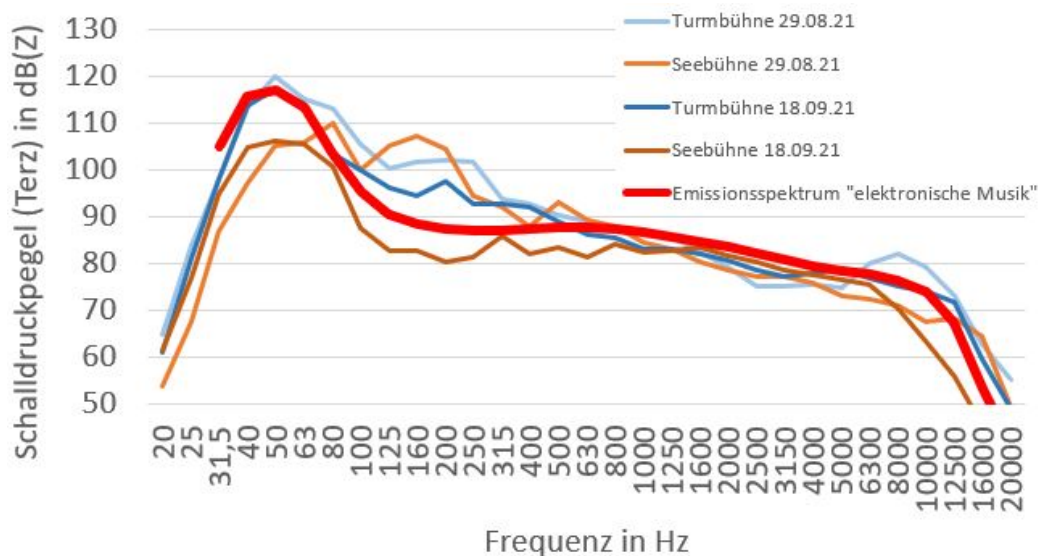


Abbildung 4.8: Emissionsspektren der Turmbühne und der Seebühne im Vergleich zu dem Emissionsspektrum "elektronische Musik" in Soundplan

4.5 Richtwirkung der Turmbühne

Die Turmbühne als größte und emissionsstärkste Bühne wurde bezüglich des Emissionsverhaltens in besonderer Weise untersucht. Unter 3.4.2 wurde der Aufbau der Turmbühne bereits erläutert, weshalb hier nicht noch einmal darauf eingegangen wird. Im laufenden Betrieb wurde ein Halbkreis um die Turmbühne abgelaufen und die aufgenommenen Terzbandwerte aufgezeichnet. Abbildung 4.9 zeigt ein Polardiagramm in welchem diese Werte dargestellt sind. Zur besseren Übersicht wurden die Terzbandwerte in drei Gruppen zusammengefasst. 20 Hz bis 125 Hz welche den tieffrequenten Bereich repräsentieren, 160 Hz bis 1600 Hz für den Mittenbereich und 2000 Hz bis 20000 Hz für den Hochtonbereich. Die Terzbänder der drei Gruppen wurden jeweils gemittelt und auf 0 dB(Z) normiert. Zu sehen sind diverse sprunghafte Änderungen des Schallpegels, welche auf unterschiedliche Musikpassagen zurückzuführen sind. Hierbei liegt auch die größte Schwäche dieser Untersuchung. Aussagekräftiger wäre ein konstantes und bekanntes Signal wie beispielsweise ein rosa Rauschen oder Sweeps gewesen. Dennoch kann versucht werden Schlüsse aus dieser Messung zu ziehen. Der sprunghafte Abfall und Anstieg der tiefen Frequenzen zwischen 65° und 120° deuten auf eine Passage mit wenig Bassanteil hin. Oft wechseln sich bei elektronischer Musik ähnlich klingende Passagen mit und ohne Bassanteil ab. Daher ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass das Frequenzspektrum vor und nach diesem bassarmen Teil ähnlich

ist. Bei 0° bis etwa 30° ist der Bassanteil relativ konstant und nimmt dann ab. Bei 45° ist der Bassanteil um etwa -6 dB gedämpft. Bei 90° lässt sich, wie erläutert, keine Aussage dazu treffen. Ab 120° , wo der Bass wieder einsetzt, beträgt die rückwertige Dämpfung -12 dB und bei 180° beträgt sie ca. -15 dB. Die mittleren und hohen Frequenzen werden hinten stärker gedämpft als die tiefen Frequenzen.

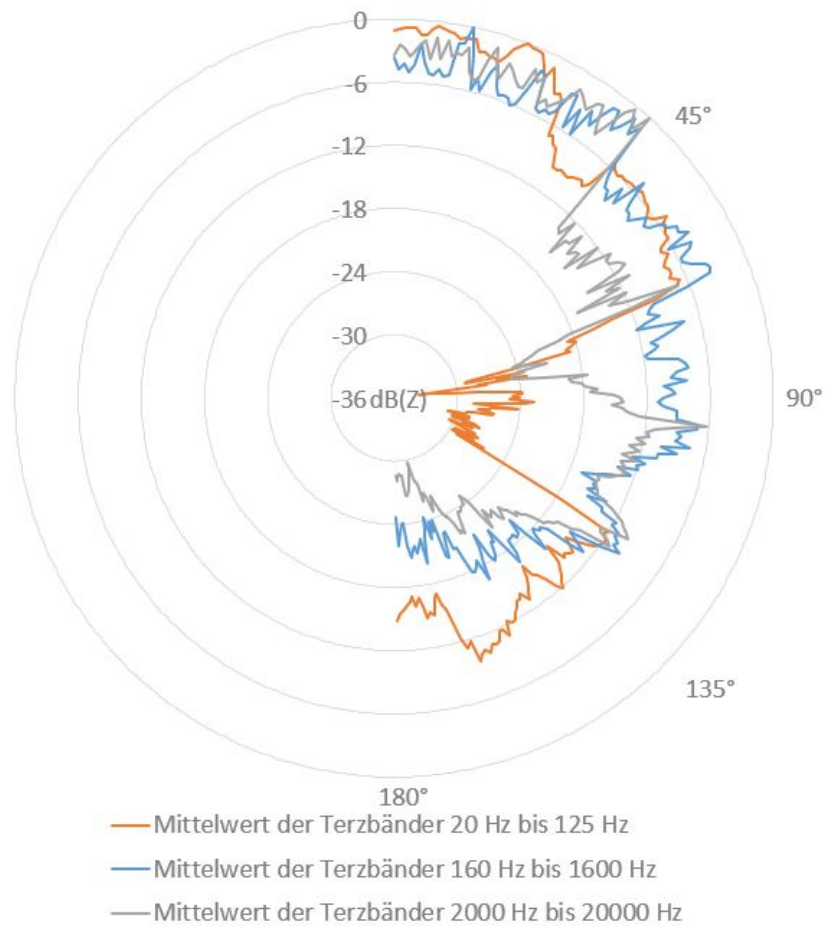


Abbildung 4.9: Aufgezeichnete Amplituden von drei Frequenzbereichen im Halbkreis um die Turmbühne im Livebetrieb

5. Bewertung der Simulation anhand der Messwerte

Um die Simulation zu bewerten, wurden verschiedene Zeitpunkte gewählt zu welchen gute Aussagen über das Emissionsverhalten einzelner Bühnen getroffen werden können. Hierzu gehören:

- 28.08.2021 von 03:00 Uhr bis 04:00 Uhr da in dieser Zeit alle Bühnen außer der Turmbühne gespielt haben.
- 28.08.2021 von 06:00 Uhr bis 07:00 Uhr da in dieser Zeit nur die Turmbühne und die Dubstation gespielt haben.
- 29.08.2021 von 03:00 Uhr bis 04:00 Uhr da in dieser Zeit alle Bühnen gespielt haben.
- 29.08.2021 von 13:00 Uhr bis 14:00 Uhr da in dieser Zeit nur die Dubstation gespielt hat.

Für den gesamten Spielplan des Plan:et C Beta siehe Anhang A.4 und A.5. Als zu vergleichende Größe wurde der energieäquivalente Dauerschalldruckpegel für den Beurteilungszeitraum einer Stunde gewählt. Ebenso wurde darauf geachtet, dass es in den betrachteten Zeitspannen keinen Wechsel der Künstler gab. Zusätzlich wurde darauf geachtet, hauptsächlich Zeiträume in den frühen Morgenstunden miteinander zu vergleichen, da die Einwirkung von Fremdgeräuschen geringer ist als Tagsüber. Es fahren beispielsweise weniger Autos auf den Straßen und auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Messwerte durch Gartenarbeit, Vogelgezwitscher und Baustellen beeinflusst werden ist geringer. Die nachfolgenden Schallpegelwerte sind ohne die Zuschläge für Impulshaltigkeit und Informationshaltigkeit angegeben. Diese müssen in Genehmigungen und schalltechnischen Gutachten beachtet werden, daher sind sie hier kurz erwähnt: Über den Zeitraum des Festivals wurde an den drei relevantesten Immissionsorten eine durchschnittliche Impulshaltigkeit von $K_i(h) = 3,4$ dB(A) mit einer Standardabweichung von $\pm 1,5$ dB(A) gemessen. Die Informationshaltigkeit wird von dem Gutachter am Immissionsort bestimmt. Da

an den Immissionsorten nur ein diffuses "Wummern" zu hören war, wird die Informationshaltigkeit als 0 dB(A) angenommen. Diese Zuschläge spielen in der folgenden Verifikation der Simulation keine Rolle.

5.1 Samstag 28.08.2021 von 03:00-04:00 Uhr

Der Zeitpunkt in den frühen Morgenstunden am Samstag wurde gewählt, da zu dieser Zeit alle Bühnen bereits gespielt haben, außer der Turmbühne. Für die Immissionsorte Granzow und Rechlin liegen keine Werte vor, da dort keine stationären Messpunkte eingerichtet wurden. Beide Immissionsorte sind aufgrund ihrer Entfernung zum Festivalgelände weniger relevant als die verbleibenden drei. Es gibt eine Abweichung zwischen den berechneten Schallpegeln an den Immissionsorten und den Rasterlärnkarten. Teilweise befinden sich die Immissionsorte in einem anderen Schallpegelbereich wie sie laut den berechneten Immissionsorten sein sollten. Dies liegt daran, dass die Berechnung der Rasterlärnkarten ungenauer ist als die Berechnung der einzelnen Immissionsorte. Je kleiner das Raster der Rasterlärnkarte desto größer die benötigte Rechenzeit, da auch mehr Punkte berechnet werden. Hierbei wurde ein Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenzeit gewählt.

	$L_{Aeq}(h)$ gemessen	$L_{Aeq}(h)$ NORD2000	$L_{Aeq}(h)$ DIN 9613-2
IO1 Granzow	-	24,9 dB(A)	23,9 dB(A)
IO2 Lärz	43,4 dB(A)	41,1 dB(A)	37,4 dB(A)
IO3 Vietzen	38,5 dB(A)	31,6 dB(A)	38,8 dB(A)
IO4 Rechlin	-	30,2 dB(A)	35,3 dB(A)
IO5 Retzow	39,6 dB(A)	41,2 dB(A)	41,2 dB(A)
Turmbühne	-		
Seebühne	91,4 dB(A)		
Haupttresen	86,7 dB(A)		
Dubstation	88,1 dB(A)		

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit: 2,4 m/s

Durchschnittliche Windrichtung: Nordost

Durchschnittliche Temperatur: 13,4°C

Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit: 98%

Durchschnittlicher absoluter Luftdruck: 1007,4 mBar

Granzow als Immissionsort der deutlich weiter entfernt ist als die übrigen, weist den niedrigsten Schallpegel auf. Dieser Wert wäre, sofern wahre Messungen vorliegen würden, aufgrund von Fremdgeräuschen deutlich höher. Die

berechneten Schallpegelwerte in Retzow stimmen, sowohl untereinander als auch mit dem wahren Messwert, sehr gut überein. In Vietzen gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen NORD2000 und DIN 9613-2. Die DIN 9613-2 gibt ein Ergebnis, welches nah an dem gemessenen Wert liegt. In Lärz ist dafür NORD2000 näher am realen Wert.

Abbildung 5.1 zeigt die erste von acht Rasterlärnkarten. Sie wurde entsprechend der Schallpegelwerte aus obenstehender Tabelle nach der DIN 9613-2 berechnet. Abbildung 5.2 zeigt die gleiche Zeitspanne, berechnet mit der Berechnungsvorschrift NORD2000. Die DIN 9613-2 berücksichtigt Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und den Luftdruck. Die DIN 9613-2 geht immer von Mitwindausrichtung zwischen Quelle und Empfänger aus. Die NORD2000 berücksichtigt die reale Windgeschwindigkeit und Windrichtung. In beiden Abbildungen ist zu sehen, dass die Immissionsorte weit von dem nächtlichen Grenzwert von 55 dB(A) (Übergang von Gelb auf Hellgrün) entfernt sind. Wie bereits erwähnt handelt es sich bei den angezeigten Pegelwerten um den energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel über den Beurteilungszeitraum einer Stunde $L_{Aeq}(h)$. Daher muss, um eine Aussage über den genehmigungsrelevanten Beurteilungspegel L_r treffen zu können, die Impuls- und Informationshaltigkeit addiert werden. Werden die Rasterlärnkarten von DIN 9613-2 und NORD2000 miteinander verglichen, kann in allen Beispielen, trotz gleichem Raster, ein höheres Detailreichtum festgestellt werden.

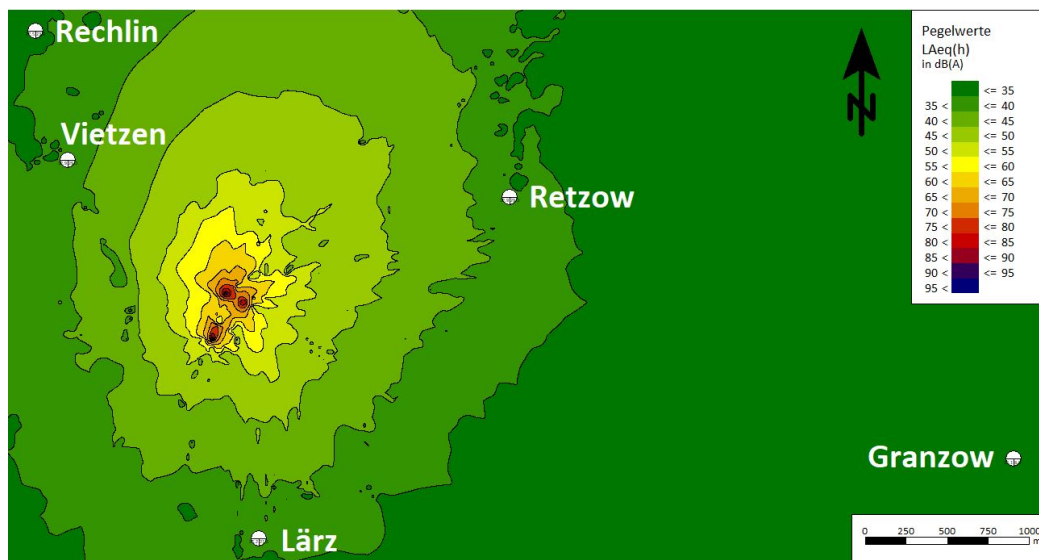


Abbildung 5.1: Rasterlärnkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Samstag 28.08.2021 03:00-04:00 Uhr

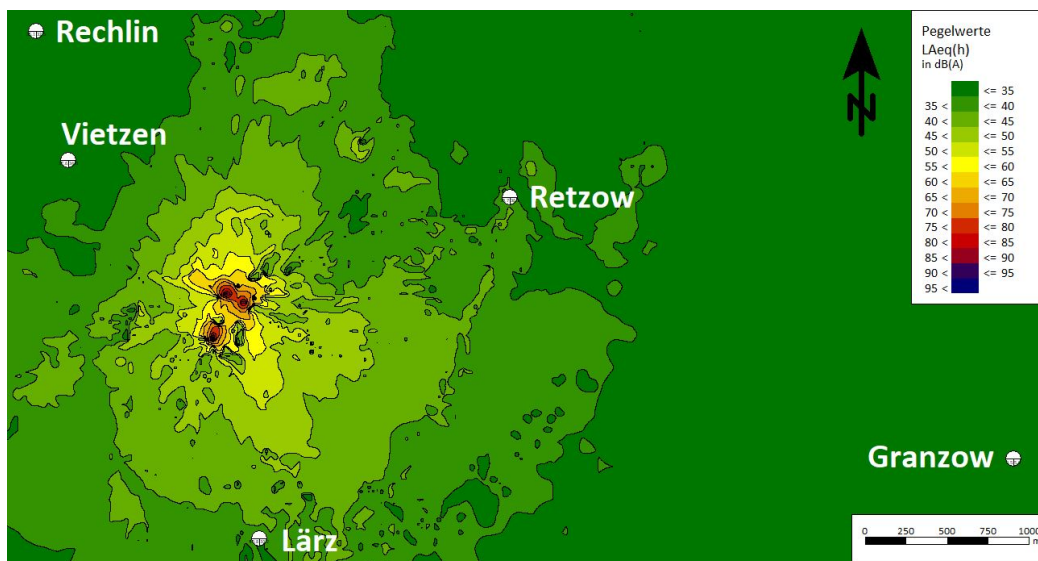


Abbildung 5.2: Rasterlärnkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immisionsorten nach NORD2000 von Samstag 28.08.2021 03:00-04:00 Uhr

5.2 Samstag 28.08.2021 von 06:00-07:00 Uhr

Die Turmbühne begann erst Samstagmorgen um 06:00 Uhr zu spielen. Zu diesem Zeitpunkt unterbrach gleichzeitig die Seebühne ihren Spielbetrieb. Daher kann zu diesem Zeitpunkt eine gute Aussage über den Einfluss der Turmbühne auf das Emissionsgeschehen getroffen werden. Der Schallpegel der Seebühne wurde in nachfolgender Tabelle in Klammern angegeben. Dies bedeutet, dass obwohl die Bühne nicht spielte, Messwerte vorliegen. Diese wurden jedoch nicht als Quelle in die Simulation eingepflegt.

	$L_{Aeq}(h)$ gemessen	$L_{Aeq}(h)$ NORD2000	$L_{Aeq}(h)$ DIN 9613-2
IO1 Granzow	-	38,1 dB(A)	40,9 dB(A)
IO2 Lärz	47,9 dB(A)	42,3 dB(A)	42,9 dB(A)
IO3 Vietzen	41,7 dB(A)	39,0 dB(A)	41,5 dB(A)
IO4 Reclin	-	38,3 dB(A)	39,0 dB(A)
IO5 Retzow	45,7 dB(A)	47,1 dB(A)	50,8 dB(A)
Turmbühne	99,0 dB(A)		
Seebühne	(62,7 dB(A))		
Haupttresen	83,0 dB(A)		
Dubstation	84,0 dB(A)		

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit: 2,0 m/s
Durchschnittliche Windrichtung: Südwest
Durchschnittliche Temperatur: 13,9°C
Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit: 93%
Durchschnittlicher absoluter Luftdruck: 1007,4 mBar

An den Werten in Granzow lässt sich der große Einfluss der Turmbühne erkennen. Dies liegt daran, dass die Turmbühne etwa in Richtung Granzow ausgerichtet war. Die Werte in Lärz sind etwa fünf Dezibel niedriger als die gemessenen. Die berechneten Schallpegel in Vietzen stimmen beide gut mit den gemessenen Werten überein. Interessant ist hierbei, dass in der vorherigen Tabelle in Unterkapitel 5.1 nur die Werte der DIN 9613-2 gut mit den wahren Messwerten übereingestimmt haben. Die Windrichtungen, welche nur in der NORD2000 berücksichtigt werden, sind in Unterkapitel 5.1 und 5.2 genau entgegengesetzt. In Retzow stimmt die NORD2000 etwa mit dem gemessenen Wert überein, die DIN 9613-2 liefert erstmals ein um fünf Dezibel höheres Ergebnis.

Werden die Abbildungen 5.1 und 5.2 verglichen mit den Abbildungen 5.3 und 5.4 kann der Einfluss der Turmbühne gesehen werden. Ein Schallpegelanstieg, besonders in Spielrichtung nach Osten, ist deutlich erkennbar.

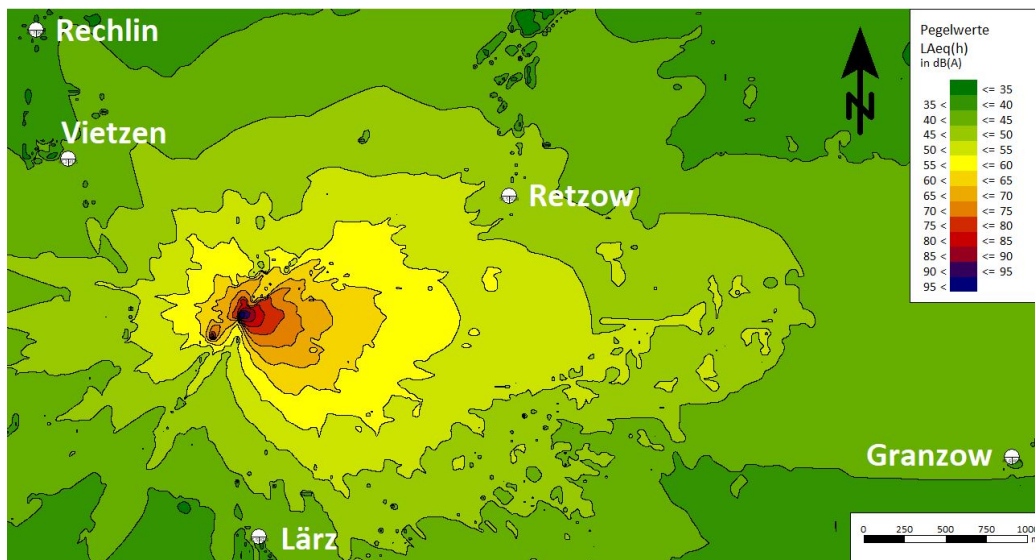


Abbildung 5.3: Rasterlärmmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Samstag 28.08.2021 06:00-07:00 Uhr

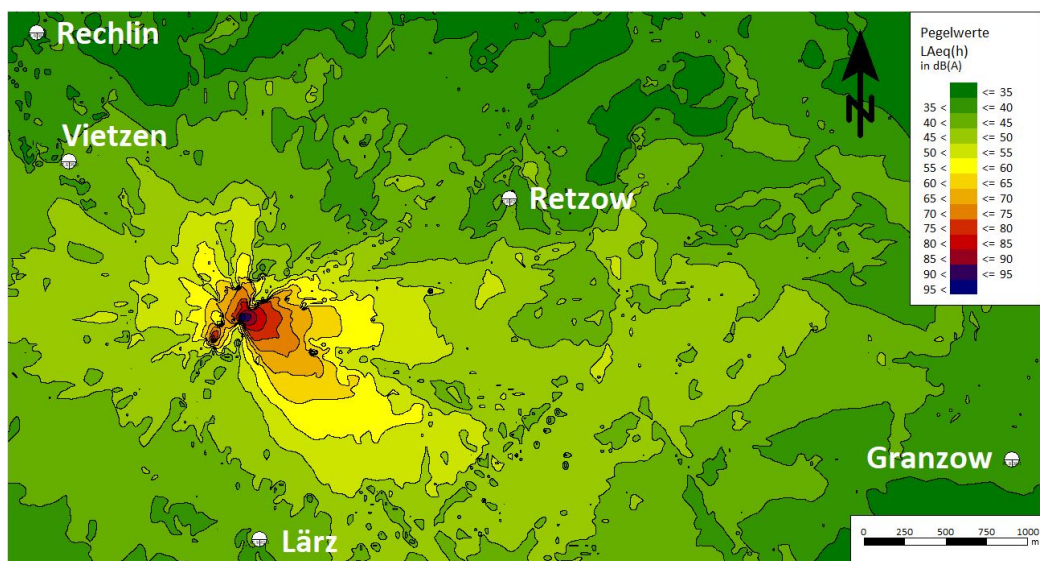


Abbildung 5.4: Rasterlärnkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immisionsorten nach NORD2000 von Samstag 28.08.2021 06:00-07:00 Uhr

5.3 Sonntag 29.08.2021 von 03:00-04:00 Uhr

Die frühen Morgenstunden des Sonntags wurden als Vergleichszeitpunkt gewählt, da alle Bühnen gespielt haben.

	$L_{Aeq}(h)$ gemessen	$L_{Aeq}(h)$ NORD2000	$L_{Aeq}(h)$ DIN 9613-2
IO1 Granzow	-	39,1 dB(A)	40,8 dB(A)
IO2 Lärz	43,1 dB(A)	42,7 dB(A)	43,3 dB(A)
IO3 Vietzen	40,8 dB(A)	41,2 dB(A)	43,8 dB(A)
IO4 Rechlin	-	40,6 dB(A)	40,8 dB(A)
IO5 Retzow	43,1 dB(A)	53,9 dB(A)	51,2 dB(A)
Turmbühne	98,9 dB(A)		
Seebühne	96,0 dB(A)		
Haupttresen	83,7 dB(A)		
Dubstation	-		

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit: 0,3 m/s

Durchschnittliche Windrichtung: Nordwest

Durchschnittliche Temperatur: 14,8°C

Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit: 99%

Durchschnittlicher absoluter Luftdruck: 1007,3 mBar

Die berechneten Schallpegelwerte in Granzow bleiben im Vergleich zu Unterkapitel 5.2 nahezu unverändert. Die Seebühne hat in dieser Konstellation keinen nennenswerten Einfluss auf den Schallpegel in Retzow. Das bedeutet, dass an diesem Immissionsort nur die Turmbühne wahrgenommen werden kann. Dieses Phänomen wurde bereits in Unterkapitel 2.2.1 erläutert. Die gemessenen und berechneten Schallpegelwerte in Lärz stimmen gut überein. Interessant hierbei ist, dass in vorheriger Tabelle noch ein Unterscheid von fünf Dezibel zwischen berechneten und gemessenen Werten bestand. Eine mögliche Erklärung ist, dass in Unterkapitel 5.2 in der Zeit von 06:00 bis 07:00 Uhr bereits mehr Fremdgeräusche die Messwerte beeinflusst haben. Die Werte in Vietzen stimmen, ebenso wie die in Lärz, gut miteinander überein. Retzow wird von beiden Berechnungsvorschriften deutlich zu laut simuliert. Dies könnte für einen zu großen Einfluss der Turmbühne in der Simulation an diesem Immissionsort sprechen, da in Unterkapitel 5.1, als die Turmbühne noch nicht spielte, die Werte noch gut übereingestimmt haben. Die Abbildungen 5.5 und 5.6 zeigen das Emissionsverhalten, wenn alle Bühnen spielen. Die Seebühne weitet den Schallpegel in nordöstliche Richtung. Der Einfluss im Vergleich zur Turmbühne ist jedoch eher gering. Dies liegt an der kleineren Anlage aber auch an dem tendenziell geringeren Schallpegel im Zuschauerbereich mit welchem diese Bühne betrieben wurde.

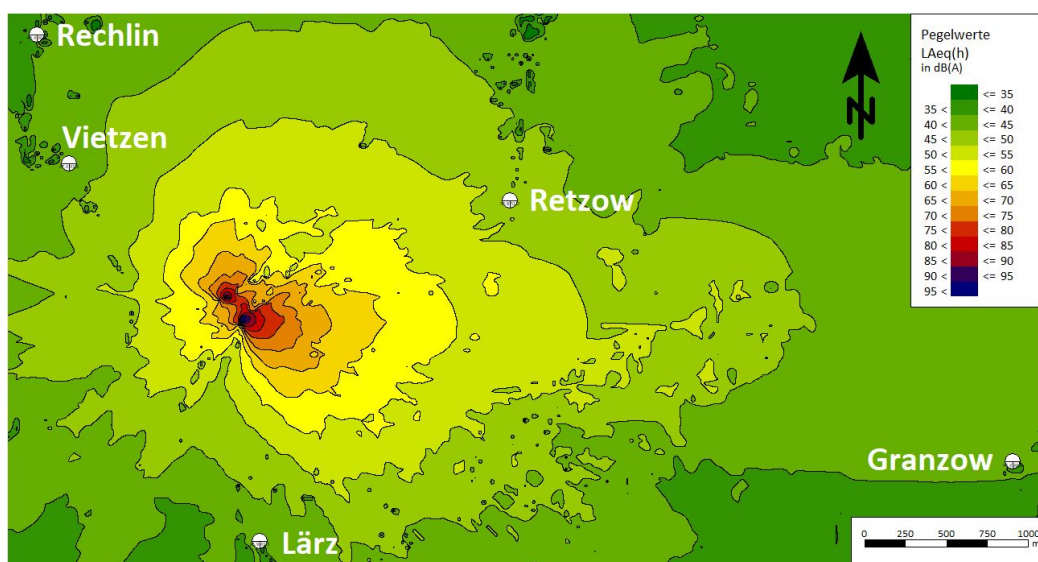


Abbildung 5.5: Rasterlärmmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Sonntag 29.08.2021 03:00-04:00 Uhr

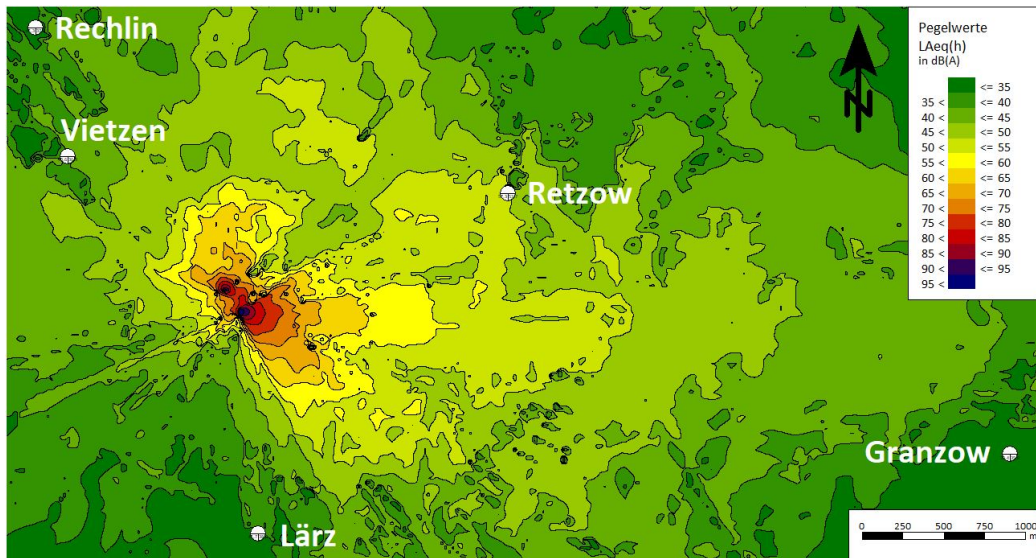


Abbildung 5.6: Rasterlärnkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immisionsorten nach NORD2000 von Sonntag 29.08.2021 03:00-04:00 Uhr

5.4 Sonntag 29.08.2021 von 13:00-14:00 Uhr

Wie bereits in Abbildung 4.2 auf Seite 43 dargestellt, gab es Sonntag von 12:00-14:00 Uhr eine Spielpause. Zu dieser Zeit war die Dubstation die einzige aktive Bühne. Es kann daher eine Aussage über den Grundschallpegel und einen Einfluss der Dubstation getroffen werden.

	$L_{Aeq}(h)$ gemessen	$L_{Aeq}(h)$ NORD2000	$L_{Aeq}(h)$ DIN 9613-2
IO1 Granzow	-	5,9 dB(A)	8,5 dB(A)
IO2 Lärz	46,4 dB(A)	10,2 dB(A)	21,6 dB(A)
IO3 Vietzen	43,9 dB(A)	34,0 dB(A)	29,3 dB(A)
IO4 Rechlin	-	32,5 dB(A)	23,9 dB(A)
IO5 Retzow	51,3 dB(A)	36,1 dB(A)	29,3 dB(A)
Turmbühne	-		
Seebühne	(61,4 dB(A))		
Haupttresen	(72,4 dB(A))		
Dubstation	88,3 dB(A)		

Durchschnittliche Windgeschwindigkeit: 4,6 m/s
 Durchschnittliche Windrichtung: Nordnordwest
 Durchschnittliche Temperatur: 17,5°C

Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit: 87%
Durchschnittlicher absoluter Luftdruck: 1006,8 mBar

Während der Ruhepause am Sonntagmittag spielte nur die Dubstation, welche durch die kleine Anlage und den verhältnismäßig niedrigen Schallpegel für die Immissionsorte kaum eine Rolle spielte. Anhand dieser Zeitspanne kann versucht werden eine Aussage über die Umgebungsgeräusche zu treffen. Auffällig ist, dass die gemessenen Schallpegelwerte in Retzow deutlich über den Werten aus Lärz und Vietzen liegen. Dies kann durch die Nähe zur Straße erklärt werden. Die Schallpegelmessgeräte in Vietzen und Lärz waren aufgrund ihrer Position weniger anfällig für Störgeräusche der naheliegenden Straßen. Die Fremdgeräusche bewegen sich, anhand dieser Tabelle, zwischen 43,9 dB(A) in Vietzen und 51,3 dB(A) in Retzow. Daran kann gesehen werden, dass es teilweise notwendig ist die Messwerte durch Kontrollen zu überprüfen. Nicht immer sind Pegelüberschreitungen an Immissionsorten die Schuld des Festivals.



Abbildung 5.7: Rasterlärmmkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immissionsorten nach DIN 9613-2 von Sonntag 29.08.2021 13:00-14:00 Uhr

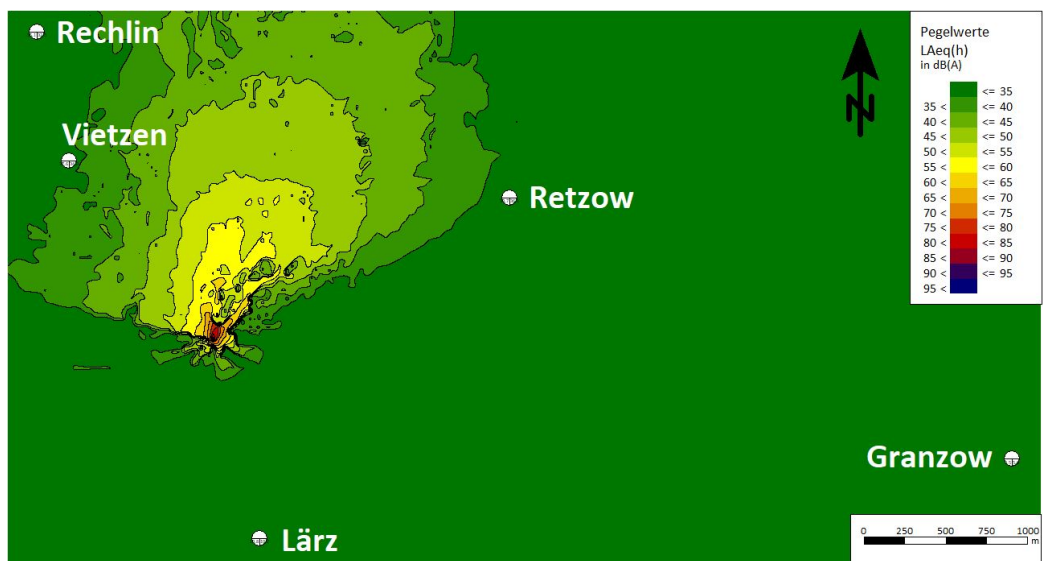


Abbildung 5.8: Rasterlärnkarte des KuKo-Geländes mit umliegenden Immis-
sionsorten nach NORD2000 von Sonntag 29.08.2021 13:00-14:00 Uhr

6. Zusammenfassung und Ausblick

Wie im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt wird, können Simulationstools sowohl dafür verwendet werden die schalltechnische Abdeckung des Zuschauerraumes zu optimieren als auch die Ausbreitung des Schalls auf umliegende Immissionsorte abzuschätzen. Mit diesen Mitteln kann viel "Trial and Error" durch sinnvolle, günstigere und schnellere Planung ersetzt werden. Die Erläuterung unterschiedlicher Lautsprecherarten und -aufbauten ermöglicht die Einschätzung der Tauglichkeit von Lautsprechersystemen. Der Einblick in Normen, Richtlinien und Verordnungen bezüglich der zulässigen Schallpegelbelastung von Anwohner:innen, Beschäftigten und Besucher:innen in Verbindung mit Grundlagen zur Schallpegelmessung sollen die "Pegelcrew" befähigen das Festivalgelände dahingehend zu überwachen und wo nötig kompetent einzugreifen. Da im Rahmen dieser Arbeit nur das kleinere Planet C Festival mit deutlich weniger Besucher:innen und Spielstätten als das Fusion Festival untersucht wurde besteht einer der nächsten Schritte darin, die Simulation auf die volle Größe der Fusion zu erweitern. Die weitere Schulung der Pegelcrew und eine stärkere Identifikation mit der Arbeit der Schallpegelmessung steht für mich im Mittelpunkt der Fusion 2022. Einige Richtwirkungsmessungen der Bühnen welche sich im Nachgang aufgrund gravierender Schwachstellen als untauglich für diese Arbeit herausgestellt haben, sollen in optimierter Art wiederholt werden. Im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses soll die Thematik dieser Arbeit von Jahr zu Jahr weitergeführt werden.

Literatur

- [1] Akustik Bureau Dresden Dr. Roy + Dr. Ederer. *Sächsische Freizeitlärmstudie, Handlungsleitfaden zur Prognose und Beurteilung von Geräuschbelastungen durch Veranstaltungen und Freizeitanlagen*. April 2016.
- [2] *B6 Subwoofer von dBb Audiotechnik*. Zuletzt geprüft: 18.05.2022. URL: <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/y-serie/b6-sub/>.
- [3] Herbert Bernstein. *Elektroakustik: Mikrofone, Klangstufen, Verstärker, Filterschaltungen und Lautsprecher*. 2nd ed. 2019. ISBN: 978-3-658-25174-1.
- [4] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz. *Freizeitlärmrichtlinie der LAI*. März 2015. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/freizeitlaermrichtlinie_1503575715.pdf.
- [5] Elena Schabalina Daniel Belcher. *Schallimmissionsprognosen mit Beschallungsanlagen: Import und komplexe Addition*. Hrsg. von Akustik Journal 01/18. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/akustik-journal/18-01/akustik_journal_2018_01_online_artikel2.pdf.
- [6] DIN 15905-5. *Veranstaltungstechnik – Tontechnik – Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemmissionen elektroakustischer Beschallungstechnik*. November 2007.
- [7] *DIN ISO 9613-2 - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien*. Oktober 1999.
- [8] Dr. Joachim Lutz. *Musikfestivals und Musikfestspiele in Deutschland*. Hrsg. von Statistische Ämter des Bundes und der Länder. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung->

Forschung - Kultur / Kultur / Publikationen / Downloads - Kultur / musikfestivals-5216204179004.pdf?__blob=publicationFile.

- [9] Festival Fire, Hrsg. *Going Out.Side -Festivalumfrage*. URL: https://www.festivalfire.de/wp-content/uploads/dae-uploads/Going-Out.Side_-Festivalumfrage_by_FestivalFire_2019_S.pdf.
- [10] Douglas C. Giancoli. *Physik: Lehr- und Übungsbuch*. 3., aktualisierte Auflage. ph - Physik. München u. a.: Pearson Studium, 2010. ISBN: 978-3-8689-4023-7.
- [11] *Handbuch der Audiotechnik*. [Ausgabe in 2 Bänden]. Berlin und Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-34301-1.
- [12] Joseph Doran, Guangsheng Du, A. D. Lightstone. *Sound Propagation Modelling for Offshore Wind Farms*. Hrsg. von Ministry of the Environment and Climate Change Canada. Juni 2016.
- [13] Kulturkosmos Müritz e.V. *Eine Fusion 2021 ist möglich! Konzept für eine innovative Teststrategie*. Zuletzt geprüft: 18.05.2022. URL: <https://www.fusion-festival.de/de/x/testkonzept>.
- [14] Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie Sachsen. *Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie*. 2018. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32823>.
- [15] *LärmVibrationsArbSchV*. März 2007. Zuletzt geändert: Juli 2021. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/l_rmvibrationsarbschv/index.html.
- [16] *Mini Tapped Horn Subwoofer*. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: <https://www.freespeakerplans.com/plans/14-plans/basscab/24-mth-30>.
- [17] Ministeriums für Bau, Landesentwicklung und Umwelt. *Richtlinie zur Beurteilung der von Freizeitanlagen verursachten Geräusche (Freizeitlärm-Richtlinie) in Mecklenburg - Vorpommern*. Hrsg. von Ministeriums für Bau, Landesentwicklung und Umwelt.
- [18] PricewaterhouseCoopers GmbH, Hrsg. *German Entertainment and Media Outlook 2020-2024: Fakten, Prognosen und Trends für 13 Segmente der Entertainment- und Medienbranche in Deutschland*. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: <https://www.pwc.de/de/technologie-medien-und-telekommunikation/german-entertainment-and-media-outlook-2020-2024.html>.

- [19] *Richtlinie zur Beurteilung der von Freizeitanlagen verursachten Geräusche (Freizeitlärm-Richtlinie) in Mecklenburg - Vorpommern*. Juli 1998. Zuletzt geprüft: 27.05.2022. URL: https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/freizeitlaerm_richtlinie.pdf.
- [20] *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)*. August 1998. Zuletzt geprüft: 20.05.2022. URL: https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26081998_IG19980826.htm.
- [21] Gh. Reza Sinambari und Stefan Sentpali. *Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Übungen*. 6th ed. 2020. ISBN: 978-3-658-27289-0.
- [22] Statista GmbH, Hrsg. *Dossier über die Festival- und Musikeventbranche*. URL: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6508/dokument/festival-und-eventbranche-statista-dossier/>.
- [23] *The new QX Series Lambda Labs*. Zuletzt geprüft: 18.05.2022. URL: <https://www.lambda-labs.com/de/produkte/qx-3>.
- [24] *Visaton DK8 auf Thomann.de*. Zuletzt geprüft: 18.05.2022. URL: https://www.thomann.de/de/visaton_dk8.htm.

A. Anhang

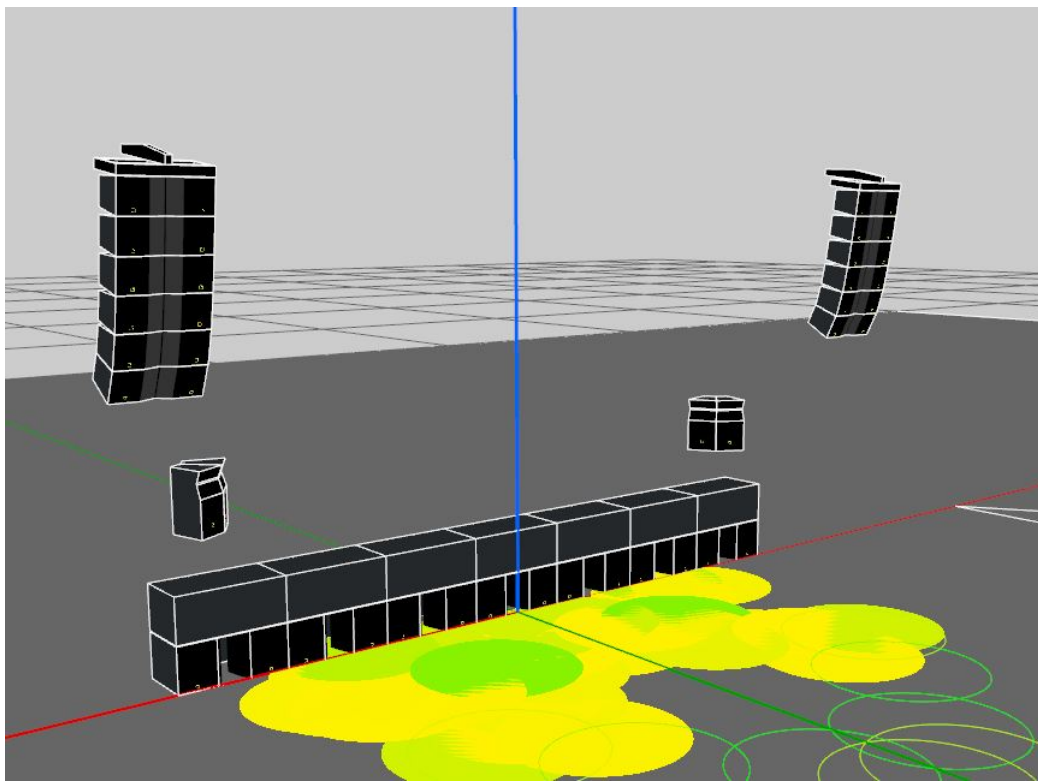


Abbildung A.1: Simulation der Seebühne in Soundvision.

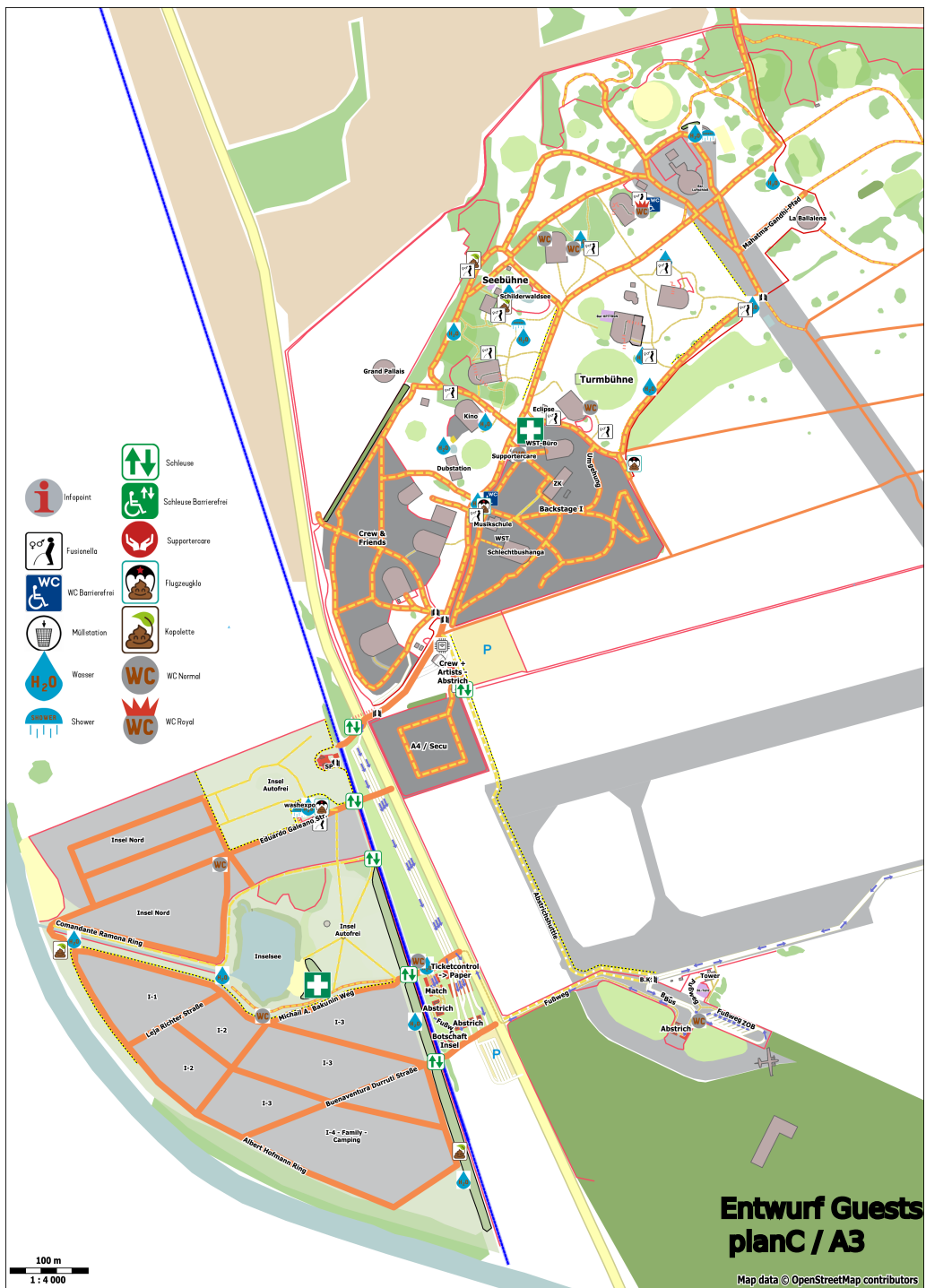


Abbildung A.2: Geländeplan des Plan:et C Festivals



Abbildung A.3: Seitenansicht des Luftschlosses.

T I M E T A B L E				
	TURMBÜHNE	SEEBÜHNE	LUFTSCHLOSS	DUBSTATION
16		Aka la Flaca		Nugget
17				
18		Los Bitchos		
19		Ravi Kuma	24/7 DIVA HEAVEN	
20				Schlammpeitziger
21		Krawalle & Liebe	Swutscher	Cherry Bandora
22				
23		Kummer	Ätna	Popov Marconi
00			MCR-T	
01		Freak de l'Afrique		Kerala Dust
02			DJ Mell G	Josephine Wedekind
03				
04		Slare feat. Wobrob	DJ Godfather	
05				
06				Fater & Morgana
07	Steve Bug			
08				
09	DJ Tennis			ISH
10				
11	Sarah Wild			mytripismytrip
12		Ali Schwarz		
13				Adrian vom Hove & Bob Sennrich
14	Carbon			
15		L.A. Salami		Wooden Peak
16	An On Bast			
17	Cioz	Kid Simius		Ayjo
18		Punani		
19	Stephan Zovsky		Alicia Edelweiss	Deliluh
20	Franca	Jackie Jackpot		
21			Neta Polturak & Band	
22	Kaufmann	Die P		Bayawaka
23			Die Wilde Jagd	

Abbildung A.4: Timetable des Plan:et C Beta 1. Teil

00	Ash Roy	Foil	Philo	AFAR
01		Mad Zach & Yunis	Fre4knc	Dela Moon
02	LUCINEE			
03		Sarah Farina	Dash	Murmel
04	Joel Mull			
05		audite	Yorobi	
06	Joseph Disco		Elke	So'Ham
07		Oakin		
08	GORGE			
09		Kraftfuttermischwerk		Lotte Ahoi
10	Schlepp Geist			
11				Oh No Noh
12				
13				Pacaya
14	Rauschhaus	10 Mark DJ Team		
15	Katja Komorebi			X.ACute
16		Gina Sabatini	Blond	
17	Vrii			Costanza & Ai ris
18	Eulenhaupt & Mollezhauer	NOEMA	Olmo	
19				Die Reise
20	Teenage Mutants	RSS Disco	Aberra	
21				
22				Tai Rona
23		Sebastian Plano	Triálogos	
00			Tukan	Aerodice
01				
02			Question Mark	Schmeckefuchs
03				
04			Daniel Krau	
05				
06			Surreal	sutsche
07				
08			Sebastian Dalf	

Abbildung A.5: Timetable des Plan:et C Beta 2. Teil