



Lisa Kerle
Monika Steinbäck

SPL MONITORING TOOL AM CAMPUS INFFELDGASSE

Untersuchung der Schallausbreitung und Optimierung der
Überwachungsmethoden zur Minimierung der Lärmbelastung

TONINGENIEUR-PROJEKT

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
DI Eric Kurz

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Graz, Juni, 2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

Abstract

Over the last couple of years the campus Inffeldgasse of the Graz University of Technology has become one of the most popular open-air event locations for students. Events with electro-acoustic sound systems take place there several times a year, which, unfortunately, often causes complaints from residents. To counteract this problem, a sound pressure level monitoring station was installed in 2019, which should enable the organizers to better control the sound pressure level.

The aim of this work is to investigate the background of the complaints and to research the sound propagation on campus in more detail. By optimizing the positioning, as well as the permitted limit values, of the monitoring system, the least possible noise exposure in accordance with the statutory guidelines should be guaranteed.

In order to implement this, the relevant legal and acoustic fundamentals were researched and a simulation of the sound propagation on campus was carried out. The resulting outcome was then checked by measurement under real conditions.

The knowledge gained by comparing measurement and simulation provides a clear overview of the prevailing situation and serves as a basis for further work in this area. Furthermore this knowledge can be used to adapt the permitted limit values as well as the positioning of the monitoring system.

Kurzfassung

Der Campus Inffeldgasse der Technischen Universität Graz gehört seit vielen Jahren zu den beliebtesten Freiluftveranstaltungsstätten der Studierenden. Dort finden mehrmals im Jahr Veranstaltungen mit elektroakustischen Beschallungsanlagen statt, was leider des Öfteren für Beschwerden seitens der Anrainerschaft sorgt. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde 2019 eine Lärmüberwachungsstation installiert, welche den VeranstalterInnen eine gezielte Kontrolle der Schalldruckpegel ermöglichen soll.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Ursachen der Problematik zu untersuchen und die Schallausbreitung am Campus genauer zu erforschen. Damit sollen die Positionierung und die zulässigen Grenzwerte des Lärmüberwachungssystems optimiert werden, um den AnrainerInnen eine möglichst geringe Lärmbelastung im Sinne der gesetzlich vorgeschriebenen Richtlinien zu gewährleisten.

Um dies umzusetzen, wurden zunächst die entsprechenden gesetzlichen und akustischen Grundlagen recherchiert, sowie eine Simulation der Schallausbreitung am Campus durchgeführt. Die resultierenden Ergebnisse wurden anschließend unter realen Bedingungen messtechnisch überprüft. Die Erkenntnisse, die durch den Vergleich von Messung und Simulation erlangt wurden, verschaffen einen klaren Überblick der vorherrschenden Situation und dienen als Grundlage für weiterführende Arbeiten in diesem Bereich. Des Weiteren ermöglichen sie eine Korrektur der am Campus Inffeldgasse geltenden Grenzwerte sowie den Vorschlag einer Neupositionierung der Lärmmessstation.

Inhaltsverzeichnis

Eidstattliche Erklärung	III
Abstract	V
Kurzfassung	VII
1 Einleitung	11
2 Physikalische und rechtliche Grundlagen der Lärmüberwachung	13
2.1 Physikalische Grundlagen	13
2.1.1 Pegelangaben	13
2.1.2 Frequenzbewertung	13
2.1.3 Zeitbewertung	16
2.1.4 Beurteilungspegel L_r	16
2.1.5 Vergleich von $L_{A,eq}$ und L_r	17
2.2 Normen und Richtlinien im Bereich Lärmschutz	17
2.2.1 Häufigkeit der Veranstaltungen	18
2.2.2 Gesonderte Betrachtung des Bassbereichs	19
2.3 Resultierende Grenzwerte am Campus Inffeldgasse	20
3 Simulation der Schallausbreitung am Campus Inffeldgasse mit SoundPLAN	22
3.1 Implementierung	22
3.1.1 Grundeinstellungen und Modell des Gebiets	22
3.1.2 Definition der Schallquellen	23
3.1.3 Platzierung der Schallquellen	25
3.1.4 Definition der Immissionspunkte	26
3.2 SAL-Gebäude	27
3.2.1 Baugrube	28
3.3 Ergebnisse	29
3.3.1 Rasterlärmkarten	29
3.3.2 Schnittlärmkarten	37
3.3.3 Ergebnistabellen	41
4 Messung der Schallausbreitung am Campus Inffeldgasse	42
4.1 Lageplan	42
4.1.1 Position der Schallquellen	42
4.1.2 Immissionspunkte	43
4.1.3 Baustellenbereich am Campus Inffeldgasse	43
4.2 Verwendetes Equipment	44
4.2.1 Software ITA toolbox	45
4.3 Messvorgang	45
4.3.1 Probemessung	45
4.3.2 Voreinstellungen	45
4.3.3 Kalibrierung	46
4.3.4 Durchführung	46
4.4 Analyse der Messung	47
4.4.1 Mittelung über Immissionspunkte	47
4.4.2 Definition der Messobjekte	49
4.4.3 Darstellung im Zeitbereich	49
4.4.4 Darstellung im Frequenzbereich	49

4.4.5	Differenz der Spektren	49
4.5	Messergebnisse	50
4.5.1	Referenzimmissionspunkt x'_1	50
4.5.2	Referenzimmissionspunkt x'_2	51
5	Diskussion	52
5.1	SoundPLAN-Ergebnisse	52
5.2	Messergebnisse	53
5.3	Vergleich der Ergebnisse	54
5.3.1	Ermittlung der Immissionspektren	54
5.3.2	Differenz der Immissionspektren	55
5.3.3	Graphischer Vergleich	55
5.3.4	Analyse der Ergebnisse im Vergleich	58
5.4	Prognose mit SAL-Gebäuden	58
5.5	Überprüfung der Bedingung $L_{C,eq} - L_{A,eq} < 10$ dB	61
5.5.1	Differenzen verschiedener Musikrichtungen im Vergleich	62
5.5.2	Alternative Position zur Lärmüberwachung	63
5.6	Festlegung der Grenzwerte für VeranstalterInnen	63
6	Fazit	65
7	Anhang	67
7.1	Ergänzung zu Kapitel 3	67
7.1.1	Rasterlärnkarten	68
7.1.2	Ergebnistabellen	74
7.2	Ergänzung zu Kapitel 4	75
7.2.1	Frequenzgang Messmikrofon NTi M2230	75
7.2.2	Durchführung und Analyse der Messung	75
7.2.3	Mittelung an Immissionspunkt x'_5	78
7.3	Ergänzung zu Kapitel 5	79
7.3.1	Ermittlung des Gesamtschalldruckpegels	79
7.3.2	Immissionspektren aus Simulation und Messung	80
7.3.3	Differenz der Immissionspektren	83

1

Einleitung

Auf dem Campus Inffeldgasse der Technischen Universität Graz finden vor allem im Frühling und Sommer regelmäßig Veranstaltungen im Freien statt, die großteils von Studierenden der TU Graz veranstaltet werden. Nicht selten handelt es sich dabei um Musikveranstaltungen mit elektroakustischer Beschallung. Laut dem Veranstaltungskalender der TU Graz sowie der Recherche über die HTU¹ fanden im Jahr 2018 circa 30 und im Jahr 2019 circa 20 Veranstaltungen mit elektroakustischer Beschallung statt. Wie in Abbildung 1.1 erkennbar ist, umschließen die Universitätsgebäude den Veranstaltungsbereich und bilden weitgehend eine akustische Abschirmung zum umliegenden Wohngebiet, welches nördlich der Sandgasse beginnt.

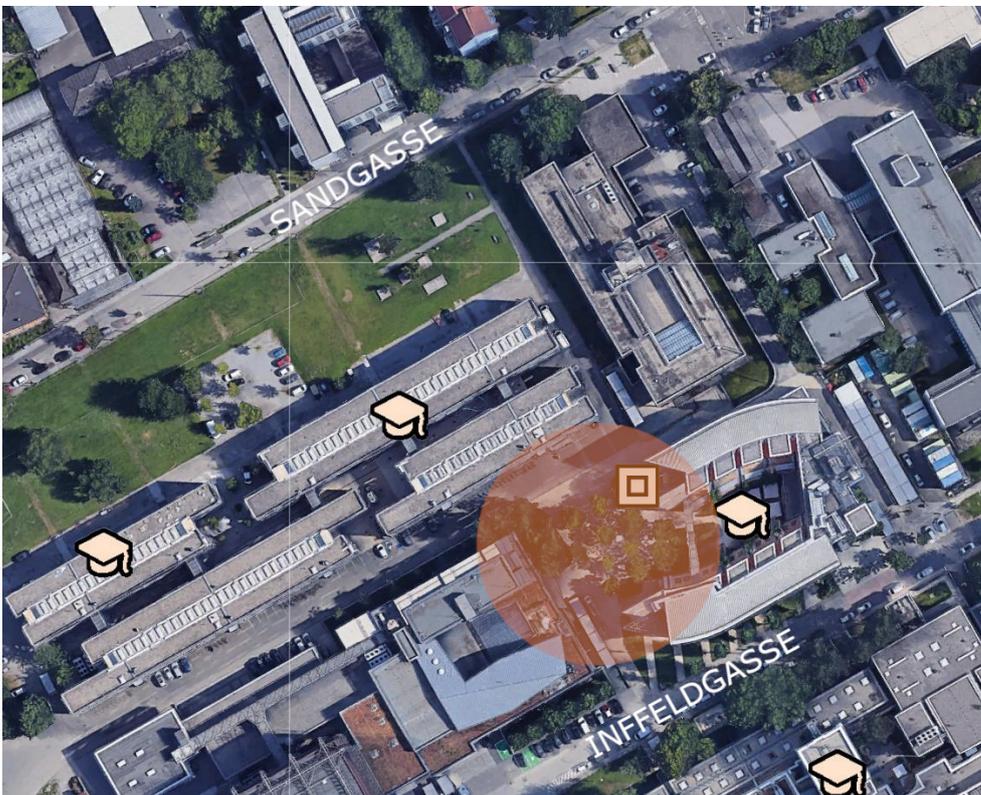


Abbildung 1.1: Die Universitätsgebäude umschließen den Veranstaltungsbereich des Campus Inffeldgasse (rot eingekreist) [1].

Da es bei den BewohnerInnen des umliegenden Wohngebiets aufgrund des Veranstaltungslärms vermehrt zu Beschwerden kam, beschloss die TU Graz im Jahr 2019 in Zusammenarbeit mit der Stadt Graz, ein Lärmüberwachungssystem der Firma Svantek einzurichten, welches bei einer Stadtteilversammlung im Juni 2019 präsentiert wurde [2], [3]. Anhand der Lärmüberwachung wurde deutlich, dass besonders die BewohnerInnen der Häuser 25 bis 47 in der Sandgasse betroffen sind. Resultierend aus Messungen am Campus wurde ein Messmikrofon am Dach des Gebäudes Inffeldgasse 12 installiert, das die Schallpegel immerwährend aufzeichnet. Die Daten

¹ HochschülerInnenschaft der TU Graz

werden über eine Software analysiert und können online über eine Website eingesehen werden (vgl. Abb. 1.2). Ziel ist es, die VeranstalterInnen zu verpflichten, den Schalldruckpegel zu überwachen und diesen gegebenenfalls zu reduzieren. Dadurch kann der erlaubte Immissions-schallpegel an den Fassaden der Wohnhäuser der Sandgasse eingehalten werden.

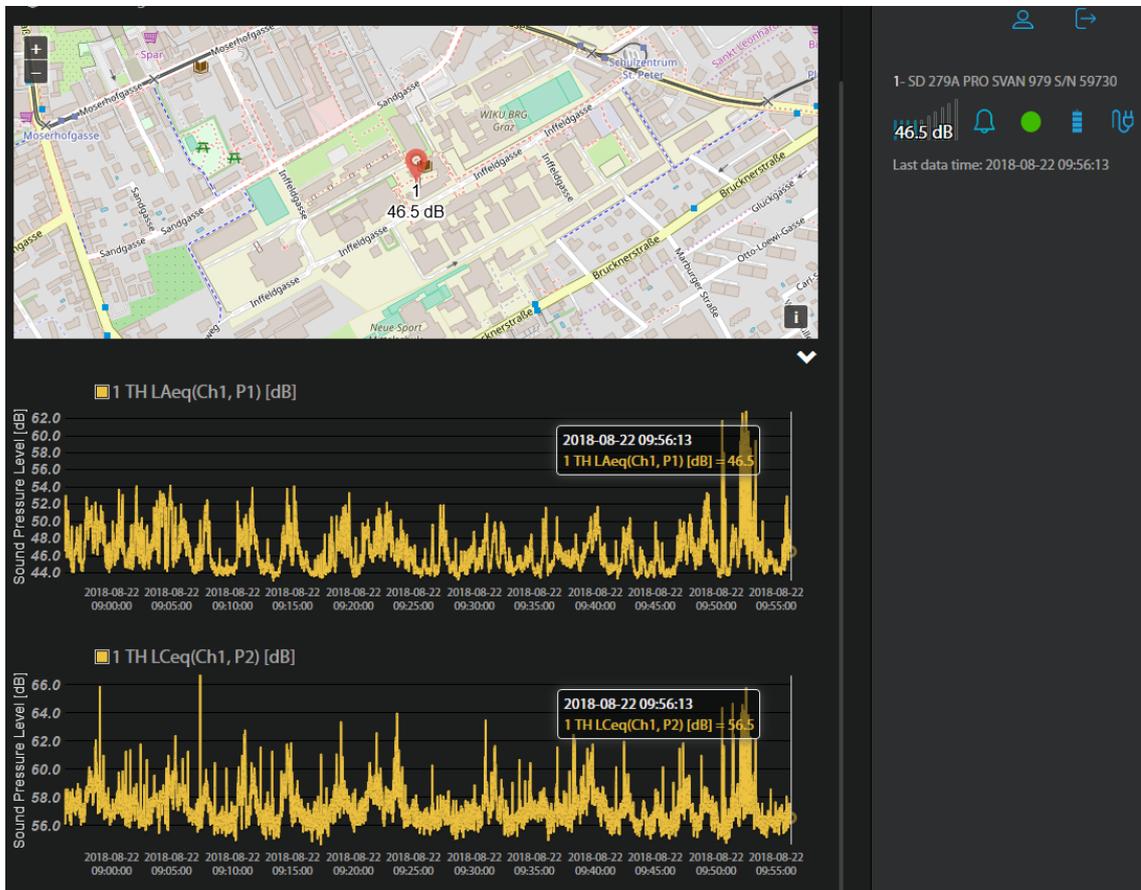


Abbildung 1.2: Ausschnitt der Website (Firma Svantek) zur Lärmüberwachung am Campus Inffeldgasse [4].

Diese Projektarbeit beschäftigt sich mit der Analyse der Lärmausbreitung am Campus Inffeldgasse, wobei die Hintergründe der Problematik und die Ausgangslage am Campus untersucht und analysiert werden sollen. Dazu werden in Kapitel 2 die gesetzlichen Richtwerte und Normen aufgearbeitet. Um die Schallausbreitung am Campus nachzuvollziehen wird in Kapitel 3 zunächst eine Simulation der Schallemission bei Veranstaltungen mit elektroakustischer Beschallung durchgeführt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend in Kapitel 4 Messungen am Campus geplant und durchgeführt. Die Ergebnisse aus Simulation und Messung werden in Kapitel 5 analysiert, diskutiert und miteinander verglichen. Letztendlich werden die erlangten Erkenntnisse in Kapitel 6 zusammengefasst sowie mögliche Verbesserungsvorschläge für das Lärmüberwachungssystem vorgestellt, die es ermöglichen, weitere Arbeiten zu diesem Thema durchführen zu können.

2

Physikalische und rechtliche Grundlagen der Lärmüberwachung

Im folgenden Kapitel soll auf einige wichtige Normen und Richtlinien eingegangen werden, welche für das Lärmüberwachungssystem am Campus Inffeldgasse von immanenter Bedeutung sind. Zuvor müssen jedoch noch bestimmte Begriffe und physikalische Größen genauer erläutert werden, die für das Verständnis der Normen und Richtlinien essenziell sind.

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Pegelangaben

Bei der Charakterisierung eines Schallereignisses spielt insbesondere der Schalldruck eine wesentliche Rolle, welcher die von der Schallwelle verursachten Druckschwankungen beschreibt. Üblicherweise wird jedoch nicht der absolute Schalldruck in Pascal zur Beschreibung eines Schallereignisses verwendet, sondern der Schalldruckpegel L_p in Dezibel, welcher durch das Verhältnis des absoluten Schalldrucks zu einem Referenzwert definiert wird.

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (2.1)$$

mit:

- L_p Schalldruckpegel in dB
- p Schalldruck in Pa
- p_0 Referenzschalldruck 20 μ Pa

2.1.2 Frequenzbewertung

Die menschliche Lautheitsempfindung eines Schallereignisses ist nicht nur vom Schalldruck an sich abhängig, sondern auch von dessen spektraler Zusammensetzung. Trotz gleichen Schalldrucks werden Schallimmissionen mit unterschiedlicher Frequenz nicht gleich laut wahrgenommen, da das menschliche Ohr für bestimmte Frequenzen empfindlicher ist als für andere. Die Frequenzabhängigkeit der wahrgenommenen Lautheit kann durch Kurven gleicher Lautheit, den sogenannten Isophonen, dargestellt werden (vgl. Abb. 2.1).

Anhand der Abbildung 2.1 wird deutlich, dass das menschliche Gehör im Frequenzbereich von 2 bis 5 kHz am empfindlichsten ist und dass diese Empfindlichkeit für sehr hohe und speziell für tiefe Frequenzen stark abnimmt. Diese Abhängigkeit beeinflusst somit auch die Wahrnehmung und Empfindung von Veranstaltungslärm und wird daher in den Normen und Richtlinien im Bereich des Lärmschutzes durch die Frequenzbewertungskurven berücksichtigt.

Die Frequenzabhängigkeit wird außerdem vom Schalldruckpegel beeinflusst. Speziell für tiefe Frequenzen weist das menschliche Gehör für geringere Schalldruckpegel eine deutlich abgeschwäch-

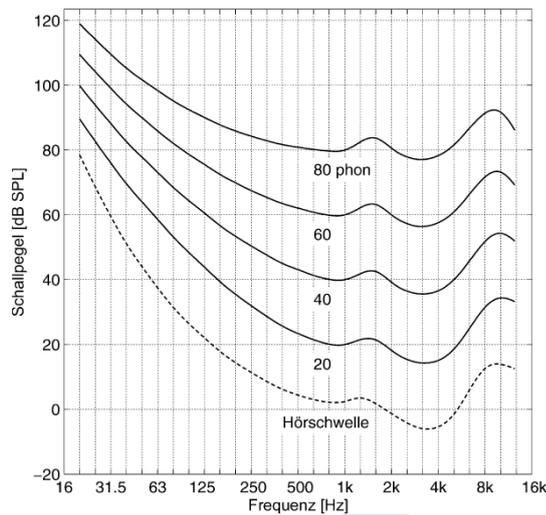


Abbildung 2.1: Kurven gleicher Lautheit (Isophone) [5].

tere Sensitivität auf. Dies wird durch den steileren Anstieg der Isophone hin zum tieffrequenten Bereich bei geringeren Schalldruckpegeln deutlich (vgl. Abb. 2.1).

Aus den Isophonen lassen sich die Frequenzbewertungskurven in Abbildung 2.2 ableiten. Sie sind dem reziproken Verlauf der Isophone angenähert, weshalb die Frequenzbewertungskurven ebenfalls mit der Lautheit variieren [5]:

- A-Bewertung: niedriger Schallpegelbereich (bis 30 phon)
- B-Bewertung: mittlerer Schallpegelbereich (30 bis 60 phon)
- C-Bewertung: hoher Schallpegelbereich (über 60 phon)

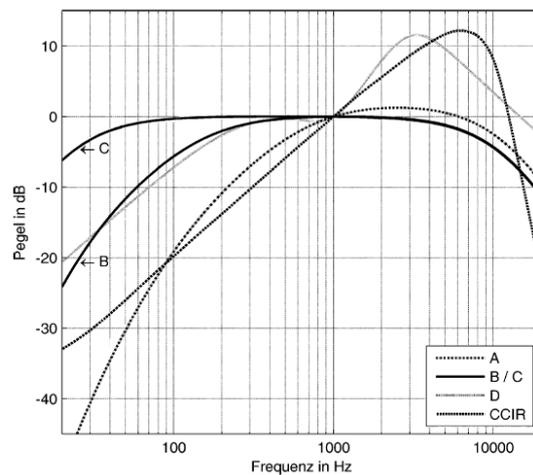


Abbildung 2.2: Filterverläufe für eine A-, B-, C- und D-Bewertung sowie der Verlauf der für Störspannungsmessungen spezifizierten «CCIR²-Kurve» [5].

² Comité Consultatif International des Radiocommunications (später ITU-R); «CCIR-Kurve» v.a. für Lautheitsbestimmungen im Kinoton genutzt

Die Frequenzbewertung führt zu separaten Korrekturwerten für jedes Terzband, mit welchen der Schalldruckpegel L_p im Falle einer Frequenzbewertung angepasst wird. Da insbesondere die A- und C-Bewertung in den nachfolgenden Abschnitten essenziell sind, werden diese zusätzlich in Tabelle 2.1 angeführt.

Nennfrequenz in Hz	Frequenzbewertungen in dB	
	A	C
10	-70.4	-14.3
12.5	-63.4	-11.2
16	-56.7	-8.5
20	-50.5	-6.2
25	-44.7	-4.4
31.5	-39.4	-3.0
40	-34.6	-2.0
50	-30.2	-1.3
63	-26.2	-0.8
80	-22.5	-0.5
100	-19.1	-0.3
125	-16.1	-0.2
160	-13.4	-0.1
200	-10.9	0.0
250	-8.6	0.0
315	-6.6	0.0
400	-4.8	0.0
500	-3.2	0.0
630	-1.9	0.0
800	-0.8	0.0
1000	0.0	0.0
1250	+0.6	0.0
1600	+1.0	-0.1
2000	+1.2	-0.2
2500	+1.3	-0.3
3150	+1.2	-0.5
4000	+1.0	-0.8
5000	+0.5	-1.3
6300	-0.1	-2.0
8000	-1.1	-3.0
10000	-2.5	-4.4
12500	-4.3	-6.2
16000	-6.6	-8.5
20000	-9.3	-11.2

Tabelle 2.1: A- und C-Frequenzbewertungen für die Terzbänder von 10 Hz bis 20 kHz [6].

2.1.3 Zeitbewertung

Die Charakterisierung eines andauernden Schallereignisses mithilfe des Schalldruckpegels ist jedoch nicht ausreichend, da dieser lediglich eine Momentaufnahme darstellt und daher zur Beschreibung des Schalls über einen längeren Zeitraum nicht geeignet ist. Daher werden die gemessenen Pegel über einen beobachteten Zeitraum gemittelt [7].

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (2.2)$$

mit:

L_{eq} energieäquivalenter Dauerschallpegel in dB
 $p(t)$ Momentanwert des Schalldrucks in Pa
 $t_2 - t_1$ Messzeit in s

Ein Schallereignis mit konstantem Dauerschallpegel ist dem gemessenen, variierenden Schalldruckpegel in der Energie äquivalent. Daher wird dieser Einzahlwert häufig zur Beschreibung eines Schallereignisses mit sich änderndem Schalldruck verwendet.

Um den energieäquivalenten Dauerschallpegel besser an das menschliche Gehör anzupassen, wird der Schalldruckpegel L_p zunächst mit Hilfe der Frequenzbewertungskurven aus Abschnitt 2.1.2 gewichtet und anschließend über die zu beobachtende Messzeit gemittelt.

Im Bereich des Lärmschutzes ist insbesondere der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ bedeutend, da aus diesem der Beurteilungspegel L_r resultiert (vgl. Abschn. 2.1.4). Für die gesonderte Betrachtung des Bassbereichs kann der C-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{C,eq}$ herangezogen werden. Da insbesondere der tieffrequente Anteil des Veranstaltungslärms häufig als besonders störend empfunden wird, ist eine separate Überwachung des Bassbereichs empfehlenswert (vgl. Abschnitt 2.2.2).

2.1.4 Beurteilungspegel L_r

In Anlehnung an den frequenzbewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel ist der Beurteilungspegel L_r definiert. Dieser entspricht dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ mit angepassten Aufschlägen, welche beispielsweise die Tonhaltigkeit und den Informationsgehalt, aber auch die Einwirkdauer eines Schallereignisses berücksichtigen [7], [8].

$$L_r = L_{A,eq} + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{T_{bez}} \right) + L_Z \quad (2.3)$$

mit:

L_r Beurteilungspegel in dB
 $L_{A,eq}$ A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel in dB
 T Dauer des Geräusches innerhalb der Bezugszeit in s
 T_{Bez} Bezugszeit in s
 L_Z Anpassungswert in dB

2.1.5 Vergleich von $L_{A,eq}$ und L_r

Bei der Definition der Grenzwerte in Normen und Richtlinien werden überwiegend der energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ und der Beurteilungspegel L_r herangezogen.

Wie bereits in Kapitel 2.1.4 erwähnt wurde, setzt sich der Beurteilungspegel L_r aus dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ und zusätzlichen Aufschlägen zusammen. Diese Aufschläge ermöglichen eine Anpassung an die individuelle Schallsituation und berücksichtigen sowohl die Einwirkdauer des Schallereignisses sowie auch dessen Zusammensetzung. Durch die zusätzlichen Aufschläge ist der Beurteilungspegel L_r im Gegensatz zum A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ messtechnisch nicht unmittelbar zu erfassen.

Daher definierte das Bundesumweltamt im Jahr 2011 eine Lärmschutzrichtlinie für Veranstaltungen [9], welche eine vereinfachte Beurteilung von Veranstaltungen vornimmt, deren wesentliche Schallquellen Musikanlagen sind. Unter der Annahme, dass die zu beobachtenden Immissionen ausschließlich von Musikanlagen erzeugt werden, kann der Beurteilungspegel L_r durch den energieäquivalenten Dauerschallpegel L_{Aeq} ersetzt werden. Dies bringt den Vorteil, dass die Messgröße unmittelbar zu ermitteln ist und im Anschluss auf eine Korrektur durch Anpassungswerte verzichtet werden kann. Im Gegensatz zum Beurteilungspegel werden jedoch besondere Situationen, wie übermäßig lange Veranstaltungen oder auffällige Schallereignisse durch den energieäquivalenten Dauerschallpegel nicht berücksichtigt.

2.2 Normen und Richtlinien im Bereich Lärmschutz

Um das Umfeld eines Schallereignisses vor zu hoher Immission zu schützen, existieren bereits zahlreiche Normen und Richtlinien zum Thema Lärmschutz. Ziel dieser Richtlinien ist vor allem der Schutz der unmittelbaren Umgebung, da zu hohe Schalldruckpegel das menschliche Gehör und somit auch die Gesundheit gefährden können. Doch auch die umliegenden Gebiete sind von der Lärmbelastung betroffen. Denn selbst in einiger Entfernung kann der beispielsweise durch Veranstaltungen verursachte Lärm noch Unbehagen bei den AnrainerInnen auslösen, insbesondere wenn dieser über einen längeren Zeitraum mit hoher Intensität besteht. Daher ist es im Bereich des Lärmschutzes außerdem wichtig, die erzeugten Geräusche nicht nur im unmittelbaren Nahfeld, sondern auch noch in einiger Entfernung zu überwachen und auch für diese Bereiche Grenzwerte für den noch erlaubten Schalldruckpegel zu definieren.

Die ÖNORM S5021 [7] befasst sich mit genau dieser Überwachung des Umfeldes. Dafür wird der Beurteilungspegel L_r herangezogen und ein Grenzwert für die zulässigen Immissionswerte festgelegt.

Da vor allem am Abend und insbesondere auch in der Nacht die Belastungsgrenze der AnrainerInnen meist deutlich unter jener am Tag liegt, müssen hier für verschiedene Tageszeiten unterschiedliche Grenzwerte bestimmt werden. Laut [7] wird dabei zwischen drei verschiedenen Tageszeiten unterschieden (vgl. Tab. 2.2).

Tageszeit	Uhrzeit
Tag	06:00-19:00
Abend	19:00-22:00
Nacht	22:00-06:00

Tabelle 2.2: Bezeichnung der Tageszeiten je nach Uhrzeit [7].

Pro Tageszeit kann nicht pauschal ein Grenzwert für jegliche Art von Umgebung bestimmt werden. Der zulässige Beurteilungspegel ist auch von der jeweiligen Nutzung des umliegenden Gebiets abhängig, also der dadurch definierten Widmungskategorie. Die Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die erlaubten Beurteilungspegel je nach Tageszeit und Widmungskategorie, wobei sich die angeführten Grenzwerte auf Immissionspunkte im Freien beziehen. Beispielsweise ergibt sich daraus für Immissionspunkte im städtischen Wohngebiet (Kategorie 3, Bauland) laut Tabelle 2.3 untertags für den Beurteilungspegel L_r ein Grenzwert von 55 dB.

Kategorie	Gebiet	Standplatz	L_r in dB		
			Tag	Abend	Nacht
1	Bauland	Ruhegebiet, Kurgebiet	45	40	35
2		Wohngebiet in Vororten, Wochenendausgebiet, ländliches Wohngebiet	50	45	40
3		städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	55	50	45
4		Kerngebiet (Büros, Geschäfte, Handel, Verwaltungsgebäude ohne wesentlicher störender Schallemission, Wohnungen, Krankenhäuser) Gebiet für Betriebe ohne Schallemission	60	55	50
5		Gebiet für Betriebe mit gewerblichen und industriellen Gütererzeugungs- und Dienstleistungsstätten	65	60	55
6		Gebiet mit besonders großer Schallemission (z.B. Industriegebiete)	-	-	-
1	Grünland	Kurbezirk	45	40	35
2		Parkanlagen, Naherholungsgebiet	50	45	40

Tabelle 2.3: Grenzwerte des Beurteilungspegels L_r je nach Widmungskategorie und Tageszeit für Immissionspunkte im Freien [7].

2.2.1 Häufigkeit der Veranstaltungen

Das Bundesumweltamt empfiehlt in der Lärmschutzrichtlinie ÖAL 3 [10], bei der Beurteilung der Lärmbelastung zwischen selten und häufig vorkommenden Veranstaltungen zu unterscheiden. Die bisher erwähnten Richtlinien in Tabelle 2.3 beziehen sich hauptsächlich auf häufig vorkommende Veranstaltungen. Werden pro Kalenderjahr jedoch zehn Veranstaltungen oder weniger an einem Veranstaltungsort abgehalten, so handelt es sich laut ÖAL 3 um selten vorkommenden Veranstaltungen und die Tabelle 2.4 wird als Beurteilungsgrundlage herangezogen. Dafür wird die zulässige Häufigkeit von Veranstaltungen pro Kalenderjahr in Abhängigkeit des gemessenen Immissionspegels festgelegt (vgl. Tab. 2.4).

Aus Tabelle 2.4 geht hervor, dass für selten vorkommende Veranstaltungen eine Überschreitung der Grenzwerte aus Tabelle 2.3 möglich ist, diese Grenzwertbestimmung ausschließlich zwischen

Tag und Nacht unterscheidet und unabhängig vom jeweiligen Nutzungsgebiet gilt. Dabei ist jedoch im Einzelfall zu prüfen, ob den AnwohnerInnen eine derartige Lärmbelastung zugemutet werden kann [10]. In jedem Fall ist die Begrenzung der Anzahl an zulässigen Veranstaltungen pro Kalenderjahr in Abhängigkeit des energieäquivalenten Dauerschallpegels einzuhalten (vgl. Tab. 2.4).

$L_{A,eq,Tag}$	$L_{A,eq,Nacht}$	Anzahl der Veranstaltungstage pro Kalenderjahr
80 dB	60 dB	1
oder		
75 dB	55 dB	3
oder		
70 dB	50 dB	10

Tabelle 2.4: Zulässige Anzahl an Veranstaltungstagen an einem Veranstaltungsort pro Kalenderjahr in Abhängigkeit des energieäquivalenten Dauerschallpegels im Freien vor den Fenstern am Tag und in der Nacht [9], [10].

2.2.2 Gesonderte Betrachtung des Bassbereichs

Da im Veranstaltungsbereich vor allem tieffrequente Geräusche als störend oder besonders durchdringend empfunden werden, wird dieser Frequenzbereich am Campus Inffeldgasse nach Empfehlung des Umweltamts der Stadt Graz gesondert betrachtet [11].

Speziell für populäre Musikrichtungen wie Dancefloor oder Techno ist ein ausgeprägter Bassbereich charakteristisch. In einem Bericht des Bundesumweltamtes aus dem Jahr 2000 [12] wurde das Spektrum von Verkehrsrauschen als «sehr gut übereinstimmend» mit eben genau diesen Musikstilen empfunden, weshalb jenes als Referenzspektrum für basslastige Musik herangezogen wird (vgl. Abb. 2.3).

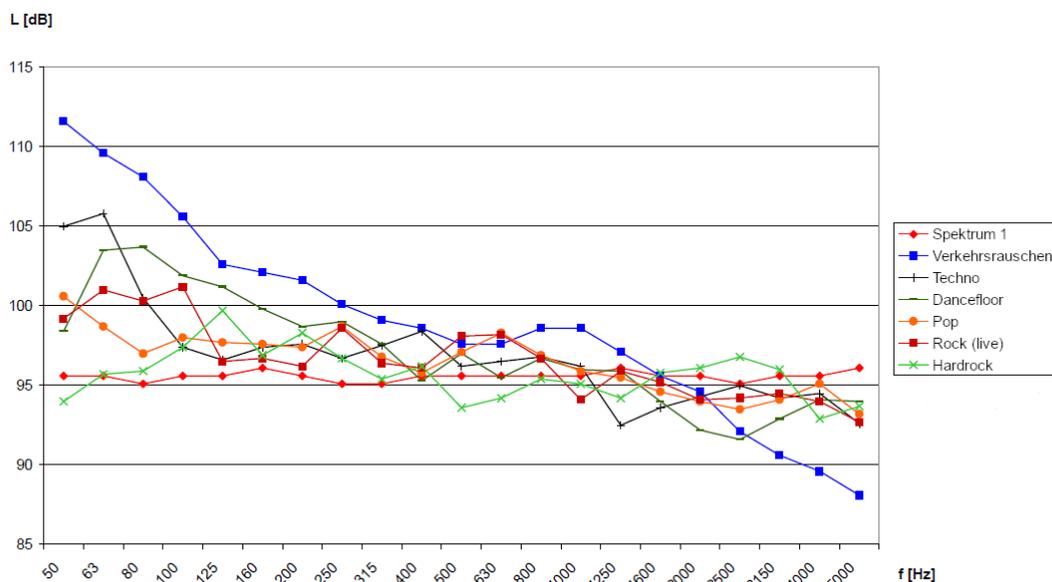


Abbildung 2.3: Darstellung der unbewerteten energieäquivalenten Terzspektren von Musikrichtungen und der Referenzspektren normiert auf gleiche $L_{A,eq}$ [11], [12].

Eine gesonderte Form der Betrachtung des Bassbereichs stellt die Differenz des C-bewerteten und A-bewerteten energetischen Mittelungspegels $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ dar. Beim Vergleich beider Frequenzbewertungskurven wird deutlich, dass die Differenz jener Kurven den Energiegehalt des Schallereignisses im Frequenzbereich unter 1000 Hz ergibt. Diese Differenz beträgt für Verkehrsruschen etwa 10 dB und bildet den Grenzwert, unterhalb dessen eine exzessive Basswiedergabe unterbunden wird. [11]

2.3 Resultierende Grenzwerte am Campus Inffeldgasse

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt wurde, resultieren die Grenzwerte der erlaubten Pegel bei Veranstaltungen im Wesentlichen aus der jeweiligen Nutzung des Gebietes sowie der Häufigkeit der Veranstaltungen an diesem Ort.

Das Gebiet des Campus Inffeldgasse fällt in die Widmungskategorie Kerngebiet mit Einkaufszentrenausschluss (Kategorie 4, Bauland) und der umliegende Bereich unter Allgemeines Wohngebiet (Kategorie 3, Bauland) [13].

Die Recherche über die Anzahl an Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse mit elektroakustischer Beschallung ergab seitens der HTU Graz³ für das Jahr 2018 circa 30 und für das Jahr 2019 circa 20 Veranstaltungen [14]. Somit lassen sich die Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse in häufig vorkommende Veranstaltungen mit elektroakustischen Beschallungssystemen im Freien einordnen (vgl. Abschn. 2.2.1). Daraus ergeben sich für den Bereich des Campus Inffeldgasse die in Tabelle 2.3 angeführten Pegelrichtwerte für den energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$.

Beim Einordnen der Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse in häufig vorkommende Veranstaltungen wurde jedoch nicht zwischen einzelnen Veranstaltungen differenziert. Da das verwendete Beschallungsequipment und somit auch die erzeugte Lärmbelastung für die AnwohnerInnen bei Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse stark variiert, erscheint es sinnvoll, die Veranstaltungen in große und kleinere Veranstaltungen zu unterteilen. Die Größe der Veranstaltungen wird künftig über die jeweils verwendete Beschallungsanlage definiert, welche den VeranstalterInnen in Form von unterschiedlichen «Tonpaketen» zur Verfügung gestellt wird (vgl. Abschn. 4.2). Veranstaltungen, bei welchen das Tonpaket 1 bzw. 2 zum Einsatz kommt, werden als «kleine» Veranstaltungen bezeichnet. Bei «großen» Veranstaltungen wird auf das leistungsstarke Tonpaket zurückgegriffen.

Für die Jahre 2018 und 2019 ergeben sich jeweils weniger als fünf Veranstaltungen, bei welchen ein leistungsstarkes Beschallungssystem zum Einsatz kam [14]. Werden zur Beurteilung der Situation am Campus Inffeldgasse hauptsächlich jene Veranstaltungen herangezogen, so spricht man von einem Veranstaltungsort mit selten vorkommenden Veranstaltungen.

Unter der Annahme, dass die zahlreichen kleineren Veranstaltungen im Campusbereich zu keiner wesentlichen Lärmbelästigung der AnrainerInnen führen, wurden zur Festlegung der Grenzwerte am Campus Inffeldgasse die Richtlinien aus Tabelle 2.4 verwendet.

Um die Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte zu gewährleisten, wurde die Lärmmesstation am Dach der Inffeldgasse 12 installiert. Das Umweltamt Graz definierte an der Position des Lärmüberwachungssystems Grenzwerte für den zulässigen energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ (vgl. Tab. 2.5), um eine Einhaltung der gesetzlichen Richtlinien, insbesondere in den umliegenden Wohngebieten, zu garantieren [2]. Im Zuge der Überwachung durch die Lärmmesstation erfolgt eine zeitliche Mittelung der gemessenen, frequenzbewerteten Schalldruckpegel über jeweils zehn Minuten, welche anschließend den vorgeschriebenen Grenzwerten gegenübergestellt werden [15]. Dabei ist zu beachten, dass zur Gegenüberstellung die an der Lärmmesstation

³ Hochschülerinnen- und Hochschülerschaft an der TU Graz

gemessenen Schalldruckpegel herangezogen werden, die dort definierten Grenzwerte jedoch jenen, welche an der Fassade der Wohnhäuser entlang der Sandgasse eingehalten werden müssen, entsprechen. Diese wurden lediglich als Grenzwerte für die Lärmmessstation übernommen. Zusätzlich soll der Bassbereich des Veranstaltungslärms über die Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ gesondert betrachtet werden (vgl. Abschn. 2.2.2), weshalb für diese Differenz ebenfalls ein Richtwert festgelegt wurde (vgl. Tab. 2.5). Die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ soll unter jener des Verkehrsrauschens (Referenzspektrum für basslastige Musik) liegen, um eine exzessive Bassüberhöhung zu vermeiden. Die am Campus Inffeldgasse einzuhaltenden Grenzwerte am Ort der Lärmmessstation sind der Tabelle 2.5 zu entnehmen. Es ist darauf zu achten, dass die Grenzwerte in Tabelle 2.5 in Anlehnung an die für selten vorkommende Veranstaltungen geltenden Grenzwerte eingeführt wurden.

Tageszeit	Grenzwert $L_{A,eq}$	Grenzwert $L_{C,eq}$	Grenzwert $L_{C,eq} - L_{A,eq}$
bis 22:00	70 dB	80 dB	10 dB
von 22:00 bis 02:00	60 dB	70 dB	10 dB

Tabelle 2.5: Behördlich vorgeschriebene Grenzwerte je nach Tageszeit für den A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel sowie deren Differenz an der Lärmmessstation am Dach des Gebäudes Inffeldgasse 12 [2].

Zusammenfassend lassen sich aus Tabelle 2.5 folgende Handlungsanweisungen ableiten:

1. Bei Überschreiten des jeweiligen Grenzwertes durch den $L_{A,eq}$ ist der Gesamtpegel zu reduzieren.
2. Bei Überschreiten des jeweiligen Grenzwertes durch den $L_{C,eq}$ ist der Bassbereich abzuschwächen.
3. Ist die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ größer als 10 dB, ist der Bassbereich abzuschwächen.

Simulation der Schallausbreitung am Campus Inffeldgasse mit SoundPLAN

Um einen Überblick der Schallausbreitung am Campus zu bekommen, wird zunächst eine Simulation durchgeführt, die ebenso als Planungsgrundlage für die anschließende Messung verwendet werden soll. Mithilfe der Simulations-Software SoundPLAN [16] soll die Ausbreitung des Schalls bei Veranstaltungen großflächig eruiert werden. Anschließend werden geeignete Immissionspunkte messtechnisch überprüft.

3.1 Implementierung

3.1.1 Grundeinstellungen und Modell des Gebiets

Als Grundlage für die Simulation muss ein digitales Geländemodell erstellt werden. Dieses setzt sich aus dem Bodenbelag und den entsprechenden Geländehöhen zusammen. Dazu wird eine Höhenlinienkarte, die von der Stadt Graz ermittelt und digitalisiert wurde, verwendet. Für den Bodenbelag wird Beton ausgewählt. Darauf werden nun die Gebäude gesetzt, die mithilfe von Google Maps [17] originalgetreu nachgebildet werden, sodass ein 3D Modell des Campus Inffeldgasse entsteht (vgl. Abb. 3.1).

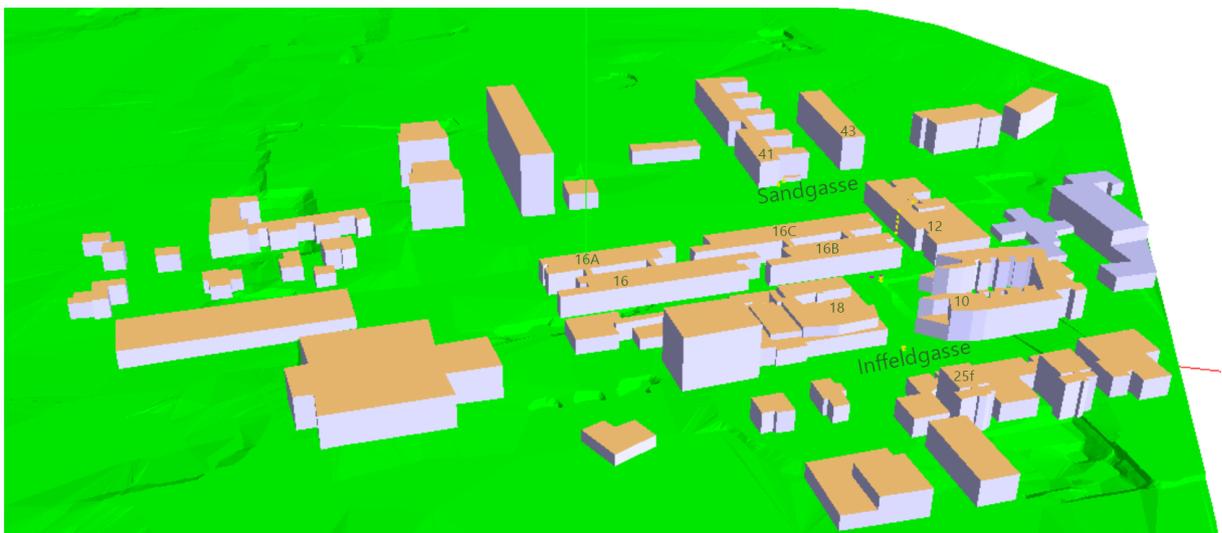


Abbildung 3.1: In SoundPLAN erzeugtes 3D Modell des Campus Inffeldgasse.

Insbesondere die Gebäude Inffeldgasse 16, 16a - 16c als auch 12 und 18 weisen schallharte Außenfassaden aus Beton auf, daher wird dort besonders auf einen passenden Reflexionsverlust geachtet, welcher sich nach Gleichung 3.1 berechnet.

$$DL_{RI} = 10 \cdot \lg(1 - \alpha) \quad (3.1)$$

mit:

DL_{RI} Reflexionsverlust in dB
 α Schallabsorptionsgrad

Für die großteils aus schallhartem Beton bestehenden Gebäude Inffeldgasse 16, 16a - 16c wird der Wert $DL_{RI,1} = 0.07$ angenommen, bei den zum Teil aus Beton bestehenden Gebäuden Inffeldgasse 12 und 18 wird der Wert $DL_{RI,2} = 0.5$ angenommen. Bei allen restlichen Gebäuden wird für den Reflexionsverlust der Wert $DL_{RI,3} = 1$ verwendet.

3.1.2 Definition der Schallquellen

Um nun eine virtuelle Beschallungssimulation durchführen zu können, werden zunächst die Schallquellen initialisiert.

Aus der SoundPLAN-Bibliothek werden Lautsprecherboxen ausgewählt, die annähernd der am Campus Inffeldgasse häufig verwendeten elektroakustischen Beschallungsanlage (vgl. Kap. 4.2), entsprechen [18]:

- d&b Q7 40x75 2-Wege-Lautsprecher
- d&b-B4 SUB Subwoofer

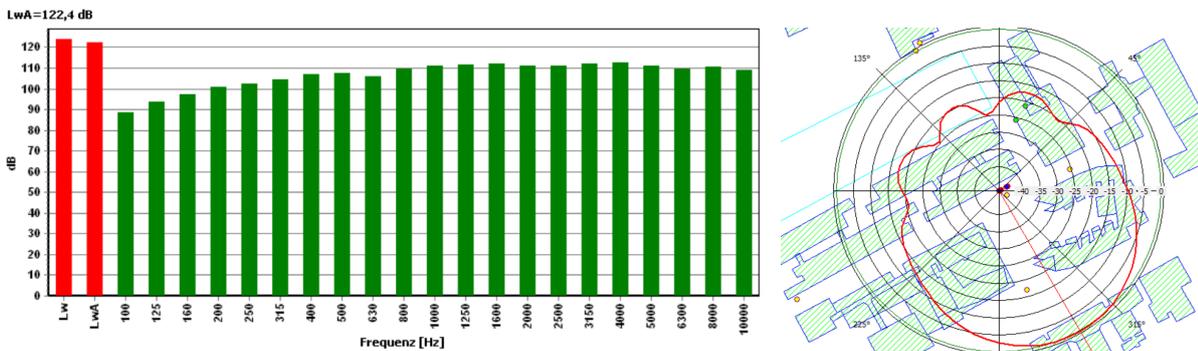


Abbildung 3.2: Gesamtschalleistungspegel L_w und A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel $L_{w,A}$ (rot) mit Frequenzspektrum des Schalleistungspegels L_w in dB (grün) (links) und Richtcharakteristik bei 1 kHz (rechts) des d&b 2-Wege-Lautsprechers.

Die Lautsprecherboxen sind als Punktschallquellen definiert (vgl. Abb. 3.2 und 3.3). Es soll der «worst-case» ermittelt werden, daher wird davon ausgegangen, dass die Lautsprecherboxen konstant mit maximaler Leistung betrieben werden.

Zusätzlich soll das Publikum als Schallquelle berücksichtigt werden. Dazu wird eine Flächenschallquelle initialisiert, die über die SoundPLAN-Bibliothek durch «laute Unterhaltung, Rufen, Lachen etc.» [19] definiert wird (vgl. Abb. 3.4).

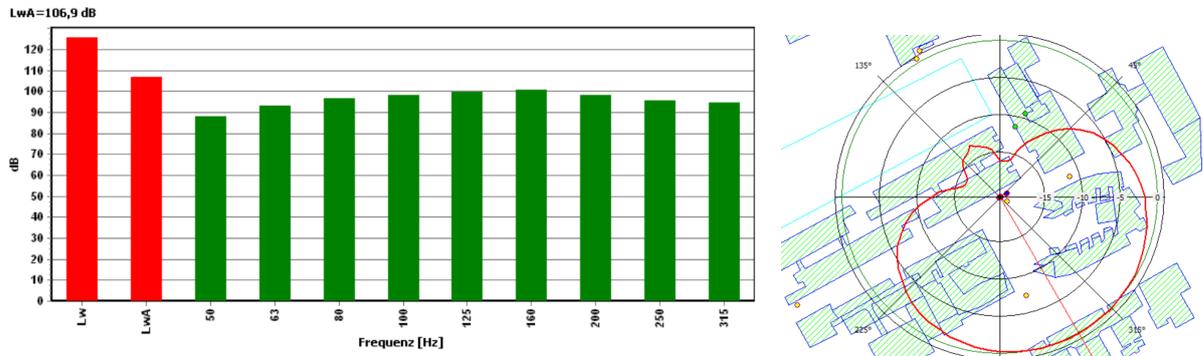


Abbildung 3.3: Gesamtschalleistungspegel L_w und A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel $L_{w,A}$ (rot) mit Frequenzspektrum des Schalleistungspegels L_w in dB (grün) (links) und Richtcharakteristik bei 80 Hz (rechts) des d8b Subwoofers.

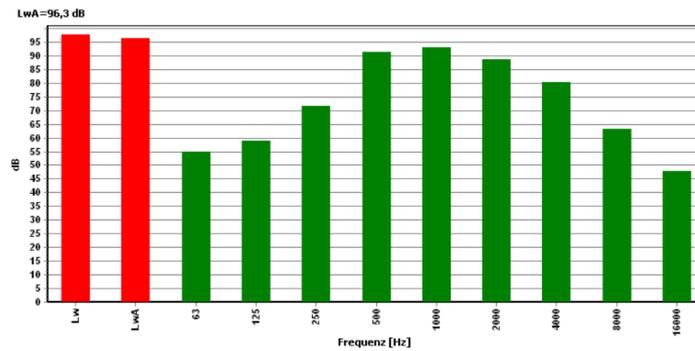


Abbildung 3.4: Gesamtschalleistungspegel L_w und A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel $L_{w,A}$ (rot) mit Frequenzspektrum des Schalleistungspegels L_w in dB (grün) des simulierten Publikums.

3.1.3 Platzierung der Schallquellen

Um die Simulation möglichst nahe an jene einer tatsächlichen Veranstaltung anzupassen, werden zunächst die potenziellen Bühnenpositionen ermittelt. Die Serviceeinrichtung Gebäude und Technik der TU Graz definiert als mögliche Bühnenpositionen den Vorplatz der Inffeldgasse 16b, sowie jenen der Inffeldgasse 18 (vgl. Abb. 7.1 im Anhang).

Die Schallquellen werden nach den Vorgaben platziert und um die Unterschiede in der Schallausbreitung zu veranschaulichen, werden die ersten Simulationen vorgenommen. Wie die Abbildungen 7.2 und 7.3 im Anhang zeigen, werden mit der Platzierung der Bühne am Vorplatz Inffeldgasse 16b deutlich höhere Pegel an der Sandgasse erzeugt, daher wird in dieser Arbeit künftig nur mehr diese Positionierung der Bühne berücksichtigt (vgl. Abb. 3.6).

Des Weiteren werden verschiedene Größen von Veranstaltungen berücksichtigt, worauf in Kapitel 2.3 bereits eingegangen wurde. Bei großen Veranstaltungen wird eine gängige Zusammensetzung einer elektroakustischen Beschallungsanlage gewählt, sodass sich die sogenannte «große Bühne» durch 2 2-Wege-Lautsprecher und 4 Subwoofer definiert. Bei kleinen Veranstaltungen wird als «kleine Bühne» ein einzelner 2-Wege-Lautsprecher definiert. Dadurch werden annähernd die Grenzfälle der in Kapitel 4.2 angeführten Equipment-Pakete untersucht.

Auch die Größe des Publikums wurde entsprechend der Veranstaltungsgröße angepasst. (vgl. Abb. 3.5)

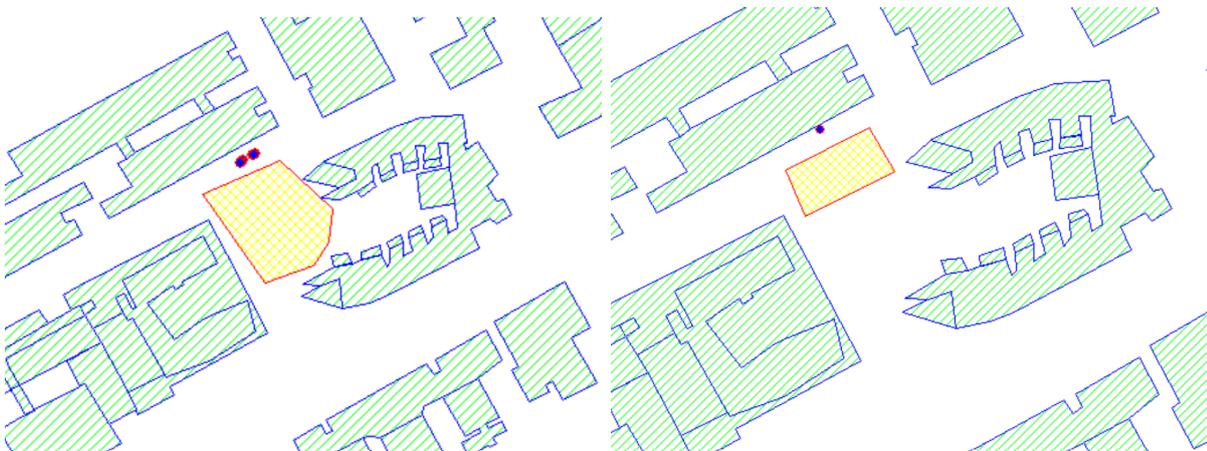


Abbildung 3.5: SoundPLAN-Modell große Bühne mit großem Publikum (links) und kleine Bühne mit kleinem Publikum (rechts) vor dem Gebäude Inffeldgasse 16b.

3.1.4 Definition der Immissionspunkte

Als nächstes werden Immissionspunkte erstellt (vgl. Abb. 3.6). Alle Immissionspunkte werden in einer Höhe von 1.6 m vom Untergrund des jeweiligen Immissionspunktes platziert. Zunächst wird ein Immissionspunkt im Abstand von ca. 5 m zentral vor den Schallquellen, die zwei Lautsprechertürme nachbilden sollen, platziert. Das an x_1 simulierte Signal wird als Referenzsignal verwendet. Der zweite Immissionspunkt x_2 wird auf das Dach des Gebäudes Inffeldgasse 12 gesetzt, wo sich auch das tatsächliche Messmikrofon zur Überwachung der Veranstaltungen befindet. Um den Schall zu betrachten, welcher sich zwischen den Gebäuden Inffeldgasse 16b und Inffeldgasse 12 in Richtung Sandgasse ausbreitet, wurde ein weiterer Immissionspunkt am Dach des Gebäudes Inffeldgasse 12 gesetzt (x_3). Das laut Simulation (vgl. Abb. 7.2 und 7.3 im Anhang) am stärksten vom Veranstaltungslärm betroffene Wohngebiet wird durch die beiden Immissionspunkte x_4 und x_5 näher untersucht. Außerdem wurden noch drei weitere Immissionspunkte innerhalb des Campus zur späteren Validierung der Simulation gesetzt (x_6 , x_7 und x_8).

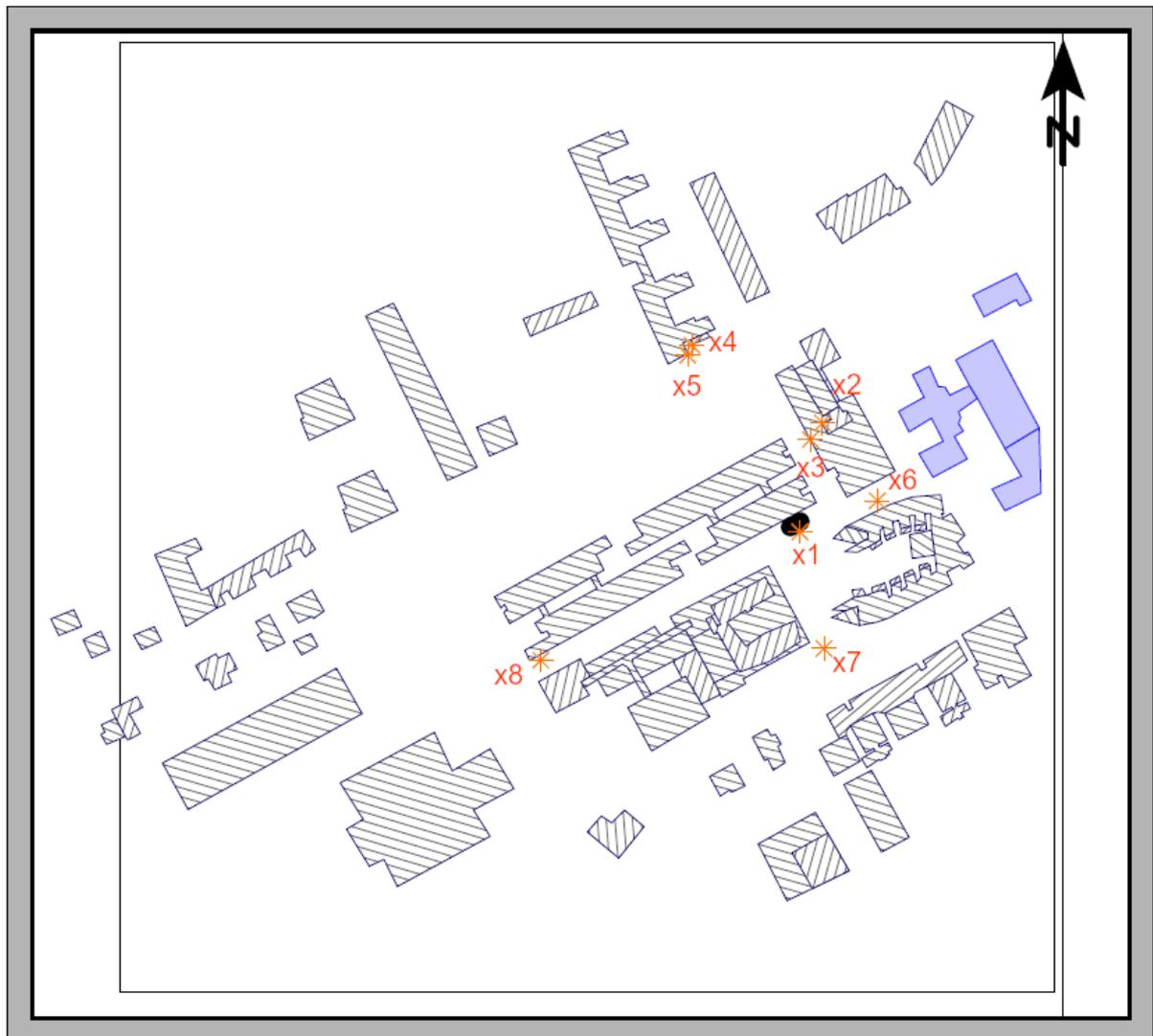


Abbildung 3.6: SoundPLAN-Modell mit Schallquellen (schwarz) und Immissionspunkten (orange).

3.2 SAL-Gebäude

Am Campus Inffeldgasse sollen bis 2023 neue Gebäude der Silicon Austria Labs GmbH entstehen, an denen bereits seit 2020 gebaut wird. Die Gebäude werden sich, wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, an der Sandgasse befinden. Somit grenzen die Gebäude an das umliegende Wohngebiet und könnten die Schallausbreitung in diesem Bereich bedeutend beeinflussen, daher werden sie in der Simulation berücksichtigt. [20]

In Anlehnung an Abbildung 3.7 werden die Gebäude in SoundPLAN nachgebaut (vgl. Abb. 3.8).



Abbildung 3.7: Karte des Campus Inffeldgasse mit den neuen SAL-Gebäuden [21].

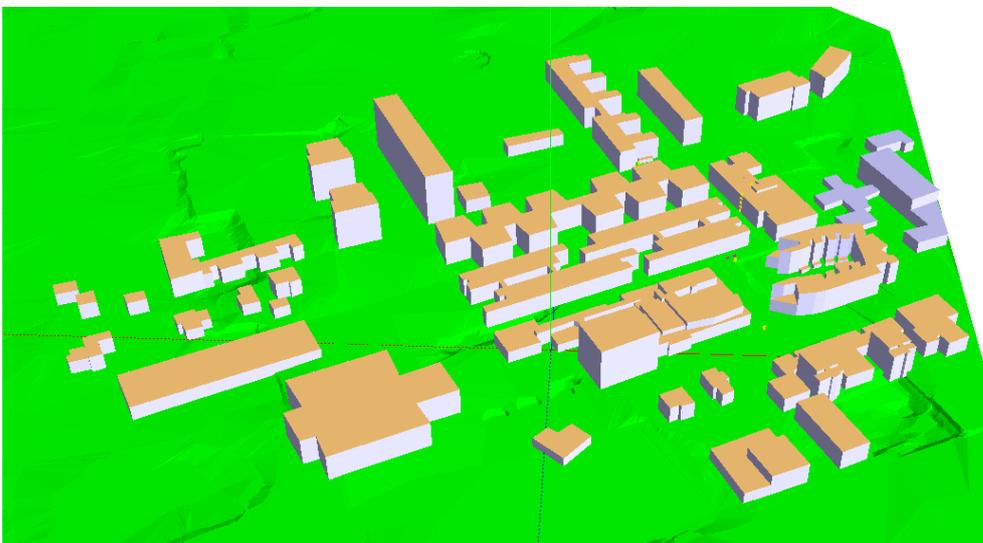


Abbildung 3.8: In SoundPLAN erzeugtes 3D Modell des Campus Inffeldgasse mit SAL-Gebäuden.

3.2.1 Baugrube

Zum Zeitpunkt der Messungen am Campus werden die SAL-Gebäude gerade gebaut. An dem Bauplatz befindet sich daher eine große Baugrube. Um die Messergebnisse und die Ergebnisse der Simulation so gut wie möglich vergleichbar zu machen, wird auch die Baugrube in der Simulation berücksichtigt.

Dazu wird rechteckförmig ein Bodeneffekt hinzugefügt, dem ein Bodenfaktor von $G = 1$ (0 = hart, 1 = weich) zugeordnet wird (vgl. Abb. 3.9).

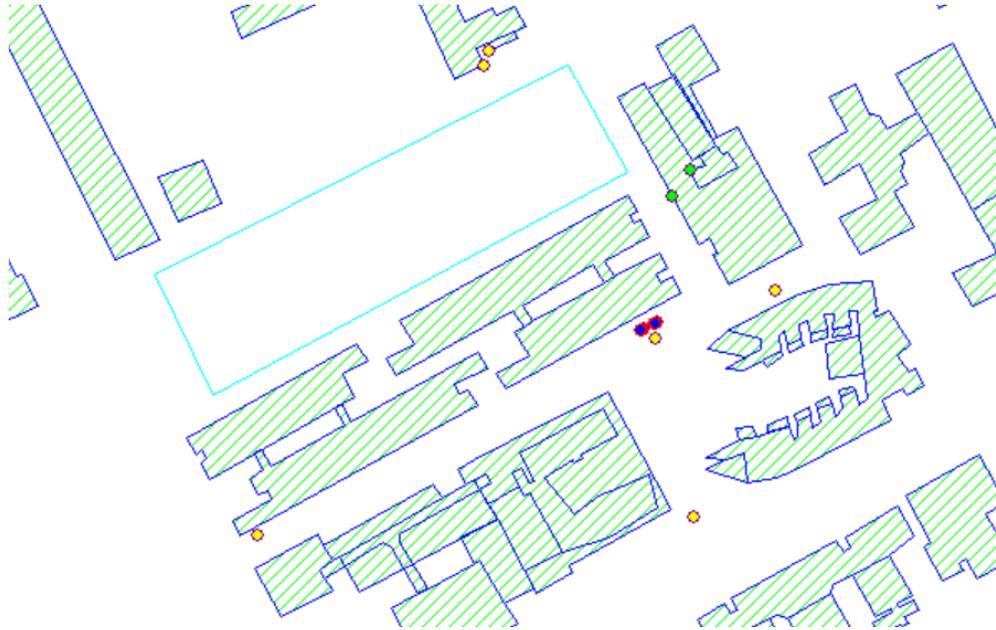


Abbildung 3.9: SoundPLAN-Modell mit Baugrube (türkis).

3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation werden durch Rasterlärmkarten, Schnittlärmkarten und in Tabellenform dargestellt.

3.3.1 Rasterlärmkarten

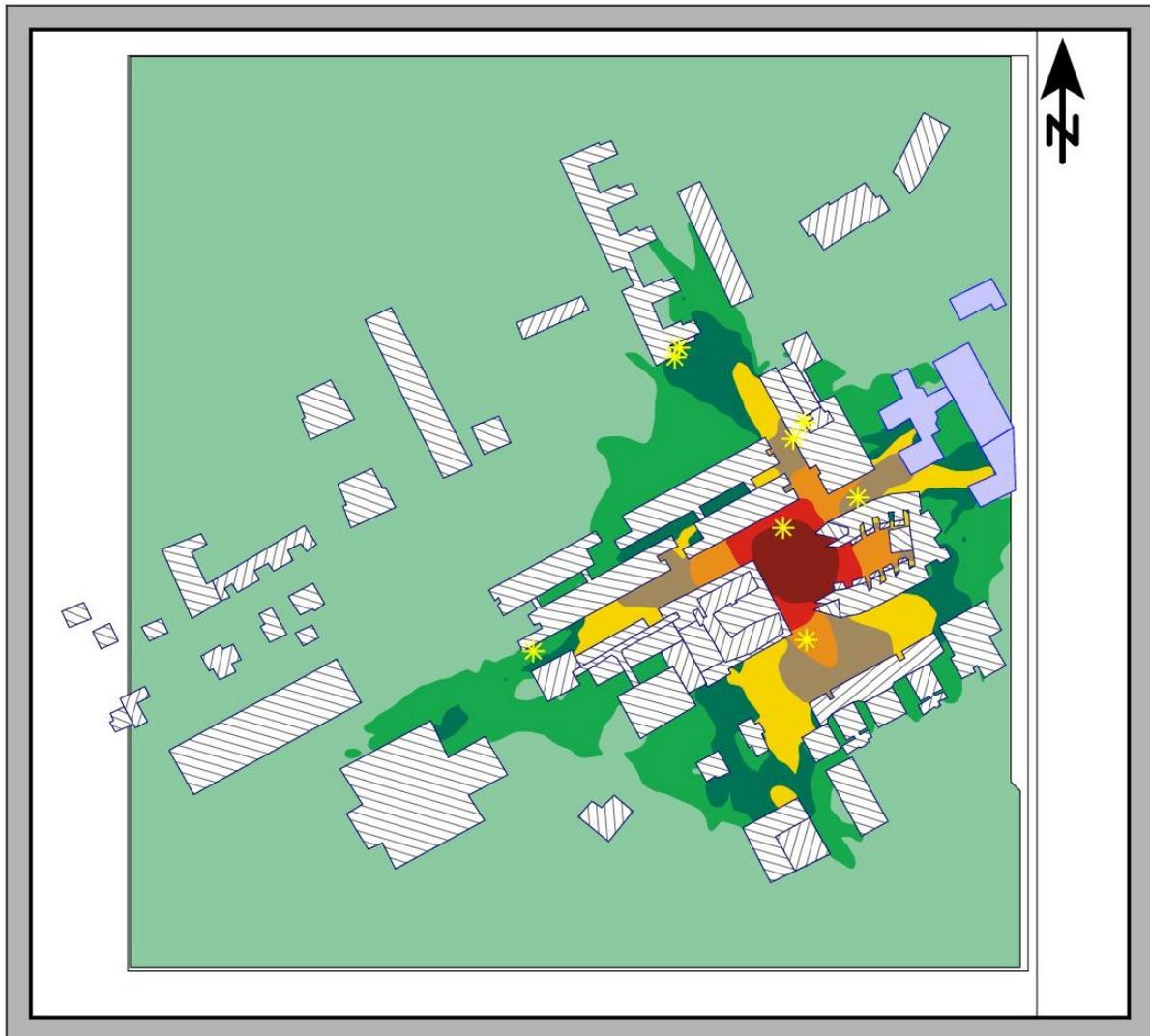
Bei Rasterlärmkarten wird die Schallausbreitung in der Draufsicht betrachtet. Hierfür muss eine Beobachtungshöhe ausgewählt werden. In dieser Projektarbeit wird die Ausbreitung in der Höhe von 1.5 m betrachtet. Zusätzlich wird auch eine Höhe von 18 m in einzelnen Fällen untersucht, da dies die Höhe der Gebäude 16, 16a - 16c überschreitet, welche zwischen der Schallquelle und den kritischen Immissionspunkten x_4 und x_5 liegen. Der gemessene Pegel $L_{rT,1h}$ wird in dB(A) angegeben und bezieht sich auf den in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Beurteilungspegel, wobei die Mittelung über die lauteste Stunde am Tag erfolgt. Da in der Simulation vom «worst-case» ausgegangen wird, werden die Schallquellen konstant mit maximaler Leistung betrieben, der angegebene Pegel ist somit dem Maximalpegel gleichzusetzen.

Es werden nun Rasterlärmkarten für verschiedene Situationen erstellt, die sich in Bühnengröße, Publikum und Berücksichtigung der SAL-Gebäude unterscheiden. Für die Betrachtung in 18 m Höhe wird lediglich die große Bühne ohne Publikum herangezogen, da hier der Einfluss der SAL-Gebäude besonders deutlich wird. In Abbildung 3.10 ist die Schallausbreitung bei reiner Betrachtung des «großen Publikums» zu sehen. Da der Einfluss des Publikums bei Veranstaltungen verhältnismäßig klein ist, sind jene Rasterlärmkarten, bei denen ein Publikum einbezogen wurde, im Anhang zu finden (vgl. Kap. 7.1.1).

Die ausführliche Analyse der Rasterlärmkarten erfolgt in der Diskussion in Abschnitt 5.1.

Inffeldgasse 16 mit Publikum

RLK in 1.5m Höhe

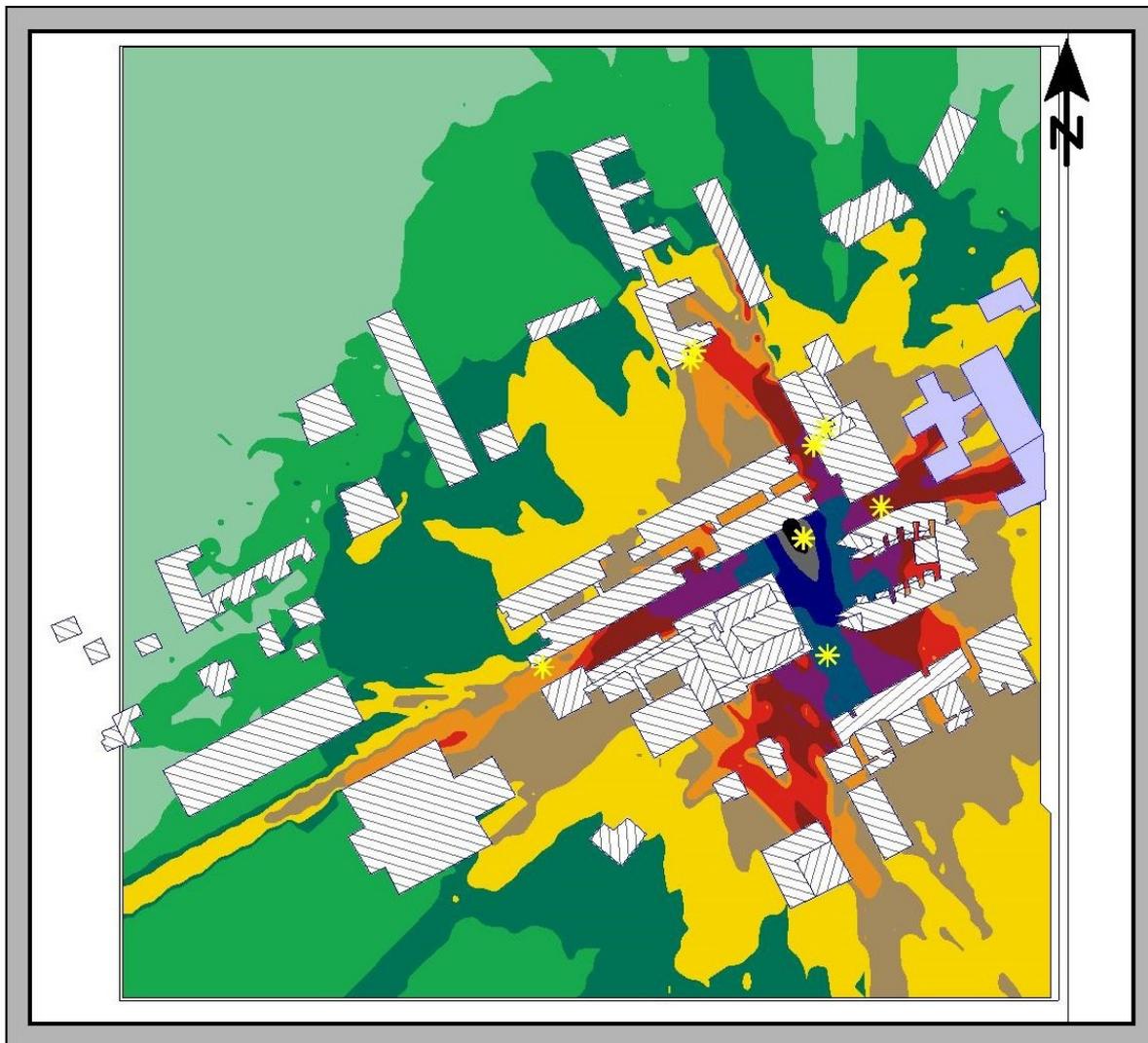


<p>Zeichenerklärung</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Punktquelle ▨ Hauptgebäude ■ Schule ★ Immissionsort □ Bodeneffekte □ Rechengebiet Lärm ■ Flächenquelle 	<p>Pegelbereich LrT, 1h in dB(A)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #c8e6c9;"></td><td>< 35</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #8bc34a;"></td><td>35 - 40</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #4caf50;"></td><td>40 - 45</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffc107;"></td><td>45 - 50</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffc107;"></td><td>50 - 55</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ff9800;"></td><td>55 - 60</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ff5722;"></td><td>60 - 65</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #d32f2f;"></td><td>65 - 70</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #9c27b0;"></td><td>70 - 75</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #3f51b5;"></td><td>75 - 80</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #2196f3;"></td><td>80 - 85</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #9e9e9e;"></td><td>85 - 90</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 10px; background-color: #424242;"></td><td>>= 90</td></tr> </table>		< 35		35 - 40		40 - 45		45 - 50		50 - 55		55 - 60		60 - 65		65 - 70		70 - 75		75 - 80		80 - 85		85 - 90		>= 90	<p>Maßstab 1:3221</p> <p>Datum: 18.06.2021 Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck</p>
	< 35																											
	35 - 40																											
	40 - 45																											
	45 - 50																											
	50 - 55																											
	55 - 60																											
	60 - 65																											
	65 - 70																											
	70 - 75																											
	75 - 80																											
	80 - 85																											
	85 - 90																											
	>= 90																											

Abbildung 3.10: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallmission des großen Publikums.

Inffeldgasse 16 kleine Bühne ohne Publikum

RLK in 1.5m Höhe



Zeichenerklärung

- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich LrT, 1h in dB(A)



Maßstab 1:3103



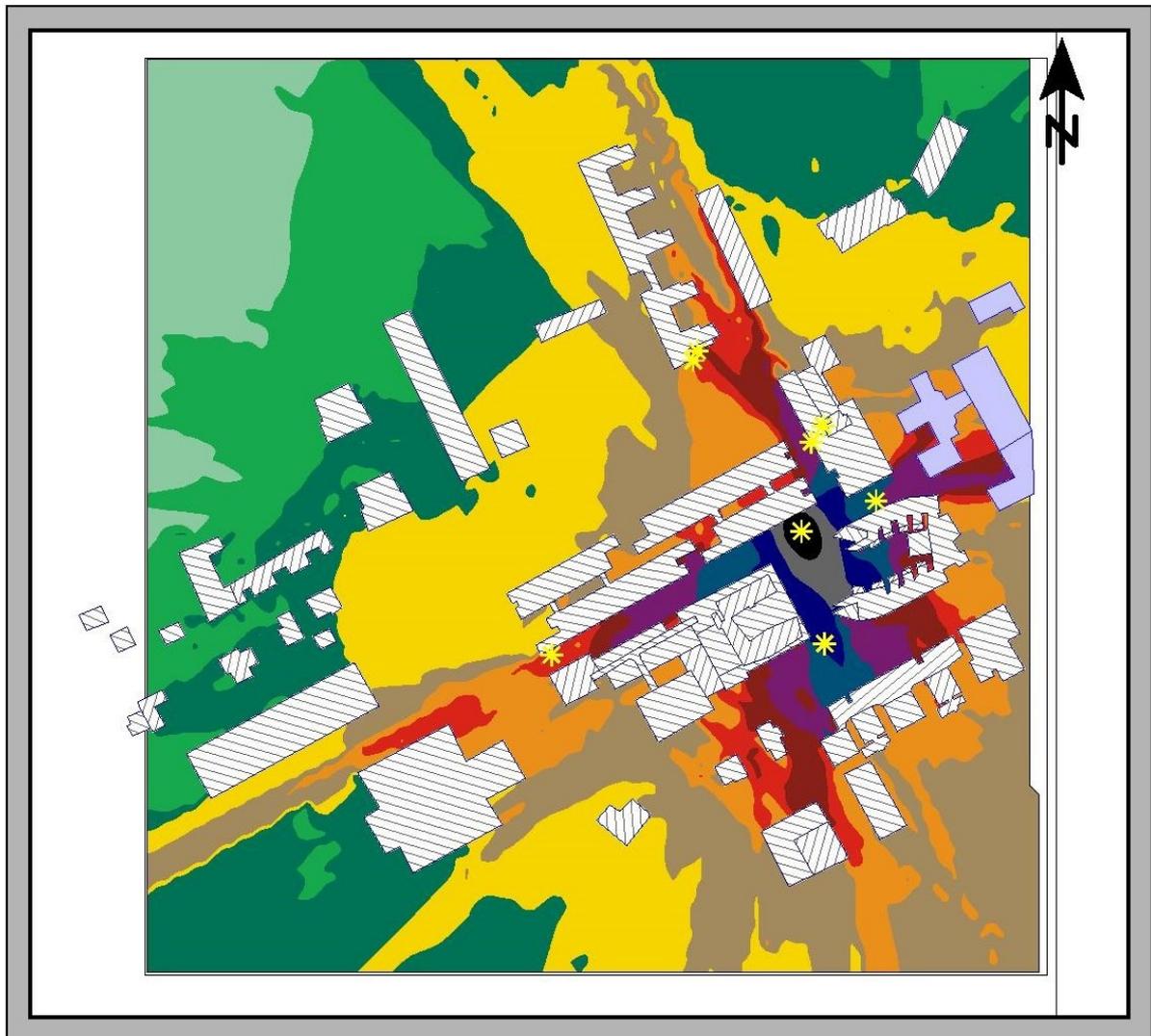
Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 3.11: Rasterlärmmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der kleinen Bühne ohne Publikum.

Inffeldgasse 16 große Bühne ohne Publikum

RLK in 1.5m Höhe



Zeichenerklärung

- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich LrT,1h in dB(A)



Maßstab 1:3214



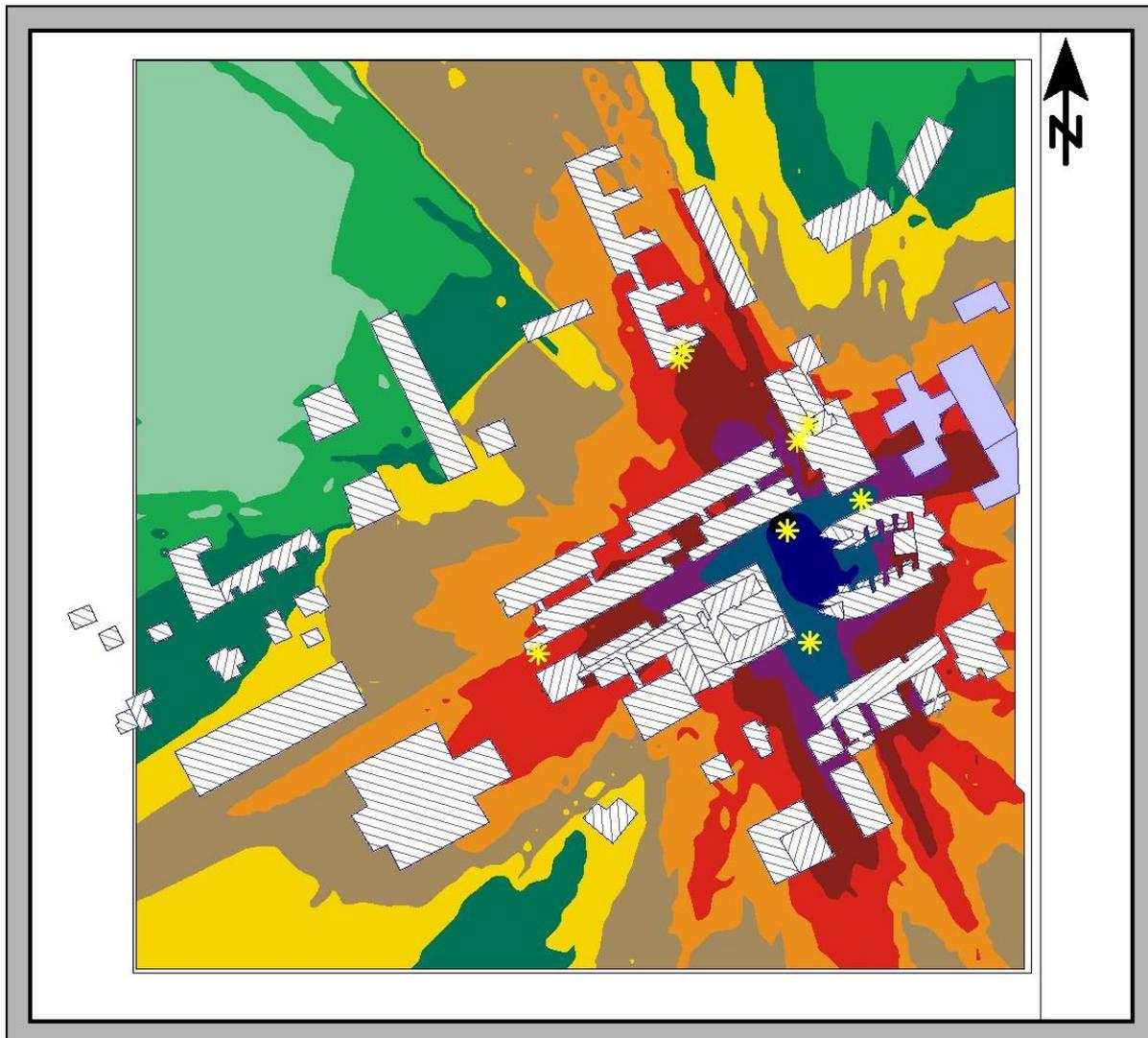
Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 3.12: Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallmission der großen Bühne ohne Publikum.

Inffeldgasse 16 große Bühne ohne Publikum

RLK in 18m Höhe



Zeichenerklärung

- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich LrT,1h in dB(A)

	< 35
	35 - 40
	40 - 45
	45 - 50
	50 - 55
	55 - 60
	60 - 65
	65 - 70
	70 - 75
	75 - 80
	80 - 85
	85 - 90
	>= 90

Maßstab 1:3240



Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 3.13: Rasterlärmkarte in einer Höhe von 18 m für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.

Inffeldgasse 16 kleine Bühne ohne Publikum

RLK mit SAL-Gebäuden in 1.5m Höhe

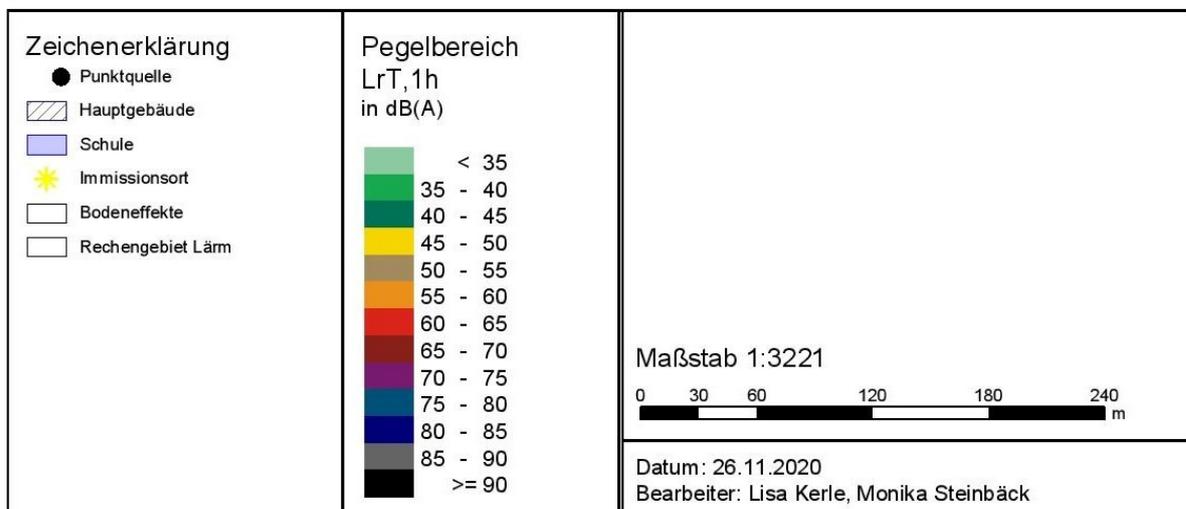
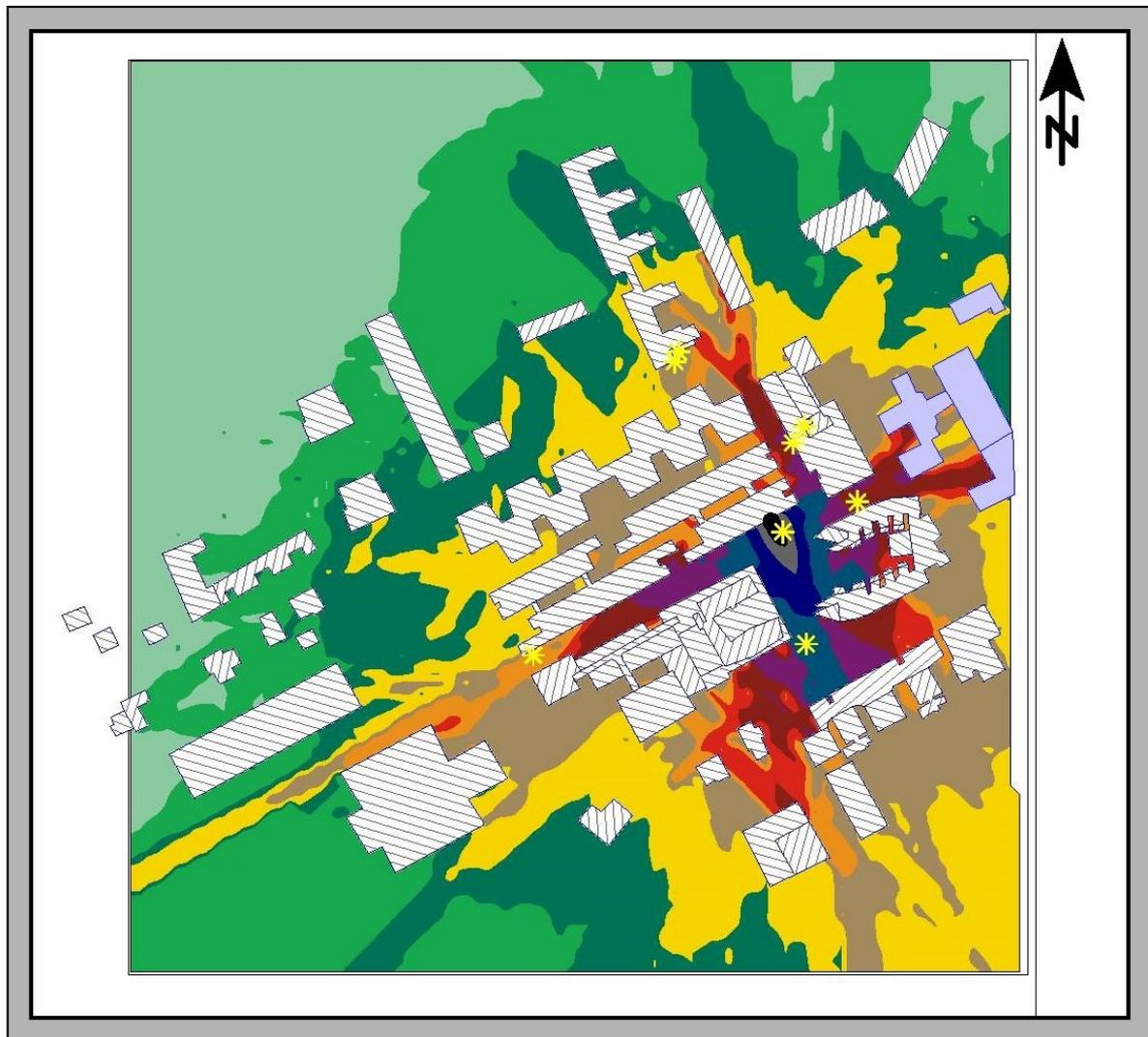
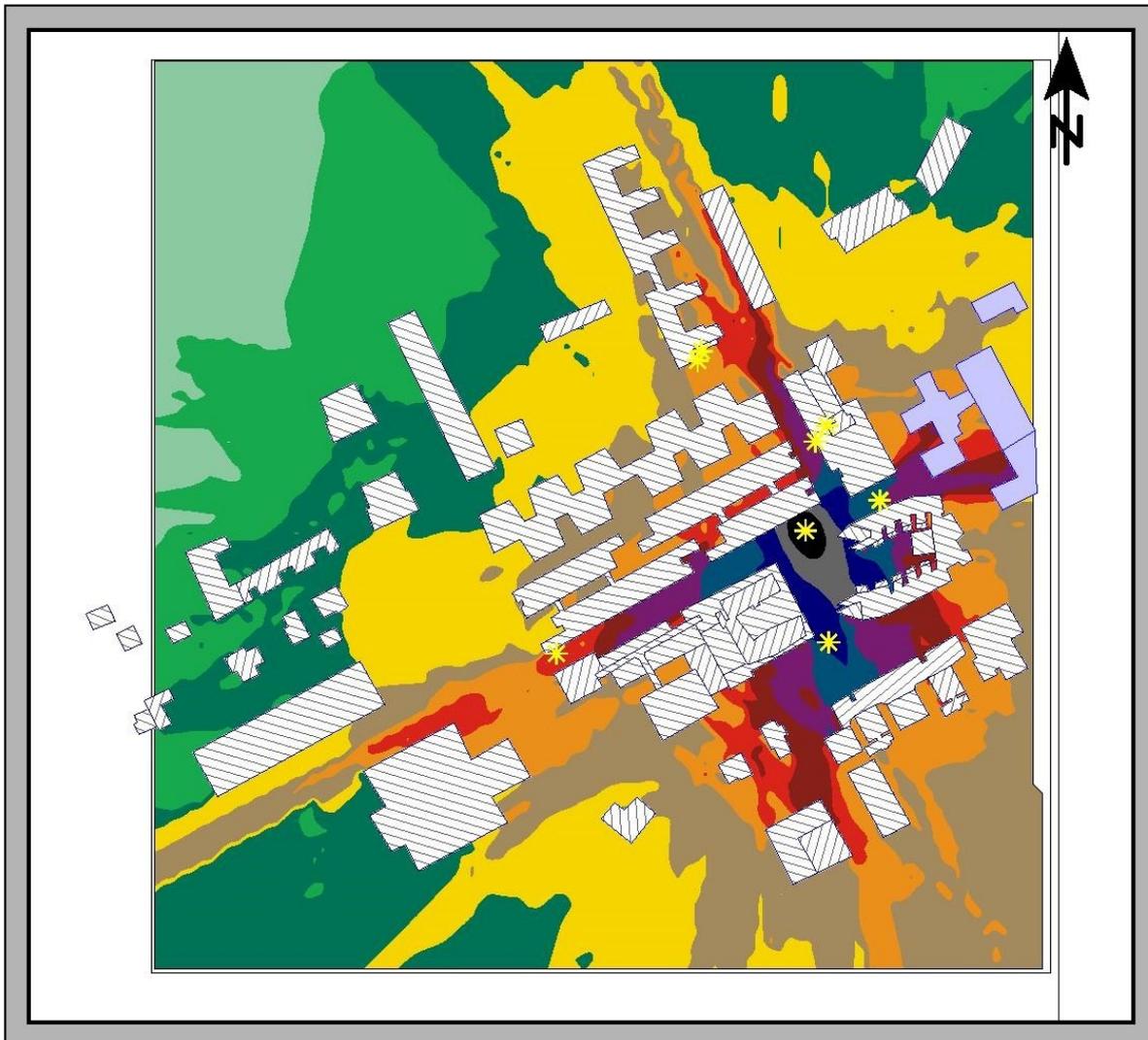


Abbildung 3.14: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der kleinen Bühne ohne Publikum.

Inffeldgasse 16 große Bühne ohne Publikum

RLK mit SAL-Gebäuden in 1.5m Höhe



Zeichenerklärung

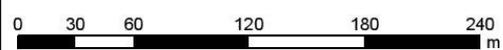
- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich

LrT, 1h
in dB(A)



Maßstab 1:3246



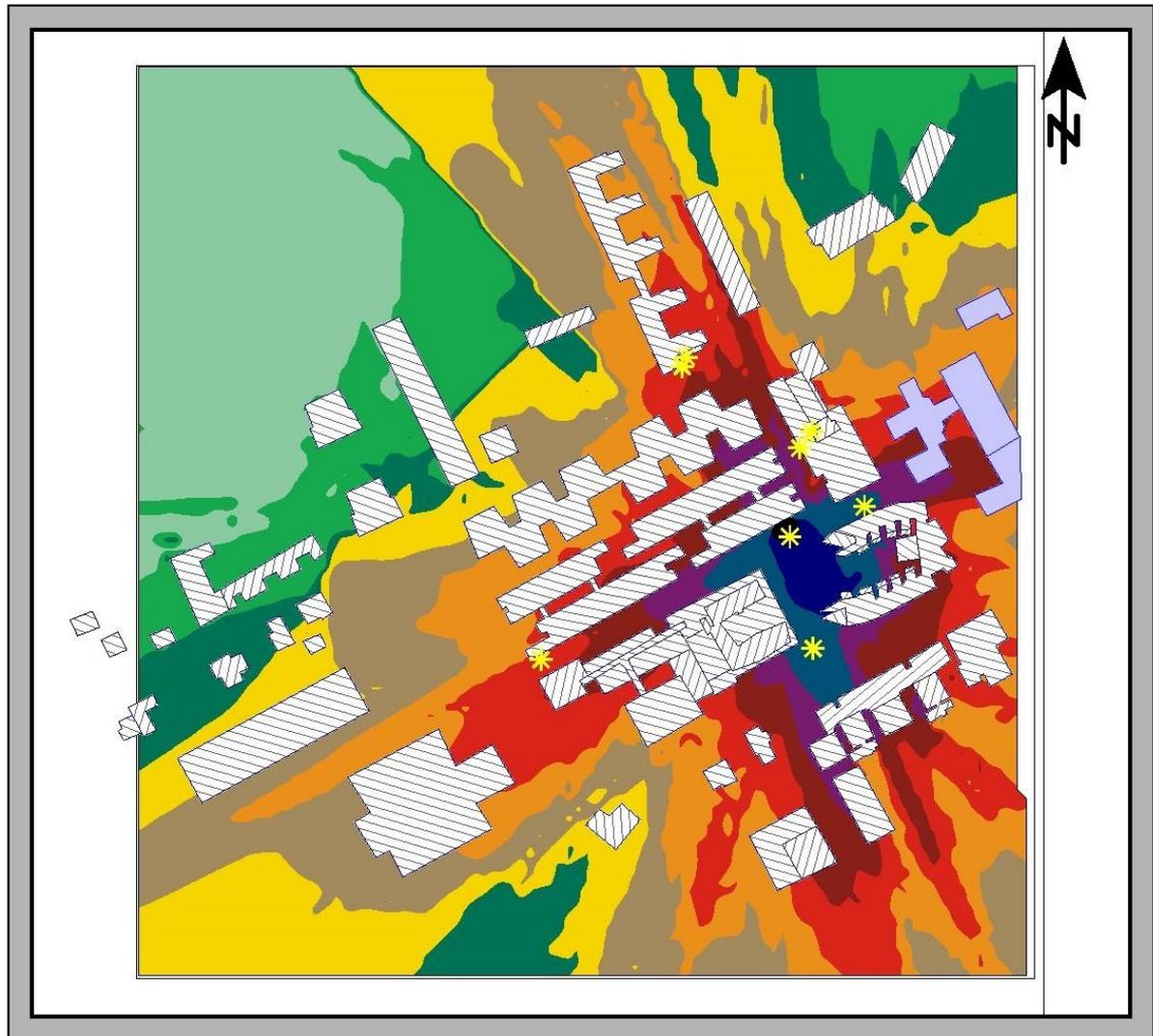
Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 3.15: Rasterlärmmarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.

Inffeldgasse 16 große Bühne ohne Publikum

RLK mit SAL-Gebäuden in 18m Höhe



Zeichenerklärung

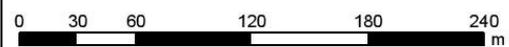
- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich

LrT,1h
in dB(A)



Maßstab 1:3227



Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 3.16: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 18 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.

3.3.2 Schnittlärmkarten

Eine genauere Betrachtung der Schallausbreitung in verschiedener Höhe liefern die Schnittlärmkarten. Hier wird ein Schnitt in das Gelände gesetzt und im Bereich zwischen Boden und 25 m Höhe der Pegel $L_{rT,1h}$ aufgetragen.

Die Schnittlärmkarten werden für zwei Schnitte erstellt (vgl. Abb. 3.17), die die Schallausbreitung einerseits zu der Lärmmessstation (vgl. Abb. 3.17(a)) und andererseits zu den Immissionspunkten x_4 und x_5 in der Sandgasse aufzeigt (vgl. Abb. 3.17(b)). Dadurch wird die Schallausbreitung vom Referenzimmissionspunkt x_1 zu den entsprechenden Immissionspunkten in Abhängigkeit der Höhe und unter Berücksichtigung von Abschattung der dazwischenliegenden Gebäude detaillierter untersucht.

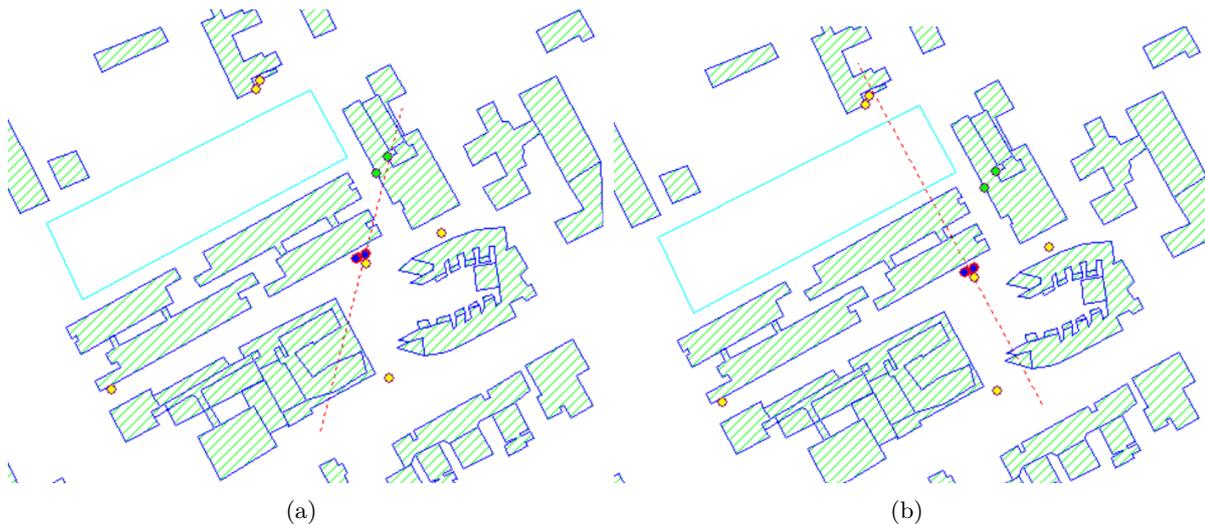


Abbildung 3.17: Schnitt zwischen den Schallquellen (x_1) und der Lärmmessstation (x_2) (a) und Schnitt zwischen den Schallquellen (x_1) und den Immissionspunkten x_4 und x_5 in der Sandgasse (b).

Die Schnittlärmkarte in Abbildung 3.18 wurde mit dem in Abbildung 3.17(a) gesetzten Schnitt erstellt und zeigt somit die Schallausbreitung zwischen dem Referenzimmissionspunkt x_1 und der Lärmmessstation im Immissionspunkt x_2 . Die analog dazu erstellte Schnittlärmkarte mit Berücksichtigung der SAL-Gebäude weist keine Unterschiede auf, daher wird sie hier nicht zusätzlich dargestellt.

In den Abbildungen 3.19 und 3.20 wurden die Schnittlärmkarten mit dem in Abbildung 3.17(b) gesetzten Schnitt zwischen dem Referenzimmissionspunkt x_1 sowie den Immissionspunkten x_4 und x_5 erstellt.

Analog zu Abschnitt 3.3.1 erfolgt die ausführliche Analyse der Schnittlärmkarten in der Diskussion in Abschnitt 5.1.

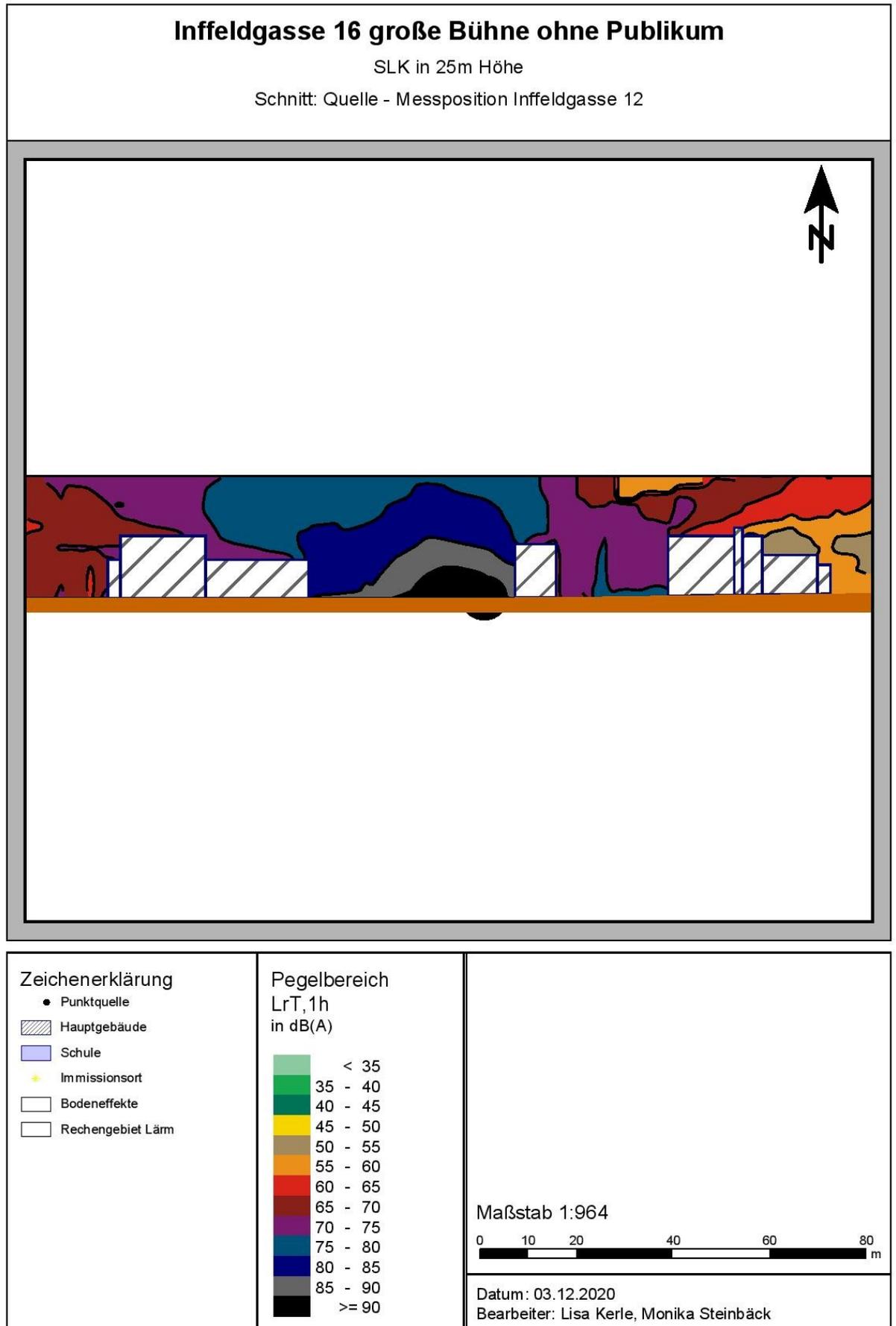


Abbildung 3.18: Schnittlärmkarte für die Schallemission der großen Bühne. Dargestellt sind die Schnitte der Gebäude Inffeldgasse 18 (links), Inffeldgasse 16b (Mitte) und Inffeldgasse 12 (rechts).

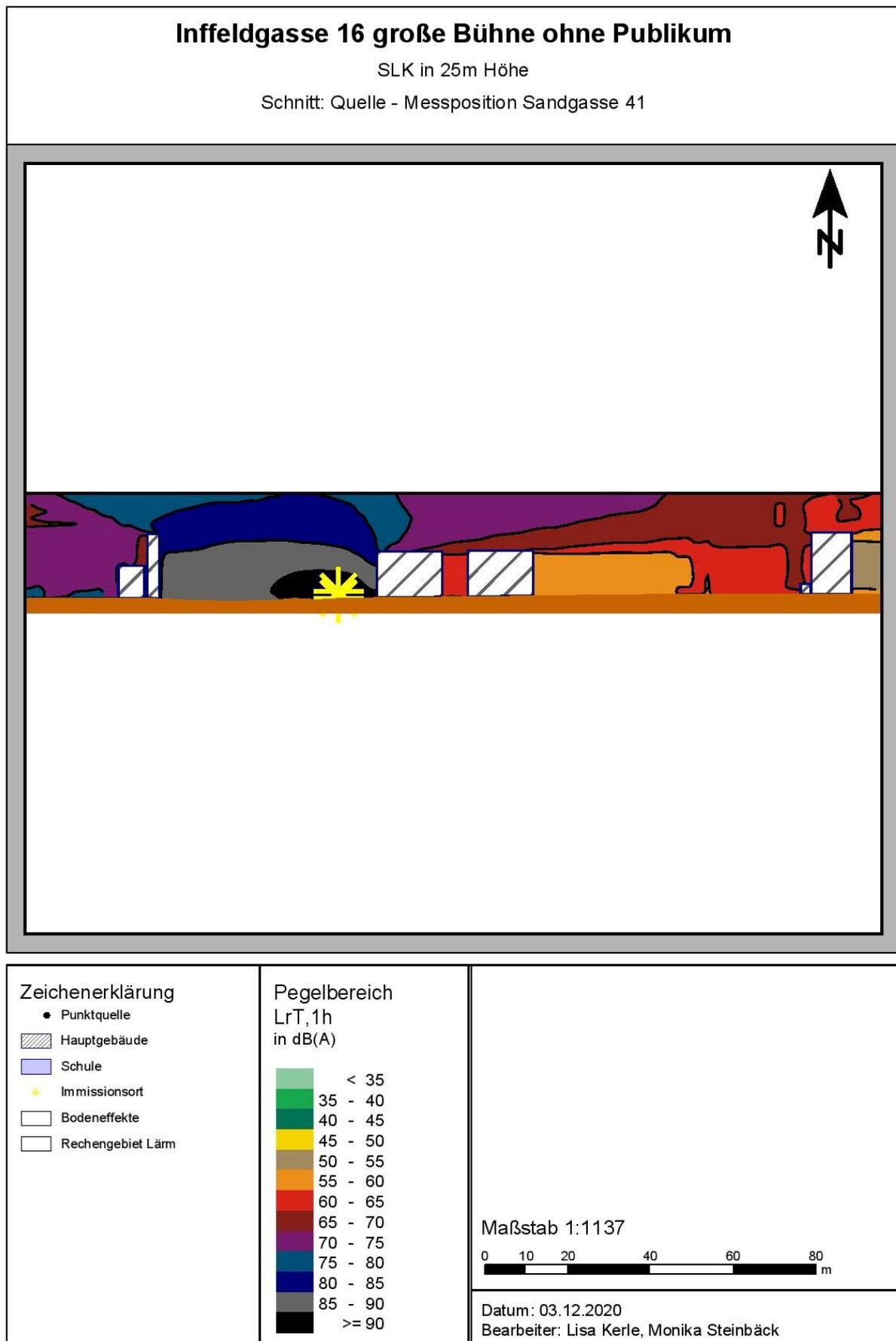


Abbildung 3.19: Schnittlärmmkarte für die Schallemission der großen Bühne. Dargestellt sind die Schnitte der Gebäude Inffeldgasse 10 (links), Inffeldgasse 16b und 16c (Mitte) und Sandgasse 41 (rechts).

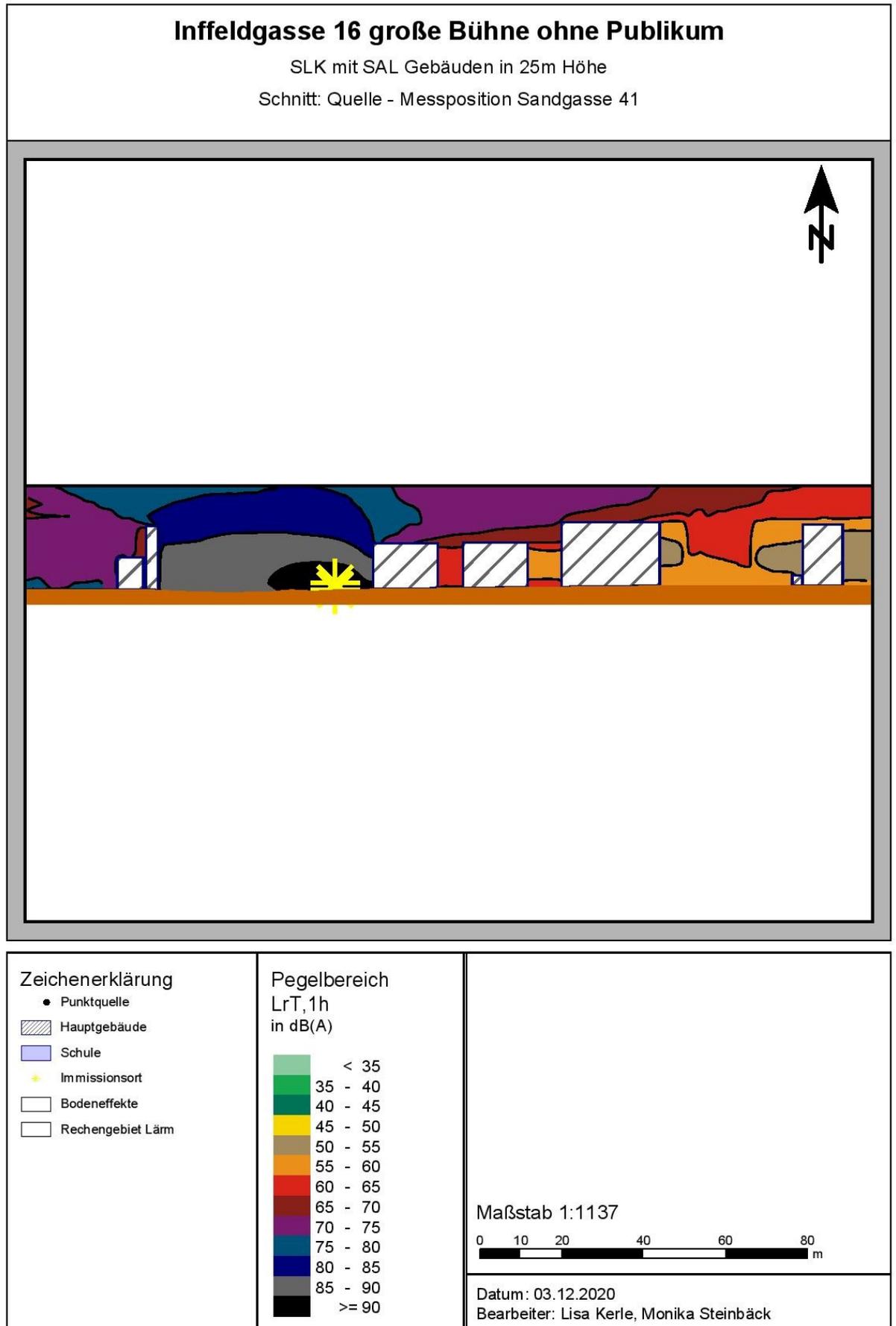


Abbildung 3.20: Schnittlärmkarte für die Schallemission der großen Bühne mit SAL-Gebäuden. Dargestellt sind die Schnitte der Gebäude Inffeldgasse 10 (links), Inffeldgasse 16b und 16c (Mitte) und Sandgasse 41 (rechts).

3.3.3 Ergebnistabellen

In den Ergebnistabellen sind die Pegelwerte für $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten zu sehen. Die Tabellen 3.2 bis 3.5 zeigen die Ergebnisse ohne Berücksichtigung eines Publikums. Da sich die Werte mit Publikum nur um maximal 0.3 dB verändern, sind die entsprechenden Ergebnistabellen im Anhang zu finden (vgl. Kap. 7.1.2).

Um die Ergebnisse mit der anschließenden Messung in Kapitel 4 vergleichen zu können, wird hier die Simulation der Baugrube mitberücksichtigt (vgl. Tab. 3.5).

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	92.6	58.7	67.5	61.0	54.6	68.8	78.8	55.5

Tabelle 3.1: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne ohne Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	96.5	62.3	69.4	61.6	63.9	73.9	82.1	60.7

Tabelle 3.2: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	92.6	58.7	67.5	53.3	53.3	68.8	78.8	55.7

Tabelle 3.3: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne mit SAL-Gebäuden ohne Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	96.5	62.4	69.4	55.8	56.3	73.9	82.1	60.8

Tabelle 3.4: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit SAL-Gebäuden ohne Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	96.5	62.3	69.4	59.2	61.5	73.9	82.1	60.7

Tabelle 3.5: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit Baugrube ohne Publikum.

4

Messung der Schallausbreitung am Campus Inffeldgasse

Mithilfe der Simulation in SoundPLAN konnte die Ausbreitung des Schalls bei Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse genauer untersucht werden (vgl. Kap. 3). Die Ergebnisse der Simulation sollen nun unter realen Bedingungen geprüft werden. Dafür wird in Anlehnung an die Simulation am Campus Inffeldgasse eine Beschallungsanlage aufgebaut und mithilfe eines Messmikrofons das von der Beschallungsanlage erzeugte Anregungssignal an verschiedenen Immissionspunkten gemessen. Die erhaltenen Messsignale werden anschließend analysiert und in Kapitel 5 der Simulation gegenüber gestellt.

4.1 Lageplan

4.1.1 Position der Schallquellen

In Kapitel 3 wurden bereits die potenziellen Bühnenpositionen für Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse erläutert (Vorplatz der Inffeldgasse 16b und Inffeldgasse 18). Im Zuge der Simulation stellte sich heraus, dass insbesondere eine elektroakustische Beschallungsanlage am Vorplatz der Inffeldgasse 16b für erhöhte Pegel im Bereich der Sandgasse verantwortlich ist und eine alternative Bühnenposition zu einer Unterschätzung des Veranstaltungslärms im anliegenden Wohngebiet (Immissionspunkte x_4 und x_5) führen könnte (vgl. Abschn. 3.1.3). Daher wird die elektroakustische Beschallungsanlage für die Messung am Vorplatz der Inffeldgasse 16b platziert (vgl. Abb. 4.1 und Abb. 4.2).



Abbildung 4.1: Installierte elektroakustische Beschallungsanlage am Vorplatz der Inffeldgasse 16b.

4.1.2 Immissionspunkte

In Analogie zur Simulation in SoundPLAN werden im Bereich des Campus Inffeldgasse acht verschiedene Immissionspunkte festgelegt (vgl. Abb. 4.2), deren genaue Lage in Abschnitt 3.1.4 erläutert wurde. Die gewählten Immissionspunkte sollen die Schallausbreitung innerhalb des Campus Inffeldgasse und vor allem auch die Schallimmission im anliegenden Wohngebiet entlang der Sandgasse erfassen. Für jeden Immissionspunkt wird das Messmikrofon 1.60 m über dem Boden platziert, um die Höhe des menschlichen Ohrs zu berücksichtigen.

4.1.3 Baustellenbereich am Campus Inffeldgasse

Zum Zeitpunkt der Messung (07.11.2020) befindet sich das Gebiet zwischen dem Campus Inffeldgasse und der Sandgasse im Umbau. Im Zuge des Baus der dort geplanten SAL-Gebäude (vgl. Abschn. 3.2) wurde die Grünfläche hinter den Gebäuden der Inffeldgasse 16a und 16c aufgehoben, wodurch eine Baugrube in der Größenordnung des Bereichs der bereits bestehenden Gebäude Inffeldgasse 16 und 16a - 16c entsteht (vgl. Abb. 4.2). Die Baugrube beläuft sich auf eine Länge von etwa 175 m und eine Breite von etwa 40 m.

Da sich die Baugrube innerhalb des Messgebiets befindet, könnte diese die Messergebnisse beeinflussen. Daher ist zu beachten, dass sich die Messergebnisse (vgl. Abschn. 4.5) auf die Situation am Campus Inffeldgasse einschließlich der Baugrube beziehen.

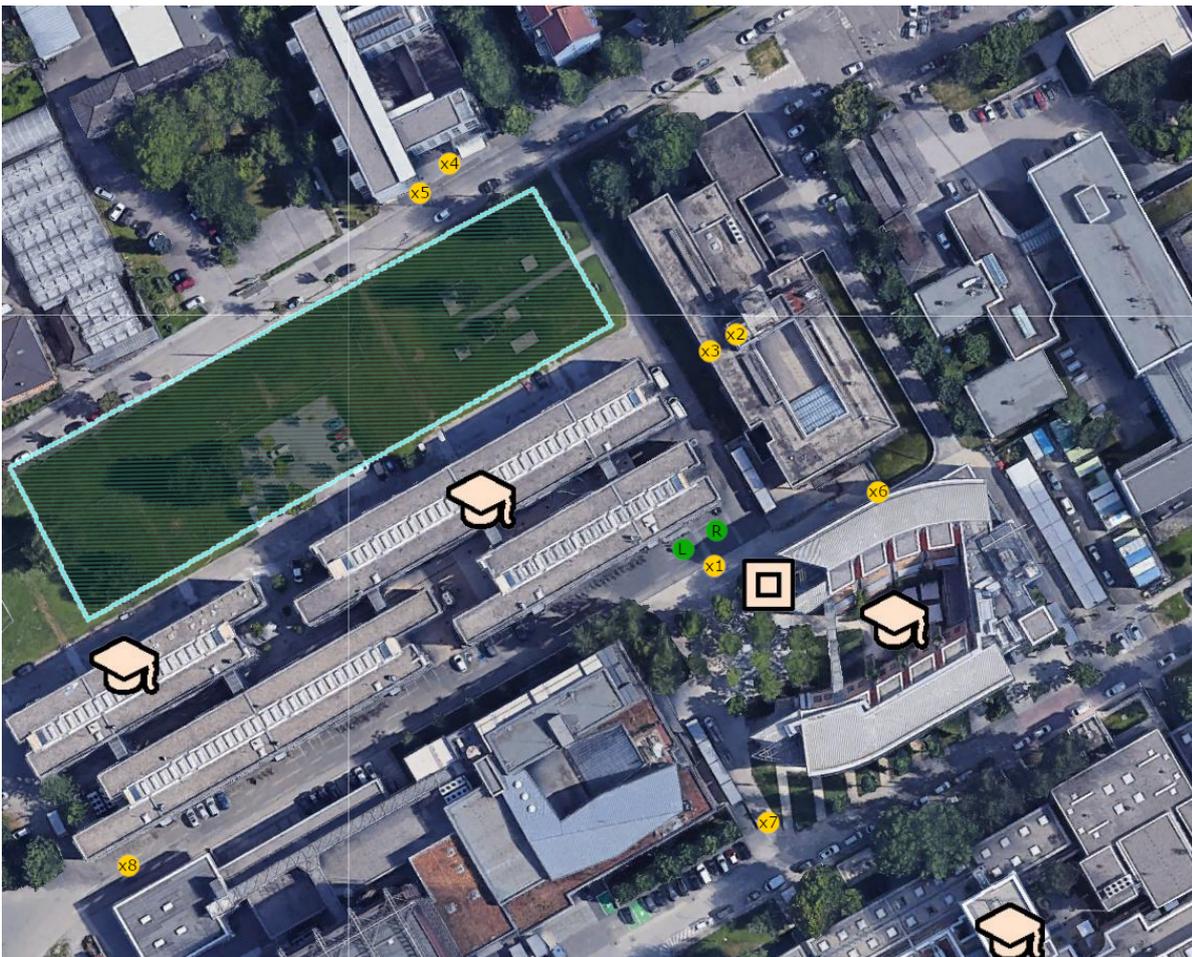


Abbildung 4.2: Bühnenposition am Vorplatz der Inffeldgasse 16b (grün) und Immissionspunkte $x'_1 - x'_8$ am Campus Inffeldgasse und entlang der Sandgasse (gelb) sowie der Grundriss der Baugrube während des Baus der SAL-Gebäude (türkis) [1].

4.2 Verwendetes Equipment

Für Veranstaltungen an der TU Graz haben Studierende die Möglichkeit, das Equipment für musikalische Darbietungen von der HTU⁴ auszuleihen, welche folgendes Equipment im Rahmen verschiedener «Tonpakete» zur Verfügung stellt:

- Aktive Lautsprecherboxen:
 - MACKIE SRM 650 15" 2-Way 1600W High-Definition Powered Loudspeaker
 - MACKIE SRM 550 12" 2-Way 1600W High-Definition Powered Loudspeaker
- Subwoofer:
 - MACKIE SRM 1850 18" 1600W Powered Subwoofer

Das Angebot der HTU reicht von zwei kleineren Tonpaketen bis hin zu einem leistungsstarken Tonpaket, welches jedoch nur auf Anfrage für größere Veranstaltungen mit professioneller Tontechnik verliehen wird.

- Tonpaket 1: 1x MACKIE SRM 550
- Tonpaket 2: 2x MACKIE SRM 550
- leistungsstarkes Tonpaket: 2x MACKIE SRM 650, 4x MACKIE SRM 1850

Anhand der angebotenen Tonpakete wird die Beschallungsanlage für die Messung ausgewählt. Um insbesondere auch größere Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse abzudecken, wird für die Messung auf das leistungsstarke Tonpaket zurückgegriffen.

In Kombination mit der Messausrüstung des Institutes für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der TU Graz wird bei der Messung folgendes Equipment eingesetzt:

- Beschallungsanlage (leistungsstarkes Tonpaket)
 - 2x MACKIE SRM550 1600W High-Definition Powered Loudspeaker
 - 4x MACKIE SRM1850 1600W 18" Powered Subwoofer
- Messmikrofon NTi M2230 bestehend aus Mikrofonskapsel MC230 und Mikrofonverstärker MA220 (Frequenzgang siehe Abb. 7.8 im Anhang)
- Audio-Interface RME Fireface UCX
- Schallkalibrator Brüel & Kjær Typ 4231

Aufgrund des nahezu linearen Frequenzganges des Messmikrofons NTi M2230 (vgl. Abb. 7.8 im Anhang) wird im Anschluss an die Messung keine Entzerrung der Messresultate benötigt.

Der schematische Aufbau der Messkette kann der Abbildung 4.3 entnommen werden.

⁴ Hochschülerinnen- und Hochschülerschaft an der TU Graz

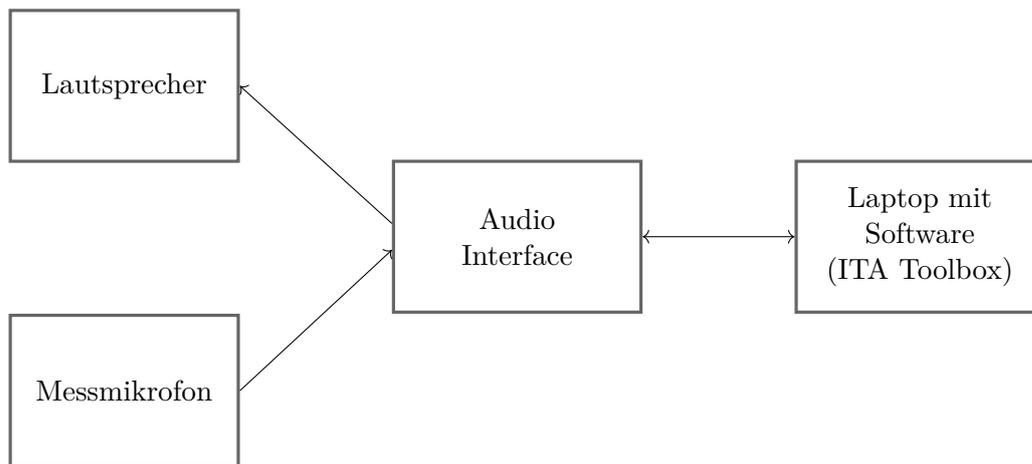


Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau der Messkette.

4.2.1 Software ITA toolbox

Die Messung wird mithilfe der ITA Toolbox realisiert. Die ITA Toolbox ist eine Open-Source Erweiterung für Matlab, mit welcher akustische Messungen sowie auch die Verarbeitung und Analyse von Audiosignalen durchgeführt werden können. Entwickelt wurde diese Toolbox vom Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen University [22].

Diese Software ermöglicht einerseits die Generierung von Anregungssignalen mit bestimmten Eigenschaften und eine individuelle Gestaltung der Messkette. Andererseits dient die ITA Toolbox auch der Analyse und graphischen Darstellung der Messsignale. Dafür stellt die ITA Toolbox zahlreiche Funktionen und Datentypen zur Verfügung, mit welchen sich die digitale Signalverarbeitung, wie beispielsweise die Filterung oder Transformation von Signalen in wenigen Schritten realisieren lässt. Außerdem erlaubt die Toolbox eine rasche und unkomplizierte Erzeugung von Abbildungen, sowohl im Zeitbereich, als auch im Frequenzbereich.

4.3 Messvorgang

4.3.1 Probemessung

Um sich mit dem Equipment und der Software vertraut zu machen, wird im Zuge der Vorbereitung der eigentlichen Messung eine Probemessung durchgeführt. Dabei wird außerdem sichergestellt, dass das gewählte Setup eine sinnvolle Messung zulässt, also das Anregungssignal auch an weiter entfernten Immissionspunkten noch vom Messmikrofon erfasst wird und nicht von Störgeräuschen wie Wind oder Verkehr verdeckt wird.

4.3.2 Voreinstellungen

Bevor mit der tatsächlichen Messung begonnen werden kann, müssen zunächst zahlreiche Voreinstellungen für die Messung und das Messobjekt definiert werden.

Das Anregungssignal wird in den Voreinstellungen durch Parameter wie Bandbreite, Länge, Signaltyp, Ausgangsverstärkung charakterisiert. Auch die Anzahl der Wiederholungen des Anregungssignals pro Messung können variiert werden. Daneben besteht auch die Möglichkeit, die Anzahl der Kanäle für den Eingang bzw. den Ausgang einzustellen.

Außerdem können über die *IO-Settings* die Abtastfrequenz oder die Geräte für die Erzeugung und Aufnahme des Anregungs- bzw. Messsignals festgelegt werden.

Für die Analyse des Messsignals werden der zu betrachtende Frequenzbereich oder die Bänder pro Oktave über die Voreinstellungen definiert. Auch die graphische Darstellung kann durch Schriftfarbe, Schriftart oder Linienbreite verändert werden.

Zur Festlegung der Voreinstellungen in Tabelle 4.1 wird der Code in Listing 7.1 im Anhang verwendet.

Name	Wert	Beschreibung
Signaltyp	'exp'	Exponentieller Sinus-Sweep
Frequenzbereich	[20 20000]	Frequenzbereich des Anregungssignals in Hz
Kanäle am Eingang	[1]	IDs der Kanäle am Eingang
Kanäle am Ausgang	[1]	IDs der Kanäle am Ausgang
Grad der FFT	19	Länge des Anregungssignals in $2^{\text{fftDegree}}$ Samples
Abtastfrequenz	44100	Abtastfrequenz in Hz
Ausgangsverstärkung	-25	Dämpfungsfaktor des Ausgangssignals in dBFS
Mittelungen	5	Anzahl der Mittelungen zur Ergebnisberechnung
Wiederholungen	1	Anzahl der Messwiederholungen
Bänder pro Oktave	3	Anzahl der Bänder pro Oktave (3=Terzbänder)

Tabelle 4.1: Festgelegte Voreinstellungen des Messobjekts.

4.3.3 Kalibrierung

Damit die Messung ordnungsgemäß durchgeführt werden kann, muss das Messmikrofon zunächst kalibriert werden. Da das Messmikrofon für jeden Immissionspunkt über eine variierende Kabellänge mit dem Audiointerface verbunden ist, muss vor jeder Messung separat kalibriert werden. Zur Kalibrierung wird ein Schallkalibrator am Messmikrofon angebracht und der Befehl in Listing 7.2 (Anhang) ausgeführt.

4.3.4 Durchführung

Nachdem die Sensitivität des Messmikrofons erfolgreich eingestellt wurde, kann mit der Messung begonnen werden. Das bereits in den Voreinstellungen definierte Anregungssignal wird dabei über die elektroakustische Beschallungsanlage abgespielt und anschließend an den ausgewählten Immissionspunkten von dem Messmikrofon erfasst. Das gemessene Signal wird als `itaAudio`-Objekt abgespeichert, einer Klasse, welche das Messergebnis sowohl im Zeitbereich, als auch im Frequenzbereich beinhaltet. Die Resultate im Zeitbereich werden direkt als absoluter Schalldruck mit der Einheit Pascal gespeichert. Die ITA Toolbox ermöglicht damit im Anschluss an die Messung eine rasche Auswertung des Messsignals sowie eine anschauliche graphische Darstellung der Messdaten.

Die beschriebene Vorgehensweise ist im Code in Listing 7.3 angeführt (Anhang) und wird im Zuge der Messung für alle definierten Immissionspunkte durchgeführt.

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Messung an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 dar, welche sich direkt an der Sandgasse befinden. Damit das Geräusch vorbeifahrender Fahrzeuge sowie jenes von Passanten und Anwohnern das Messergebnis nicht verfälscht wird, wird an diesen beiden Immissionspunkten mehrmals gemessen und anschließend im Zuge der Analyse über die Messergebnisse gemittelt (vgl. Abschn. 4.4.1).

4.4 Analyse der Messung

Die Analyse der Messergebnisse soll Aufschluss über die Schallausbreitung zwischen dem Emissionspunkt und den Immissionspunkten geben.

Zunächst werden die Messergebnisse an den erforderlichen Immissionspunkten gemittelt und anschließend für jeden Immissionspunkt gesondert analysiert. Dafür werden die gemessenen Informationen im Zeit- und Frequenzbereich aus den Messobjekten extrahiert und in Form einer Impulsantwort und eines Betragsspektrums graphisch veranschaulicht.

Diese Auswertung betrachtet nur die absoluten Pegelwerte, welche erwartungsgemäß mit der erzeugten Schallleistung der Schallquelle variieren und daher wenig Aussagekraft über die generelle Schallausbreitung am Campus Inffeldgasse besitzen. Um die Abhängigkeit der Resultate von der Schallquelle zu vermeiden, wird in der weiterführenden Analyse jeweils die Schallausbreitung zwischen zwei Immissionspunkten betrachtet, indem die Differenz der Betragsspektren von Immissionspunkt x'_n und Referenzimmissionspunkt ermittelt wird.

Als Referenzimmissionspunkte dienen der Immissionspunkt direkt vor der elektroakustische Beschallungsanlage (x'_1) und der Immissionspunkt des bereits installierten Messsystems am Dach der Inffeldgasse 12 (x'_2).

4.4.1 Mittelung über Immissionspunkte

Aufgrund der Umgebungsgeräusche im Bereich der Sandgasse wurde an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 mehrfach gemessen. Im Anschluss an die Messung sollen damit allfällige Störgeräusche durch eine Mittelung über die gemessenen itaAudio-Objekte an diesen Immissionspunkten nach Listing 7.4 (Anhang) eliminiert werden (vgl. Abb. 4.4, Abb. 7.9 im Anhang).

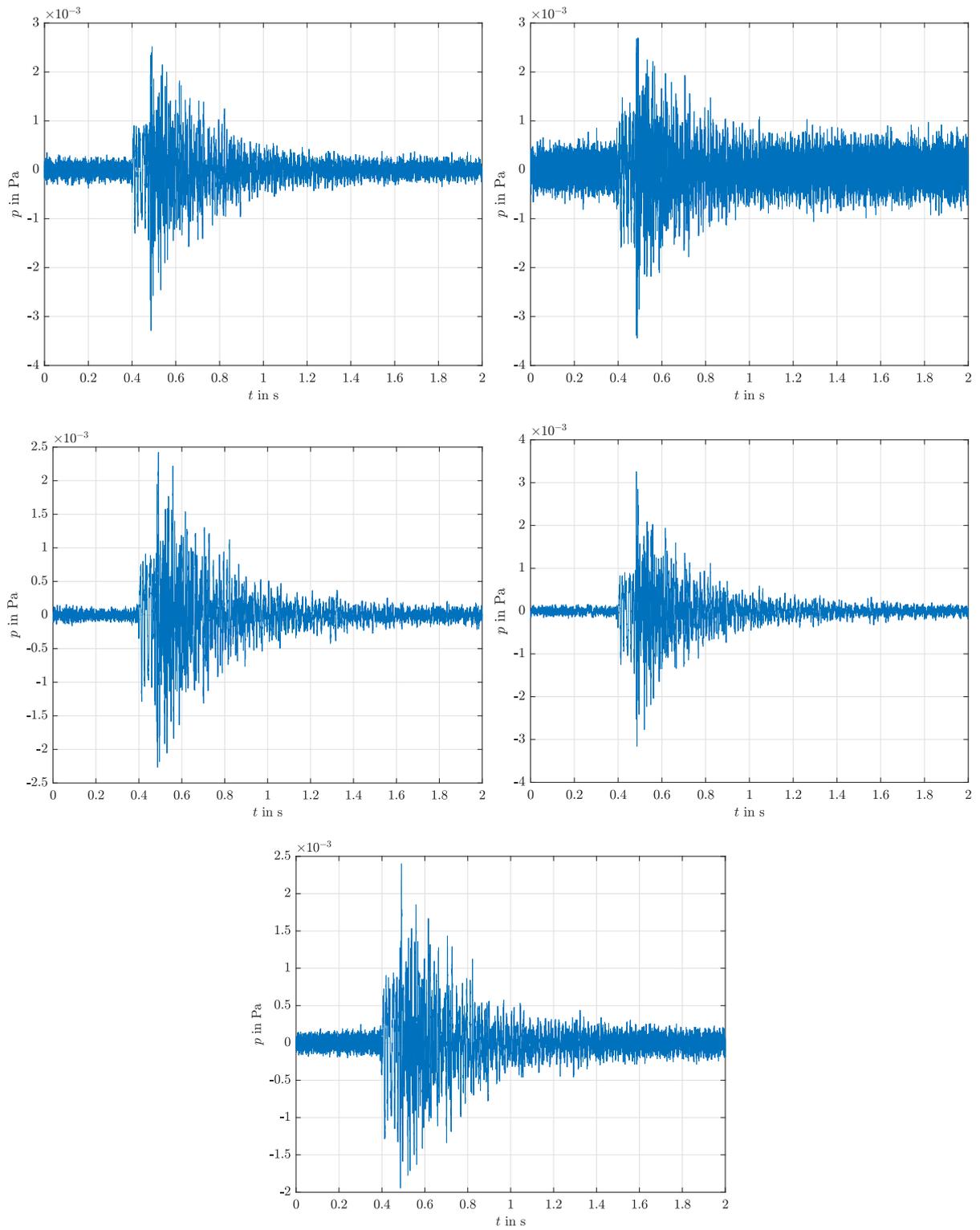


Abbildung 4.4: Ergebnis der Mittelung an Immissionspunkt x'_4 (unten), basierend auf vier Messungen an diesem Immissionspunkt (oben, Mitte).

4.4.2 Definition der Messobjekte

Im Zuge der Messanalyse werden die benötigten Parameter Abtastfrequenz und -periode sowie Referenzschalldruck festgelegt. Anschließend werden die gemessenen bzw. die durch die Mittelung in Abschnitt 4.4.1 ermittelten itaAudio-Objekte geladen und der zu analysierende Immissionspunkt mit zugehörigem Referenzimmissionspunkt definiert (vgl. Code in Listing 7.5 im Anhang).

4.4.3 Darstellung im Zeitbereich

Für die Impulsantworten werden die Information aus dem Zeitbereich extrahiert und die Absolutwerte über der Zeit graphisch dargestellt.

4.4.4 Darstellung im Frequenzbereich

Über die Fourier-Transformation wird die zeitliche Information in den Frequenzbereich transformiert. Das ermittelte Betragsspektrum wird anschließend in Pegelwerte umgerechnet und graphisch dargestellt. Für einen gleichmäßigeren Verlauf wird das Spektrum zudem noch über Terz- und Oktavbänder geglättet. Das geglättete Spektrum wird dem ursprünglichen Spektrum überlagert (vgl. Code in Listing 7.6 im Anhang).

4.4.5 Differenz der Spektren

Die Differenz der geglätteten Betragsspektren der Immissionspunkte und des Referenzimmissionspunktes wird ebenfalls ermittelt, um die Schallpegeldifferenzen zwischen diesen beiden Immissionspunkten für verschiedene Frequenzbereiche zu untersuchen (vgl. Code in Listing 7.7 im Anhang).

$$\Delta L_p = L_{p,Mp} - L_{p,Ref} \quad (4.1)$$

mit:

ΔL_p Differenz der geglätteten Betragsspektren in dB

$L_{p,Mp}$ geglättetes Betragsspektrum des Immissionspunktes x'_n in dB

$L_{p,Ref}$ geglättetes Betragsspektrum des Referenzimmissionspunktes in dB

Aus der Differenz ΔL_p ergibt sich eine Übertragungsfunktion zwischen den beiden beobachteten Immissionspunkten, welche durch deren Entfernung, durch äußere Umwelteinflüsse wie Temperatur und Wind, aber vor allem auch durch die umliegenden Gebäude charakterisiert wird. Daher wird die Differenz L_p in den nachfolgenden Kapiteln auch als Übertragungsfunktion bezeichnet.

4.5 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse aus Abschnitt 4.4 werden in diesem Kapitel graphisch dargestellt. Dafür werden die Immissionspunkte x'_1 und x'_2 jeweils als Referenz verwendet.

Der Fokus liegt hier vor allem auf den Differenzen der geglätteten Betragsspektren (vgl. Abb. 4.6 und 4.8), da diese für die Diskussion in Kapitel 5 relevant sind (vgl. Abschn. 4.4.5).

Auf die Darstellung der Impulsantworten und Betragsspektren aller Immissionspunkte wird verzichtet. Zur Veranschaulichung werden die Impulsantwort und das Betragsspektrum mit überlagertem geglätteten Betragsspektrum für die Referenzimmissionspunkte x'_1 und x'_2 dargestellt (vgl. Abb. 4.5 und 4.7).

4.5.1 Referenzimmissionspunkt x'_1

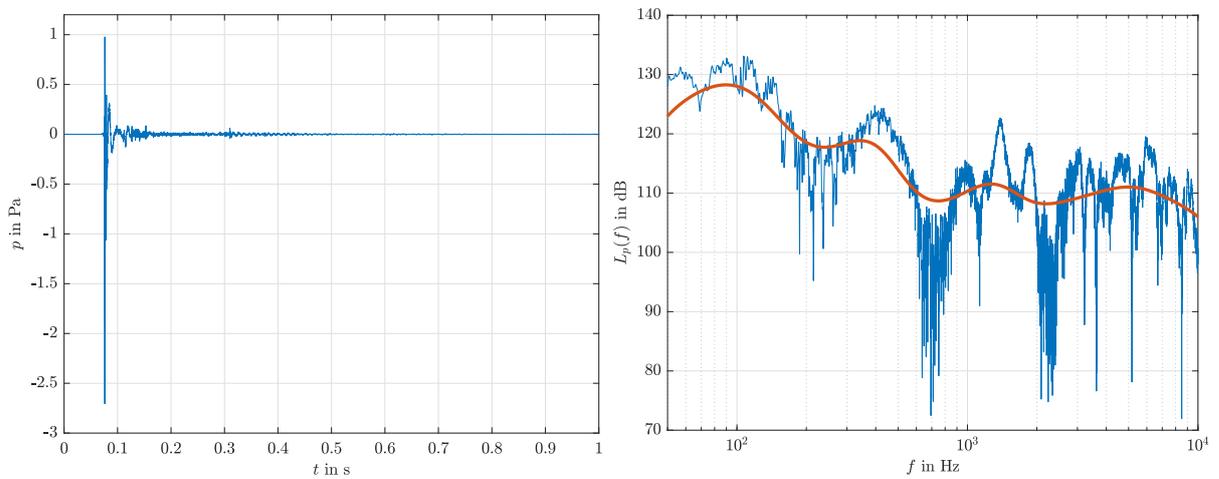


Abbildung 4.5: Impulsantwort an Immissionspunkt x'_1 (links); Betragsspektrum (blau) und über Oktavbänder geglättetes Betragsspektrum (rot) an Immissionspunkt x'_1 (rechts).

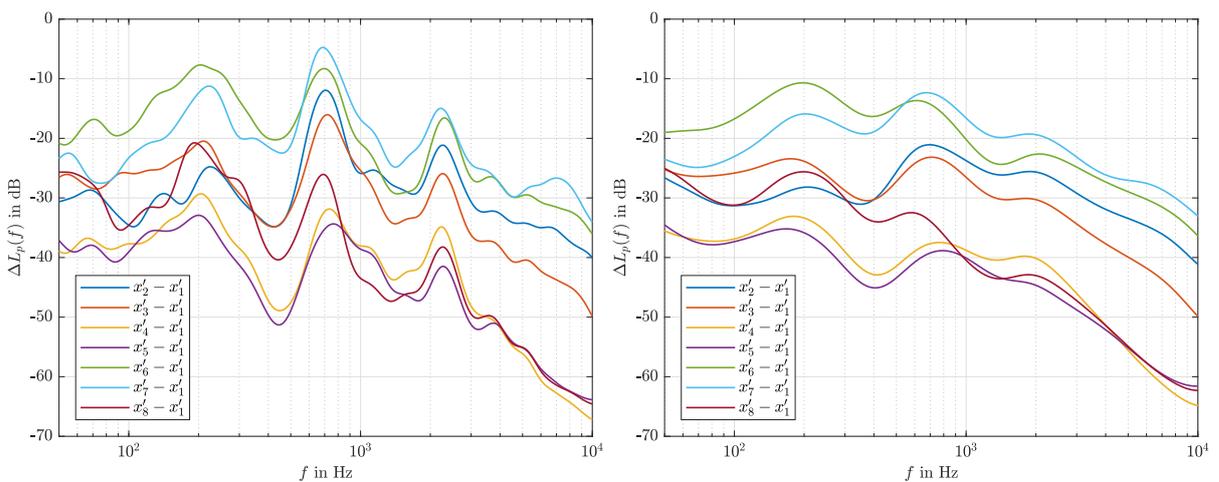


Abbildung 4.6: Differenz der über Terzbänder (links) bzw. Oktavbänder (rechts) geglätteten Betragsspektren von Immissionspunkten x'_n und Referenzimmissionspunkt x'_1 .

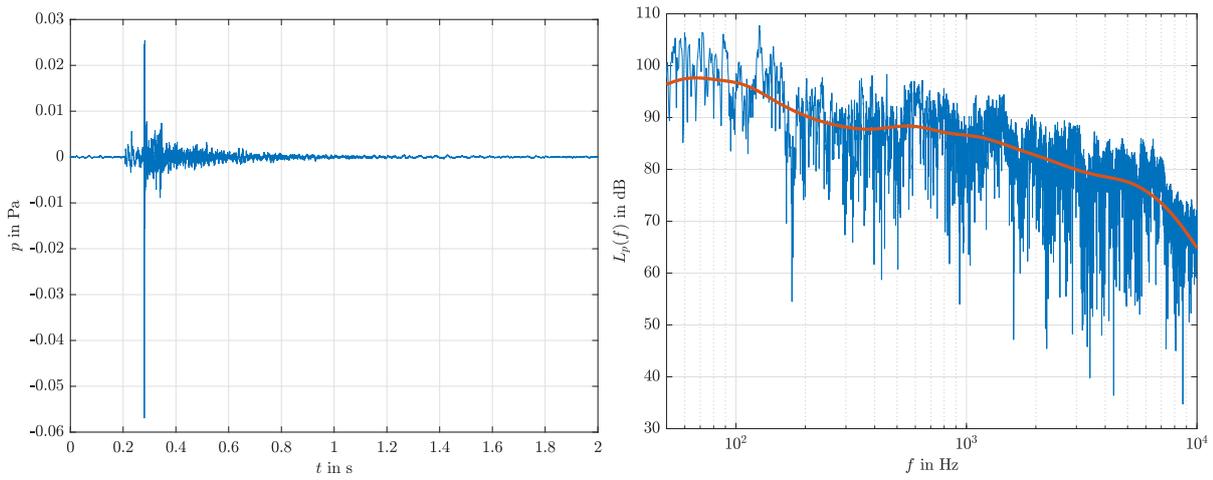
4.5.2 Referenzimmissionspunkt x'_2 

Abbildung 4.7: Impulsantwort an Immissionspunkt x'_2 (links); Betragsspektrum (blau) und über Oktavbänder geglättetes Betragsspektrum (rot) an Immissionspunkt x'_2 (rechts).

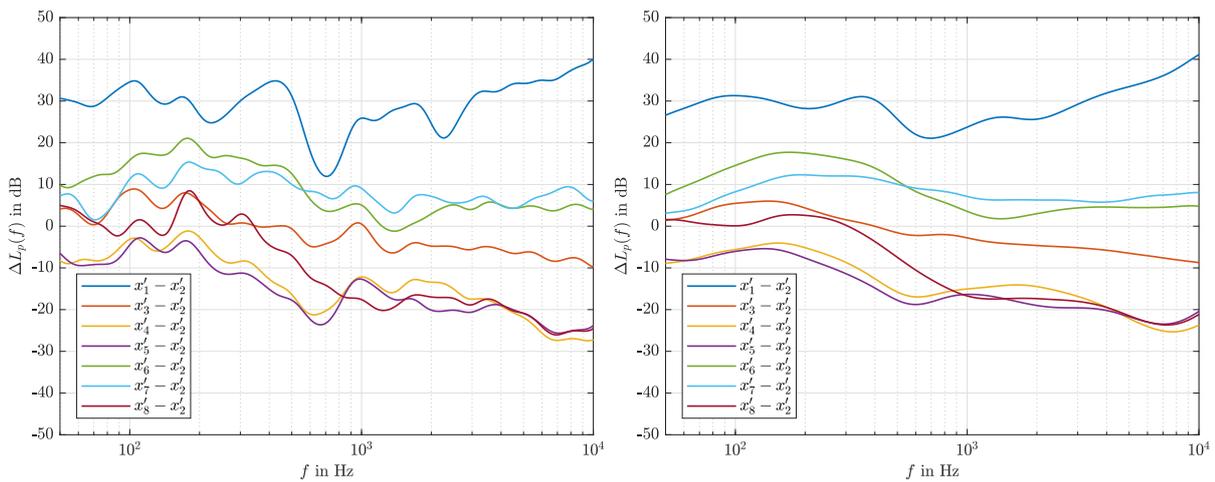


Abbildung 4.8: Differenz der über Terzbänder (links) bzw. Oktavbänder (rechts) geglätteten Betragsspektren von Immissionspunkten x'_n und Referenzimmissionspunkt x'_2 .

5

Diskussion

5.1 SoundPLAN-Ergebnisse

Durch die Simulation mit SoundPLAN konnten wichtige Erkenntnisse über das Verhalten der Schallausbreitung am Campus Inffeldgasse erlangt werden. Bei der Analyse durch Rasterlärnkarten fällt besonders auf, wie sich der Schall zur Sandgasse hin ausbreitet. Es wird eindeutig, dass das Gebäude Sandgasse 41 am stärksten von der Lärmbelastung betroffen ist. Von der Schallquelle aus scheint sich zwischen den Gebäuden Inffeldgasse 12 sowie 16b und 16c eine Art Gasse ungehinderter Schallausbreitung zu bilden, wodurch der Schall verhältnismäßig gering bedämpft wird und sich stark gerichtet ausbreiten kann (vgl. Kap. 3.3.1).

Die Platzierung des Lärmüberwachungssystems am Gebäude Inffeldgasse 12 erscheint aufgrund dieses Verhaltens sinnvoll, allerdings lässt sich durch die Schnittlärnkarte in Abbildung 3.18 deutlich erkennen, dass bereits zwischen der Gebäudewand (x_3) und der Dachmitte eine merkliche Verringerung des Pegels erzielt wird. In Tabelle 3.2 ergibt sich zwischen dem an der Gebäudewand liegenden Immissionspunkt x_3 und dem Punkt der Lärmmessstation x_2 ein Abfall von 7.1 dB.

In Kapitel 3.3.1 wird auch deutlich, dass bereits durch den einzelnen Lautsprecher der «kleinen Bühne» eine merkliche Schallimmission im anliegenden Wohngebiet in der Sandgasse erreicht wird.

Auch die Universitätsgebäude rund um den Veranstaltungsbereich sind von einer großen Lärmbelastung betroffen, durch diese wird aber die Schallausbreitung aus dem Campus hinaus verringert. Es lässt sich feststellen, dass sich die Gebäude 16 sowie 16a - 16c ähnlich einer Lärmschutzwand zum Wohngebiet in der Sandgasse verhalten, sodass die Pegel deutlich verringert werden (vgl. Abb. 3.12). In den Abbildungen 3.13 und 3.19 ist jedoch zu sehen, dass ein erheblicher Anteil der Schallemission die Gebäude 16, 16a, 16b und 16c überschreitet. Es wird deutlich, dass vor allem die oberen Stockwerke auch bis zur Mitte des Gebäudes Sandgasse 41 eine erhöhte Schallimmission erfahren. Die in den Abbildungen 3.14 und 3.15 gezeigten Rasterlärnkarten mit Berücksichtigung der SAL-Gebäude zeigen, welche deutlichen Verbesserungen durch den Bau der Gebäude in der Sandgasse erreicht werden. Durch die größere Gebäudehöhe werden auch Verbesserungen in den oberen Stockwerken der Sandgasse 41 erzielt (vgl. Abb. 3.20).

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 erwähnt, stellt das simulierte Publikum keine bedeutende Lärmquelle bei Verwendung einer elektroakustischen Anlage dar (vgl. Abb. 3.10 sowie Abb. 7.4 bis 7.7). Die Pegelwerte der Einzelpunkte in den Ergebnistabellen in Abschnitt 3.3.3 und 7.1.2 bestätigen diese geringe Abweichung.

Nun werden die Ergebnisse für die Immissionspunkte x_4 und x_5 in Kapitel 3.3.3 mit den vorgeschriebenen Richtlinien in Kapitel 2 verglichen. In Tabelle 2.3 unter «Städtisches Wohngebiet» finden sich die Richtwerte, die in der Sandgasse für häufig vorkommende Veranstaltungen gelten. Für selten vorkommende Veranstaltungen gelten die Richtwerte in Tabelle 2.4.

Für die Situation mit großer Bühne werden die Richtwerte für seltene Veranstaltungen herangezogen, wobei der am Tag geltende Richtwert auch für 10 Veranstaltungen pro Jahr eingehalten

wird (vgl. Tab. 3.2 mit Tab. 2.4). Die Pegel überschreiten aber den in der Nacht geltenden Richtwert.

Ordnet man die Situation mit kleiner Bühne nun häufigen Veranstaltungen zu, wird am Immissionspunkt x_4 bereits der am Tag geltende Richtwert leicht überschritten. Der Pegel am Immissionspunkt x_5 liegt erst für den in der Nacht geltenden Richtwert im kritischen Bereich (vgl. Tab. 3.1 mit Tab. 2.3).

Die Berücksichtigung der SAL-Gebäude erzeugt eine Verbesserung um etliche dB, sodass sowohl für die Situation mit kleiner als auch mit großer Bühne die am Tag geltenden Richtwerte für häufige Veranstaltungen eingehalten werden (vgl. Tab. 3.3 und 3.4 mit Tab. 2.3).

Auch die Berücksichtigung der Baugrube erzeugt bereits eine deutliche Verbesserung (vgl. Tab. 3.5 mit Tab. 2.3).

5.2 Messergebnisse

Um die Ergebnisse der Messung mit den vorgegebenen Richtwerten aus Kapitel 2 vergleichen zu können, muss zunächst ein vergleichbarer Wert zum Beurteilungspegel für jeden Immissionspunkt ermittelt werden. Dazu werden die gemessenen Impulsantworten A-bewertet, um eine Anpassung an den Beurteilungspegel vorzunehmen. Anschließend folgt eine Terzbandfilterung des Messsignals, um jedes Frequenzband in Form einer Fouriertransformation und einer Mittelung separat zu analysieren (vgl. Gl. 5.1 [23]).

Für den Gesamtpegel werden die gemittelten Teilpegel nach Gleichung 5.2 [23] für jeden Immissionspunkt aufsummiert (vgl. Abb. 5.1 und Code in Listing 7.8 im Anhang).

Die Analyse ergibt somit für jeden Immissionspunkt einen Einzahlwert $L_{p,A,ges}$, welcher für einen Vergleich mit den erlaubten Beurteilungspegeln aus den Normen und Richtlinien herangezogen werden kann (vgl. Tab. 5.1).

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_n^N 10^{\frac{L_{p,n}}{10}} \right) \quad (5.1)$$

mit:

L_p mittlerer Schalldruckpegel pro Frequenzband in dB

$L_{p,n}$ Teilpegel n innerhalb des Frequenzbandes in dB

N Anzahl der Teilpegel pro Frequenzband

$$L_{p,ges} = 10 \cdot \log \left(\sum_m^M 10^{\frac{L_{p,m}}{10}} \right) \quad (5.2)$$

mit:

$L_{p,ges}$ Gesamtschalldruckpegel in dB

$L_{p,m}$ mittlerer Schalldruckpegel des Frequenzbandes m in dB

M Anzahl der Frequenzband-Teilpegel

Es ist deutlich erkenntbar, dass die Pegel für die Immissionspunkte x'_4 und x'_5 die Richtwerte für häufig vorkommende Veranstaltungen überschreiten (vgl. Tab. 2.3). Der in Tabelle 5.1 angegebene Pegel am Immissionspunkt x'_1 wird als Referenz herangezogen und entspricht somit dem Emissionspegel. Da die Messung mit «leistungsstarkem Equipment» durchgeführt wurde, kann angenommen werden, dass Veranstaltungen mit jenem Equipment in die Kategorie der selten

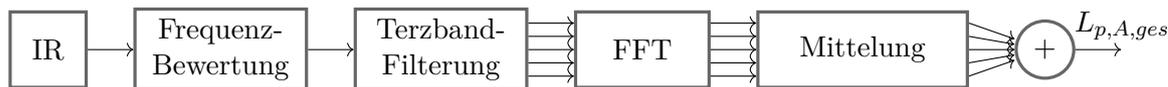


Abbildung 5.1: Terzbandanalyse zur Ermittlung des Gesamtpegels $L_{p,A,ges}$ für jeden Immissionspunkt.

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
$L_{p,A,ges}$ in dB(A)	109.4	79.1	75.8	64.6	62.5	85.8	86.3	68.0

Tabelle 5.1: A-bewerteter Gesamtschalldruckpegel $L_{p,A,ges}$ der Messergebnisse.

vorkommenden Veranstaltungen eingeordnet werden können, sodass die Richtwerte aus Tabelle 2.4 gelten. Somit werden die am Tag geltenden Richtwerte eingehalten, jene bei Nacht geltenden jedoch überschritten.

Auffällig ist, dass hier im Gegensatz zu den Ergebnissen in SoundPLAN an Immissionspunkt x'_2 ein höherer Gesamtpegel als an Immissionspunkt x'_3 erreicht wird, sodass dieser für die Einhaltung der Richtlinien an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 aussagekräftiger erscheint. Allerdings könnte es sein, dass am Immissionspunkt x'_2 durch Windgeräusche fälschlicherweise ein höherer Pegel erzielt wurde, welche bei der Simulation nicht berücksichtigt werden.

In Kapitel 2.3 werden für die Grenzwerte am Campus für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel 70 dB am Tag und 60 dB in der Nacht angegeben (vgl. Tab. 2.5). Das bei der Messung verwendete Equipment erzeugt einen Schalldruckpegel von ≈ 110 dB(A), wodurch am Immissionspunkt x'_2 der Grenzwert um 9 dB überschritten wird.

Bei Betrachtung der Messergebnisse im Frequenzbereich (vgl. Abb. in Kap. 4.5) fällt auf, dass die Betragsspektren teilweise starke Welligkeit aufweisen, sodass der Verlauf erst über eine entsprechende Glättung gut erkennbar wird. Vor allem weisen aber auch die bereits geglätteten Übertragungsfunktionen zu den Referenzpositionen starke Schwankungen auf. Es ist also zu beachten, dass bei der Beurteilung des Veranstaltungslärms mittels frequenzbewertetem energieäquivalentem Dauerschallpegels lediglich ein Einzahlwert zur Beschreibung des gesamten Frequenzbereichs herangezogen wird, welcher keine Auskunft über die Beiträge der einzelnen Frequenzbänder liefert. Die frequenzabhängigen Überhöhungen und Absenkungen in den einzelnen Frequenzbereichen werden erst bei der Aufteilung des gemessenen Immissionspegels in einzelne Frequenzbänder deutlich.

5.3 Vergleich der Ergebnisse

5.3.1 Ermittlung der Immissionsspektren

Im Zuge des Vergleichs der Ergebnisse aus Simulation und Messung (vgl. Kap. 3 und Kap. 4) werden die Ergebnisse für jedes Frequenzband separat ermittelt und anschließend miteinander verglichen. Somit kann untersucht werden, in welchen Frequenzbereichen die größte Abweichung zwischen Simulation und Messung besteht. Für den groben Vergleich von Messung und Simulation werden die Pegelwerte pro Oktavband ermittelt. Für eine höhere Frequenzauflösung werden die Ergebnisse zusätzlich für jedes Terzband bestimmt.

Die Messung am Campus Inffeldgasse entspricht der Simulation «große Bühne am Vorplatz der Inffeldgasse 16b ohne Publikum» in SoundPLAN. Da die Messung während des Baus der SAL-Gebäude durchgeführt wurde (vgl. Abschn. 4.1.3), wird die Situation einschließlich der Baugrube im Vergleich ebenfalls berücksichtigt.

Über die Ergebnistabellen in SoundPLAN lässt sich der Beurteilungspegel an verschiedenen Immissionsorten sowohl in Terzbandauflösung als auch in Oktavbandauflösung extrahieren. Um einen Vergleich mit den ermittelten Pegeln aus der Messung herzustellen, wurde in der Simulation der Beurteilungspegel am Tag, gemittelt über die lauteste Stunde $L_{rT,1h}$ betrachtet.

Die in der Simulation berechneten Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ pro Frequenzband sind für die Situationen mit und ohne Baugraube den Tabellen 7.5 und 7.7 im Anhang zu entnehmen (vgl. Abschn. 7.3.2). Dabei ist zu beachten, dass die Baugraube ausschließlich die Messergebnisse an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 beeinflusst und daher die Ergebnisse beider Situationen in einer Tabelle vereint werden.

Um entsprechende Vergleichswerte aus der Messung zu erhalten, werden die gemessenen Impulsantworten aus Kapitel 4 zunächst A-bewertet. Diese Frequenzbewertung soll für eine bessere Übereinstimmung mit dem Beurteilungspegel aus der Simulation sorgen (vgl. Abschn. 2.1.4). Anschließend werden die A-bewerteten Messergebnisse in Oktavbänder bzw. Terzbänder unterteilt und eine Analyse in Analogie zu Abschnitt 5.2 für jedes Frequenzband durchgeführt (vgl. Abb. 5.1 und Code in Listing 7.8).

Die gemittelten Teilpegel ergeben ein Immissionspektrum für jeden Immissionspunkt, welches den Tabellen 7.6 und 7.8 im Anhang zu entnehmen ist (vgl. Abschn. 7.3.2).

5.3.2 Differenz der Immissionsspektren

Die in Abschnitt 5.3.1 ermittelten Pegelwerte pro Frequenzband sind erwartungsgemäß von der erzeugten Schalleistung der Schallquelle abhängig. Um die Ergebnisse von Simulation und Messung sinnvoll miteinander vergleichen zu können, werden pro Frequenzband die Differenzen der einzelnen Immissionspunkte und einem Referenzimmissionspunkt (x'_1 bzw. x'_2) gebildet und die resultierenden Werte miteinander verglichen (vgl. Tab. 7.9 bis 7.16 in Abschnitt 7.3.3).

5.3.3 Graphischer Vergleich

Zusätzlich werden die Differenzen zwischen Simulation und Messung graphisch dargestellt, um die Abweichungen in den einzelnen Frequenzbändern aussagekräftiger zu veranschaulichen (vgl. Abb. 5.2 bis 5.4).

Für die Simulation wird die Differenz des Beurteilungspegels $L_{rT,1h}$ zwischen den Immissionspunkten x_n und den Referenzimmissionspunkten in Terzbandauflösung aus der Simulation verwendet (vgl. Tab. 7.10 und 7.12) und graphisch dargestellt.

Um die Differenzen aus der Messung zu erhalten, werden die Betragsspektren über Oktavbänder (bpo/bands per octave = 1) bzw. Terzbänder (bpo = 3) geglättet und anschließend die Differenz der geglätteten Betragsspektren gebildet (vgl. Abschn. 4.4.5).

Mithilfe der simulierten Baugraube konnten die Differenzen aus SoundPLAN für die Immissionspunkte x_4 und x_5 im mittleren Frequenzbereich jenen aus der Messung angenähert werden (vgl. Abb. 5.4 (a) mit Abb. 5.2 (d) und Abb. 5.4 (b) mit 5.3 (a)).

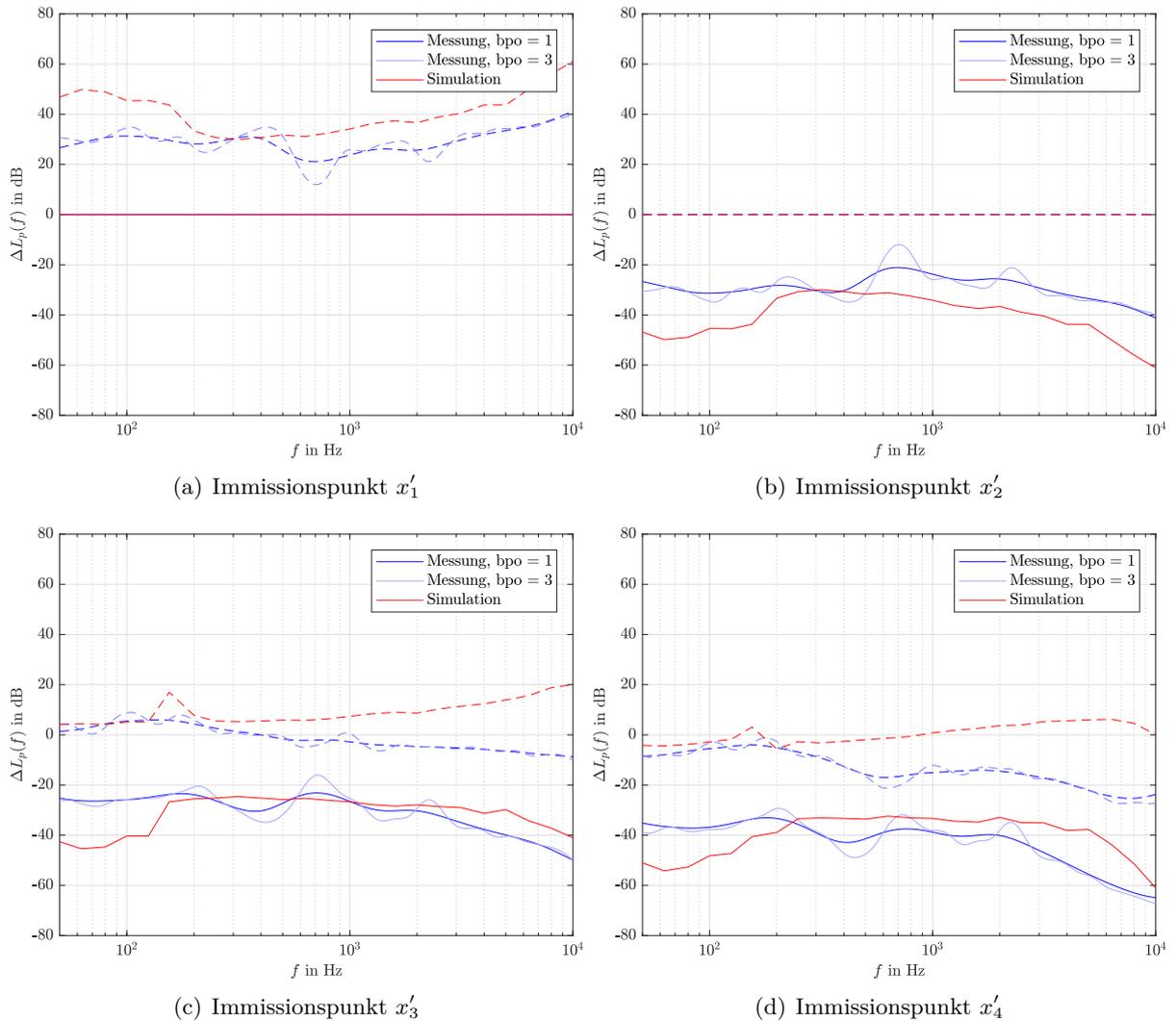


Abbildung 5.2: Vergleich der Differenzen zu Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgehend) und x'_2 (strichliert) bei Simulation und Messung mit Terzband- ($bpo = 3$) und Oktavbandglättung ($bpo = 1$).

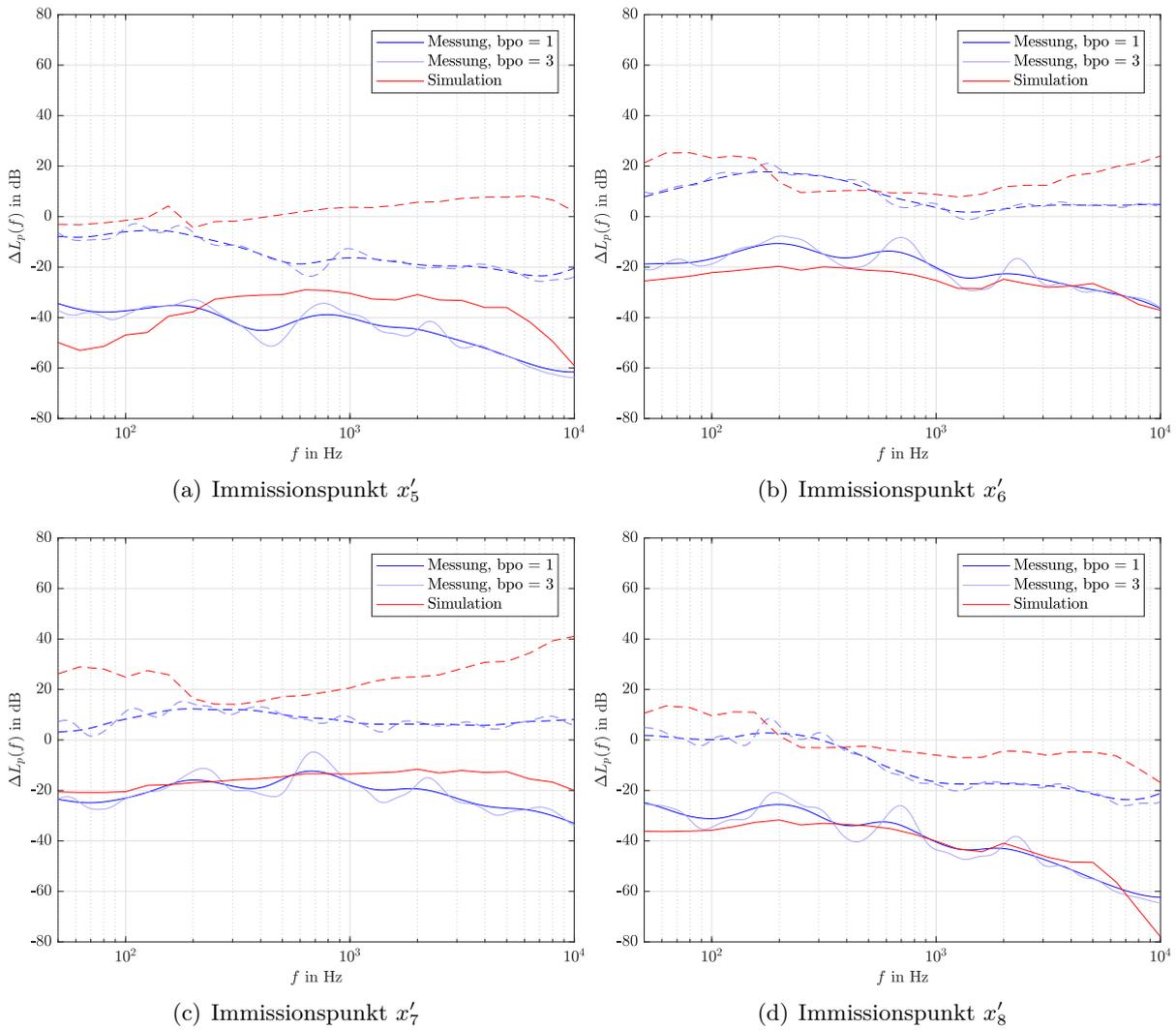


Abbildung 5.3: Vergleich der Differenzen zu Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgehend) und x'_2 (strichliert) bei Simulation und Messung mit Terzband- ($bpo = 3$) und Oktavbandglättung ($bpo = 1$).

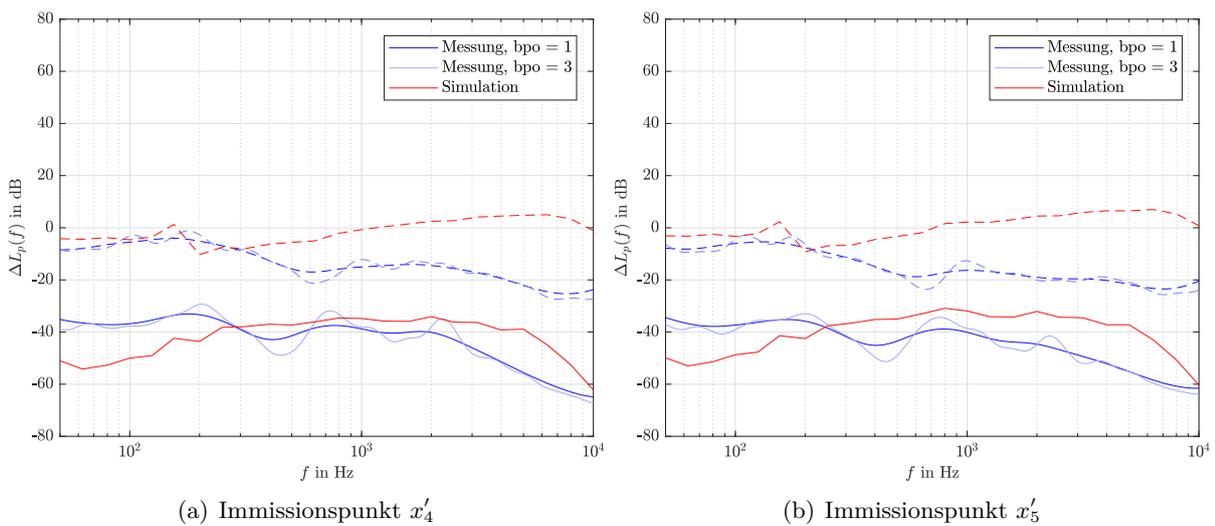


Abbildung 5.4: Vergleich der Differenzen zu Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgehend) und x'_2 (strichliert) bei Simulation und Messung mit Terzband- ($bpo = 3$) und Oktavbandglättung ($bpo = 1$) unter Berücksichtigung der Baugrube.

5.3.4 Analyse der Ergebnisse im Vergleich

Generell lässt sich anhand der Analyse aus Abschnitt 5.3 sagen, dass die Ergebnisse von Simulation und Messung mäßig gut übereinstimmen. Die Übertragungsfunktionen der Messungen mit Terzbandglättung weisen im Vergleich zu jenen der Simulation eine große Welligkeit auf, welche mithilfe der Oktavbandglättung verringert wird. Dadurch ergeben sich vor allem für die Pegeldifferenzen zum Referenzimmissionspunkt x'_1 recht ähnliche Ergebnisse, jedoch geht durch die Oktavbandglättung auch einiges an Information der Messungen verloren.

Die höchsten Übereinstimmungen werden an den Immissionspunkten x'_6, x'_7 und x'_8 erzielt, welche sich am Campus selbst befinden (vgl. Abb. 5.3). Daraus lässt sich schließen, dass die Eigenschaften des Geländes am Campus, vor allem in Bodennähe, in der Simulation gut nachgebildet werden konnten.

Es fällt auf, dass tiefe Frequenzen (unter 200 Hz) beim Vergleich mit dem Referenzimmissionspunkt x'_1 in der Simulation eher unterschätzt werden, wodurch die Übertragungsfunktionen niedrigere Pegel aufweisen. Das lässt sich durch etwaige tieffrequente Hintergrund- oder Störgeräusche, etwa durch Stadtlärm, Wind oder Verkehrsrauschen, bei der Messung erklären, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Eine weitere mögliche Begründung wäre, dass sich tiefe Frequenzen in der Realität besser ausbreiten, als in der Simulation. Bei den Frequenzen 200, 800 und 1500 Hz treten hingegen bei allen Messpunkten geringe Differenzen auf.

Der Vergleich mit dem Referenzimmissionspunkt x'_2 zeigt konstant eine Überschätzung der Simulation gegenüber der Messung bei hohen Frequenzen, vor allem bei den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 ergibt sich eine erhöhte Abweichung ab ca. 200 Hz (vgl. Abb. 5.2 - 5.4). Hier macht sich die Dissipation durch die Umgebung in der Realität bemerkbar, welche durch Luft und Wind, aber auch Bewuchs, Bauzäune etc. oder die Baugrube bedingt ist. Durch die Berücksichtigung der Baugrube in der Simulation werden nur geringe Verbesserungen im Frequenzbereich von 200 Hz - 1000 Hz erzielt (vgl. Abb. 5.4).

5.4 Prognose mit SAL-Gebäuden

Mithilfe der erlangten Resultate aus Simulation und Messung soll nun eine Prognose erstellt werden, wie sich die erbauten SAL-Gebäude auf die Schallausbreitung im Bereich des Campus Inffeldgasse auswirken könnten. Die Prognose soll eine Anpassung der Grenzwerte an der Lärmmessstation ermöglichen.

Dafür wird zunächst in SoundPLAN ein Vergleich zwischen der Schallimmission ohne SAL-Gebäude und mit SAL-Gebäuden hergestellt. Für eine exaktere Prognose werden die in SoundPLAN ermittelten Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ für jedes Terzband betrachtet und die Differenz zwischen den Immissionspunkten x_n zu den Referenzimmissionspunkten x_1 und x_2 ermittelt.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 erwähnt, wirken sich die SAL-Gebäude maßgeblich auf die Schallausbreitung in Richtung Sandgasse aus (vgl. Abb. 3.14 und 3.15), weshalb für die Prognose die Immissionspunkte x_4 und x_5 untersucht werden.

Anhand der Simulation wird deutlich, dass die SAL-Gebäude vor allem im mittleren Frequenzbereich (ca. 200 - 3000 Hz) für eine Dämpfung des Schalls von etwa 5 - 10 dB verantwortlich sind. Für sehr tiefe Frequenzen (< 100 Hz) ist eine geringere Dämpfung zu erwarten (vgl. Abb. 5.5).

Die verstärkte Dämpfung der Schalldruckpegel im mittleren Frequenzbereich zwischen dem Ort der Lärmmessstation (x_2) und den Immissionspunkten entlang der Sandgasse (x_4 und x_5) könnte für eine Erhöhung des Grenzwertes des A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{A,eq}$ an der Lärmmessstation sorgen.

Um diese Annahme zu überprüfen, wird anhand der Simulation für die kritischen Immissionspunkte (x_4 und x_5) jeweils die Differenz des Beurteilungspegels $L_{rT,1h}$ vor und nach dem Bau

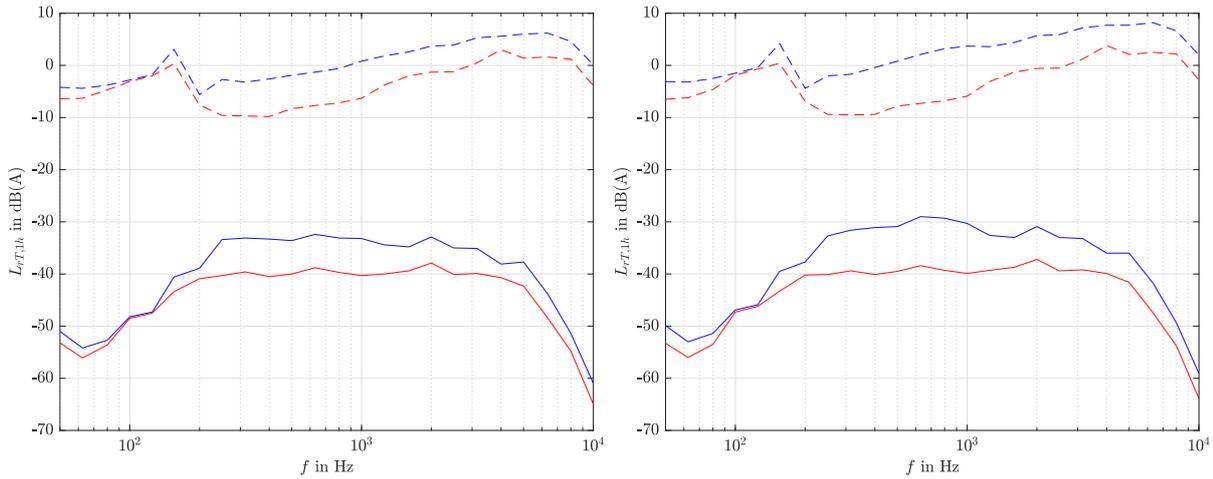


Abbildung 5.5: Einfluss der SAL-Gebäude auf die Übertragungsfunktion zwischen dem Immissionspunkt x_4 (links) bzw. x_5 (rechts) und dem Referenzimmissionspunkt x_1 (durchgezogen) bzw. x_2 (strichliert) gemäß der Simulation in SoundPLAN (blau: ohne SAL-Gebäude, rot: mit SAL-Gebäuden).

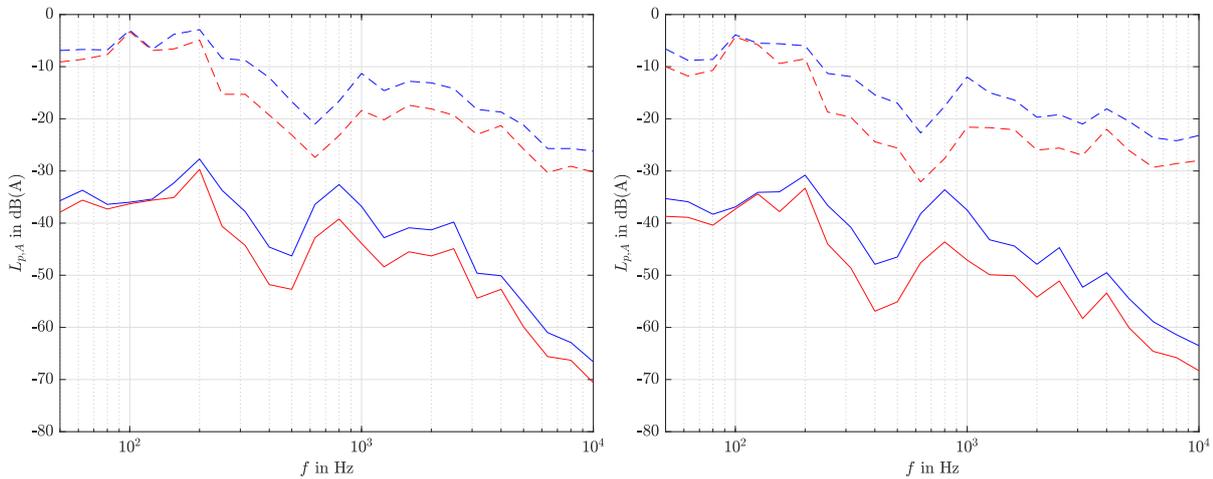


Abbildung 5.6: Mögliche Auswirkung der SAL-Gebäude auf die Übertragungsfunktion zwischen dem Immissionspunkt x'_4 (links) bzw. x'_5 (rechts) und dem Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgezogen) bzw. x'_2 (strichliert) gemäß der Simulation in SoundPLAN (blau: ohne SAL-Gebäude, rot: mit SAL-Gebäuden).

der Gebäude ermittelt, welche sich für den Immissionspunkt x_4 bzw. x_5 auf etwa 5.8 dB bzw. 7.6 dB beläuft (vgl. Tab. 5.2).

Wird davon ausgegangen, dass sich die SAL-Gebäude in ähnlichem Maße auf die Ergebnisse im Falle einer erneuten Messung am Campus Inffeldgasse auswirken, so kann für die Messresultate an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 ebenfalls eine Pegelreduktion im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 3000 Hz erwartet werden (vgl. Abb. 5.6).

Anhand des ermittelten Einflusses der SAL-Gebäude auf die Übertragungsfunktionen zwischen dem Immissionspunkt x'_2 und den kritischen Immissionspunkten x'_4 und x'_5 (vgl. Abb. 5.5 und 5.6), wird der zu erwartende A-bewertete Schalldruckpegel an x'_4 und x'_5 unter Berücksichtigung der SAL-Gebäude ebenfalls ermittelt und mit jenem ohne SAL-Gebäude verglichen.

Die Differenz des A-bewerteten Schalldruckpegels aus der Messung und des prognostizierten A-bewerteten Schalldruckpegels nach Fertigstellung der SAL-Gebäude sind für die Immissions-

punkte x'_4 und x'_5 der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Die ermittelten Differenzen lassen an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 eine Abschwächung des A-bewerteten Schalldruckpegels durch die SAL-Gebäude von etwa 5 dB erwarten ($\Delta L_{p,A,ges} = 4.7$ dB für x'_4 bzw. $\Delta L_{p,A,ges} = 5.6$ dB für x'_5).

Der Bau der SAL-Gebäude ermöglicht somit eine Erhöhung des Grenzwertes für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel am Ort der Lärmmessstation (x'_2).

Die ausgeprägte Abschwächung der Schalldruckpegel tritt jedoch vorwiegend im mittleren Frequenzbereich auf. Für den tiefen Frequenzbereich (< 150 Hz) lässt die Simulation eine geringere Dämpfung erwarten. In Analogie zum A-bewerteten Schalldruckpegel werden für den C-bewerteten Schalldruckpegel ebenfalls die Differenzen vor und nach dem Bau der SAL-Gebäude bestimmt. Verglichen mit der A-Bewertung ist der Einfluss der SAL-Gebäude auf den C-bewerteten Schalldruckpegel wesentlich geringer (vgl. Tab. 5.2).

Die geringere Dämpfung der tiefen Frequenzen (< 150 Hz) durch die SAL-Gebäude bewirkt eine Erhöhung der Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten entlang der Sandgasse (x'_4 und x'_5) und in weiterer Folge die Notwendigkeit einer Verschärfung des Grenzwerts für $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ an der Lärmmessstation. Daher wird die eingeführte Bedingung $L_{C,eq} - L_{A,eq} < 10$ dB im Abschnitt 5.5 genauer untersucht, um diese gegebenenfalls zu korrigieren.

Immissionspunkt	$\Delta L_{rT,1h}$	$\Delta L_{p,A,ges}$	$\Delta L_{C,eq}$	$\Delta L_{p,C,ges}$
x'_4	5.8	4.7	4.2	1.7
x'_5	7.6	5.6	5.3	1.9

Tabelle 5.2: Differenzen der Beurteilungspegel $\Delta L_{rT,1h}$ und der C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $\Delta L_{C,eq}$ aus der Simulation sowie die daraus resultierende Reduktion des A- bzw. C-bewerteten Schalldruckpegels $\Delta L_{p,A,ges}$ bzw. $\Delta L_{p,C,ges}$ durch den Bau der SAL-Gebäude.

5.5 Überprüfung der Bedingung $L_{C,eq} - L_{A,eq} < 10$ dB

Die Frequenzbewertungskurven in Abbildung 2.2 zeigen eine starke Abschwächung der tiefen Frequenzen (< 1000 Hz) in Folge der A-Bewertung, weshalb der Bassbereich durch die Beurteilung durch den $L_{A,eq}$ nicht erfasst wird und eine gesonderte Betrachtung des Bassbereichs sinnvoll erscheint. Daher wird für die Lärmüberwachung am Campus Inffeldgasse die gesonderte Betrachtung des Bassbereichs über die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ durchgeführt, welche die Energie im tiefen Frequenzbereich (< 1000 Hz) beschreibt (vgl. Abschn. 2.2.2).

Für das Referenzspektrum basslastiger Musikrichtungen (z.B. Techno, Dancefloor) liegt die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ bei etwa 10 dB [11]. Daher wird dieser Wert als oberer Grenzwert für die noch zulässige Energie im Bassbereich an den Immissionspunkten entlang der Sandgasse (x'_4 und x'_5) festgelegt und als Grenzwert für die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ der Lärmmessstation übernommen.

Diese Bedingung soll mithilfe der Übertragungsfunktionen aus der Messung (vgl. Kap. 4) überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden (vgl. Abb. 4.6 und 4.8).

Zunächst werden die Werte der Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ aus den Ergebnissen der Messung (vgl. Kap. 4) an den Immissionspunkten entlang der Sandgasse (x'_4 und x'_5) und an den Immissionspunkten im Campusbereich (x'_1 , x'_2 und x'_3) ermittelt. Dafür werden die absoluten Teilpegel der Terzbänder aus Abschnitt 5.2 A- und C-bewertet und anschließend die Differenz der resultierenden frequenzbewerteten Gesamtpegel gebildet (vgl. Abb. 5.7 und Gl. 5.2). Dies ergibt für die kritischen Immissionspunkte die in Tabelle 5.3 angeführten Werte.

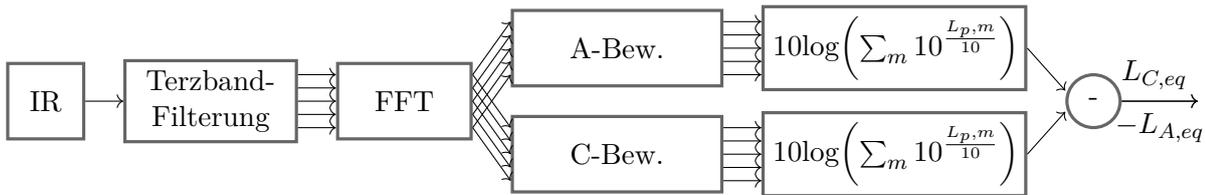


Abbildung 5.7: Terzbandanalyse und Frequenzbewertung zur Ermittlung der Differenz der frequenzbewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{C,eq} - L_{A,eq}$.

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	1.2	2.0	7.0	7.7	8.6

Tabelle 5.3: Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels der Messergebnisse an verschiedenen Immissionspunkten.

Aus der Analyse der Differenzen wird deutlich, dass an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 eine signifikante Bassüberhöhung auftritt, obwohl am Immissionspunkt der Bühne (x'_1) bzw. der Messstation (x'_2) eine geringe Differenz, also eine ausgeglichene Verteilung der Energie über das betrachtete Spektrum vorliegt.

Diese geringe Dämpfung des Bassbereichs lässt sich anhand der Übertragungsfunktionen zwischen den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 und den Referenzimmissionspunkten x'_1 und x'_2 in Abschnitt 4.5 erklären: In den Abbildungen 4.6 bzw. 4.8 ist für Frequenzen oberhalb von 400 Hz bzw. 800 Hz eine deutlich stärkere Pegelabschwächung als für den Bassbereich erkennbar.

Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Dämpfung erscheint es daher sinnvoll, die Übertragungsfunktionen aus Kapitel 4 in die Definition des Grenzwertes für $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ zu integrieren.

5.5.1 Differenzen verschiedener Musikrichtungen im Vergleich

Wie bereits erwähnt, gibt die Differenz des C- und A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels Auskunft über die Energie im tiefen Frequenzbereich unter 1000 Hz. Der Zusammenhang der Differenzen zwischen den einzelnen Immissionspunkten kann jedoch nicht pauschal angegeben werden, da $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ nicht nur von der Übertragungsfunktion, sondern auch vom Betragsspektrum am Ausgangsimmissionspunkt an sich abhängt. Diese Abhängigkeit wird in den Tabellen 5.4 bis 5.8 deutlich, bei welcher typische Betragsspektren verschiedener Musikrichtungen (vgl. Abb. 2.3) am Referenzimmissionspunkt x'_1 angenommen und deren Auswirkungen auf die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ untersucht werden [11]. Der Einfluss der SAL-Gebäude wird dabei ebenfalls berücksichtigt.

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	9.4	4.8	9.3	11.4 (13.9)	11.9 (15.2)

Tabelle 5.4: Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für das Referenzspektrum basslastiger Musik ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	4.8	2.7	5.8	8.1 (11.1)	8.3 (12.6)

Tabelle 5.5: Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für die Musikrichtung Techno ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	5.5	3.2	6.8	8.9 (11.7)	9 (12.9)

Tabelle 5.6: Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für die Musikrichtung Dancefloor ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	3.3	2.1	4.5	6.8 (9.2)	6.8 (10.6)

Tabelle 5.7: Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für die Musikrichtung Pop ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).

	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	1.4	1.6	3.6	5.6(8.0)	5.6 (9.4)

Tabelle 5.8: Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für das Referenzspektrum rosa Rauschen ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).

Anhand der Tabellen 5.4 bis 5.8 werden die Unterschiede der Energien im tiefen Frequenzbereich für verschiedene Musikrichtungen deutlich. So weisen beispielsweise basslastige Musikrichtungen wie Dancefloor und Techno eine höhere Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ als die Musikrichtung Pop auf.

Zudem ergibt sich aus den Tabellen 5.4 bis 5.8, dass die Differenz am Immissionspunkt x'_2 für unterschiedliche Musikrichtungen am Immissionspunkt x'_1 den Wert von $L_{C,eq} - L_{A,eq} = 5$ dB nicht überschreitet, sondern sich das Referenzspektrum basslastiger Musikrichtungen diesem nur annähert. Mit einem angenommenen Grenzwert für $L_{C,eq} - L_{A,eq} = 5$ dB an der Position des Lärmüberwachungssystems stellt sich an den Immissionspunkten x'_4 bzw. x'_5 eine Differenz von etwa 12 dB ein.

Unter Berücksichtigung der SAL-Gebäude ergeben sich an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 deutlich höhere Differenzen für $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ aufgrund der geringeren Dämpfung der tiefen Frequenzen (< 150 Hz), weshalb der Grenzwert von $L_{C,eq} - L_{A,eq} = 5$ dB verschärft werden muss. Werden Musikrichtungen mit geringerem Bassanteil herangezogen (Pop), so ergibt sich für einen Grenzwert am Immissionspunkt x'_2 von etwa 2 dB trotz des Einflusses der SAL-Gebäude die Einhaltung des Grenzwertes $L_{C,eq} - L_{A,eq} < 10$ dB an den Immissionspunkten x'_4 und x'_5 .

5.5.2 Alternative Position zur Lärmüberwachung

Die verschiedenen Musikrichtungen im Vergleich zeigen eine deutlich geringere Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ am Immissionspunkt x'_2 als an den kritischen Immissionspunkten x'_4 und x'_5 (vgl. Tab. 5.4 bis 5.8), was eine merkliche Änderung des Betragsspektrums zwischen der Lärmmessstation (x'_2) und den Wohngebieten (x'_4 und x'_5) entlang der Sandgasse vermuten lässt. Für den Immissionspunkt x'_3 liegt die Differenz deutlich näher an jenen der Immissionspunkte x'_4 und x'_5 , da am Immissionspunkt x'_3 deutlich mehr Bassanteil als am Immissionspunkt x'_2 gemessen wird (vgl. Abb. 4.8). Durch den geringeren Bassanteil am Immissionspunkt x'_2 im Vergleich zu Immissionspunkt x'_3 sollte eine Änderung der Positionierung der Lärmmessstation in Betracht gezogen werden.

5.6 Festlegung der Grenzwerte für VeranstalterInnen

Schließlich lassen sich aus den erlangten Erkenntnissen Grenzwerte für den energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ sowie die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ ableiten, um die gesetzlichen Richtlinien aus Kapitel 2 einzuhalten. Mithilfe der Ergebnisse der Messung am Campus und unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Veranstaltungen lassen sich Vorschläge für die Aktualisierung der zulässigen Grenzwerte in Tabelle 2.5 herleiten.

Der Immissionspunkt x'_4 wird als Richtimmissionspunkt für die Lärmbelastung im Wohngebiet der Sandgasse herangezogen, da dort der höchste Gesamtschalldruckpegel erreicht wird (vgl. Tab. 5.1). Nimmt man nun an diesem Immissionspunkt den gesetzlich geltenden Pegel für häufig vorkommende Veranstaltungen an (vgl. Tab. 2.3), so ergibt sich bei gleicher Pegeländerung an Immissionspunkt x'_2 ein Gesamtschalldruckpegel von $L_{A,eq} = 69$ dB am Tag und $L_{A,eq} = 59$ dB in der Nacht. Durch weitere Ausführung dieser Überlegungen erlangen wir demnach die Grenzwerte in Tabelle 5.9. Die Bezeichnung häufige Veranstaltungen bezieht sich auf häufig vorkommende Veranstaltungen mit über 10, die Bezeichnung seltene Veranstaltungen auf selten vorkommende Veranstaltungen mit 10 Veranstaltungen pro Jahr am selben Veranstaltungsort. Wie bereits in vorangegangenen Überlegungen festgestellt wurde, wird auch hier deutlich, dass die Position des Immissionspunkt x'_3 im Vergleich zu Immissionspunkt x'_2 besser für die Lärmmessstation geeignet ist, da der Gesamtschalldruckpegel jenem an Immissionspunkt x'_4 deutlich ähnlicher ist (vgl. Tab. 5.1).

Für die gesonderte Betrachtung des Bassbereichs werden nun auch Grenzwerte festgelegt, durch welche gewährleistet wird, dass an den Immissionspunkten in der Sandgasse der Differenzpegel

	x'_2		x'_3	
$L_{A,eq}$ in dB	69	59	66	56
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
	häufige Veranstaltungen		seltene Veranstaltungen	

Tabelle 5.9: Vorgeschlagene Grenzwerte für den Gesamtschalldruckpegel $L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 für Veranstaltungen mit unterschiedlicher Häufigkeit.

von $L_{C,eq} - L_{A,eq} = 10$ dB nicht überschritten wird. Die Ergebnisse dieser Betrachtung wurden aus Kapitel 5.5 gefolgert und sind in Tabelle 5.10 einzusehen.

	x'_2	x'_3
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	5	7

Tabelle 5.10: Vorgeschlagene Grenzwerte für den Differenzpegel $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 .

Des Weiteren wird nun auch die Prognose mit den SAL-Gebäuden in die Überlegungen miteinbezogen (vgl. Abschn. 5.4 sowie Tab. 5.11 und 5.12).

	x'_2		x'_3	
$L_{A,eq}$ in dB	75	65	71	61
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
	häufige Veranstaltungen		seltene Veranstaltungen	

Tabelle 5.11: Vorgeschlagene Grenzwerte für den Gesamtschalldruckpegel $L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 für Veranstaltungen mit unterschiedlicher Häufigkeit bei Miteinbeziehung der Prognose mit SAL-Gebäuden.

	x'_2	x'_3
$L_{C,eq} - L_{A,eq}$ in dB	2	4.5

Tabelle 5.12: Vorgeschlagene Grenzwerte für den Differenzpegel $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 bei Miteinbeziehung der Prognose mit SAL-Gebäuden.

Es fällt auf, dass die Grenzwerte für den Gesamtschallpegel $L_{A,eq}$ durch den Einfluss der SAL-Gebäude deutlich erhöht werden können. Da aber hauptsächlich der mittlere Frequenzbereich beeinflusst wird (vgl. Abschn. 5.4), müssen die Grenzwerte für die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ verschärft werden.

6

Fazit

Aus den Ergebnissen und Untersuchungen dieser Projektarbeit lässt sich erschließen, dass sich die bisherige Methode der Lärmschutzerhaltung durch das Lärmüberwachungssystem als ein gutes, aber ausbaufähiges System herausstellt. Da die Lärmüberwachung bisher durch eine externe Firma durchgeführt wird, wäre die Entwicklung eines universitätseigenen Tools anzustreben, welches auf die Erkenntnisse dieser Arbeit Bezug nehmen könnte.

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass die Positionierung des Messmikrofons einen signifikant Einfluss auf eine valide Lärmüberprüfung hat. Da aus der Simulation hervorgeht, dass der sich in Richtung Sandgasse ausbreitende Schall durch ein Messmikrofon am Immissionspunkt x'_3 präziser erfasst werden kann, ist eine Änderung der Positionierung des Messmikrofons erstrebenswert.

Des Weiteren wurde in Kapitel 4 messtechnisch festgestellt, dass die Ausbreitung des Schalls stark frequenzabhängig ist. Daher sollte im verwendeten Überwachungs-Tool zusätzlich zur gesonderten Bassbetrachtung die frequenzabhängige Ausbreitung des Schalls in Form einer Übertragungsfunktion zum anliegenden Wohngebiet berücksichtigt werden. Diese frequenzabhängige Überwachung kann durch die Anpassung der zulässigen Differenz zwischen A- und C-bewertetem energieäquivalentem Dauerschallpegel in Anlehnung an die ermittelten Übertragungsfunktionen realisiert werden (vgl. Abschnitt 5.5).

Für die erlaubten Grenzwerte der Lärmmessstation wurden bisher lediglich jene Veranstaltungen herangezogen, bei denen das leistungsstarke Equipment verwendet wurde. Somit gelten die vorgeschriebenen Pegelwerte für selten vorkommende Veranstaltungen. Mittels der Simulation in SoundPLAN (vgl. Kap. 3) wurde jedoch deutlich, dass die Schallausbreitung in Richtung Sandgasse auch bei kleineren Veranstaltungen nicht zu vernachlässigen ist. Daraus lässt sich ableiten, dass insbesondere bei kleineren Veranstaltungen genau auf die vorgeschriebenen Grenzwerte geachtet werden muss, um den Campus Inffeldgasse als Veranstaltungsort für selten vorkommende Veranstaltungen zu erhalten. Eine Einordnung der Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse in die Kategorie häufig vorkommender Veranstaltungen würde zu einer Verschärfung der geltenden Richtlinien führen.

Mit dem Bau der SAL-Gebäude wird die Lärmsituation im Wohngebiet entlang der Sandgasse künftig deutlich verbessert werden (vgl. Abschnitt 5.4). Aufgrund der Ergebnisse der Simulation (vgl. Abb. 5.6) können auch die Richtlinien für häufig vorkommende Veranstaltungen eingehalten werden und das leistungsstarke Equipment bei Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse häufiger eingesetzt werden. Der Bau der SAL-Gebäude beeinflusst jedoch auch die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$, weshalb eine Verschärfung der Grenzwerte für die Differenz zu empfehlen ist.

In Kapitel 5.6 wurden die Vorschläge für die zulässigen Grenzwerte am Campus zusammengefasst, dabei wurde zwischen selten und häufig vorkommenden Veranstaltungen differenziert. Neben den Grenzwerten für den energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$, welche aus den gesetzlichen Richtlinien und den Ergebnissen der Messung erlangt werden konnten, wurden auch Grenzwerte für die Differenz $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ festgelegt, um den Bassbereich gesondert zu behandeln. Die Grenzwerte ergaben sich aus der Betrachtung verschiedener Musikrichtungen als Quellsignale, und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die Immissionspunkte entlang der Sandgasse (vgl. Abschn. 5.5).

Trotz des Baus der SAL-Gebäude bleiben die BewohnerInnen der Sandgasse 41 vom Veranstaltungslärm am stärksten betroffen. Sollte eine weitere Messung im Anschluss an die Fertigstellung der SAL-Gebäude zu keiner merklichen Verbesserung der Lärmsituation entlang der Sandgasse führen, müssen weitere Lärmschutzmaßnahmen zu einer Entlastung der AnwohnerInnen in Betracht gezogen werden.

Um die Lärmbelastung der AnrainerInnen künftig akkurater beurteilen zu können, ist es möglich, zusätzlich zur Pegelüberwachung psychoakustische Größen heranzuziehen. Die Lärmbelastung kann beispielsweise durch die psychoakustische Annoyance (PA) genauer beschrieben werden, welche durch die Lautheit, die Klangfarbe oder auch durch die zeitliche Struktur des Lärms beeinflusst wird [24]. Daher ist die Integration psychoakustischer Größen in das Beurteilungssystem der Lärmmessstation durchaus empfehlenswert.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass der Bau der SAL-Gebäude sowie die Anpassung der Positionierung und der Grenzwerte des Lärmüberwachungssystems für eine Verbesserung der Lärmsituation am Campus Inffeldgasse sorgen wird. Dies garantiert zum einen eine Steigerung der Wohnqualität in den Wohnhäusern entlang der Sandgasse und ermöglicht zum anderen den Erhalt des Campus Inffeldgasse als beliebte Veranstaltungsstätte bei den Studierenden.

7

Anhang

7.1 Ergänzung zu Kapitel 3

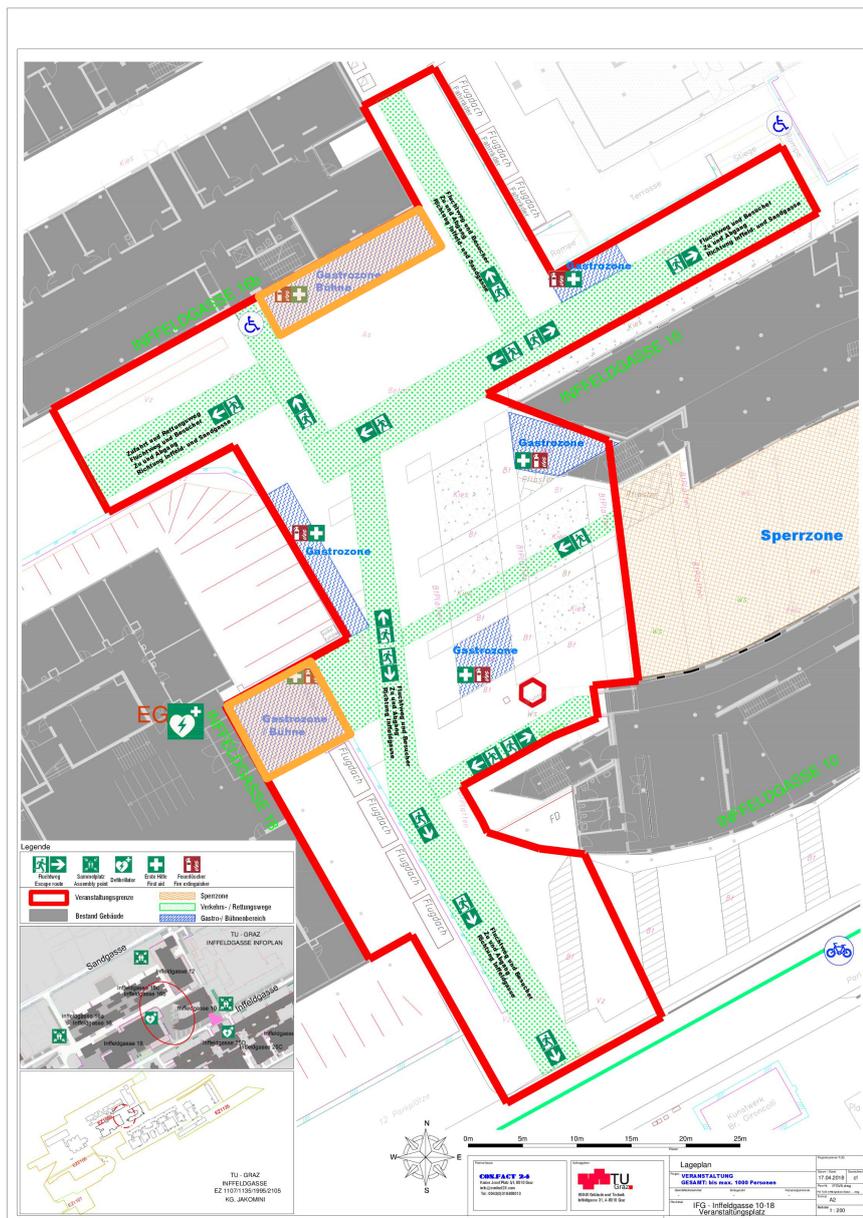


Abbildung 7.1: Lageplan mit möglichen Bühnenpositionen (orange) aus den Richtlinien für Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse der Serviceeinrichtung Gebäude und Technik der TU Graz.

7.1.1 Rasterlärmkarten

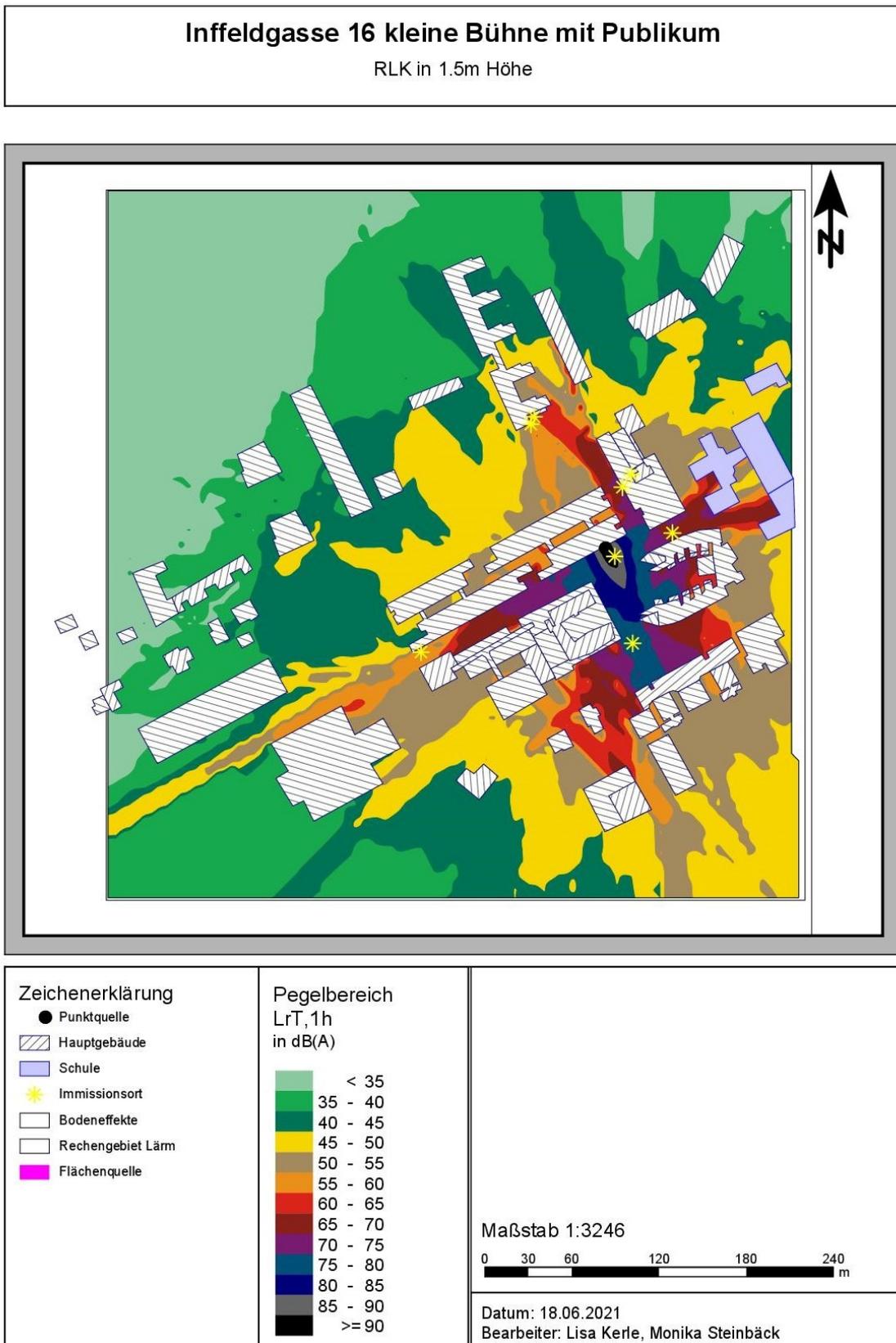
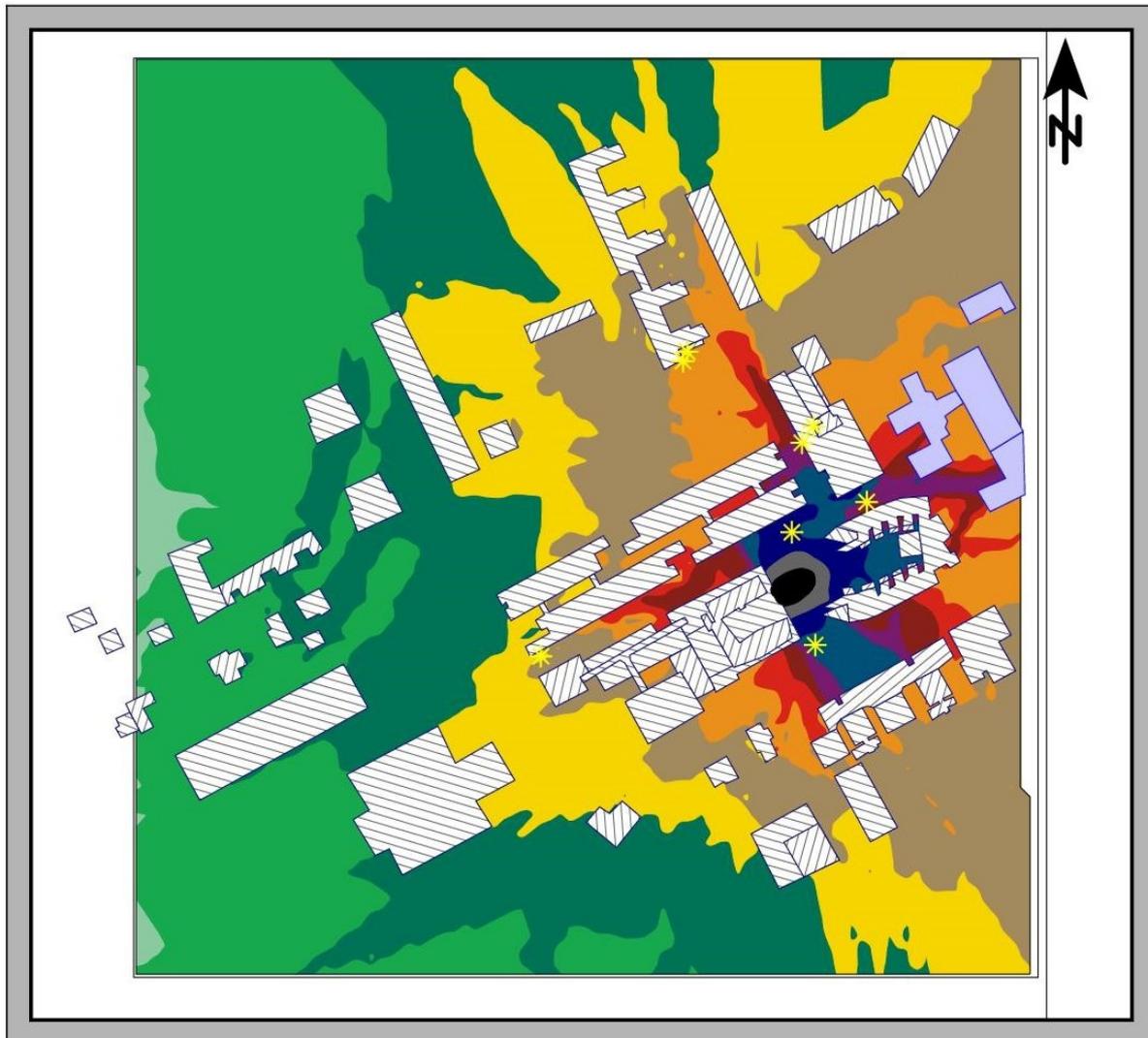


Abbildung 7.2: Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der kleinen Bühne vor Gebäude Inffeldgasse 16b.

Inffeldgasse 18 große Bühne mit Publikum

RLK in 1.5m Höhe



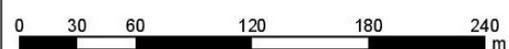
Zeichenerklärung

- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm
- Flächenquelle

Pegelbereich LrT, 1h in dB(A)



Maßstab 1:3214



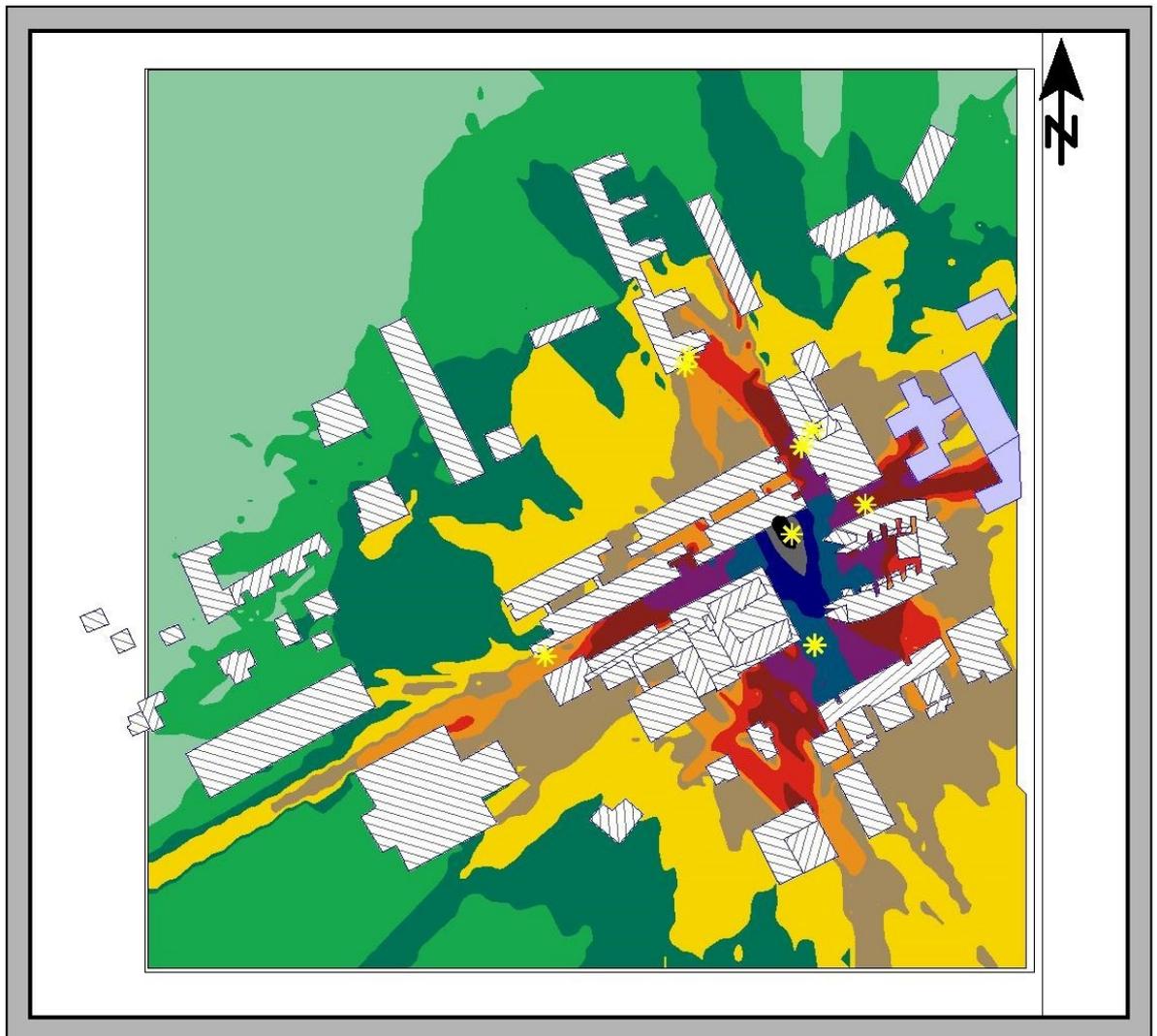
Datum: 18.06.2021

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 7.3: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der großen Bühne vor Gebäuden Inffeldgasse 18.

Inffeldgasse 16 kleine Bühne mit Publikum

RLK in 1.5m Höhe



Zeichenerklärung

- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich LrT,1h in dB(A)



Maßstab 1:3261



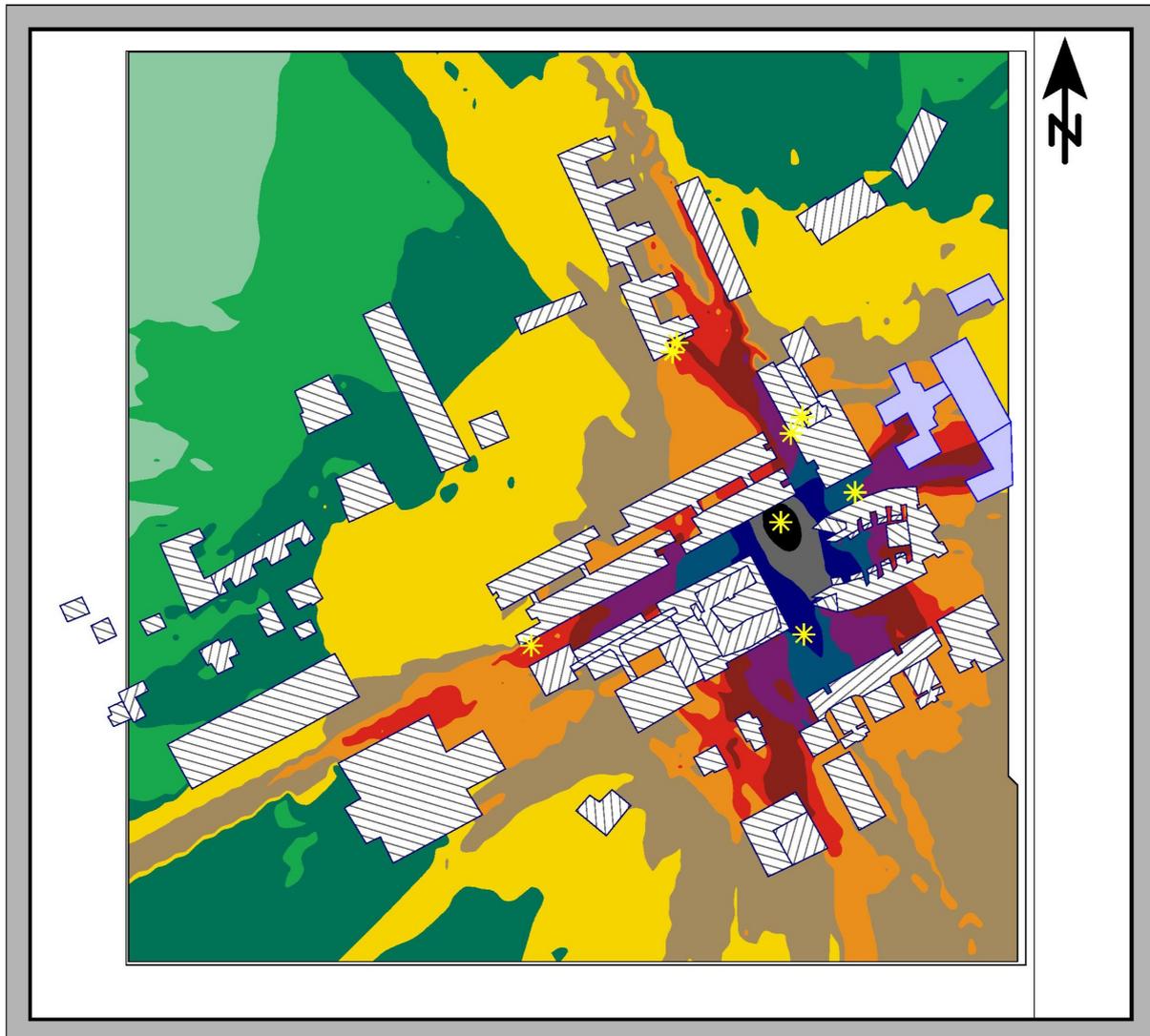
Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 7.4: Rasterlärmmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der kleinen Bühne mit Publikum.

Innfeldgasse 16 große Bühne mit Publikum

RLK in 1.5m Höhe



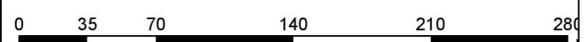
Zeichenerklärung

- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ✱ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich LrT, 1h in dB(A)



Maßstab 1:3233



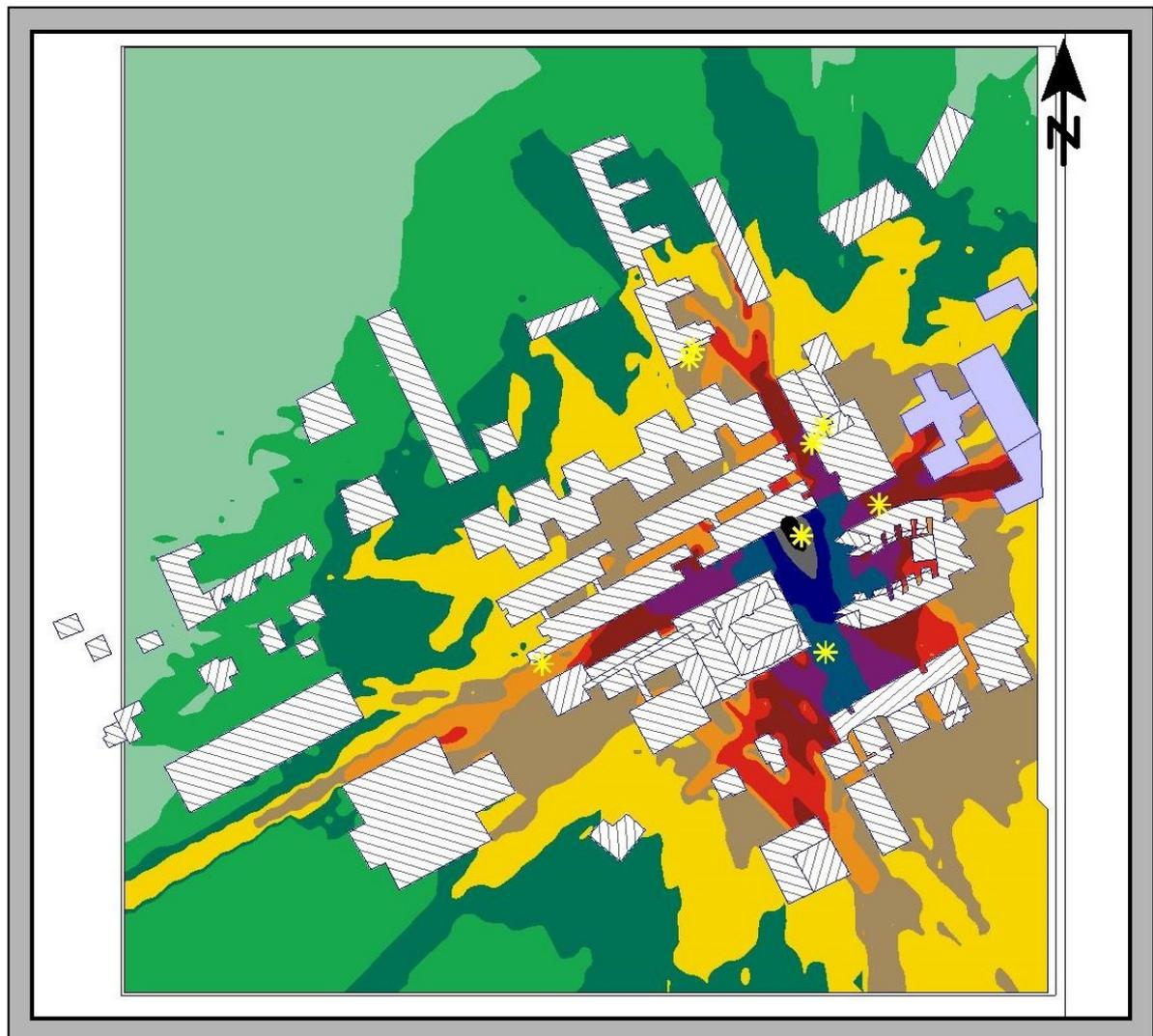
Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 7.5: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der großen Bühne mit Publikum.

Inffeldgasse 16 kleine Bühne mit Publikum

RLK mit SAL-Gebäuden in 1.5m Höhe



Zeichenerklärung

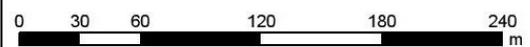
- Punktquelle
- ▨ Hauptgebäude
- Schule
- ★ Immissionsort
- Bodeneffekte
- Rechengebiet Lärm

Pegelbereich

LrT, 1h
in dB(A)



Maßstab 1:3103



Datum: 26.11.2020

Bearbeiter: Lisa Kerle, Monika Steinbäck

Abbildung 7.6: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der kleinen Bühne mit Publikum.

Inffeldgasse 16 große Bühne mit Publikum

RLK mit SAL-Gebäuden in 1.5m Höhe

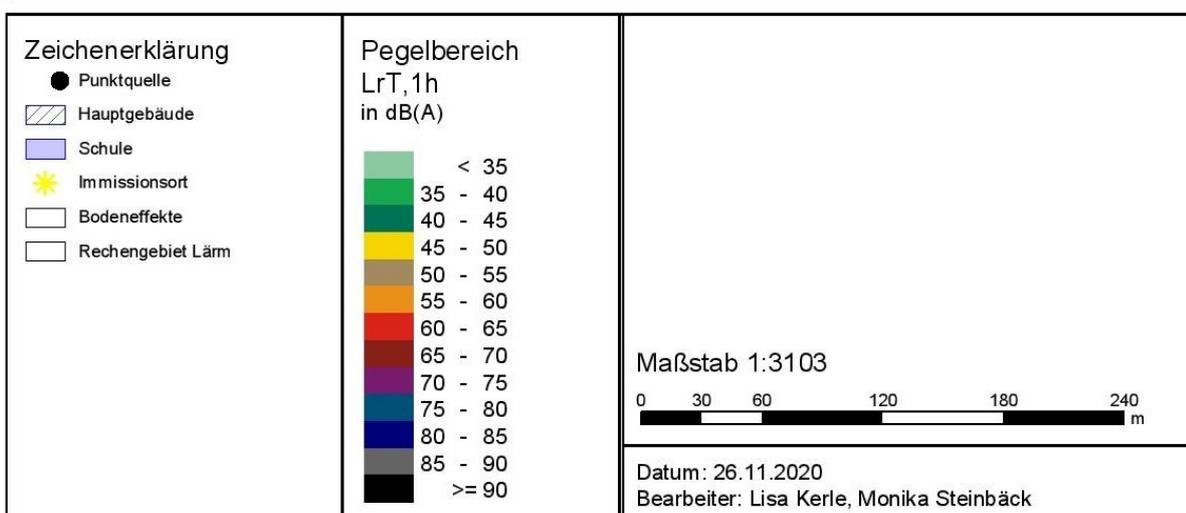
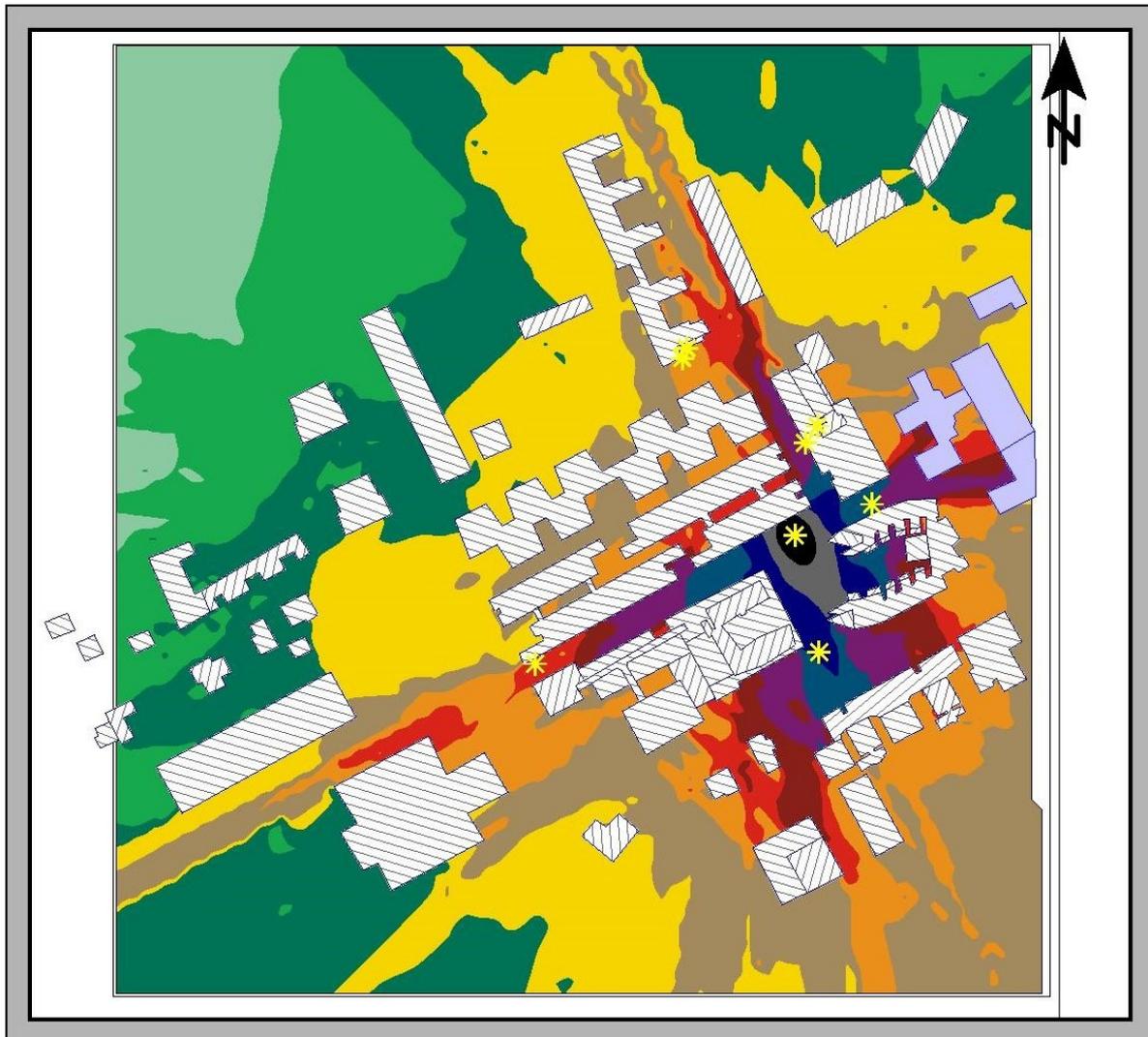


Abbildung 7.7: Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der großen Bühne mit Publikum.

7.1.2 Ergebnistabellen

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	92.7	58.8	67.5	61.1	54.7	69.0	78.8	55.8

Tabelle 7.1: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	96.5	62.4	69.4	61.6	63.9	73.9	82.1	60.8

Tabelle 7.2: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne mit Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	96.5	62.4	69.4	55.9	56.4	73.9	82.1	60.8

Tabelle 7.3: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit SAL-Gebäuden und Publikum.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
$L_{rT,1h}$ in dB(A)	92.7	58.8	67.5	53.4	53.4	69.0	78.8	55.9

Tabelle 7.4: Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne mit SAL-Gebäuden und Publikum.

7.2 Ergänzung zu Kapitel 4

7.2.1 Frequenzgang Messmikrofon NTi M2230

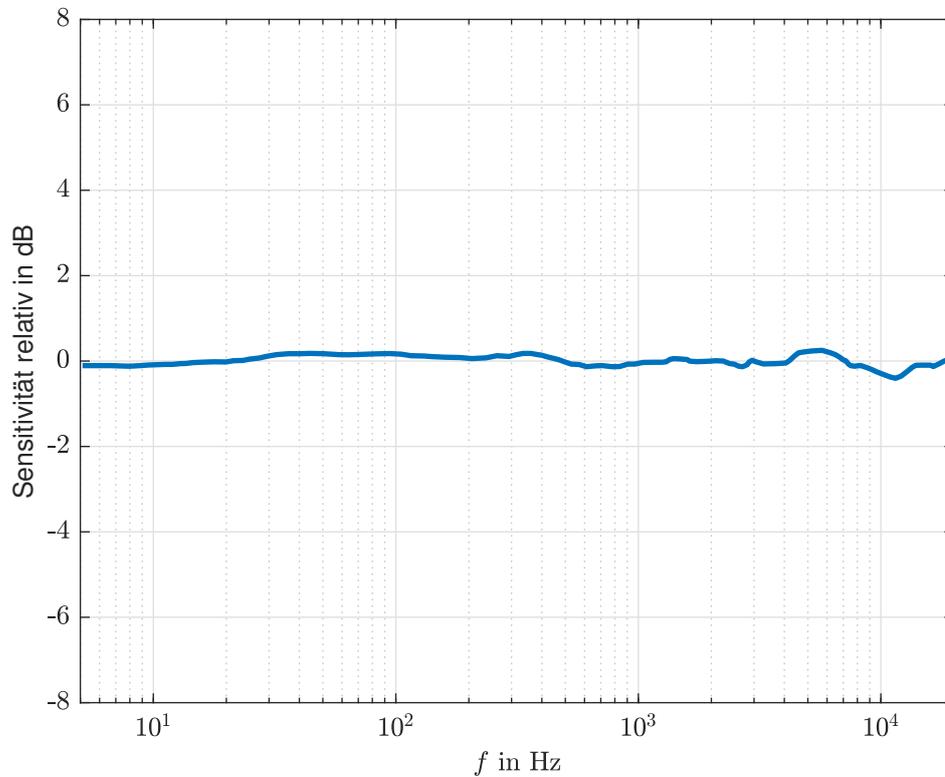


Abbildung 7.8: Frequenzgang des Messmikrofons NTi M2230 [25].

7.2.2 Durchführung und Analyse der Messung

```

1 %% Voreinstellungen
2 ita_preferences;
3
4 %% Setup der Messung
5 % Erstellung einer Instanz der Klasse itaMSTF
6 MS_object = itaMSTF;
7
8 % Bearbeitung des Messobjekts mithilfe einer GUI
9 MS_object.edit;
10
11 % Spezifikation des Anregungssignals; Mögliche Auswahl:
12 % 'exp' : exponentieller Sweep
13 % 'lin' : linearer Sweep
14 % 'noise': weißes Rauschen
15 MS_object.type = 'exp';
16
17 % Definition des Kanals am Eingang
18 MS_object.inputChannels = [1];

```

```

19 % Definition des Kanals am Ausgang
20 MS_object.outputChannels = [2];
21 % Definition des Grads der FFT
22 MS_object.fftDegree = 19;
23 % Definition der Abtastfrequenz
24 MS_object.samplingRate = 48000;
25 % Definition der Verstärkung am Ausgang
26 MS_object.outputamplification = -25;
27 % Definition der Wiederholungen
28 MS_object.repeats = 1;
29 % Definition der Mittelungen
30 MS_object.averages = 5;
31
32 % Aktivierung der Messkette
33 MS_object.useMeasurementChain = true;
34 % Definition der Messkette
35 MS_object.inputMeasurementChain = ita_measurement_chain;

```

Listing 7.1: Code zur Festlegung der Voreinstellungen über die ITA Toolbox.

```

1 % Kalibrierung des Eingangssignals
2 MS_object.calibrate_input

```

Listing 7.2: Code zur Kalibrierung des Messmikrofons.

```

1 ir = MS_object.run;
2
3 %% Validierung der Ergebnisse
4 ir = ir * itaValue(1, 'Pa');
5 ir.plot_all
6
7 % Speicherung der Ergebnisse
8 save('ir.mat', 'ir')

```

Listing 7.3: Code zur Durchführung der Messung und Speicherung der Ergebnisse.

```

1 %% Mittelungen der itaAudio-Objekte
2 ccx;
3 %% Laden der gemessenen itaAudio-Objekte
4 load('ir_x4.mat');
5 load('ir_x4_1.mat');
6 load('ir_x4_2.mat');
7 load('ir_x4_3.mat');
8
9 load('ir_x5.mat');
10 load('ir_x5_1.mat');
11 load('ir_x5_2.mat');
12
13 % Mittelungen
14 ir_x4_m = 1/4 * (ir_x4 + ir_x4_1 + ir_x4_2 + ir_x4_3);
15 ir_x5_m = 1/3 * (ir_x5 + ir_x5_1 + ir_x5_2);
16
17 % Speicherung
18 save('ir_x4_m.mat', 'ir_x4_m');
19 save('ir_x5_m.mat', 'ir_x5_m');

```

Listing 7.4: Code zur Mittelung und Speicherung der Messergebnisse an Immissionspunkt x'_4 und x'_5 .

```

1 %% Parameter festlegen
2 fs = 44100; % Abtastfrequenz
3 T = 1/fs; % Abtastperiode
4 p0 = 2*10^-5; % Referenzschalldruck
5
6 %% Messungen laden und Einheit des Schalldrucks auf Pa setzen
7 load('ir_x1.mat');
8 load('ir_x2.mat');
9
10 %% Definition des Referenzimmissionspunktes und der Immissionspunkte
11 xRef = ir_x1; % Referenzimmissionspunkt
12 xM = ir_x2; % Immissionspunkt

```

Listing 7.5: Code zur Festlegung der Parameter und Definition der Immissionspunkte.

```

1 %% Berechnung des Spektrums
2 fftLength = 17; % entspricht ca. 3s bei fs = 44100Hz
3
4 x_Ref = x_Ref(1:2^fftLength);
5 L = length(x_Ref);
6 x1F = fft(x_Ref);
7 x1F = abs(x1F);
8 x1F = x1F(1:L/2+1);
9
10 x_M = x_M(1:2^fftLength);
11 L = length(x_M);
12 x2F = fft(x_M);
13 x2F = abs(x2F);
14 x2F = x2F(1:L/2+1);
15
16 %% Spektrum in dB
17 x1Fdb = mag2db(x1F./p0);
18 x2Fdb = mag2db(x2F./p0);
19
20 % Glätten des Spektrums
21 bpo = 1; % Bänder pro Oktave (1=Oktavband, 3=Terzen)
22 f = fs*(0:(L/2))/L;
23
24 x1FdbSm = smoothSpectrum(x1Fdb,f',bpo);
25 x2FdbSm = smoothSpectrum(x2Fdb,f',bpo);

```

Listing 7.6: Code zur Berechnung der Spektren und anschließender Oktavbandglättung.

```

1 deltaFdbSm = x2FdbSm - x1FdbSm;

```

Listing 7.7: Code zur Berechnung der Differenz der geglätteten Spektren.

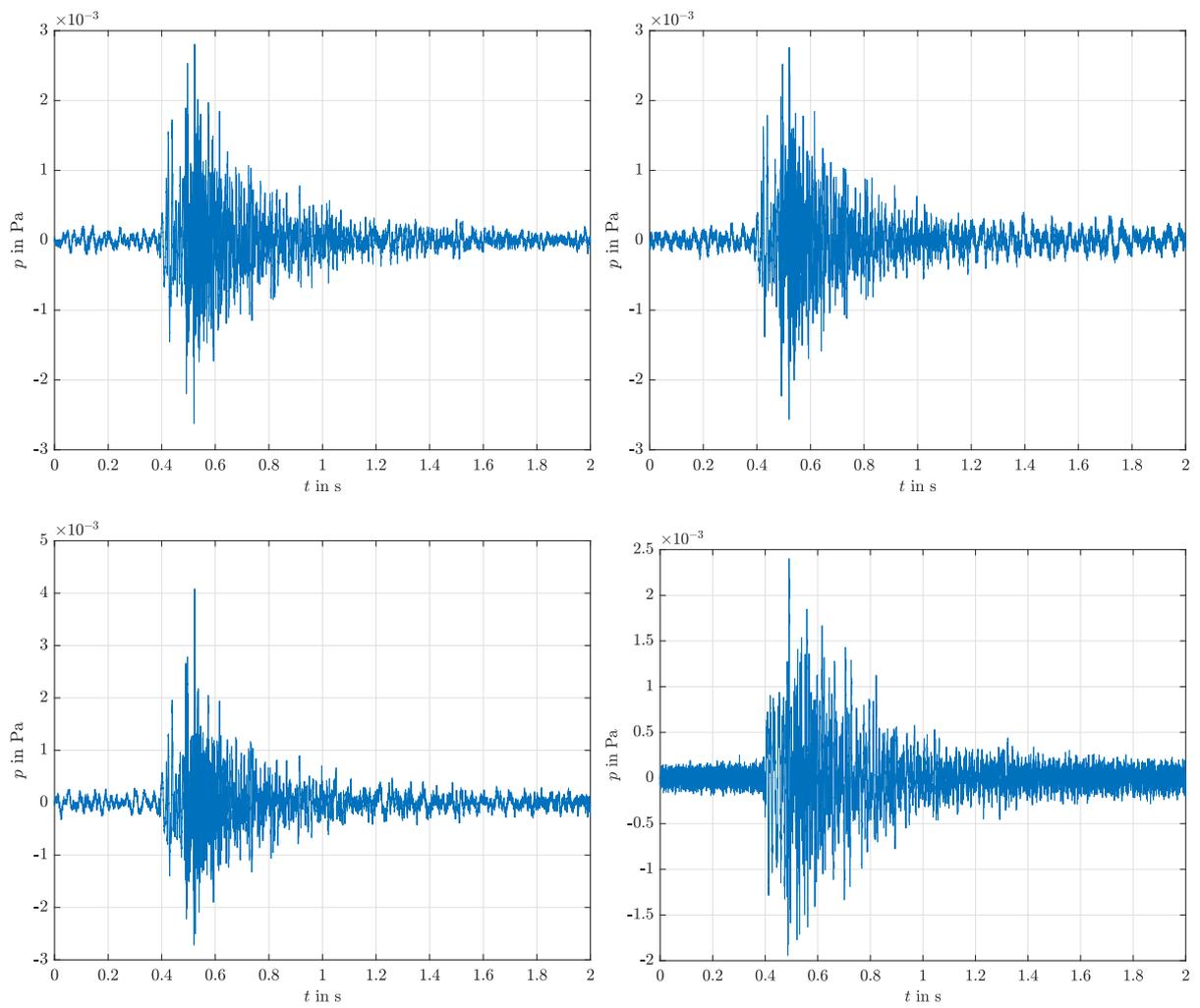
7.2.3 Mittelung an Immissionspunkt x'_5 

Abbildung 7.9: Ergebnis der Mittelung an Immissionspunkt x'_5 (unten, rechts), basierend auf drei Messungen an diesem Immissionspunkt (oben, unten links).

7.3 Ergänzung zu Kapitel 5

7.3.1 Ermittlung des Gesamtschalldruckpegels

```

1 %% Parameter festlegen
2 fs = 44100; % Abtastfrequenz
3 T = 1/fs; % Sampling-Periode
4 p0 = 2*10^-5; % Referenzschalldruck
5
6 %% Messobjekte laden
7 load('ir_x1.mat');
8
9 %% Auswahl des Immissionspunktes
10 xM = ir_x1;
11
12 %% A-Bewertung der itaAudio-Objekte
13 xMA = ita_filter_weighting(xM);
14
15 %% Terzbandfilterung der itaAudio-Objekte
16 xMTB = ita_filter_fractional_octavebands(xMA, 'bandsperoctave',3);
17
18 %% Zeitinformation aus den itaAudio-Objekten extrahieren (Terzbandinformation)
19 xMT = xMTB.timeData;
20
21 %% Berechnung des Spektrums pro Frequenzband
22 fftLength = 17; % entspricht ca. 3s
23 xM_mean = zeros(size(xMT,2),1);
24
25 for ii = 1:size(xMT,2)
26     x_M = xMT(1:2^fftLength,ii);
27     L = length(x_M);
28     x2F = fft(x_M);
29     x2F = abs(x2F);
30     x2F = x2F(1:L/2+1);
31
32     % Spektrum von x2F in db
33     x2Fdb = mag2db(x2F./p0);
34
35     % Mittlere Pegel pro Frequenzband
36     xM_meanpCh = 10*log10(mean(10.^(x2Fdb/10)));
37     xM_mean(ii) = xM_meanpCh;
38 end
39
40 %% Gesamtpegel berechnen
41 % 50Hz-10kHz ( -> Channel 5 : 28 )
42 xM_Lp = 10*log10(sum(10.^(xM_mean(5:28,1)/10)));

```

Listing 7.8: Code zur Ermittlung des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels $L_{p,A,ges}$ aus den Teilpegeln der Terzbandanalyse.

7.3.2 Immissionsspektren aus Simulation und Messung

Mittenfrequenz in Hz	Immissionsspektrum $L_{rT,1h}$ in dB(A)							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
63	81.9	33.0	37.2	29.0	30.3	57.9	61.1	45.7
125	88.8	44.2	58.9	43.9 (+1.8)	45.0 (+1.8)	67.6	70.4	55.1
250	88.6	57.6	63.6	49.4 (+4.8)	50.4 (+5.0)	68.5	72.3	55.9
500	88.6	57.5	63.2	51.7 (+3.7)	54.0 (+4.1)	67.7	74.1	54.6
1000	90.3	56.2	63.5	55.2 (+1.5)	58.1 (+1.6)	65.1	77.0	50.5
2000	88.0	50.5	59.7	52.6 (+1.1)	54.4 (+1.2)	61.3	75.6	45.0
4000	85.2	43.3	55.3	47.6 (+1.2)	49.5 (+1.2)	57.6	72.8	37.8
8000	79.7	27.1	43.7	31.8 (+1.2)	33.8 (+1.2)	47.4	63.2	20.2

Tabelle 7.5: In SoundPLAN ermittelter Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) pro Oktavband für die Situation mit großer Bühne am Vorplatz der Inffeldgasse 16b ohne Publikum mit Baugrube (ohne Baugrube).

Mittenfrequenz in Hz	Immissionsspektrum $L_{p,A}$ in dB(A)							
	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
63	78.7	49.5	53.7	42.7	41.0	61.8	54.9	50.7
125	87.6	58.3	63.3	53.5	53.1	74.9	68.2	59.0
250	89.4	61.4	63.6	54.4	51.2	77.9	73.8	64.5
500	96.7	70.4	67.8	52.9	51.0	79.8	79.7	61.6
1000	99.6	73.6	71.1	59.5	58.9	77.2	79.7	56.7
2000	101.4	73.6	69.3	60.3	55.6	77.8	79.8	57.0
4000	104.7	72.2	66.7	53.3	52.5	77.4	78.1	53.4
8000	104.4	68.4	61.7	43.1	45.0	74.0	77.2	44.6

Tabelle 7.6: Aus den Messergebnissen errechneter A-bewerteter Schalldruckpegel $L_{p,A}$ in dB(A) pro Oktavband.

Mittelfrequenz in Hz	Immissionsspektrum $L_{rT,1h}$ in dB(A)							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
50	70.8	24.0	28.2	19.8	20.9	45.3	50.2	34.6
63	76.3	26.5	30.9	22.1	23.3	51.7	55.5	40.0
80	80.0	31.1	35.3	27.3	28.6	56.4	59.2	43.9
100	82.0	36.6	41.7	32.0 (+1.8)	33.3 (+1.8)	59.8	61.5	46.2
125	84.0	38.5	43.7	35.0 (+1.7)	36.3 (+1.8)	62.5	66.0	49.6
160	85.4	41.7	58.7	43.0 (+1.8)	44.0 (+1.9)	64.8	67.6	52.7
200	83.8	50.5	58.3	40.2 (+4.7)	41.3 (+4.8)	64.1	66.9	52.1
250	83.4	52.7	58.2	45.2 (+4.8)	45.8 (+4.9)	62.2	66.9	49.7
315	84.3	54.4	59.7	46.4 (+4.8)	47.7 (+5.0)	64.4	68.5	51.3
400	84.7	54.0	59.5	47.7 (+3.7)	49.5 (+4.1)	64.3	69.4	51.2
500	84.6	52.9	58.8	47.3 (+3.7)	49.6 (+4.1)	63.3	70.0	50.5
630	81.7	50.6	56.4	45.6 (+3.7)	48.6 (+4.1)	60.0	68.3	46.5
800	84.9	52.4	58.8	50.3 (+1.5)	54.0 (+1.6)	61.8	71.5	47.5
1000	86.0	52.0	59.4	51.3 (+1.5)	54.2 (+1.5)	60.8	72.6	46.0
1250	85.5	49.3	57.7	49.7 (+1.4)	51.4 (+1.5)	57.1	72.4	42.3
1600	84.9	47.5	56.5	49.0 (+1.1)	50.7 (+1.2)	56.4	72.2	40.6
2000	81.7	45.1	53.8	47.6 (+1.2)	49.6 (+1.2)	56.9	70.1	40.8
2500	82.6	43.7	54.0	46.4 (+1.2)	48.3 (+1.3)	56.1	69.5	39.0
3150	82.0	41.6	53.0	45.7 (+1.2)	47.5 (+1.3)	54.0	69.9	35.5
4000	80.6	36.9	49.3	41.4 (+1.1)	43.4 (+1.2)	53.1	67.7	32.2
5000	77.4	33.7	47.6	38.5 (+1.2)	40.2 (+1.2)	50.9	64.8	28.9
6300	76.2	26.2	41.9	31.2 (+1.2)	33.2 (+1.2)	46.0	60.7	19.9
8000	75.4	19.4	38.2	22.8 (+1.2)	24.7 (+1.3)	40.6	58.7	8.0
10000	72.3	11.2	31.3	10.1 (+1.2)	12.0 (+1.2)	35.2	52.3	-5.7

Tabelle 7.7: In SoundPLAN ermittelter Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) pro Terzband für die Situation mit großer Bühne am Vorplatz der Inffeldgasse 16b ohne Publikum mit Baugrube (ohne Baugrube).

Mittenfrequenz in Hz	Immissionsspektrum $L_{p,A}$ in dB(A)							
	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
50	65.8	37.1	42.0	30.2	30.5	44.6	46.0	41.2
63	70.7	43.7	45.6	37.0	34.8	54.2	49.9	45.9
80	77.3	47.7	52.1	40.9	39.0	60.4	51.5	48.3
100	81.6	48.7	56.8	45.7	44.8	64.1	60.1	49.0
125	83.8	55.2	59.5	48.4	49.7	71.9	64.2	53.6
160	83.0	54.5	59.2	50.7	49.0	71.1	64.8	56.0
200	78.5	53.8	58.5	50.8	47.7	72.2	66.8	59.9
250	81.5	56.2	58.8	47.8	44.8	73.6	68.9	55.7
315	87.4	58.5	58.8	49.7	46.6	73.7	70.2	61.8
400	94.2	61.7	62.1	49.6	46.3	75.7	74.3	58.0
500	92.9	63.3	62.9	46.6	46.4	75.4	73.1	56.6
630	84.1	68.6	63.7	47.7	45.9	73.6	77.0	55.8
800	84.1	68.1	65.8	51.5	50.5	73.6	74.1	53.3
1000	92.1	66.6	67.9	55.3	54.6	72.8	75.6	49.8
1250	99.0	70.8	65.5	56.2	55.8	70.9	75.0	52.0
1600	97.5	69.4	65.3	56.6	53.1	69.8	74.4	52.7
2000	96.9	68.6	64.1	55.6	49.0	73.2	75.9	52.0
2500	93.9	68.4	64.2	54.1	49.2	74.9	74.7	52.3
3150	99.7	68.4	62.7	50.1	47.4	71.9	74.3	49.4
4000	98.4	67.1	61.8	48.4	48.9	73.0	72.5	49.1
5000	100.9	66.8	61.2	45.6	46.3	72.3	72.5	46.8
6300	102.9	67.6	60.6	42.0	44.0	72.8	75.8	43.2
8000	97.7	60.5	53.8	34.8	36.3	66.7	71.7	36.3
10000	95.7	55.4	47.5	29.1	32.2	61.0	62.2	31.5

Tabelle 7.8: Aus den Messergebnissen errechneter A-bewerteter Schalldruckpegel $L_{p,A}$ in dB(A) pro Terzband.

7.3.3 Differenz der Immissionspektren

Mittenfrequenz in Hertz	Differenz der Immissionspektren in dB(A)						
	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
50	-28.7	-23.8	-35.7	-35.3	-21.3	-19.8	-24.6
63	-27.1	-25.1	-33.7	-35.9	-16.5	-20.8	-24.8
80	-29.7	-25.3	-36.4	-38.3	-16.9	-25.8	-29.0
100	-33.0	-24.8	-36.0	-36.9	-17.5	-21.5	-32.6
125	-28.6	-24.3	-35.4	-34.1	-11.9	-19.7	-30.2
160	-28.5	-23.9	-32.3	-34.0	-11.9	-18.2	-27.0
200	-24.8	-20.1	-27.7	-30.8	-6.4	-11.7	-18.7
250	-25.3	-22.6	-33.7	-36.6	-7.9	-12.6	-25.8
315	-28.9	-28.6	-37.8	-40.8	-13.7	-17.2	-25.6
400	-32.5	-32.1	-44.6	-47.9	-18.5	-19.9	-36.2
500	-29.6	-30.0	-46.3	-46.5	-17.4	-19.7	-36.3
630	-15.5	-20.4	-36.4	-38.2	-10.5	-7.1	-28.3
800	-16.0	-18.3	-32.6	-33.6	-10.5	-10.0	-30.8
1000	-25.5	-24.2	-36.8	-37.5	-19.3	-16.5	-42.3
1250	-28.2	-33.5	-42.8	-43.2	-28.1	-24.0	-47.0
1600	-28.1	-32.2	-40.9	-44.4	-27.7	-23.1	-44.8
2000	-28.2	-32.8	-41.3	-47.9	-23.6	-21.0	-44.9
2500	-25.5	-29.7	-39.8	-44.7	-19.1	-19.2	-41.6
3150	-31.3	-37.0	-49.6	-52.3	-27.8	-25.4	-50.3
4000	-31.4	-36.6	-50.1	-49.5	-25.5	-25.9	-49.3
5000	-34.1	-39.6	-55.3	-54.5	-28.5	-28.4	-54.1
6300	-35.3	-42.4	-61.0	-58.9	-30.1	-27.2	-59.7
8000	-37.2	-43.9	-62.9	-61.4	-31.0	-26.0	-61.4
10000	-40.4	-48.2	-66.6	-63.5	-34.8	-33.6	-64.3

Tabelle 7.9: Differenzen der Immissionspektren in Terzbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_1 .

Mittenfrequenz in Hertz	Differenz der Immissionsspektren in dB(A)						
	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
50	-46.8	-42.6	-51.0	-49.9	-25.5	-20.6	-36.2
63	-49.8	-45.4	-54.2	-53.0	-24.6	-20.8	-36.3
80	-48.9	-44.7	-52.7	-51.4	-23.6	-20.8	-36.1
100	-45.4	-40.3	-50.0 (+1.8)	-48.7 (+1.8)	-22.2	-20.5	-35.8
125	-45.5	-40.3	-49.0 (+1.7)	-47.7 (+1.8)	-21.5	-18.0	-34.4
160	-43.7	-26.7	-42.4 (+1.8)	-41.4 (+1.9)	-20.6	-17.8	-32.7
200	-33.3	-25.5	-43.6 (+4.7)	-42.5 (+4.8)	-19.7	-16.9	-31.7
250	-30.7	-25.2	-38.2 (+4.8)	-37.6 (+4.9)	-21.2	-16.5	-33.7
315	-29.9	-24.6	-37.9 (+4.8)	-36.6 (+5.0)	-19.9	-15.8	-33.0
400	-30.7	-25.2	-37.0 (+3.7)	-35.2 (+4.1)	-20.4	-15.3	-33.5
500	-31.7	-25.8	-37.3 (+3.7)	-35.0 (+4.1)	-21.3	-14.6	-34.1
630	-31.1	-25.3	-36.1 (+3.7)	-33.1 (+4.1)	-21.76	-13.4	-35.2
800	-32.5	-26.1	-34.6 (+1.5)	-30.9 (+1.6)	-23.1	-13.4	-37.4
1000	-34.0	-26.6	-34.7 (+1.5)	-31.8 (+1.5)	-25.2	-13.4	-40.0
1250	-36.2	-27.86	-35.8 (+1.4)	-34.1 (+1.5)	-28.4	-13.16	-43.2
1600	-37.4	-28.4	-35.9 (+1.1)	-34.2 (+1.2)	-28.5	-12.7	-44.3
2000	-36.6	-27.9	-34.1 (+1.2)	-32.1 (+1.2)	-24.8	-11.6	-40.9
2500	-38.9	-28.6	-36.2 (+1.2)	-34.3 (+1.3)	-26.5	-13.1	-43.6
3150	-40.4	-29.0	-36.3 (+1.2)	-34.5 (+1.3)	-28.0	-12.1	-46.5
4000	-43.7	-31.36	-39.2 (+1.1)	-37.2 (+1.2)	-27.5	-12.9	-48.4
5000	-43.7	-29.8	-38.9 (+1.2)	-37.2 (+1.2)	-26.5	-12.6	-48.5
6300	-50.0	-34.36	-45.0 (+1.2)	-43.0 (+1.2)	-30.2	-15.5	-56.3
8000	-56.0	-37.2	-52.6 (+1.2)	-50.7 (+1.3)	-34.8	-16.7	-67.4
10000	-61.1	-41.0	-62.2 (+1.2)	-60.3 (+1.2)	-37.1	-20.0	-78.0

Tabelle 7.10: Differenzen der Immissionsspektren in Terzbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_1 .

Mittenfrequenz in Hertz	Differenz der Immissionspektren in dB(A)						
	x'_1	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
50	28.7	4.9	-6.9	-6.6	7.5	8.9	4.1
63	27.1	2.0	-6.7	-8.8	10.5	6.2	2.3
80	29.7	4.4	-6.8	-8.6	12.7	3.9	0.6
100	33.0	8.2	-3.0	-3.9	15.5	11.5	0.3
125	28.6	4.4	-6.7	-5.5	16.8	9.0	-1.5
160	28.5	4.6	-3.8	-5.6	16.5	10.3	1.5
200	24.8	4.7	-2.9	-6.0	18.4	13.1	6.1
250	25.3	2.7	-8.4	-11.3	17.4	12.7	-0.5
315	28.9	0.3	-8.8	-11.9	15.2	11.7	3.3
400	32.5	0.4	-12.1	-15.4	13.9	12.6	-3.7
500	29.6	-0.4	-16.7	-17.0	12.1	9.8	-6.7
630	15.5	-4.9	-21.0	-22.7	5.0	8.4	-12.9
800	16.0	-2.4	-16.6	-17.6	5.4	6.0	-14.8
1000	25.5	1.3	-11.3	-12.0	6.3	9.0	-16.8
1250	28.2	-5.3	-14.6	-15.0	0.1	4.2	-18.7
1600	28.1	-4.2	-12.8	-16.4	0.3	4.9	-16.8
2000	28.2	-4.6	-13.1	-19.7	4.6	7.2	-16.6
2500	25.5	-4.2	-14.2	-19.2	6.5	6.3	-16.1
3150	31.3	-5.7	-18.2	-21.0	3.6	6.0	-19.0
4000	31.4	-5.2	-18.7	-18.1	5.9	5.4	-18.0
5000	34.1	-5.6	-21.2	-20.5	5.5	5.7	-20.0
6300	35.3	-7.1	-25.7	-23.6	5.2	8.1	-24.4
8000	37.2	-6.7	-25.7	-24.2	6.1	11.1	-24.2
10000	40.4	-7.9	-26.2	-23.2	5.6	6.8	-23.9

Tabelle 7.11: Differenzen der Immissionspektren in Terzbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_2 .

Mittenfrequenz in Hertz	Differenz der Immissionsspektren in dB(A)						
	x_1	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
50	46.8	4.2	-4.2	-3.1	21.3	26.2	10.6
63	49.8	4.4	-4.4	-3.2	25.2	29.0	13.5
80	48.9	4.2	-3.8	-2.5	25.3	28.1	12.8
100	45.4	5.1	-4.6 (+1.8)	-3.3 (+1.8)	23.2	24.9	9.6
125	45.5	5.2	-3.5 (+1.7)	-2.2 (+1.8)	24.0	27.5	11.1
160	43.7	17.0	1.3 (+1.8)	2.3 (+1.9)	23.1	25.9	11.0
200	33.3	7.8	-10.3 (+4.7)	-9.2 (+4.8)	13.6	16.4	1.6
250	30.7	5.5	-7.5 (+4.8)	-6.9 (+4.9)	9.5	14.2	-3.0
315	29.9	5.3	-8.0 (+4.8)	-6.7 (+5.0)	10.0	14.1	-3.1
400	30.7	5.5	-6.3 (+3.7)	-4.5 (+4.1)	10.3	15.4	-2.8
500	31.7	5.9	-5.6 (+3.7)	-3.3 (+4.1)	10.4	17.1	-2.4
630	31.1	5.8	-5.0 (+3.7)	-2.0 (+4.1)	9.4	17.7	-4.1
800	32.5	6.4	-2.1 (+1.5)	1.6 (+1.6)	9.4	19.1	-4.9
1000	34.0	7.4	-0.7 (+1.5)	2.2 (+1.5)	8.8	20.6	-6.0
1250	36.2	8.4	0.4 (+1.4)	2.1 (+1.5)	7.8	23.1	-7.0
1600	37.4	9.0	1.5 (+1.1)	3.2 (+1.2)	8.9	24.7	-6.9
2000	36.6	8.7	2.5 (+1.2)	4.5 (+1.2)	11.8	25.0	-4.3
2500	38.9	10.3	2.7 (+1.2)	4.6 (+1.3)	12.4	25.8	-4.7
3150	40.4	11.4	4.1 (+1.2)	5.9 (+1.3)	12.4	28.3	-6.1
4000	43.7	12.4	4.5 (+1.1)	6.5 (+1.2)	16.2	30.8	-4.7
5000	43.7	13.9	4.8 (+1.2)	6.5 (+1.2)	17.2	31.1	-4.8
6300	50.0	15.7	5.0 (+1.2)	7.0 (+1.2)	19.8	34.5	-6.3
8000	56.0	18.8	3.4 (+1.2)	5.3 (+1.3)	21.2	39.3	-11.4
10000	61.1	20.1	-1.1 (+1.2)	0.8 (+1.2)	24.0	41.1	-16.9

Tabelle 7.12: Differenzen der Immissionsspektren in Terzbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_2 .

Mittenfrequenz in Hz	Differenz der Immissionsspektren in dB(A)						
	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
63	-48.9	-44.7	-52.9 (+0.0)	-51.6 (+0.0)	-24.0	-20.8	-36.2
125	-44.6	-29.9	-44.9 (+1.8)	-43.8 (+1.8)	-21.2	-18.4	-33.7
250	-31.0	-25.0	-39.2 (+4.8)	-38.2 (+5.0)	-20.1	-16.3	-32.7
500	-31.1	-25.4	-36.9 (+3.7)	-34.6 (+4.1)	-20.9	-14.5	-34
1000	-34.1	-26.8	-35.1 (+1.5)	-32.2 (+1.6)	-25.2	-13.3	-39.8
2000	-37.5	-28.3	-35.4 (+1.1)	-33.6 (+1.2)	-26.7	-12.4	-43
4000	-41.9	-29.9	-37.6 (+1.2)	-35.7 (+1.2)	-27.6	-12.4	-47.4
8000	-52.6	-36.0	-47.9 (+1.2)	-45.9 (+1.2)	-32.36	-16.5	-59.5

Tabelle 7.13: Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_1 .

Mittenfrequenz in Hz	Differenz der Immissionsspektren in dB(A)						
	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
63	-29.2	-24.9	-36.0	-37.7	-16.9	-23.8	-28.0
125	-29.2	-24.2	-34.0	-34.5	-12.7	-19.3	-28.6
250	-28.0	-25.8	-35.0	-38.1	-11.4	-15.5	-24.9
500	-26.3	-29.0	-43.8	-45.7	-16.9	-17.0	-35.1
1000	-26.0	-28.4	-40.1	-40.8	-22.4	-19.9	-42.9
2000	-27.8	-32.1	-41.2	-45.8	-23.7	-21.6	-44.4
4000	-32.4	-37.9	-51.3	-52.2	-27.3	-26.6	-51.2
8000	-36.0	-42.8	-61.3	-59.5	-30.5	-27.3	-59.8

Tabelle 7.14: Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_1 .

Mittenfrequenz in Hz	Differenz der Immissionsspektren in dB(A)						
	x_1	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
63	48.9	4.2	-4.0 (+0.0)	-2.7 (+0.0)	24.9	28.1	12.7
125	44.6	14.7	-0.3 (+1.8)	0.8 (+1.8)	23.4	26.2	10.9
250	31.0	6.0	-8.2 (+4.8)	-7.2 (+5.0)	10.9	14.7	-1.7
500	31.1	5.7	-5.8 (+3.7)	-3.5 (+4.1)	10.2	16.6	-2.9
1000	34.1	7.3	-1.0 (+1.5)	1.9 (+1.6)	8.9	20.8	-5.7
2000	37.5	9.2	2.1 (+1.1)	3.9 (+1.2)	10.8	25.1	-5.5
4000	41.9	12.0	4.3 (+1.2)	6.2 (+1.2)	14.3	29.5	-5.5
8000	52.6	16.6	4.7 (+1.2)	6.7 (+1.2)	20.3	36.1	-6.9

Tabelle 7.15: Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_2 .

Mittenfrequenz in Hz	Differenz der Immissionsspektren in dB(A)						
	x'_1	x'_3	x'_4	x'_5	x'_6	x'_7	x'_8
63	29.2	4.3	-6.8	-8.5	12.3	5.4	1.2
125	29.2	5.0	-4.8	-5.3	16.5	9.9	0.6
250	28.0	2.2	-7.0	-10.1	16.6	12.5	3.1
500	26.3	-2.6	-17.6	-19.4	9.4	9.3	-8.8
1000	26.0	-2.5	-14.1	-14.8	3.6	6.1	-16.9
2000	27.8	-4.3	-13.4	-18.0	4.1	6.2	-16.6
4000	32.4	-5.5	-18.9	-19.7	5.1	5.9	-18.8
8000	36.0	-6.8	-25.3	-23.5	5.5	8.7	-23.8

Tabelle 7.16: Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_2 .

Abbildungsverzeichnis

1.1	Die Universitätsgebäude umschließen den Veranstaltungsbereich des Campus Inffeldgasse (rot eingekreist) [1].	11
1.2	Ausschnitt der Website (Firma Svantek) zur Lärmüberwachung am Campus Inffeldgasse [4].	12
2.1	Kurven gleicher Lautheit (Isophone) [5].	14
2.2	Filterverläufe für eine A-, B-, C- und D-Bewertung sowie der Verlauf der für Störspannungsmessungen spezifizierten «CCIR-Kurve» [5].	14
2.3	Darstellung der unbewerteten energieäquivalenten Terzspektren von Musikrichtungen und der Referenzspektren normiert auf gleiche $L_{A,eq}$ [11], [12].	19
3.1	In SoundPLAN erzeugtes 3D Modell des Campus Inffeldgasse.	22
3.2	Gesamtschalleistungspegel L_w und A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel $L_{w,A}$ (rot) mit Frequenzspektrum des Schalleistungspegels L_w in dB (grün) (links) und Richtcharakteristik bei 1 kHz (rechts) des d&b 2-Wege-Lautsprechers.	23
3.3	Gesamtschalleistungspegel L_w und A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel $L_{w,A}$ (rot) mit Frequenzspektrum des Schalleistungspegels L_w in dB (grün) (links) und Richtcharakteristik bei 80 Hz (rechts) des d&b Subwoofers.	24
3.4	Gesamtschalleistungspegel L_w und A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel $L_{w,A}$ (rot) mit Frequenzspektrum des Schalleistungspegels L_w in dB (grün) des simulierten Publikums.	24
3.5	SoundPLAN-Modell große Bühne mit großem Publikum (links) und kleine Bühne mit kleinem Publikum (rechts) vor dem Gebäude Inffeldgasse 16b.	25
3.6	SoundPLAN-Modell mit Schallquellen (schwarz) und Immissionspunkten (orange).	26
3.7	Karte des Campus Inffeldgasse mit den neuen SAL-Gebäuden [21].	27
3.8	In SoundPLAN erzeugtes 3D Modell des Campus Inffeldgasse mit SAL-Gebäuden.	27
3.9	SoundPLAN-Modell mit Baugrube (türkis).	28
3.10	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission des großen Publikums.	30
3.11	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der kleinen Bühne ohne Publikum.	31
3.12	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.	32
3.13	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 18 m für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.	33
3.14	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der kleinen Bühne ohne Publikum.	34
3.15	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.	35
3.16	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 18 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.	36
3.17	Schnitt zwischen den Schallquellen (x_1) und der Lärmmessstation (x_2) (a) und Schnitt zwischen den Schallquellen (x_1) und den Immissionspunkten x_4 und x_5 in der Sandgasse (b).	37
3.18	Schnittlärmkarte für die Schallemission der großen Bühne. Dargestellt sind die Schnitte der Gebäude Inffeldgasse 18 (links), Inffeldgasse 16b (Mitte) und Inffeldgasse 12 (rechts).	38

3.19	Schnittlärnkarte für die Schallemission der großen Bühne. Dargestellt sind die Schnitte der Gebäude Inffeldgasse 10 (links), Inffeldgasse 16b und 16c (Mitte) und Sandgasse 41 (rechts).	39
3.20	Schnittlärnkarte für die Schallemission der großen Bühne mit SAL-Gebäuden. Dargestellt sind die Schnitte der Gebäude Inffeldgasse 10 (links), Inffeldgasse 16b und 16c (Mitte) und Sandgasse 41 (rechts).	40
4.1	Installierte elektroakustische Beschallungsanlage am Vorplatz der Inffeldgasse 16b.	42
4.2	Bühnenposition am Vorplatz der Inffeldgasse 16b (grün) und Immissionspunkte x'_1 - x'_8 am Campus Inffeldgasse und entlang der Sandgasse (gelb) sowie der Grundriss der Baugrube während des Baus der SAL-Gebäude (türkis) [1].	43
4.3	Schematischer Aufbau der Messkette.	45
4.4	Ergebnis der Mittelung an Immissionspunkt x'_4 (unten), basierend auf vier Messungen an diesem Immissionspunkt (oben, Mitte).	48
4.5	Impulsantwort an Immissionspunkt x'_1 (links); Betragsspektrum (blau) und über Oktavbänder geglättetes Betragsspektrum (rot) an Immissionspunkt x'_1 (rechts).	50
4.6	Differenz der über Terzbänder (links) bzw. Oktavbänder (rechts) geglätteten Betragsspektren von Immissionspunkten x'_n und Referenzimmissionspunkt x'_1 .	50
4.7	Impulsantwort an Immissionspunkt x'_2 (links); Betragsspektrum (blau) und über Oktavbänder geglättetes Betragsspektrum (rot) an Immissionspunkt x'_2 (rechts).	51
4.8	Differenz der über Terzbänder (links) bzw. Oktavbänder (rechts) geglätteten Betragsspektren von Immissionspunkten x'_n und Referenzimmissionspunkt x'_2 .	51
5.1	Terzbandanalyse zur Ermittlung des Gesamtpegels $L_{p,A,ges}$ für jeden Immissionspunkt.	54
5.2	Vergleich der Differenzen zu Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgehend) und x'_2 (strichliert) bei Simulation und Messung mit Terzband- (bpo = 3) und Oktavbandglättung (bpo = 1).	56
5.3	Vergleich der Differenzen zu Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgehend) und x'_2 (strichliert) bei Simulation und Messung mit Terzband- (bpo = 3) und Oktavbandglättung (bpo = 1).	57
5.4	Vergleich der Differenzen zu Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgehend) und x'_2 (strichliert) bei Simulation und Messung mit Terzband- (bpo = 3) und Oktavbandglättung (bpo = 1) unter Berücksichtigung der Baugrube.	57
5.5	Einfluss der SAL-Gebäude auf die Übertragungsfunktion zwischen dem Immissionspunkt x_4 (links) bzw. x_5 (rechts) und dem Referenzimmissionspunkt x_1 (durchgezogen) bzw. x_2 (strichliert) gemäß der Simulation in SoundPLAN (blau: ohne SAL-Gebäude, rot: mit SAL-Gebäuden).	59
5.6	Mögliche Auswirkung der SAL-Gebäude auf die Übertragungsfunktion zwischen dem Immissionspunkt x'_4 (links) bzw. x'_5 (rechts) und dem Referenzimmissionspunkt x'_1 (durchgezogen) bzw. x'_2 (strichliert) gemäß der Simulation in SoundPLAN (blau: ohne SAL-Gebäude, rot: mit SAL-Gebäuden).	59
5.7	Terzbandanalyse und Frequenzbewertung zur Ermittlung der Differenz der frequenzbewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{C,eq} - L_{A,eq}$.	61
7.1	Lageplan mit möglichen Bühnenpositionen (orange) aus den Richtlinien für Veranstaltungen am Campus Inffeldgasse der Serviceeinrichtung Gebäude und Technik der TU Graz.	67
7.2	Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der kleinen Bühne vor Gebäude Inffeldgasse 16b.	68
7.3	Rasterlärnkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der großen Bühne vor Gebäude Inffeldgasse 18.	69

7.4	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der kleinen Bühne mit Publikum.	70
7.5	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m für die Schallemission der großen Bühne mit Publikum.	71
7.6	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der kleinen Bühne mit Publikum.	72
7.7	Rasterlärmkarte in einer Höhe von 1.5 m mit SAL-Gebäuden für die Schallemission der großen Bühne mit Publikum.	73
7.8	Frequenzgang des Messmikrofons NTi M2230 [25].	75
7.9	Ergebnis der Mittelung an Immissionspunkt x'_5 (unten,rechts), basierend auf drei Messungen an diesem Immissionspunkt (oben, unten links).	78

Tabellenverzeichnis

2.1	A- und C-Frequenzbewertungen für die Terzbänder von 10 Hz bis 20 kHz [6]. . .	15
2.2	Bezeichnung der Tageszeiten je nach Uhrzeit [7].	17
2.3	Grenzwerte des Beurteilungspegels L_r je nach Widmungskategorie und Tageszeit für Immissionspunkte im Freien [7].	18
2.4	Zulässige Anzahl an Veranstaltungstagen an einem Veranstaltungsort pro Kalenderjahr in Abhängigkeit des energieäquivalenten Dauerschallpegels im Freien vor den Fenstern am Tag und in der Nacht [9], [10].	19
2.5	Behördlich vorgeschriebene Grenzwerte je nach Tageszeit für den A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel sowie deren Differenz an der Lärmmessstation am Dach des Gebäudes Inffeldgasse 12 [2].	21
3.1	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne ohne Publikum.	41
3.2	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne ohne Publikum.	41
3.3	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne mit SAL-Gebäuden ohne Publikum. . .	41
3.4	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit SAL-Gebäuden ohne Publikum. . .	41
3.5	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit Baugrube ohne Publikum.	41
4.1	Festgelegte Voreinstellungen des Messobjekts.	46
5.1	A-bewerteter Gesamtschalldruckpegel $L_{p,A,ges}$ der Messergebnisse.	54
5.2	Differenzen der Beurteilungspegel $\Delta L_{rT,1h}$ und der C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $\Delta L_{C,eq}$ aus der Simulation sowie die daraus resultierende Reduktion des A- bzw. C-bewerteten Schalldruckpegels $\Delta L_{p,A,ges}$ bzw. $\Delta L_{p,C,ges}$ durch den Bau der SAL-Gebäude.	60
5.3	Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels der Messergebnisse an verschiedenen Immissionspunkten.	61
5.4	Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für das Referenzspektrum basslastiger Musik ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).	62
5.5	Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für die Musikrichtung Techno ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).	62
5.6	Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für die Musikrichtung Dancefloor ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).	62
5.7	Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für die Musikrichtung Pop ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).	62
5.8	Differenz des A- und C-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels an verschiedenen Immissionspunkten für das Referenzspektrum rosa Rauschen ohne SAL-Gebäude (mit SAL-Gebäuden).	62
5.9	Vorgeschlagene Grenzwerte für den Gesamtschalldruckpegel $L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 für Veranstaltungen mit unterschiedlicher Häufigkeit. . .	64

5.10	Vorgeschlagene Grenzwerte für den Differenzpegel $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3	64
5.11	Vorgeschlagene Grenzwerte für den Gesamtschalldruckpegel $L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 für Veranstaltungen mit unterschiedlicher Häufigkeit bei Miteinbeziehung der Prognose mit SAL-Gebäuden.	64
5.12	Vorgeschlagene Grenzwerte für den Differenzpegel $L_{C,eq} - L_{A,eq}$ an den Immissionspunkten x'_2 und x'_3 bei Miteinbeziehung der Prognose mit SAL-Gebäuden.	64
7.1	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit Publikum.	74
7.2	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne mit Publikum.	74
7.3	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der großen Bühne mit SAL-Gebäuden und Publikum.	74
7.4	Beurteilungspegel $L_{rT,1h}$ in dB(A) an den einzelnen Immissionspunkten $x_1 - x_8$ für die Schallemission der kleinen Bühne mit SAL-Gebäuden und Publikum.	74
7.5	In SoundPLAN ermittelter Beurteilungspegel L_{rT1h} in dB(A) pro Oktavband für die Situation mit großer Bühne am Vorplatz der Inffeldgasse 16b ohne Publikum mit Baugrube (ohne Baugrube).	80
7.6	Aus den Messergebnissen errechneter A-bewerteter Schalldruckpegel $L_{p,A}$ in dB(A) pro Oktavband.	80
7.7	In SoundPLAN ermittelter Beurteilungspegel L_{rT1h} in dB(A) pro Terzband für die Situation mit großer Bühne am Vorplatz der Inffeldgasse 16b ohne Publikum mit Baugrube (ohne Baugrube).	81
7.8	Aus den Messergebnissen errechneter A-bewerteter Schalldruckpegel $L_{p,A}$ in dB(A) pro Terzband.	82
7.9	Differenzen der Immissionsspektren in Terzbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_1	83
7.10	Differenzen der Immissionsspektren in Terzbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_1	84
7.11	Differenzen der Immissionsspektren in Terzbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_2	85
7.12	Differenzen der Immissionsspektren in Terzbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_2	86
7.13	Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_1	87
7.14	Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_1	87
7.15	Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Simulation mit Baugrube (ohne Baugrube) für Referenzimmissionspunkt x_2	88
7.16	Differenzen der Immissionsspektren in Oktavbändern aus der Messung für Referenzimmissionspunkt x'_2	88

Literaturverzeichnis

- [1] Google Ireland Limited,. (2021) Google Earth. Google. Gordon House, Barrow Street, Dublin 4, Ireland. [Online]. Available: <https://earth.google.com/>
- [2] H. Koller, “Messbericht; Dauermessstation TU Graz Inffeldgasse (Schallmessungen, Kalibrierung Messstation),” May 2019.
- [3] G. Graber, J. Balint, “Lautstärke bei Studierendenfesten am Campus Inffeldgasse / TU-Graz (Stadtteilversammlung),” Jun. 2019.
- [4] Gebäude und Technik der Technischen Universität Graz, “Einhalten der Lärmbelastung bei Veranstaltung im Freigelände Inffeldgasse 10/16b/18,” Jun. 2019.
- [5] S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] W. Weselak, *Akustische Messtechnik*. Vorlesungsskriptum, Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz.
- [7] Austrian Standards Institutes, *Schalltechnische Grundlagen für die örtliche und überörtliche Raumplanung und -ordnung*, Komitee 138 Akustik Std., Apr. 2010.
- [8] *ÖAL-Richtlinie Nr. 6/18: Die Wirkung des Lärms auf den Menschen - Beurteilungshilfen für den Arzt*, Std., Feb. 2011.
- [9] C. Lechner, “Lärmschutzrichtlinie für Veranstaltungen,” 2011.
- [10] *ÖAL-Richtlinie Nr. 3/1: Beurteilung von Schallimmissionen im Nachbarschaftsbereich*, Std., Mar. 2008.
- [11] H. Koller, “Vorläufige Abschätzung möglicher Schallpegelreduzierung im tieffrequenten Bereich,” Feb. 2016.
- [12] C. Lechner, “Begrenzung der Schallemission durch Musikanlagen,” Jan. 2000.
- [13] Magistrat Graz - Stadtvermessungsamt. (2018) Flächenwidmungsplan 4.0. Stadt Graz. Rathaus, 8011 Graz. [Online]. Available: https://www.graz.at/cms/beitrag/10295892/8115447/Online_Karte_Flaechenwidmungsplan.html
- [14] Hochschülerinnen- und Hochschülerschaft an der TU Graz,. Verleihsystem der HTU Graz. Hochschülerinnen- und Hochschülerschaft an der TU Graz. Rechbauerstraße 12, 8010 Graz. [Online]. Available: <https://verleih.htugraz.at/>
- [15] M. Wilke, “Bescheid zur Veranstaltungsstättenbewilligung,” Apr. 2018.
- [16] SoundPLAN GmbH,. (2015, Oct.) SoundPLAN-Manager. SoundPLAN GmbH. D-71522 Backnang.
- [17] Google Ireland Limited,. (2021) Google Maps. Google. Gordon House, Barrow Street, Dublin 4, Ireland. [Online]. Available: <https://www.google.at/maps/@47.0583979,15.4572856,17.75z>
- [18] db Application Support. (2008, Apr.) db Application Support. support@dbaudio.com. [Online]. Available: <http://www.dbaudio.com>

- [19] E. Krämer, “Technischer Bericht Nr. L 4054 zur Untersuchung der Geräuschemissionen und -immissionen von Tankstellen,” 1999.
- [20] Bundesimmobiliengesellschaft m.b.H. (2021) Data House und SAL Building - TU Graz. Trabrennstraße 2c, 1020 Wien. [Online]. Available: big.at
- [21] Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten,. Everysize Arquitectura LDA, Lissabon. Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten. Karlsgasse 9/2. 1040 Wien. [Online]. Available: architekturwettbewerb.at
- [22] RWTH Aachen University. (2017) ITA Toolbox. RWTH Aachen University. Templergraben 55, 52062 Aachen. [Online]. Available: <http://www.ita-toolbox.org/>
- [23] A. Schweizer. Schallpegelberechnung. Wasenöschstr. 11, 88048 Friedrichshafen. [Online]. Available: <https://www.schweizer-fn.de/akustik/schallpegelaenderung/schallpegel.php>
- [24] H. Fastl, E. Zwicker, *Psychoacoustics*. Springer-Verlag GmbH, Dec. 2006. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/4013268/hugo_fastl_eberhard_zwicker_psychoacoustics.html
- [25] P. Schwizer. Technische Daten Messmikrofone - NTi Audio. NTi Audio AG. Im alten Riet 102; 9494 Schaan. [Online]. Available: <https://www.nti-audio.com/Portals/0/data/de/Messmikrofone-Spezifikationen.pdf>