

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
6048 Horw
T +41 41 349 33 11
hslu.ch/technik-architektur

Institut für Elektrotechnik IET
Prof. Dr.-Ing. Armin Taghipour
Professor für Signalverarbeitung & Akustik
Leiter der Forschungsgruppe
Waves & Signal Processing
T direkt +41 41 349 30 01
E-Mail armin.taghipour@hslu.ch

Horw, 16. Februar 2026

Objektive Methoden der Klangraumbeurteilung und Möglichkeiten der KI-basierten Klangraumklassifizierung

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

[Für den Inhalt ist ausschliesslich die Auftragnehmerin dieses Berichts verantwortlich.]

Verfasser*innen: Manuel Isenegger, Gregor Heini, Silvio Emmenegger,
Mario Rölli, Thomas Steiner, Sandra Hollenstein, Lél Bartha, Ulrike Sturm und
Armin Taghipour

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

Begriff	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CB	Cercle Bruit
CC ASR	Kompetenzzentrum Autonome Systeme und Robotik
dB	Dezibel, logarithmische Angabe von Pegeln
EDT	Die Early Decay Time: EDT misst die Zeit, die benötigt wird, bis der Schalldruckpegel unmittelbar nach dem direkten Schall um 10 dB abnimmt, und extrapoliert diesen Abklingvorgang, um die vollständige 60 dB-Nachhallzeit zu schätzen.
IET	Institut für Elektrotechnik
IR	Impulse Response (Impulsantwort): In der Raumakustik verwendeter Begriff für den Zeitverlauf des Schalldrucks an einem Messpunkt im Raum, wenn durch einen kurzen Schallstoss, z. B. einen Knall, Schallreflexionen und Nachhall angeregt werden.
HSLU	Hochschule Luzern
L_p	Schalldruckpegel
L_{A95}	Während 95% der Messzeit überschrittener A-bewerteter Schalldruckpegel
L_{Aeq}	A-bewerteter Schalldruck-Mittelungspegel
L_{AFmax}	A-bewerteter Schalldruck-Maximalpegel, Zeitkonstante FAST = 125 Millisekunden
L_{AS}	A-bewerteter Schalldruckpegel, Zeitkonstante SLOW = 1 Sekunde
Lautheit	Wahrgenommene Lautstärke eines Schalls, abhängig von akustischen Eigenschaften und spezifischen Hörbedingungen.
LSV	Lärmschutzverordnung

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Begriff	Bedeutung
MFCC	Mel Frequency Cepstral Coefficients: Spektrale Merkmale eines Audiosignals, die oft in der Sprach- und Audioverarbeitung verwendet werden.
Rauigkeit	Die Hörempfindung Rauigkeit beschreibt gemeinsam mit der Hörempfindung Schwankungsstärke die Wahrnehmung zeitlicher Variationen von Schallen.
RT60	Nachhallzeit: Dauer zwischen dem Abschalten der Quelle und dem Zeitpunkt, an dem die räumlich gemittelte Schallenergiedichte um 60 dB abgenommen hat.
Schärfe	Psychoakustische Grösse zur Beschreibung, ob ein Geräusch als scharf, schrill oder zischend wahrgenommen wird.
SEL	Schallexpositionspegel (Sound Exposure Level)
Spectral Slope	Beschreibt, wie die Energie eines Geräusches mit zunehmender Frequenz abnimmt.
T20	Auswertung der Nachhallzeitmessung über einen 20-dB-Abklingbereich (meist -5 dB bis -25 dB relativ zum Ausgangspegel). Dieser Wert wird verdreifacht, um den RT60 näherungsweise zu berechnen.
T30	Auswertung der Nachhallzeitmessung über einen 30-dB-Abklingbereich (meist -5 dB bis -35 dB relativ zum Ausgangspegel). Dieser Wert wird verdoppelt, um den RT60 näherungsweise zu berechnen.
Tonalität	Gibt an, inwieweit ein Schall eine klare harmonische Struktur aufweist.

Executive Summary

Aufgrund der beschlossenen Änderung des Umweltschutzgesetzes wurden von der HSLU im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) innerhalb von 17 Monaten Untersuchungen zur objektiven Beurteilung von Klangräumen durchgeführt. Diese Untersuchungen beinhalteten insbesondere die Beantwortung der folgenden Fragen:

- Welche akustischen und raumakustischen Messgrößen sind bei der Klangraumbeurteilung von Aussenräumen von Wohnbauten relevant?
- Welche soziokulturellen Parameter beeinflussen die Möglichkeit zu Erholung und die Wohnqualität von Klangräumen?
- Wie lässt sich der Klangraum in Aussenräumen von Wohnbauten beurteilen? Wie sieht ein Punktesystem/Ampelsystem aus, welches die Einflüsse der relevanten Faktoren auf die Klangraumqualität abbildet?
- Kann mit Hilfe von KI-basierten Modellen eine Klangraumklassifizierung (z.B. inkl. akustischer/raumakustischer Messgrößen, Inhalt/Kontext usw.) erreicht werden?

In einer ersten Phase wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und vier Objekte in Basel, Bern, Luzern und Zürich zur genaueren Untersuchung ausgewählt. Parallel hierzu wurde eine Vorstudie durchgeführt und ausgewertet, welche die akustische Messmethodik von Klangräumen untersuchte und die späteren Messungen durch ihre Erkenntnisse bereicherte. Nach der Auswahl der vier Objekte wurden in diesen Messungen raumakustischer, akustischer, sowie psychoakustischer Variablen durchgeführt bzw. im Nachgang extrahiert und einige weitere Variablen (Anzahl Sitzplätze, Vorhandensein eines Spielplatzes, Grünanteil etc.) durch Beobachtung erhoben. Die Auswertung der Messungen zeigte verwertbare Unterschiede zwischen den Klangräumen, wobei einige Variablen aufgrund von methodischen Fehlern oder mangelnder Varianz aus der weiteren Analyse ausgeschlossen wurden.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurden Befragungen von jeweils maximal 5 Personen pro Klangraum (Innenhof) durchgeführt. Diese subjektive Befragung beinhaltete qualitative und quantitative Aspekte und Items. Die Ergebnisse beider Erhebungen wurden ausgewertet und auch teilweise statistisch verglichen. Der Vergleich zeigt signifikante Korrelationen zwischen einigen subjektiven und objektiven Daten.

Aufgrund der Projektergebnisse wurden zudem Empfehlungen zur Beurteilung von Klangräumen verfasst, welche insbesondere die Erhebungsmethodik von zu beurteilenden Klangräumen erläutern.

Parallel zu diesen Schritten wurde die Machbarkeit untersucht, ob eine künstliche Intelligenz (KI) Geräuscharten aus Audioaufnahmen identifizieren kann, um in der Zukunft so ein mögliches Hilfsmittel in der Klangraumbeurteilung zu sein. Die Untersuchung zeigte, dass verschiedene Kategorien von Geräuschen mit grosser Zuverlässigkeit identifiziert werden können. Die aktuelle Komplexität des KI-Modells erlaubt jedoch keine Erkennung von gleichzeitig vorkommenden Geräuschen. Im Falle von mehreren, gleichzeitig vorkommenden Geräuscharten wird das gemäss Modell dominanteste Geräusch erkannt und ausgewiesen. Ein komplexeres Modell könnte mit grosser Wahrscheinlichkeit auch mehr und mehrere gleichzeitig auftretende Geräuscharten erkennen.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	3
1 Projektauftrag	9
1.1 Einleitung	9
1.2 Projektorganisation	11
1.3 Untersuchungsfragen	12
1.4 Projektplan inkl. Arbeitspakete	12
1.5 Zeitplan	16
2 Grundlagen	17
2.1 Vorstudie	17
2.2 Literatur-Review zur Entwicklung der technischen Erhebungsmethodik . .	26
2.3 Literatur-Review zur sozialwissenschaftlichen Erhebung - drei Ansätze im Vergleich	28
3 Untersuchungsobjekte	30
3.1 Objektauswahl	30
3.2 Objektbeschreibung	32
3.2.1 Objekt 1: Zürich, Zwicky-Areal Ost	32
3.2.2 Objekt 2: Basel, Erlenmatt Ost	34
3.2.3 Objekt 3: Luzern, Himmelrich 3	36
3.2.4 Objekt 3: Bern, Park Humboldtstrasse	38
4 Technische Datenerhebung	41
4.1 Methodik	41
4.2 Erhebungsergebnisse	44
4.2.1 Dübendorf, Zwickyareal Ost	44
4.2.2 Basel, Erlenmatt Ost	57
4.2.3 Luzern, Himmelrich 3	69
4.2.4 Bern, Park Humboldtstrasse	82
5 Qualitative Datenerhebung	96
5.1 Erhebungs-Methodik	96
5.2 Durchführung und Erhebungen	98
5.3 Auswertung Fragebogen	100

5.3.1	Klangquellen nach Deutlichkeit der Wahrnehmung	100
5.3.2	Wahrnehmung Klanglandschaften - Empfindung	102
5.3.3	Wahrnehmung Klanglandschaften - Soundscape	103
5.4	Ergebnisse Audio-Analyse	104
5.5	Ergebnisse Begehung im Dialog	104
5.5.1	Zürich, Zwickyareal Ost	104
5.5.2	Basel, Erlenmatt Ost	106
5.5.3	Luzern, Himmelrich 3	108
5.5.4	Bern, Park Humboldtstrasse	109
5.6	Zusammenfassung	111
5.6.1	Zürich, Zwickyareal Ost: naturnah und anregend, aber laut	111
5.6.2	Basel, Erlenmatt Ost: angenehm aber widersprüchlich	111
5.6.3	Luzern, Himmelrich 3: lebhaft, aber betonlastig und Dauerbeschallung	111
5.6.4	Bern, Park Humboldtstrasse: naturnah, angenehm, aber langweilig	112
5.7	Übergreifende Erkenntnisse	112
5.8	Methodenkritik der qualitativen Erhebungen	113
6	Datenanalyse und Diskussion	114
6.1	Analyse und Diskussion zur technischen Erhebung	114
6.1.1	Plausibilität und Aussagekraft der Resultate	114
6.1.2	Zürich, Zwickyareal Ost	114
6.1.3	Basel, Erlenmatt Ost	115
6.1.4	Luzern, Himmelrich 3	116
6.1.5	Bern, Park Humboldtstrasse	117
6.1.6	Schalldruckpegel, Spektralverhalten und Tonalität über alle Objekte	118
6.1.7	Nachhallzeit über alle Objekte	119
6.1.8	Sprachverständlichkeit über alle Objekte	119
6.2	Vergleich der subjektiven und objektiven Daten	120
6.2.1	Grünanteil	120
6.2.2	STI	122
6.2.3	RT60	124
6.2.4	Vergleich der subjektiven Beurteilungsmethoden	125
7	KI-basierte Klangraum-Klassifizierung	127
7.1	Zielsetzung	127
7.2	Lösungsansatz	128
7.2.1	Modellpartition	128

7.2.2	Geräuschkategorien	129
7.2.3	Anforderungen	130
7.3	Datensammlung und -aufbereitung	131
7.3.1	Standorte	131
7.3.2	Datenschutz	131
7.3.3	Labelling	131
7.4	Entwicklung und Training des KI-Modells	134
7.4.1	Software-Aufbau	134
7.4.2	Preprocessing	134
7.4.3	Modellarchitektur	137
7.4.4	Training	137
7.4.5	Tuning	138
7.4.6	Modellwahl	139
7.5	Validierung des KI-Modells	141
7.5.1	Auswertung Einzelgeräusche	142
7.5.2	Auswertung gemischte Geräusche	145
7.6	Diskussion	148
7.6.1	Technische Aspekte	148
7.6.2	Fazit	148
8	Leitfaden	150
9	Fazit	160
9.1	Beantwortung der Untersuchungsfragen	160
9.2	Empfehlungen für eine Anwendung der Untersuchungsmethode	162
9.2.1	Erhebung technischer Variablen	162
9.2.2	Diskussion in Bezug auf Hypothesen der Gesetzesänderung	164
A	Tabellen	A-1
A.1	Vorstudie: RT60 Resultate	A-1
A.2	Vorstudie: SPL Resultate	A-4
B	Allgemeine Ergänzungen	B-2
B.1	Formular zur subjektiven Klangraumbeurteilung von Cercle Bruit	B-2
B.2	STI Rating Übersicht	B-4
B.3	Vorstudie	B-4
B.4	Messprotokoll WP2	B-27

B.5	Messequipment für die technische Datenerhebung	B-32
B.6	Masse der Messpositionen der Untersuchungsobjekte	B-33
B.7	Resultate der KI-basierten Klangraum-Klassifizierung	B-42

1 Projektauftrag

1.1 Einleitung

Am 27.09.2024 wurde die Änderung des Umweltschutzgesetzes beschlossen (Link: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/fga/2024/2502/de>). Mit der Gesetzesänderung sollen unter anderem raumplanerische Zielsetzungen mit dem Schutz der Bevölkerung vor Lärm besser abgestimmt werden. Bei der Planung von zusätzlichem Wohnraum in lärmbelasteten Gebieten sollen gemäss dem neuen Artikel 24 bei Überschreitung der Planungs- oder Immissionsgrenzwerte Ausnahmen gewährt werden, solange ein Angebot an Freiräumen für die Erholung und Massnahmen für eine akustisch angemessene Wohnqualität realisiert werden.

Die Gesetzesänderung geht von verschiedenen Hypothesen aus, welche Erholung und Wohnqualität im Siedlungsraum unterstützen:

1. **Nutzungsverträglichkeit:** Die Motivation, einen Freiraum für Erholungszwecke zu nutzen, zeigt sich in Bewegung/Sport, Ausruhen/Entspannen und sozialer Austausch. Ein Freiraum, der mehrere Aktivitäten zulässt, weist eine höhere Nutzungsverträglichkeit auf und eignet sich daher besser für Erholungszwecke, als einer der diese Aktivitäten nicht oder nur eingeschränkt zulässt. Hier spielen u.a. die momentane Lärmbelastung und Lärmbelästigung eine Rolle.
2. **Nutzungsvielfalt:** ein Freiraum, der für viele Menschen gleichzeitig Privatheit zulässt (z.B. privates Gespräch auf einer Parkbank oder einem Spaziergang), eignet sich besser für Erholungs- und Wohnzwecke, als einer ohne diese Möglichkeit. Dies zeigt sich u.a. darin, wenn zwei Personen sich miteinander unterhalten können ohne andere zu stören.
3. **Kohärenz und Angebot:** ein Freiraum eignet sich besser für Erholungszwecke, wenn die Anbindung zu anderen öffentlichen Freiräumen, die weitere Nutzungen/Aktivitäten zulassen, fussläufig und möglichst hindernisfrei gewährleistet ist. Der stadträumliche Kontext sollte also eine gewisse (akustische) Diversität anstelle Monotonie ermöglichen, muss gleichzeitig aber auch lesbar bleiben.
4. **Partizipation, Kommunikation und Cocreation:** ein Freiraum, der von den Nutzer:innen innerhalb eines gewissen Rahmens angeeignet, mitgestaltet und mitverantwortet werden kann, eignet sich besser für Erholungs- und Wohnzwecke, als einer der fest vorschreibt, wie er zu nutzen ist, oder weil die (akustischen) Bedingungen keine Aneignung und Nutzung zulassen.

5. Multimodales und biophiles Design: Bei der Gestaltung eines Freiraums sind multisensorische Wahrnehmungsaspekte zu berücksichtigen, z.B. visuell, akustisch, thermisch. Diese können u.a. durch Natur- und grüne Elemente angesprochen werden.

Die Aufenthaltsqualität an einem Ort wird nicht nur von der visuellen Erscheinung, dem Geruch und der Sauberkeit, dem Mikroklima und dem Sicherheitsgefühl geprägt, sondern ebenso wesentlich von der akustischen Qualität, auch wenn wir diese oft nur unbewusst wahrnehmen[1].

Dieses Projekt beschreibt die Untersuchungen mittels akustischer und raumakustischer Metriken, sowie sozialwissenschaftlicher Methoden, welche zur Erweiterung der obenstehenden Thematik und Fragestellungen beitragen. Weitere Ausführungen sind der Offerte "Projektvorschlag: Objektive Methoden der Klangraumbeurteilung und Möglichkeiten der KI-basierten Klangraumklassifizierung" der Hochschule Luzern vom 17. Juli 2023 zu entnehmen.

1.2 Projektorganisation

Bundesamt für Umwelt (BAFU):

Abteilung:	Lärm und NIS
Auftraggeber:	Dr. Trond Maag
Projektleiter:	Dr. Trond Maag

Hochschule Luzern (HSLU):

Projektleiter:	Prof. Dr. Armin Taghipour (HSLU T&A IET)
Umweltakustik:	Manuel Isenegger (HSLU T&A IET) Gregor Heini (HSLU T&A IET)
Künstliche Intelligenz	Silvio Emmenegger (HSLU T&A IET) Mario Rölly (HSLU T&A IET)
Evaluation & qualitative Methoden	Thomas Steiner (HSLU SA ISE)
Quartiersentwicklung & Raumplanung	Prof. Dr. Ulrike Sturm (HSLU SA ISE)

Vertragsdaten:

Vertrags-Nr.:	00.0425.PZ / 61E53287F
Bestell-Nr.:	110016059 / 8T10/00.0425.PZ/0038
Projektdauer:	01.10.2023 - 31.03.2025

1.3 Untersuchungsfragen

Ausgehend von der Annahme, dass eine rein akustische Untersuchung für die Beurteilung der Erholung und Wohnqualität der Aussenräume nicht ausreicht, hat das vorliegende Projekt zum Ziel, folgenden Fragen nachzugehen.

- Welche akustischen und raumakustischen Messgrössen sind bei der Klangraumbeurteilung von Aussenräumen von Wohnbauten relevant?
- Welche soziokulturellen Parameter beeinflussen die Möglichkeit zu Erholung und die Wohnqualität von Klangräumen?
- Wie lässt sich der Klangraum in Aussenräumen von Wohnbauten beurteilen? Wie sieht ein Punktesystem/Ampelsystem aus, welches die Einflüsse der relevanten Faktoren auf die Klangraumqualität abbildet?
- Kann mit Hilfe von KI-basierten Modellen eine Klangraumklassifizierung (z.B. inkl. akustischer/raumakustischer Messgrössen, Inhalt/Kontext usw.) erreicht werden?
- Welche Massnahmen erzielen die grösstmögliche Verbesserung der Klangraumqualität in Aussenräumen von Wohnbauten?

1.4 Projektplan inkl. Arbeitspakete

Das geplante Projekt beinhaltet sechs Arbeitspakete, plus ein separates AP für das Projektmanagement.

Tabelle 2: Projekt-Workpackages

AP-Nr.	AP-Titel	Aufwand (Tage)
AP0	Projektmanagement	7
AP1	Literatur-Review und Objektauswahl	15
AP2	Datenerhebungskampagne	40
AP3	Datenanalyse	62
AP4	KI-basierte Klangraum-Klassifizierung	43
AP5	Massnahmenkatalog	15
AP6	Schlussfolgerungen und Dokumentation	10

AP1 – Literatur-Review und Objektauswahl Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik wird überprüft, sowie Vorbereitungen für die Untersuchung von Fallbeispielen getroffen.

Arbeitsschritte:

- Literatur-Review updaten;
- Festlegung/Update der akustischen, raumakustischen, psychoakustischen, sowie soziokulturellen Einflussparameter auf die Qualität des Klangraums [2, 3, 4, 5, 6];
- Auswahl der Messinstrumente für quantitative Untersuchungen: Raumakustisch, bauakustisch, umweltakustisch, physikalisch (HSLU T&A) [7, 2, ?];
- Auswahl und Ausarbeitung der Methoden für die qualitativen Untersuchungen, sozialwissenschaftlich und sozialräumlich (HSLU SA);
- Untersuchungsobjekte (d.h., Fallbeispiele) auswählen.

Deliverables: Aktualisierte Listen der Einflussparameter (Auswahl der relevanten Einflussparameter für dieses Projekt) und Auswahl der Untersuchungsobjekte.

AP2 – Datenerhebungskampagne Die ausgewählten Objekte werden besichtigt und dokumentiert, in-situ Messungen gemacht und qualitative Untersuchungen durchgeführt. Arbeitsschritte:

- Akustische/raumakustische Messungen: Nachhallzeit, SPL-Messung, Binaurale Aufnahmen, STI usw.;
- Expertenanalyse: Parallele Wände [4], Materialisierung Fassadenoberfläche [2, 3, 4, 8, 9], Bodenmaterial, Hintergrundgeräusche [10, 11, 12], Naturelemente/Grünes [13, 14], Dachform [15], Balkonform und Balkonuntersicht/Balkonwände [16, 17, 18, 3], Spiel- und/oder Sportplatz [3];
- Klangraumbeurteilungsf formular von Cercle Bruit Schweiz [1];
- Visuelle Dokumentation durch Bildaufnahmen;
- Begehung, Beobachtung und Befragung (HSLU SA).

Meilenstein 1 (MS1): Datenerhebung wurde erfolgreich abgeschlossen.

AP3 – Datenanalyse Die im AP2 erhobenen Daten werden im AP3 analysiert. Die HSLU T&A führt akustische, raumakustische, psychoakustische und statistische Analysen durch. Die HSLU SA führt eine qualitative Analyse durch.

Arbeitsschritte:

- Statistische Analyse der akustischen/raumakustischen Messdaten mit MATLAB und SPSS;
- Analyse der Audioaufnahmen mit MATLAB und ArtemiS SUITE für weiterführende akustische/psychoakustische Analysen (z.B. Berechnung psychoakustischer Parameter);
- Qualitative Bewertung der Klangräume, d.h., Objekte, Bildaufnahmen, Begehung, Beobachtung und Befragungen.

Meilenstein 2 (MS2): Datenanalyse wurde erfolgreich abgeschlossen.

AP4 – KI-basierte Klangraum-Klassifizierung Es wird untersucht, ob eine Klassifizierung der aufgenommenen Szenarien mit Hilfe der künstlichen Intelligenz (KI) möglich ist [19]. AP4 ist eine Machbarkeitanalyse mit einer geringen Anzahl von Eingangsszenarien (Audio-Ausschnitten). Untersucht wird, ob unterschiedliche Geräuscharten (Natur, Stimmen, Verkehr, Zivilisation, etc.) allein und als Mischsignal oder auch die Aussenraumakustik (d.h., Nachhallzeit) durch das KI-Modell kategorisiert und klassifiziert werden können.

Arbeitsschritte:

- Datensammlung und -aufbereitung: Es werden Aufzeichnungen von repräsentativen Audioaufnahmen durchgeführt, welche verschiedene Natur- und Hintergrundgeräusche (Störgeräusche) sowie Aussenraumakustik-Szenarien abbilden. Die Audiodaten müssen in ein geeignetes Format konvertiert und für die Verarbeitung durch das KI-Modell vorbereitet werden.
- Entwicklung und Training des KI-Modells: Ein geeignetes KI-Modell für die Klassifizierung der Audiodaten wird evaluiert. In einem ersten Schritt werden die Audiodaten mit konventionellen Methoden vorverarbeitet und analysiert. Anschliessend werden auf Basis der vorverarbeiteten Daten verschiedene Algorithmen und Modellarchitekturen trainiert und das Modell mit den besten Ergebnissen ausgewählt.

- Validierung des KI-Modells: Das trainierte KI-Modell wird auf seine Genauigkeit und Zuverlässigkeit überprüft. Dazu werden Testdaten verwendet, welche nicht im Training verwendet wurden. Im besten Fall weist das Modell eine hohe Genauigkeit auf, um für die Echtzeit-Klassifizierung von Audioaufnahmen in der Praxis geeignet zu sein. Als Anhaltspunkt für die mögliche Genauigkeit (State-of-the-Art-Genauigkeit) dienen Forschungsergebnisse der DCASE Challenge [20]. Dieser Wettbewerb befasst sich im Task 1 mit vergleichbaren Modellen für die Klassifikation von 10 akustischen Szenen (u.a. Strassen und Plätze mit unterschiedlichen Verkehrs-/Besucherbelastungen). Die besten Teams in dieser Challenge erreichten in den vergangenen Jahren eine Modellgenauigkeit von über 75%.

AP5 – Massnahmenkatalog Aus den im AP1 und AP3 gewonnenen Erkenntnissen wird ein ein Massnahmenkatalog zur Verbesserung der Klangraumqualität¹.

Arbeitsschritte:

- Evaluation des Einflusses unterschiedlicher, untersuchter Parameter auf die Klangraumqualität.
- Synthese von möglichen Massnahmen, welche gemäss den Resultaten der Untersuchungsobjekte die Klangraumqualität erhöhen.

Meilenstein 3 (MS3): Ein Ein Massnahmenkatalog zur Verbesserung der Klangraumqualität wurde erstellt.

AP6 – Schlussfolgerungen und Dokumentation Es werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen erläutert.

Arbeitsschritte:

- Abschliessende Bewertung der Rolle der akustischen, raumakustischen, psychoakustischen, sowie sozialräumlichen Parameter auf die Qualität des Klangraums;
- Urteil zur Machbarkeit der KI-basierten Klangraum-Klassifizierung und Aufdeckung möglicher Anwendungen für eine solche Analyse in der Lärmbeurteilung;
- Projektbericht.

Meilenstein 4 (MS4): Das Projekt wurde inkl. Dokumentation abgeschlossen.

¹Die Zielsetzung des AP5 wurde im Laufe des Projekts und in Absprache mit dem BAFU von “Massnahmenkatalog zur Verbesserung der Klangraumqualität” zu “Empfehlungen zur Beurteilung von Klangräumen” angepasst.

Nach dem Projektabschluss

Nach der Übergabe des finalen Projektberichts wird das HSLU-Team eine wissenschaftliche Publikation verfassen. Die HSLU stellt die Finanzierung dafür bereit.

1.5 Zeitplan

Der Projektzeitplan sieht eine Projektbearbeitung von 15 Monaten vor. Die wissenschaftliche Publikation wird ausserhalb dieses Zeitraums verfasst.

WP	Titel	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15
WP0	Projektmanagement															
WP1	Literatur-Review und Objektauswahl															
WP2	Datenerhebungskampagne															
WP3	Datenanalyse															
WP4	KI-basierte Klangraum-Klassifizierung															
WP5	Massnahmenkatalog															
WP6	Schlussfolgerungen und Dokumentation															
	Meilensteine (MS)						MS1				MS2			MS3		MS4

Abbildung 1: Projektzeitplan (Offerte)

Anmerkung: Im Verlauf des Projekts wurde dieser Zeitplan in Abstimmung mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) wie folgt angepasst und um zwei Monate verlängert.

		2023		2024												2025		
WP	Titel	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz
WP0	Projektmanagement																	
WP1	Literatur-Review und Objektauswahl																	
WP2	Datenerhebungskampagne																	
WP3	Datenanalyse																	
WP4	KI-basierte Klangraum-Klassifizierung																	
WP5	Massnahmenkatalog																	
WP6	Schlussfolgerungen und Dokumentation																	
	Meilensteine (MS)											MS1		MS2		MS3		MS4

Abbildung 2: Angepasster Projektzeitplan

2 Grundlagen

2.1 Vorstudie

Untersuchungsgegenstand

Für die Planung von akustischen Verbesserungen bestehender Aussenwohnbereiche oder die Gestaltung neuer Aussenwohnbereiche ist es erforderlich, eine Reihe nützlicher, objektiver Masse zur Quantifizierung der akustischen Qualität in diesem Kontext zu ermitteln. Eine der ersten Fragen, die es zu beantworten gilt, ist, inwieweit bekannte akustische, raumakustische und psychoakustische Messgrössen nützlich, zuverlässig und/oder valide sind, um die Gesamtqualität der akustischen Umgebung in Aussenräumen von Wohnanlagen zu quantifizieren. In dieser Vorstudie wurde entsprechend die Erhebung solcher Masse in Aussenraummessungen im Umfeld mehrerer Gebäude erörtert.

Akustische Masse: L_{Aeq} , L_{AFmax} und andere akustische Masse wurden mit kurzfristiger Belästigung [21, 4], langfristiger Belästigung [22] und kurzfristigem akustischen Komfort [23, 3, 2] in Verbindung gebracht. Bei der Verknüpfung von akustischen Ergebnissen mit qualitativen Ergebnissen oder psychologischen Konstrukten stellt sich die Frage, ob kurzfristige oder langfristige Situationen bewertet werden sollen. Darüber hinaus wurde die Stabilität akustischer Messungen im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf für urbane Soundscapes noch nicht eingehend untersucht.

Raumakustische Masse: Die Nachhallzeit RT [24], die frühe Abklingzeit EDT [24] und der Sprachübertragungsindex STI [25] wurden zur Beschreibung der Qualität von Aussenräumen verwendet [26, 27, 28, 29, 2, 30], obwohl sie für Innenräume und/oder elektroakustische Zwecke konzipiert sind. Die Gültigkeit, Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Methoden für den Einsatz im Freien wurde nicht bestätigt. Die hohe Variabilität der städtischen Aussenbedingungen lässt auf eine geringe Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit schliessen.

Psychoakustische Masse: Tonalität [31], Schärfe [32] und andere psychoakustische Masse werden üblicherweise für kurze Audioausschnitte berechnet. Im Falle von akustischen Umgebungen im Freien ist die akustische Szenerie jedoch nicht konstant. Kurze Audiosegmente stellen nur eine momentane Szene dar. Verschiedene Schallquellen können über unterschiedliche Zeiträume hinweg vorhanden sein. Es stellt sich die Frage, in welcher statistischen Form psychoakustische Masse bei der Bewertung der akustischen Umgebung

im Freien von Nutzen sein könnten.

In der Vorstudie wurden zwei Messkampagnen durchgeführt. Im ersten Teil führten 10 verschiedene Klangräume zu ersten Messresultaten. Im zweiten Teil wurden die Messungen an einem Messobjekt in höherer Anzahl und Auflösung durchgeführt.

Methoden und Messequipment

Die Methoden zur Messung der Nachhallzeit und der Sprachverständlichkeit wurden aus den bestehenden europäischen Normen für Innenräume übernommen und auf Aussenräume angewendet.

Die folgenden Mess- und Bewertungsmethoden wurden in die Untersuchungen einbezogen:

- Schalldruckpegel (SPL), resultierend in L_{Aeq} , L_{AFmax} , etc. [33]
- Nachhallzeit RT60, gemessen über $T20$ und $T30$ [24]
- Sprachübertragungsindex (STI) [25]
- Binaurale Soundscape-Aufnahmen zur selben Zeit wie die Pegelmessung [34]
- Soundscape-Bewertungsbogen von *Cercle Bruit Schweiz* [1]

Angaben über Geräte und Mikrofone sind unter B.3 aufgeführt.

Messkampagne 1

Verschiedene Klangräume wurden ausgewählt und jeweils eine RT60-Messung und je drei SPL-Messungen durchgeführt. Bei den Objekten 1 bis 5 wurde auf einer Höhe von 1.2 m gemessen, bei den Objekten 6 bis 10 auf 1.2 m und 1.7 m. Als Quellen dienten jeweils Luftballons, Händeklatschen und eine Holzklappe. Bei den Objekten 6 bis 10 wurden zusätzlich Audioaufnahmen gemacht. Nach der letzten Messung folgte jeweils eine subjektive Beurteilung mithilfe des Formulars von Cercle Bruit Schweiz (2.1).

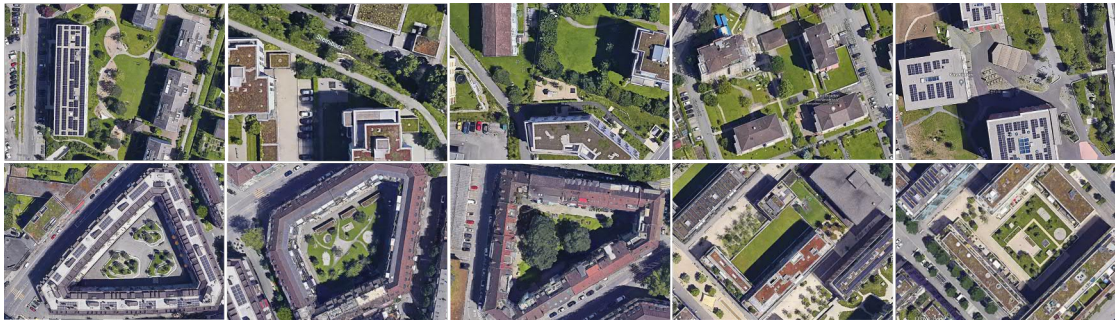


Abbildung 3: Übersicht der Innenhöfe (<https://earth.google.com/web>) der ersten Feldmesskampagne

Resultate der Messkampagne 1

Messergebnisse RT60 Die Ergebnisse der Messungen im Freien schienen fehlerhaft. Im unteren Frequenzbereich bis 1000 Hz fehlt ein erheblicher Teil der Werte. Zudem finden sich starke Streuungen innerhalb desselben Frequenzbands und unplausibel tiefe Werte. Ergebnisse dieser Art zeigen sich bei allen Objekten. Um Lücken und Fehler bei den Resultaten zu vermeiden, sollten Messwiederholungen durchgeführt werden. Die vollständige Liste der Messresultate ist im Anhang A.1.

Messergebnisse SPL Der L_{Aeq} schwankte zu verschiedenen Tageszeiten zum Teil erheblich (bis zu 12,8 dB). Je nach Lage und Umgebung sind die Pegel zum Beispiel morgens höher aufgrund von Kleingewerbe innerhalb des Hofes. Spielende Kinder wiederum haben am Nachmittag Einfluss auf die Messung sowie der sich ändernde Verkehr und Industrielärm (siehe Abb. 4). Die Messergebnisse sind generell abhängig von der Tageszeit und dem momentanen Geschehen im Innenhof.

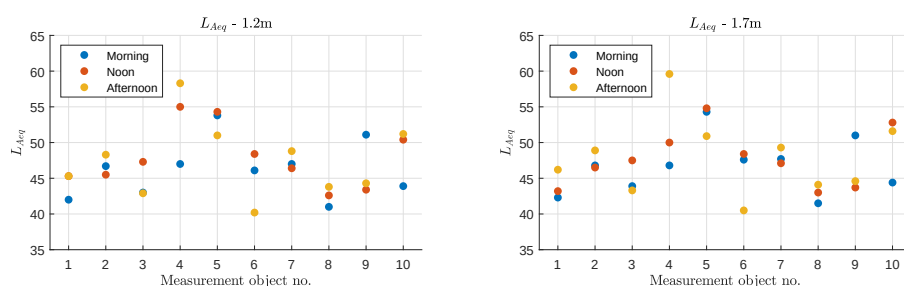


Abbildung 4: Übersicht der L_{Aeq} Werte aller Objekte zu allen Messzeiten

Die L_{AFmax} -Werte zeigen ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 101). Die Werte bei einigen Objekten sind je nach Tageszeit sehr unterschiedlich. Je nach Nutzung und Umgebung war der Pegel am Morgen, Mittag oder am Nachmittag am höchsten.

Subjektive Klangraumbeurteilung Der Cercle Bruit Schweiz² hat zur Bewertung der Klangraumqualität von Höfen und Plätzen als Erholungsräume einen Bewertungsbogen entwickelt (siehe Anhang B.1). Dieser wurde ergänzend zu den Messungen verwendet. Es kann maximal die Note 6 erreicht werden (entsprechend dem Schweizer Schulnotensystem). Für eine Bewertung sollten Negativ- wie auch Positiv-Referenzstandorte besucht werden.

Die gemittelten Ergebnisse der subjektiven Bewertungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der subjektiven Klangraumbeurteilung

Objekt Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resultat (Note 1-6)	4.5	5.3	3.7	2.7	3.1	3.8	4.5	4.5	4.5	2.5

Analyse im Hinblick auf psychoakustische Parameter Um die 10-minütigen Audiodateien für die Objekte Nr. 6-10 psychoakustisch zu analysieren, wurde ArtemiS SUITE v. 12.0 verwendet. Es wurden 30 Aufnahmen analysiert: 5 Objekte, 2 Messhöhen und 3 Tageszeiten.

Abb. 5 zeigt die Schärfeergebnisse für die Objekte 6-10 in beiden Messhöhen zu den verschiedenen Tageszeiten. Die psychoakustischen Messwerte sind abhängig von der

²Cercle Bruit Schweiz (CB) ist ein Zusammenschluss von kantonalen Lärmschutzexperten und ein Verein nach Art.69ff. des Schweizerischen Zivilgesetzbuches

Tageszeit und schwanken innerhalb einer Aufnahme teilweise stark. Objekt Nr. 6 zeigt tagsüber auf der Messhöhe von 1.70m die grössten Unterschiede.

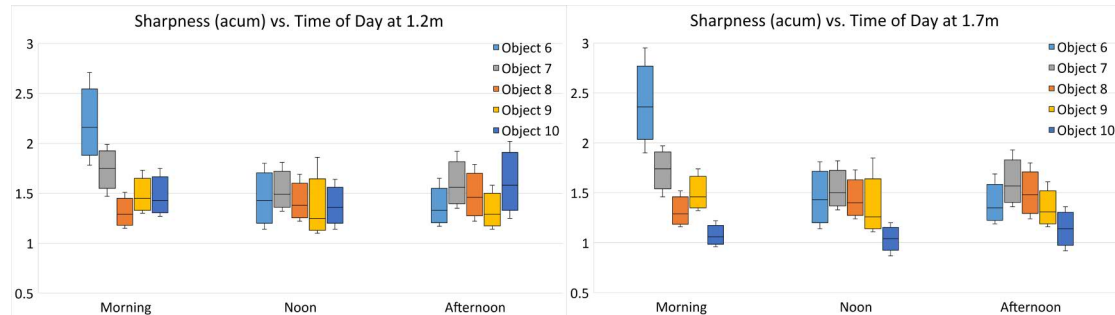


Abbildung 5: Verteilung der Schärfewerte bei den Objekten Nr. 6-10 in 1.2 Meter Aufnahmehöhe (links) und in 1.7 Meter Aufnahmehöhe (rechts)

Messkampagne 2

In einem Innenhof der Hochschule für Technik und Architektur Luzern (siehe B.3) wurden RT60-, STI- und SPL-Messungen durchgeführt, um die Verteilung innerhalb des Raumes und die Zuverlässigkeit der RT- und STI-Messmethoden im Aussenraum zu untersuchen. Als Quelle diente die NTi Audio Talkbox und ein Dodekaeder mit Rosa Rauschen. Vor den Messungen wurde jeweils ein Messplan erstellt.



Abbildung 6: Innenhof HSLU, Sicht Richtung Nordosten

Messpositionierung RT60 Der Innenhof wurde in 3 Messlinien unterteilt, auf denen die

Quelle in regelmässigen Abständen von 6 m positioniert wurde. Zwei Messlinien wurden seitlich und eine inmitten des Raumes definiert. An 5 Positionen wurden Messungen variiert oder erweitert, an einer Messposition wurde zusätzlich eine Schallpegelmessung durchgeführt. Die Messhöhe betrug 1.7 m.

Messpositionierung STI Es gab insgesamt 13 Quellenpositionen. An 5 Positionen wurden zusätzliche, abweichende Konfigurationen verwendet. Die Höhe der Quelle und der Messgeräte betrug 1,7 m mit Ausnahme einer Messvariante. Zusätzlich zu den STIPA-Messungen wurde beim ersten Messpunkt eine 20 Sekunden dauernde Schallpegelmessung (SLM) durchgeführt.

Weitere Angaben und Pläne sind in Anhang B.3 abgelegt.

Resultate der Messkampagne 2

Messergebnisse RT60 Die Messung wurde am 16. Dezember 2023 durchgeführt. Der L_{Aeq} am Messpunkt 5 betrug 41.9 dB. Es gab während der Dauer der Messung wenig transiente Geräusche³, zwischendurch Zugdurchfahrten und Flugzeugüberflüge. Durchgehend waren Geräusche von technischen Anlagen hörbar. Messungen, bei denen transiente Störgeräusche auftraten, wurden verworfen.

RT60-Messdaten Abbildung 7 zeigt die Messergebnisse aller Messpositionen. Als Messergebnis für jede Position gilt der Durchschnittswert von jeweils 8-12 Messwiederholungen. Bei den unteren Frequenzbändern gibt es Lücken in den Daten, weshalb die Punkte teils nicht verbunden sind. Um 250 Hz heben sich einige Messungen vom Rest ab. Dies ist eventuell auf die parallelen Oberflächen, zwischen welchen sich gewisse Positionen befinden, zurückzuführen. Oberhalb von ca. 2'500 Hz nimmt die Nachhallzeit stetig ab.

³kurzzeitige, unregelmässige oder impulsive Störereignisse.

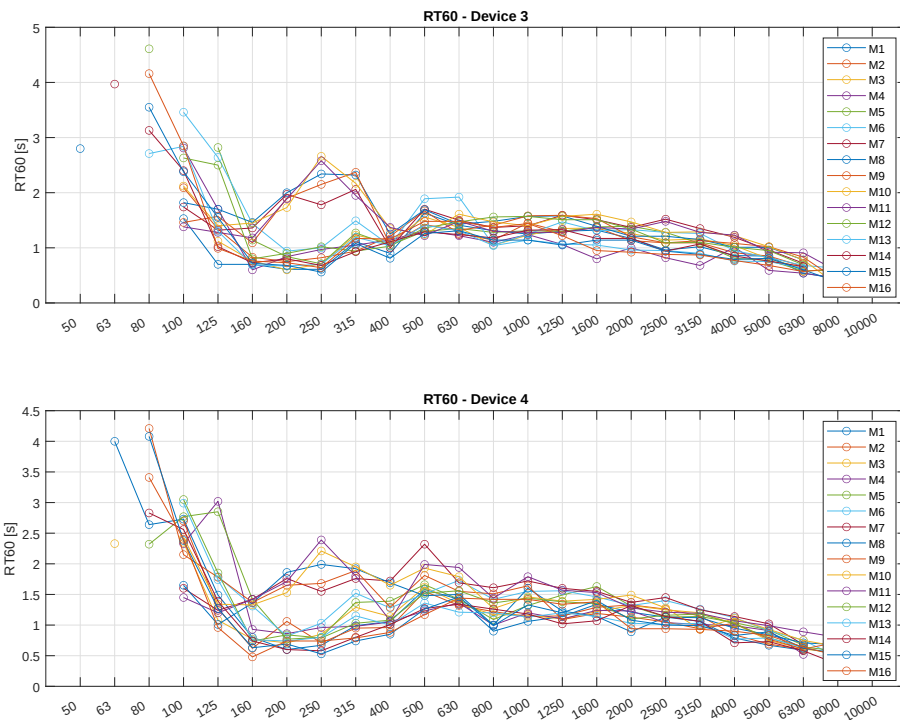


Abbildung 7: RT60-Messwerte, Messgeräte Nr. 3 und 4

Insgesamt sind 9 Einzelmessungen nicht berücksichtigt worden, da sie entweder zu wenig gültige Werte beinhalten oder als unplausibel eingestuft wurden (B.3).

Standardabweichung Die Standardabweichung wurde aus den Mittelwerten für jede Frequenz berechnet (vgl. Abbildung 8). Zwischen 100 und 400 Hz zeigen beide Messgeräte erhöhte Werte bis 0.61 bzw. 0.77 s. Über 500 Hz wird die Standardabweichung kleiner und liegt zwischen 0.09 und 0.23 s. Dies liegt zum Teil auch an der reduzierten Anzahl gültiger Messwerte bei diesen Frequenzen.

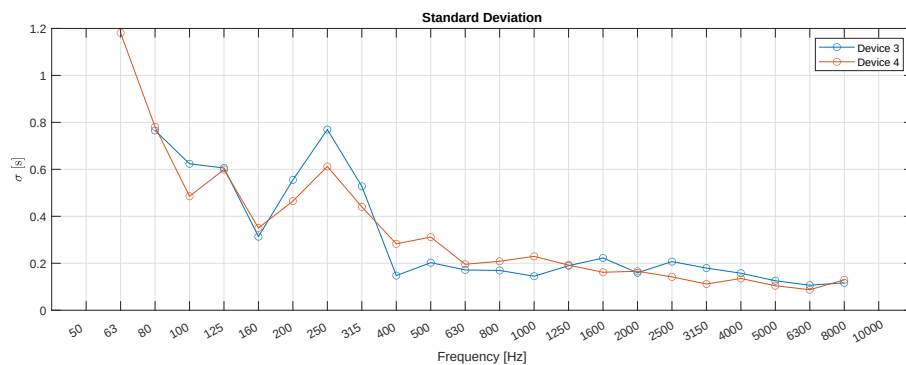


Abbildung 8: Standardabweichung RT60-Messwerte beider Messrichtungen

Messergebnisse STI Die Messung wurde am 23. Dezember 2023 durchgeführt. Der L_{Aeq} am Messpunkt 1 betrug 38.3 dB.

Übersicht der STI-Messdaten an den Messpunkten 1-11 An den Messpunkten 1 bis 11 wurden jeweils zwei Messungen bei den Abständen 2 m und 5 m gemacht (vgl. Abbildung 9). Die Werte beim Abstand 2m bewegen sich alle im höchsten Qualitätsband A+. Bei einem Abstand von 5 m sind die Werte wenig tiefer, aber durchgehend oberhalb der Grenze des A-Bandes (vgl. Anhang B.2).

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit wurden an einem Messpunkt 6 Messwiederholungen mit Abstand 2 m und 5 m gemacht. Die Werte waren beim Abstand von 2 m nahezu konstant über 0.95 geblieben. Beim Abstand von 5 m bewegten sich die Werte zwischen 0.76 und 0.83.

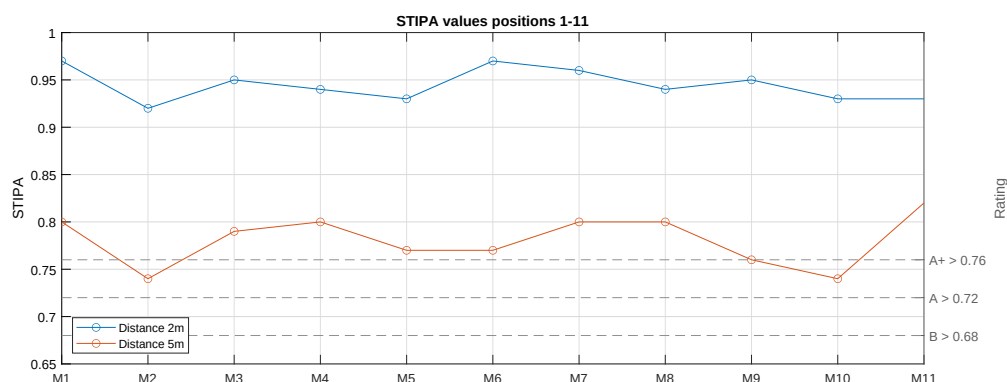


Abbildung 9: STIPA: Alle Messwerte liegen oberhalb von 0.72

STI-Messdaten an den Messpunkten 11.3,12,13 An Position 11.3 wurde der Laut-

sprecher um 90° gedreht, der Empfänger blieb unverändert mit Abstand 2m. Die Position liegt nahe am Trakt 3. Der STIPA-Wert ist durch die Drehung des Lautsprechers tiefer geworden, bewegt sich aber mit 0.72 noch immer im Qualitätsband A.

An Position 12 liegt zwischen Sender und Empfänger eine Erhöhung mit Bäumen, welche die Messung deutlich beeinflusste. Der Messwert hat mit 0.41 den tiefsten Wert der gesamten Messkampagne (Qualitätsband I: PA in schwierigen Umgebungen). Der Wert an Position 13 ohne Hindernis ist mit 0.91 wieder deutlich im ausgezeichneten Bereich (Abbildung 9).

L_{Aeq} -Werte der STI-Messungen In Abbildung 11 ist erkennbar, dass der L_{Aeq} -Wert bei abgedrehtem Lautsprecher am Messpunkt M11.3 im Abstand von 2 m ca. 3 dB tiefer ist. Ein klar tieferer Wert wird über ein Hindernis beim Messpunkt M12 gemessen. Die Werte der Messpositionen M1-M11 sind wenig unterschiedlich.

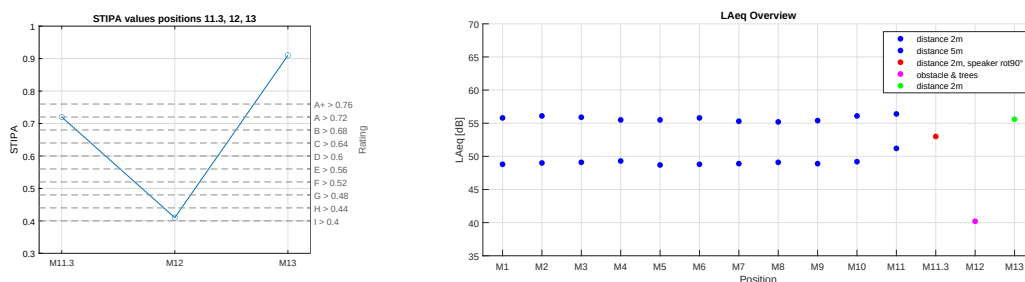


Abbildung 10: Messvarianten an drei Positionen Abbildung 11: L_{Aeq} -Werte der STIPA-Messungen an allen Mespositionen

Weitere Auswertungen der Vorstudie finden sich im Anhang B.3.

Fazit der Vorstudie

Die RT60-Messung gemäss Norm ist nicht robust gegenüber den teilweise starken Hintergrundgeräuschen im Aussenraum. Messanordnungen zur Erhöhung des Quellenpegels (Schreckschusswaffen) oder zur Verringerung des Störpegels (Messung während der Nacht) sind im öffentlichen Bereich üblicherweise nicht zulässig. Nach Möglichkeit sollten spektral angepasste Quellen verwendet werden und eine grosse Anzahl Messwiederholungen durchgeführt werden. Die Plausibilität der Messresultate sollte überprüft und fehlerhafte Messungen aussortiert werden. Darüber hinaus sind RT60-Messungen in gewissen Innenhöfen aufgrund unzureichender Anzahl reflektierender Oberflächen nicht möglich. Die RT60-Ergebnisse variieren aufgrund der unterschiedlichen, akustischen Bedingungen

innerhalb gewisser Innenhöfe (vgl. Kapitel 2.1), sodass ein einziger Wert zur Charakterisierung des gesamten Innenhofs nicht sinnvoll erscheint.

Der gemessene STI-Wert ist hauptsächlich von den Hintergrundgeräuschen, dem Abstand zwischen Quelle und Empfänger, allfälligen Hindernissen und der Ausrichtung der Quelle bezüglich dem Empfänger ab. Es wurde keine offensichtliche Abhängigkeit des STI-Wertes von der Position innerhalb des Innenhofes festgestellt. Während Schwankungen des Hintergrundgeräusches nicht speziell für den STI-Wert untersucht wurden, wiesen separate SPL-Messungen auf Schwankungen hin, sodass die Wiederholbarkeit von STI-Messungen nicht gegeben scheint.

Die Vorstudie zeigt, dass SPL, RT60, STI und eine Reihe von psychoakustischen Parametern zur Bewertung und Beschreibung der akustischen Qualität von Wohnumgebungen im Freien verwendet werden können, allerdings mit Vorsicht. Es braucht eine höhere Anzahl von wiederholten Messungen (im Vergleich zu Innenräumen) und die Eliminierung fehlerhafter Daten vor der Analyse. Es sollten zudem Variationen der raumakustischen Eigenschaften innerhalb des Raums betrachtet werden. Das heisst, es ist förderlich, den Aussenraum in kleinere Abschnitte mit gleichbleibenden Charakteristika zu unterteilen. Darüber hinaus sollen bei der SPL- und psychoakustischen Analyse zeitliche Schwankungen berücksichtigt werden und die Resultate mithilfe statistischer Angaben (wie bspw. Perzentile) ausgedrückt werden.

2.2 Literatur-Review zur Entwicklung der technischen Erhebungsmethodik

Für die Entwicklung der Erhebungsmethodik wurden verschiedene Publikationen beigezogen. Diese bestanden einerseits aus technischen Standards aus dem Bereich Soundscape, als auch wissenschaftlichen Publikationen, sowie einigen Dokumenten aus dem öffentlichen Bereich. Im Folgenden wird auf die betrachteten Publikationen eingegangen und insbesondere erwähnt, welche Erkenntnisse und Methoden daraus geschöpft wurden.

Tabelle 4: Tabelle der relevanten Literaturbeiträge für die Methodik

Publikation	Typ	Beschrieb	Verwendung
DIN ISO 12913 Teile 1 bis 3 [35, 34, 36]	Norm	Normenreihe zum Thema Soundscape	Zu erhebende technische Variablen, Methodik für qualitative Erhebungen
DIN 45631/A1:2010-03 [37]	Norm	Berechnung der Lautheit	←
DIN 45692:2009-08 [32]	Norm	Simulation der Hörempfindung Schärfe	←
ISO 532-1:2017 [38]	Norm	Berechnung der Lautheit	←
DIN 38455:2022-11 [39]	Norm	Berechnung der Hörempfindung Rauigkeit	←
ISO 1996-1:2016 [33]	Norm	Akustik - Beschreibung, Messung und Beurteilung von Umgebungslärm - Teil 1: Grundlegende Kenngrößen und Beurteilungsverfahren	Berechnung des Schalldruckpegels
ECMA-74 [40]	Norm	Auswertung der psychoakustischen Tonalität	←
IEC 60268-16:2011 [?]	Norm	Messung und Auswertung des Sprachverständlichkeitsindex STI	←
A systematic review of prediction models for the experience of urban soundscapes [41]	Wiss. Publikation	Meta-Analyse verschiedener Ansätze zur Beurteilung von Klangräumen	Zu erhebende Variablen
Progress in the understanding of soundscape: [...] [42]	Wiss. Publikation	Entwicklung und Untersuchung eines Ansatzes zur Beurteilung von Klangräumen	Zu erhebende Variablen

Für die Erhebung ausgewählte Variablen

- Diverse Schalldruckpegelmasse aus Mono- und Binauralaufnahmen

- L_{Aeq} , L_{AFmax} , L_{AFmin} , $L_{AF5\%}$, $L_{AF10\%}$, $L_{AF50\%}$, $L_{AF90\%}$, $L_{AF95\%}$, L_{10-L90} , L_{Ceq} , L_{Zeq} , Terzband-Spektrumswerte
- Raumakustische Variablen
 - T_{20} , T_{30} , EDT , spektral aufgelöste RT60 Werte
- STI
- Diverse psychoakustische Variablen aus Binauralaufnahmen
 - Schärfe, Rauigkeit, Tonalität, Lautheit
- Diverse aus den Audioaufnahmen erhobene Variablen
 - Spectral Slope, Time Frequency Second Derivative (TFSD), Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC)
- Aus der Impulsantwort erhobene Variablen
 - Echokriterium nach Dietsch & Kraak, Stärkemass G
- visuelle Aspekte
 - Anteil Grün/Blau in Bildern, Anteil Naturmerkmale in Bildern

2.3 Literatur-Review zur sozialwissenschaftlichen Erhebung - drei Ansätze im Vergleich

Als Grundlage für die Entwicklung eines Ansatzes zur objektiven Klangraumbewertung wurde ein Vergleich bereits bestehender Ansätze zur Klangraumbewertung vorgenommen. Dazu wurden drei Ansätze aus der Klangforschung ausgewählt und in Bezug auf ihre zentralen Inhalte analysiert. Die Auswahl der Ansätze erfolgte aufgrund der Aktualität, der inhaltlichen Relevanz sowie der Praktikabilität für das Projekt. Es wurden die Ansätze «Stadtklang» (Band I+II), «Soundscape» sowie «Cercle Bruit» ausgewählt. Ziel des Vergleichs dieser drei Ansätze war es, aufzuzeigen, wie sich Modelle, Inhalte und Ziele voneinander unterscheiden und welche Aspekte für das eigene Projekt als zielführend weiterzuverfolgen sind.

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche zu den ausgewählten Ansätzen durchgeführt und eine zusammenfassende Übersicht erstellt. Die zentralen Erkenntnisse wurden im Projektteam besprochen. Anschliessend erfolgte eine vertiefte Sichtung des

Materials mit Fokus auf Indikatoren zur Messbarkeit von Klangräumen. In einer zweiten Runde wurden die Indikatoren der unterschiedlichen Ansätze für die Durchführung eigener Messungen im Projektverlauf besprochen.

Die Analyse der drei ausgewählten Ansätze zeigt, dass eine Beurteilung von Klangräumen stets in Abhängigkeit der menschlichen Wahrnehmung zu erfolgen hat. Diese Perspektive wird insbesondere im Soundscape Ansatz hervorgehoben, welcher eine standardisierte Messmethodik (ISO) sowie die Berücksichtigung psychoakustischer Faktoren für die Beurteilung von Klangräumen vorschlägt. Der Klangraum ist somit stets als ein Sozialraum einzuordnen, der durch persönliche Erwartungen und Erfahrungen geprägt wird. Für die Beurteilung von Klangräumen sind daher neben akustischen Messungen, vor allem die individuellen Perspektiven und Wahrnehmungen zu erfassen, etwa durch qualitative sowie quantitative Erhebungen wie Interviews, Beobachtungen, Befragungen oder angeleitete Soundwalks. Damit bildet die lokale Expertise eine der zentralsten Komponenten in der Klangraumbeurteilung. Wie ein Klangraum wahrgenommen wird, hängt jedoch auch von der baulichen Gestaltung und der Materialität eines Ortes ab. Der Ansatz Stadtklang zeigt auf, dass auch Kartierungen, die baulich-materielle Elemente und räumliche Zusammenhänge aufgreifen, die akustische Einordnung von Stadträumen unterstützen. Der Cercle Bruit Ansatz bietet ein Kriterienraster, das als praktikables Instrument zur Bewertung von Klangräumen anhand von vorgegebenen Kriterien dient.

Insgesamt bietet die Betrachtung der drei Ansätze eine Bandbreite an Vorschlägen, welche Indikatoren für eine Klangraumbeurteilung zu berücksichtigen sind. Betont wird dabei weniger die Möglichkeit der Herstellung einer objektiven Betrachtungsweise als vielmehr die Bedeutung einer präzisen Planung und Gestaltung von klangräumlichen Messungen und den Elementen der qualitativen und quantitativen Erhebungen auf sozialräumlicher Seite. Die Herstellung von Objektivität in klangräumlichen Messungen bleibt somit eine komplexe Herausforderung, der sich die kontinuierlich weiterentwickelnde Klangraumforschung gegenüberstellt.

3 Untersuchungsobjekte

Für die Datenerhebung wurden vier spezifische Klangräume ausgewählt. Im Folgenden werden das Auswahlverfahren sowie die untersuchten Objekte detailliert erläutert.

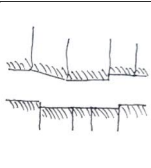
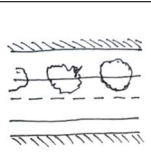
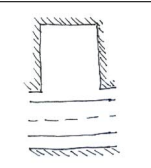
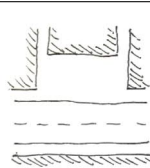
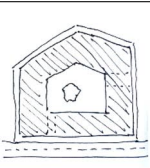
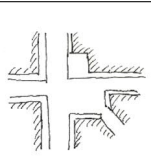
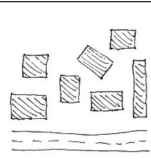
3.1 Objektauswahl

Ziel der Objektauswahl war eine Heterogenität in der späteren Erhebung der Klangraumqualität zu erreichen. Hierfür wurden aufgrund der Erfahrung der Autor*innen Annahmen zur Klangraumqualität verschiedener, zur Auswahl stehender Klangräume getroffen. Hauptparameter für die Auswahl waren die Lärmsituation, der Anteil Grünflächen, sowie die subjektiv wahrgenommene Benutzung des Klangraums. Es sollten zwei tendenziell positiv bewertete und zwei tendenziell negativ bewertete Klangräume ausgewählt werden. Lärmige, wenig frequentierte Orte mit wenig Grünflächen wurden dabei als tendenziell negativ eingestuft, leisere, mehr frequentierte Orte mit grossem Anteil Grünflächen als positiv. Zudem sollten sich die Klangräume in verschiedenen Städten der Schweiz befinden.

Grundsätzlich gilt das Projektinteresse allen Aussenräumen, die das Potenzial für die Funktion als Erholungsräume haben. Dies können Plätze, Strassen, Parkanlagen und Aussenräume von Wohnsiedlungen sein.

Alle diese Raumformen weisen ihre eigene Typologie auf, die bei einer Untersuchung der Klangräume zu berücksichtigen ist. Bei den Überlegungen zur Auswahl geeigneter Fallstudien wurde folgende Typologie angewendet (siehe Tabelle 6):

Tabelle 6: Typen von Klangräumen im Siedlungsraum

Kleine Gasse	Strassen-Korridor	«Raum-Tasche»	Vorplatz Vorhof	Innenhof	Aufgeweitete Straßenkreuzung	Block-Feld
						

Neben diesen Raumtypologien waren folgende Kriterien massgebend für die Auswahl der Untersuchungsräume:

- Art, Zeitraum und Dauer der Nutzungen

- Kaschierung durch Hintergrundlärm
- Akustische Eigenschaften der Oberflächen
- Begrünung
- Kleinteilige Strukturierung
- (Ästhetik der) Architektur
- Öffentlicher (resp. privater) Charakter der Nutzungen

Für die Fallstudien wurde die Auswahl auf mehr oder weniger geschlossene Innenhöfe gelegt. Dies hat seinen Grund in praktischen Überlegungen:

- Für die Fragestellung relevante Nutzungen wie Erholungsnutzungen (Freizeit und Spiel), die Aufenthaltsfunktion und öffentliche Nutzung resp. zumindest eine Nutzung mit (halb-)öffentlichem Charakter.
- In städtischen Wohngebieten sind diese Funktionen häufig in Innenbereichen von Baufeldern anzutreffen.
- Die Typologie des Innenhofs mit den oben genannten Nutzungen ist neben ihrer Häufigkeit für die Projektfragestellung von besonderem Interesse, da eine allseits umschlossene Raumsituation einen gewissen Schutz vor Verkehrslärm oder gewerblichen Lärm bietet.
- Zudem ist diese Raumsituation akustisch einfacher fassbar.

Es wurden daher mehr oder weniger geschlossene Innenhofsituationen mit einer halböffentlichen oder öffentlichen Nutzung für die vier Fallbeispiele ausgewählt.

Damit jedoch innerhalb dieses Samples Aussagen zu unterschiedlichen Typologien und Nutzungen gemacht werden können, wurden verschiedenartige Innenhof-Situationen untersucht. Dabei waren folgende Kriterien ausschlaggebend:

- Bauliche Geometrie (vor allem auch Geschlossenheit des Innenhofs, resp. Öffnungen)
- Innenhof-Nutzungen
- Umgebungslärm-Situation

Ausserdem wurden unterschiedliche Schweizer Städte berücksichtigt.

Die Auswahl der Fallbeispiele erfolgte im Team anhand von Steckbriefen der einzelnen Situationen. Folgende vier Fallbeispiele wurden ausgewählt:

Tabelle 7: Übersicht Messobjekte

Nr.	Objekt	Stadt	Vorbewertung
1	Zwicky-Areal	Zürich	negativ
2	Erlenmatt Ost	Basel	positiv
3	Himmelrich 3	Luzern	negativ
4	Park Humboldtstrasse	Bern	positiv

3.2 Objektbeschreibung

Die einzelnen Fallbeispiele werden im Folgenden anhand von sogenannten Objektsteckbriefen beschrieben.

3.2.1 Objekt 1: Zürich, Zwicky-Areal Ost

Lage	Am Wasser 1-46, Seidenweg 10, 12, 14, 8600 Dübendorf, Zürich
Errichtung	2012-2016; 1840: Produktionsstätte für Nähfäden und Webgarne der Zwicky & Co. AG
Bauherrschaft	Bau- und Wohngenossenschaft Kraftwerk 1, Zürich; Anlagestiftung Adimora, Zürich Anlagestiftung Turidomus, Zürich; Anlagestiftung Swiss Life, Zürich; Stiftung Altried, Zürich
Architektur/ Landschaftsarchitektur	Schneider Studer Primas, Lorenz Eugster Landschaftsarchitektur und Städtebau
Nutzung	Miet- und Eigentumswohnungen in genossenschaftlichem oder nicht genossenschaftlichem Besitz, Büro, Gewerbe, Restaurant, Dienstleistung, Hotel, Nutzfläche Miete: 33'850 m ² (299 Wohneinheiten, Gewerbe: 5'800 m ²)
Gestaltung Innenhof	Spielplatz, Kies, Sitzplätze (überdacht/frei), Velostellplätze, Bepflanzung, Materialität: Betonplatten, Stahlgerüst (Fassade), Kies, Asphalt (Hof)



Abbildung 12: Zürich: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung

Klangraumbeschreibung

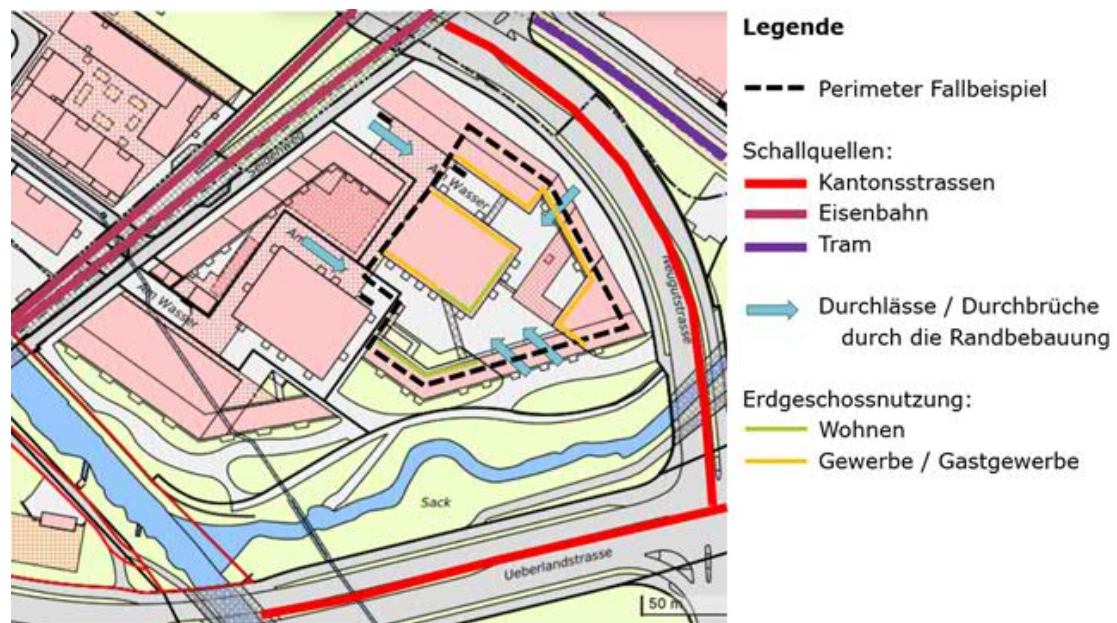


Abbildung 13: Klangraum Zürich, Zwicky-Areal Ost

3.2.2 Objekt 2: Basel, Erlenmatt Ost

Lage	Goldbachweg 2, Erlenmattstrasse 73, Signalstrasse 23, 25, 25A
Ort	4058 Basel
Material	Beton, Holz, Textilvorhänge an den Balkonen
Errichtung	2010-2019; ehemaliges Güterbahnhof-Areal der Deutschen Bahn
Bauherrschaft	Stiftung Habitat, Erlenflex Genossenschaft
Architektur/ Landschaftsarchitektur	Galli Rudolf Architekten
Nutzung	Kinderkrippe, Gewerbe, Miet- und Eigentumswohnungen
Gestaltung Innenhof	Viel Schotterrasen, Begrünung, befestigte Fusswege

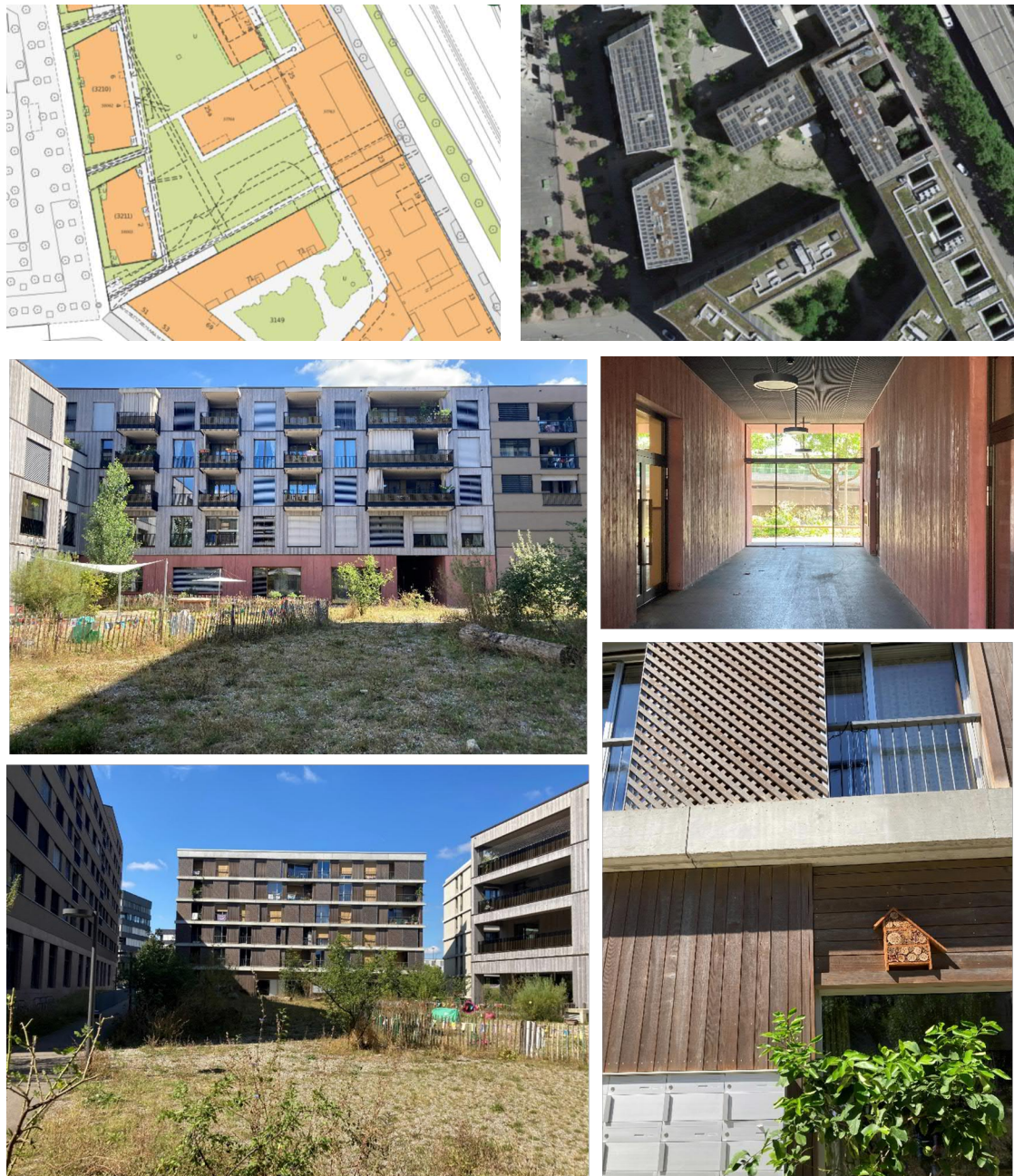


Abbildung 14: Basel: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung

Klangraumbeschreibung



Abbildung 15: Klangraum Basel, Erlenmatt Ost

3.2.3 Objekt 3: Luzern, Himmelrich 3

Lage	Claridenstrasse 1, 2, 3, 4, 5, 5A, 6, 6A, Bundestrasse 12, 14, 16, 18, Himmelrichstrasse 12, 14, 16
Ort	6003 Luzern
Material	Massivbau, Verputz, gegliederte Oberflächen
Errichtung	2016-2022
Bauherrschaft	Allgemeine Baugenossenschaft Luzern ABL
Architektur	Enzmann und Fischer Partner AG
Nutzung	Miet- und Eigentumswohnungen (254 Einheiten), Büro, Gewerbe, Café
Gestaltung Innenhof	geteerte Fläche, Wiese, Sand, Pflanzen, Sitzplätze, Fahrradstellfläche, Stall für Kleintiere



Abbildung 16: Luzern: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung

Klangraumbeschreibung

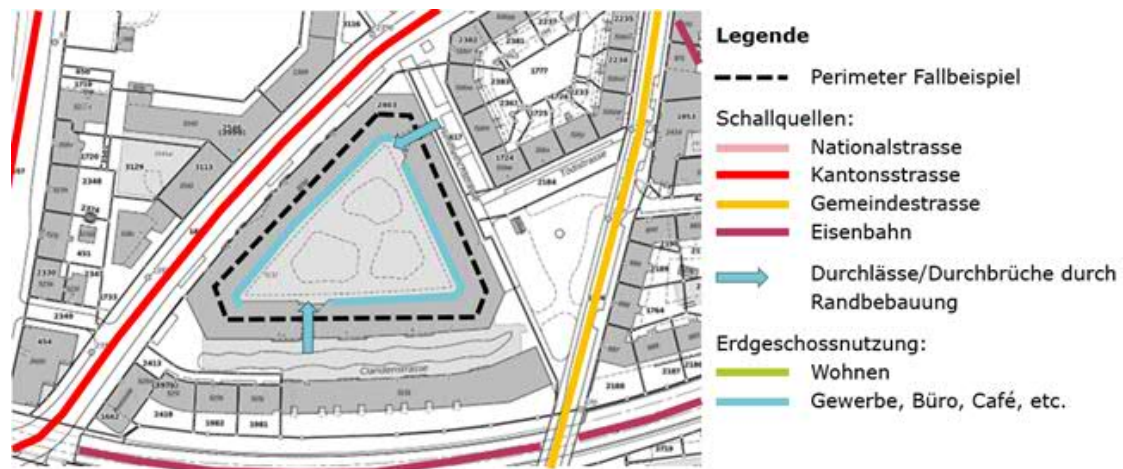


Abbildung 17: Klangraum Luzern, Himmelmich 3

3.2.4 Objekt 3: Bern, Park Humboldtstrasse

Lage	Humboldtstrasse 5, 7, 9, 11, 13, 13A, 15, 17, 19, 21, Schönburgstrasse 5, Viktoriastrasse 33, 55, 37, 39, 41, 43, 45, Blumenbergstrasse 4, 6
Ort	3013 Bern
Material	klassischer Massivbau, verputzt
Nutzung	Miet- und Eigentumswohnungen
Gestaltung Innenhof	Wiese, Sand, Mulch, Pflanzen, Kies, geteilter Weg, Spielplatz, Sportgeräte, Brunnen



Abbildung 18: Bern: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung

Klangraumbeschreibung

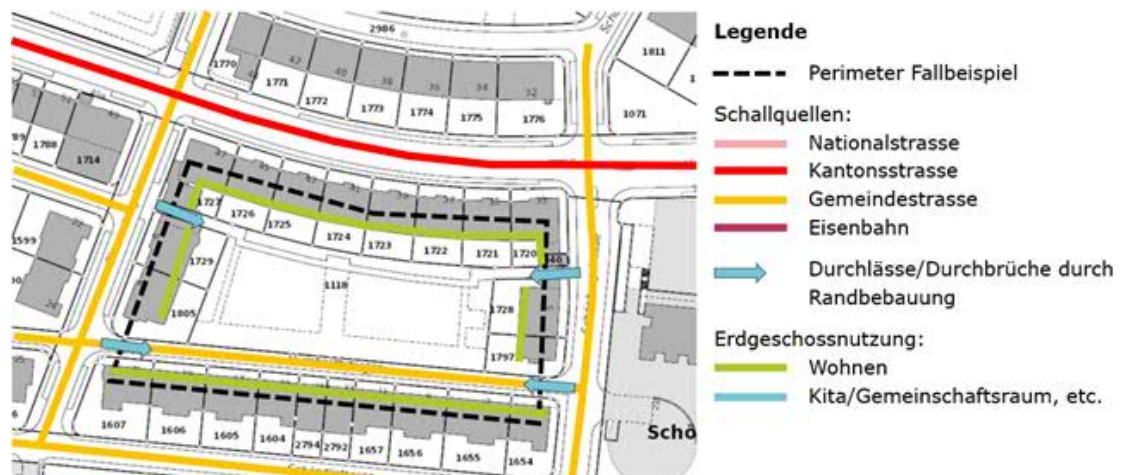


Abbildung 19: Klangraum Bern, Park Humboldtstrasse

4 Technische Datenerhebung

4.1 Methodik

Zur Vorbereitung und Orientierung vor Ort wurde ein Messprotokoll erstellt. Das Messprotokoll beinhaltet neben der Messvorbereitung eine Übersicht der Messweisen für Nachhallzeit (RT60), Sprachübertragungsindex (STI), Schalldruckpegel (SPL) und Impulsantwort sowie Informationen über die Protokollführung, den Messablauf und die Auswertung. Bei jedem Objekt wurden alle Messungen am selben Tag gemacht. Detailliertere Angaben können dem Messprotokoll im Anhang B.4 entnommen werden.

RT60

- Unterteilung in raumakustisch ähnlich eingeschätzte Teilräume
- Messung mit abschaltendem Rosa Rauschen über einen Dodekaeder
- Drei Empfängergeräte in unterschiedlichen Richtungen im Abstand von 3 m
- Jede Messung überprüfen und fehlerhafte Messungen eliminieren



Abbildung 20: Setup RT60 Luzern

SPL

- Positionierung je nach Objektgrösse an 2-4 Positionen
- 4 Messungen in folgenden Zeitfenstern:
 1. Morgen: 08:00-10:30
 2. Mittag: 11:30-13:00
 3. Nachmittag: 14:30-16:00
 4. Abend: 17:00-18:30
- Dauer: 15 min
- In 170 cm Höhe
- Zur gleichen Zeit an einer ausgewählten Position eine zusätzliche binaurale Aufnahme machen



Abbildung 21: Setup SPL Bern

STI

- Positionen bestimmen, welche sich als Treff- oder Aufenthaltsort eignen oder als solche definiert sind
- TalkBox in 1.2 m Höhe
- In 1.2 m Höhe eine Empfangsposition im Abstand 1 m (Gesprächssituation) und eine Empfangsposition im Abstand 4 m (Situation einer Drittperson)
- 8 Messwiederholungen pro Position, um verschiedene Einflüsse des Hintergrundgeräusches aufzuzeichnen



Abbildung 22: Setup STI Luzern

IR

- Selbe Positionen wie die STI-Messung
- Messung der Impulsantwort mit logarithmischem Sinus-Sweep 20 Hz - 20 kHz

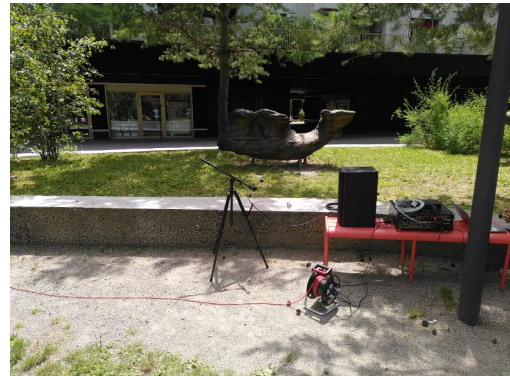


Abbildung 23: Setup Impulsantwort Luzern

Die Ausrichtung der RT60-Empfänger wurde bei allen Messpositionen eingehalten. Empfänger 1 und 2 bilden einen rechten Winkel, der Empfänger 3 steht diagonal dazu (Verlängerung des 45°-Winkels). Im Plan ist jeweils nur die Position 1 ausführlich gezeichnet. STI wurde mit einer Ausnahme (Zwicky-Areal Zürich) zweimal in die Richtung des jeweiligen Pfeils gemessen.

Die Standpunkte sind mit zwei Abständen zu ausgewählten Fassaden definiert und jeweils in einer Tabelle im Anhang ersichtlich. Die Bezugss Fassaden sind mit Grossbuchstaben gekennzeichnet.

Die gesammelten Daten dienen zur Berechnung folgender Daten:

- T20 und EDT
- Echokriterium nach Dietsch und Kraak
- Auswertung der Audioaufnahmen nach psychoakustischen Kriterien: Schärfe, Lautheit, Rauigkeit, Schwankungsstärke, Tonalität
 1. Lautstärkeüberschreitung in 5% des Zeitintervalls N5 gemäss ISO 532-1;
 2. Lautstärkeüberschreitung in 95% des Zeitintervalls N95 gemäss ISO 532-1;
 3. Kubisch gewichtete Lautheit N_{rmc} gemäss ISO 532-1;
- Stärkemass G
- L10-L90

- TFSD: time frequency second derivative
- MFCC: Mel Frequency Cepstrum Coeff.
- Spectral Slope
- Anteil Grün und Anteil Blau in Fotos
- Anteil Naturmerkmale in Fotos

Die Berechnung des Echokriteriums nach Dietsch und Kraak ergab im Bereich Sprache keine Echostörungen und wurde bei den Ergebnissen weggelassen.

Bereinigung der Daten Aus der Vorstudie ist bekannt, dass die Messungen der Nachhallzeit RT60 ungültige Daten beinhalten. Die Daten werden darum vor der Analyse bereinigt. Es gibt drei Parameter, welche die Werte eingrenzen und wenn nötig von der Datenmenge ausschliessen.

- Korrelationskoeffizient Messgerät $> 90\%$
- Obere Grenze des Messwerts: 10 s
- Untere Grenze des Messwerts: 0.4 s

Die zur Analyse gebrauchten RT60-Daten sind im weiteren Mittelwerte der bereinigten Daten und wurden vor allem bei den unteren Frequenzen aus unterschiedlich vielen Werten berechnet. Wo es keine gültigen Werte gibt, fehlen sie in der Darstellung ganz. Angaben über das Messequipment ist im Anhang B.5.

4.2 Erhebungsergebnisse

Im folgenden sind die Resultate der Messungen aller ausgewählten Klangobjekte zusammengestellt.

4.2.1 Dübendorf, Zwickyareal Ost

Wetterverhältnisse am Messtag

Datum:	04.06.2024
Wetter:	trocken, morgens bewölkt und etwas frisch mit etwas Wind, nachmittags eher sonnig und warm, kein Wind
Niederschlag:	0 mm / 9%

Sonnenstunden: 7 h
 Wind: 6 | 22 km/h
 Sonnenaufgang: 05:30
 Sonnenuntergang: 21:17

Messpositionierung

Anzahl Messpositionen:

SPL	4
RT60	6
STI	3

RT60 Messrichtungen:

Richtung 1	Quelle Richtung D
Richtung 2	Quelle Richtung E
Richtung 3	Richtung 2 + 135 Grad im UZS

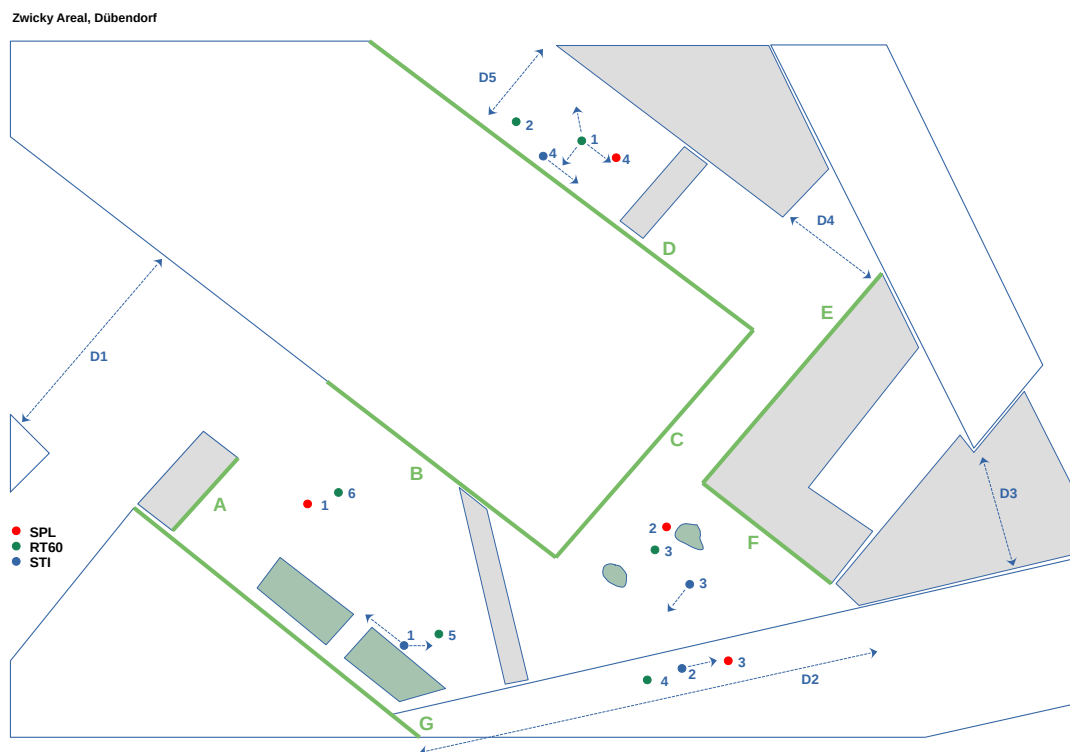


Abbildung 24: Zürich, Übersicht der Messpositionen

Schalldruckpegelmessung und binaurale Aufnahmen

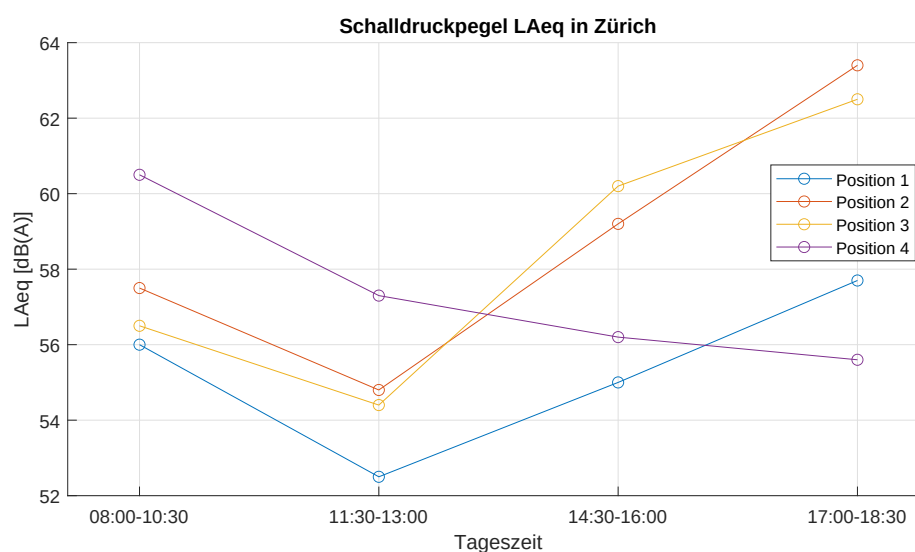


Abbildung 25: L_{Aeq} Einzelwerte zu unterschiedlichen Messzeiten

Resultate aller Messpositionen in der Übersicht:

Tageszeit	Position	L_{Aeq} [dB]	L_{Ceq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AF95} [dB]	L_{AF90} [dB]	L_{AF10} [dB]	L_{AF5} [dB]
Morgen	M1	56	64.7	83.2	51.8	52.2	56.6	57.4
	M2	57.5	66.1	60.4	55.7	55.8	58.9	59.2
	M3	56.5	67.1	74	52.4	53	58.6	59.6
	M4	60.5	67.7	75	52.4	53.6	63.8	65.4
Mittag	M1	52.5	65.1	67.2	47.9	48.5	55	56.4
	M2	54.8	64.6	72.3	49.2	50	57.1	58.4
	M3	54.4	66.9	66.2	49.8	50.6	56.5	57.5
	M4	57.3	65.2	75.2	50.2	51.4	60	61.5
Nachmittag	M1	55	65.7	75.4	48.4	49.1	56.3	59.1
	M2	59.2	67.5	80.7	51.6	52.3	60.8	63.3
	M3	60.2	69.1	82.6	52.4	53.5	60.8	63

	M4	56.2	65.8	70.8	48.3	49.3	59.2	61
Abend	M1	57.7	65.3	77.1	50.2	50.9	59	61.9
	M2	63.4	68.4	85.5	54.4	55.3	65.4	68.6
	M3	62.5	70	85	54.8	55.7	65.2	67.4
	M4	55.6	65.7	66.8	49.5	50.4	58.1	59.2

Tabelle 8: Zürich, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 4 Messpositionen

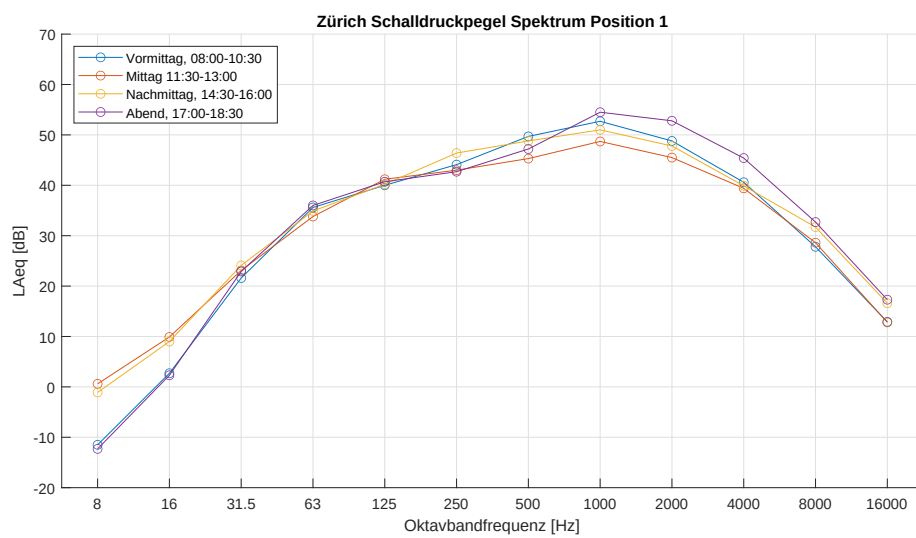


Abbildung 26: Spektrale Darstellung der LAeq-Messwerte an Position 1

Tabelle 9: Zurich Spectral Slope Tabelle

Tageszeit	Position	Spectral Slope (dB/decade)
Morgen	M1	-25.082
	M2	-22.6976
	M3	-25.6836
	M4	-21.8048
Mittag	M1	-27.2398
	M2	-23.7865
	M3	-28.02
	M4	-22.81
Nachmittag	M1	-26.1921
	M2	-21.2838
	M3	-21.8001
	M4	-24.4289
Abend	M1	-22.9904
	M2	-19.4515
	M3	-21.6361
	M4	-25.1075

Tabelle 10: Zürich, Resultate Psychoakustik

Tageszeit	Position	Lautheit [sone]	Schärfe [acum]	Rauigkeit [asper]	Tonalität [tu]
Morgen	M1	9.04	1.45	0.03	0.02
	M2	11.19	1.58	0.03	0.04
	M3	10.31	1.56	0.03	0.04
	M4	12.36	1.63	0.03	0.04
Mittag	M1	7.35	1.44	0.02	0.03
	M2	8.53	1.47	0.02	0.04
	M3	9.1	1.47	0.02	0.04
	M4	9.79	1.64	0.03	0.06
Nachmittag	M1	7.96	1.45	0.02	0.04
	M2	10.01	1.6	0.03	0.05
	M3	11.36	1.65	0.03	0.06
	M4	8.97	1.57	0.03	0.03
Abend	M1	8.87	1.56	0.02	0.09
	M2	12.38	1.93	0.03	0.14
	M3	12.79	1.8	0.03	0.19
	M4	9.2	1.49	0.03	0.05

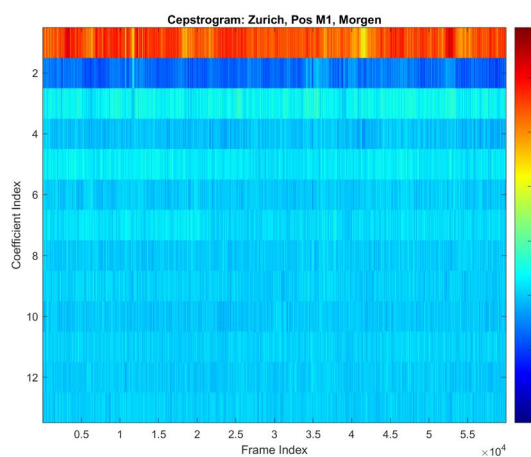


Abbildung 27: Cepstrogramm Messposition 1, Morgen

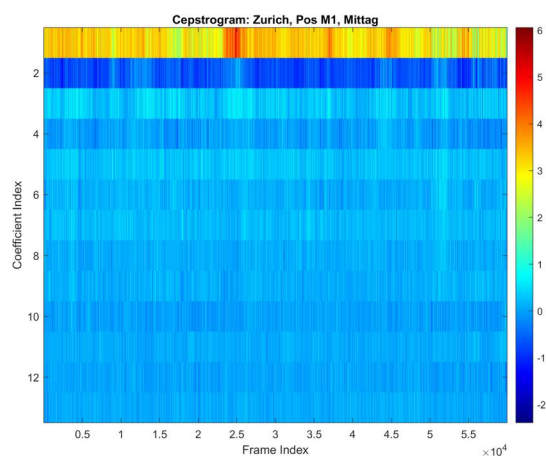


Abbildung 28: Cepstrogramm Messposition 1, Mittag

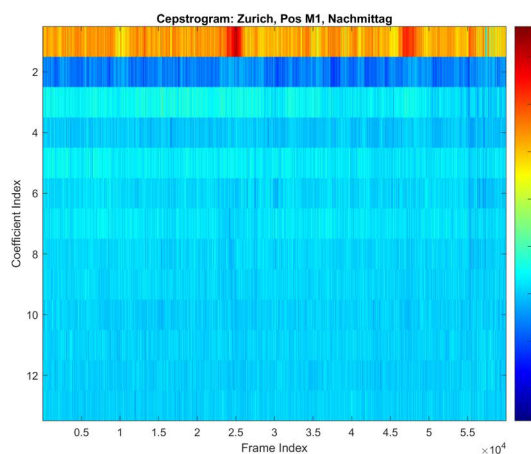


Abbildung 29: Cepstrogramm Messposition 3, Nachmittag

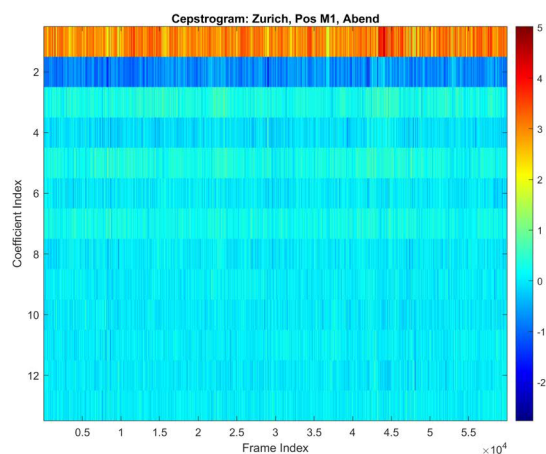


Abbildung 30: Cepstrogramm Messposition 4, Abend

Nachhallzeit RT60

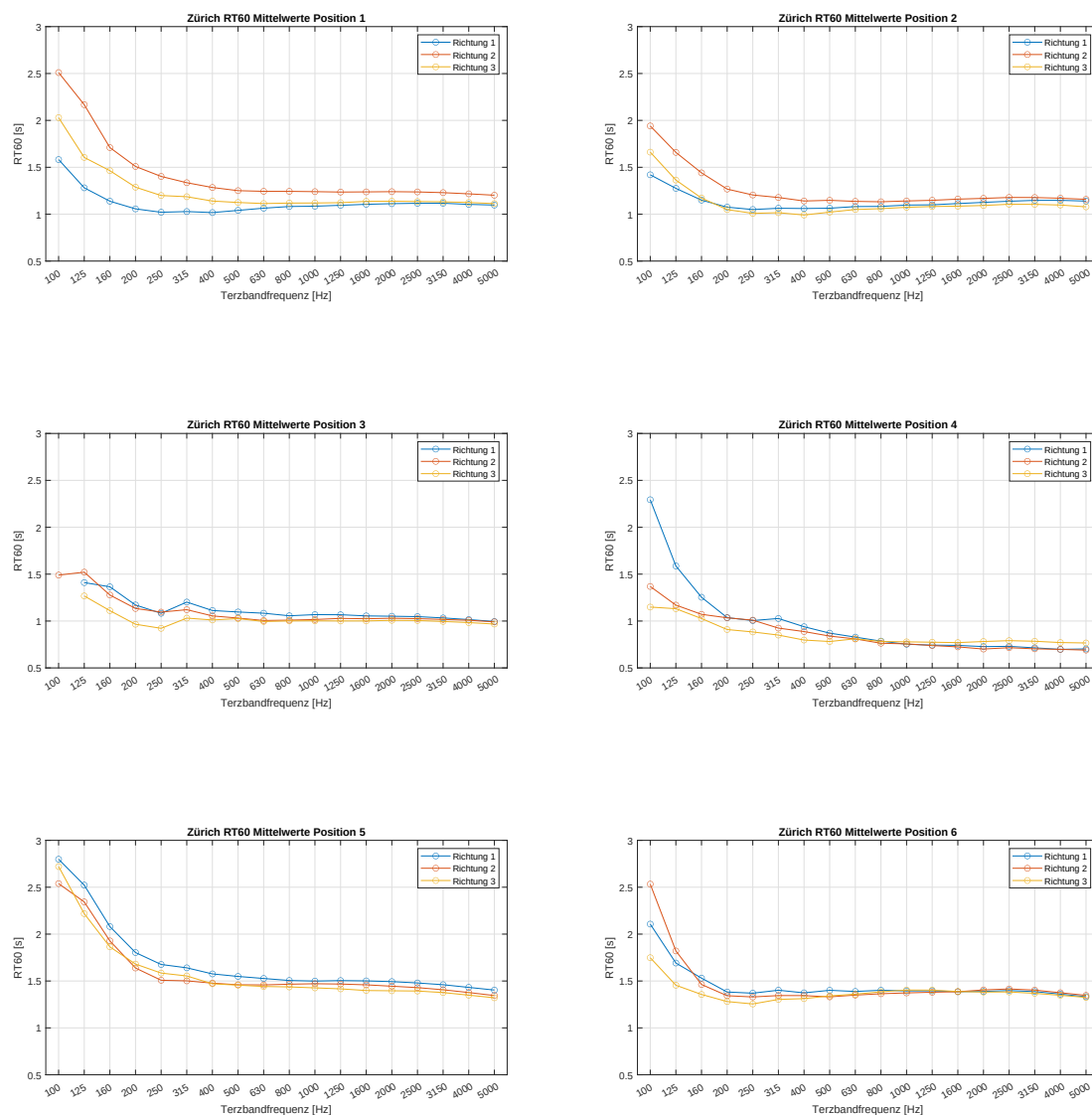


Abbildung 31: Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen

Tabelle 11: Zürich, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig

Position	Richtung	RT60 500/1000 Hz [s]	RT60 breitbandig [s]
M1	1	1.06	1.12
	2	1.25	1.42
	3	1.12	1.24
M2	1	1.08	1.13
	2	1.14	1.25
	3	1.05	1.12
M3	1	1.08	1.05
	2	1.02	1.10
	3	1.01	0.96
M4	1	0.82	0.97
	2	0.80	0.87
	3	0.79	0.85
M5	1	1.53	1.69
	2	1.47	1.60
	3	1.44	1.58
M6	1	1.39	1.45
	2	1.36	1.46
	3	1.37	1.38

Sprachübertragungsindex STI

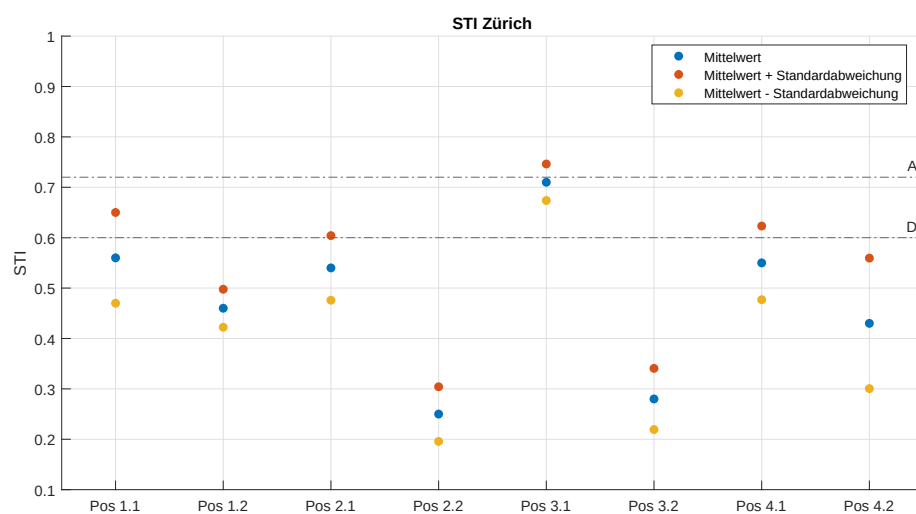


Abbildung 32: STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)

Auswertung der Impulsantwort (IR)

Tabelle 12: Zürich, EDT Werte

Position	Richtung	EDT [s]
M1	1	0.00
	2	0.01
M2	1	0.00
	2	0.01
M4	1	0.00
	2	0.06

Tabelle 13: Zürich, T20 Werte

Position	Richtung	T20 [s]
M1	1	0.04
	2	0.68
M2	1	0.04
	2	2.05
M4	1	0.11
	2	0.87

Visuelle Auswertungen

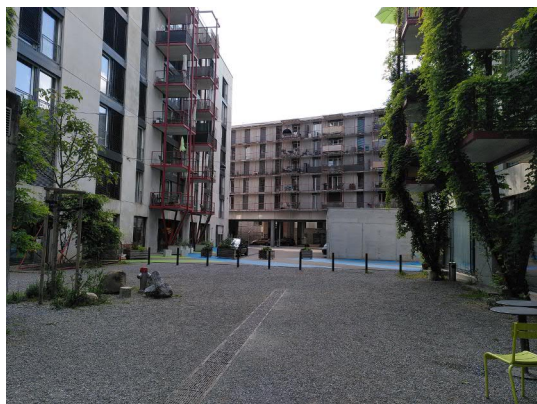


Abbildung 33: Innenhof Zürich, Original-
bild

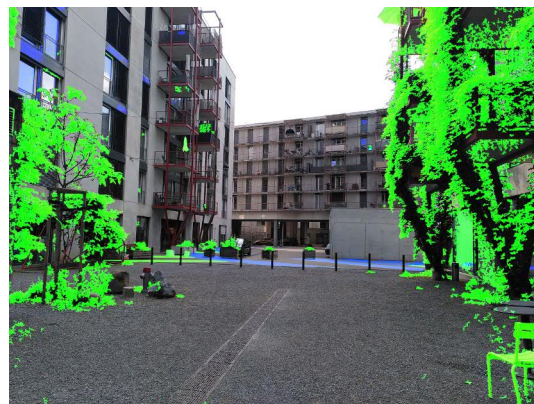


Abbildung 34: Innenhof Zürich, Bild mit
Überlagerung

Tabelle 14: Zürich, Farbanteile

Sicht	Grünanteil [%]	Blauanteil [%]
Sicht 1	16.28	1.10
Sicht 2	30.53	0.19
Sicht 3	22.96	0.05
Sicht 4	4.49	0.72
Sicht 5	4.78	0.04

Auswertung nach Cercle Bruit Im Folgenden ist das durch die Messperson ausgefüllte Formular des Cercle Bruit zu finden. Die Note für diesen Klangraum ist 3.0.

Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorten im Siedlungsraum Rev. 2023 V.01

Ortlichkeit: Platz / Park / Innenhof	Stadt / Ort	Standort	Datum	Zeit von – bis	Koordinaten	Nutzung	Wetter	t [°C]	dB(A)	Visum
Innenhof	Zürich	Zürich - Areal	09.06.2024	08:30-17:30	47.403944 8.665435	Innere	Sonnig bewölkt	12-23	52-63	M

negative Merkmale	na = nicht anwendbar →	--	-	0 / na	+	++	positive Merkmale	konkrete Feststellungen
Hauptkriterien								
Wirkt der Ort, insbesondere im Vergleich zur Umgebung, (ohne Nutzungsgeräusche) laut, z.B. wegen einem hohen Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gewerbelärm?		X		0			Wirkt der Ort (ohne Nutzungsgeräusche) im Vergleich zur Umgebung, ruhig, z. B. dank tiefem Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gewerbe-Lärm?	Stresser, Flugzeuge, Eisenbahn
Überwiegen technische Geräusche (Verkehrs-, Industrie- und Gewerbe-/Anlagen-/Freizeitlärm), und verdecken die natürlichen Geräusche? Sind starke Störgeräusche zu hören?		X		0			Überwiegen natürliche (von Vögeln, Insekten, Wasser, Wind, Laub, ...) oder archaische Geräusche (Glocken, Wasserräder ...), oder dezente Menschenstimmen?	wenig Naturgeräusche, viel Straßenlärm
Erscheint die Geräuschkulisse zeitlich konstant, uninteressant, eintönig, auf die Dauer (-) oder sogar bereits kurzfristig (-)?		X		0			Bilden vielfältige positiv empfundene (d.h. natürliche oder archaische) Geräusche oder dezente Menschenstimmen eine abwechslungsreiche Klanglandschaft?	monoton
Zwingt der hohe Grundpegel zu lauterem Sprechen oder gar zu verkürzter Kommunikation? Oder fehlt wegen Reflexionen die Privatsphäre (Gespräch weitum verständlich)?				0	X		Erlaubt der tiefe oder moderate Grundpegel ohne Einschränkung differenzierte Gespräche mit müheloser Verständlichkeit, aber auch mit Privatsphäre?	überwiegend gut, Dank Lärm, gute Privatsphäre
Bewirken Nutzungen (z.B. Fussball oder andere Spiele, aber auch Bewegungen von Metalltönen an Eisenketten) für andere Besucher wiederholt starke Störungen?		X		0			Verursachen Nutzungen (z.B. Verschleiben von Sitzgelegenheiten; Fussballspielen etc.) höchstens diskrete Geräusche? (gedämpfte Fussballschläger ++)	Spieleplatz und Stühle
Verstärken Reflexionen hinter Lärmquellen deren Lärm? Erzeugen Spiegelreflexionen an glatten Flächen Echoes? Verursachen parallele/konkave reflektierende Flächen (Flatter-)Echoes oder ein "Singen"? Stört die Halligkeit?				X			Schirmen Hindernisse den Lärm von aussen ab? Sind grosse reflektierende Flächen in Tiefe oder Ausrichtung gebrochen und vermeiden unnatürliche Echoes? Wird Halligkeit durch Absorption gemildert?	unauffällig
Können Geräusche, z.B. von Motorfahrzeugen, wegen Reflexionen nicht korrekt geortet werden? Erlaubt ein offener Platz das Hören auf Distanz trotzdem nicht?				X			Werden Geräuschquellen korrekt geortet ("Ich höre es, wo ich es sehe" → Sicherheitsgefühl)? Hört man (auf offenen Plätzen) nahe und ferne Quellen?	teilweise Hören, teilweise nicht
Detaillkriterien								
Stört ein penetrantes Wassergeräusch am bevorzugten Aufenthaltsort auf die Dauer (-)? Beeinträchtigt es gar an bevorzugten Aufenthaltsorten die differenzierte Sprachkommunikation und zwingt zu lauterem Sprechen (-)?				X			Er klingt ein moduliertes Wassergeräusch (Bach, Brunnen, Wasserspiel ++)? Oder ein gleichförmiges Rauschen (Kanal, +)? Bewirkt es eine "Umdeutung" oder Maskierung von Verkehrs- o. B. Lärm ++)?	keine Wasserquelle/-geräusche
Verdrängen installierte Schallquellen (z.B. auch Musik aus Lautsprecheranlagen) den Besucher an sonst weniger attraktive Zonen des Ortes oder an andere Orte?				X			Bringen spezielle Schallquellen im Klangraum (z. B. von Installationen) eine (zeitweise) Bereicherung der Klanglandschaft und ziehen Besucher an?	-
Können am Ort eklatante Störungen der Ruhe vor, wie z. B. ein den Platz querendes Motorrad, laute Flugzeuge etc., (-) und zwingen zur Gesprächsunterbrechung (-)?		X		0			Sind eklatante Ruhestörungen unwahrscheinlich oder höchst selten (ausser Kommunalfahrzeuge im Schritttempo für die Reinigung des Ortes)?	keine Ruhe und Motorrad bei Angel

Abbildung 35: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1

Bonus-Kriterien	0	+	++		
Bleibt die Klanglandschaft über den ganzen Raum unverändert, d.h. der Besucher kann sie durch die Wahl seines Standorts nicht beeinflussen (0)?	Klangraum nach Wahl				Varliert die Klanglandschaft mit dem Standort und kann so beeinflusst werden (+)? Bietet der Raum mehrere unterschiedliche Klangräume (++)?
Ist die Klanglandschaft austauschbar oder ist der Ort akustisch (z.B. in einer Tonaufnahme) nicht oder nur anhand negativer Merkmale zu identifizieren (0)?	Einzigartigkeit, Identifizierbarkeit				Erkenne ich den Klangraum an der Zusammensetzung der Geräuschkulisse oder an positiven Soundmarks (für den Ort charakteristische Klänge)?

Gesamtbeurteilung der akustischen Erholungsqualität						Expertenurteil: akustische Erholungsqualität	
	--	-	na/0	+	++		
Anzahl der Bewertungen in der jeweiligen Stufe	3 x (-2)	2 x (-1)	4 x 0	1 x 1	1 x 2	Q	Gesamturteil - Gründe für Abweichung Note zu Q
Summe Negativpunkte / Summe Positivpunkte	Σ: 8	0	Σ: 3			25	Note 1-6
Summe Negativpunkte + Summe Positivpunkte	Σ- + Σ+ = 5			(Σ+20)/6 = Q			

Verbesserungspotenzial bei der akustischen Erholungsqualität	
Wichtigste Schwäche(n) des Ortes in der Klangqualität	Lärm von allen Seiten
Wichtigste Stärke(n) des Ortes in der Klangqualität	Grünbereich, Spielplatz, bewusste Eckon
Verbesserungspotenzial (bei welchen Kriterien?)	Lärmschutz
Verbesserungsmassnahme(n) konkret (Vorschlag)	Verkleinern oder Schliessen von Öffnungen, Pufferzone einbauen



Abbildung 36: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2

4.2.2 Basel, Erlennmatt Ost

Wetterverhältnisse am Messtag

Datum: 11.06.2024

Wetter: trocken, morgens bewölkt und etwas frisch mit etwas Wind, mittags eher sonnig und warm, nachmittags wechselhafte Temperatur

Temperatur: min. 10°C, max. 18°C

Niederschlag: 0 mm / 0 %

Sonnenstunden: 3 h

Wind: 4 | 18 km/h

Sonnenaufgang: 05:32

Sonnenuntergang: 21:27

Messpositionierung

Anzahl Messpositionen:

SPL 2

RT60 6
STI 3

RT60 Messrichtungen:

Richtung 1 Quelle Richtung A
Richtung 2 Quelle Richtung B
Richtung 3 Richtung 2 + 135 Grad im UZS

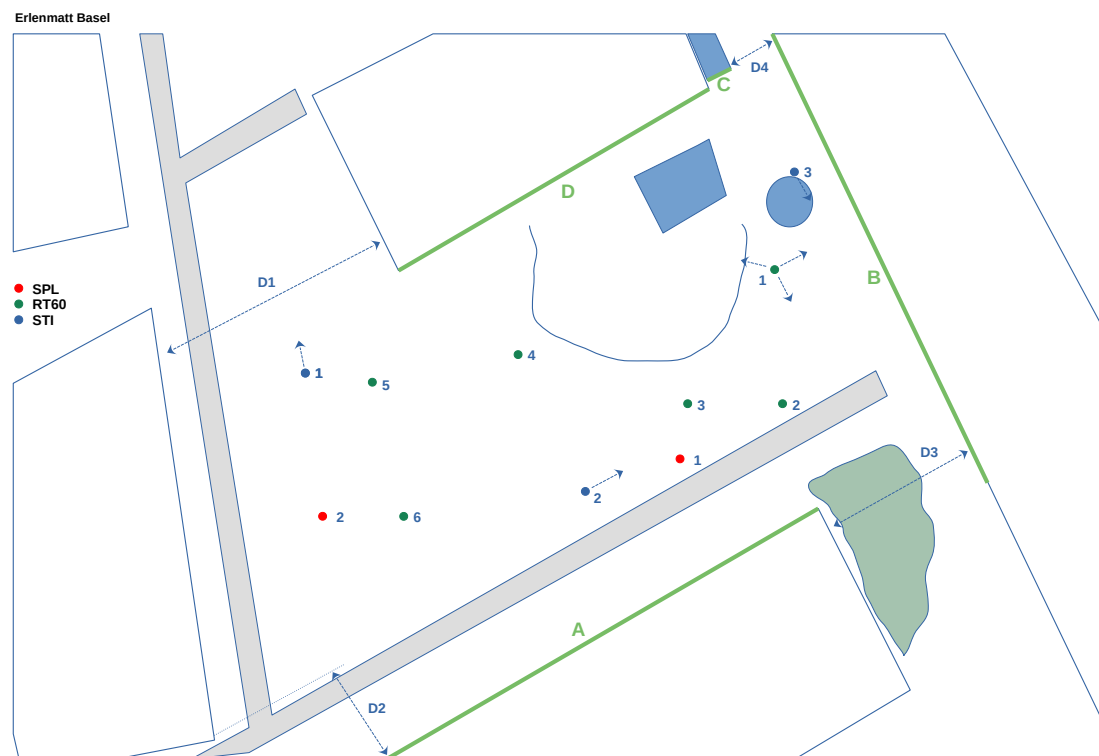


Abbildung 37: Basel, Übersicht der Messpositionen

Schalldruckpegelmessung und binaurale Aufnahmen

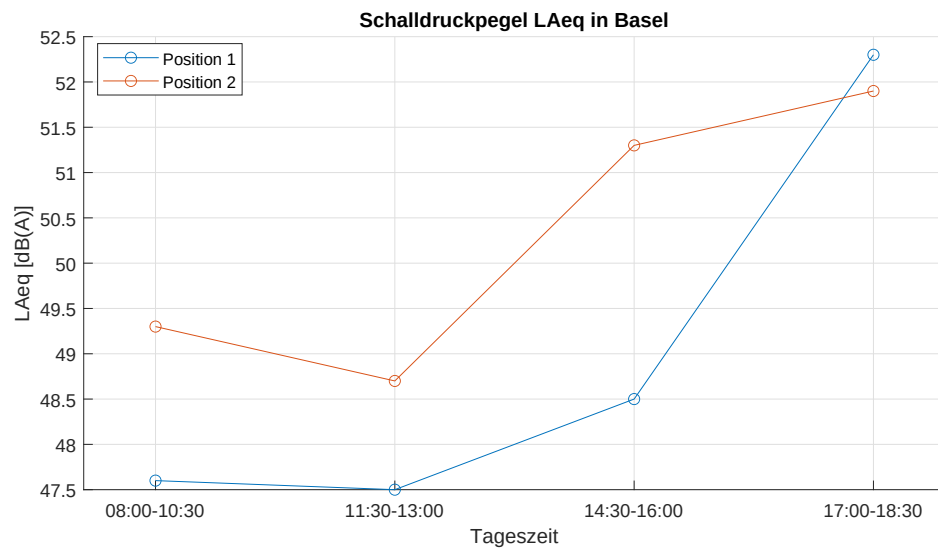


Abbildung 38: L_{Aeq} Einzelwerte zu unterschiedlichen Messzeiten

Resultate aller Messpositionen in der Übersicht:

Tageszeit	Position	L_{Aeq} [dB]	L_{Ceq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AF95} [dB]	L_{AF90} [dB]	L_{AF10} [dB]	L_{AF5} [dB]
Morgen	M1	47.6	61.3	61.3	41.5	42	51.2	52.6
	M2	49.3	62.2	62.7	40.9	41.4	53.5	55.6
Mittag	M1	47.5	67	61.9	42.6	43.2	50.5	51.9
	M2	48.7	65.6	63	41.8	42.6	52.1	54.5
Nachmittag	M1	48.5	61.7	64.5	43.5	44	51.2	52.7
	M2	51.3	63	73.9	43.3	44	54.4	56.4
Abend	M1	52.3	61.8	70.8	44.8	45.5	54.9	56.8
	M2	51.9	62.2	68	44.7	45.3	55.1	57.1

Tabelle 15: Basel, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 2 Messpositionen

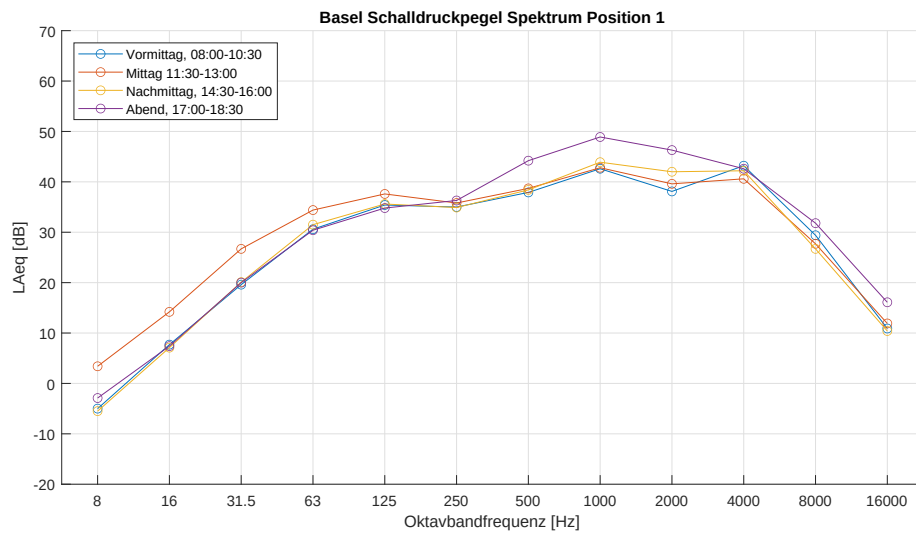


Abbildung 39: Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1

Tabelle 16: Basel Spectral Slope Tabelle

Tageszeit	Position	Spectral Slope (dB/decade)
Morgen	M1	-25.4752
	M2	-24.3733
Mittag	M1	-27.9144
	M2	-26.1406
Nachmittag	M1	-25.7585
	M2	-24.3978
Abend	M1	-24.78
	M2	-24.4358

Tabelle 17: Basel, Resultate Psychoakustik

Tageszeit	Position	Lautheit [sone]	Schärfe [acum]	Rauigkeit [asper]	Tonalität [tu]
Morgen	M1	4.74	1.65	0.02	0.08
	M2	4.43	1.59	0.01	0.06
Mittag	M1	4.86	1.44	0.02	0.04
	M2	4.7	1.46	0.02	0.04
Nachmittag	M1	5.48	1.5	0.02	0.1
	M2	5.32	1.51	0.02	0.1
Abend	M1	6.31	1.55	0.02	0.12
	M2	5.55	1.47	0.02	0.11

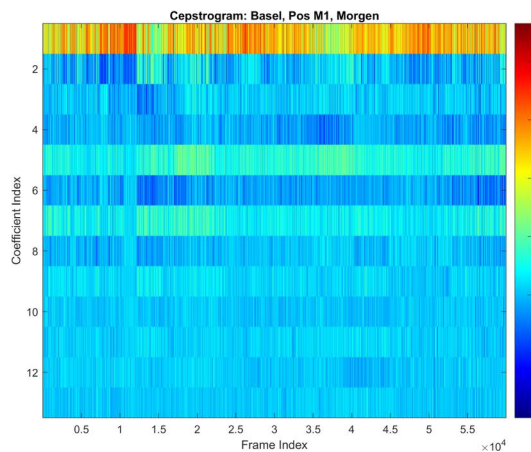


Abbildung 40: Cepstrogram Messposition 1, Morgen

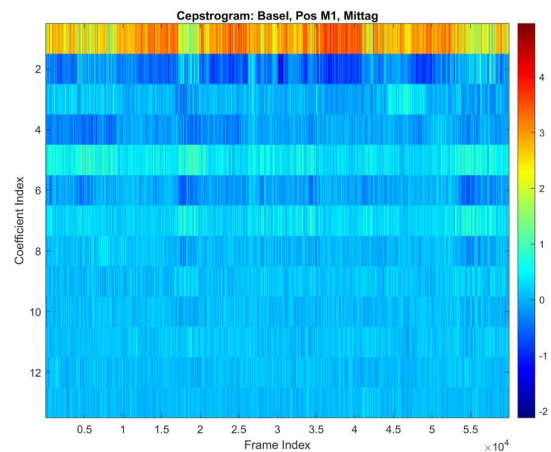


Abbildung 41: Cepstrogram Messposition 1, Mittag

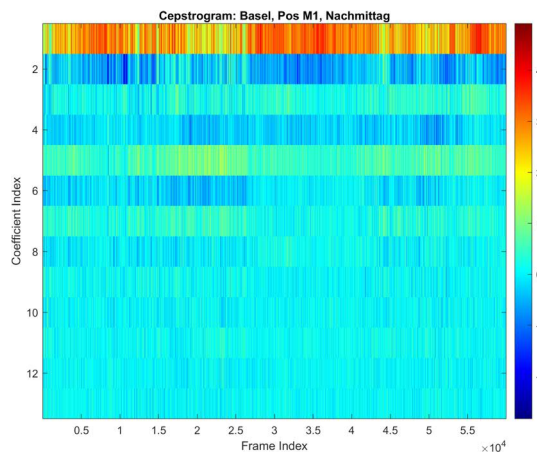


Abbildung 42: Cepstrogram Messposition 1, Nachmittag

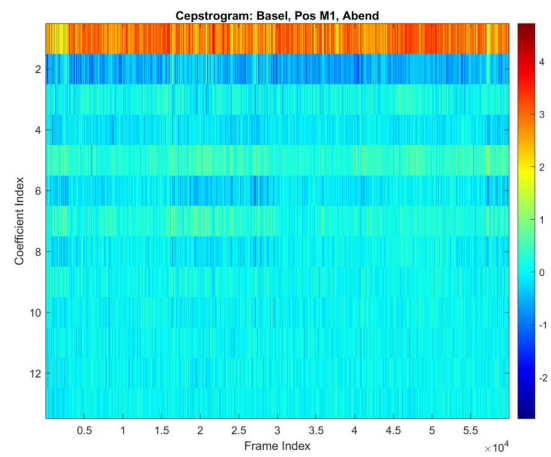


Abbildung 43: Cepstrogram Messposition 1, Abend

Nachhallzeit RT60

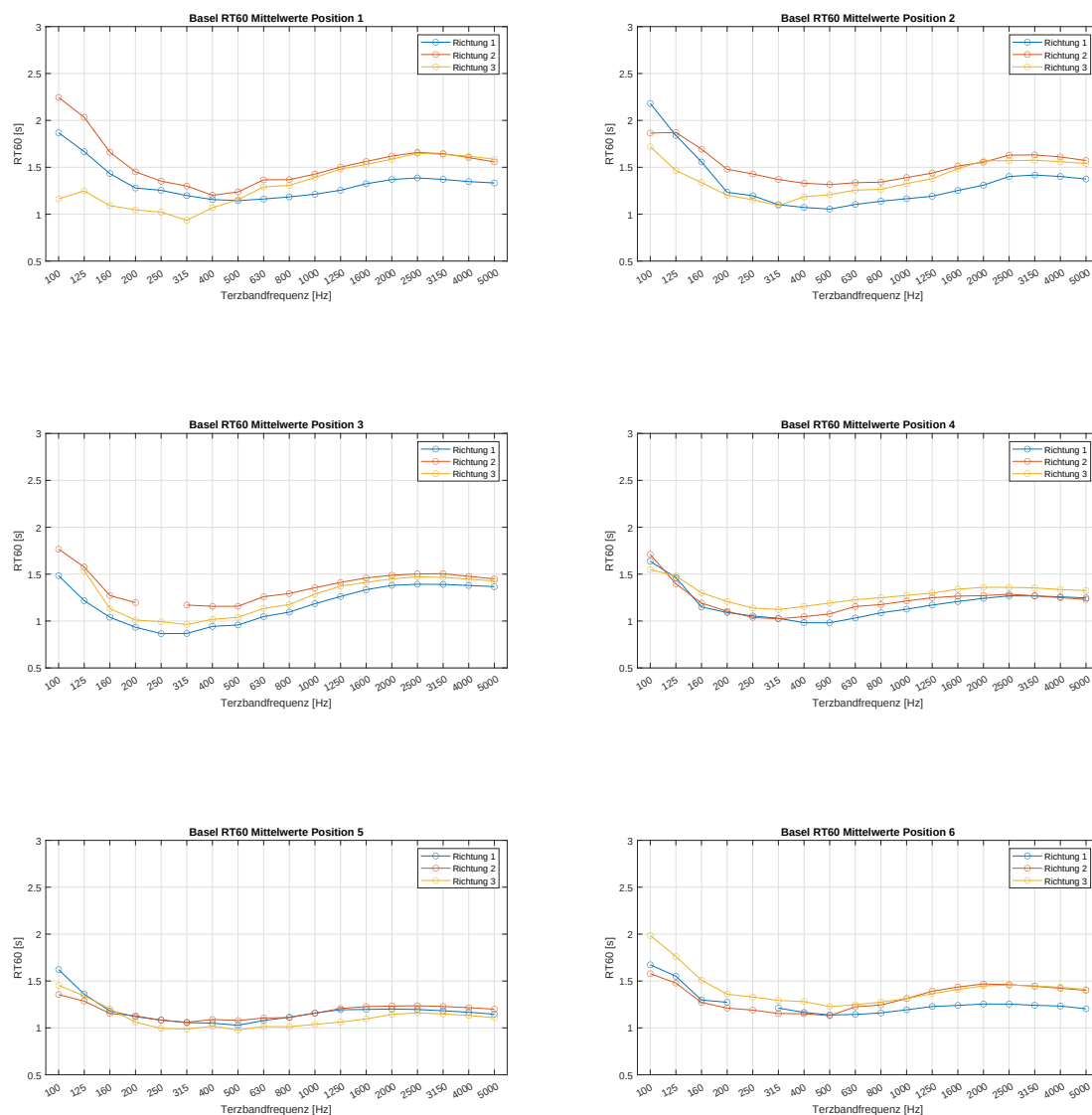


Abbildung 44: Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen

Tabelle 18: Basel, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig

Position	Richtung	RT60 500/1000 Hz [s]	RT60 breitbandig [s]
M1	1	1.19	1.33
	2	1.35	1.54
	3	1.28	1.32
M2	1	1.12	1.33
	2	1.36	1.52
	3	1.27	1.38
M3	1	1.08	1.17
	2	1.27	1.31
	3	1.17	1.19
M4	1	1.06	1.18
	2	1.15	1.22
	3	1.23	1.29
M5	1	1.10	1.17
	2	1.12	1.18
	3	1.02	1.11
M6	1	1.17	1.19
	2	1.24	1.33
	3	1.28	1.42

Sprachübertragungsindex STI

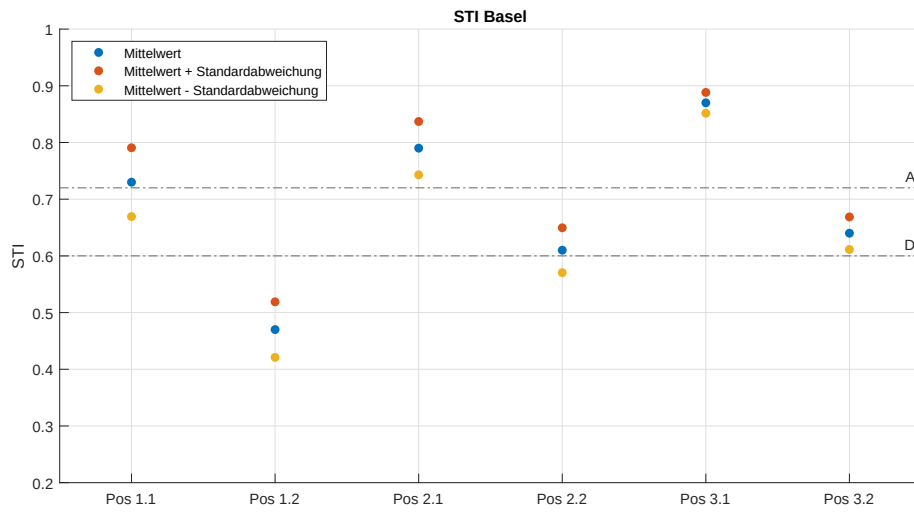


Abbildung 45: STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)

Auswertung der Impulsantwort (IR)

Tabelle 19: Basel, EDT Werte

Position	Richtung	EDT [s]
M1	1	0.00
	2	0.01
M2	1	0.00
	2	0.02
M3	1	0.04
	2	0.06

Tabelle 20: Basel, T20 Werte

Position	Richtung	T20 [s]
M1	1	0.03
	2	0.53
M2	1	0.03
	2	1.16
M3	1	0.06
	2	0.226

Visuelle Auswertungen



Abbildung 46: Innenhof Basel, Originalbild



Abbildung 47: Innenhof Basel, Bild mit Überlagerung

Tabelle 21: Basel, Farbanteile

Sicht	Grünanteil [%]	Blauanteil [%]
Sicht 1	35.72	13.78
Sicht 2	18.91	0.35
Sicht 3	17.64	0.02
Sicht 4	20.28	2.45
Sicht 5	16.85	0.61

Auswertung nach Cercle Bruit Im Folgenden ist das durch die Messperson ausgefüllte Formular des Cercle Bruit zu finden. Die Note für diesen Klangraum ist 5.0.

Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorte im Siedlungsraum Rev. 2022 V.02

Örtlichkeit: Platz / Park / Hof	Stadt / Ort	Standort	Datum	Zeit von – bis	Koordinaten	Nutzung	Wetter	t [°C]	dB(A)	Visum
Innenhof	Basel	Erlenmatt Ost	04.06.2024	09.00-18.30	47.57072520245019 7.602571245210459	Erholung, Spielen				

negative Merkmale	na = nicht anwendbar →	--	-	0 / na	+	++	positive Merkmale	konkrete Feststellungen	
Hauptkriterien									
Wirkt der Ort, insbesondere im Vergleich zur Umgebung, (ohne Nutzungsgeräusche) laut , z.B. wegen einem hohen Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gewerbelärm?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Allgemeine Situation, Ruhe Wirkt der Ort (ohne Nutzungsgeräusche), besonders im Vergleich zur Umgebung, ruhig , z.B. dank tiefem Grundpegel von Verkehrs- oder Indus./Gew.-Lärm?			Innenhof und Überbauung Nähe von Autobahn und Zug, trotzdem angenehm
Überwiegen technische Geräusche (Verkehrs-, Industrie- und Gewerbe-/Anlagen-/Freizeitlärm), und verdecken die natürlichen Geräusche? Sind starke Störöne zu hören?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Vorherrschende Geräusche Überwiegen natürliche (z.B. von Vögeln, Insekten, Wasser, Wind, Laub, Nutztieren, ...) oder "archaische" Geräusche (Glocken, Wasserräder ...)?			Grundpegel von Autobahn immer hörbar, Vogel sind lauter
Erscheint die Geräuschlandschaft zeitlich konstant , uninteressant , eintönig , auf die Dauer (–) oder sogar bereits kurzfristig (– –)?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Geräuschvielfalt – Klangvielfalt Kommen am Ort vielfältige positiv empfundene (d.h. natürliche oder archaische) Geräusche vor und bilden eine abwechslungsreiche Geräuschlandschaft?			Eher konstant, wenn dann menschliche Gespräche aufgrund der Bewohner
Zwingt der hohe Grundpegel zu lauterem Sprechen oder gar zu verkürzter Kommunikation? Oder fehlt wegen Reflexionen die Privatsphäre (Gespräch weitum verständlich)?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Kommunikationsfreundlichkeit Erlaubt der tiefe oder moderate Grundpegel ohne Einschränkung differenzierte Gespräche mit mühe- loser Verständlichkeit , aber auch mit Privatsphäre ?			Differenzierte Gespräche gut möglich
Bewirken Nutzungen (z.B. Fussball oder andere Spiele, aber auch Bewegungen von Metallstühlen an Eisenketten) für andere Besucher wiederholt starke Störungen ?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Akustische Nutzungsverträglichkeit Verursachen Nutzungen (z.B. Verschieben von Sitzgelegenheiten; Fussballspielen etc.) höchstens diskrete Geräusche? (gedämpfte Fussballgitter ++)?			Trotz Behindertenheim und Kinder sind die Geräusche gut erträglich
Verstärken Reflexionen hinter Lärmquellen deren Lärm? Erzeugen Spiegelflexionen an glatten Flächen Echos ? Verursachen parallele/konkave reflektierende Flächen (Flatter)-Echos oder ein "Sirren"? Stört die Halligkeit ?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Schallausbreitung und Reflexionen (Test z.B. mit Klatschen) Schirmen Hindernisse den Lärm von aussen ab? Sind grosse reflektierende Flächen in Tiele oder Ausrichtung gebrochen und vermeiden unnatürliche Echos? Wird Halligkeit durch Absorption gemildert?			Kaum Halligkeit, Innenhof ist auch gut abgeschirmt
Können Geräusche, z.B. von Motorfahrzeugen, wegen Reflexionen nicht korrekt geortet werden? Erlaubt ein offener Platz das Hören auf Distanz trotzdem nicht?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Ortung in Richtung und Distanz Werden Geräuschquellen korrekt geortet ("Ich höre es, wo ich es sehe" → Sicherheitsgefühl)? Hört man (auf offenen Plätzen) nahe und ferne Quellen ?			Unterschiedlich
Detaillkriterien									
Stört ein penetrantes Wassergeräusch am bevorzugten Aufenthaltsort auf die Dauer (–)? Beeinträchtigt es gar an bevorzugten Aufenthaltsorten die differenzierte Sprach- kommunikation und zwingt zu lauterem Sprechen (– –)?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Wassergeräusche Er klingt ein moduliertes Wassergeräusch (Bach, Brunnen, Wasserspiel ++)? Oder ein gleichförmiges Rauschen (Kanal, +)? Bewirkt es eine " Umdeutung " oder Maskierung von Verkehrs- o. ä. Lärm (++)?			Es gibt keine Wassergeräusche
Verdrängen installierte Schallquellen (z.B. auch Musik aus Lautsprecheranlagen) den Besucher an sonst weniger attraktive Zonen des Ortes oder an andere Orte?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Spezielle Schallquellen Bringen spezielle Schallquellen im Klangraum (z. B. von Installationen) eine (zeitweise) Bereicherung der Klanglandschaft und ziehen Besucher an?			Es gibt keine zusätzliche Schallquellen
Kommen am Ort eklatante Störungen der Ruhe vor, wie z. B. ein den Platz querendes Motorrad, laute Flugzeuge etc., (–) und zwingen zur Gesprächsunterbrechung (– –)?			☐ -- ☐ - ☐ 0 ☐ + ☐ ++			Sicherheit vor starken Störungen Sind eklatante Ruhestörungen unwahrscheinlich oder höchst selten (ausser Kommunalfahrzeuge im Schritttempo für die Reinigung des Ortes)?			Ruhestörung durch Autobahn nicht eklatant

Abbildung 48: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1

Bonus-Kriterien	0	+	++		
Bleibt die Klanglandschaft über den ganzen Raum unverändert , d.h. der Besucher kann sie durch die Wahl seines Standorts nicht beeinflussen (0)?	Klangraum nach Wahl 0	☐	☐	Variert die Klanglandschaft mit dem Standort und kann so beeinflusst werden (+)? Bietet der Raum mehrere unterschiedliche Klangräume (++)?	Es gibt Nischen, Ecken und offene Plätze
Ist die Klanglandschaft austauschbar, ist der Ort akustisch (z.B. in einer Tonaufnahme) nicht oder nur anhand negativer Merkmale zu identifizieren (0)?	Einzigkeit, Identifizierbarkeit 0	☐	☐	Erkenne ich den Klangraum an der Zusammensetzung der Geräuschlandschaft oder an positiven Soundmarks (für den Ort charakteristische Klänge)?	Nichts Spezielles oder positives erkennbar

Gesamtbeurteilung der akustischen Erholungsqualität						
	--	-	na/0	+	++	
Anzahl der Bewertungen in der jeweiligen Stufe	x(-2)	1 x(-1)	5 x0	4 x1	2 x2	Q
Summe Negativpunkte / Summe Positivpunkte	Σ-	-1	0	Σ+ 8		
Summe Negativpunkte + Summe Positivpunkte	Σ- + Σ+ = Σ →	7		(Σ+20)/6 = Q →	4.5	

Expertenurteil: akustische Erholungsqualität	
Gesamturteil – Gründe für Abweichung Note zu Q	Note 1– 6
Die Atmosphäre im Hof ist grundsätzlich angenehm, Grundgeräusche sind gut ertragbar, menschlicher Lärm wird zu einem grossen Teil absorbiert	5

Verbesserungspotenzial bei der akustischen Erholungsqualität	
Wichtigste Schwäche(n) des Ortes in der Klangqualität	Neben Autobahn
Wichtigste Stärke(n) des Ortes in der Klangqualität	Viele Vögel erzeugen Naturgeräusche
Verbesserungspotenzial (bei welchen Kriterien?)	Schwierig etwas zu verändern, da die Lage gegeben ist
Verbesserungsmassnahme(n) konkret (Vorschlag)	Öffnungen Richtung Autobahn schliessen

Hier Smartphone-Panoramabild einfügen

Abbildung 49: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2

4.2.3 Luzern, Himmelrich 3

Wetterverhältnisse am Messtag

Datum: 17.06.2024

Wetter: trocken, morgens sonnig und warm,
nachmittags etwas windig und bewölkt

Temperatur: min. 14°C, max. 24°C

Niederschlag: 0.2 mm / 66 %

Sonnenstunden: 3 h

Wind: 4 | 22 km/h

Sonnenaufgang: 05:30

Sonnenuntergang: 21:24

Messpositionierung

Anzahl Messpositionen:

16. Februar 2026

69 von 176

SPL	4
RT60	4
STI	4

RT60 Messrichtungen:

Richtung 1	Quelle Richtung C
Richtung 2	Richtung 1 + 90 Grad im Gegen-UZS
Richtung 3	Richtung 1 + 135 Grad im UZS

Himmelrich Luzern

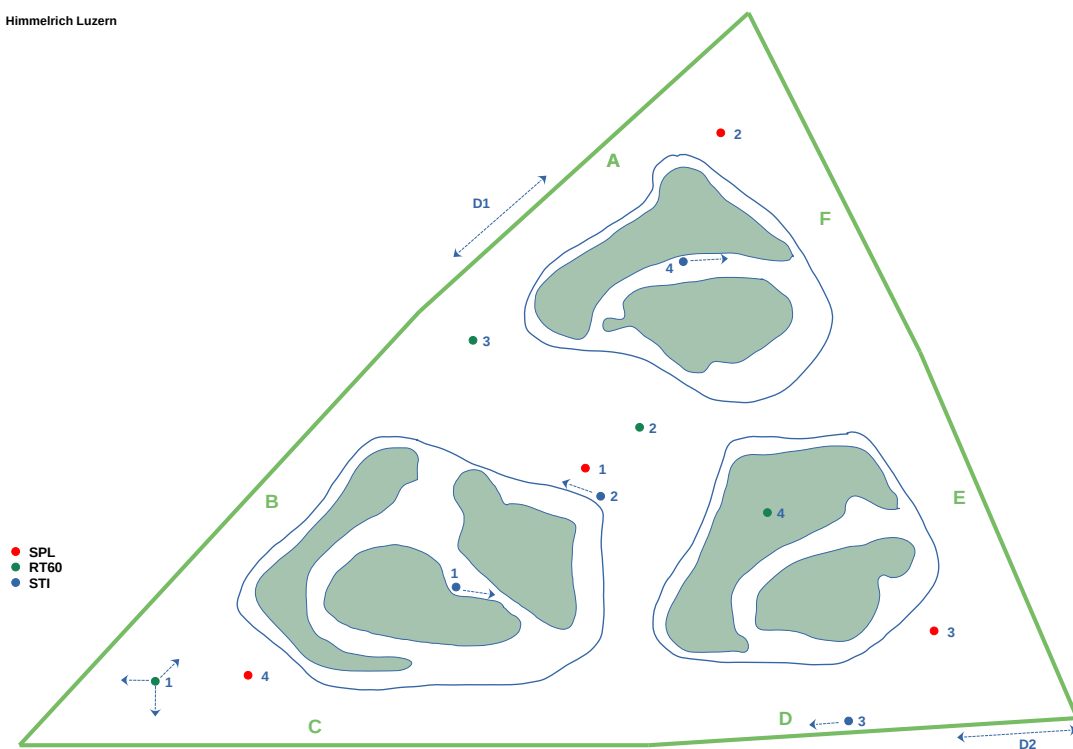


Abbildung 50: Luzern, Übersicht der Messpositionen

Schalldruckpegelmessung und binaurale Aufnahmen

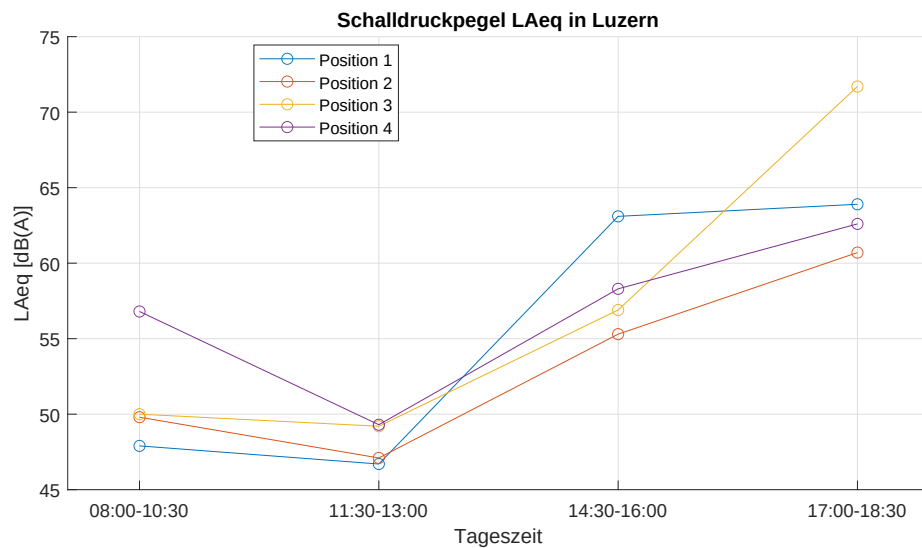


Abbildung 51: L_{Aeq} Einzelwerte bei unterschiedlichen Messzeiten, Himmelrich 3 Luzern

Resultate aller Messpositionen in der Übersicht:

Tageszeit	Position	L_{Aeq} [dB]	L_{Ceq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AF95} [dB]	L_{AF90} [dB]	L_{AF10} [dB]	L_{AF5} [dB]
Morgen	M1	47.9	57.2	59.5	38.5	39.9	51.1	53.2
	M2	49.8	59.5	65.6	41.2	42.3	54.7	56.3
	M3	50	57.6	60.7	38.1	40	54.2	55.1
	M4	56.8	66.5	70.1	37.5	38.8	61.5	66
Mittag	M1	46.7	53.9	64.7	38.6	39.5	49.7	51.9
	M2	47.1	54.7	60.3	41.1	42.1	49.6	51.1
	M3	49.2	55.9	66.8	40.3	41.5	52.2	53.7
	M4	49.3	55.4	69	40.9	42.1	51.9	53.5
Nachmittag	M1	63.1	66.7	85.4	49.6	50.9	65.1	68.3
	M2	55.3	58.7	74	46.7	47.5	58	60.5
	M3	56.9	65.7	74.3	47.5	48.5	59.6	62.2

	M4	58.3	63	73.4	48.3	49.4	61.7	64
Abend	M1	63.9	66.4	84.9	51.2	52.5	66.7	69.3
	M2	60.7	62.2	82.2	48.7	49.9	62.9	65.7
	M3	71.7	71.1	105.5	50.4	51.7	66.4	69.4
	M4	62.6	65.8	89.3	49.1	50.4	64.3	66.6

Tabelle 22: Luzern, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 4 Messpositionen

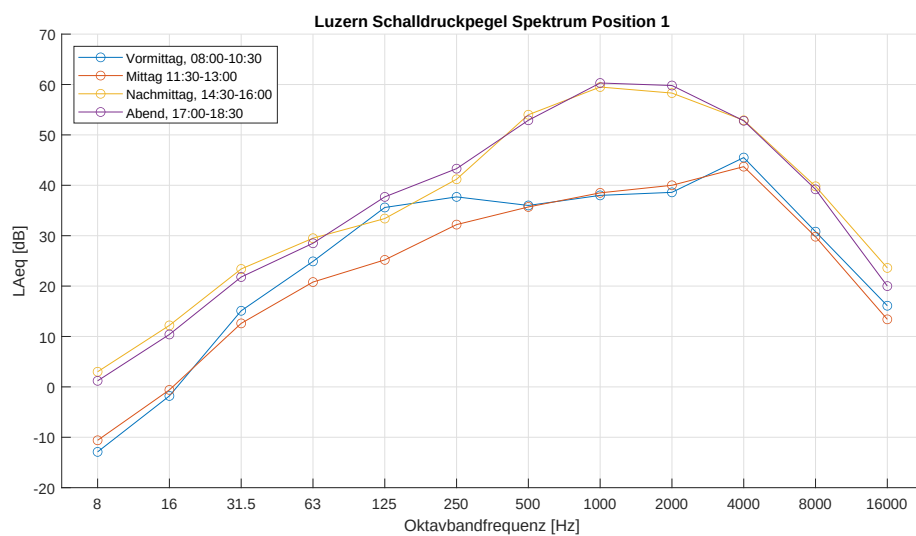


Abbildung 52: Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1

Tabelle 23: Luzern Spectral Slope Tabelle

Tageszeit	Position	Spectral Slope (dB/decade)
Morgen	M1	-22.4628
	M2	-22.9259
	M3	-21.3901
	M4	-19.3672
Mittag	M1	-21.6967
	M2	-21.9559
	M3	-21.394
	M4	-22.3438
Nachmittag	M1	-22.1678
	M2	-21.9138
	M3	-24.7695
	M4	-23.4191
Abend	M1	-22.859
	M2	-20.5142
	M3	-20.0218
	M4	-22.2916

Tabelle 24: Luzern, Resultate Psychoakustik

Tageszeit	Position	Lautheit [sone]	Schärfe [acum]	Rauigkeit [asper]	Tonalität [tu]
Morgen	M1	4.28	2.34	0.01	0.09
	M2	5.1	2.03	0.02	0.06
	M3	4.5	2.34	0.01	0.1
	M4	3.96	2.33	0.01	0.08
Mittag	M1	4.03	2.06	0.01	0.09
	M2	4.85	1.88	0.02	0.06
	M3	4.99	2.17	0.01	0.1
	M4	4.84	2.03	0.02	0.11
Nachmittag	M1	9.4	2.11	0.02	0.21
	M2	7.21	1.89	0.02	0.12
	M3	8.04	1.98	0.02	0.16
	M4	8.33	2.09	0.02	0.16
Abend	M1	10.69	2.01	0.02	0.31
	M2	8.77	1.93	0.02	0.22
	M3	10.39	1.99	0.02	0.3
	M4	9.21	1.98	0.02	0.23

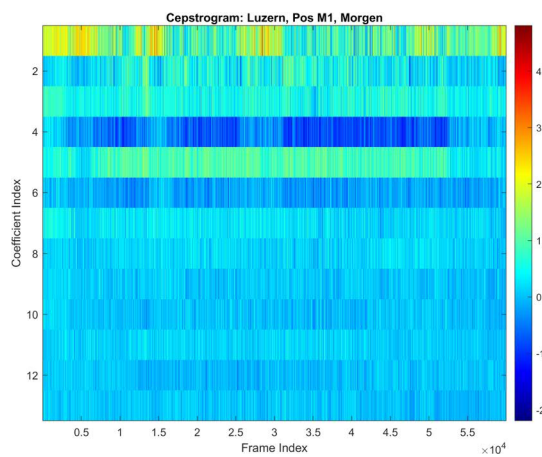


Abbildung 53: Cepstrogram Messposition 1, Morgen

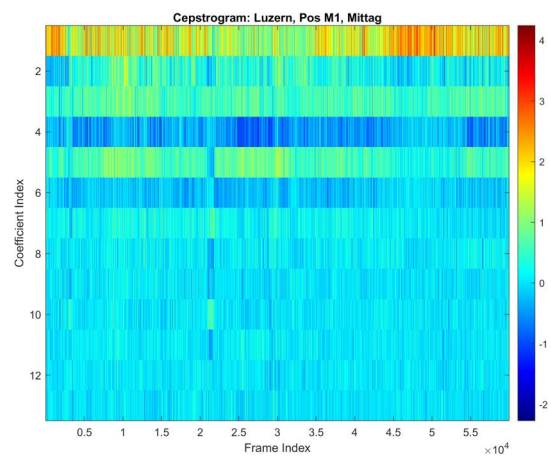


Abbildung 54: Cepstrogram Messposition 2, Mittag

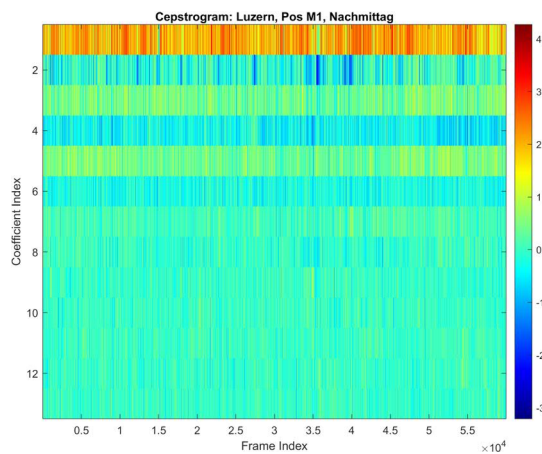


Abbildung 55: Cepstrogram Messposition 3, Nachmittag

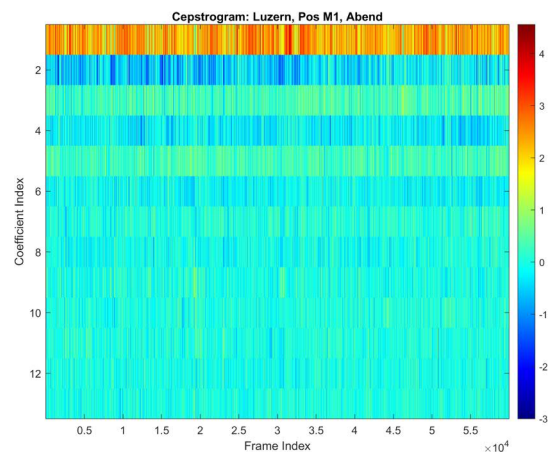


Abbildung 56: Cepstrogram Messposition 4, Abend

Nachhallzeit RT60

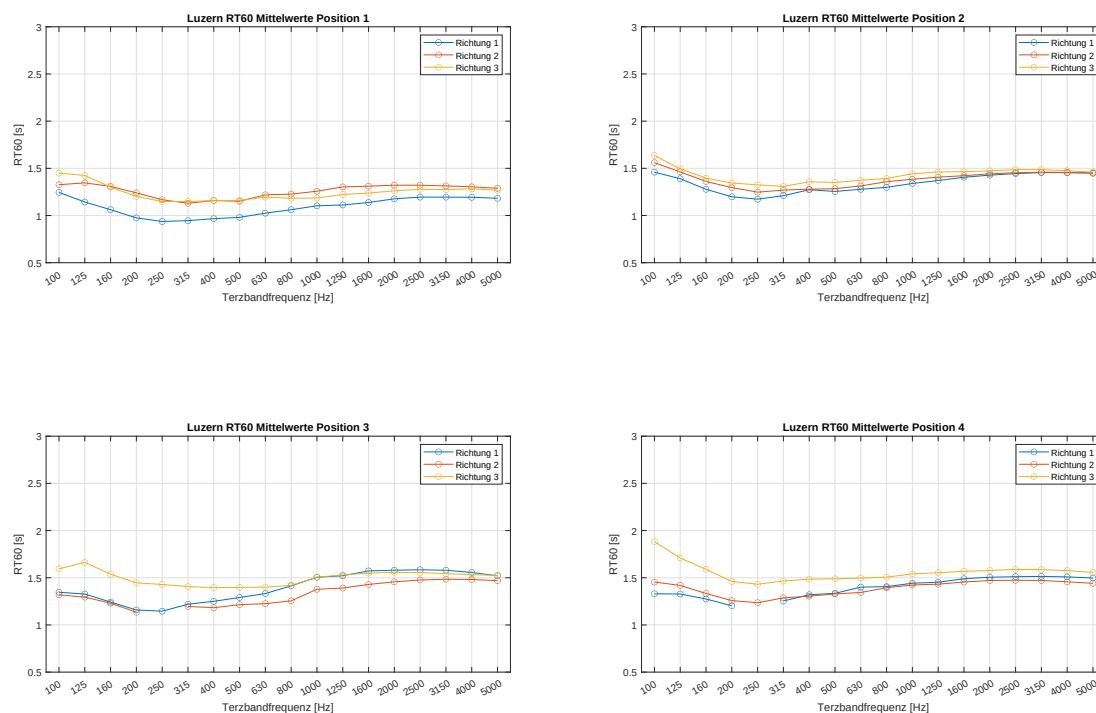


Abbildung 57: Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen

Tabelle 25: Luzern, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig

Position	Richtung	RT60 500/1000 Hz [s]	RT60 breitbandig [s]
M1	1	1.04	1.09
	2	1.22	1.26
	3	1.18	1.24
M2	1	1.30	1.34
	2	1.34	1.38
	3	1.40	1.43
M3	1	1.39	1.40
	2	1.27	1.26
	3	1.44	1.50
M4	1	1.39	1.32
	2	1.37	1.39
	3	1.51	1.56

Sprachübertragungsindex STI

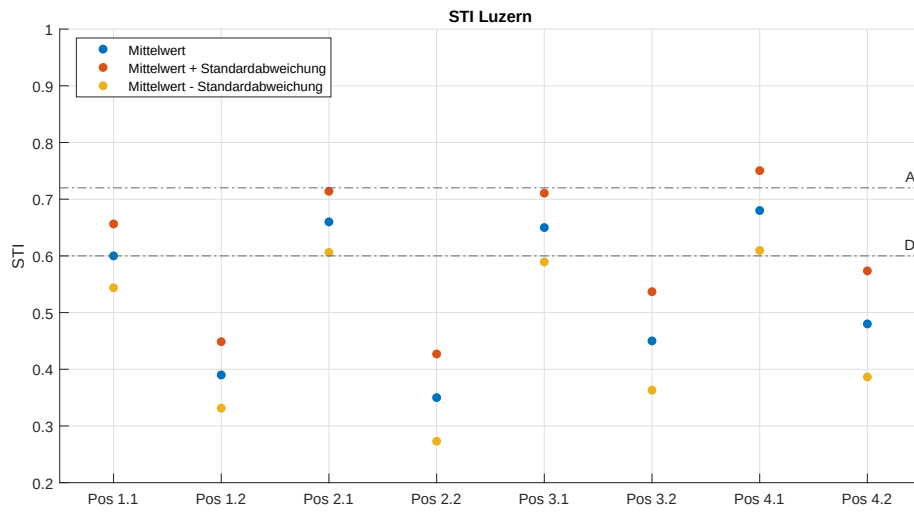


Abbildung 58: STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)

Auswertung der Impulsantwort (IR)

Tabelle 26: Luzern, EDT Werte

Position	Richtung	EDT [s]
M1	1	0.00
	2	0.01
M2	1	0.01
	2	0.01
M3	1	0.04
	2	0.14
M4	1	0.00
	2	0.01

Tabelle 27: Luzern, T20 Werte

Position	Richtung	T20 [s]
M1	1	0.04
	2	1.10
M2	1	0.04
	2	1.011
M3	1	0.23
	2	0.46
M4	1	0.05
	2	0.55

Visuelle Auswertungen



Abbildung 59: Innenhof Luzern, Original-
bild



Abbildung 60: Innenhof Luzern, Bild mit
Überlagerung

Tabelle 28: Luzern, Farbanteile

Sicht	Grünanteil [%]	Blauanteil [%]
Sicht 1	21.39	0.78
Sicht 2	6.24	0.10
Sicht 3	22.33	0.27
Sicht 4	8.10	0.06
Sicht 5	14.82	0.12

Auswertung nach Cercle Bruit Im Folgenden ist das durch die Messperson ausgefüllte Formular des Cercle Bruit zu finden. Die Note für diesen Klangraum ist 3.5.

Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorten im Siedlungsraum Rev. 2023 V.01

Örtlichkeit: Platz / Park / Innenhof	Stadt / Ort	Standort	Datum	Zeit von – bis	Koordinaten	Nutzung	Wetter	t [°C]	dB(A)	Visum
Innenhof	Luzern	Hindrich 3	17.06.24	08:30-17:30	47.0933/8.3086	Innenhof	sonnig	14/24	47-72	M1

negative Merkmale	na = nicht anwendbar →	--	-	0 / na	+	++	positive Merkmale	konkrete Feststellungen
-------------------	------------------------	----	---	--------	---	----	-------------------	-------------------------

Hauptkriterien									
Wirkt der Ort, insbesondere im Vergleich zur Umgebung, (ohne Nutzungsgeräusche) laut, z.B. wegen einem hohen Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gewerbe-Lärm?							Allgemeine Situation, Ruhe	Wirkt der Ort (ohne Nutzungsgeräusche) im Vergleich zur Umgebung, ruhig, z.B. dank tiefem Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gewerbe-Lärm?	stetiger gedämpfter Verkehrslärmpegel
Überwiegen technische Geräusche (Verkehrs-, Industrie- und Gewerbe-/Anlagen-/Freizeitlärm), und verdecken die natürlichen Geräusche? Sind starke Störgeräusche zu hören?							Vorherrschende Geräusche	Überwiegen natürliche (von Vögeln, Insekten, Wasser, Wind, Laub, ...) oder archaische Geräusche (Glocken, Wasserräder ...), oder dezente Menschenstimmen?	vielen Vogelgeräusche teilweise HLKs und Verkehr
Erscheint die Geräuschkulisse zeitlich konstant, uninteressant, eintönig, auf die Dauer (-) oder sogar bereits kurzfristig (-)?							Geräuschvielfalt – Klangvielfalt	Bilden vielfältige positiv empfundene (d.h. natürliche oder archaische) Geräusche oder dezente Menschenstimmen eine abwechslungsreiche Klanglandschaft?	Vielfalt vor allem durch Kinder
Zwingt der hohe Grundpegel zu lauterem Sprechen oder gar zu verkürzter Kommunikation? Oder fehlt wegen Reflexionen die Privatsphäre (Gespräch weitum verständlich)?							Kommunikationsfreundlichkeit	Erlaubt der tiefe oder moderate Grundpegel ohne Einschränkung differenzierte Gespräche mit müheloser Verständlichkeit, aber auch mit Privatsphäre?	keine Privatsphäre, daher hohe Verständlichkeit
Bewirken Nutzungen (z.B. Fussball oder andere Spiele, aber auch Bewegungen von Metalltüren an Eisenketten) für andere Besucher wiederholt starke Störungen?							Akustische Nutzungsverträglichkeit	Verursachen Nutzungen (z.B. Verschieben von Sitzgelegenheiten, Fussballspielen etc.) höchstens diskrete Geräusche? (gedämpfte Fussballgitter ++)	Kinder im hellen Raum sehr laut
Verstärken Reflexionen hinter Lärmquellen deren Lärm? Erzeugen Spiegelflexionen an glatten Flächen Echos? Verursachen parallele/konkave reflektierende Flächen (Flatter-)Echos oder ein "Siren"? Stört die Halligkeit?							Schallausbreitung und Reflexionen (Test z.B. mit Klatschen)	Schirmen Hindernisse den Lärm von aussen ab? Sind grosse reflektierende Flächen in Tiefe oder Ausrichtung gebrochen und vermeiden unnatürliche Echos? Wird Halligkeit durch Absorption gemildert?	starke Reflexionen
Können Geräusche, z.B. von Motorfahrzeugen, wegen Reflexionen nicht korrekt geortet werden? Erlaubt ein offener Platz das Hören auf Distanz trotzdem nicht?							Ortung in Richtung und Distanz	Werden Geräuschquellen korrekt geortet ("Ich höre es, wo ich es sehe" → Sicherheitsgefühl)? Hört man (auf offenen Plätzen) nahe und ferne Quellen?	gute Ortung, alles klingt aber nahe
Detailkriterien									
Stört ein penetrantes Wassergeräusch am bevorzugten Aufenthaltsort auf die Dauer (-)? Beeinträchtigt es gar an bevorzugten Aufenthaltsorten die differenzierte Sprachkommunikation und zwingt zu lauterem Sprechen (-)?							Wassergeräusche	Erdlingt ein moduliertes Wassergeräusch (Bach, Brunnen, Wasserspiel ++)? Oder ein gleichförmiges Rauschen (Kanal, +)? Bewirkt es eine "Umdeutung" oder Maskierung von Verkehrs- o. d. Lärm ++)?	kein Wasser
Verdrängen installierte Schallquellen (z.B. auch Musik aus Lautsprecheranlagen) den Besucher an sonst weniger attraktive Zonen des Ortes oder an andere Orte?							Spezielle Schallquellen	Bringen spezielle Schallquellen im Klangraum (z.B. von Installationen) eine (zeitweise) Bereicherung der Klanglandschaft und ziehen Besucher an?	-
Kommen am Ort eklatante Störungen der Ruhe vor, wie z.B. ein den Platz querendes Motorrad, laute Flugzeuge etc., (-) und zwingen zur Gesprächsunterbrechung (-)?							Sicherheit vor starken Störungen	Sind eklatante Ruhestörungen unwahrscheinlich oder höchst selten (ausser Kommunalfahrzeuge im Schritttempo für die Reinigung des Ortes)?	teilweise Lärm von Läden, Flugzeug

Abbildung 61: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1

Bonus-Kriterien	0	+	++	
Bleibt die Klanglandschaft über den ganzen Raum unverändert, d.h. der Besucher kann sie durch die Wahl seines Standorts nicht beeinflussen (0)?	☒	☐	☐	Verliert die Klanglandschaft mit dem Standort und kann so beeinflusst werden (+)? Bietet der Raum mehrere unterschiedliche Klangräume (++)?
Ist die Klanglandschaft austauschbar oder ist der Ort akustisch (z.B. in einer Tonaufnahme) nicht oder nur anhand negativer Merkmale zu identifizieren (0)?	☒	☐	☐	Erkenne ich den Klangraum an der Zusammensetzung der Geräuschkulisse oder an positiven Soundmarks (für den Ort charakteristische Klänge)?

Gesamtbeurteilung der akustischen Erholungsqualität						
	--	-	na/0	+	++	
Anzahl der Bewertungen in der jeweiligen Stufe	1 x (-2)	2 x (-1)	6 x 0	3 x 1	0 x 2	Q
Summe Negativpunkte / Summe Positivpunkte	Σ: -4		0	Σ: 3		
Summe Negativpunkte + Summe Positivpunkte	Σ: -4 + 3 = -1					Σ: 3 + 20 = 23 = Q

Expertenurteil: akustische Erholungsqualität	
Gesamturteil – Gründe für Abweichung Note zu Q	Note 1–6
3.7 in Akustik (Erkennung, Fokussierung, Typologie), praktisch aber trotzdem ungenügend	3.5

Verbesserungspotenzial bei der akustischen Erholungsqualität	
Wichtigste Schwäche(n) des Ortes in der Klangqualität	hell, keine Privatsphäre
Wichtigste Stärke(n) des Ortes in der Klangqualität	Vögel, wenig Straßenlärm
Verbesserungspotenzial (bei welchen Kriterien?)	Helligkeit, Variation innerhalb
Verbesserungsmaßnahme(n) konkret (Vorschlag)	gedüngte Bereiche (Fassaden), Variation durch andere Böden

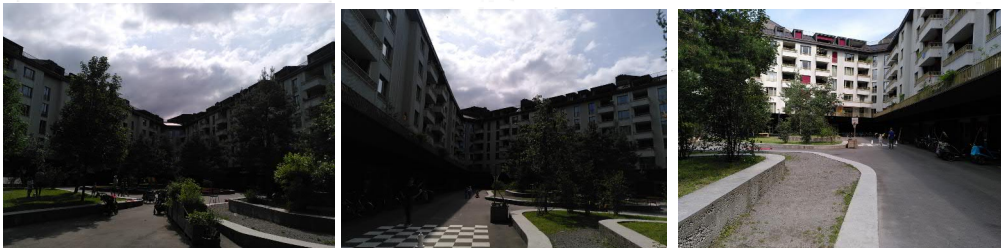


Abbildung 62: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2

4.2.4 Bern, Park Humboldtstrasse

Wetterverhältnisse am Messtag

Datum: 04.07.2024

Wetter: In der Nacht (vor der Messung) hat es geregnet, trocken, Mittag und Nachmittag sonnig, windig

Temperatur: min. 15°C, max. 21°C

Niederschlag: 0 mm / 0 %

Sonnenstunden: 8 h

Wind: 6 | 17 km/h

Sonnenaufgang: 05:41

Sonnenuntergang: 21:27

Messpositionierung

Anzahl Messpositionen:

SPL	4
RT60	4
STI	4

RT60 Messrichtungen:

Richtung 1	Quelle Richtung B
Richtung 2	Richtung 1 + 90 Grad im Gegen-UZS
Richtung 3	Richtung 1 + 135 Grad im UZS

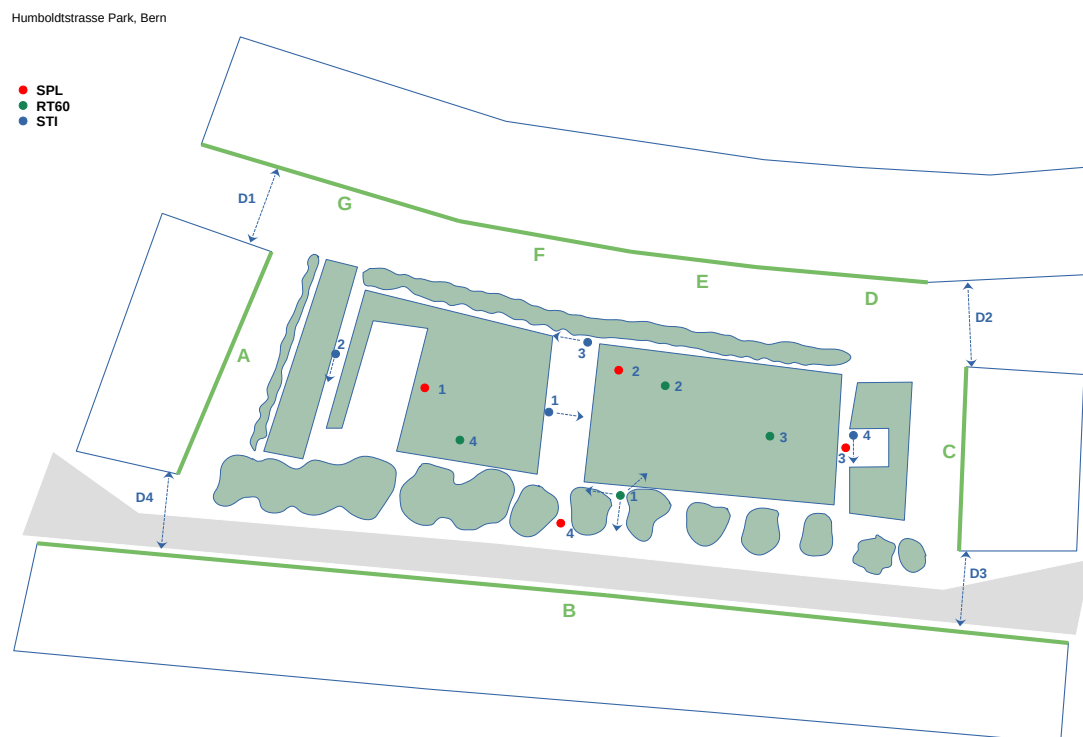


Abbildung 63: Bern, Übersicht der Messpositionen

Schalldruckpegelmessung und binaurale Aufnahmen

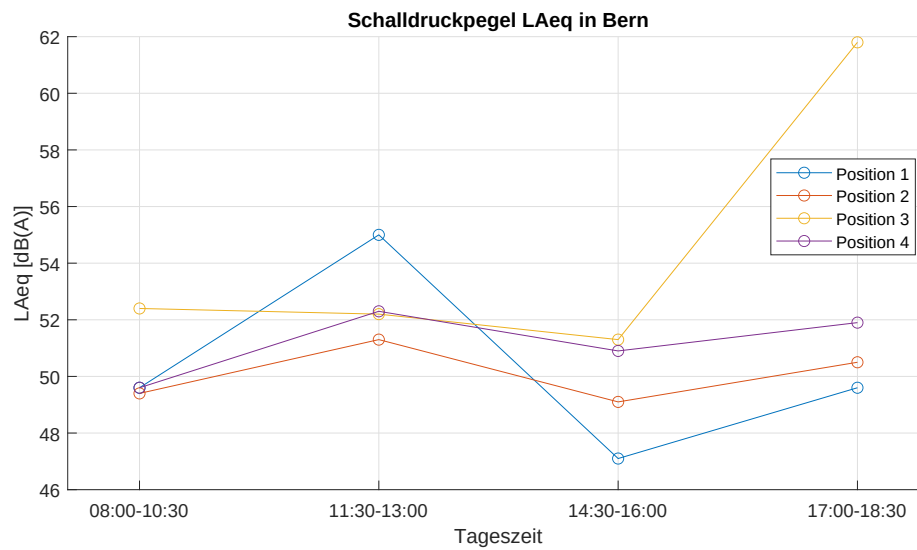


Abbildung 64: L_{Aeq} Einzelwerte zu unterschiedlichen Messzeiten

Resultate aller Messpositionen in der Übersicht:

Tageszeit	Position	L_{Aeq}	L_{Ceq}	L_{AFmax}	L_{AF95}	L_{AF90}	L_{AF10}	L_{AF5}
Morgen	M1	49.6	62.1	70.9	38.5	39.1	47.9	50
	M2	49.4	61.3	69.9	38.2	38.7	46.5	50.1
	M3	52.4	61.8	74.1	45.7	46.3	51.3	52.7
	M4	49.6	60.7	71.6	38.5	39.2	48.2	50.7
Mittag	M1	55	73.4	80.9	40.3	41.2	53.9	57.5
	M2	51.3	73.5	73.9	41.3	42.4	53.8	57.1
	M3	52.2	71.1	65.6	48.3	48.8	53.7	55.6
	M4	52.3	70.8	75.9	41.3	42	52.4	56.8
Nachmittag	M1	47.1	69.1	64	41.9	42.4	49.9	51.1
	M2	49.1	71.6	64.7	42.3	42.9	52	53.8
	M3	51.3	69.8	62.6	48	48.6	53.1	54
	M4	50.9	67.4	70.1	43	44.1	53.7	55.8

Abend	M1	49.6	67.3	70.8	41.8	42.6	51.8	55.1
	M2	50.5	70.1	69.6	42.6	43.6	53.7	55.6
	M3	61.8	70.2	83.6	48.5	49.5	64.7	67.2
	M4	51.9	64.9	71	43	43.9	54.3	57

Tabelle 29: Bern, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 4 Messpositionen

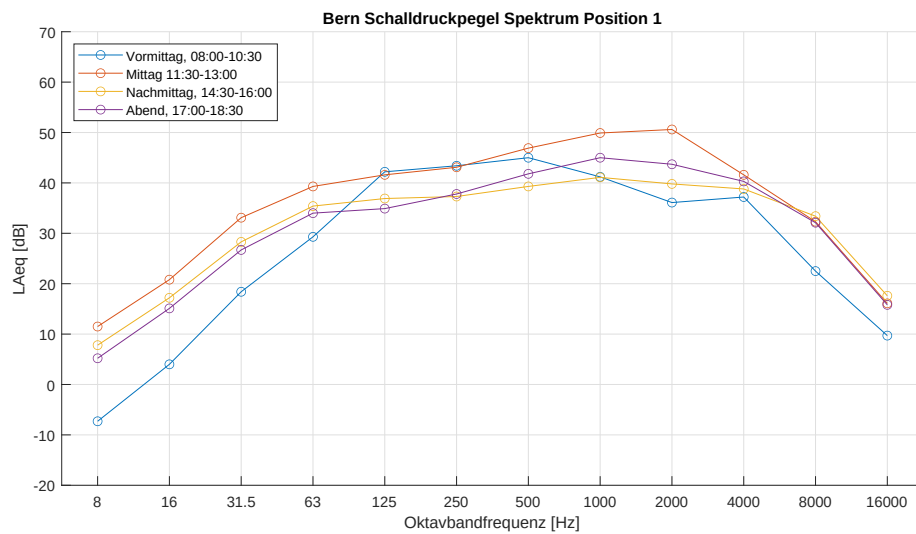


Abbildung 65: Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1

Tabelle 30: Bern Spectral Slope Tabelle

Tageszeit	Position	Spectral Slope (dB/decade)
Morgen	M1	-27.0131
	M2	-25.7392
	M3	-21.1337
	M4	-24.8667
Mittag	M1	-29.2595
	M2	-24.9182
	M3	-25.8136
	M4	-27.3428
Nachmittag	M1	-27.4784
	M2	-24.8821
	M3	-25.0548
	M4	-24.7282
Abend	M1	-26.9014
	M2	-25.0457
	M3	-24.5954
	M4	-24.3945

Tabelle 31: Bern, Resultate Psychoakustik

Tageszeit	Position	Lautheit [sone]	Schärfe [acum]	Rauigkeit [asper]	Tonalität [tu]
Morgen	M1	3.78	1.39	0.02	0.05
	M2	3.77	1.49	0.02	0.04
	M3	5.9	2.2	0.02	0.04
	M4	4.15	1.56	0.02	0.04
Mittag	M1	5.28	1.85	0.01	0.03
	M2	6.2	2.46	0.01	0.01
	M3	7.15	2.21	0.02	0.02
	M4	5.53	2.15	0.01	0.02
Nachmittag	M1	5.33	2	0.01	0.01
	M2	5.96	2.24	0.01	0.01
	M3	7.28	2.22	0.02	0.01
	M4	6.86	2.29	0.02	0.01
Abend	M1	5.6	1.86	0.02	0.04
	M2	6.33	2.11	0.02	0.03
	M3	8.81	2.02	0.02	0.12
	M4	6.65	2.05	0.02	0.04

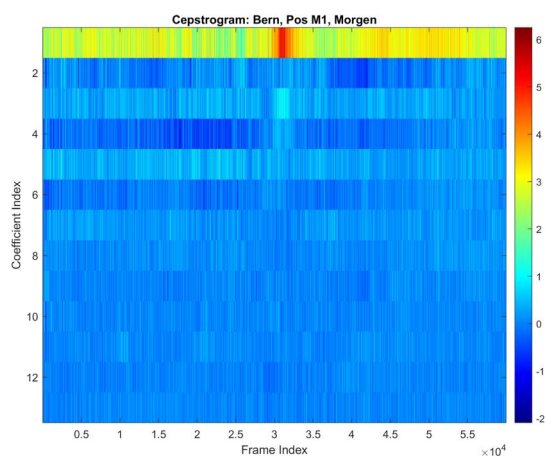


Abbildung 66: Cepstrogram Messposition 1, Morgen

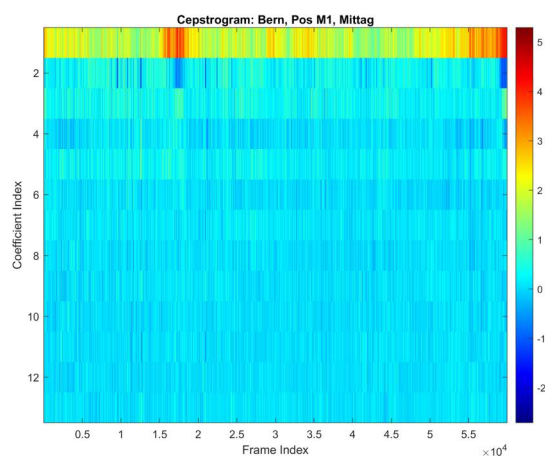


Abbildung 67: Cepstrogram Messposition 2, Mittag

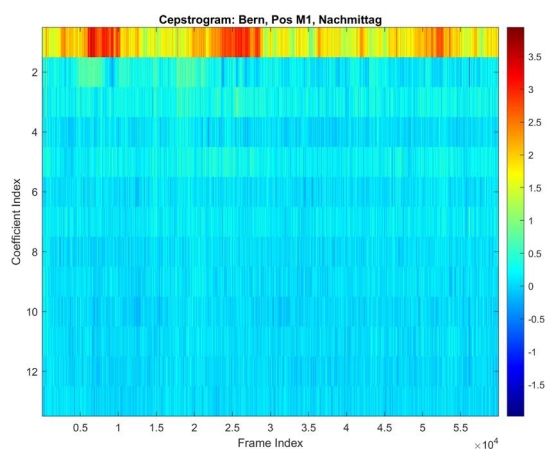


Abbildung 68: Cepstrogram Messposition 3, Nachmittag

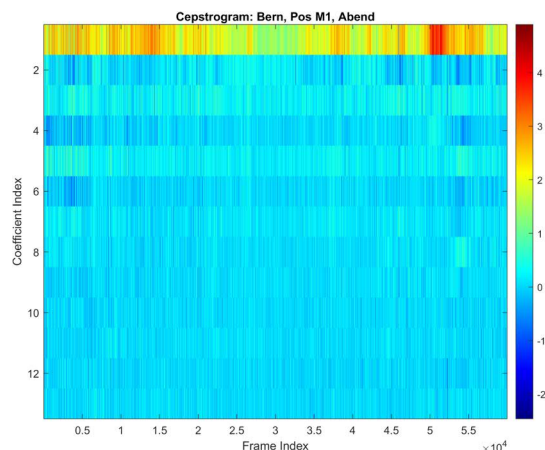


Abbildung 69: Cepstrogram Messposition 4, Abend

Nachhallzeit RT60

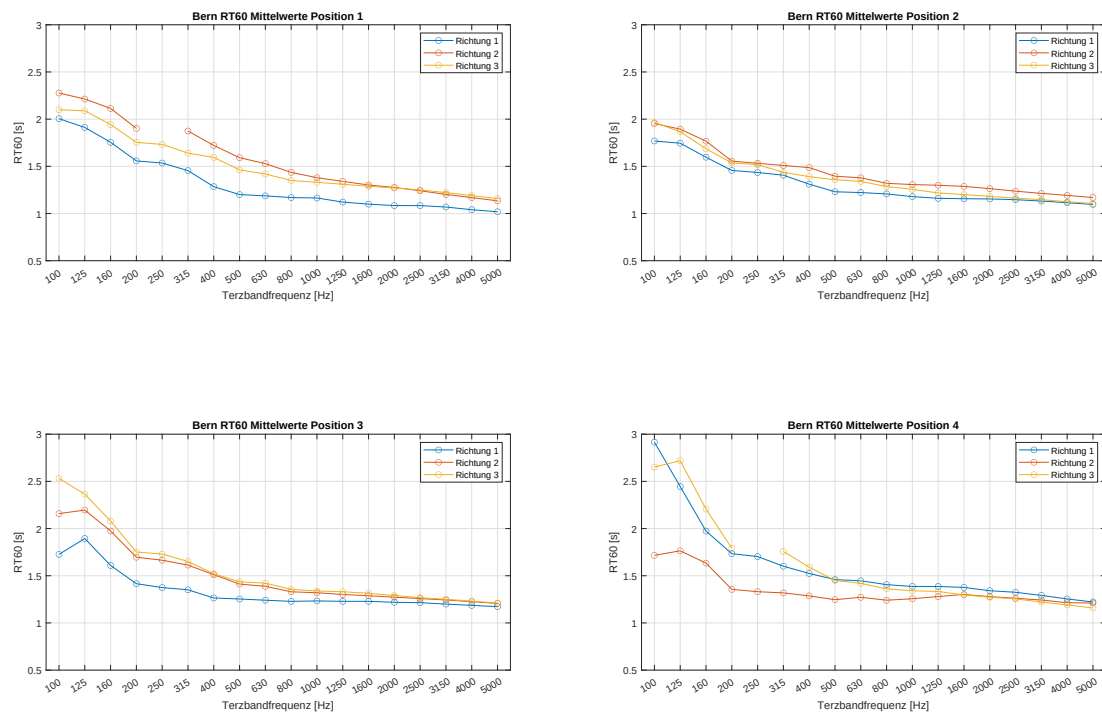


Abbildung 70: Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen

Tabelle 32: Bern, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig

Position	Richtung	RT60 500/1000 Hz [s]	RT60 breitbandig [s]
M1	1	1.19	1.32
	2	1.50	1.48
	3	1.41	1.51
M2	1	1.23	1.31
	2	1.36	1.43
	3	1.31	1.38
M3	1	1.24	1.34
	2	1.38	1.50
	3	1.40	1.56
M4	1	1.43	1.60
	2	1.26	1.35
	3	1.42	1.50

Sprachübertragungsindex STI

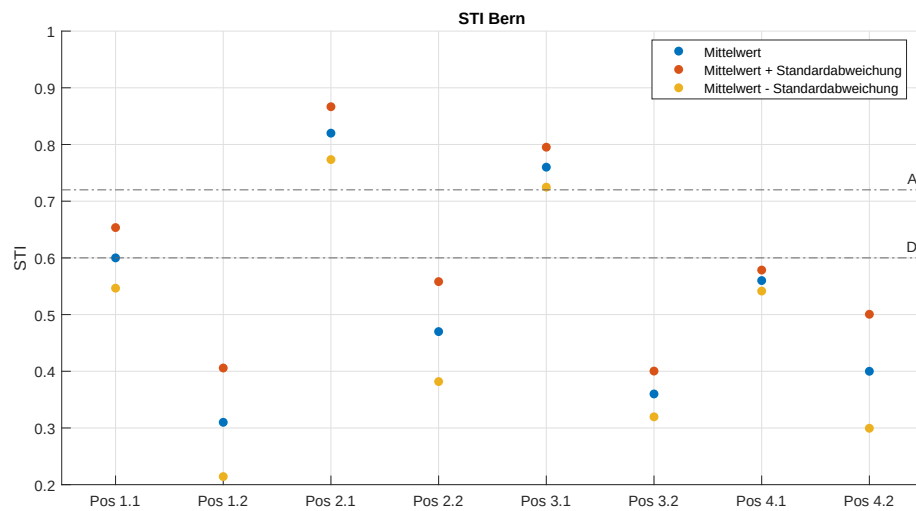


Abbildung 71: STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)

Auswertung der Impulsantwort (IR)

Tabelle 33: Bern, EDT Werte

Position	Richtung	EDT [s]
M1	1	0.00
	2	0.09
M2	1	0.02
	2	0.02
M3	1	0.01
	2	0.02
M4	1	0.01
	2	0.03

Tabelle 34: Bern, T20 Werte

Position	Richtung	T20 [s]
M1	1	0.04
	2	10.27
M2	1	0.04
	2	0.55
M3	1	0.04
	2	0.27
M4	1	0.05
	2	0.78

Visuelle Auswertungen



Abbildung 72: Innenhof Bern, Originalbild

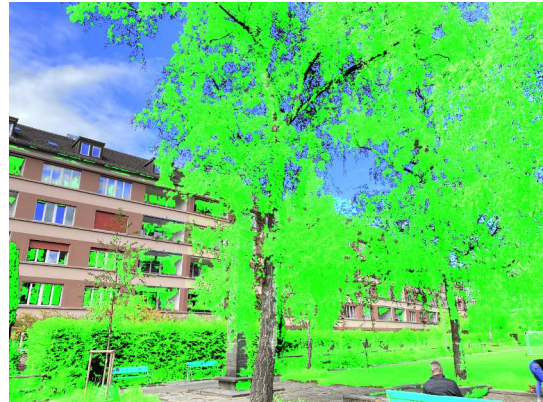


Abbildung 73: Innenhof Bern, Bild mit Überlagerung

Tabelle 35: Bern, Farbanteile

Sicht	Grünanteil [%]	Blauanteil [%]
Sicht 1	67.22	4.19
Sicht 2	75.75	0.27
Sicht 3	54.07	17.04
Sicht 4	59.21	12.66
Sicht 5	68.47	2.79

Auswertung nach Cercle Bruit Im Folgenden ist das durch die Messperson ausgefüllte Formular des Cercle Bruit zu finden. Die Note für diesen Klangraum ist 5.5.

Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorte im Siedlungsraum Rev. 2022 V.02

Örtlichkeit: Platz / Park / Hof	Stadt / Ort	Standort	Datum	Zeit von – bis	Koordinaten	Nutzung	Wetter	t [°C]	dB(A)	Visum	
Innenhof mit Strassendurchfahrt	Bern	Park Humboldtstrasse	04.07.2024	09.00-18.30	46.95316161990843, 7.455444094224454	Spiel, Erholung	sonnig, windig				
negative Merkmale		na = nicht anwendbar →			--	-	0 / na	+	++	positive Merkmale	konkrete Feststellungen
Hauptkriterien											
Wirkt der Ort, insbesondere im Vergleich zur Umgebung, (ohne Nutzungsgeräusche) laut , z.B. wegen einem hohen Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gewerbelärm?		Allgemeine Situation, Ruhe			Wirkt der Ort (ohne Nutzungsgeräusche), besonders im Vergleich zur Umgebung, ruhig , z.B. dank tiefem Grundpegel von Verkehrs- oder Indus./Gew.-Lärm?				Wirkt ruhig, erholsam, kaum Verkehr zu hören		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Überwiegen technische Geräusche (Verkehrs-, Industrie- und Gewerbe-/Anlagen-/Freizeitlärm), und verdecken die natürlichen Geräusche? Sind starke Störgeräusche zu hören?		Vorherrschende Geräusche			Überwiegen natürliche (z.B. von Vögeln, Insekten, Wasser, Wind, Laub, Nutztieren, ...) oder "archaische" Geräusche (Glocken, Wasserräder ...)?				Ausser Wind kaum andere Geräusche zu hören, nur in der Ferne		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Erscheint die Geräuschlandschaft zeitlich konstant, uninteressant, eintönig , auf die Dauer (–) oder sogar bereits kurzfristig (– –)?		Geräuschvielfalt – Klangvielfalt			Kommen am Ort vielfältige positiv empfundene (d.h. natürliche oder archaische) Geräusche vor und bilden eine abwechslungsreiche Geräuschlandschaft?				Im Hintergrund wenige Vögel		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Zwingt der hohe Grundpegel zu lauterem Sprechen oder gar zu verkürzter Kommunikation? Oder fehlt wegen Reflexionen die Privatsphäre (Gespräch weitum verständlich)?		Kommunikationsfreundlichkeit			Erlaubt der tiefe oder moderate Grundpegel ohne Einschränkung differenzierte Gespräche mit mühe- loser Verständlichkeit , aber auch mit Privatsphäre ?				Privatsphäre gut möglich, Unterhaltungen angenehm		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Bewirken Nutzungen (z.B. Fussball oder andere Spiele, aber auch Bewegungen von Metallstühlen an Eisenketten) für andere Besucher wiederholt starke Störungen ?		Akustische Nutzungsverträglichkeit			Verursachen Nutzungen (z.B. Verschieben von Sitzgelegenheiten; Fussballspielen etc.) höchstens diskrete Geräusche? (gedämpfte Fussballgitter ++)				Kies und Wiese verhindern spitze Geräusche		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Verstärken Reflexionen hinter Lärmquellen deren Lärm? Erzeugen Spiegelflexionen an glatten Flächen Echos ? Verursachen parallele/konkave reflektierende Flächen (Flatter)-Echos oder ein "Siren"? Stört die Halligkeit ?		Schallausbreitung und Reflexionen (Test z.B. mit Klatschen)			Schirmen Hindernisse den Lärm von aussen ab? Sind grosse reflektierende Flächen in Tiefe oder Ausrichtung gebrochen und vermeiden unnatürliche Echos? Wird Halligkeit durch Absorption gemildert?				Zwischen Mauern und Park sind auf allen Seiten Sträucher, Hecken oder Bäume		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Können Geräusche, z.B. von Motorfahrzeugen, wegen Reflexionen nicht korrekt geortet werden? Erlaubt ein offener Platz das Hören auf Distanz trotzdem nicht?		Ortung in Richtung und Distanz			Werden Geräuschquellen korrekt geortet ("Ich höre es, wo ich es sehe" → Sicherheitsgefühl)? Hört man (auf offenen Plätzen) nahe und ferne Quellen ?				Gute Ortung möglich		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Detaillkriterien											
Stört ein penetrantes Wassergeräusch am bevorzugten Aufenthaltsort auf die Dauer (–)? Beeinträchtigt es gar an bevorzugten Aufenthaltsorten die differenzierte Sprach- kommunikation und zwingt zu lauterem Sprechen (– –)?		Wassergeräusche			Erklingt ein moduliertes Wassergeräusch (Bach, Brunnen, Wasserspiel ++)? Oder ein gleichförmiges Rauschen (Kanal, +)? Bewirkt es eine "Umdeutung" oder Maskierung von Verkehrs- o. ä. Lärm (++)?				Brunnen mit fließendem Wasser ist kaum wahrnehmbar		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Verdrängen installierte Schallquellen (z.B. auch Musik aus Lautsprecheranlagen) den Besucher an sonst weniger attraktive Zonen des Ortes oder an andere Orte?		Spezielle Schallquellen			Bringen spezielle Schallquellen im Klangraum (z. B. von Installationen) eine (zeitweise) Bereicherung der Klanglandschaft und ziehen Besucher an?				Es gibt keine zusätzlichen Schallquellen		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		
Kommen am Ort eklatante Störungen der Ruhe vor, wie z. B. ein den Platz querendes Motorrad, laute Flugzeuge etc., (–) und zwingen zur Gesprächsunterbrechung (– –)?		Sicherheit vor starken Störungen			Sind eklatante Ruhestörungen unwahrscheinlich oder höchst selten (ausser Kommunalfahrzeuge im Schrittempo für die Reinigung des Ortes)?				Eher selten, ausser direkt auf der integrierten Strasse		
☐ ☐ ☐ ☐ ☐		☐ ☐ ☐ ☐ ☐			☐ ☐ ☐ ☐ ☐				☐ ☐ ☐ ☐ ☐		

Abbildung 74: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1

Bonus-Kriterien	0	+	++			
Bleibt die Klanglandschaft über den ganzen Raum unveränderlich , d.h. der Besucher kann sie durch die Wahl seines Standorts nicht beeinflussen (0)?	Klangraum nach Wahl	0	☐	☐	Variiert die Klanglandschaft mit dem Standort und kann so beeinflusst werden (+)? Bietet der Raum mehrere unterschiedliche Klangräume (++)?	Pegel unterschiedlich, Klanglandschaft sonst gleich
Ist die Klanglandschaft austauschbar, ist der Ort akustisch (z.B. in einer Tonaufnahme) nicht oder nur anhand negativer Merkmale zu identifizieren (0)?	Einzigkeit, Identifizierbarkeit	0	☐	☐	Erkenne ich den Klangraum an der Zusammensetzung der Geräuschlandschaft oder an positiven Soundmarks (für den Ort charakteristische Klänge)?	Kaum identifizierbar

Gesamtbeurteilung der akustischen Erholungsqualität						
	--	-	na/0	+	++	
Anzahl der Bewertungen in der jeweiligen Stufe	x(-2)	1 x(-1)	4 x0	4 x1	3 x2	Q
Summe Negativpunkte / Summe Positivpunkte	Σ^-	-1	0	Σ^+	10	
Summe Negativpunkte + Summe Positivpunkte	$\Sigma^- + \Sigma^+ = \Sigma \Rightarrow$	9		$(\Sigma + 20) / 6 = Q \Rightarrow$		4.83

Expertenurteil: akustische Erholungsqualität	
Gesamturteil – Gründe für Abweichung Note zu Q	Note 1– 6
Park ist grundsätzlich stark begrünt mit Hecken, Bäumen und Sträucher, es gibt kaum Verkehr oder störende Geräusche, Kinderlärm ist gut ertragbar	5-6

Verbesserungspotenzial bei der akustischen Erholungsqualität	
Wichtigste Schwäche(n) des Ortes in der Klangqualität	Strasse führt durch den Park und öffnet den Innenhof
Wichtigste Stärke(n) des Ortes in der Klangqualität	Viele Bäume, Hecken und Sträucher
Verbesserungspotenzial (bei welchen Kriterien?)	Fassaden könnte man noch ändern oder anpassen
Verbesserungsmassnahme(n) konkret (Vorschlag)	Strasse privat machen, Parkplätze ausserhalb des Parks platzieren

Hier Smartphone-Panoramabild einfügen

Abbildung 75: Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2

5 Qualitative Datenerhebung

Unter dem Begriff «qualitative Datenerhebung» werden unterschiedliche sozialwissenschaftliche Methoden zusammengefasst. Dabei handelt es sich genau genommen nicht in jedem Fall um qualitative Daten: Einschätzungen zu qualitativen Kriterien können auch anhand von Fragebogen z.B. mit Skalenabfragen erhoben werden. Der Vorteil an diesen Daten ist eine statistische Verarbeitung gemeinsam mit physikalischen Messdaten.

Auf der anderen Seite spiegeln Interviewdaten verschiedene Perspektiven und Einschätzungen zu qualitativen Fragestellungen, beispielsweise der wahrgenommenen Störung durch Geräusche. Dadurch lassen sich vor allem neue Erkenntnisse gewinnen und die Verschiedenheit individueller Wahrnehmungen abbilden.

5.1 Erhebungs-Methodik

Entsprechend der ISO 12913 liegt die zentrale Projektidee in der Kombination verschiedener Ansätze und Methoden zur Beschreibung des Klangraums und dessen Wahrnehmung durch Testpersonen.

Die Analyse der drei ausgewählten Ansätze in Kapitel 2.3 zeigt, dass eine Beurteilung von Klangräumen stets in Abhängigkeit der menschlichen Wahrnehmung zu erfolgen hat. Dabei wird nach einem sozialräumlichen Raumverständnis vorgegangen, wonach Raum sich neben den gebauten Strukturen massgeblich durch soziale Interaktionen konstituiert. Den Erhebungen im Projekt wird ein Raumverständnis nach Rolshoven (2012) zugrunde gelegt, wonach der Raum sich aus dem gebauten Raum (vermessbarer, architektonisch geschaffener Raum), dem erlebten Raum (vom Individuum wahrgenommener und in den Alltagshandlungen verwirklichter Raum) und dem Repräsentationsraum (gesellschaftliche und historische Zuschreibungen von Räumen) zusammensetzt.

Die unterschiedlichen Erhebungen wurden mit Testpersonen aus einem Pool durchgeführt. Bereits im «Stadtklang»-Projekt [43] hat sich gezeigt, dass die Klangraum-Bewertung durch die Anwohnenden der Innenhöfe aus folgenden Gründen nicht sinnvoll ist:

- Die Anwohnenden lassen sich kaum auf Befragungen, schon gar nicht auf Erhebungen vor Ort mit definiertem Zeitpunkt ein. Sowohl im Stadtklang-Projekt als auch im aktuellen Projekt sind entsprechende schriftliche Aufrufe ohne Resonanz geblieben.

- Die Bewertung eines Klangraums kann nicht vollständig vom individuellen Erleben entkoppelt werden. Allerdings benötigt die erforderliche Einschätzung ein gewisses Abstraktionsvermögen. Die Wahrnehmung von Anwohnenden ist von jahrelangen persönlichen Erlebnissen mit dem und im Innenraum beeinflusst und damit in der Objektivität erheblich beeinträchtigt.
- Aus diesem Grund wurde mit einer Gruppe von unterschiedlichen Testpersonen gearbeitet, welche sich über einen längeren Zeitraum vor Ort aufhielten und dadurch temporär die Nutzenden-Perspektive einnehmen konnten.
- Die Erhebungen konzentrieren sich auf die Aussensicht, nicht auf die Bewohnenden. Bei diesen spielen noch zahlreiche andere Kriterien eine Rolle, welche weggelassen wurden, um das Projekt handhabbar zu halten.

Die Nutzungen in einem Raum sind unter verschiedenen Gesichtspunkten relevant: Einerseits als Elemente des Sozialraums, die massgeblich zur Gestaltung dieses Raums beitragen. Dadurch wird der Raum – je nach Nutzung – ganz unterschiedlich wahrgenommen. Allerdings ist diese Wahrnehmung sehr unterschiedlich geprägt: Werden spielende Kinder von ihren Eltern als Teil ihrer Lebenswelt betrachtet und sind deshalb primär durchaus positiv konnotiert, kann dies bei Menschen, die keinen Bezug zu diesen Kindern – oder gar generell zu Kindern – haben, durchaus als störende Lärmquelle wahrgenommen werden. Im Projekt hat sich gezeigt, dass diese Störung massgeblich von den akustischen Eigenschaften der Lärmquelle abhängt.

Die Nutzenden sind untrennbar mit den Nutzungen verbunden. Eine reine Beschreibung der beiden ist jedoch für die Klangraumwahrnehmung eine zu neutrale Aussage. Erst die Bedeutung, welche die Befragten (Nutzenden) den anderen Nutzenden und den Nutzungen in Bezug auf ihre Perspektive geben, gibt Hinweise auf die Klangraumwahrnehmung.

Für die Bewertung des Klangraumes durch die Nutzenden wurde folgende Methoden angewendet:

- Fragebogen-Erhebung zur Wahrnehmung des Klangraums mit Skalenabfragen (siehe Leitfragen im Hauptbericht)
- Dialogisches Fokusgruppengespräch vor Ort zu den Klangraumwahrnehmungen. Diese wurden protokolliert und nach Kategorien ausgewertet.
- Eine Bewertung von Audioaufnahmen der anderen Erhebungszeitpunkte im Tagesverlauf

Die Fragebogenerhebung und das Fokusgruppen-Gespräch wurden an einem zentralen Ort im untersuchten Raum durchgeführt. In der Fokusgruppe wurde im Anschluss an die zentralen Leitfragen-Diskussionen auch andere Bereiche des untersuchten Raums begangen und bewertet. Allerdings wurde hier nur noch erhoben, was sich gegenüber dem Raumzentrum verändert hat.

Weiter wurden den Testpersonen Audioaufnahmen der akustischen Situationen zu früheren Tageszeitpunkten zur Einschätzung gegeben. Dadurch sollte die Veränderung im Tagesverlauf ebenfalls bewertet werden, da aus praktischen Gründen die Testpersonen nicht während des ganzen Tages immer wieder für Erhebungen herangezogen werden konnten.

Die Erhebungsmethodik basiert stark auf dem Soundwalk-Prinzip (ISO/TS 12913-2), wurde jedoch für den Projektkontext angepasst. Vor allem geht es nicht um einen Spaziergang, sondern um die Bewertung der individuellen und kollektiven Wahrnehmung am festgelegten Punkten im Raum, welche mit den Messpunkten der akustischen Messungen übereinstimmen.

5.2 Durchführung und Erhebungen

In einem ersten Schritt wurde am 5.07.2024 eine Testerhebung am Fallbeispiel Luzern durchgeführt. Aus den Erfahrungen wurde das definitive Erhebungssetting angepasst. Eine grosse Herausforderung bestand in der Gewinnung von Testpersonen. An zwei Orten wurde dennoch versucht, Bewohner:innen als Testpersonen zu gewinnen. Dies ist nur in einem einzigen Fall gelungen und diese Person weist eine gewisse Forschungsnähe auf. Aus diesem Grund wurden sieben Testpersonen rekrutiert, welche in unterschiedlichen Zusammensetzungen (Verfügbarkeit) an den vier Fallstudien als Testpersonen zur Verfügung standen. Die Erhebungen fanden an folgenden Tagen statt:

- Zürich, 22.08.2024
- Basel, 20.08.2024
- Luzern, 28.08.2024
- Bern, 26.08.2024

Aufgrund guter Witterungsverhältnisse wurden die ebenfalls festgelegten Ausweichtermine nicht benötigt.

Die Erhebungstage liefen folgendermassen ab: Die Erhebung erfolgt an festgelegten Orten im Innenhof. Diese Orte orientieren sich einerseits an der Methodik aus dem Stadtklang-Projekt, andererseits auch an den Messstandorten des Akustik-Teams. Die Charakteristik des Gesamtraums (Innenhof) wird durch das Erhebungsteam aufgenommen. Basis bilden die Abmessungen (aus Plänen und Stockwerkmassen) sowie die Oberflächen. Diese Erhebung wird bei der Vorbesichtigung begonnen und bei der Testbegehung nach Bedarf ergänzt. Es gibt vier Erhebungszeitpunkte für Audioaufnahmen: 11:00, 12:30 und 14:00. Zu allen Zeitpunkten wird die Klangsituation an allen festgelegten Punkten mit dem Audiogerät aufgezeichnet. Jeweils 1' repräsentativer Aufnahme werden abgespeichert. Das Zeitfenster zwischen 16:30 und 17:30 ist als Haupt-Erhebungszeitpunkt mit den Testpersonen vorgesehen:

- 16:00 Eintreffen der Testpersonen am festgelegten Ort,
nach der Begrüssung eine kurze Einführung in das Projekt, den Ort und
die Methodik.
- 16:30 Fragebogen (Erhebung Teil 1)
Die Testpersonen hören sich in der Mitte des Hofes einzeln in den
Klangraum ein und füllen den Fragebogen aus.
- 16:45 Fokus-Gruppe (Erhebung Teil 2, moderiert)
Gemeinsame dialogische Bewertung der einzelnen Bewertungspunkte.
- 17:30 Audioaufnahmen (Erhebung Teil 3)
Da wir die Testpersonen nicht den ganzen Tag beanspruchen können,
bitten wir sie, im Anschluss die Audioaufnahmen von den anderen
Zeitpunkten anzuhören und Unterschiede zur vorangegangenen Erhebung
zu kommentieren.
- 18:00 Abschluss

Im Rahmen der Vorbereitung während des Tages waren ursprünglich auch spontane Kurzinterviews (sep. Leitfaden) mit Bewohnenden, die sich im Innenhof aufhalten, angedacht. Es zeigte sich jedoch, dass solche Interviews aufgrund des Abstraktionsgrades einer guten Einführung bedürfen. Ein einziges solches Interview wurde durchgeführt, welches teilweise aufschlussreich bezüglich der Nutzung des Innenhofes war, jedoch nicht die erwarteten Ergebnisse zum Klangraum erbringen konnte.

5.3 Auswertung Fragebogen

Mittels Fragebogen wurden die Teilnehmer:innen im ersten Schritt gebeten, alle wahrnehmbaren Klangquellen aufzulisten – dies in absteigender Deutlichkeit. Im zweiten Schritt fand eine Bewertung der akustischen Umgebung in Bezug auf die Empfindung statt. Im Folgenden werden die Auswertungsschritte dieser Erhebung sowie die Ergebnisse aufgeführt.

5.3.1 Klangquellen nach Deutlichkeit der Wahrnehmung

Die erste Frage im Fragebogen bezog sich auf die wahrnehmbaren Klangquellen. Die Teilnehmer:innen listeten maximal acht Klangquellen in absteigender Deutlichkeit in einer Tabelle auf. Um die Geräuscharten, welche von den Teilnehmer:innen erhoben wurden, anschliessend auszuwerten, wurden Kategorien anhand der Taxonomie der ISO/TS 12913-2 gebildet (vgl. Tabelle 36).

Tabelle 36: Auswertungs-Kategorien (Geräuscharten)

Kategorien		Kürzel
Durch den Menschen verursachte Geräuschemissionen	Motorisierter Verkehr	M
	Nicht-motorisierte Bewegung (z.B. Schritte, Fahrrad)	B
	Elektro-mechanisch (z.B. Baustellenlärm, Haushaltsgeräusche)	E
	Stimme & Instrument	S
	Kommunal (z.B. Kirchenglocken)	K
Nicht durch den Menschen verursachte Geräuschemissionen	Naturgeräusche (z.B. Wind, Wasser, Bäume)	N
	Domestizierte Tiere	T

Die aufgelisteten Klangquellen wurden den jeweiligen Kategorien zugeordnet und numerisch ausgewertet (Summe der Anzahl Nennungen). Um die Deutlichkeit der Klangquellen miteinzubeziehen, wurden die Nennungen mit dem jeweiligen Listenrang multipliziert (erste Nennung x8, letzte Nennung x1).

Ergebnisse Geräuschquellen

Abbildung 76 zeigt die wahrgenommenen Geräuschquellen nach Objekt und mit eingerechneter Gewichtung. In keinem der untersuchten Objekte wurden Geräuschquellen erhoben, die den Kategorien «kommunal» und «Tiere» entsprechen.

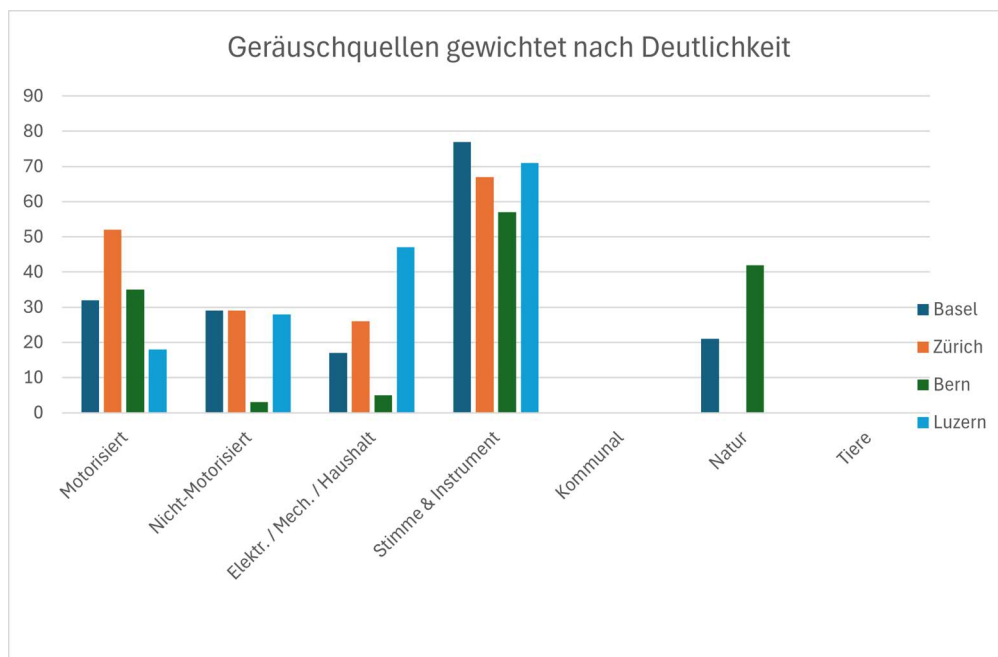


Abbildung 76: Übersicht der Geräuschquellen

Zürich:

In Zürich wird eine belebte Umgebung wahrgenommen, die von Strassenlärm (im Vergleich höchster Wert) und anderen menschlichen Geräuschemissionen (Kinder auf dem Spielplatz, Gespräche usw.) geprägt ist. Naturgeräusche wurden nicht notiert, obwohl die Umgebung naturnah gestaltet ist⁴.

Basel:

In Basel zeigt sich eine vielfältige akustische Umgebung mit im Vergleich höchstem Wert bei «Stimme & Instrument». Naturgeräusche sind hörbar (Grillenzirpen, Blätterscheln).

Luzern:

In Luzern dominieren Klänge, die durch die Nutzung des Innenhofs (Kinder, Gespräche, Geschirr) und durch das Wohnen (Türklingen, Türklingel) entstehen. Strassenlärm ist hier im Vergleich zu den anderen Objekten weniger prägend.

Bern:

⁴Allgemeiner Hinweis: Eine grüne Umgebung erzeugt nicht zwangsläufig oder dauerhaft wahrnehmbare Naturgeräusche – trotz einer häufig damit verbundenen Erwartungshaltung.

Die Auswertung zeigt eine tendenziell ruhige Umgebung mit gut hörbaren Naturklängen (Vögel, Wasser / Brunnen, Blätterscheln) in Bern.

5.3.2 Wahrnehmung Klanglandschaften - Empfindung

Die Empfindung der akustischen Umgebung wurde durch die Teilnehmer:innen auf einer Skala von 1 (trifft überhaupt nicht zu) bis 5 (trifft absolut zu) verortet. Für die Auswertung wurde die Summe der Skalenwerte durch die Summe der Teilnehmer:innen geteilt. Abbildung 2 zeigt die durchschnittliche Zustimmung zu den Aussagen:

- Hier ist es laut.
- Hier ist es akustisch angenehm.
- Die Geräusche passen zur Umgebung.

Werte von 1 bis 2 können als Ablehnung und Werte von 4 bis 5 als Zustimmung gelesen werden. Werte um 3 entsprechen einer neutralen Haltung.

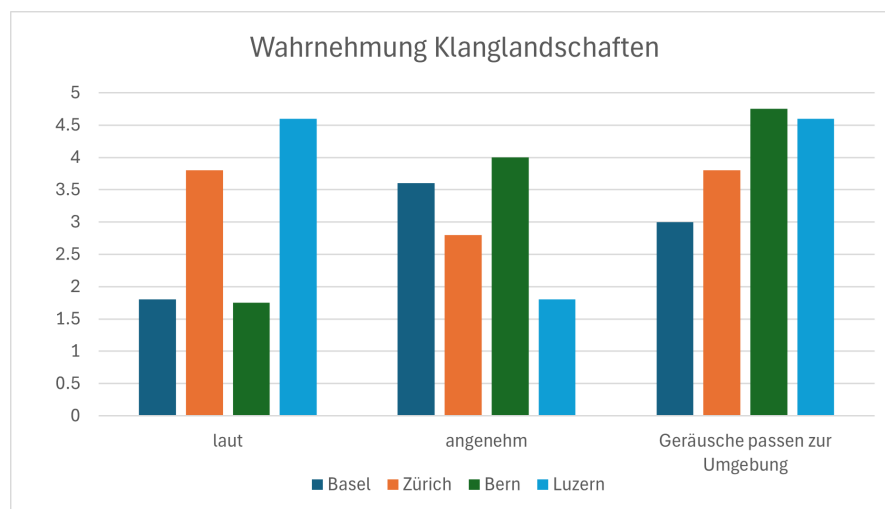


Abbildung 77: Durchschnittliche Zustimmung zu den Kategorien «laut», «angenehm» und «passend»

Basel und Bern haben tiefere Werte bei «laut» und dafür die höchsten Werte bei «angenehm». Zürich und Luzern haben hohe Werte bei «laut» und tiefere Werte bei «angenehm». Die Differenz von «laut» und «angenehm» ist bei Luzern jedoch stärker als bei Zürich. Luzern wird als noch etwas lauter und dadurch als noch etwas weniger

angenehm wahrgenommen.

Basel und Bern haben die grösste Unterscheidung in der Kategorie «passend». Gründe dafür werden in der Auswertung der Dialoge ersichtlich.

5.3.3 Wahrnehmung Klanglandschaften - Soundscape

Die Empfindung der Klanglandschaft anhand der an die Soundscape angelehnten Kategorien (vgl. Kapitel 5.1) wurde durch die Teilnehmer:innen ebenfalls auf einer Skala von 1 (trifft überhaupt nicht zu) bis 5 (trifft absolut zu) verortet. Für die Auswertung wurden wiederum die Skalenwerte durch die Summe der Teilnehmer:innen geteilt.

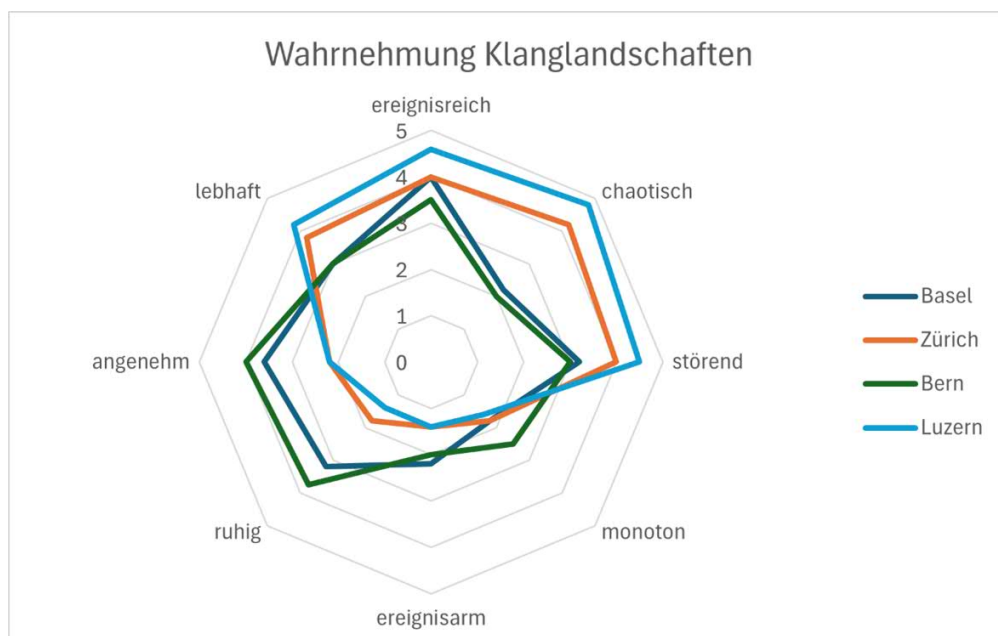


Abbildung 78: Durchschnittliche Zustimmung zu den Soundscape-Kategorien

Auch hier zeigen sich die Ähnlichkeiten zwischen Basel und Bern sowie zwischen Zürich und Luzern. Basel und Bern haben im vorherigen Diagramm hohe Werte bei «ruhig» und «angenehm» erhalten. Dies deckt sich mit den hier vorliegenden Daten. Die Klanglandschaften in Zürich und Luzern sind lebhaft, ereignisreich, chaotisch und störend. Eine weitere auffällige Differenz zu Basel und Bern ergibt sich in der Kategorie «chaotisch». Bei «ereignisreich» landen Zürich und Basel auf demselben Wert. Eine eher ruhige und angenehme Klanglandschaft kann also auch ereignisreich sein.

5.4 Ergebnisse Audio-Analyse

Die nachträgliche Bewertung von Audioaufnahmen hat sich als wenig sinnvoll herausgestellt. Diese Erkenntnis muss differenziert werden: Die Bewertung eines Klangraumes wird massgeblich durch weitere sensorische Einflüsse geprägt. Insofern ist es einleuchtend, dass eine solche Bewertung ausschliesslich über Audioaufnahmen nicht möglich ist. Es funktioniert allerdings recht gut, wenn die Testpersonen den Klangraum bereits vor Ort bewertet haben. Die verschiedenen klangräumlichen Eigenschaften lassen sich auch aus der Erinnerung des Raums recht gut bewerten. Allerdings ergibt sich daraus eine rein deskriptive Beschreibung der Unterschiede zur Situation während der Bewertung vor Ort. Diese Aussagen sind nur sehr bedingt hilfreich für eine Beschreibung des Klangraums. Aus diesem Grund werden die Aufnahmen als reine Dokumentation betrachtet. Es wäre allerdings sinnvoll, parallel zur Erhebung vor Ort ebenfalls Audioaufnahmen nach denselben Qualitätskriterien zu erstellen, die eine Vergleichbarkeit zulassen. Tatsächlich wurden diese Aufnahmen gleichzeitig zur Gesprächsaufzeichnung verwendet, so dass die Vergleichbarkeit allenfalls erschwert ist.

Fazit: Es wird empfohlen, zukünftig auf die Zeitreihe der Audioaufnahmen zu verzichten und nur den Erhebungszeitraum zu dokumentieren.

5.5 Ergebnisse Begehung im Dialog

Die Aufzeichnungen der Dialoge wurden für die Auswertung zusammengefasst. Aus diesen Zusammenfassungen wurden anschliessend Aussagen zu positiven und negativen Eindrücken sowie zu Klanglandschaft und Akustik gesammelt. Die Kategorienbildung fand induktiv anhand der durch die Teilnehmer:innen eingebrachten Aspekte statt. Im Folgenden werden diese Ergebnisse überblicksartig dargestellt. Die Interpretation der Auswertung findet im Fazit für jedes Untersuchungsobjekt statt.

5.5.1 Zürich, Zwickyareal Ost

Positive Eindrücke

- Vielfalt und Architektur: Der Ort wird für seine Vielfalt und die asymmetrische und dadurch interessante Gestaltung geschätzt. Besonders das Grün und die Ent-

deckungsmöglichkeiten über verschiedene Winkel und Ebenen tragen zur positiven Wahrnehmung bei.

- **Naturnahe Atmosphäre:** Die naturnahe Umgebung und das durchdachte, konsequente Konzept bieten eine angenehme Atmosphäre. Die Verwendung einfacher Materialien und die Architektur, die an Upcycling oder Baumhäuser erinnert, finden Anerkennung.
- **Luftige und lebendige Atmosphäre:** Der Raum wird als luftig, lebendig und einladend wahrgenommen. Die einfache Balkonkonstruktion trägt zu dieser Wahrnehmung bei.
- **Anregung zu Aktivitäten:** Der Ort wird als anregend für kreative Aktivitäten wie Malen oder Musizieren beschrieben. Die bestehende Nutzungsvielfalt und die Geräuschkulisse wirken einladend, um selbst aktiv zu werden, ohne sich ausgestellt zu fühlen.
- **Zonierung:** Während der erste Standpunkt als Familienort und prägend für die Siedlung wahrgenommen wird, erweitert der dritte Standpunkt diesen Blick. Hier ist der Ort für die Erwachsenen mit Einkehrmöglichkeiten und Grossstadtfeeling.

Negative Eindrücke

- **Baustellenästhetik:** Durch die Verwendung günstiger Materialien (Sichtbeton, Maschendraht, Balkongeländer) entsteht die Wirkung einer Baustelle. Die Gestaltung erinnert an Brutalismus, die Verwendung von Beton wirkt hart. Dies wird jedoch durch die Begrünung und die Einpassung in ein konsequentes Konzept aufgewertet.

Geräusche und Akustik

- **Lärm:** Der Verkehrslärm und plötzliche laute Geräusche (z. B. von Strassen oder spielenden Kindern) werden als störend und anstrengend empfunden und beeinträchtigen die Aufenthaltsqualität erheblich. Besonders der Verkehrslärm wird als dominierend wahrgenommen. Beim letzten Standpunkt kommt der Lärm des Zugverkehrs dazu, was für einige störender ist, als das konstante Rauschen des Strassenlärms. Der Lärm von spielenden Kindern wurde von einigen Teilnehmer:innen als besonders störend empfunden, was den Wunsch, dort zu wohnen, negativ beeinflusste.
- **Mangel an Ruhe:** Der hohe Geräuschpegel, besonders von der Strasse, erschwert eine entspannende Atmosphäre und das Finden von Ruhe. Einige Teilnehmer:innen könnten sich nicht vorstellen, den Ort für längere Aufenthalte zu nutzen.

- Erwartung: Die Klanglandschaft entsprach grösstenteils den Erwartungen, jedoch wurde der Lärmpegel stärker und störender wahrgenommen, als in Bezug auf die naturnahe Gestaltung erwartet. Laute Stimmen und Musik wurden als passend zum Raum erwähnt.

Fazit:

Die positiven Eindrücke des Ortes beruhen auf der architektonischen, interessanten Gestaltung, der naturnahen Atmosphäre und der Anregung zu Aktivitäten. Die negativen Aspekte konzentrieren sich vor allem auf die Lärmbelastung durch Verkehr und Kinderlärm, die die Aufenthaltsqualität und den Wunsch nach einem längeren Aufenthalt beeinträchtigen. Aufgrund der Lärmbelastung würde keine*r der Teilnehmenden in der Siedlung wohnen wollen.

5.5.2 Basel, Erlenmatt Ost**Positive Eindrücke**

- Vielfalt: Die Materialvielfalt, darunter Holz, Stein und Pflanzen, wird als positiv wahrgenommen und vermittelt einen naturnahen Eindruck.
- Biodiversität: Die Präsenz von Insekten (Grillenzirpen) in der Stadt wird als wichtiger Aspekt des Aussenraums gelobt.
- Architektur: Die versetzte Anordnung der Häuser wird als ästhetisch ansprechend und angenehm empfunden.
- Lebendigkeit: Die Geräuschkulisse des Raumes trägt zu einem Gefühl von Lebendigkeit bei, was die Aufenthaltsqualität fördert. Der Innenraum wirkt nicht durchgeplant, was für einige Raum für eigene Ideen schafft.

Negative Eindrücke

- Widersprüchlichkeit: Der Ort vermittelt einen widersprüchlichen Eindruck. Obwohl er Potenzial hat, wirkt er teilweise leblos, «steinig» und «monoton» und nicht wirklich einladend. Er strahlt eine Homogenität aus, die zweifeln lässt, ob und welche Aneignungen erlaubt sind. Grillstellen und Schattenplätze sind zwar vorhanden. Es wird jedoch auch bemerkt, dass nur wenige Sitzplätze vorhanden sind. Dies wirft die Frage auf, ob das bewusst so gewählt wurde. Obwohl der Ort anfänglich anziehend wirkt, lädt er nicht alle Teilnehmenden zum längeren Verweilen ein.

- Unvollständiger Versuch: Der Versuch, einen natürlichen, nicht-urbanen Raum zu schaffen, wird als nicht vollständig gelungen angesehen. Die Verwendung von natürlichen Elementen spiegelt sich zu wenig in Architektur und Setzung wider. Die Kubaturen werden als zu gross angesehen. Die Frage taucht auf, ob die Biodiversität und Vielfalt der «grünen Mitte» gewollt, oder eine Folge mangelnder Pflege sind. Es fehlt ein «integriertes» Konzept.
- Fehlender industrieller Charakter: Der frühere industrielle Charme des Ortes wird vermisst. Die geraden Häuser lassen den Ort zu sauber wirken. Zwar gefällt die grüne Mitte, es wird aber mehr Wildheit erwartet.

Geräusche & Akustik

- Erwartete Geräusche: Typische Geräusche, wie Kindergeschrei, Stimmen von Balkonen und Haushaltsgeräusche (z.B. Staubsauger, Radio) werden hier erwartet. Diese Geräusche fehlen zunächst, finden sich jedoch, nachdem der Standpunkt gewechselt wird.
- Überraschende Naturgeräusche: Das Zirpen von Grillen überrascht und unterstreicht die naturnahe Atmosphäre. Diese leisen Geräusche machen den Ort für einige ruhig.
- Gebirgsakustik: Die Akustik wird mit einem Gebirge verglichen, da laute Geräusche stark präsent sind, während leisere Geräusche gedämpft wahrgenommen werden.
- Überfrachtung: Auch wenn die Geräuschkulisse als angenehm beschrieben wird, wird die Befürchtung geäußert, dass der Raum bei einer Zunahme von Geräuschen überladen wirken könnte.
- Geräuschhintergrund: Grundsätzlich wird die Akustik als angenehm beschrieben. Für einige ist der Strassenlärm sehr präsent, andere nehmen es nur als Grundrauschen wahr. Dieses konstante Rauschen wird auch positiv bewertet, da es eine angenehme Atmosphäre im Innenhof schafft. Dadurch getraut man sich eher, ein Gespräch zu führen, ohne Anwohner*innen dadurch zu stören.

Fazit:

Der Raum kombiniert eine interessante Vielfalt aus natürlichen Elementen und urbaner Umgebung. Positiv hervorzuheben sind die Biodiversität und die teils lebendige Geräuschkulisse. Dennoch bleibt der Gesamteindruck ambivalent: Einerseits sind gute Ansätze für eine naturnahe Atmosphäre vorhanden, andererseits mangelt es an Authentizität und einer einladenden, lebendigen Qualität. Die Akustik verstärkt den zwiespältigen Eindruck, da laute Geräusche dominieren und subtilere Klänge verloren gehen.

5.5.3 Luzern, Himmelrich 3

Positive Eindrücke

- Ästhetik und Vielfalt: Der Ort wird als familienfreundlich und optisch ansprechend beschrieben, mit angenehmen Farben, Grünflächen und einer allgemeinen Vielfältigkeit. Es können verschiedene Dinge entdeckt werden (z.B. Garten, Meer-schweinchen), was positiv hervorgehoben wird. Die Sitzplätze und die räumliche Aufteilung tragen zur Attraktivität bei.
- Öffentlicher Raum mit Privatsphäre: Der Platz bietet flexible Nutzungs- und Aneignungsmöglichkeiten, mit Schattenplätzen, einem Café und Bereichen, die sowohl privat als auch öffentlich wirken. Zudem wird die Barrierefreiheit und die generationsübergreifende Nutzbarkeit gelobt.

Negative Eindrücke

- Mangel an Grün: Die Grünflächen werden als zu gering bewertet, während die Fassaden als konform und wenig ansprechend empfunden werden.
- Betonlastige Gestaltung: Zu viel Beton und wenig abwechslungsreiche Materialien tragen zu einer unangenehmen Atmosphäre bei.

Geräusche & Akustik

- Hall und Lärmeinflüsse: Der Innenhof leidet unter einer konstanten Lärmbelastung («Dauerbeschallung») insbesondere durch die verschiedenen Nutzungen und einem starken Hall. Obwohl der Raum als geschlossen wahrgenommen wird, dringt der Schall von aussen in den Innenhof ein, was als unangenehm empfunden wird. Der Lärm sammelt sich und wird verstärkt («wie ein Lautsprecher»). Strassengeräusche sind präsent und fangen sich im Hof.
- Erwartete Geräusche: Die üblichen Geräusche (Strassenlärm, Familien, spielende Kinder) werden erwartet, jedoch in einer zu starken Intensität erlebt. Geräusche von Balkonen würden stärker erwartet. Es wird bemerkt, dass Naturgeräusche (Vögel, Blätterrascheln, Wind) im Moment der Begehung aufgrund des allgemeinen Lärmpegels nicht wahrgenommen werden.
- Lärmbelastung verringern: Vorschläge zur Verbesserung beinhalten eine Veränderung der Ausgänge, sodass der Lärm eher nach aussen statt nach innen geleitet wird. Auch eine Auflockerung der Fassadenstruktur und Symmetrie sowie andere

Bodenmaterialien könnten helfen. Zwar werden die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten befürwortet, es wird jedoch auch die Frage aufgeworfen, ob es auch ein Zuviel an gleichzeitigen Nutzungen gibt.

Fazit:

Der Raum bietet positive Elemente in Bezug auf Ästhetik, Familienfreundlichkeit und die Mischung aus privatem und öffentlichem Raum. Allerdings wird der Mangel an Grünflächen, die betonlastige Gestaltung und die problematische Akustik stark kritisiert. Besonders störend sind die konstante Beschallung, der Hall und das Eindringen von Geräuschen von ausserhalb der Siedlung in den Innenhof. Akustische Anpassungen und eine Veränderung der baulichen Gestaltung werden zur Verbesserung der Atmosphäre des Innenhofs vorgeschlagen.

5.5.4 Bern, Park Humboldtstrasse**Positive Eindrücke**

- Familienfreundlichkeit: Der Ort wird aufgrund des Sandkastens, Spielplatzes und der allgemeinen Familienfreundlichkeit positiv hervorgehoben. Ebenso wird als Vorteil gesehen, dass die Räume, die zur Nutzung einladen, nicht direkt an die Häuser grenzen. Auch die Möglichkeiten zur Müllentsorgung (Abfalleimer) tragen zur Nutzbarkeit insbesondere für Familien bei.
- Parkatmosphäre: Die zentrale Lage, die grosszügigen Grünflächen, die Weite und die Allee vermitteln eine angenehme, öffentliche Parkatmosphäre mit genügend Möglichkeiten zum Verweilen. Es gibt keinen klaren Abschluss des Raums nach aussen, was den offenen Charakter verstärkt. Dadurch fühlt man sich beim Besuch nicht wie ein Eindringling.
- Nutzungsvielfalt: Die Kombination aus zwei Spielplätzen und Wiesenflächen sowie die Grösse des Innenhofs werden positiv für die Möglichkeiten der Nutzung angesehen. Es gibt Raum für eigene Ideen.

Negative Eindrücke

- Langweilige Wohnumgebung: Auch wenn die Grösse und die zentrale Lage positiv bewertet werden und der Innenhof grundsätzlich als schön beschrieben wird, empfinden einige die Umgebung als pragmatisch und langweilig. Es passiert wenig und es gibt nicht viel zu entdecken. Dies ermöglicht zwar ruhige Tätigkeiten (z.B. ein Buch lesen) mindert jedoch die Attraktivität des Innenhofes und die Wohnqualität.

- Zonierung: Die Trennung der Gärten vom Park wird teilweise kritisiert. Diese Abtrennung verhindert Begegnungen zwischen Parkbesuchenden und Gärtner*innen. Es wird vorgeschlagen, den Raum stärker zu unterteilen und Bereiche wie eine Feuerstelle und Getränkeangebote zu integrieren. Zudem fehlt im Hinblick auf die Nutzung des Spielplatzes eine Toilette.
- Eingangsbereich: Der Eingang zur Strasse wird teilweise als zu gross empfunden (fehlende Begrenzung nach Aussen).

Geräusche & Akustik

- Erwartete Geräusche: Es wird damit gerechnet, dass Geräusche aus den Wohnungen und von spielenden Kindern im Aussenraum dominieren. Man erwartet bellende Hunde und mehr Kinder. Autos erscheinen durch die zentrale Lage als erwartete Geräuschquelle, Flugzeuge dafür weniger.
- Vielfalt der Geräusche: Die Geräuschkulisse ist vielfältig - eine Mischung aus Stadt- und Spielplatzgeräuschen. Positiv hervorgehoben wird die Wahrnehmung von Blättern im Wind und das Plätschern des Brunnens, welcher andere Geräusche überdeckt.
- Akustisches Zentrum: Bei Standpunkt 4 wird der Raum als akustisches Zentrum wahrgenommen, in dem fast alles hörbar ist. Dadurch wirkt der Ort unentspannt.
- Hall und Strassengeräusche: Strassengeräusche sind zwar aus allen Richtungen hörbar, werden jedoch auch als Klanghintergrund und nicht aufdringlich beschrieben. Der Raum wird von einigen erst als hallend beschrieben und es wird befürchtet, dass Geräuschemissionen weit getragen werden. Dieser Eindruck relativiert sich aber mit der Zeit. Für die meisten ist der Aufenthalt im Innenhof angenehm.

Fazit:

Der Raum wird durch die Familienfreundlichkeit, die Parkatmosphäre und die Vielfalt an Nutzungsmöglichkeiten positiv wahrgenommen. Es gibt jedoch Kritik an der Spannungslosigkeit und der Trennung von Park und Garten. Die akustische Umgebung wird als eher angenehm und unaufdringlich beschrieben, jedoch zunächst auch als hallend. Akustisch ist der Raum offen, und Veränderungen in der Lautstärke der Geräusche dominieren die Wahrnehmung je nach Standort im Hof.

5.6 Zusammenfassung

Im Folgenden findet die Zusammenführung der Auswertungen aus dem Fragebogen (Kapitel 5.3) und den Dialogen (Kapitel 5.5) für jedes Untersuchungsobjekt statt.

5.6.1 Zürich, Zwickyareal Ost: naturnah und anregend, aber laut

In Zürich dominieren Strassen- und Spielplatzlärm. Allgemein ist der Aussenraum belebt, was zu verschiedenen Geräuschemissionen führt. Bei der Wahrnehmung der akustischen Umgebung erhält der Raum dadurch auch einen hohen Wert bei «laut». Er ist – ähnlich wie Basel – lebhaft und ereignisreich, aber auch chaotisch und störend.

Dies deckt sich auch mit den Daten aus den Dialogen: Zwar werden die Naturnähe, die Vielfalt in der Gestaltung sowie Aneignungs- und Nutzungsmöglichkeiten positiv hervorgehoben. Die Lärmbelastung mindert die Aufenthaltsqualität jedoch erheblich, sodass die vielgestaltigen Qualitäten in den Hintergrund rücken.

5.6.2 Basel, Erlenmatt Ost: angenehm aber widersprüchlich

Die akustische Umgebung in Basel wird tendenziell als ruhig und angenehm bewertet, obwohl dort der höchste Wert bei Stimme & Instrument verzeichnet wird. Die Akustik im Innenhof ist ereignisreich, aber weniger störend als in Zürich oder Luzern. Das Grundrauschen der Autobahn stört kaum oder wird sogar als positiver Einfluss auf die Aufenthaltsqualität genannt. Hervorzuheben ist der geringe Wert bei «passend». Erwartet wurde eine grössere Vielfalt in den Geräuschemissionen durch Anwohner:innen und Nutzer:innen. Die Widersprüchlichkeit findet sich auch in der Gestaltung: es wurden bewusst natürliche Elemente und Materialien verwendet und Naturgeräusche (z.B. Grillenzirpen) sind wahrnehmbar. Dies wird jedoch in der Architektur zu wenig fortgesetzt und erwartete Aneignungsspuren fehlen. Der Ort wird als steinig und monoton beschrieben. Gleichzeitig wird die Frage gestellt, ob die Biodiversität und Vielfalt der grünen Mitte gewollt oder eine Folge mangelnder Pflege sind. Der Innenhof lädt zur Aneignung ein, aber es bleibt unklar, was man darf.

5.6.3 Luzern, Himmelrich 3: lebhaft, aber betonlastig und Dauerbeschallung

Luzern ist laut, chaotisch, störend, ereignisreich und lebhaft. In den Dialogen wird von Dauerbeschallung gesprochen. Die betonlastige Gestaltung, die Setzung der Gebäude und der Mangel an Grün tragen zu dieser Wahrnehmung bei. Im Gegensatz zu Zürich trägt hier der Strassenlärm nicht so stark zur Geräuschkulisse bei. Obwohl die vielfältigen

Nutzungsmöglichkeiten geschätzt werden, stellt sich hier die Frage, ob weniger auch mehr sein könnte.

5.6.4 Bern, Park Humboldtstrasse: naturnah, angenehm, aber langweilig

Obwohl Bern den zweithöchsten Wert bei «motorisiert» erhält, wird der Ort als angenehm und ruhig beschrieben. Gleichzeitig verzeichnet er auch den höchsten Wert bei «monoton». Naturgeräusche werden wahrgenommen, dafür wenig Stimmen oder Haushaltgeräusche. Dies deckt sich mit den Rückmeldungen im Dialog: es passiert wenig und es gibt wenig zu entdecken im ruhigen Park, was das Erlebnis negativ beeinflusst. Die Geräusche passen zum Ort (höchster Wert) – die ruhige/ monotone Atmosphäre spiegelt sich in der Geräuschkulisse wider.

5.7 Übergreifende Erkenntnisse

Aus diesen fallspezifischen Erkenntnissen können übergeordnete Hinweise für die Planung von Klangräumen gezogen werden:

«(...) in der Mitte ein bisschen und dann zack! Die graden Häuser rundherum.»

- Grün und Naturnähe (auch akustisch) werden geschätzt. Zieht sich die Naturnähe jedoch nicht konsequent in der Gestaltung durch, wird das Erlebnis widersprüchlich und die Aufenthaltsqualität wird gemindert (Bsp. Basel).

«Wenn es nicht so laut wäre, wäre es schön.»

- Positive Qualitäten die durch die Gestaltung, die Belebung sowie Aneignungs- und Nutzungsmöglichkeiten des Raums entstehen, machen eine zu hohe Lärmbelastung nicht wett. Zwar gibt es individuelle Bewertungen von Geräuschquellen (Strassenlärm, spielende Kinder), die Intensität und Dauer der Beschallung sind jedoch entscheidend für die Bewertung der Aufenthaltsqualität (Bsp. Zürich, Luzern).

«Ist langweilig nach einem stressigen Tag vielleicht besser?»

«Für dich vielleicht schon.»

- Eine angenehme Geräuschkulisse macht noch keinen angenehmen Innenhof. Je nach Lebensentwurf wird die Wohnumgebung als langweilig bezeichnet, wenn anregende Elemente und eine lebendige akustische Umgebung fehlen (Bsp. Bern). Genauso können Wohnumgebungen durch die starke Präsenz von spielenden Kindern

eine familienfreundliche Atmosphäre schaffen, die nicht zu jeder Lebensphase und Wohnvorstellung passen (Bsp. Zürich). Die akustische Umgebung trägt dazu bei, dass man sich willkommen fühlt, oder eben nicht.

5.8 Methodenkritik der qualitativen Erhebungen

Die Nutzenden sind untrennbar mit den Nutzungen verbunden. Eine reine Beschreibung der beiden ist jedoch für die Klangraumwahrnehmung eine zu neutrale Aussage. Erst die Bedeutung, welche die Befragten (Nutzenden) den anderen Nutzenden und den Nutzungen in Bezug auf ihre Perspektive geben, gibt Hinweise auf die Klangraumwahrnehmung. Die Erhebung durch eine ausgewählte Gruppe an Testpersonen, welche die Perspektive von Bewohnenden der Innenhöfe einnehmen, hat sich grundsätzlich bewährt. Gerade die Trennung in die individuelle Wahrnehmung der Klangsituation und eine dialogische Betrachtung in der Gruppe führt zu differenzierten Ergebnissen und zur Integration unterschiedlicher Sichtweisen.

Die Bewertung von Audioaufnahmen anderer Erhebungszeitpunkte ohne den direkten Raumbezug hat sich nicht bewährt. Zwar wurden die zuvor direkt erlebten Räume in den Audioaufnahmen anderer Erhebungszeiträume durchaus wieder erkannt und die Verknüpfung gelang, neue oder zusätzliche Erkenntnisse konnten aus diesen Bewertungen aber nicht generiert werden. Bei einer Reduktion auf eine reine Bewertung von Audioaufnahmen würde zudem der Raumbezug mit anderen Sinnen wegfallen, was die Aussagekraft unzulässig einschränken würde.

Diese Erhebung ist bei Räumen, die sich durch unterschiedliche Bereiche auszeichnen, für jeden Bereich einzeln durchzuführen. Im Projekt wurden die Nutzungen und die Nutzenden sehr offen und auch episodisch beschrieben. Im Hinblick auf eine Objektivierung / Standardisierung wäre die Erhebung zu einem gewählten Zeitpunkt mit Auszählung bspw. der Nutzenden zu prüfen. Anhand einer geeigneten Kategorienbildung (siehe erste Kategorisierungsansätze im Projekt) könnten die Möglichkeiten einer Standardisierung weiterentwickelt werden.

6 Datenanalyse und Diskussion

6.1 Analyse und Diskussion zur technischen Erhebung

6.1.1 Plausibilität und Aussagekraft der Resultate

Die meisten Randbedingungen (wie bspw. meteorologische Variablen) der verschiedenen Messungen sind ähnlich, was eine bessere Vergleichbarkeit zulässt.

Die meisten, erhobenen Werte erscheinen nach Betrachtung plausibel. Einzig die aus der Impulsantwortmessung extrahierten Werte erscheinen unplausibel. Dies ist insbesondere auf die Art der Messung der Impulsantwort zurückzuführen. Diese wurde mit einem gerichteten Lautsprecher durchgeführt, was insbesondere die Anregung vom diffusen Schallfeld bzw. von Reflexionen reduziert. Zudem wurden, um die Lärmbelastung auf die Anwohnenden zu reduzieren, relativ leise Anregungspegel benutzt. Wie sich in der Nachbearbeitung herausstellte, waren diese Anregungspegel zu leise, so dass der Störpegel der Impulsantwort so hoch ist, dass gewisse Metriken nicht daraus extrahiert werden konnten. Die **EDT**- und viele der **T20**-Werte gehören zu diesen Metriken und wurden rapportiert, jedoch aus weiteren Analysen ausgeschlossen. Ebenfalls potentiell davon betroffen ist die Auswertung des **Echokriteriums** nach Dietsch und Kraak. Dieses zeigte bei keiner Messung ein Echo, welches über dem festgelegten Schwellwert liegt, obwohl insbesondere im Objekt in Luzern Echos hörbar (wenn auch nicht direkt störend) waren. Da keine Variation in diesem Wert auftauchte, wurde er nicht rapportiert. Das **Stärkemass G** wurde nicht ausgewertet, da hierfür eine ungerichtete Schallquelle angewendet werden muss. **L10-L90** wurde nicht zusätzlich ausgewertet, da die Perzentilwerte L10 und L90 bereits separat statistisch ausgewertet wurden. Die **TFSD** Auswertung ergab eine grosse Menge Daten mit geringer Variabilität zwischen Positionen und Objekten. Aufgrund mangelnder Zeit konnte zusätzlich auch keine geeignete Methode zur sinnvollen Reduktion dieser Daten entwickelt werden. Die Rauigkeitswerte aller Orte waren sehr tief und ohne grosse Variation, weswegen sie aus der weiteren Analyse ausgeschlossen wurden, der Vollständigkeit halber aber dennoch rapportiert wurden. Der **Anteil Naturmerkmale** wurde nicht rapportiert, da die Zeit fehlte eine geeignete Definition natürlicher Merkmale für einen Bildanalysealgorithmus zu finden.

6.1.2 Zürich, Zwickyareal Ost

Die **Schalldruckpegel** in Zürich sind mit $L_{Aeq} > 50$ dB(A) insgesamt hoch. Dies insbesondere aufgrund des hohen Strassenverkehrsaufkommens rund um das Objekt. Mit

einem C- bis A-Wert von ca. 8 dB bzw. Spectral Slope zwischen -2.7 und -3.6 dB und Schärfe-Werten zwischen 1.44 und 1.93 acum ist der Anteil tieffrequenter Geräusche eher tief. An gewissen Orten und zu gewissen Zeiten werden Spitzenpegel von $L_{AFmax} = 85.5$ dB(A) erreicht. Im Oktavbandspektrum sind keine starken, tonalen Anteil zu erkennen. Die Tonalitätswerte sind am Vormittag und Mittag eher tief und steigen gegen Nachmittag und Abend an. Die MFCC zeigen ein ähnliches Bild, insbesondere bei den Positionen nahe des Spielplatzes. Dies ist hauptsächlich auf die spielenden Kinder, welche am Nachmittag und Abend kamen, zurückzuführen.

Die **Nachhallzeit RT60** variiert innerhalb des Objekts beträchtlich. Sowohl in den Einzahlwerten, welche sich im Bereich $RT60 = 0.85 - 1.69$ s bewegt, als auch in der spektralen Verteilung. Einige Positionen haben stark längere Nachhallzeiten in den tiefen Frequenzen. An Position 1 ist sogar ein starker Unterschied abhängig von der Richtung sichtbar. Diese Resultate sind anhand der unterschiedlichen Umgebungen und Materialisierungen, sowie der Unterschiede der vorhandenen Oberflächen an verschiedenen Positionen, nicht weiter erstaunlich. Die Nachhallzeit wurde subjektiv nicht als besonders lange oder störend empfunden.

Der **Sprachübertragungsindex STI** ist an allen Orten, relativ unabhängig von der Quelle-Empfänger Distanz relativ schlecht (Durchschnittswerte unterhalb D-Qualifikationsband). Dies ist hauptsächlich auf den hohen Hintergrundlärm zurückzuführen. Dies ist hinsichtlich Privatsphäre von Unterhaltungen vorteilhaft, jedoch ist der benötigte Stimmaufwand, um sich auch auf nahe Distanzen zu unterhalten erhöht.

Hinsichtlich der **Farbanteile** ist das Objekt ebenfalls divers. Einige Sichten haben kaum Grünanteile ($> 4\%$), andere haben hohe Anteile ($> 30\%$). Die Blauanteile sind tief.

6.1.3 Basel, Erlenmatt Ost

Die **Schalldruckpegel** in Basel bewegen sich mit 53 dB(A) $> L_{Aeq} > 47$ dB(A) in einem kleinen und im Vergleich zu Luzern und Zürich tiefen Rahmen. Mit einem C- bis A-Wert von bis zu 20 dB und Schärfe-Werten zwischen 1.44 und 1.65 acum ist der Anteil tieffrequenter Geräusche eher hoch. Die Spectral Slope ist mit Werten zwischen -3 und -3.3 dB ähnlich wie in Zürich. Der Spitzenpegel von $L_{AFmax} = 73.9$ dB(A) ist im Vergleich zu Zürich und Luzern eher tief. Hinsichtlich Tonalität verhält es sich in Basel ähnlich wie in Zürich. Die MFCC zeigen im Verlauf des Tages zunehmend tonhaltige Schalle, welche auf die spielenden Kinder, welche am Nachmittag und Abend kamen, zurückzuführen sind.

Die **Nachhallzeit RT60** ist innerhalb des Klangraums, abgesehen von Position 5, relativ ähnlich. Sowohl in den Einzahlwerten, welche sich im Bereich $RT60 = 1.11 - 1.54$ s bewegt, als auch in der spektralen Verteilung. Alle Positionen haben gegen die tiefen und auch hohen Frequenzen längere Nachhallzeiten. An Positionen 1 und 2 sind sogar Unterschiede abhängig von der Richtung sichtbar. Der spektrale Verlauf ist anhand der Materialisierung zu erwarten. Die Nachhallzeit wurde subjektiv nicht als besonders lange oder störend empfunden.

Der **Sprachübertragungsindex STI** ist für die Distanz von 1 m sehr gut (Durchschnittswerte oberhalb A-Qualifikationsband). Für die Distanz von 4 m sinkt der STI auf tiefere Werte (Durchschnittswerte teilweise stark unterhalb A-Qualifikationsband). Dieses Verhalten ist sowohl hinsichtlich Verständlichkeit auf kurze Distanzen als auch Privatsphäre auf weitere Distanzen vorteilhaft.

Hinsichtlich der **Farbanteile** ist das Objekt als grün einzustufen. Alle Sichten haben Grünanteile ($> 16\%$), gewisse sogar ($> 35\%$). Die Blauanteile sind auch hier tief. Der hohe Wert von ca. 13% bei einer Sicht ist fehlerhaft einzustufen, da sie die Reflexionen des Himmels (welcher von der Berechnung ausgeschlossen werden sollte) einschliessen.

6.1.4 Luzern, Himmelrich 3

Die **Schalldruckpegel** in Luzern sind am Vormittag und Mittag mit grösstenteils $L_{Aeq} < 50$ dB(A) eher tief. Am Nachmittag und Abend steigen diese aufgrund der spielenden Kinder bis maximal 71 dB(A) an. Dasselbe gilt für die Spitzenpegel, welche sich am Vormittag und Mittag bei tiefen Werten $L_{AFmax} < 70$ dB(A) aufhalten, am Nachmittag und Abend aber höher bis $L_{AFmax} = 105$ dB(A) steigen. Die besonders hohen Pegel traten aufgrund von Kindern, welche direkt ins Aufnahmegerät schrien, auf. Mit einem C- bis A-Wert zwischen 2 bis 10 dB und Schärfe-Werten grösstenteils > 2 acum ist der Anteil hochfrequenter Geräusche eher hoch bzw. der Anteil tiefer Frequenzanteile ist tief. Es sind im Vergleich zu den anderen Objekten vergleichsweise hohe Tonalitätswerte bis zu $tu = 0.3$ vorzufinden, was sich auch in den MFCC zeigt. Dies ist wohl ebenfalls auf die teilweise (sehr nahe) schreienden Kinder zurückzuführen.

Die **Nachhallzeit RT60** ist innerhalb des Klangraums relativ unterschiedlich ($RT60 \approx 0.9 - 1.5$ s). Spektral gibt es keine typische Erhöhung der Nachhallzeiten zu tiefen Frequenzen. Unterschiede aufgrund der Empfängerichtung sind marginal. Die Nachhallzeit

wurde subjektiv als eher lange und störend empfunden, dies insbesondere aufgrund der teilweise hörbaren Echos. Jedoch ist wohl eher die Abwesenheit eines diffusen Reflexionszerfalls für die Hörbarkeit des Echos und damit auch die störende Wirkung verantwortlich.

Der **Sprachübertragungsindex STI** ist für die Distanz von 1 Meter an allen Orten, unabhängig von der Quelle-Empfänger Distanz nicht besonders gut (Durchschnittswerte zwischen A- und D-Qualifikationsband). Für die Distanz von 4 Metern ist die Sprachverständlichkeit durchwegs tief (unterhalb D-Qualifikationsband). Dies ist wohl zu gleichen Teilen auf die raumakustischen Verhältnisse und den Hintergrundlärm zurückzuführen. In der subjektiven Wahrnehmung war die Verständlichkeit über weite Distanzen tief, jedoch ergab sich trotzdem ein Gefühl von schlechter Privatsphäre, da auch weit entfernte Stimmen nah wirkten.

Hinsichtlich der **Farbanteile** ist das Objekt dank der drei grünen Inseln im Hof als eher grün einzustufen. Zwei Sichten, welche eher Richtung Fassade gewandt sind haben Grünanteile ($\approx 5\%$), die anderen drei Sichten haben Anteile ($> 15\%$). Die Blauanteile sind wie auch bei den anderen Objekten tief.

6.1.5 Bern, Park Humboldtstrasse

Die **Schalldruckpegel** in Bern bewegen sich abgesehen von einer Ausnahme mit

$$47 \text{ dB(A)} < L_{Aeq} < 55 \text{ dB(A)}$$

in einem kleinen und im Vergleich zu Luzern und Zürich tiefen Rahmen. Die Ausnahme an Position 3 hat um ca. 10 dB(A) höhere Pegel, aufgrund einer erwachsenen Person und einem Kind, welche sich während der Aufnahme direkt neben dem Messgerät unterhalten haben. Die C- bis A-Werte sind am Morgen eher tief bei ca. 12 dB und ab dem Mittag sehr hoch bei ca. 20 dB. Dies ist hauptsächlich auf künstliche Windgeräusche im Mikrofon zurückzuführen, welche ab dem Mittag auftraten und auch durch den Windschutz auf dem Mikrofon nicht genügend gedämpft werden konnten. Dies zeigt sich auch in den teilweise eher tiefen Spectral Slope Werten. Die psychoakustischen Schärfe-Werte sind ab Mittag entgegen der Erwartung aufgrund der Spectral Slope Werte jedoch tendenziell hoch (vielfach > 2 acum). Dies ist ebenfalls auf den Wind zurückzuführen, welcher ab Mittag ein oft auftretendes, hochfrequentes Blätterrauschen erzeugte. Die Spitzenpegel sind im Vergleich zu Zürich und Luzern tendenziell ebenfalls eher tief. Hinsichtlich Tonalität verhält es sich in Bern ähnlich wie an den anderen Orten mit zunehmenden Werten im

Verlauf des Tages. Die MFCC zeigen dies ebenfalls.

Die **Nachhallzeit RT60** ist bei mittleren und hohen Frequenzen innerhalb des Klangraums relativ ähnlich. In den tiefen Frequenzen zeigen sich sowohl zwischen Positionen als auch abhängig von den Richtungen grössere Unterschiede. Es zeigen sich Einzahlwerte zwischen $RT60 \approx 1.3 - 1.6$ s. Der spektrale Verlauf zeigt, wie dies typischerweise anzutreffen ist, höhere Nachhallzeiten bei tieferen Frequenzen. Die Nachhallzeit wurde subjektiv nicht als störend empfunden.

Der **Sprachübertragungsindex STI** ist stark abhängig von der Position innerhalb des Klangraumes. Die Werte bei der Distanz von 1 m sind für zwei Positionen sehr gut (Durchschnittswerte oberhalb A-Qualifikationsband), für zwei Positionen relativ schlecht ((Durchschnittswerte unterhalb D-Qualifikationsband). Für die Distanz von 4 m sinkt der STI auf tiefe Werte (Durchschnittswerte unterhalb D-Qualifikationsband). Die Privatsphäre ist also gegeben, wobei man nicht an allen Aufenthaltsorten eine gute Sprachverständlichkeit auf kurze Distanzen hat.

Hinsichtlich der **Farbanteile** ist das Objekt als sehr grün einzustufen, insbesondere im Vergleich zu den anderen Objekten. Alle Sichten haben Grünanteile ($> 50\%$), gewisse sogar ($> 75\%$). Die Blauanteile sind auch hier tief. Die höheren Werte sind auf den versehentlichen Einbezug des Himmels zurückzuführen.

6.1.6 Schalldruckpegel, Spektralverhalten und Tonalität über alle Objekte

Die Schalldruckpegel haben, abgesehen von Bern, alle einen ähnlichen Verlauf. Um die Mittagszeit ist es am leisesten, am Abend am lautesten. Der morgendliche Pegel besteht teilweise aus Lieferungen zu lokalen Geschäften, sowie dem Verkehrsaufkommen. Am Mittag herrscht üblicherweise weniger Verkehr und es sind wenige oder keine Menschen in den Innenhöfen anzutreffen. Am Nachmittag gibt es wieder ein normales Verkehrsaufkommen und teilweise schon Kinder mit Eltern. Am Abend gibt es üblicherweise eine grössere Menge an Kinder und Eltern, was den Pegel zusätzlich erhöht.

Die Spektren der Klangräume sind durch verschiedene Einflüsse bestimmt. Die hauptsächlichen Einflüsse hierbei waren Strassenlärm, Geräusche aufgrund des Windes, Kinder- und Erwachsenenstimmen, sowie Vogelgezwitscher. In geringerem Ausmass waren dies auch Flugzeugüberflüge oder Geräusche technischer Anlagen (tieffrequente Töne von Lüftungen oder hochfrequente Töne von Staubsaugern/Bohrmaschinen/etc.). In Zürich und Basel

waren absolut betrachtet lautere tieffrequente Geräusche vorhanden als in Luzern und Basel. Dies ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die Öffnungen bzw. Abschirmungen zu Strassen zurückzuführen. Der hochfrequente Anteil zeigt sich in den Schärfewerten, welche in Bern und Luzern höher waren als in Zürich und Basel. In Bern sind diese Werte insbesondere auf die Geräusche von Blätterrascheln zurückzuführen. In Luzern auf die unmittelbare Nähe von spielenden Kindern, sowie teilweise auch andere hochfrequente Geräuschquellen (quietschende Räder von Einkaufswagen, Staubsauger, etc.).

Hinsichtlich Tonalität war vor allem die Anwesenheit von Kindern entscheidend. Die MFCC-Werte sind höher, wenn Kinder da sind und jeweils am höchsten bei den Mikrofonen, welche am nächsten am Spielplatz waren. Andere Einflüsse in der Tonalität könnten Flugzeugüberflüge, Vogelgeräusche und Haushaltsgeräte gewesen sein. Eine Untersuchung über die Einflussgrösse wurde jedoch nicht durchgeführt.

6.1.7 Nachhallzeit über alle Objekte

Die Nachhallzeit lag über alle Objekte im Bereich zwischen $0.85\text{ s} < RT_{60} < 1.69\text{ s}$. Insbesondere in Zürich und Luzern wurde eine grosse Variation abhängig vom Ort innerhalb des Objekts festgestellt. Als störend wurde die Halligkeit einzig in Luzern empfunden, obwohl das Objekt im Vergleich mittlere bis tiefe Nachhallzeiten aufweist. Insbesondere wurde dort ein leichtes Echo festgestellt, welches jedoch nicht stark genug für die Erkennung im Echokriterium nach Dietsch & Kraak war. Anhand der Resultate wurde die Hypothese formuliert, dass ein diffuses Ausklingen von Geräuschen im Innenhof, insbesondere in Anwesenheit von weiteren, maskierenden Geräuschen als wenig störend empfunden wird. Hingegen werden einzelne Echos, insbesondere in Abwesenheit von maskierenden Hintergrundgeräuschen als störend empfunden. Somit wäre die Nachhallzeit ein weniger wichtiger Faktor bei der Sprachqualität als störende Echos. Diese Hypothese wird von den Resultaten der STI-Messungen gestützt.

6.1.8 Sprachverständlichkeit über alle Objekte

Die Resultate der Sprachverständlichkeitsmessungen zeigen, dass diese an erster Stelle vom Hintergrundlärm und an zweiter Stelle von den raumakustischen Gegebenheiten beeinflusst werden. In Zürich, wo besondere hohe Hintergrundpegel auftraten ist die Sprachverständlichkeit deutlich schlechter als bspw. in Basel. Auch in Bern wurden die Orte mit tieferer Sprachverständlichkeit vom lauten Blätterrauschen in den entsprechenden Frequenzen beeinflusst. In Luzern scheinen die (nicht besonders guten)

Sprachverständlichkeitswerte unabhängig von den während der Messung aufgezeichneten (eher tiefen) Schalldruckpegeln zu sein. Daher wird vermutet, dass diese hauptsächlich von den (nachteilhaften) raumakustischen Bedingungen beeinflusst wurden.

6.2 Vergleich der subjektiven und objektiven Daten

Im folgenden werden beispielhaft einige Zusammenhänge zwischen den objektiv und subjektiv erhobenen Daten aufgeführt. Dabei wurde bewusst auf die Pegelwerte verzichtet, da sie nicht nur zu unterschiedlichen Tageszeiten, sondern auch zwischen der objektiven Messung und subjektiver Befragung (in unterschiedlichen Monaten) variieren.

6.2.1 Grünanteil

Es wurde untersucht, inwieweit die subjektiven Bewertungen der vier Untersuchungsobjekte mit dem Grünanteil in % korrelieren. Tabelle 37 zeigt starke Zusammenhänge. Innenhöfe mit höherem Grünanteil wurden als angenehmer, beruhigend und weniger laut sowie weniger störend empfunden.

Tabelle 37: Korrelationen des Grünanteils (%) mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.

	Grünanteil (%)	
	r	p
Hier ist es laut	-.585**	.008
Hier ist es akustisch angenehm	.555*	.014
Die Geräusche passen zur Umgebung	.253	.295
ereignisreich (ISO)	-.303	.208
chaotisch (ISO)	-.626**	.004
lästig / störend (ISO)	-.575**	.010
monoton (ISO)	.495*	.031
ereignisarm (ISO)	.233	.338
ruhig / beruhigend (ISO)	.611**	.005
angenehm (ISO)	.522*	.022
aufregend / lebhaft (ISO)	-.335	.162
Bewertung nach Cercle Bruit	.782**	<.001

Exemplarisch sind die durchschnittlichen subjektiven Bewertungen für die Items *ruhig* / *beruhigend* (oben) und *lästig* / *störend* (unten) in Abbildung 79 als Funktion des Grünanteils (%) dargestellt. Während ein höherer Grünanteil im Vergleich zu keinem oder geringem Grünanteil mit besseren subjektiven Bewertungen assoziiert wird, ist ein Sättigungseffekt erkennbar.

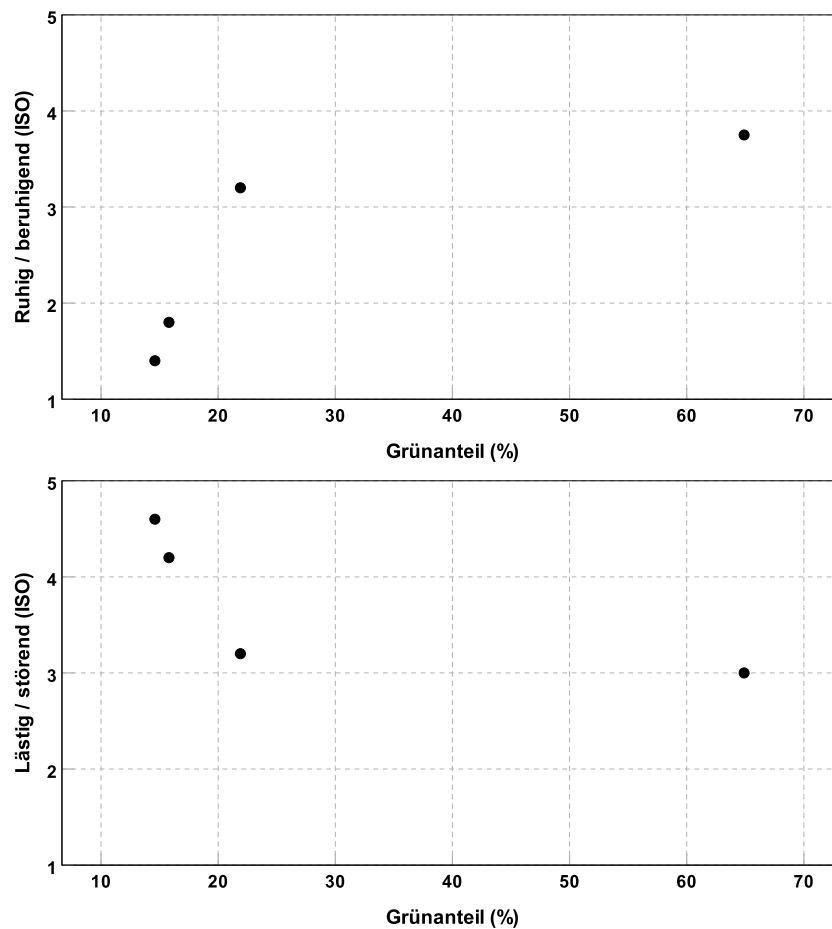


Abbildung 79: Durchschnittliche subjektive Bewertungen für die Items *ruhig / beruhigend* (oben) und *lästig / störend* (unten) als Funktion des Grünanteils (%).

6.2.2 STI

Der Zusammenhang zwischen den subjektiven Bewertungen und dem gemessenen Sprachverständlichkeitsindex (Sprachübertragungsindex) STI (am Befragungspunkt) wurde Anhand von Korrelationen untersucht (s. Tabelle 38).

Tabelle 38: Korrelationen des STI mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.

	STI	
	r	p
Hier ist es laut	-.863**	<.001
Hier ist es akustisch angenehm	.741**	<.001
Die Geräusche passen zur Umgebung	.090	.714
ereignisreich (ISO)	-.578**	.010
chaotisch (ISO)	-.884**	<.001
lästig / störend (ISO)	-.786**	<.001
monoton (ISO)	.420	.074
ereignisarm (ISO)	.409	.082
ruhig / beruhigend (ISO)	.772**	<.001
angenehm (ISO)	.660**	.002
aufregend / lebhaft (ISO)	-.503*	.028
Bewertung nach Cercle Bruit	.943**	<.001

Exemplarisch sind die durchschnittlichen subjektiven Bewertungen für die Items *ruhig / beruhigend* (oben) und *lästig / störend* (unten) in Abbildung 80 als Funktion des STI dargestellt. Orte mit hohen STI-Werten (1 m) werden positiver bewertet. Dies war auch der Fall bei STI-Werten in einem Abstand von 4 m.

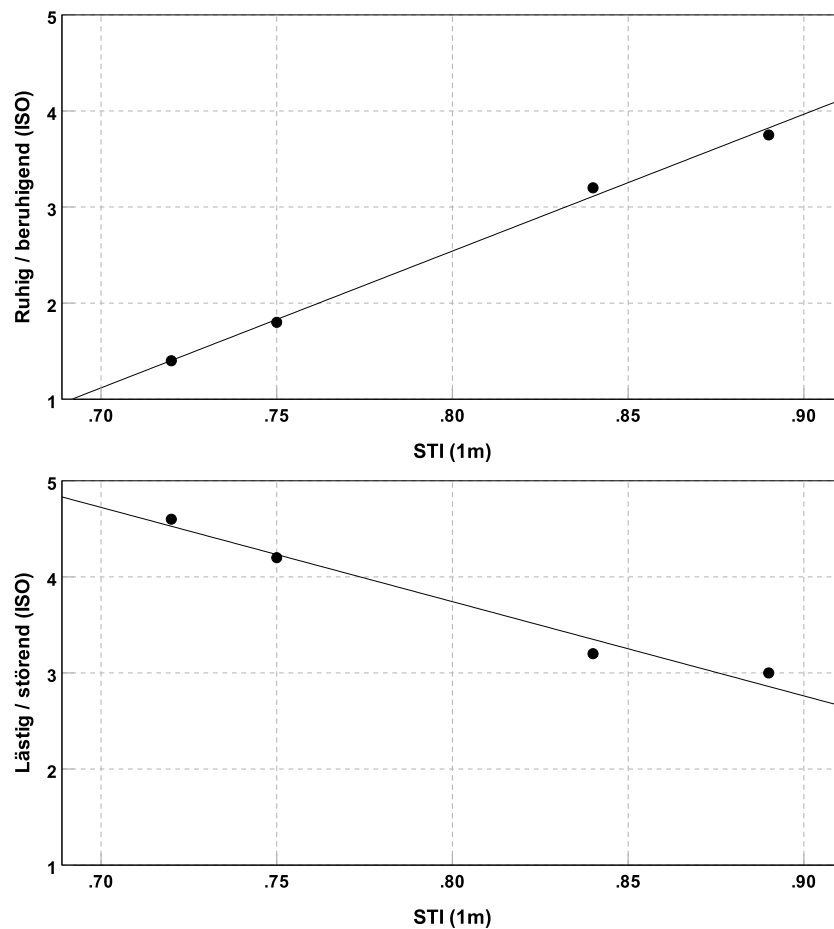


Abbildung 80: Durchschnittliche subjektive Bewertungen für die Items *ruhig / beruhigend* (oben) und *lästig / störend* (unten) als Funktion des STI.

6.2.3 RT60

Es wurde untersucht, ob RT60 am Befragungspunkt in einem signifikanten Zusammenhang mit den subjektiven Bewertungen steht. Dafür wurden zwei Einzelwerte betrachtet: der breitbandige RT60-Wert und der RT60-Wert im Frequenzbereich von Oktavbändern 500–1000 Hz. Wie aus Tabelle 39 hervorgeht, zeigten die RT60-Einzelwerte keine signifikante Korrelation mit den subjektiven Bewertungen. Nur die Bewertung nach Cercle Bruit durch die Akustik-Gruppe korrelierte signifikant mit RT60.

Tabelle 39: Korrelationen der RT60-Einzelwerte mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.

	RT60		RT60	
	500-1000		breitbandig	
	r	p	r	p
Hier ist es laut	-.062	.801	-.177	.469
Hier ist es akustisch angenehm	-.035	.885	.072	.769
Die Geräusche passen zur Umgebung	.424	.071	.420	.073
ereignisreich (ISO)	.128	.601	.046	.852
chaotisch (ISO)	-.124	.612	-.239	.323
lästig / störend (ISO)	-.100	.684	-.204	.402
monoton (ISO)	.176	.471	.236	.332
ereignisarm (ISO)	.076	.758	.124	.612
ruhig / beruhigend (ISO)	.175	.473	.275	.254
angenehm (ISO)	.231	.341	.311	.195
aufregend / lebhaft (ISO)	-.011	.963	-.079	.747
Bewertung nach Cercle Bruit	.519**	.002	.622**	<.001

6.2.4 Vergleich der subjektiven Beurteilungsmethoden

Es wurde untersucht, ob die subjektiven Antworten auf die drei Aufmacher-Fragen, die ISO-Fragen und die Bewertung nach Cercle Bruit (durch die Messpersonen der HSLU T&A) miteinander zusammenhängen. Tabelle 40 zeigt die entsprechenden Korrelationen.

Tabelle 40: Korrelationen der RT60-Einzelwerte mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.

	Hier ist es laut		Akustisch ange- nehm		Geräusche passen		Cercle Bruit	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Hier ist es laut	1							
Akustisch angenehm	-.737**	<.001	1					
Geräusche passen...	-.011	.965	.323	.177	1			
Cercle Bruit	-.806**	<.001	.626**	.004	.176	.472	1	
ereignisreich (ISO)	.658**	.002	-.663**	.002	-.158	.519	-.507*	.027
chaotisch (ISO)	.803**	.000	-.763**	<.001	-.208	.392	-.839**	<.001
lästig/störend (ISO)	.735**	<.001	-.823**	<.001	-.414	.078	-.732**	<.001
monoton (ISO)	-.230	.344	.153	.532	-.043	.862	.353	.138
ereignisarm (ISO)	-.420	.073	.374	.114	.171	.484	.424	.070
ruhig/beruhigend (ISO)	-.720**	.001	.875**	<.001	.312	.193	.731**	<.001
angenehm (ISO)	-.696**	.001	.821**	<.001	.402	.088	.661**	.002
aufregend/lebhaft (ISO)	.588**	.008	-.394	.095	-.037	.881	-.461*	.047

Es zeigt sich, dass das Item *Die Geräusche passen zur Umgebung* keine signifikanten Korrelationen mit den anderen subjektiven Bewertungen aufweist. Allerdings sind Tendenzen erkennbar: Höhere Stimmigkeit ist tendenziell mit niedriger Lästigkeit/Störung (ISO) und höherer Annehmlichkeit (ISO) assoziiert. Die Items *Hier ist es laut* und *Hier ist es akustisch angenehm* weisen offenbar eine starke Korrelation sowohl mit der Bewertung nach Cercle Bruit als auch mit den meisten ISO-Bewertungen auf. Die Richtung der Zusammenhänge entspricht den theoretischen Erwartungen: Z.B. höhere Werte für *Hier ist es laut* sind mit einer niedrigeren Bewertung nach Cercle Bruit sowie mit höheren Werten für Lästigkeit / Störung (ISO) sowie mit niedrigeren Werten für Ruhe / Beruhigung (ISO) assoziiert und werden als weniger angenehm (ISO) wahrgenommen.

Darüber hinaus weist die Bewertung nach Cercle Bruit [1] in diesem begrenzten Datensatz eine hohe Übereinstimmung mit den Bewertungen gemäss DIN ISO 12913 [35, 34, 36] auf.

7 KI-basierte Klangraum-Klassifizierung

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) verfolgt mit diesem Projekt das Ziel, Möglichkeiten aufzuzeigen, um urbane Klangräume objektiv beurteilen zu können. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit der Anwendung des neuen Artikel 24 des Umweltschutzgesetzes von Bedeutung.

7.1 Zielsetzung

Ziel ist die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Klassifizierung des psychoakustischen Empfindens in einer Umgebung (bspw. erholsam, neutral oder stressig). Für die Erledigung dieser Aufgabe gelten Modelle auf Basis von künstlicher Intelligenz (KI) bzw. Machine Learning (ML) als erfolversprechend. Der Einsatz einer solchen Technologie könnte zur Bewertung der akustischen Umweltqualität in verschiedenen Räumen oder zur Überwachung von Lärmpegeln in städtischen Gebieten beitragen. Eine Beurteilung soll jedoch nicht durch eine KI ersetzt, sondern lediglich ergänzt werden.

Das Ziel in diesem Projekt ist es, die Machbarkeit eines solchen Modells zu überprüfen und eine Grundlage für weitere Entwicklungen zu schaffen. Folgende Ziele haben höchste Priorität:

- **Hohe Klassifikationsgenauigkeit:** Das Modell soll in der Lage sein, Audio-Aufnahmen zuverlässig in eine vordefinierten Klangraum-Kategorie einzuordnen.
- **Anpassung an urbane Umgebung:** Das Modell soll in neuen, ungesesehenen städtischen Gebieten immer noch gut funktionieren. Damit sind neue Umgebungen gemeint, welche nicht in den Trainingsdaten vorhanden waren.
- **Robustheit:** Variierenden Aufnahmebedingungen, wie unterschiedlicher Lautstärke oder Hintergrundgeräusche, soll die Stabilität des Modells nicht gross beeinflussen.

7.2 Lösungsansatz

Im folgenden Abschnitt ist beschrieben, wie bei der Entwicklung des KI-Modells vorgegangen wurde und welche Daten mit welchen Softwaretools trainiert wurden.

7.2.1 Modellpartition

Gemäss Erfahrungswerten ist es nicht sinnvoll, ein einzelnes KI-Modell direkt für die Beantwortung einer grossen Frage zu verwenden. In diesem Fall ist es die psychoakustische Beurteilung eines Klangraums anhand einer Audioaufnahme. Besser ist es, diese komplexe Aufgabe in mehrere Modelle aufzuteilen, wobei man die einzelnen Teilschritte besser überwachen und testen kann. Deshalb wurde die Aufgabe in drei Modelle unterteilt:

- **Soundscape Model:** dient der Klassifikation der Umgebung und unterscheidet zwischen verschiedenen Räumlichkeiten wie bspw. Strasse, Natur oder Bahnhof.
- **Sound Event Model:** klassifiziert einzelne Geräusche innerhalb der Umgebung, beispielsweise Blätterrauschen, Wasser oder Schritte.
- **Sentiment Model:** verarbeitet die Ausgaben der ersten beiden Modelle und bewertet mithilfe einer vordefinierten *Sentiment Policy*, welche Kombinationen von Soundscapes und Sound Events als erholsam, stressig, neutral, etc. eingestuft werden. Die Policy legt Regeln fest, wie beispielsweise:

– „10 Minuten Wasser pro Stunde in der Natur → erholsam“

Im Rahmen dieses Projekts wurde ausschliesslich das Sound Event Model implementiert (roter Rahmen in Abbildung 81). Die Arbeit an diesem Modell ist Teil des vierten Arbeitspakets des Gesamtprojekts und umfasst folgende Teilaufgaben: Datensammlung und -aufbereitung, Entwicklung und Training des Modells sowie deren Validierung, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

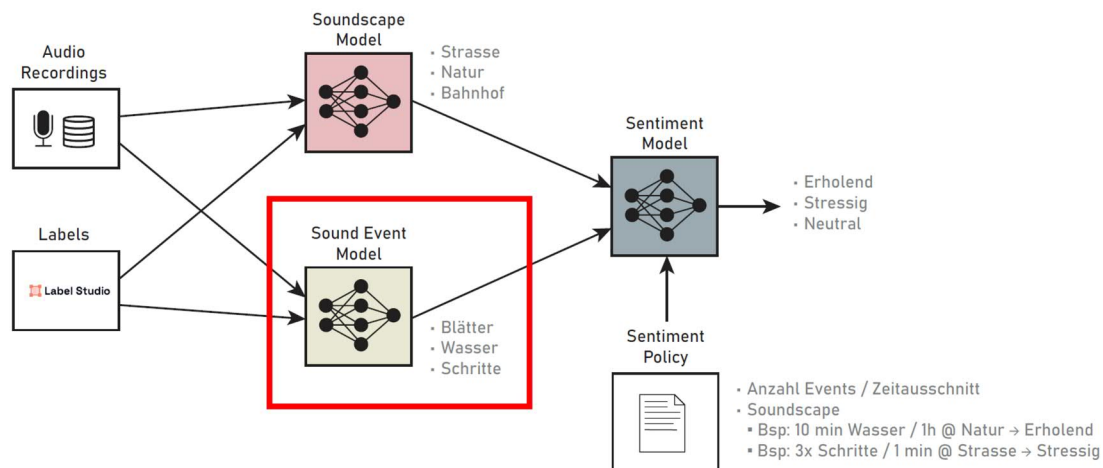


Abbildung 81: Systemübersicht der notwendigen KI-Modelle

7.2.2 Geräuschkategorien

Für das Sound Event Model einigte man sich auf sechs Geräuschtypen (Labels) gemäss Tabelle 41. Durch die Wahl von wenigen Labels für eine erste Entwicklung kann das Risiko für die Machbarkeitsprüfung gering gehalten werden.

Tabelle 41: Selektierte Geräusche (Labels) für das Sound Event Model

Label	Geräusch
construction	Baustellenlärm
footsteps_gravel	Schritte auf Kies
speec_unclear	unklare Sprache
traffic	Verkehrslärm
train	Züge
water	Wassergeräusche

Für die Wahl der Geräusche wurde die Taxonomie gemäss ISO/TS 12913-2 als Grundlage herangezogen. Diese Taxonomie katalogisiert das akustische Umfeld mithilfe einer hierarchischen Baumstruktur (Abbildung 82). Der Pfad *Outdoor Acoustic Environment* → *Urban Acoustic Environment* ist bei unserer Anwendung entscheidend. Dessen Geräusche sind in menschengenerierte und nicht-menschengenerierte Geräusche unterteilt. Aus beiden Kategorien wurden in Absprache mit dem BAFU die finalen sechs Geräuschkategorien

ausgewählt. Bei dieser Wahl spielten ausserdem folgende Kriterien eine Rolle:

- Aufwand für Datenerhebung
- Häufigkeit des Vorkommens
- Persönliches Störepfinden der Projektteilnehmer

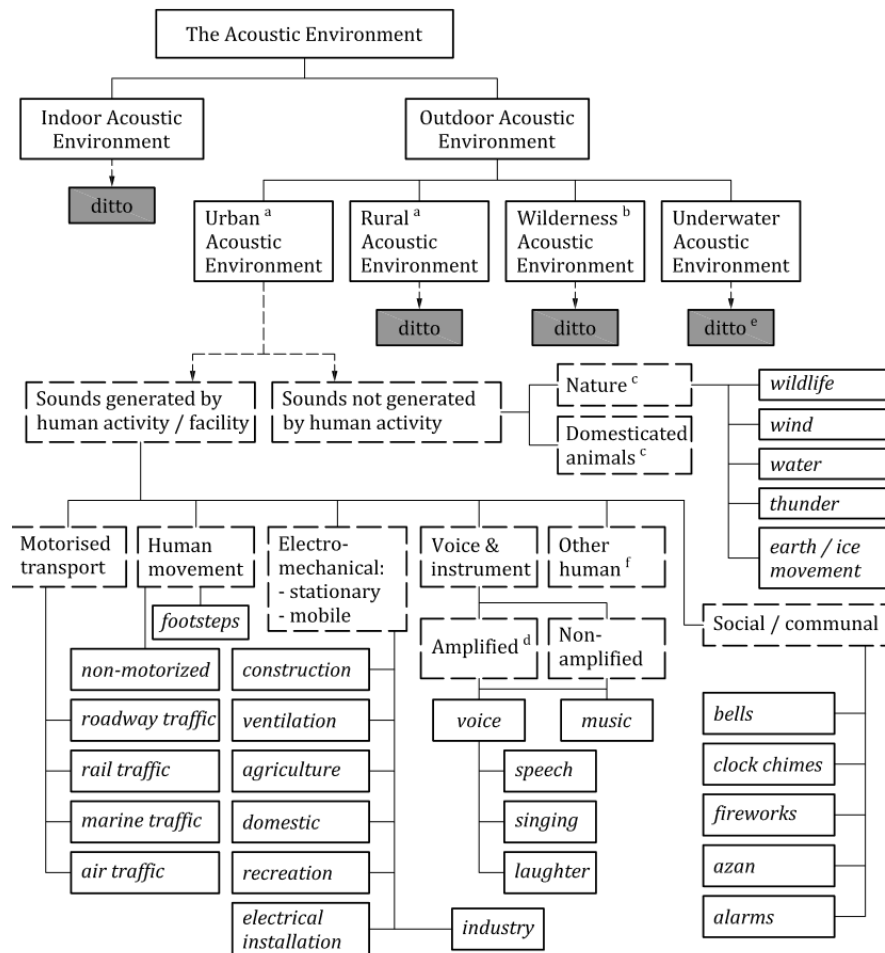


Abbildung 82: Ausschnitt aus Taxonomie ISO/TS 12913-2

7.2.3 Anforderungen

Die Entwicklung des Sound Event Models erfordert in erster Linie qualitativ hochwertige Daten. Öffentlich verfügbare Datasets reichten für dieses Projekt nicht aus. Entweder waren in diesen Datasets die selektierten Labels nicht vorhanden, die Datenmenge dieser

Labels unzureichend, oder die Qualitätsanforderungen (z.B. Bit-Tiefe der Audiodaten) nicht erfüllt. Aus diesem Grund wurde ein eigenes Dataset erstellt, welches die Anforderungen für unsere Domäne vollständig erfüllt. Die dabei verwendeten Methoden und Prozesse werden im Abschnitt 7.3 detailliert beschrieben.

Eine weitere Anforderung war die Wahl einer geeigneten Modell-Architektur. Dabei wurde auf eine Architektur zurückgegriffen, welche sich bei anderen Geräusch-Klassifizierungsaufgaben erfolgreich bewährt hat. Im Abschnitt 7.4.3 wird darauf genauer eingegangen. Die Umsetzung der Software wird in Abschnitt 7.4 erläutert.

7.3 Datensammlung und -aufbereitung

Das Ziel der Erfassung des neuen Datasets war es, für jede Kategorie mindestens eine Stunde an Audioaufnahmen zu erfassen und sie anschliessend für die KI aufzubereiten. Folgende Abschnitte erklären das Vorgehen bei dieser Datenerfassung.

7.3.1 Standorte

Alle Audioaufnahmen wurden in der Umgebung der Hochschule Luzern, der Gemeinde Horw, der Stadt Luzern sowie am Rotsee in Ebikon durchgeführt. Der Aufnahmezeitraum erstreckte sich vom 7. April 2024 bis zum 30. Oktober 2024. Zum Einsatz kamen verschiedene Geräte des Modells NTi Audio XL2 sowie Mikrofone des Typs NTi Audio M2211. Genauere Angaben zu den Orten finden sich im Anhang B.7.

7.3.2 Datenschutz

Die im KI-Modell verwendeten Audiodaten werden im Preprocessing so verändert, dass diese nicht aus dem Modell rekonstruiert werden können. Die Trainings-Datensätze sind auf den Servern der HSLU abgelegt und haben den Standort in der Schweiz. Die Entwicklung der Modelle wurden mit einem hausinternen Server betrieben, welcher nur über das HSLU-Netzwerk zugänglich ist. Ein Datentransfer ins Ausland findet zu keinem Zeitpunkt statt.

7.3.3 Labelling

Um die aufgenommenen Audiodaten für das Training des KI-Modells verwenden zu können, müssen diese mit hoher Präzision annotiert werden (Labelling). Dieser Prozess ist entscheidend, da die Qualität der Labels direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Modells hat. Mithilfe von *Label Studio* konnte dies effizient durchgeführt werden

(Abbildung 83).

Bei *Label Studio* handelt es sich um eine Open-Source-Anwendung zur Annotation von Daten, die verschiedene Datentypen wie Audio, Text, Bild und Video unterstützt [44]. Es bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche, um Trainingsdaten für maschinelles Lernen effizient zu labeln.

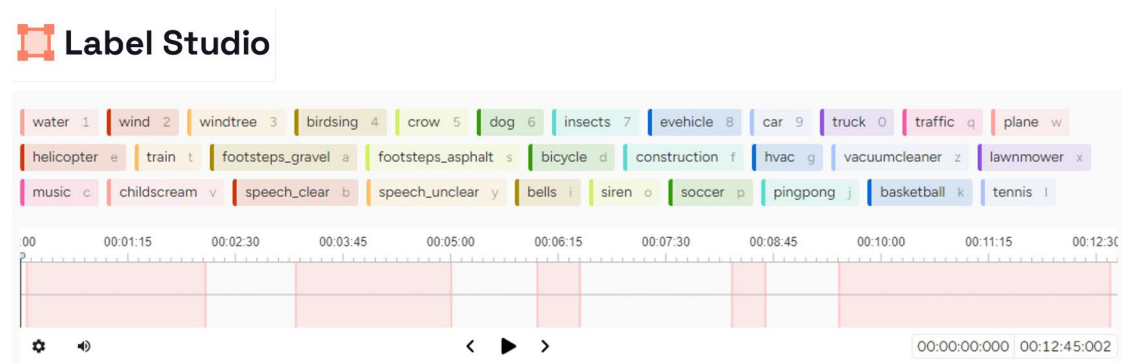


Abbildung 83: Das Labeln der Audioaufnahmen in Label Studio

Abbildung 84 zeigt nebst den seches selektierten Geräuschkategorien auch noch elf andere Kategorien, welche in einem ersten Versuch als interessant eingestuft wurden. Diese können ignoriert werden.

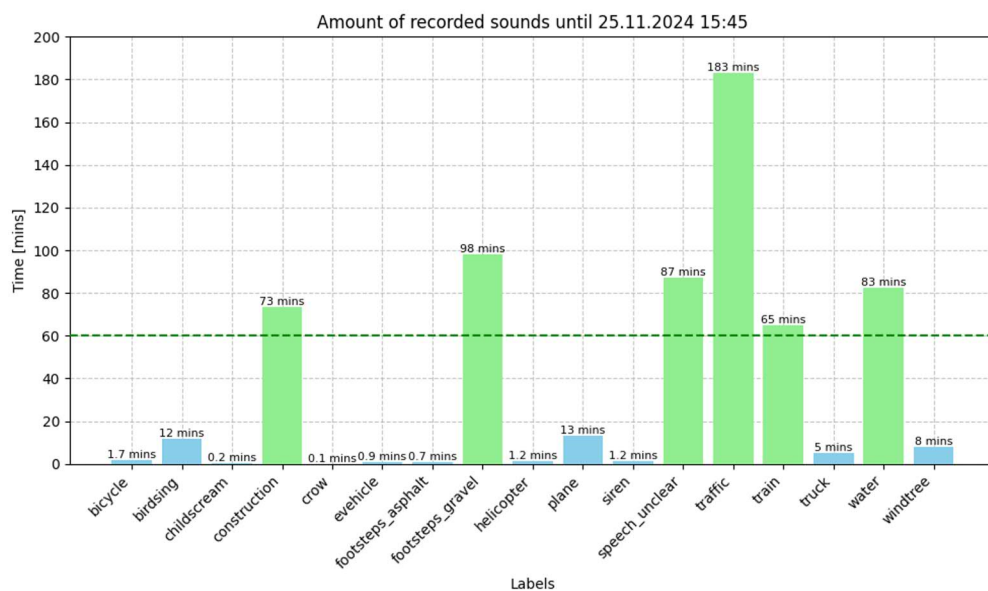


Abbildung 84: Menge der Audio-Daten im neu erhobenen Dataset in Minuten

Nach der Annotation wurden die gelabelten Audioaufnahmen für die weiteren Verarbeitungsschritte vorbereitet. Im Preprocessing wurden daraus die Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze generiert, die zur Entwicklung und Evaluation des KI-Modells verwendet wurden.

7.4 Entwicklung und Training des KI-Modells

Die Entwicklung des KI-Modells umfasst die Datenaufbereitung, Modellarchitektur, Hyperparameteroptimierung und das abschliessende Training. Der vorliegende Abschnitt beschreibt die Softwarearchitektur von der Datenverarbeitung bis hin zum Training und die Wahl des finalen Modells. Die erzielten Ergebnisse sind im nachfolgenden Kapitel 7.5 beschrieben.

7.4.1 Software-Aufbau

Die Schritte bei der Entwicklung des KI-Modells sind in Abbildung 85 zu sehen. Zunächst wurden die Audioaufnahmen extrahiert und mit der Software *Label Studio* mit passenden Labels versehen. Diese gelabelten Audiodaten bilden die Grundlage für die Entwicklung des KI-Modells.

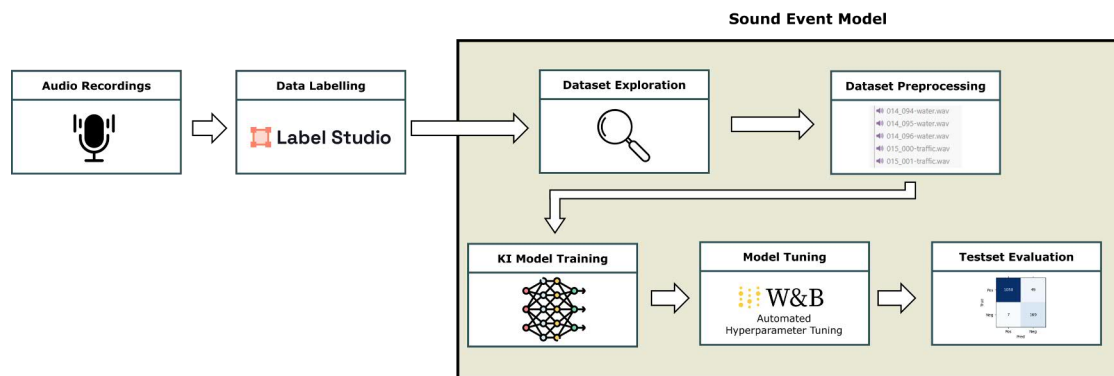


Abbildung 85: Ablauf der Arbeitsschritte des Sound Event Modells

Nach dem Labeln wurden die Daten überprüft, um deren Qualität sicherzustellen, Muster zu erkennen und mögliche Probleme zu finden (Dataset Exploration). Danach wurden die Daten vorverarbeitet (Preprocessing).

Für das Training des KI-Modells wurde *TensorFlow* verwendet, während *Weights and Biases* (W&B) [45] zur Nachverfolgung und Optimierung der Trainingsläufe (Model Tuning) und bei der Wahl des besten Modells eingesetzt wurde.

7.4.2 Preprocessing

Die Audiodaten müssen zunächst in eine Form gebracht werden, mit der die KI-Architektur damit arbeiten kann. Es hat sich bewährt, dass man Audiodaten in die Spektrogramm-

Form bringt (Abbildung 86). Damit hat man eine zeitdimensionale Bilddarstellung der Audioaufnahme, worauf herkömmliche Bildverarbeitungsalgorithmen benutzt werden können.

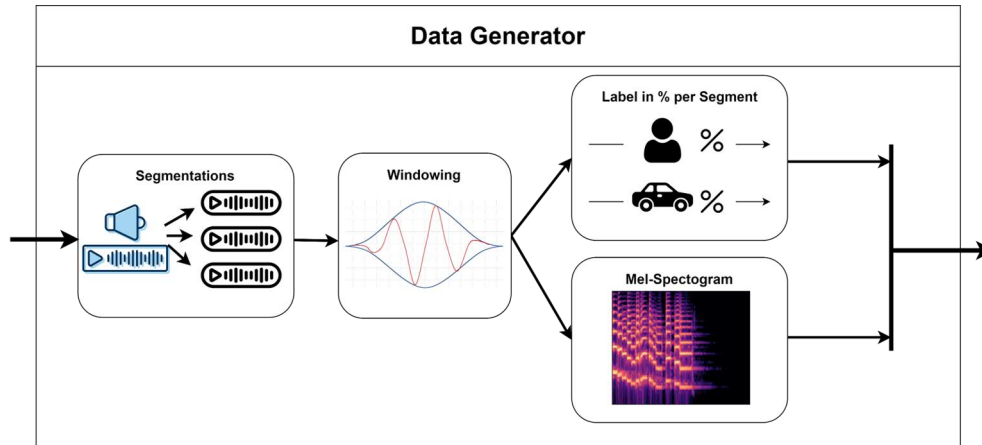


Abbildung 86: Vorverarbeitung der Daten

Für die Verarbeitung in Spektrogramme wurden die Audiodateien in fixe Segmentlängen unterteilt. Im Falle des finalen Modells waren dies 5-Sekunden-Segmente. Um hohe Frequenzen an den Rändern der Segmente zu vermeiden, wurden die Ausschnitte mit einem Hanning-Window verrechnet, welches diese Übergänge glättet. Anschliessend wurde für jedes Segment ein *Standard-Spektrogramm* erstellt.

Da bei alltäglichen Geräuschen tiefere Frequenzen häufiger vorkommen als hohe, sind die meisten Pixel im Standard-Spektrogramm schwarz und enthalten nur wenige Informationen. Ein KI-Modell wird es so schwerer haben, etwas sinnvolles zu erlernen. Damit man diese Entropie erhöhen kann, hat es sich bewährt, aus dem Standard-Spektrogramm das *Mel-Spektrogramm* zu berechnen. Dieses wendet verschieden grosse Dreieck-Filter auf der Frequenzachse an wobei es mehrere Frequenzen in sogenannten *Bins* zusammenfasst. Tiefere Frequenzen werden genauer aufgelöst und höhere Frequenzen stärker zusammengefasst. Dadurch bleibt viel Information erhalten, während der Fokus auf für Menschen relevante Frequenzbereiche gelegt wird (Abbildung 87).

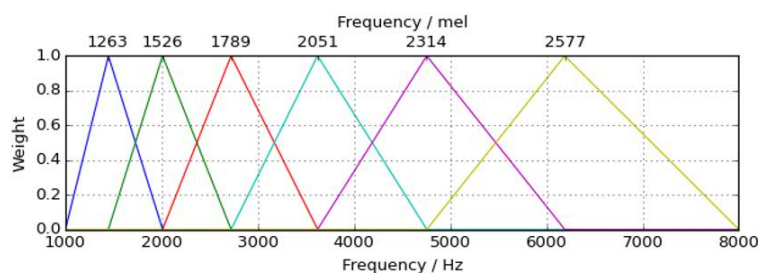


Abbildung 87: Filterbank zur Erstellung von Bins in einem Mel-Spektrogramm

Nebst den Vorverarbeitung der Audiodaten wurden auch die Labels vorverarbeitet: das Label wurde exakt auf alle Zeitstempel des Audiosamples kopiert (Label-Matrix) und danach die prozentualen Anteile der Labels innerhalb der Segmente berechnet. Dies ermöglicht die spätere Festlegung eines Schwellwerts (Threshold), welcher eine genauere Selektion von Segmenten für das Training ermöglicht. Abbildung 88 zeigt das Spektrogramm, die Audio-Waveform und die Label-Matrix für eine zufällige Audio-Aufnahme.

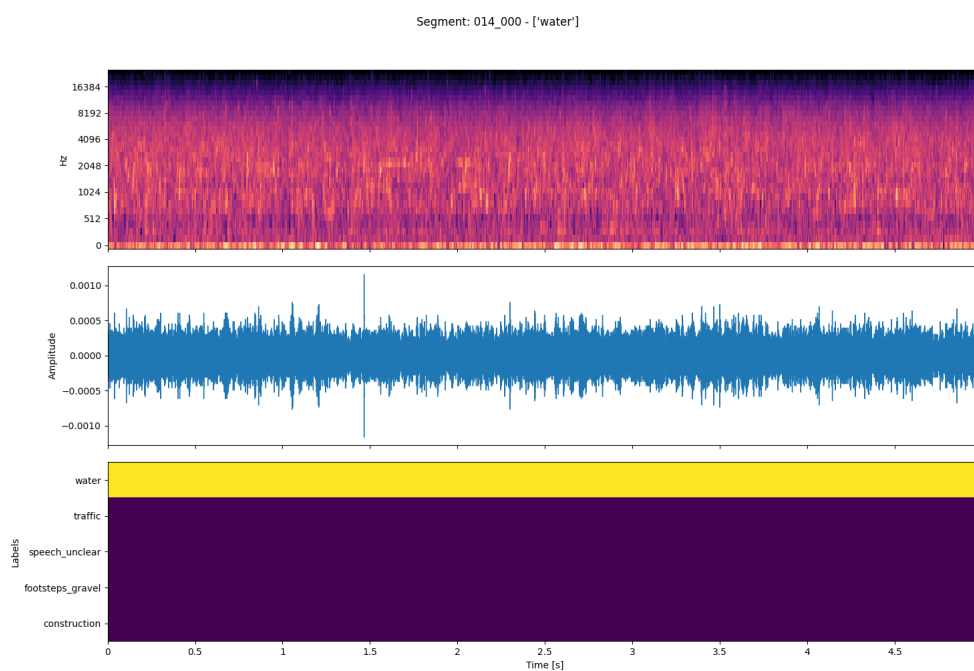


Abbildung 88: Beispiel einer vorverarbeiteten und gelabelten Audio-Aufnahme der Geräuschkategorie **water** zu 100%

7.4.3 Modellarchitektur

Das verwendete Modell entspricht einem einfachen Convolutional Neural Network (CNN), welches sich erfolgreich in der Bildverarbeitung bewährt hat. Es besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Schichten, die darauf ausgelegt sind, relevante Muster in den Mel-Spektrogrammen zu erkennen und sogenannte Feature-Maps zu bilden. Die wichtigsten Bestandteile der Architektur sind folgende:

- **Faltungsschichten:** Mehrere Convolutional Layers, die zur Extraktion von Mustern aus den Eingabedaten dienen und eine nicht-lineare Aktivierungsfunktion verwenden.
- **Pooling-Schichten:** Max-Pooling-Ebenen zur Reduzierung der Feature-Komplexität und Diskretisierung von lokalen Merkmalen.
- **Dropout-Schichten:** Dropout-Layer zur Verringerung von Overfitting durch zufälliges Deaktivieren von Neuronen während des Trainings.
- **Dense-Schichten:** Vollständig verbundene Schichten, die die extrahierten Merkmale für die finale Klassifikation nutzen.
- **Ausgabe-Schicht:** Eine Aktivierungsfunktion, die die Vorhersagen für die entsprechenden Klassen ausgibt.

Die Modellarchitektur wurde bewusst klein und einfach gehalten, da es sich um eine Machbarkeitsstudie handelt. Ein komplexeres Modell hätte einen erheblich höheren Zeitaufwand erfordert, da mehr Trainingsläufe und ein komplexeres Preprocessing notwendig gewesen wären. Zudem hätte dies eine deutlich grössere Menge an Audiodaten zur erfolgreichen Modellierung verlangt. Trotz der vereinfachten Architektur bietet das Modell eine effiziente Lösung mit geringem Rechenaufwand und ermöglicht eine zuverlässige Klassifikation der akustischen Daten.

7.4.4 Training

Das Training des KI-Modells wurde unter Verwendung von W&B durchgeführt, um eine effiziente Nachverfolgung und Optimierung der Modellleistung zu gewährleisten.

Zu Beginn wurden die Audiodaten entsprechend den festgelegten Parametern vorbereitet und in Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze aufgeteilt. Das Modell wurde mit verschiedenen Hyperparameter-Konfigurationen in den Schritten Preprocessing und

Modell-Architektur trainiert. Beim Training und in den Tests wurden Metriken wie der *lwlap*-Score (Label-Weighted Label Ranking Average Precision), der *F1-Score* und die *Akkuratheit* zur Bewertung verwendet. Dies sind gängige Metriken für diesen Anwendungsfall und stellt die Vergleichbarkeit mit anderen Modellen in diesem Forschungsgebiet sicher.

Während des Trainings kamen Mechanismen wie die adaptive Anpassung der Lernrate und regelmässige Checkpoints zum Einsatz, um eine bestmögliche Modellleistung sicherzustellen. Das Training erfolgte über mehrere Epochen, wobei W&B zur Protokollierung von Metriken und zur Analyse des Fortschritts genutzt wurde.

7.4.5 Tuning

Die Implementierung des KI-Modells wurde so umgesetzt, dass sämtliche Hyperparameter mittels eines Sweeps in W&B optimiert werden konnten. Hierbei kam die Bayes'sche Methode zum Einsatz mit dem Ziel, den Validation-Loss zu minimieren.

Während der Optimierung wurden verschiedene Modellparameter wie die Anzahl der Faltungseinheiten, Dropout-Raten, Kernelgrössen und Pooling-Strategien systematisch angepasst. Auch Hyperparameter bei der Datenvorverarbeitung wurden variiert, beispielsweise die Segmentlänge und Überlappung der Audiodaten. Die Optimierung erfolgte iterativ, wobei jede Konfiguration basierend auf den vorherigen Ergebnissen verbessert wurde.

Ein wichtiger Bestandteil des Prozesses war die Identifikation von Parametern, die keinen signifikanten Einfluss auf den *lwlap*-Score (Label-Weighted Label Ranking Average Precision) hatten. Es hat sich herausgestellt, dass eine Segmentlänge von mind. 1 Sekunde nötig ist, damit das Modell Geräusche erkennen kann. Längere Segmente sind grundsätzlich besser, jedoch wird das Modell dabei träge. Ein Overlap von 25% (Streckung der Trainingdaten um 25%) hat grundsätzlich positiv zum Modell-Training beigetragen.

7.4.6 Modellwahl

Die Wahl des besten Modells (Evaluation) erfolgte in mehreren Iterationen. Insgesamt wurden über 420 verschiedene Trainings mittels Hyperparameter-Sweeps durchgeführt. Die entstandenen Modelle wurden anhand der Metriken *lwlap*-Score, dem *train_loss* und *val_loss* sowie dem *F1-score* bewertet. Daraus wurde das Modell mit der besten Gesamtperformance identifiziert. Es wurde folgendermassen vorgegangen:

1. Die besten 10 % sämtlicher Modelle hinsichtlich des *lwlap*-Scores und des *F1-scores* wurden selektiert. Gleichzeitig wurden alle Modelle ausgeschlossen, welche nicht zu den unteren 10% des Trainings- und Validierungsverlusts (Loss) gehörten. Dieser Auswahlprozess reduzierte die Anzahl der Modelle auf sieben vielversprechende Kandidaten. Bei allen Modellen lag der *lwlap*-Wert konstant über 0.94, und sowohl der Trainings- als auch der Validierungsverlust blieb unter 0.07. Overfitting trat dabei nicht auf.
2. Im nächsten Schritt wurden die Modelle auf Basis des *F1-scores* für alle sechs Labels weiter analysiert. Dabei zeigte sich, dass drei der sieben Modelle bei einzelnen Labeln einen niedrigen *F1-score* im Training aufwiesen, worauf diese bei der weiteren Selektion ausschieden.
3. Die verbleibenden vier Modelle wurden anhand ihres durchschnittlichen *F1-scores* verglichen. Das Modell mit der höchsten Gesamtbewertung wurde schlussendlich als das Beste ausgewählt (siehe Tabelle 42).

Tabelle 42: F1-score der besten Modelle, das beste Modell in grün

Modell	F1-score
20241211_042231-7832c0a9	0.951
20241210_220745-7f541bc6	0.953
20241211_121756-63906a6d	0.955
20241211_021623-a62f3c7b	0.961

Abbildung 89 zeigt eine grafische Visualisierung aller Modelle bzgl. deren Performance.

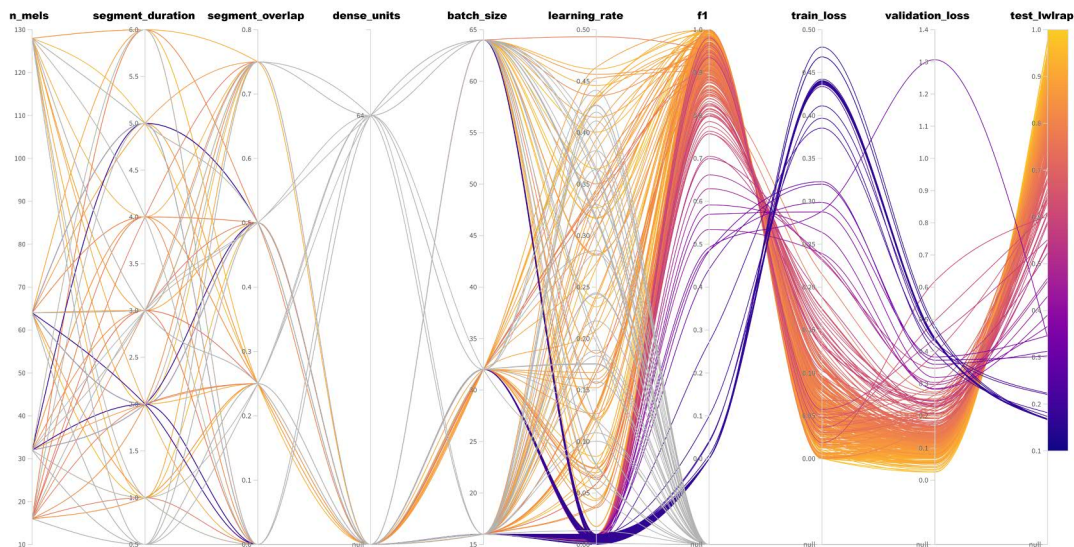


Abbildung 89: Parallelkoordinaten-Plot der Sweep-Konfigurationen mit Bezug auf den erreichten *lwlap*-Score (je gelber die Farbe, desto besser das Modell)

Das ausgewählte Modell erzielte eine durchschnittliche Klassifikationsgenauigkeit von 96 %, was sehr gut ist. Als Referenz für die Bedeutung dieses Werts dient die DCASE Challenge. In dieser Challenge erreichen die Teams typischerweise Genauigkeiten von etwa 75 %. Es ist jedoch zu beachten, dass die DCASE Challenge eine grössere Anzahl an Klassen umfasst (12). Tabelle 43 zeigt den Classification Report des besten KI-Modells. Die dazugehörige ROC-Kurve findet sich im Anhang im Abschnitt *ROC-Kurve* 143.

Tabelle 43: Classification Report des besten KI-Modells, der F1-Score in grün als wichtigste Kenngrösse

Klasse	Precision	Recall	F1-Score	Support
construction	0.94	0.95	0.94	352
footsteps_gravel	0.99	0.95	0.97	504
speech_unclear	0.99	0.99	0.99	428
traffic	0.97	0.95	0.96	878
train	0.95	0.89	0.92	376
water	0.99	0.99	0.99	408
micro avg	0.97	0.95	0.96	2946
macro avg	0.97	0.95	0.96	2946
weighted avg	0.97	0.95	0.96	2946
samples avg	0.95	0.95	0.95	2946

7.5 Validierung des KI-Modelles

Die Validierung des entwickelten KI-Modells erfolgte anhand verschiedener Testszenarien. Ziel dieser Validierung war es, die Genauigkeit des Modells unter praxisnahen Bedingungen zu überprüfen und dessen Robustheit in unterschiedlichen akustischen Kontexten zu bewerten.

Drei Testfälle wurden evaluiert:

1. **Einzelgeräusche:** Prüfung der Modellleistung bei einer einzelnen Klangklasse (z.B. Verkehrslärm oder Wassergeäusche).
2. **Gemischte Geräusche mit zwei überlappenden Labels:** Untersuchung der Modellleistung bei gleichzeitig auftretenden Geräuschquellen, beispielsweise Verkehrslärm und unklare Sprache.
3. **Gemischte Geräusche mit sechs Labels:** Analyse der Modellgenauigkeit bei komplexen Mischsignalen mit allen sechs definierten Klassen, wobei ein permanentes Hintergrundgeräusch (z.B. Wasser) vorhanden ist.

Die erzielten Ergebnisse liefern eine umfassende Bewertung der Modellleistung unter verschiedenen Bedingungen. Die wichtigsten Resultate sind teilweise im Hauptteil des Berichts enthalten, während detailliertere Resultate im Anhang B.7 zu finden sind.

7.5.1 Auswertung Einzelgeräusche

In einer ersten Evaluation wurde eine Inferenz des KI-Modells mit einzelnen Geräuschen auf ungesehenen Datensätzen durchgeführt (Daten, welche nicht im Trainings-Dataset waren). Ziel war es zu prüfen, ob das Modell die trainierten Klassen präzise erkennen kann. Dies dient als Anhaltspunkt, wie das KI-Modell in der realen Welt funktionieren wird. Dies stellt den einfachsten Task der Auswertungen dar. Die Tests wurden für alle sechs Klassen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Labels **traffic** und **water** sind exemplarisch in den Abbildungen 90 und 91 dargestellt. Abbildung 92 zeigt zudem das Verhalten des KI-Modells, wenn ein Audiofile ein falsches Label trägt. Weitere Testergebnisse sind im Anhang B.7 unter *Einzellabel-Auswertung* verfügbar.

Die Testauswertung folgt einer einheitlichen Struktur, die sich aus vier Diagrammen zusammensetzt:

1. **Audioaufzeichnung für das Label:** Zeigt die Amplitude des Audiosignals über die Zeit und dient als visuelle Referenz für die Signalintensität.
2. **Mel-Spektrogramm des Labels:** Eine Frequenzdarstellung des Audiosignals, die zeitliche und spektrale Merkmale des Geräuschs visualisiert.
3. **Durchschnittliches wahres Label pro Sekunde:** Gibt an, welches Label tatsächlich während der Aufnahme vorhanden ist.
4. **Vorhergesagtes Label pro Sekunde:** Zeigt die Modellvorhersagen über die Zeit und ermöglicht einen direkten Vergleich mit dem wahren Label.

Die Abbildungen 90 und 91 zeigen, dass das Modell in der Lage ist, einzelne Geräusche zuverlässig zu klassifizieren. Sowohl für die Label **traffic** und **water** als auch für jene im Anhang erkennt das Modell mit hoher Sicherheit die korrekten Kategorien. Dies steht im Einklang mit dem im Classification Report dokumentierten F1-score von 96 %, welcher die hohe Klassifikationsgenauigkeit des Modells bestätigt.

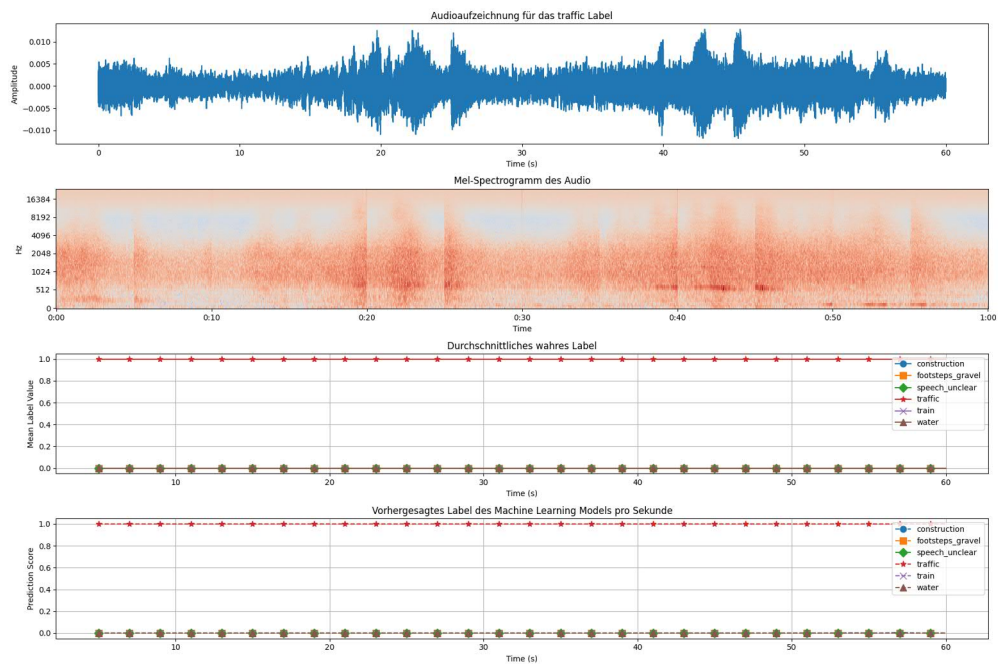


Abbildung 90: Überprüfung des Labels **traffic**

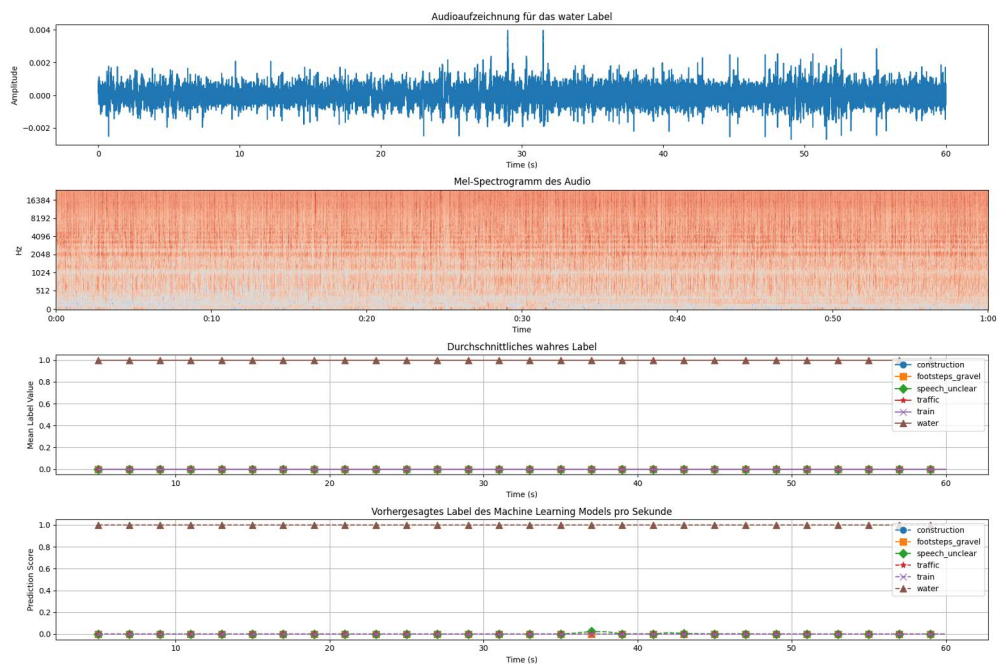


Abbildung 91: Überprüfung des Labels **water**

In Abbildung 92 ist zu sehen, dass das gesamte Audiosignal ursprünglich als klassischer Verkehrslärm gekennzeichnet wurde. Allerdings zeigt das Mel-Spektrogramm im Zeitbereich von 40 bis 50 Sekunden eine deutliche Veränderung im Muster. Das KI-Modell erkennt diesen Abschnitt als **construction**.

Eine akustische Hörprobe ergab, dass in diesem Bereich ein schweres Fahrzeug über eine metallische Unebenheit gefahren ist (vermutlich ein LKW). Diese Klangcharakteristik ähnelt eher typischen Baustellengeräuschen als gewöhnlichem Verkehrslärm. Somit hat das KI-Modell die Situation korrekt interpretiert. Dies zeigt, dass das Modell in der Lage ist, bestimmte akustische Merkmale präzise zu differenzieren, auch wenn die Zuordnung für diesen Fall nicht korrekt war.

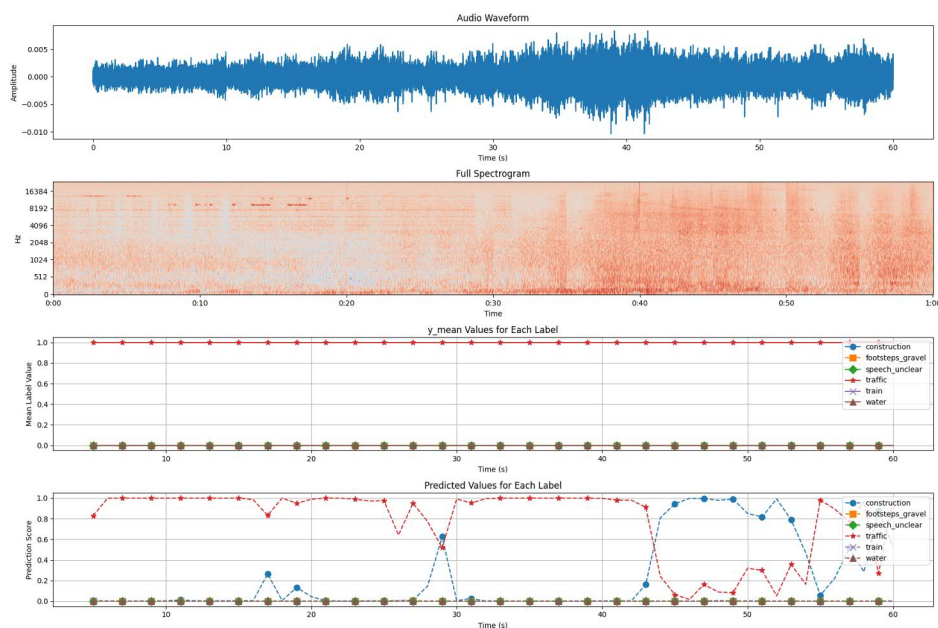


Abbildung 92: Verhalten des KI-Modells bei vermeintlich falschem Labelling

7.5.2 Auswertung gemischte Geräusche

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie das Modell mit komplexeren akustischen Szenarien umgeht. Die Klassifizierungsaufgabe wurde dabei auf Mischsignale erweitert, d.h. es können mehrere Geräusche gleichzeitig auftreten. Zu diesem Zweck wurden zwei verschiedene Szenarien geschaffen:

1. **Überlappende Labels:** In diesem Szenario wird untersucht, wie das Modell auf überlappende Geräusche reagiert. Dazu werden die Kombinationen `speech_unclear` und `traffic` sowie `speech_unclear` und `footsteps_gravel` betrachtet. Ziel ist es herauszufinden, ob das Modell in der Lage ist, die überlappenden Geräusche korrekt zu identifizieren und zu differenzieren.
2. **Nahe aufeinanderfolgende Labels:** In diesem Szenario werden alle sechs Labels (`traffic`, `construction`, `speech_unclear`, `footsteps_gravel`, `train` und `water`) in einer Audioaufnahme nacheinander gemischt. Das Ziel ist zu evaluieren, ob das Modell in der Lage ist, die Labels korrekt über den zeitlichen Verlauf zuzuordnen.

Die Auswertung dieser Tests soll aufzeigen, wie das aktuelle Modell auf komplexe Klangumgebungen anwendbar ist und ob es eine zuverlässige Erkennung bei überlappenden oder schnell wechselnden akustischen Ereignissen ermöglicht.

Auswertung von zwei überlappenden Geräuschen

Um zu überprüfen, ob das aktuelle KI-Modell in der Lage ist, zwei überlappende Labels gleichzeitig zu erkennen, wurden Tests mit Mischsignalen durchgeführt. Dabei wurden jeweils zwei Labels so kombiniert, dass sie sich zeitlich überschneiden.

In den Abbildungen 93 und 94 ist zu sehen, dass das erste Label bis Sekunde 35 vorliegt, während das zweite Label bereits ab Sekunde 25 beginnt. Dies führt zu einer Überlappungszeit von 10 Sekunden. Da das Modell ein Auswertefenster von 5 Sekunden verwendet und die Auswertung jede Sekunde neu durchgeführt wird, ergeben sich insgesamt 14 überlappende Vorhersagen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell eine eindeutige Klassifikation treffen kann, solange nur ein einzelnes Label vorhanden ist. In der Überlappungsphase hingegen zeigt sich, dass das Modell Schwierigkeiten hat, beide Geräusche gleichzeitig korrekt zu klassifizieren. Stattdessen neigt es dazu, eines der beiden Labels vorzuziehen, während das andere unterrepräsentiert bleibt.

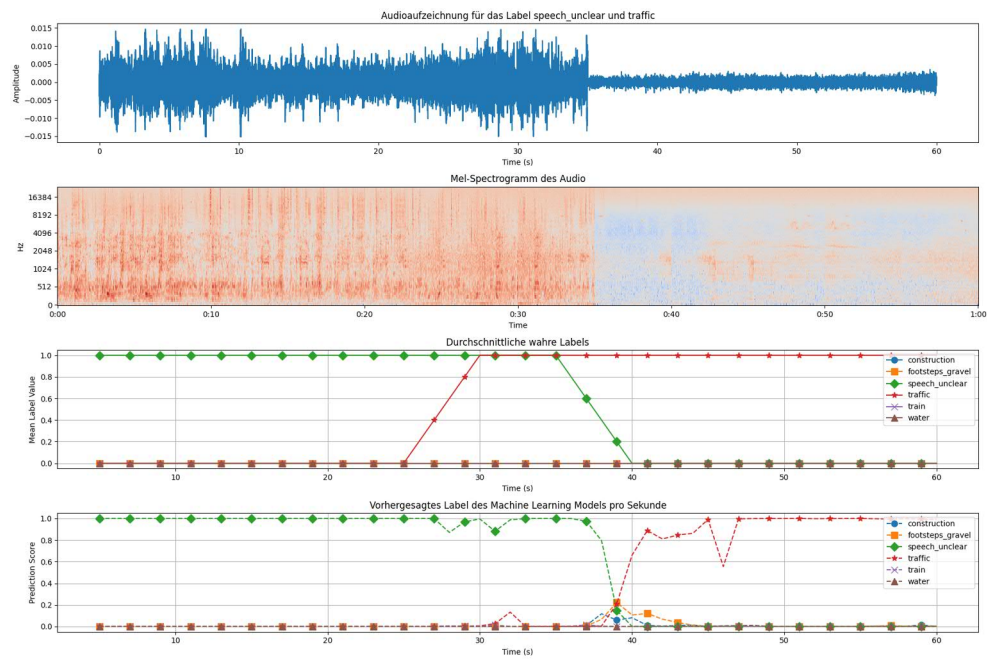


Abbildung 93: Mischsignal mit `speech_unclear` und `traffic`

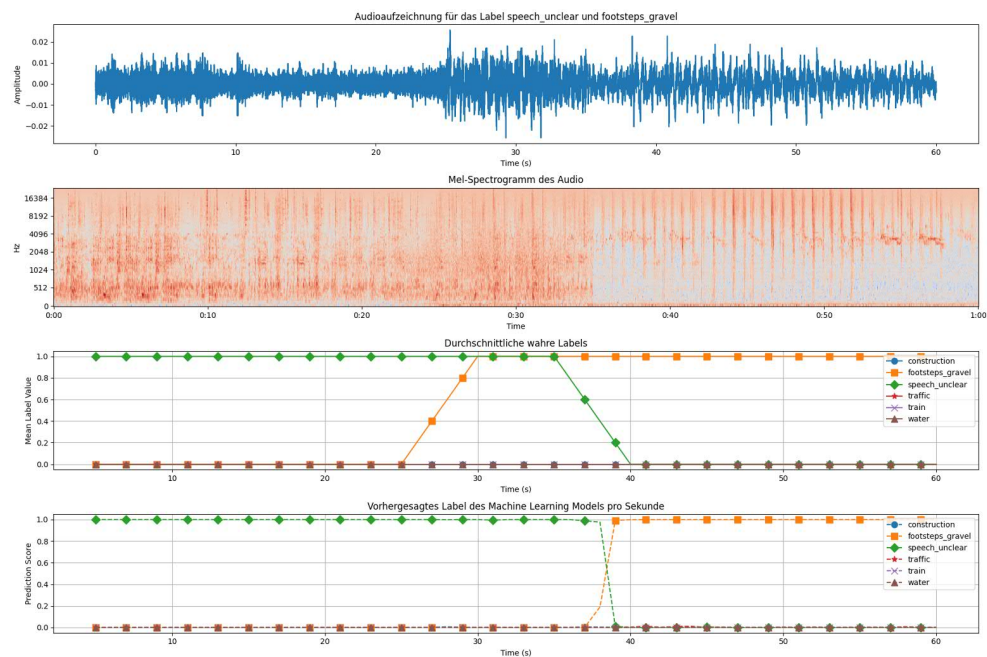


Abbildung 94: Mischsignal mit `speech_unclear` und `footsteps_gravel`

Auswertung von sechs Labels nacheinander folgenden Geräuschen

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie gut das KI-Modell mit einer Sequenz aus schnell aufeinanderfolgenden Labels umgehen kann. Das untersuchte Audiosignal enthält alle sechs definierten Labels, wobei das Label **water** kontinuierlich im Hintergrund präsent ist. Abbildung 95 zeigt die Analyseergebnisse für das Testsignal, wobei das KI-Modell die einzelnen Labels im zeitlichen Verlauf erkennt und bewertet.

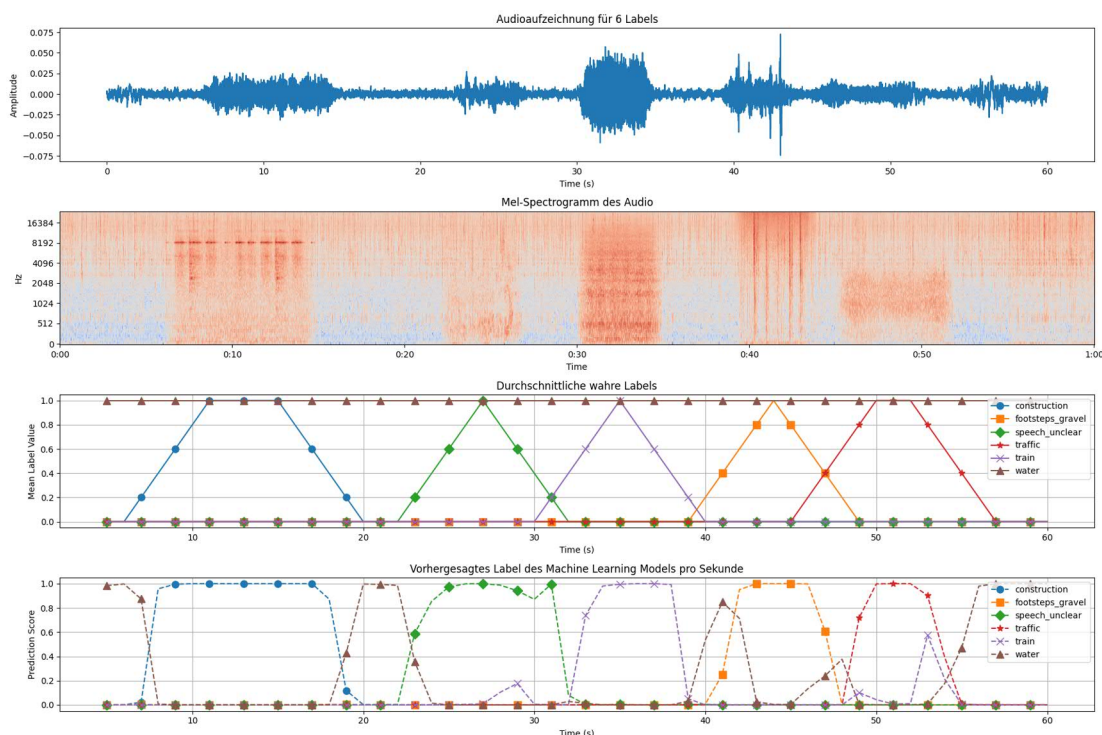


Abbildung 95: Mischsignal mit sechs Labels und Wasser als Hintergrundgeräusch.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die Labels korrekt zu identifizieren, wenn diese zeitlich getrennt auftreten. Bei schnellen Übergängen oder kurzen Überschneidungen wird jedoch nur eines von mehreren Labels korrekt identifiziert. Dies lässt darauf schliessen, dass das Modell für komplexe Szenarien weiter optimiert werden muss. Das Modell trifft in den meisten Fällen die richtige Entscheidung, zeigt jedoch Verzögerungen bei der Erkennung von Labels nach einem Wechsel. Dies bedeutet, dass das Modell eine gewisse Zeit benötigt, um neue Geräuschmuster zu erkennen. Insgesamt bestätigt die Auswertung, dass das Modell unter idealen Bedingungen funktioniert. Schnelle Wechsel zwischen Geräuschtypen bleiben jedoch eine Herausforderung. Eine Verbesserung könnte die Verwendung von längeren Ausschnitten oder mehr Trainingsdaten sein.

7.6 Diskussion

7.6.1 Technische Aspekte

Das entwickelte KI-Modell wurde gezielt für die Klassifikation von sechs verschiedenen Geräuschkategorien trainiert. Die Evaluation der Einzellabel-Tests zeigt, dass das Modell diese Aufgabe mit einer hohen Genauigkeit von 96 % erfüllt. Dies bestätigt, dass das Modell unter den trainierten Bedingungen zuverlässig arbeitet und Geräusche korrekt klassifizieren kann.

In den durchgeführten Tests mit überlappenden und schnell aufeinanderfolgenden Signalen, die ausserhalb des ursprünglich trainierten Einsatzbereichs liegen, zeigte sich, dass das Modell über kurze Zeiträume hinweg robuste Vorhersagen treffen kann. Allerdings ist es nicht in der Lage, mehrere Labels gleichzeitig präzise zu erkennen. Insbesondere bei überlappenden Signalen dominiert in der Regel eines der Geräusche, während das zweite oft nicht korrekt erkannt wird.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass für eine zuverlässige Multilabel-Erkennung zusätzliche Massnahmen erforderlich sind. Eine mögliche Verbesserung könnte durch die Erweiterung der Modellarchitektur erreicht werden, beispielsweise durch die Einführung von Mechanismen zur Berücksichtigung paralleler Klangquellen. Darüber hinaus könnten Optimierungen im Trainingsprozess sowie die Bereitstellung umfangreicherer und qualitativ hochwertiger Trainingsdaten die Modellleistung weiter steigern.

Trotz dieser Herausforderungen konnte durch die Ergebnisse eindeutig die Machbarkeit eines KI-Modells zur Geräusch-Klassifikation nachgewiesen werden. Das aktuelle Modell belegt das Potential für weiterführende Entwicklungen und Anwendungen im Bereich der akustischen Analyse durch künstliche Intelligenz.

7.6.2 Fazit

Die automatisierte Zuordnung von Geräuschen zu für die Klangraumbeurteilung relevanten Kategorien ist ein erster Schritt zur Objektivierung und Vereinfachung von Klangraumanalysen. Diese Art der Analyse erlaubt die Taxonomie vorkommender Geräusche, welche ohne grossen Aufwand auch über längere Zeit (bspw. während einer Woche) erhoben werden kann. Eine Art der Erhebung, welche so bisher ohne enormen Aufwand nicht möglich war. Die Kategorisierung ist anpassbar, so dass für die Beurteilung relevante Kategorien individuell trainiert werden könnten (bspw. mechanisch, menschlich, natürlich wie von Irvine [46] vorgeschlagen). Diese Kategorisierung soll individuelle Aspekte und Beurteilungen nicht ersetzen, sondern als Werkzeug ergänzen. Insbesondere

im Bereich der Klangraumbeurteilung sind lokale Expert*innen, wie auch die Erfahrung von Fachpersonen aus relevanten Bereichen (Akustik, Architektur, Raumplanung, soziale Arbeit, etc.) weiterhin unabdingbar.

Ausblick

In der Machbarkeitsstudie wurde eine einfache KI-Architektur verwendet, welche sich als erfolgreich beweisen hat. Ein komplexeres Modell könnte eine erhebliche Verbesserung bei der Klassifikation bei Mischsignalen hervorbringen. Vergleichbare Projekte haben dies bereits bewiesen. Für eine Implementation solcher Modelle wäre jedoch ein grösserer Aufwand nötig, da es auch um Anpassungen des Preprocessing geht. Ein Vorschlag für eine zukünftige Entwicklung ist die Verwendung der VGGNet-Architektur, welches mehrschichtig aufgebaut ist. Ein Training auf grösseren Datensätzen minimiert dabei das Risiko für ein Overfitting. Dies bedeutet, dass das Modell besser generalisiert und auf neue Situationen besser reagiert.

Möglichkeiten für die Weiterentwicklung bestehen nebst den gerade genannten Anpassungen in der Modellarchitektur auch in dem im Abschnitt 7 genannten Soundscape-Model (Erkennung der Umgebung und von allfällig relevanten Raumvariablen) und Sentiment-Model (Beurteilung des Klangraums nach einer Sentiment-Policy). Eine weitere Möglichkeit ist die Erweiterung des Modells um weitere bzw. andere Kategorien oder auch die Extraktion des Schalldruckpegels verschiedener gleichzeitig auftretender Quellen(-kategorien).

8 Leitfaden

Im Dokument “Empfehlungen für eine Beurteilung von Klangräumen mit Hilfe von quantitativen Untersuchungen und qualitativen Erhebungen” werden relevante Kriterien für eine Kombination aus qualitativer und quantitativer Beurteilung sowie die Methoden zu deren Erhebung beschrieben. Es folgt eine Kopie dieses Dokuments.

Objektive Methoden der Klangraumbeurteilung und Möglichkeiten der KI-basierten Klangraumklassifizierung

Empfehlungen für eine Beurteilung von Klangräumen mit Hilfe von quantitativen Untersuchungen und qualitativen Erhebungen

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Kurzübersicht.....	2
3. Kategorisierung und Abgrenzung von Räumen	2
4. Bewertung bestehender Beurteilungsmethoden	3
4.1. Normenreihe ISO 12913 («Soundscape»)	3
4.2. Stadtklang	4
4.3. Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorte im Siedlungsraum («Cercle Bruit»)	5
4.4. Fazit	5
5. Vorschlag zur objektiven Klangraumbeurteilung und erhobene Variablen.....	5
5.1. Erhebung der Gesamtsituation	5
5.2. Erhebung technischer Variablen.....	5
5.3. Erhebung der Oberflächen	7
5.4. Auswahl der Testpersonen	7
5.5. Erhebung der Nutzungen	7
5.6. Erhebung der Klangraum-Wahrnehmung	7
5.7. Empfehlung	8
6. Fazit und Würdigung	8

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Institut für Elektrotechnik

Prof. Dr. Armin Taghipour

Hochschule Luzern – Soziale Arbeit
Institut für Soziokulturelle Entwicklung

Prof. Dr. Ulrike Sturm

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abt. Lärm und NIS
Dr. Trond Maag
Monbijoustrasse 40
CH-3003 Bern
trond.maag@bafu.admin.ch

1. Einleitung

Im Rahmen eines 17-monatigen Projekts konnten die HSLU SA und T&A Untersuchungen zum Thema der objektiven Klangraumbeurteilung durchführen. Hierfür wurden in 4 Räumen in Basel, Bern, Luzern und Zürich einerseits technische, insbesondere akustische Werte erhoben, andererseits wurden Befragungen in diesen Räumen durchgeführt. Die Ergebnisse, welche Kriterien sich als relevant für die objektive Beurteilung zeigten und wie diese erhoben werden, wird in diesem Dokument beschrieben.

2. Kurzübersicht

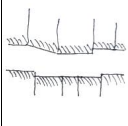
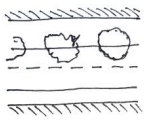
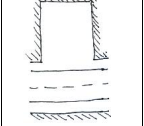
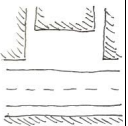
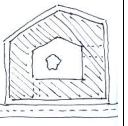
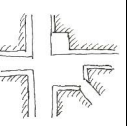
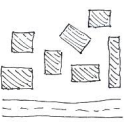
Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU untersuchte ein interdisziplinäres Projektteam der Hochschule Luzern an verschiedenen Orten in der Schweiz die physikalischen und wahrgenommenen Klangraumqualitäten von städtischen Wohn-Innenhöfen.

Dieses interdisziplinäre Projekt hat zum Ziel, eine objektive Evaluationsmethode für die Klangraumbeurteilung und -klassifizierung zu entwickeln.

3. Kategorisierung und Abgrenzung von Räumen

Grundsätzlich gilt das Projektinteresse allen Aussenräumen, die das Potenzial für die Funktion als Erholungsräume haben. Dies können Plätze, Strassen, Parkanlagen und Aussenräume von Wohnsiedlungen sein.

Alle diese Raumformen weisen ihre eigene Typologie auf, die bei einer Untersuchung der Klangräume zu berücksichtigen ist. Bei den Überlegungen zur Auswahl geeigneter Fallstudien wurde folgende Typologie angewendet:

Kleine Gasse	Strassenkorridor	«Raumtasche»	Vorplatz / Vorhof	Innenhof	Aufgeweitete Strassenkreuzung	Block-Feld
						

Neben diesen Raumtypologien waren folgende Kriterien massgebend für die Auswahl der Untersuchungsräume:

- Art, Zeitraum und Dauer der Nutzungen
- Kaschierung durch Hintergrundlärm
- Akustische Eigenschaften der Oberflächen
- Begrünung
- Kleinteilige Strukturierung
- (Ästhetik der) Architektur
- Öffentlicher (resp. privater) Charakter der Nutzungen

Für die Fallstudien wurde die Auswahl auf mehr oder weniger geschlossene Innenhöfe gelegt. Dies hat seinen Grund in praktischen Überlegungen:

Hinsichtlich der Nutzung stehen Erholungsnutzungen (Freizeit und Spiel), die Aufenthaltsfunktion und öffentliche Nutzung resp. zumindest eine Nutzung mit (halb-)öffentlichem Charakter im Zentrum. In städtischen Wohngebieten sind diese Funktionen häufig in Innenbereichen von Baufeldern anzutreffen. Die Typologie des Innenhofs mit den oben genannten Nutzungen ist neben ihrer Häufigkeit für die

Projektfragestellung von besonderem Interesse, da eine allseits umschlossene Raumsituation einen gewissen Schutz vor Verkehrslärm oder gewerblichen Lärm bietet. Zudem ist diese Raumsituation akustisch einfacher fassbar.

Es wurden daher mehr oder weniger geschlossene Innenhofsituationen mit einer halböffentlichen oder öffentlichen Nutzung für die vier Fallbeispiele ausgewählt.

4. Einordnung bestehender Beurteilungsmethoden

In der Literatur werden bereits Möglichkeiten zur Beschreibung und Beurteilung von Klangräumen beschrieben. Ebenfalls existieren Leitfäden, sowie eine Norm mit Beschreibungen zu Klangräumen bzw. Soundscapes. Einige ausgewählte Herangehensweisen werden in diesem Abschnitt beschrieben¹:

Dazu wurden drei Ansätze aus der Klangforschung ausgewählt und in Bezug auf ihre zentralen Inhalte analysiert. Die Auswahl der Ansätze erfolgte aufgrund der Aktualität, der inhaltlichen Relevanz sowie der Praktikabilität für das Projekt, wird jedoch nicht als abschliessend betrachtet. Es wurden die Ansätze ISO 12913 «**Soundscape**», «**Stadtklang**» sowie die Beurteilung der Klangqualität nach «**Cercle Bruit**» ausgewählt.

Die Analyse der drei ausgewählten Ansätze zeigt, dass eine Beurteilung von Klangräumen stets in Abhängigkeit der menschlichen Wahrnehmung zu erfolgen hat. Diese Perspektive wird insbesondere im Soundscape Ansatz hervorgehoben, welcher eine standardisierte (ISO) Messmethodik sowie die Berücksichtigung psychoakustischer Faktoren für die Beurteilung von Klangräumen vorschlägt. Der Klangraum ist somit stets als ein Sozialraum einzuordnen, der durch persönliche Erwartungen und Erfahrungen geprägt wird. Für die Beurteilung von Klangräumen sind daher neben akustischen Messungen, vor allem die individuellen Perspektiven und Wahrnehmungen zu erfassen, etwa durch qualitative sowie quantitative Erhebungen wie Interviews, Beobachtungen, Befragungen oder angeleitete Soundwalks. Damit bildet subjektive und kollektive Bewertung durch Personen eine der zentralsten Komponenten in der Klangraumbeurteilung. Inwiefern ein Klangraum wahrgenommen wird, hängt jedoch auch von der baulichen Gestaltung und der Materialität eines Ortes ab. Der Ansatz Stadtklang zeigt auf, dass auch Kartierungen oder Konzepte wie das Raumschalenmodell die akustische Einordnung von Stadträumen unterstützt. Der Cercle Bruit Ansatz bietet hierfür zudem ein klar definiertes Kriterienraster, das als praktikables Instrument zur Bewertung von Klangräumen anhand von vorgegebenen Kriterien dient.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, in welchen Aspekten die Überlegungen im vorliegenden Projekt von den untersuchten drei Ansätzen abweichen.

4.1. Normenreihe ISO 12913 («Soundscape»)

Wichtigste Charakteristika:

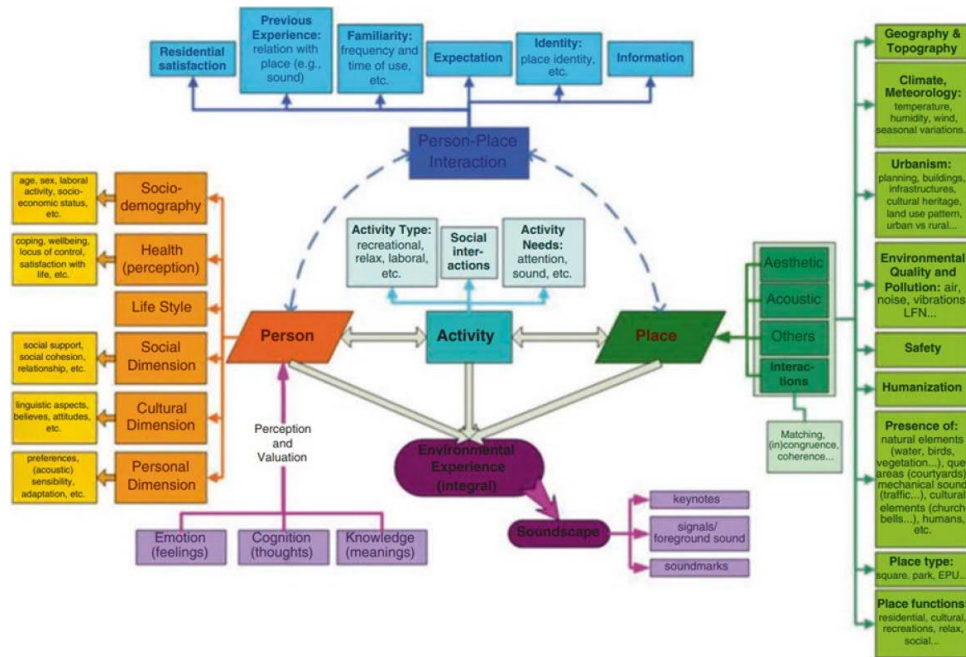
- Fokus: menschliche Wahrnehmung
- Standardisierung der Messung von Klanglandschaften
- Multidisziplinärer und ganzheitlicher Ansatz

Relevante Aspekte, die nicht zur Projektfragestellung, resp. zu den Projektüberlegungen passen:

- Gemäss der ISO-Norm ist jeder Fall auf der qualitativen Ebene für sich zu betrachten. Dies läuft der Vorgabe einer Objektivierung der Klangraumbeurteilung, vor allem aber einer sich daraus ergebenden Standardisierung von Klangraum-Situationen zuwider.
- Hoher Grad an Komplexität und Aufwand

¹ Näheres kann dem Hauptbericht entnommen werden.

- Es fehlen aktuell klare Grenzwerte und Einteilungen zur Beurteilung von Klangräumen.



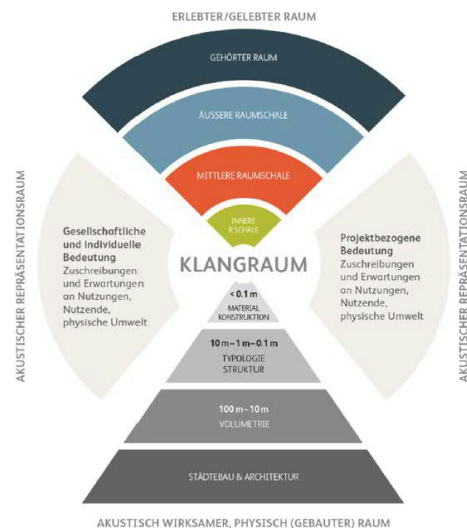
4.2. Stadtklang

Wichtigste Charakteristika:

- Fokus: Wahrnehmung und Repräsentation
- Interaktion zwischen Raum und Hörenden
- Einfluss baulicher Elemente
- Einfluss Wahrnehmung

Relevante Aspekte, die nicht zu den Projekt-Fragestellung, resp. zu den Projekt-Überlegungen passen:

- In der Stadtklang-Methodik wird kaum mit physikalischen Daten gearbeitet. Das vorliegende Projekt dagegen setzt auf die Methodentriangulation von quantitativen und qualitativen Daten sowie von physikalischen Messungen und sozialwissenschaftlichen Datenerhebungen.



4.3. Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorte im Siedlungsraum («Cercle Bruit»)

Wichtigste Charakteristika:

- Fokus: akustische Erholungsqualität
- positive/negative Bewertung der Geräuschwahrnehmung
- Einfaches, strukturiertes Bewertungssystem

Relevante Aspekte, die nicht zu den Projekt-Fragestellungen, resp. zu den Projekt-Überlegungen passen:

- Relevante Kontextfaktoren und Differenzierung in der qualitativen Klangraumwahrnehmung können nicht (vollständig) abgebildet werden.
- In der Cercle Bruit Methode wird nur optional mit physikalischen Messungen gearbeitet. Eine Objektivierung ist somit einzig durch die Hinweise zur Beurteilung gegeben.

Kriterien	-2	-1	0	+1	+2
generell					
Allgemeine Situation, Ruhe					
Dominierende Geräusche (Natur+Kultur vs. Technik)					
Geräuschvielfalt – Klangvielfalt					
Kommunikationsfreundlichkeit STI (1m) > 0.60					
Akustische Nutzungsverträglichkeit (ggs. Störung)					
Schallausbreitung und Reflexionen					
Ortung in Richtung und Distanz					
speziell					
Wassergeräusche					
Spezielle Schallquellen					
Sicherheit vor Störungen auf Platz					
Bonus					
Klangraum nach Wahl					
Einzigartigkeit, Identifizierbarkeit					

4.4. Fazit

Alle drei Ansätze liefern wichtige Anregungen für eine objektive Klangraumanalyse:

- Alle setzen auf eine kriteriengestützte Einschätzung des Klangraums durch Testpersonen.
- Der «**Soundscape**»-Ansatz setzt auf eine differenzierte, sozialräumliche Betrachtungsweise und geht von einer konsequent einzelfallweisen Betrachtung aus, dient also per se nicht für eine Objektivierung der Klangraum-Analyse. Der Vorteil liegt jedoch in einer in Normen festgehaltenen und sehr ausdifferenzierten Erhebungsmethode.
- Der «**Stadtklang**»-Ansatz arbeitet primär mit der Topologie eines Raums. Die menschliche Wahrnehmung wird durch hochspezialisierte ExpertInnen erfasst (die jedoch nicht die Nutzenden-Perspektive einnehmen können).
- Der «**Cercle Bruit**»-Ansatz ist bewusst einfach und praxisnah gehalten. Anhand der möglichst zahlreichen Klangraumbeurteilung durch verschiedene Personen derselben Räume sollen die Wahrnehmungen objektiviert werden. Ausserdem ist das Modell für bestimmte Aussenräume konzipiert, arbeitet also ebenfalls mit einer gewissen Kategorisierung von Räumen.

5. Vorschlag zur objektiven Klangraumbeurteilung und erhobene Variablen

Im Folgenden wird aufgrund der Messungen und Erhebungen bei den vier Fallbeispielen ein Vorschlag für eine standardisierte Klangraumanalyse sowie für deren Weiterentwicklung gemacht.

5.1. Erhebung der Gesamtsituation

In einem ersten Schritt wird der zu bewertende Raum beschrieben: In seiner baulichen Ausprägung, seiner Eigentums- und Bewohnendenstruktur sowie in der Einbettung in die Umgebung, resp. in das städtische Gefüge. Wichtig sind zudem die Lärmquellen sowie die Naherholungsmöglichkeiten in der unmittelbaren Umgebung.

5.2. Erhebung technischer Variablen

Gemäss den Resultaten des Projekts bestehen folgende statistisch relevante Abhängigkeiten zwischen technisch messbaren Variablen und ob ein Raum als akustisch angenehm empfunden wird:

- A-bewerteter äquivalenter Schalldruckpegel L_{Aeq}
- Sprachverständlichkeitsindex STI
- Grünanteil

Erhoben, jedoch im Rahmen dieses Projekts als fehlerhaft oder nicht statistisch relevant detektiert, wurden auch folgende Variablen:

- Diverse Schalldruckpegelmasse aus Mono- und Binauralaufnahmen
 - L_{AFmax} , L_{AFmin} , $L_{AF5\%}$, $L_{AF10\%}$, $L_{AF50\%}$, $L_{AF90\%}$, $L_{AF95\%}$, L_{10-L90} , L_{Ceq} , L_{Zeq} , Terzband-Schalldruckpegelwerte
- Raumakustische Variablen
 - T20, EDT, spektral aufgelöste RT60 Werte
- Diverse psychoakustische Variablen aus Binauralaufnahmen
 - Schärfe, Rauigkeit, Tonalität, Lautheit
- Diverse aus den Audioaufnahmen erhobene Variablen
 - Spectral Slope, Time Frequency Second Derivative (TFSD), Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC)
- Aus der Impulsantwort erhobene Variablen
 - Echokriterium nach Dietsch & Kraak, Stärkemass G
- visuelle Aspekte
 - Anteil Blau in Bildern, Anteil Naturmerkmale in Bildern

Entsprechend dieser Erkenntnisse sollen die drei erstgenannten Variablen bei der Beurteilung eines Klangraums erhoben werden. Die Messung und Bestimmung der Schalldruckpegel erfolgt nach Norm ISO 1996-1:2016. Die Messung der Sprachverständlichkeit erfolgt nach Norm IEC 60268-16. Folgende Punkte sind hierbei zu beachten:

- Der Schalldruckpegel kann innerhalb eines Objekts unterschiedlich sein und ist von vielen Faktoren abhängig (Tageszeit, Jahreszeit, Wetter, Schulferien, etc.). Zur Vergleichbarkeit verschiedener Klangräume sollte entweder ein klar definierter, standardisierter Zustand gemessen werden oder möglichst viele verschiedene Zustände, welche entweder gemittelt oder abhängig von den externen Faktoren angegeben werden.
- Zur Extraktion allfälliger Korrektur von Messungen muss parallel zu den Schalldruckpegelmessungen auch eine Audiospur aufgenommen werden.

Insbesondere für die Erhebung der Sprachverständlichkeit würden Simulationen, welche diese berechnen können, eine stabilere Methode bieten, welche dann mit den gemessenen Schalldruckpegeln ergänzt werden kann. Ansonsten sind hier folgende Punkte bei der Messung zu beachten:

– Die Messung des Sprachverständlichkeitsindex STI ist hauptsächlich abhängig vom Hintergrundschalldruckpegel. Entsprechend sollten mehrere Messungen in unterschiedlichen Zuständen (zeitlich, meteorologisch) durchgeführt und entweder zeitlich gemittelt oder alternativ abhängig von den externen Zuständen angegeben werden.

- Um das Szenario eines Gesprächs abzubilden, soll mit einer Quelle-Empfänger Distanz von 1m gemessen werden.
- Um das Szenario eines benachbarten Gesprächs abzubilden, soll mit einer Quelle-Empfänger Distanz von 4m gemessen werden.
- Der (gerichtete) Schallgeber soll für beide Fälle auf den Empfänger ausgerichtet werden.
- Der Hintergrundschalldruckpegel sollte während der STI-Messungen ebenfalls erhoben werden.

Der Grünanteil wird bestimmt, indem an typischen Aufenthaltspositionen Fotografien in horizontaler Für die Erhebung der Grünanteile soll eine Auswahl digitaler Fotografien an typischen Aufenthaltsorten mit typischen Blickwinkeln (in horizontaler Richtung) erfasst werden. Für die Fotografien sollen Kameras verwendet werden, welche nicht automatisierte Einstellungen erlauben. Auf diese Weise können Probleme in der Analyse aufgrund von Farbverfälschungen bzw. -verdunkelungen vermieden werden.

Die Anwendbarkeit dieser Messmethoden ist unabhängig der spezifischen Raumkategorie. Für sämtliche Erhebungen gilt, dass diese auf Plausibilität überprüft werden müssen.

5.3. Erhebung der Oberflächen

Im aktuellen Projekt wurde die Bewertung der Oberflächen qualitativ vorgenommen, also «Kiesboden», «Fassade Beton», «Fassade EG: Holzverschalung». Die Beschreibung der Materialisierung dient der späteren Abstimmung mit der Einschätzung der Testpersonen zur Aufenthaltsqualität. Die Oberflächen sind jedoch nicht nur für Absorptionsgrad und Nachhallzeit relevant, sondern auch für qualitative Aspekte: Wahrnehmung und Attraktivität der untersuchten Räume werden unter anderem durch die Oberflächen geprägt, sei dies durch ästhetische Effekte oder durch die Schallreflexion im Nahraum. Auf eine Berechnung des Schallabsorptionsgrades wird verzichtet, da dies indirekt in der Messung der Sprachverständlichkeit abgebildet wird. Eine Berechnung des Absorptionsgrades macht in diesem Fall wenig Sinn, zumal eine raumakustische Berechnung im Aussenraum üblicherweise nur in grober Näherung durchgeführt werden kann.

5.4. Auswahl der Testpersonen

Bereits im «Stadtklang»-Projekt hat sich gezeigt, dass die Klangraum-Bewertung durch die Anwohnenden der Innenhöfe aus folgenden Gründen nicht sinnvoll ist:

- Die Anwohnenden lassen sich kaum auf Befragungen, schon gar nicht auf Erhebungen vor Ort mit definiertem Zeitpunkt ein. Sowohl im Stadtklang-Projekt als auch im aktuellen Projekt sind entsprechende schriftliche Aufrufe ohne Resonanz geblieben.
- Die Bewertung eines Klangraums kann nicht vollständig vom individuellen Erleben entkoppelt werden. Allerdings benötigt die erforderliche Einschätzung ein gewisses Abstraktionsvermögen. Die Wahrnehmung von Anwohnenden ist von jahrelangen persönlichen Erlebnissen mit dem und im Innenraum beeinflusst und damit in der Objektivität erheblich beeinträchtigt.
- Aus diesem Grund wurde mit einer Gruppe von unterschiedlichen Testpersonen gearbeitet, welche sich über einen längeren Zeitraum vor Ort aufhielten und dadurch temporär die Nutzenden-Perspektive einnehmen konnten.
- Die Erhebungen konzentrieren sich auf die Aussensicht, nicht auf die Bewohnenden. Bei diesen spielen noch zahlreiche andere Kriterien eine Rolle, welche weggelassen wurden, um das Projekt handhabbar zu halten.

5.5. Erhebung der Nutzungen

Die Nutzungen in einem Raum sind unter verschiedenen Gesichtspunkten relevant: Einerseits als Elemente des Sozialraums, die massgeblich zur Gestaltung dieses Raums beitragen. Dadurch wird der Raum – je nach Nutzung – ganz unterschiedlich wahrgenommen. Allerdings ist diese Wahrnehmung sehr unterschiedlich geprägt: Werden spielende Kinder von ihren Eltern als Teil ihrer Lebenswelt betrachtet und sind deshalb primär durchaus positiv konnotiert, kann dies bei Menschen die keinen Bezug zu diesen Kindern – oder gar generell zu Kindern – haben durchaus als störende Lärmquelle wahrgenommen werden. Im Projekt hat sich gezeigt, dass diese Störung massgeblich von den akustischen Eigenschaften der Lärmquelle abhängt.

Daraus lässt sich bereits ein Aspekt der Bedeutung der Nutzenden ablesen. Andere Menschen machen einen Raum für Nutzende attraktiv²: Vertraute Personen fördern die Identifikation mit dem Raum, Fremde machen ihn interessant.

5.6. Erhebung der Klangraum-Wahrnehmung

Die Nutzenden sind untrennbar mit den Nutzungen verbunden. Eine reine Beschreibung der beiden ist jedoch für die Klangraumwahrnehmung eine zu neutrale Aussage. Erst die Bedeutung, welche die

² Zitat von Jan Gehl.

Befragten (Nutzenden) den anderen Nutzenden und den Nutzungen in Bezug auf ihre Perspektive geben, gibt Hinweise auf die Klangraumwahrnehmung.

Für die Bewertung des Klangraumes durch die Nutzenden wird folgendes Verfahren empfohlen:

- Fragebogen-Erhebung zur Wahrnehmung des Klangraums mit folgenden Skalenabfragen:
 - Was hören Sie? (Bitte geben Sie in absteigender Deutlichkeit) die verschiedenen Klangquellen an, die Sie identifizieren können (also «Kinder», «Flugzeug», «Vögel», ... maximal 8).
 - Wie empfinden Sie die Geräusche, resp. die Klanglandschaft? (hier ist es laut / hier ist es akustisch angenehm / die Geräusche passen zur Umgebung)
 - Wie empfinden Sie die Geräusche?

	trifft überhaupt nicht zu	trifft eher nicht zu	trifft mittel zu	trifft eher zu	trifft absolut zu
ereignisreich	☐	☐	☐	☐	☐
chaotisch	☐	☐	☐	☐	☐
lästig / störend	☐	☐	☐	☐	☐
monoton	☐	☐	☐	☐	☐
ereignisarm	☐	☐	☐	☐	☐
ruhig / beruhigend	☐	☐	☐	☐	☐
angenehm	☐	☐	☐	☐	☐
aufregend / lebhaft	☐	☐	☐	☐	☐

- Dialogisches Fokusgruppengespräch vor Ort zu den Klangraumwahrnehmungen. Diese werden protokolliert und nach Kategorien ausgewertet.
 - Was gefällt Ihnen an diesem Ort? Weshalb?
 - Wie ist die Aufenthaltsqualität an diesem Ort? Was macht sie aus?
 - Wie beurteilen Sie die «Raumakustik» dieses Innenhofs?
 - Welche Geräusche / Klanglandschaft würden Sie an diesem Ort typischerweise erwarten?
 - Würden Sie gerne hier wohnen? Weshalb, resp. weshalb nicht?

Zusätzliche Fragen zu den weiteren Beurteilungspunkten im Raum

- Was hat sich an den Geräuschen / der Klanglandschaft gegenüber der Hofmitte geändert?
- Eine Bewertung von Audioaufnahmen ohne den direkten Raumbezug zu anderen Tageszeitpunkten hat sich nicht bewährt.

Diese Erhebung ist bei Räumen, die sich durch unterschiedliche Bereiche auszeichnen, für jeden Bereich einzeln durchzuführen.

5.7. Empfehlung

Im Projekt wurden die Nutzungen und die Nutzenden sehr offen und auch episodisch beschrieben. Im Hinblick auf eine Objektivierung / Standardisierung wäre die Erhebung zu einem gewählten Zeitpunkt mit Auszählung bspw. der Nutzenden zu prüfen. Anhand einer geeigneten Kategorienbildung (*siehe Abschnitt 3*) könnten die Möglichkeiten einer Standardisierung weiterentwickelt werden.

6. Fazit und Würdigung

Es gelingt mit der dargestellten Vorgehensweise, die Methodik für eine «objektive Klangraumbeurteilung» um die Perspektive von Nutzenden zu erweitern. Dieser komplementäre Ansatz kann in Anbetracht der

Änderung der Gesetzeslage sowie einer voraussichtlich weiter zunehmenden Verdichtung in den Städten ein besonderes Gewicht erhalten.

9 Fazit

9.1 Beantwortung der Untersuchungsfragen

- Welche akustischen und raumakustischen Messgrößen sind bei der Klangraumbeurteilung von Aussenräumen von Wohnbauten relevant?
 - Unsere Literaturrecherche zeigt, dass akustische Parameter wie L_{Aeq} und L_{AFmax} die momentane akustische Situation gut beschreiben können. Die empfundene Lästigkeit/Störung, aber auch das Wohlbefinden (und die Annehmlichkeit), sind stark mit dem SPL verbunden. Allerdings hat unser Projekt gezeigt, wie stark der SPL sowohl im Tagesverlauf als auch von Tag zu Tag (von Saison zu Saison) variieren kann. Dementsprechend muss man sehr achtsam sein, eine momentane akustische Szenerie nicht überzubewerten und sie nicht vorschnell als repräsentativ für einen Ort anzusehen. Wenn die SPL-Werte den Ort einigermaßen repräsentieren sollen, empfehlen wir, neben dem L_{Aeq} anstatt L_{AFmax} (oder zusätzlich dazu) den L_{AF10} in Betracht zu ziehen. Alternativ könnten normierte Bedingungen (bspw. Wochentag, Uhrzeit und meteorologische Bedingungen) zu einer besseren Vergleichbarkeit verwendet werden.
 - Psychoakustische Parameter liefern wertvolle Informationen über Geräusche, sind jedoch stark quellenabhängig und beschreiben daher eher die Schallquellen als den Raum selbst. Werden sie jedoch über einen längeren Zeitraum erfasst und anhand statistischer Kennwerte vertreten, können sie relevante Rückschlüsse auf den Raum ermöglichen – insbesondere hinsichtlich der typischen Geräuscharten, die dort vorherrschen. Vor allem aus diesem Grund eignen sie sich eher für eine relative als eine absolute Bewertung: Sie können Unterschiede zwischen verschiedenen Aussenräumen aufzeigen.
 - Auch raumakustische Parameter können zur Beschreibung eines Aussenraums herangezogen werden. Im Kontext der Klangraumbeurteilung in diesem Projekt erweist sich beispielsweise der elektroakustisch basierte STI als ein geeigneter Prädiktor, da er Auskunft darüber gibt, inwieweit ein Raum für Gespräche geeignet ist. In dieser Studie zeigte sich jedoch auch, dass der RT60 bei den vier Hauptobjekten keine prognostische Relevanz für die wahrgenommene Qualität hatte. Dies widerspricht den Erkenntnissen aus der Literatur und sollte daher in zukünftigen Studien weiter untersucht werden.

- Welche soziokulturellen Parameter beeinflussen die Möglichkeit zur Erholung und die Wohnqualität von Klangräumen?
 - In Bezug auf soziokulturelle Aspekte sind Nutzungen und Nutzende eines Aussenraums wesentlich. Eine reine (parametrische) Beschreibung der beiden ist jedoch für die Klangraumwahrnehmung eine zu neutrale Aussage. Erst die Bedeutung, welche die Befragten (Nutzenden) den anderen Nutzenden und den Nutzungen in Bezug auf ihre Perspektive geben, gibt Hinweise auf die Klangraumwahrnehmung.
 - Eine Kategorisierung der Klangquellen in *durch den Menschen verursachte, technische Geräuschemissionen* und *Natur- und Tiergeräusche*, wie sie beispielsweise durch eine KI automatisiert durchgeführt werden könnte, scheint sowohl nach der Literatur als auch aus unseren Ergebnissen hierfür zielführend zu sein, um die Bedeutungen zu erfassen. Diese qualitative Kategorisierung kann mit quantitativen Befragungen nach ISO sowie mit den drei Auftaktfragen zur Wahrnehmung der Klanglandschaft ergänzt werden. Das Item *Die Geräusche passen zur Umgebung* scheint dabei eine neue Dimension / einen separaten Faktor zu erfassen, da es sehr wenig Korrelationen mit anderen Items aufweist. Das könnte z.B. mit der Erwartungshaltung, dem kollektiven Bild und dem Kontext des Orts zusammenhängen.
- Wie lässt sich der Klangraum in Aussenräumen von Wohnbauten beurteilen? Wie sieht ein Punktesystem/Ampelsystem aus, welches die Einflüsse der relevanten Faktoren auf die Klangraumqualität abbildet?
 - Im Einklang mit den Vorgehen nach ISO und Cercle Bruit zeigt unsere Studie eine Notwendigkeit der Berücksichtigung von sowohl qualitativen als auch quantitativen Aspekten. Der Aussenraum sollte nicht rein mit akustischen Werten beschrieben werden. Andere Faktoren, wie Grünanteil beeinflussen die (akustische) Qualität des Aussenraums. Aus diesem Grund ist es noch nicht möglich ein Punktesystem/Ampelsystem zu definieren. Ein solches System würde eine gewichtete Gegenüberstellung aller Prädiktoren voraussetzen.
- Kann mit Hilfe von KI-basierten Modellen eine Klangraumklassifizierung (z.B. inkl. akustischer/raumakustischer Messgrößen, Inhalt/Kontext usw.) erreicht werden?
 - Es konnte gezeigt werden, dass mit KI-basierten Modellen Geräuschquellen mit hoher Zuverlässigkeit identifiziert werden können. Ein solches Quellen-Modell

könnte mit anderen akustischen und nicht-akustischen Parametern ergänzt werden, so dass ein Modell für die Beurteilung der Qualität des Klangraums entwickelt werden kann. Bei der Festlegung dieser Beurteilung gelten die gleichen Unsicherheiten wie oben zum Thema Punkte- oder Ampelsystem erwähnt.

- Welche Massnahmen erzielen die grösstmögliche Verbesserung der Klangraumqualität in Aussenräumen von Wohnbauten?
 - Grünanteil erhöhen.
 - STI erhöhen.
 - Die Literatur empfiehlt eine Senkung der Nachhallzeit (z.B. EDT, RT60 usw.) [2, 27, 29, 47].
 - Für eine momentane Klangraumbeurteilung wird ein niedriger momentaner SPL (L_{Aeq} , L_{AFmax} oder L_{AF10}) zur besserer Bewertung des Klangraums führen. Sollte ein Klangraum über einen längeren Zeitraum immer wieder ähnliche / vergleichbare Pegelwerte aufweisen, können diese Werte für die Beschreibung der Qualität des Klangraums verwendet werden.
 - Stimmigkeit der akustischen Umgebung zum Raum könnte die Empfindung des Klangraums erhöhen (nur nicht-signifikante Tendenzen erkennbar).

9.2 Empfehlungen für eine Anwendung der Untersuchungsmethode

9.2.1 Erhebung technischer Variablen

Die Erhebungsmethoden akustischer, raumakustischer, sowie weiterer technischer Variablen müssen gemäss der Erfahrungen in diesem Projekt für den Aussenraum adaptiert werden. Einerseits verhindert der erhöhte Störschallpegel bei gewissen Methoden die verlässliche Erhebung der gewünschten Werte. Andererseits unterliegen viele Variablen Bedingungen, welche ihrerseits abhängig von Tageszeit, Jahreszeit, sowie meteorologischen Variablen sind. Um eine aussagekräftige und repräsentative Erhebung der relevanten Variablen durchzuführen, müssen die Methoden wie folgt angepasst werden:

- Schalldruckpegel SPL und psychoakustische Variablen
 - Der Schalldruckpegel kann innerhalb eines Objekts unterschiedlich sein und ist von vielen Faktoren abhängig (Tageszeit, Jahreszeit, Wetter, Schulferien, etc.). Zur Vergleichbarkeit verschiedener Klangräume sollte entweder ein klar

definierter, standardisierter Zustand gemessen werden oder möglichst viele verschiedene Zustände, welche entweder gemittelt oder abhängig von den externen Faktoren angegeben werden.

- Dasselbe gilt für die Erhebung psychoakustischer Variablen.
- Zur Extraktion der psychoakustischen Variablen und allfälligen Korrektur muss parallel zu den Schalldruckpegelmessungen auch eine Audiospur aufgenommen werden.
- Nachhallzeit RT60
 - Das Anregungssignal muss in allen interessierenden Frequenzbändern mindestens 30 dB, besser 40 dB über dem statischen Hintergrundpegel liegen.
 - Es sollen zur Stabilität der Messergebnisse insbesondere bei stark fluktuierenden Hintergrundgeräuschpegeln genügend Messwiederholungen (Vorschlag: 12 Wiederholungen) durchgeführt werden.
 - Sollten in verschiedenen Bereichen des Objekts unterschiedliche Nachhallzeiten erwartet werden, sollen diese separat ermittelt werden.
 - Eine hohe RT60 weist auf ausgeprägte Reflexionen hin, die typischerweise zu einem erhöhten Schalldruckpegel (SPL) führen können. Auch wenn die Bestimmung der RT60 in Aussenräumen – insbesondere in offen gestalteten Bereichen wie Höfen – methodisch eingeschränkt oder nicht zuverlässig möglich ist, kann sich der indirekte Einfluss reflektierender Flächen dennoch im SPL bemerkbar machen.
- Sprachverständlichkeitsindex STI
 - Die Messung des Sprachverständlichkeitsindex STI ist hauptsächlich abhängig vom Hintergrundschalldruckpegel. Entsprechend sollten mehrere Messungen in unterschiedlichen Zuständen (zeitlich, meteorologisch) durchgeführt und entweder zeitlich gemittelt oder alternativ abhängig von den externen Zuständen angegeben werden.
 - Um das Szenario eines Gesprächs abzubilden soll mit einer Quelle-Empfänger Distanz von 1m gemessen werden.
 - Um das Szenario eines benachbarten Gesprächs abzubilden soll mit einer Quelle-Empfänger Distanz von 4m gemessen werden.
 - Der (gerichtete) Schallgeber soll für beide Fälle auf den Empfänger ausgerichtet werden.

- Der Hintergrundschalldruckpegel sollte während der STI-Messungen ebenfalls erhoben werden.
- Messung der Impulsantwort
 - Zur Anregung soll ein deterministisches Signal (bspw. ein logarithmischer Sinus-Sweep) im Frequenzbereich 50 – 20000 Hz verwendet werden.
 - Zur Wiedergabe soll ein ungerichteter Schallgeber (bspw. Dodekaederlautsprecher) verwendet werden.
 - Das Anregungssignal soll in allen interessierenden Frequenzbereichen mindestens 30 dB, besser 40 dB über dem Hintergrundpegel liegen.
 - Es soll mit einer Quelle-Empfänger Distanz von 4m gemessen werden.
 - Auf Empfängerseite soll ein Messmikrofon der Klasse 1 benutzt werden, welches eine lineare Charakteristik im angestrebten Schalldruckpegelbereich aufweist.
 - Die Abtastung soll mit einer Rate von mindestens 44.1 kHz geschehen und die Bittiefe mindestens 16 Bit betragen.

Für die Erhebung der Grünanteile soll eine Auswahl digitaler Fotografien an typischen Aufenthaltsorten mit typischen Blickwinkeln (in horizontaler Richtung) erfasst werden. Für die Fotografien sollen Kameras verwendet werden, welche nicht automatisierte Einstellungen erlauben. Auf diese Weise können Probleme in der Analyse aufgrund von Farbverfälschungen bzw. -verdunkelungen vermieden werden.

Für sämtliche Erhebungen gilt, dass diese auf Plausibilität überprüft werden müssen.

9.2.2 Diskussion in Bezug auf Hypothesen der Gesetzesänderung

Die Gesetzesänderung geht von verschiedenen Hypothesen aus, welche Erholung und Wohnqualität im Siedlungsraum unterstützen (s. Abschnitt 1). Die Erkenntnisse der vorliegenden Studie werden im Zusammenhang mit der Siedlungsinnenentwicklung auf diese Hypothesen bezogen.

1. **Nutzungsverträglichkeit:** Nicht alle untersuchten Räume sind gleichermassen für eine vielfältige Nutzung geeignet. Die Unterschiede in der Nutzung zeigen sich recht deutlich. Beispielsweise ist der Aussenraum in Basel sehr naturnah und qualitätsvoll gestaltet, er lässt jedoch nur begrenzte Nutzungen zu: Kinder finden nur sehr wenige befestigte Flächen für Spiele; ausserdem befinden sich die grossen Spielplätze ausserhalb der Innenhöfe im Park. Dadurch sind die Innenhöfe sehr ruhig, was möglicherweise den Bedarf nach Erholung in den Aussenräumen etwas vermindert.

2. **Nutzungsvielfalt:** Alle untersuchten Räume lassen private Gespräche unter vier Augen zu. Dies hat einerseits mit der Gestaltung, aber auch mit der Kaschierung durch Hintergrundlärm zu tun. Am wenigsten trifft dieses Kriterium wohl wiederum auf Basel zu (der Hof ist recht still und bietet kaum Nischen) oder aber auf Luzern (die Geräusche der spielenden Kinder können ein ruhiges Gespräch durchaus erschweren).
3. **Kohärenz und Angebot:** Auf mindestens zwei der untersuchten Räume trifft dieses Kriterium zu: Sowohl in Basel wie auch in Luzern besteht eine unmittelbare Anbindung an weitere Erholungsräume, jedoch mit umgekehrten Vorzeichen: In Basel befinden sich Spielplatz und Park ausserhalb des Innenhofs, in Luzern wird der Innenhof als Spielplatz genutzt. In beiden Fällen findet eine Ausweichbewegung in die angrenzenden Räume statt, so dass diese verschiedene Formen der Erholung (Restoration und Spiel) ermöglichen [48]. Dies führt dazu, dass in Luzern im Innenhof kaum ruhige Erholungsnutzungen verzeichnet wurden, in Basel generell wenig Nutzungen im Innenhof. An den anderen Beispielen konnte die Auswirkung von Vernetzung (in beiden Fällen eher weitere Distanzen) nicht beobachtet werden.
4. **Partizipation, Kommunikation und Co-Kreation:** Im Rahmen der methodischen Möglichkeiten konnten diese Kriterien im Projekt nicht überprüft werden. Es ist jedoch naheliegend, dass beispielsweise der Innenhof in Luzern vor allem aufgrund von Partizipation, Kommunikation und Co-Kreation innerhalb der Genossenschaftsstrukturen trotz der ungünstigen akustischen Situation sehr gut angenommen und genutzt wird.
5. **Multimodales und biophiles Design:** Aus den Erhebungsdaten lässt sich klar ableiten, dass die Gestaltung eines Freiraums nicht alleine ausschlaggebend, jedoch von hoher Relevanz ist: Sowohl Begrünung, angenehme Akustik, interessante Gestaltung, Nutzungsvielfalt und angenehme Oberflächen spielen eine erhebliche Rolle, wie gut ein Klangraum sich zur Erholungsnutzung eignet.

Literatur

- [1] B. W. Hohmann. Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorte im Siedlungsraum. Technical report, Cercle Bruit Schweiz/Suisse, 2021.
- [2] A. Taghipour, S. Athari, A. Gisladdottir, T. Sievers, and K. Eggenschwiler. Room acoustical parameters as predictors of acoustic comfort in outdoor spaces of housing complexes. *Front. Psychol.*, 11:344, 2020.
- [3] A. Taghipour, T. Sievers, and K. Eggenschwiler. Acoustic comfort in virtual inner yards with various building facades. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16(2):249, 2019.
- [4] Kurt Eggenschwiler, Kurt Heutschi, Armin Taghipour, Reto Pieren, Arnthrudur Gisladdottir, and Beat Schäffer. Urban design of inner courtyards and road traffic noise: Influence of façade characteristics and building orientation on perceived noise annoyance. *Build. Environ.*, 224:109526, 2022.
- [5] J. Xiao, L. Lavia, and J. Kang. Towards an agile participatory urban soundscape planning framework. *J. Environ. Plan. Manag.*, 61(4):677–698, 2018.
- [6] J. Kang, F. Aletta, T.T. Gjestland, L.A. Brown, D. Botteldooren, B. Schulte-Fortkamp, P. Lercher, I. van Kamp, K. Genuit, A. Fiebig, A.L. Bento Coelho, L. Maffei, and L. Lavia. Ten questions on the soundscapes of the built environment. *Build. Environ.*, 108:284–294, 2016.
- [7] A. Mitchell, T. Oberman, F. Aletta, M. Erfanian, M. Kachlicka, M. Lionello, and J. Kang. The soundscape indices (ssid) protocol: A method for urban soundscape surveys—questionnaires with acoustical and contextual information. *Appl. Sci.*, 10(7):2397, 2020.
- [8] C. Calleri, L. Shtrepi, A. Armando, and A. Astolfi. Evaluation of the influence of building façade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces. *Build. Acoust.*, 25(1):77–95, 2018.
- [9] E. Badino, R. Manca, L. Shtrepi, C. Calleri, and A. Astolfi. Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon. *Build. Environ.*, 157:242–256, 2019.

- [10] A. Taghipour and E. Pelizzari. Effects of background sounds on annoyance reaction to foreground sounds in psychoacoustic experiments in the laboratory: Limits and consequences. *Appl. Sci.*, 9(9):1872, 2019.
- [11] K. Bolin, A. Kedhammar, and M.E. Nilsson. The influence of background sounds on loudness and annoyance of wind turbine noise. *Acta Acust united Ac*, 98(5):741–748, 2012.
- [12] B. De Coensel, S. Vanwetswinkel, and D. Botteldooren. Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(4):EL148–EL153, 2011.
- [13] T. Van Renterghem. Using vegetation to tackle environmental noise problems – combining exposure level reduction and noise perception improvement. Madrid, Spain, 2019.
- [14] G. Watts, L. Chinn, and N. Godfrey. The effects of vegetation on the perception of traffic noise. *Appl. Acoustc*, 56(1):39–56, 1999.
- [15] T. Van Renterghem and D. Botteldooren. The importance of roof shape for road traffic noise shielding in the urban environment. *J. Sound Vib.*, 329(9):1422–1434, 2010.
- [16] M. Yeung. Adopting specially designed balconies to achieve substantial noise reduction for residential buildings. Hamburg, Germany, 2016.
- [17] H. Hossam El-dien and P. Woloszyn. Prediction of the sound field into high-rise building facades due to its balcony ceiling form. *Appl. Acoust.*, 65(4):431–440, 2004.
- [18] X. Wang, D. Mao, W. Yu, and Z. Jiang. Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade. *Build. Environ.*, 93:1–8, 2015.
- [19] S. Emmenegger. *Acoustic Scene and Room Classification for Real-Time Applications*. Masterarbeit, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 2020.
- [20] DCASE Community. Dcase challenge task 1, <https://dcase.community/challenge2023/task-low-complexity-acoustic-scene-classification>, 2023.
- [21] J.Y. Jeon, P.J. Lee, J. You, and J. Kang. Perceptual assessment of quality of urban soundscapes with combined noise sources and water sounds. *J. Acoust. Soc. Am.*, 127(3):1357–1366, 2010.

- [22] WHO. Environmental noise guidelines for the european region. Technical report, WHO Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark, 2018.
- [23] W. Yang and J. Kang. Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces. *Appl. Acoust.*, 66(2):211–229, 2005.
- [24] ISO 3382-2:2008. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Standard, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2008.
- [25] IEC 60268-16. Sound system equipment – part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Standard, International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2011.
- [26] J. Kang. Numerical modelling of the sound fields in urban streets with diffusely reflecting boundaries. *J. Sound Vib.*, 258(5):793–813, 2002.
- [27] H.-S. Yang, M.-J. Kim, and J. Kang. Acoustic characteristics of outdoor spaces in an apartment complex. *Noise Control Eng. J.*, 61:1–10, 2013.
- [28] P.J. Lee, Y.H. Kim, J.Y. Jeon, and K.D. Song. Effects of apartment building façade and balcony design on the reduction of exterior noise. *Build. Environ.*, 42(10):3517–3528, 2007.
- [29] P.J. Lee and J. Kang. Effect of height-to-width ratio on the sound propagation in urban streets. *Acta Acust united Ac*, 101(1):73–87, 2015.
- [30] Jian Kang. Soundscape in city and built environment: current developments and design potentials. *City Built Enviro*, 1:1, 2023.
- [31] DIN 45681:2005-03. Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen . Standard, DIN, the German Institute for Standardisation: Berlin, Deutschland, 2005.
- [32] DIN 45692:2009-08. Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Standard, DIN, the German Institute for Standardisation: Berlin, Deutschland, 2009.
- [33] ISO 1996-1:2016. Acoustics - description, measurement and assessment of environmental noise – part 1: Basic quantities and assessment procedures. Standard, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016.

- [34] ISO/TS 12913-2:2018. Acoustics - Soundscape – Part 2: Data Collection and Reporting Requirements. Standard, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018.
- [35] ISO 12913-1:2014. Acoustics - Soundscape – Part 1: Definition and Conceptual Framework. Standard, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.
- [36] ISO/TS 12913-3:2019. Acoustics - Soundscape – Part 3: Data analysis. Standard, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2019.
- [37] DIN 45631/A1:2010-03. Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche. Standard, DIN, the German Institute for Standardisation: Berlin, Deutschland, 2010.
- [38] ISO 532-1:2017. Acoustics — Methods for calculating loudnessPart 1: Zwicker method. Standard, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2017.
- [39] DIN 38455:2024-11. Berechnung der Hörempfindung Rauigkeit. Standard, DIN, the German Institute for Standardisation: Berlin, Deutschland, 2024.
- [40] ECMA-74. Measurement of Airborne Noise emitted by Information Technology and Telecommunications Equipment. Standard, ECMA international, Rue du Rhône 114, CH-1204 Geneva, Switzerland, 2022.
- [41] Matteo Lionello, Francesco Aletta, and Jian Kang. A systematic review of prediction models for the experience of urban soundscapes. *Applied Acoustics*, 170:107479, 2020.
- [42] Karmele Herranz-Pascual, Igone García, Itziar Aspuru, Itxasne Díez, and Alvaro Santander. Progress in the understanding of soundscape: objective variables and objectifiable criteria that predict acoustic comfort in urban places. *Noise Mapping*, 3(1), 2016.
- [43] U. Sturm, M. Bürgin, and A. Schubert. *Stadtklang – Wege zu einer hörenswerten Stadt 2 – Band 2: Klangraumgestaltung von Aussenräumen*. vdf Hochschulverlag AG, Zurich, Switzerland, 2019.
- [44] Label Studio. Label Studio Auto Annotation, (zuletzt geöffnet) 17.01.2025. <https://labelstud.io/>.

- [45] Weights and Biases. The AI Developer Platform. <https://wandb.ai/>, (zuletzt geöffnet) 17.01.2025. <https://wandb.ai/>.
- [46] Katherine N Irvine, Patrick Devine-Wright, Sarah R Payne, Richard A Fuller, Birgit Painter, and Kevin J Gaston. Green space, soundscape and urban sustainability: an interdisciplinary, empirical study. *Local environment*, 14(2):155–172, 2009.
- [47] A. Taghipour, A. Gisladdottir, F. Aletta, M. Bürgin, M. Rezaei, and U. Sturm. Improved acoustics for semi-enclosed spaces in the proximity of residential buildings. In *Proc. of Inter-noise 2022*, Glasgow, UK, 2022.
- [48] P. Krass, P. Leiser, T. Maag, and F. Fischer. Bauzonen in lärmbelasteten gebieten. entwurf, 2025.

Abbildungsverzeichnis

1	Projektzeitplan (Offerte)	16
2	Angepasster Projektzeitplan	16
3	Übersicht der Innenhöfe (https://earth.google.com/web) der ersten Feld- messkampagne	19
4	Übersicht der L_{Aeq} Werte aller Objekte zu allen Messzeiten	20
5	Verteilung der Schärfewerte bei den Objekten Nr. 6-10 in 1.2 Meter Auf- nahmehöhe (links) und in 1.7 Meter Aufnahmehöhe (rechts)	21
6	Innenhof HSLU, Sicht Richtung Nordosten	21
7	RT60-Messwerte, Messgeräte Nr. 3 und 4	23
8	Standardabweichung RT60-Messwerte beider Messrichtungen	24
9	STIPA: Alle Messwerte liegen oberhalb von 0.72	24
10	Messvarianten an drei Positionen	25
11	L_{Aeq} -Werte der STIPA-Messungen an allen Mespositionen	25
12	Zürich: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung	33
13	Klangraum Zürich, Zwicky-Areal Ost	34
14	Basel: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung .	35
15	Klangraum Basel, Erlenmatt Ost	36
16	Luzern: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung	37
17	Klangraum Luzern, Himmelrich 3	38
18	Bern: Katasterplan, Vogelperspektive, Fotos am Tag der Datenerhebung .	39
19	Klangraum Bern, Park Humboldtstrasse	40
20	Setup RT60 Luzern	41

21	Setup SPL Bern	42
22	Setup STI Luzern	42
23	Setup Impulsantwort Luzern	43
24	Zürich, Übersicht der Messpositionen	45
25	L_{Aeq} Einzelwerte zu unterschiedlichen Messzeiten	46
26	Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1	47
27	Cepstrogram Messposition 1, Morgen	50
28	Cepstrogram Messposition 1, Mittag	50
29	Cepstrogram Messposition 3, Nachmittag	50
30	Cepstrogram Messposition 4, Abend	50
31	Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen	51
32	STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)	53
33	Innenhof Zürich, Originalbild	55
34	Innenhof Zürich, Bild mit Überlagerung	55
35	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1	56
36	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2	57
37	Basel, Übersicht der Messpositionen	58
38	L_{Aeq} Einzelwerte zu unterschiedlichen Messzeiten	59
39	Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1	60
40	Cepstrogram Messposition 1, Morgen	61
41	Cepstrogram Messposition 1, Mittag	61
42	Cepstrogram Messposition 1, Nachmittag	62
43	Cepstrogram Messposition 1, Abend	62
44	Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen	63
45	STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)	65
46	Innenhof Basel, Originalbild	67
47	Innenhof Basel, Bild mit Überlagerung	67
48	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1	68
49	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2	69
50	Luzern, Übersicht der Messpositionen	70
51	L_{Aeq} Einzelwerte bei unterschiedlichen Messzeiten, Himmelrich 3 Luzern	71
52	Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1	72
53	Cepstrogram Messposition 1, Morgen	75
54	Cepstrogram Messposition 2, Mittag	75
55	Cepstrogram Messposition 3, Nachmittag	75
56	Cepstrogram Messposition 4, Abend	75

57	Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen	76
58	STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)	78
59	Innenhof Luzern, Originalbild	80
60	Innenhof Luzern, Bild mit Überlagerung	80
61	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1	81
62	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2	82
63	Bern, Übersicht der Messpositionen	83
64	L_{Aeq} Einzelwerte zu unterschiedlichen Messzeiten	84
65	Spektrale Darstellung der L_{Aeq} -Messwerte an Position 1	85
66	Cepstrogram Messposition 1, Morgen	88
67	Cepstrogram Messposition 2, Mittag	88
68	Cepstrogram Messposition 3, Nachmittag	88
69	Cepstrogram Messposition 4, Abend	88
70	Mittelwerte der bereinigten Daten, alle Positionen	89
71	STI-Messwerte bezüglich den Bewertungen D (gut) und A (ausgezeichnet)	91
72	Innenhof Bern, Originalbild	93
73	Innenhof Bern, Bild mit Überlagerung	93
74	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 1	94
75	Auswertung nach Cercle Bruit, Seite 2	95
76	Übersicht der Geräuschquellen	101
77	Durchschnittliche Zustimmung zu den Kategorien «laut», «angenehm» und «passend»	102
78	Durchschnittliche Zustimmung zu den Soundscape-Kategorien	103
79	Durchschnittliche subjektive Bewertungen für die Items <i>ruhig</i> / <i>beruhigend</i> (oben) und <i>lästig</i> / <i>störend</i> (unten) als Funktion des Grünanteils (%). . .	122
80	Durchschnittliche subjektive Bewertungen für die Items <i>ruhig</i> / <i>beruhigend</i> (oben) und <i>lästig</i> / <i>störend</i> (unten) als Funktion des STI.	124
81	Systemübersicht der notwendigen KI-Modelle	129
82	Ausschnitt aus Taxonomie ISO/TS 12913-2	130
83	Das Labeln der Audioaufnahmen in Label Studio	132
84	Menge der Audio-Daten im neu erhobenen Dataset in Minuten	132
85	Ablauf der Arbeitsschritte des Sound Event Models	134
86	Vorverarbeitung der Daten	135
87	Filterbank zur Erstellung von Bins in einem Mel-Spektrogramm	136
88	Beispiel einer vorverarbeiteten und gelabelten Audio-Aufnahme der Ge- räuschkategorie water zu 100%	136

89	Parallelkoordinaten-Plot der Sweep-Konfigurationen mit Bezug auf den erreichten <i>lwlap</i> -Score (je gelber die Farbe, desto besser das Modell) . . .	140
90	Überprüfung des Labels traffic	143
91	Überprüfung des Labels water	143
92	Verhalten des KI-Modells bei vermeintlich falschem Labelling	144
93	Mischsignal mit speech_unclear und traffic	146
94	Mischsignal mit speech_unclear und footsteps_gravel	146
95	Mischsignal mit sechs Labels und Wasser als Hintergrundgeräusch.	147
96	Formular von Cercle Bruit Seite 1	B-2
97	Formular von Cercle Bruit Seite 2	B-3
98	STI Rating Tabelle von NTi Audio	B-4
99	Übersicht der Innenhöfe (https://earth.google.com/web) der ersten Feldmesskampagne	B-5
100	Übersicht der L_{Aeq} Werte aller Objekte zu allen Messzeiten	B-8
101	Übersicht der L_{AFmax} -Werte	B-8
102	Verteilung der Schärfewerte bei den Objekten Nr. 6-10 in 1.2 Meter Aufnahmehöhe (links) und in 1.7 Meter Aufnahmehöhe (rechts)	B-9
103	Luftansicht des Innenhofs an der HSLU T&A in Horw (https://earth.google.com/web/)	B-11
104	Der begehbare Teil mit Bodenplatten, Tischen und Stühlen neben der Wiese und einer runden, begrünten Erhöhung	B-11
105	Innenhof HSLU mit RT60-Messpositionen	B-13
106	Innenhof HSLU mit STI-Messpositionen	B-14
107	LZ_{eq} -Werte am Messpunkt 5	B-15
108	RT60-Messwerte, Messgeräte Nr. 3 und 4	B-16
109	Ranges der Messwerte an 6 Messpositionen	B-17
110	Standardabweichung RT60-Messwerte beider Messrichtungen	B-17
111	Mittelwerte RT60-Messwerte beider Messrichtungen	B-18
112	Aufteilung der Messpositionen in drei Gruppen und Mittelung der Messwerte, Messgeräte Nr. 3 und 4	B-19
113	Standardabweichung gruppiert, Messgeräte Nr. 3 und 4	B-20
114	Mittelwerte bei den Frequenzen 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz	B-21
115	LZ_{eq} -Werte an der Messposition 1	B-21
116	STIPA: Alle Messwerte liegen oberhalb von 0.72	B-22
117	Messvarianten an drei Positionen	B-22
118	Stabile <i>mr</i> -Werte zwischen 250 Hz und 4000 Hz	B-23
119	Konstante Messwerte bei 6 aufeinanderfolgenden Messungen	B-24

120	Messrange der multiplen STI-Messung am Messpunkt 1	B-24
121	Messvarianten an der Messposition 6	B-25
122	Messrange der STI-Messung am Messpunkt 6	B-25
123	LA_{eq} -Werte der STIPA-Messungen an allen Mespositionen	B-26
124	LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Zürich	B-37
125	LA_{eq} Spektrum Messposition 3 Zürich	B-37
126	LA_{eq} Spektrum Messposition 4 Zürich	B-38
127	LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Basel	B-38
128	LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Luzern	B-39
129	LA_{eq} Spektrum Messposition 3 Luzern	B-39
130	LA_{eq} Spektrum Messposition 4 Luzern	B-40
131	LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Bern	B-40
132	LA_{eq} Spektrum Messposition 3 Bern	B-41
133	LA_{eq} Spektrum Messposition 4 Bern	B-41
134	Überprüfung des Labels <i>construction</i>	B-43
135	Überprüfung des Labels <i>footsteps_gravel</i>	B-44
136	Überprüfung des Labels <i>speech_unclear</i>	B-44
137	Überprüfung des Labels <i>traffic</i>	B-45
138	Überprüfung des Labels <i>train</i>	B-45
139	Überprüfung des Labels <i>water</i>	B-46
140	Überprüfung des Mischsignals mit den Labels <i>speech_unclear</i> und <i>traffic</i> .	B-46
141	Überprüfung des Mischsignals mit den Labels <i>speech_unclear</i> und <i>foot-</i> <i>steps_gravel</i>	B-47
142	Überprüfung des Mischsignals mit 6 Labels und Wasser als konstantem Hintergrundsignal	B-48
143	ROC-Kurve des besten KI-Modells	B-49

Tabellenverzeichnis

2	Projekt-Workpackages	12
3	Ergebnisse der subjektiven Klangraumbeurteilung	20
4	Tabelle der relevanten Literaturbeiträge für die Methodik	27
6	Typen von Klangräumen im Siedlungsraum	30
7	Übersicht Messobjekte	32
8	Zürich, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 4 Messpositionen	47
9	Zurich Spectral Slope Tabelle	48

10	Zürich, Resultate Psychoakustik	49
11	Zürich, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig	52
12	Zürich, EDT Werte	54
13	Zürich, T20 Werte	54
14	Zürich, Farbanteile	55
15	Basel, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 2 Messpositionen	59
16	Basel Spectral Slope Tabelle	60
17	Basel, Resultate Psychoakustik	61
18	Basel, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig	64
19	Basel, EDT Werte	65
20	Basel, T20 Werte	66
21	Basel, Farbanteile	67
22	Luzern, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 4 Messpositionen	72
23	Luzern Spectral Slope Tabelle	73
24	Luzern, Resultate Psychoakustik	74
25	Luzern, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig	77
26	Luzern, EDT Werte	78
27	Luzern, T20 Werte	79
28	Luzern, Farbanteile	80
29	Bern, Zusammenstellung der verschiedenen Messwerte an 4 Messpositionen	85
30	Bern Spectral Slope Tabelle	86
31	Bern, Resultate Psychoakustik	87
32	Bern, RT60-Einzelwerte für 500-1000 Hz und breitbandig	90
33	Bern, EDT Werte	91
34	Bern, T20 Werte	92
35	Bern, Farbanteile	93
36	Auswertungs-Kategorien (Geräuscharten)	100
37	Korrelationen des Grünanteils (%) mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.	121
38	Korrelationen des STI mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifi- kanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.	123

39	Korrelationen der RT60-Einzelwerte mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.	125
40	Korrelationen der RT60-Einzelwerte mit den subjektiven Bewertungen. Die Spalten zeigen die Befragungsisems, den Korrelationskoeffizient r und das Signifikanzniveau p . Zudem sind signifikante ($p < 0.05$) sowie hochsignifikante Korrelationen ($p < 0.01$) mit * resp. ** markiert.	126
41	Selektierte Geräusche (Labels) für das Sound Event Model	129
42	F1-score der besten Modelle, das beste Modell in grün	139
43	Classification Report des besten KI-Modells, der F1-Score in grün als wichtigste Kenngrösse	141
44	RT60 Resultate der vorausgehenden Feldmesskampagne	A-4
45	SPL Resultate der vorausgehenden Feldmesskampagne	A-5
46	Übersicht über die ausgewählten Soundscape Objekte	B-6
47	RT60 Messergebnisse von Objekt Nr. 5 an den Messpunkten M1-M5 . . .	B-6
48	Messergebnisse von drei Objekten unterschiedlicher Bauart	B-7
49	Ergebnisse der subjektiven Klangraumbeurteilung	B-9
50	Verteilung der Tonalitätswerte (tuHMS) beim Objekt Himmelrich (Nr. 6). B-10	
51	Übersicht Messgeräte	B-32
52	Zwicky-Areal Zürich: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen . .	B-33
53	Masse der Hof-Durchgänge Zürich	B-33
54	Erlenmatt Basel: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen	B-34
55	Masse der Hof-Durchgänge Basel	B-34
56	Himmelrich 3 Luzern: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen . .	B-35
57	Masse der Hof-Durchgänge Luzern	B-35
58	Park Humboldtstrasse Bern: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen	B-36
59	Masse der Hof-Durchgänge Bern	B-36
60	Adressen Standorte für Audio-Aufnahmen	B-42

Anhang A Tabellen

A.1 Vorstudie: RT60 Resultate

Objekt	Höhe	Band	M1	M2	M3	M4	M5
Nr.	[m]	[Hz]	RT60 (T20) [s]	RT60 (T20) [s]	RT60 (T20) [s]	RT60 (T20) [s]	RT60 (T20) [s]
1	1.2	63	-.–	-.–	-.–	-.–	
		125	0.62	0.78	0.41	-.–	
		250	0.19	0.3	0.6	-.–	
		500	0.51	0.35	0.3	0.63	
		1000	0.02	-.–	0.11	0.51	
		2000	0.02	0.46	0.74	0.02	
		4000	0.02	0.68	0.5	0.89	
		8000	0.03	0.43	-.–	0.48	
2	1.2	63	-.–	-.–	-.–	-.–	
		125	0.87	0.73	-.–	-.–	
		250	0.69	0.84	-.–	-.–	
		500	0.47	0.54	-.–	0.23	
		1000	0.25	0.57	0.12	0.16	
		2000	0.69	0.69	0.57	0.55	
		4000	0.53	0.57	0.61	0.35	
		8000	0.33	0.34	0.25	0.23	
3	1.2	63	-.–	-.–	-.–	-.–	
		125	-.–	-.–	-.–	-.–	
		250	0.3	0.18	0.1	0.37	
		500	0.44	0.29	-.–	0.22	
		1000	0.25	0.1	0.23	0.3	
		2000	0.57	0.41	0.36	0.34	
		4000	0.4	0.28	0.36	0.35	
		8000	0.21	0.21	0.32	0.32	
4	1.2	63	-.–	-.–	-.–	-.–	
		125	-.–	-.–	-.–	0.32	
		250	0.41	0.11	-.–	0.45	
		500	0.7	0.22	0.35	0.68	
		1000	0.01	0.14	-.–	0.57	
		2000	0.44	0.55	0.38	0.63	
		4000	0.7	0.6	0.69	0.99	
		8000	0.27	0.41	0.55	0.52	
5	1.2	63	-.–	-.–	-.–	-.–	-.–

		125	0.11	0.29	-.–	-.–	0.73
		250	0.07	-.–	0.99	0.91	0.79
		500	0.13	-.–	0.75	-.–	0.61
		1000	0.1	0.29	0.66	-.–	0.73
		2000	0.26	0.5	0.75	0.83	0.7
		4000	0.64	0.66	0.69	0.7	0.62
		8000	0.36	0.05	0.49	0.56	0.45
6	1.2	63	-.–	-.–	-.–	-.–	
		125	-.–	-.–	-.–	-.–	
		250	0.76	-.–	0.36	-.–	
		500	0.04	0.46	0.47	0.5	
		1000	0.05	0.04	0.47	0.48	
		2000	0.52	0.83	1.04	-.–	
		4000	0.29	0.02	0.14	-.–	
		8000	0.44	0.1	0.27	0.1	
6	1.7	63	-.–	-.–	-.–	-.–	
		125	-.–	-.–	0.3	0.43	
		250	0.66	-.–	0.43	0.08	
		500	0.78	0.41	0.5	0.97	
		1000	0.05	0.06	0.33	0.89	
		2000	0.44	0.62	0.63	-.–	
		4000	0.63	1.64	0.67	-.–	
		8000	0.62	0.38	0.72	0.1	
7	1.2	63	-.–	-.–	-.–		
		125	-.–	-.–	-.–		
		250	-.–	0.34	-.–		
		500	0.84	1	0.02		
		1000	-.–	0.3	0.02		
		2000	0.02	0.56	0.02		
		4000	0.02	0.59	0.03		
		8000	0.32	0.25	0.42		
7	1.7	63	-.–	-.–	-.–		
		125	-.–	-.–	-.–		
		250	0.99	0.52	-.–		
		500	0.85	-.–	0.02		
		1000	0.4	0.25	-.–		
		2000	0.23	1.12	-.–		
		4000	0.03	0.6	0.03		
		8000	0.47	0.49	0.03		
8	1.2	63	-.–	-.–	-.–		

		125	-.-	-.-	-.-	
		250	0.25	-.-	-.-	
		500	1.21	0.03	0.75	
		1000	0.17	0.05	-.-	
		2000	0.82	-.-	1.22	
		4000	0.57	0.66	0.74	
		8000	0.53	0.41	0.53	
8	1.7	63	-.-	-.-	-.-	
		125	-.-	-.-	-.-	
		250	-.-	0.72	1.19	
		500	1.11	0.02	1.41	
		1000	-.-	0.03	0.02	
		2000	0.99	0.02	1.32	
		4000	0.74	1.38	0.72	
		8000	0.5	0.65	0.57	
9	1.2	63	-.-	-.-	-.-	
		125	-.-	-.-	-.-	
		250	-.-	0.17	0.26	
		500	0.17	0.79	0.03	
		1000	-.-	0.81	0.02	
		2000	0.96	0.4	0.02	
		4000	0.44	0.36	0.87	
		8000	0.31	-.-	1.08	
9	1.7	63	-.-	-.-	-.-	
		125	-.-	-.-	-.-	
		250	0.05	1.59	0.69	
		500	0.7	0.92	0.03	
		1000	0.03	-.-	0.03	
		2000	0.55	0.36	0.34	
		4000	0.75	0.26	-.-	
		8000	0.52	0.35	-.-	
10	1.2	63	-.-	-.-	-.-	-.-
		125	-.-	0.27	0.32	-.-
		250	0.84	0.19	-.-	0.06
		500	0.57	0.02	0.02	0.27
		1000	0.02	0.03	0.03	0.06
		2000	0.58	0.57	0.03	0.03
		4000	0.02	0.57	0.02	0.12
		8000	0.39	0.01	0.72	0.19
10	1.7	63	-.-	-.-	-.-	-.-

125	–	–	–	–
250	0.79	0.26	0.41	0.06
500	0.13	0.03	0.02	0.07
1000	0.03	0.2	0.03	0.08
2000	0.03	0.35	0.02	0.32
4000	–	0.01	0.03	0.12
8000	0.71	0.02	1.03	0.1

Tabelle 44: RT60 Resultate der vorausgehenden Feldmesskampagne

A.2 Vorstudie: SPL Resultate

Objekt Nr.	Tageseit	Messhöhe [m]	L_{AFmin}	L_{AF90}	L_{Aeq}	L_{Ceq}	L_{AF10}	L_{AFmax}
1	Morgen	1.2	34.1	37.2	42	55.8	45.1	53.8
		1.7	34.4	37.8	42.3	55.3	45.4	52
	Mittag	1.2	35.5	37.6	45.3	57.5	44.9	73.2
		1.7	35.5	37.7	43.2	56.3	44.8	68.9
	Nachmittag	1.2	39.3	41.4	45.3	61.1	47.6	55.8
		1.7	40.1	42	46.2	61.5	48.6	57.3
2	Morgen	1.2	43	43.7	46.7	56.6	48.3	59.1
		1.7	42.6	43.7	46.8	60.8	48.6	60.3
	Mittag	1.2	42	42.9	45.5	57.8	47.2	58.3
		1.7	42.7	43.5	46.5	59	48.7	60.6
	Nachmittag	1.2	41	42.6	48.3	62.1	49	64.9
		1.7	41.1	42.4	48.9	62.4	49.9	66
3	Morgen	1.2	33.7	35.9	43	59.7	45.6	59
		1.7	34.3	36.7	43.9	57.5	46.8	59.5
	Mittag	1.2	36.1	39.2	47.3	59.4	47.9	68.2
		1.7	37.3	40.2	47.5	59.2	48.4	67.6
	Nachmittag	1.2	32.2	35.6	42.9	58.1	46	57.1
		1.7	32.1	35.8	43.3	57.6	46.1	58.2
4	Morgen	1.2	40.3	42.9	47	58.7	49.4	60.4
		1.7	40.2	43.2	46.8	58.2	48.8	58.6
	Mittag	1.2	38.9	42.4	55	65.6	59.5	73.8
		1.7	36.9	41.3	50	58	52.5	71.7
	Nachmittag	1.2	42.6	48.3	58.3	70.7	59.1	80.4
		1.7	43	49.1	59.6	71.3	60.1	81.9
5	Morgen	1.2	41.8	45.3	53.8	62.5	54.8	68
		1.7	42	46.2	54.3	63.5	55.2	68.5

6	Mittag	1.2	43.4	46.6	54.3	63.2	58	68.8
		1.7	43.8	47.2	54.8	64	58.5	65.7
	Nachmittag	1.2	39.7	42.9	51	69	51.7	67.7
		1.7	40	43.2	50.9	67.1	51.7	67.9
	Morgen	1.2	36.3	39.9	46.1	57.3	48	58.5
		1.7	36.6	40.8	47.6	58.1	49.4	61.9
	Mittag	1.2	32.8	37.1	48.4	57.7	48.9	67.1
		1.7	32.8	37.2	48.4	57.9	49	67
	Nachmittag	1.2	32.1	34.9	40.2	55.1	43	58.7
		1.7	32	35.2	40.5	55.3	43.1	59.4
	Morgen	1.2	38.3	41.6	47	58.7	49.7	59.9
		1.7	38.8	42.1	47.7	58.5	50.7	61.5
7	Mittag	1.2	35.4	39.7	46.4	59.3	49.3	57.8
		1.7	35.6	40	47.1	59.5	50.5	59.7
	Nachmittag	1.2	36	41.6	48.8	60.9	51	62.6
		1.7	36.2	42.1	49.3	60.1	52	62.1
	Morgen	1.2	35.3	37.1	41	58.9	43.4	56.4
		1.7	35.6	37.4	41.5	57.9	44	58.9
	Mittag	1.2	35.8	38.8	42.6	57.2	44.8	60.2
		1.7	36.8	39.1	43	56.6	45.2	55.9
	Nachmittag	1.2	36.8	38.8	43.8	58.6	46.1	61.2
		1.7	37.1	38.9	44.1	58	46.4	60.9
	Morgen	1.2	38.3	40.3	51.1	57.8	47.1	71.4
		1.7	38.5	40.6	51	57.5	47.5	71.8
8	Mittag	1.2	35.2	37.7	43.4	58.2	45.3	58.7
		1.7	35.4	37.9	43.7	58.1	45.4	60.7
	Nachmittag	1.2	36.1	39	44.3	64.2	45.6	65.3
		1.7	36.6	39.2	44.6	62.3	46	67
	Morgen	1.2	35.1	37.1	43.9	59.1	48.3	56.6
		1.7	35.3	37.3	44.4	58.3	48.7	59.7
	Mittag	1.2	31.2	34.2	50.4	57.2	47.8	80.9
		1.7	32.1	34.9	52.8	58.6	48.6	85.2
	Nachmittag	1.2	54.9	34.2	51.2	57.2	47.8	52.5
		1.7	35	39.3	51.6	58.5	53	74.2

Tabelle 45: SPL Resultate der vorausgehenden Feldmesskampagne

Anhang B Allgemeine Ergänzungen

B.1 Formular zur subjektiven Klangraumbeurteilung von Cercle Bruit

Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Parks als Erholungsorte im Siedlungsraum										Rev. 2022 V.02		
Örtlichkeit: Platz / Park / Hof		Stadt / Ort	Standort	Datum	Zeit von – bis	Koordinaten	Nutzung	Weiter	t [°C]	dB(A)	Visum	
negative Merkmale na = nicht anwendbar →			--	-	0 / na	+	++	positive Merkmale				konkrete Feststellungen
Hauptkriterien												
Wirkt der Ort, insbesondere im Vergleich zur Umgebung, (ohne Nutzungsgeräusche) laut , z.B. wegen einem hohen Grundpegel von Verkehrs- oder Industrie-/Gew.-Lärm?		Allgemeine Situation, Ruhe						Wirkt der Ort (ohne Nutzungsgeräusche), besonders im Vergleich zur Umgebung, ruhig , z.B. dank tielem Grundpegel von Verkehrs- oder Indus./Gew.-Lärm?				
Überwiegen technische Geräusche (Verkehrs-, Industrie- und Gewerbe-/Anlagen-/Freizeidlärm), und verdecken die natürlichen Geräusche? Sind starke Störgeräusche zu hören?		Vorherrschende Geräusche						Überwiegen natürliche (z.B. von Vögeln, Insekten, Wasser, Wind, Laub, Nutztieren, ...) oder "archaische" Geräusche (Glocken, Wasserräder ...)?				
Erscheint die Geräuschlandschaft zeitlich konstant , uninteressant , eintönig , auf die Dauer (–) oder sogar bereits kurzfristig (–)?		Geräuschvielfalt – Klangvielfalt						Kommen am Ort vielfältige positiv empfundene (d.h. natürliche oder archaische) Geräusche vor und bilden eine abwechslungsreiche Geräuschlandschaft?				
Zwingt der hohe Grundpegel zu lauterem Sprechen oder gar zu verkürzter Kommunikation? Oder fehlt wegen Reflexionen die Privatsphäre (Gespräch weitem verständlich)?		Kommunikationsfreundlichkeit						Erlaubt der tiefe oder moderate Grundpegel ohne Einschränkung differenzierte Gespräche mit mühsamer Verständlichkeit , aber auch mit Privatsphäre ?				
Bewirken Nutzungen (z.B. Fussball oder andere Spiele, aber auch Bewegungen von Metallstühlen an Eisenketten) für andere Besucher wiederholt starke Störungen ?		Akustische Nutzungsverträglichkeit						Verursachen Nutzungen (z.B. Verschieben von Sitzgelegenheiten; Fussballspielen etc.) höchstens diskrete Geräusche ? (gedämpfte Fussballgitter ++)				
Erzeugen Spiegelreflexionen an glatten Flächen Echos ? (Flatter-)Echos oder ein "Sirren"? Stört die Helligkeit ?		Schallausbreitung und Reflexionen (Test z.B. mit Klatschen)						Sind grosse reflektierende Flächen in Tiefe oder Ausrichtung gebrochen und vermeiden unnatürliche Echos? Wird Helligkeit durch Absorption gemildert?				
Können Geräusche, z.B. von Motorfahrzeugen, wegen Reflexionen nicht korrekt geortet werden? Erlaubt ein offener Platz das Hören auf Distanz trotzdem nicht?		Ortung in Richtung und Distanz						Werden Geräuschquellen korrekt geortet ("Ich höre es, wo ich es sehe" → Sicherheitsgefühl)? Hört man (auf offenen Plätzen) nahe und ferne Quellen ?				
Detaillkriterien												
Stört ein penetrantes Wassergeschrei am bevorzugten Aufenthaltsort auf die Dauer (–)? Beeinträchtigt es gar an bevorzugten Aufenthaltsorten die differenzierte Sprachkommunikation und zwingt zu lauterem Sprechen (–)?		Wassergeschreie						Er klingt ein moduliertes Wassergeschrei (Bach, Brunnen, Wasserspiel ++)? Oder ein gleichförmiges Rauschen (Kanal, +)? Bewirkt es eine "Umdeutung" oder Maskierung von Verkehrs- o. a. Lärm (++)?				
Verdrängen installierte Schallquellen (z.B. auch Musik aus Lautsprecheranlagen) den Besucher an sonst weniger attraktive Zonen des Ortes oder an andere Orte?		Spezielle Schallquellen						Bringen spezielle Schallquellen im Klangraum (z.B. von Installationen) eine (zeitweise) Bereicherung der Klanglandschaft und ziehen Besucher an?				
Kommen am Ort eklatante Störungen der Ruhe vor, wie z.B. ein den Platz querendes Motorrad, laute Flugzeuge etc., (–) und zwingen zur Gesprächsunterbrechung (–)?		Sicherheit vor starken Störungen						Sind eklatante Ruhestörungen unwahrscheinlich oder höchst selten (ausser Kommunikationsmittel im Schrittempo für die Reinigung des Ortes)?				

Bonus-Kriterien		0 + ++			
Bleibt die Klanglandschaft über den ganzen Raum unverändert, d.h. der Besucher kann sie durch die Wahl seines Standorts nicht beeinflussen (0)?		Klangraum nach Wahl			Variiert die Klanglandschaft mit dem Standort und kann so beeinflusst werden (+)? Bleibt der Raum mehrere unterschiedliche Klangräume (++)?
		0 0 0 0 0			
Ist die Klanglandschaft austauschbar, ist der Ort akustisch (z.B. in einer Tonaufnahme) nicht oder nur anhand negativer Merkmale zu identifizieren (0)?		Einzigartigkeit, Identifizierbarkeit			Erkenne ich den Klangraum an der Zusammensetzung der Geräuschkulisse oder an positiven Soundmarks (für den Ort charakteristische Klänge)?
		0 0 0 0 0			

Gesamtbeurteilung der akustischen Erholungsqualität											
		--		--		na/0		+ ++		Expertenurteil: akustische Erholungsqualität	
Anzahl der Bewertungen in der jeweiligen Stufe		x(-2)		x(-1)		x0		x1		x2	
Summe Negativpunkte / Summe Positivpunkte		Σ-				0		Σ+		Q	
Summe Negativpunkte + Summe Positivpunkte		Σ- + Σ+ = Σ →								Σ + 20 / 6 = Q →	

Verbesserungspotenzial bei der akustischen Erholungsqualität	
Wichtigste Schwäche(n) des Ortes in der Klangqualität	
Wichtigste Stärke(n) des Ortes in der Klangqualität	
Verbesserungspotenzial (bei welchen Kriterien?)	
Verbesserungsmassnahme(n) konkret (Vorschlag)	

Hier Smartphone-Panoramabild einfügen

Abbildung 97: Formular von Cercle Bruit Seite 2

B.2 STI Rating Übersicht

Band	Mess-er- gebnis	Typische Anwendungen
A+	> 0,76	Aufnahmestudio
A	0,72 - 0,76	Theater, Auditorium, Parlament, Gericht
B	0,68 - 0,72	Theater, Auditorium, Parlament, Gericht
C	0,64 - 0,68	Telekonferenz, Theater
D	0,60 - 0,64	Schulklassse, Konzerthalle
E	0,56 - 0,60	Konzerthalle, moderne Kirche
F	0,52 - 0,56	PA in Einkaufszentrum, öffentliches Büro, Kathedrale
G	0,48 - 0,52	PA in Einkaufszentrum, öffentliches Büro
H	0,44 - 0,48	PA in schwierigen akustischen Umgebungen
I	0,40 - 0,44	PA in schwierigen Umgebungen
J	0,36 - 0,40	nicht anwendbar für PA-Systeme
U	< 0,36	nicht anwendbar für PA-Systeme

Abbildung 98: STI Rating Tabelle von NTi Audio

B.3 Vorstudie

Messmethoden und Messequipment

Geräte und Mikrofone:

Quelle	NTi Audio Talkbox STIPA measurement signal (Standard, edition 5) 60 dBA @ 1m, ± 0.5 dBA
SPL/RT60/STI-Messung	NTi Audio XL2 NTi Audio M2211
Kalibrier-Gerät	LARSON DAVIS Sound Level Calibrator CAL200
Binaurale Audio-Aufnahmen	HEAD acoustics SQobold 3302 HEAD acoustics BHS II

Als Messgeräte wurden zwei NTi Audio XL2 Einheiten zusammen mit NTi Audio M2211 Mikrofonen verwendet. Die Kalibrierung wurde mit 94 dB durchgeführt. Bei den Messungen wurden die Geräte in 1,2 und/oder 1,7 m Höhe über dem Boden angebracht.

RT60-Messungen wurden mit den drei Impulsquellen Luftballons, Händeklatschen und Holzklappe oder mit der NTi Audio Talkbox durchgeführt. Die Abstände zwischen Quelle und Empfänger betrugen zwischen 2 und 5 m (je

nach Messmethode und geometrischen Möglichkeiten).

Vorausgehende Feldmesskampagne: Übersicht der Soundscape Objekte

Es wurden zehn Innenhöfe in Luzern und Umgebung ausgewählt, um die Qualität der Messresultate und die Stabilität der Messmethoden, die teilweise nur für Innenräume ausgelegt sind, zu untersuchen. Die meisten Überbauungen sind reine Wohngebäude, zwei davon werden auch gewerblich genutzt. Die Innenhöfe sind für die Freizeitgestaltung vorgesehen. Drei Innenhöfe sind gut umschlossen, andere weisen grosse Durchgänge auf. Abbildung 99 zeigt in der oberen Reihe die Objekte Nr. 1-5 und in der zweiten Reihe die Objekte Nr. 6-10.

Die Messungen wurden zu drei verschiedenen Zeiten pro Tag durchgeführt: morgens zwischen 8 und 10 Uhr, mittags zwischen 12 und 13 Uhr und nachmittags zwischen 15 und 16 Uhr. Bei den Objekten 1-5 wurde auf einer Höhe von 1.2m gemessen, bei den Objekten 6-10 auf 1.2m und 1.7m. Als Quellen dienten jeweils Luftballons, Händeklatschen und eine Holzklappe. Ebenfalls bei den Objekten 6-10 wurden zusätzlich Audioaufnahmen gemacht. Nach der letzten Messung folgte eine subjektive Beurteilung mithilfe des Formulars von Cercle Bruit Schweiz (B.1).

Die Art der Überbauungen reicht von Umgebungen mit wenigen, einzelnen Gebäuden bis zu geschlossenen Innenhöfen. In der Tabelle 46 sind die einzelnen Objekte beschrieben. Die Vielfalt der Objekte wurde bewusst gewählt.



Abbildung 99: Übersicht der Innenhöfe (<https://earth.google.com/web>) der ersten Feldmesskampagne

Tabelle 46: Übersicht über die ausgewählten Soundscape Objekte

Nr.	Adresse	Beschreibung	Benutzung
1	Ebenastrasse 7, Horw	4 Gebäude, 4 breite Passagen	Wohnungen
2	Ebenauweg 3, Horw	3 Gebäude, 3 breite Passagen	Wohnungen
3	Kantonsstrasse 150, Horw	3 freistehende Gebäude, 3 breite Passagen	Wohnungen
4	Steinenstrasse, Horw	3 hohe, 2 kleine Gebäude, 1 breite Passage	Wohnungen
5	Ziegeleipark, Horw	3 hohe Gebäude, 3 breite Passagen	Wohnungen
6	Himmelrich, Luzern	Geschl. Innenhof, dreieckig	Wohnungen, Gewerbe
7	Tödistrasse, Luzern	Geschl. Innenhof, 4 unterschiedl. Seiten	Wohnungen
8	Bundesstrasse 19, Horw	Geschl. Innenhof, dreieckig	Wohnungen, Gewerbe
9	A. Neumann Gasse, Luzern	Offener Innenhof, 2 breite Passagen	Wohnungen
10	J. Hodel Gasse, Luzern	Offener Innenhof, 2 breite Passagen	Wohnungen

Vorausgehenden Feldmesskampagne: Resultate

Messergebnisse RT60 Die Ergebnisse der Messungen im Freien sind fehlerhaft und teils unglaublich. Tabelle 47 zeigt die Nachhallzeit-Messdaten des exemplarischen Messobjekts Nr. 5. Bei 63 Hz konnten keine gültigen Messwerte erhoben werden. Die niedrigste Frequenz mit vereinzelt gültigen Werten ist 125 Hz. Generell, finden sich fehlende Werte im unteren Frequenzbereich bis 1000 Hz. Zudem finden sich grosse Streuungen innerhalb derselben Frequenz und unplausibel tiefe Werte. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch bei den anderen Objekten. Die vollständige Liste mit allen Resultaten ist im Anhang A.1.

Tabelle 47: RT60 Messergebnisse von Objekt Nr. 5 an den Messpunkten M1-M5

	M1	M2	M3	M4	M5
Band [Hz]	RT60 (T_{20}) [s]	RT60 (T_{20}) [s]	RT60 (T_{20}) [s]	RT60 (T_{20}) [s]	RT60 (T_{20}) [s]
63	-.–	-.–	-.–	-.–	-.–
125	0.11	0.29	-.–	-.–	0.73
250	0.07	-.–	0.99	0.91	0.79
500	0.13	-.–	0.75	-.–	0.61
1000	0.1	0.29	0.66	-.–	0.73
2000	0.26	0.5	0.75	0.83	0.7
4000	0.64	0.66	0.69	0.7	0.62
8000	0.36	0.05	0.49	0.56	0.45

Messergebnisse SPL Tabelle 48 zeigt eine Auswahl von Werten aus den SPL-Messungen. Es sind Werte von drei unterschiedlichen Messobjekten aufgelistet. Objekt Nr. 4 besteht aus einem Grünbereich, umgeben von 4

Gebäuden, welche in Abständen von 8-15 Metern angeordnet sind. Es befindet sich in einem Wohnquartier mit wenig Verkehrs- und Industrielärm. Der Hof von Objekt Nr. 5 ist von drei hohen Gebäuden umgeben, auf eine Seite jedoch vollständig offen. Daneben befinden sich die Bahngleise und Industrie, der Strassenverkehrslärm ist gering. Das Grundstück Nr. 6 ist ein geschlossener Innenhof. Es war kaum Strassenverkehrslärm zu hören. Die vorherrschenden Lärmquellen waren das interne Kleingewerbe und Wohnungsgeräusche.

Tabelle 48: Messergebnisse von drei Objekten unterschiedlicher Bauart

Objekt Nr.	Tageszeit	Messhöhe [m]	L_{AFmin}	L_{AF90}	L_{Aeq}	L_{Ceq}	L_{AF10}	L_{AFmax}
4	Morgen	1.2	40.3	42.9	47	58.7	49.4	60.4
		1.7	40.2	43.2	46.8	58.2	48.8	58.6
	Mittag	1.2	38.9	42.4	55	65.6	59.5	73.8
		1.7	36.9	41.3	50	58	52.5	71.7
	Nachmittag	1.2	42.6	48.3	58.3	70.7	59.1	80.4
		1.7	43	49.1	59.6	71.3	60.1	81.9
5	Morgen	1.2	41.8	45.3	53.8	62.5	54.8	68
		1.7	42	46.2	54.3	63.5	55.2	68.5
	Mittag	1.2	43.4	46.6	54.3	63.2	58	68.8
		1.7	43.8	47.2	54.8	64	58.5	65.7
	Nachmittag	1.2	39.7	42.9	51	69	51.7	67.7
		1.7	40	43.2	50.9	67.1	51.7	67.9
6	Morgen	1.2	36.3	39.9	46.1	57.3	48	58.5
		1.7	36.6	40.8	47.6	58.1	49.4	61.9
	Mittag	1.2	32.8	37.1	48.4	57.7	48.9	67.1
		1.7	32.8	37.2	48.4	57.9	49	67
	Nachmittag	1.2	32.1	34.9	40.2	55.1	43	58.7
		1.7	32	35.2	40.5	55.3	43.1	59.4

Der L_{Aeq} schwankte zum Teil erheblich (bis zu 12,8 dB) innerhalb der verschiedenen Tageszeiten. Der Pegel beim Objekt Nr. 4 war morgens am niedrigsten, wenn kaum Verkehr und kein Industrielärm vorhanden war. Am Nachmittag war der Pegel höher, da Kinder spielten und Erwachsene anwesend waren. Beim Objekt Nr. 6 nahm der Pegel im Laufe des Tages ab. Morgens und mittags gab es teils laute Geräusche aus den Geschäften, die durch das Be- und Entladen der Autos verursacht wurden, während man sich im Hof unterhielt. In den Nachmittagsstunden war es meist ruhig (Abbildung 100). Im Gegensatz dazu waren die Pegel beim Objekt Nr. 5 zu allen Messzeiten auf ähnlichem Niveau.

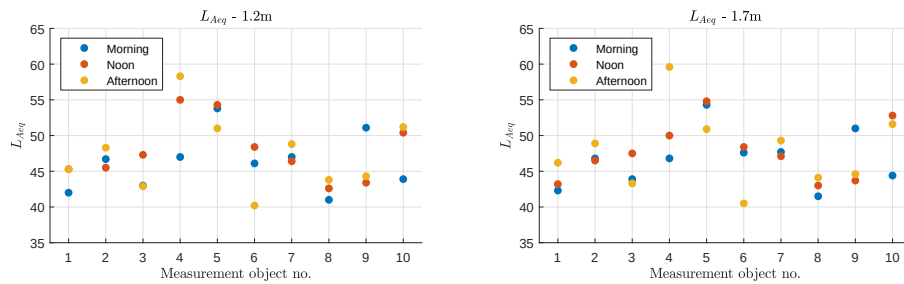


Abbildung 100: Übersicht der L_{Aeq} Werte aller Objekte zu allen Messzeiten

Die L_{AFmax} -Werte zeigen ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 101). Die Werte der Objekte 1, 3, 4 und 5 sind je nach Tageszeit sehr unterschiedlich. Je nach Nutzung und Umgebung war der Pegel am Morgen, Mittag oder am Nachmittag am höchsten.

Die höchsten Werte sind bei Objekt Nr. 10 zu sehen. Um die Mittagszeit waren im Innenhof einige Personen beim Mittagessen anzutreffen. Es waren 2 oder 3 Familien auf den Balkonen. Jedes Geräusch war deutlich hörbar und teilweise störend. Das Objekt Nr. 7 war sehr ausgeglichen, der Pegel war konstant und die Geräusche unaufdringlich. Dies ist bei beiden Messungen deutlich zu erkennen. Das Objekt Nr. 8 hat die gleichen Eigenschaften, mit dem Unterschied, dass der Innenhof kaum besucht wurde und die Wohnungen nur kleine Balkone haben, auf denen sich kaum jemand aufhält.

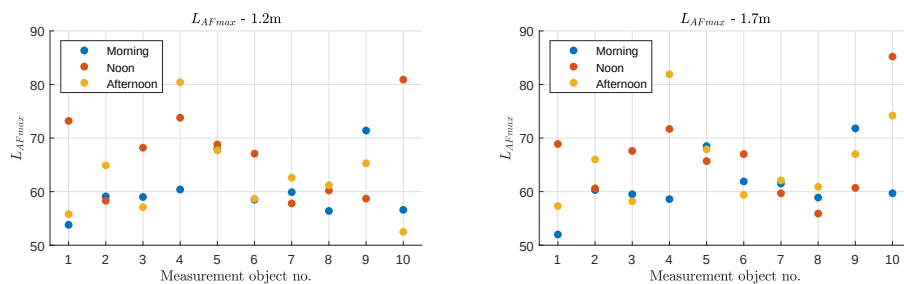


Abbildung 101: Übersicht der L_{AFmax} -Werte

Subjektive Klangraumbeurteilung Cercle Bruit Schweiz hat zur Bewertung der Klangraumqualität von Höfen und Plätzen als Erholungsräume einen Bewertungsbogen entwickelt (Anhang B.1). Dieser wurde ergänzend zu den Messungen verwendet.

Das Formular umfasst sieben Hauptkriterien, drei Detailkriterien und zwei Bonuskriterien. Das Ergebnis basiert auf einer Punktberechnung und einer zusätzlichen intuitiv zugewiesenen Note [1]. Mit dieser Methode kann maximal die Note 6 erreicht werden (entsprechend dem Schweizer Schulnotensystem). Für eine Bewertung sollten Negativ- wie auch Positiv-Referenzstandorte besucht werden. Es ist von Vorteil, wenn mehrere Personen unabhängig voneinander urteilen.

Die subjektive Bewertung der Klangräume wurde von drei Einzelpersonen durchgeführt. Sie erfolgte während der letzten Messung des Tages vor Ort⁵.

Die gemittelten Ergebnisse der subjektiven Bewertungen sind in Tabelle 49 dargestellt.

⁵Die Autoren danken den beiden Schulpraktikanten Enis Serifi und Loris Prud'homme für ihre Beiträge

Tabelle 49: Ergebnisse der subjektiven Klangraumbeurteilung

Objekt Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resultat (Note 1-6)	4.5	5.3	3.7	2.7	3.1	3.8	4.5	4.5	4.5	2.5

Analyse im Hinblick auf psychoakustische Parameter ArtemiS SUITE v. 12.0 wurde verwendet, um die 10-minütigen Audiodateien für die Objekte Nr. 6-10 psychoakustisch zu analysieren. Es wurden 30 Aufnahmen analysiert: 5 Objekte, 2 Messhöhen und 3 Tageszeiten.

Die Schallprofile variierten zwischen Morgen, Mittag und Nachmittag sowie zwischen Aufnahmen in einer Höhe von 1,2 und 1,7 m. Abbildung 102 zeigt die Schärfeergebnisse für die Objekte 6-10 in beiden Höhen zu den verschiedenen Tageszeiten. Die Balken in den Boxplots stellen die Mediane dar, die unteren und oberen Grenzen die Quartile und die Whisker die akustischen Perzentile 90% und 10%. Akustische x-Perzentile beschreiben den Wert, der in x% der Zeit überschritten wurde.

Die psychoakustischen Messwerte sind abhängig von der Tageszeit und schwanken teilweise stark. Objekt Nr. 6 zeigt tagsüber auf der Messhöhe von 1.70m die grössten Unterschiede.

Tabelle 50 zeigt den Bereich der Tonalitätswerte für Objekt 6 bei Aufnahmen von zehn Minuten. Die Mittelwerte und die Verteilung zeigen klare Unterschiede im Verlauf des Tages.

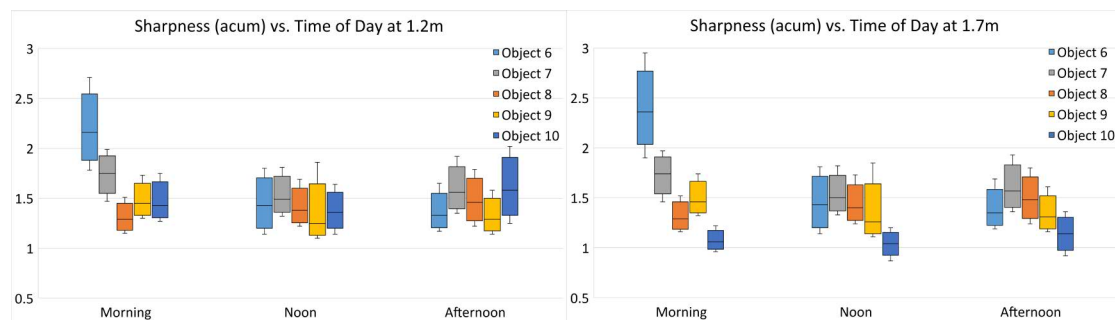


Abbildung 102: Verteilung der Schärfewerte bei den Objekten Nr. 6-10 in 1.2 Meter Aufnahmehöhe (links) und in 1.7 Meter Aufnahmehöhe (rechts)

Tabelle 50: Verteilung der Tonalitätswerte (tuHMS) beim Objekt Himmelrich (Nr. 6).

Tageszeit	Messhöhe [m]	min	90%	75%	50%	25%	10%	max	mean
Morgen	1.2	0	0.03	0.07	0.17	0.3	0.43	1.28	0.22
Morgen	1.7	0	0.03	0.07	0.19	0.36	0.49	1.44	0.25
Mittag	1.2	0	0.01	0.04	0.1	0.22	0.36	1.56	0.18
Mittag	1.7	0	0.01	0.03	0.1	0.23	0.4	1.61	0.19
Nachmittag	1.2	0	0.01	0.02	0.04	0.08	0.15	0.77	0.09
Nachmittag	1.7	0	0.01	0.01	0.03	0.06	0.012	0.93	0.08

Messkampagne für RT60- und STI-Intra-Raum-Verteilungen: Innenhof HSLU

Der Innenhof der HSLU ist auf allen Seiten von den Gebäuden I, II, III und V umschlossen und misst 63 m in der Länge und 44 m in der Breite. Abbildung 103 zeigt den Blick von oben auf den Innenhof mit Gebäude III im Norden, Gebäude IV im Westen, Gebäude II im Süden und Gebäude I im Osten.

Abbildung 104 oben links zeigt den Blick auf den Bogen und die Wiese in südöstlicher Richtung. Oben rechts ist die mit Betonplatten bedeckte Fläche, in südöstlicher Richtung vom Ausgang von Gebäude III aus gesehen, abgebildet. Das Bild unten links zeigt den Blick auf den Innenhof in östlicher Richtung. Unten rechts ist das Podium mit Gras und Bäumen in der Mitte zu sehen.

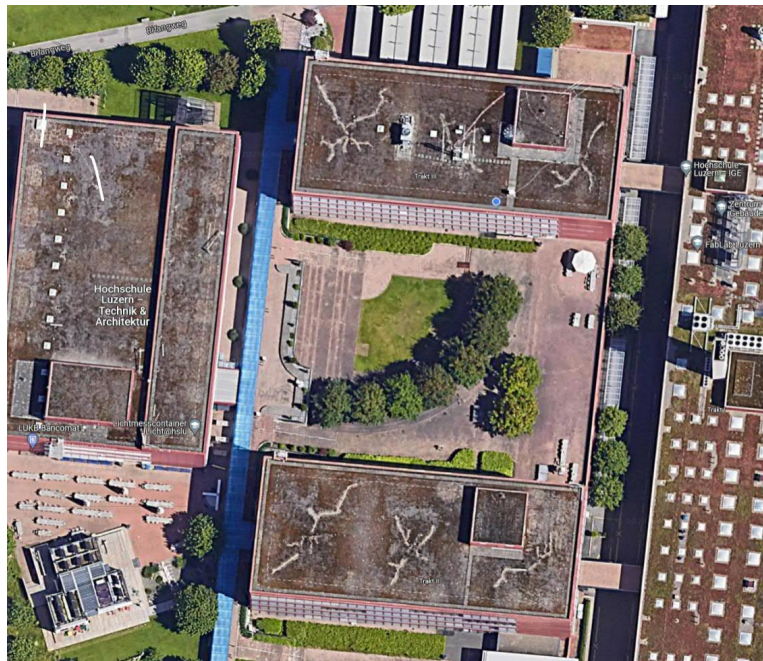


Abbildung 103: Luftansicht des Innenhofs an der HSLU T&A in Horw (<https://earth.google.com/web/>)



Abbildung 104: Der begehbare Teil mit Bodenplatten, Tischen und Stühlen neben der Wiese und einer runden, begrünten Erhöhung

Es gibt drei verschiedene Terrains. Der grösste Teil ist mit eingefärbten Betonbodenplatten belegt und teilweise mit Tischen und Stühlen ausgestattet. In der Mitte befindet sich ein geschwungenes Podium, dessen oberer Bogen mit Gras und Bäumen bewachsen ist und welches sich 1 m über das Niveau der Betonbodenplatten erhebt. Der dritte Teil besteht hauptsächlich aus einer Wiese und liegt 0,7 m tiefer als der Teil mit den Bodenplatten. Die Fassaden der umliegenden Gebäude bestehen aus Metall mit Glasfenstern.

Die Durchgänge zwischen den Gebäuden I und II/III sind 9,9 m, zwischen dem Gebäude V und II/III 12 m breit. Es gibt eine 11,2 m breite Zufahrt zwischen dem Gebäude V im Osten und dem zugänglichen Innenhof. Dieser befindet sich ein Stockwerk tiefer. Der Innenhof ist durch ein Betongeländer gesichert. Im Westen liegt das Gebäude ein Stockwerk höher. Zwischen dem eigentlichen Platz im Innenhof und dem Eingang zum Gebäude V befindet sich an beiden Rändern eine Treppe mit einer mehrstufigen Wand dazwischen.

Messkampagne für RT60- und STI-Intra-Raum-Verteilungen: Messpositionen

Messpositionierung RT60 Der Innenhof wurde in 3 Messlinien unterteilt, auf denen die Quelle in regelmässigen Abständen positioniert wurde (vgl. Abbildung 105). Die erste Linie verläuft entlang des Gebäudes II, die zweite zwischen den Gebäuden II und III und die dritte Linie befindet sich innerhalb des Bereichs mit der Wiese. Die beiden Messgeräte wurden von der Quelle aus gesehen nach Süden und Westen ausgerichtet. Die Messhöhe betrug jeweils 1.7 m. Zusätzlich zu den RT60-Messungen wurde am Messpunkt 5 während 10 Sekunden eine Schallpegelmessung (SLM) durchgeführt.

Zusätzliche Messkonfigurationen:

- Position 1: In beiden Abständen (2m/5m) je 6 Messungen
- Position 6: in alle vier Richtungen mit den Abständen 2m und 5m , sowie in die Richtung von Trakt III mit den zusätzlichen Distanzen von 10m und 5m
- Position 11: zusätzliche Messung mit Quelle und Empfänger Abstand 2m, Lautsprecher 90° abgedreht
- Position 12, 13: jeweils eine Messung, Position siehe Abbildung 106

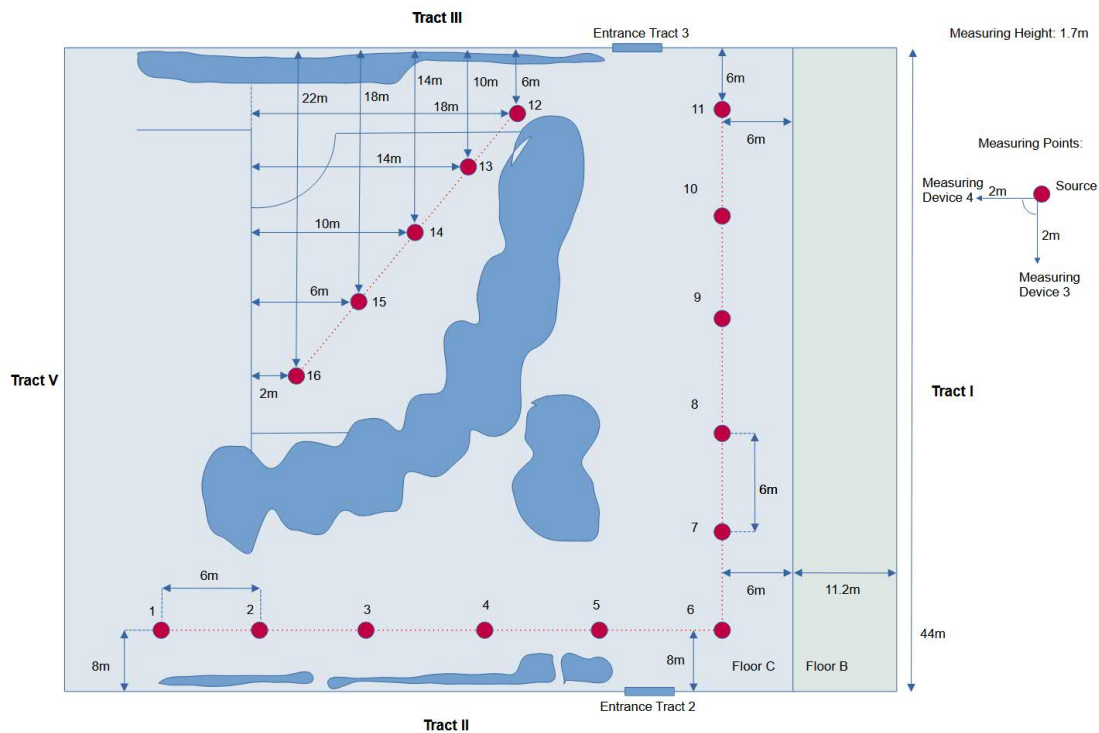


Abbildung 105: Innenhof HSLU mit RT60-Messpositionen

Messpositionierung STI Die Messpositionen für die STI-Messungen sind in Abbildung 106 dargestellt. Es gibt insgesamt 13 Quellenpositionen, von denen 11 entlang zweier Hauptlinien angeordnet sind. An den Punkten 1, 6, 11, 12 und 13 wurden zusätzliche, abweichende Konfigurationen verwendet. Die Höhe der Quelle und der Messgeräte betrug immer 1,7 m mit Ausnahme der zusätzlichen Messung an Messpunkt 6. Darüber hinaus wurde am Messpunkt 1 eine 20 Sekunden dauernde Schallpegelmessung (SLM) durchgeführt.

Zusätzliche Messkonfigurationen:

- Position 1: In beiden Abständen 2m und 5m je 6 Messungen
- Position 6: in alle vier Richtungen mit den Abständen 2m und 5m , sowie in die Richtung von Trakt III mit den zusätzlichen Distanzen von 10m und 5m (vgl. Abbildung 106 rechts unten)
- Position 11: zusätzliche Messung mit Abstand 2m, Lautsprecher 90° abgedreht
- Position 12, 13: jeweils eine Messung in einer Position (vgl. Abbildung 106)

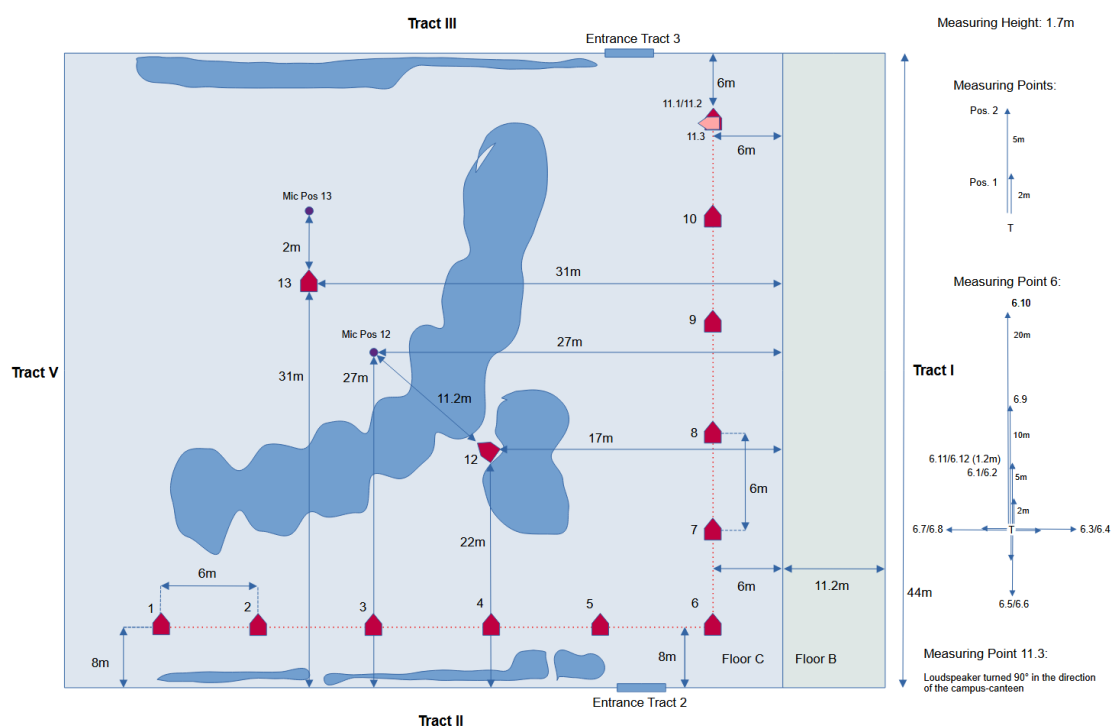


Abbildung 106: Innenhof HSLU mit STI-Messpositionen

Messkampagne für RT60- und STI-Intra-Raum-Verteilungen: Resultate

Resultate der RT60-Intra-Raummessungen

Die Messung wurde am 16. Dezember 2023 durchgeführt.

SLM Messung Abbildung 107 zeigt die SLM-Messung am Messpunkt 5. LA_{eq} breitbandig beträgt 41.9 dB. Es gab wenig transiente Geräusche, zwischendurch Zug-Durchfahrten und Fluglärm. Hauptsächlich waren es Geräusche von technischen Anlagen.

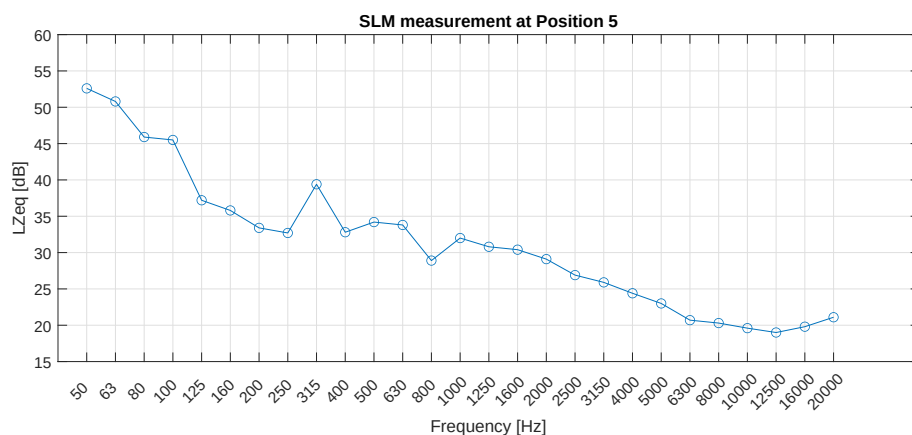


Abbildung 107: LZ_{eq} -Werte am Messpunkt 5

Übersicht der RT60-Messdaten In Abbildung 108 sind die Messergebnisse aller Messpositionen dargestellt. Als Messergebnis für jede Position gilt der Average-Wert. Bei den unteren Frequenzen gibt es Lücken in den Daten, weshalb die Punkte teils nicht verbunden sind. Um 250 Hz heben sich einige Messungen vom Rest ab. Die Unterschiede könnten in der Gruppierung durch die drei Messlinien entstanden sein (siehe Kapitel B.3). Oberhalb von ca. 2'500 Hz nimmt die Nachhallzeit stetig ab.

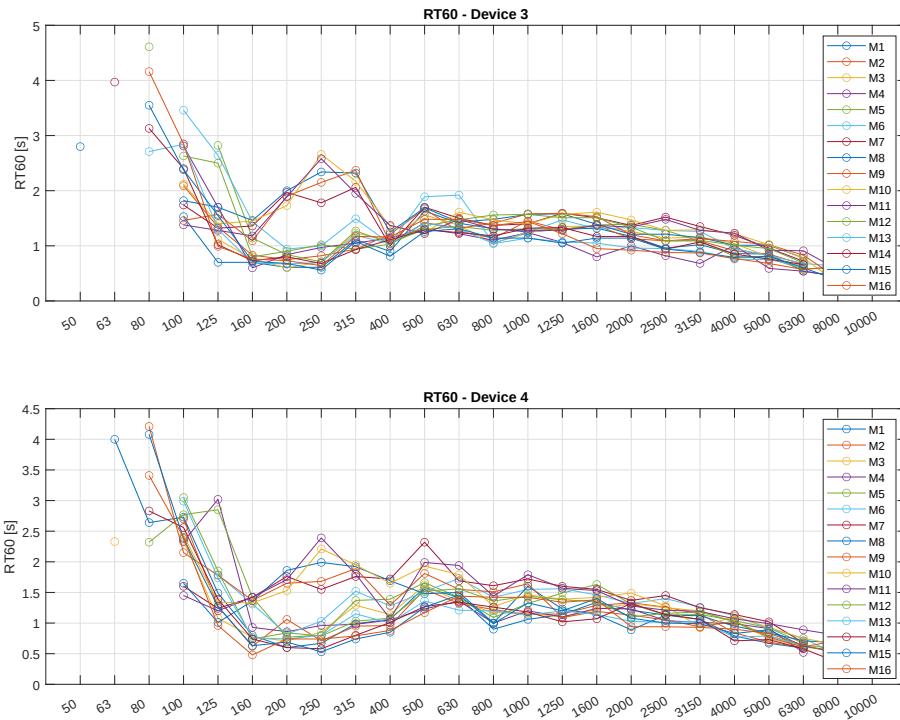


Abbildung 108: RT60-Messwerte, Messgeräte Nr. 3 und 4

Aus den Messdaten wurden folgende Messungen nicht berücksichtigt:

- Gerät 3:
 - Position 2, Messung 3
 - Position 13, Messungen 2, 3, 5, 9
- Gerät 4:
 - Position 7, Messung 1
 - Position 10, Messung 1
 - Position 12, Messungen 6, 8

Die besagten Messungen beinhalten entweder zu wenige Werte oder sie sind fehlerhaft.

Range der Messwiederholungen Für die Berechnungen des Messranges innerhalb der Messwiederholungen wurden jeweils 2 Messpositionen pro Messlinie (vgl. Abbildung 105) ausgewählt:

- Positionen 2, 4 entlang des Trakts 2
- Positionen 8, 10 entlang Durchfahrtskorridor

- Positionen 13, 15 innerhalb des Parks

Abbildung 109 zeigt die Ranges vom Messgerät Nr. 3. Ranges oberhalb von 1000 Hz sind regelmässig klein, zwischen 100-1000 Hz unterschiedlich. Ab 200 Hz wird der Range bei den Messpositionen 8 und 10 grösser. Die beiden Positionen befinden sich entlang des Durchfahrtskorridors (Ebene B).

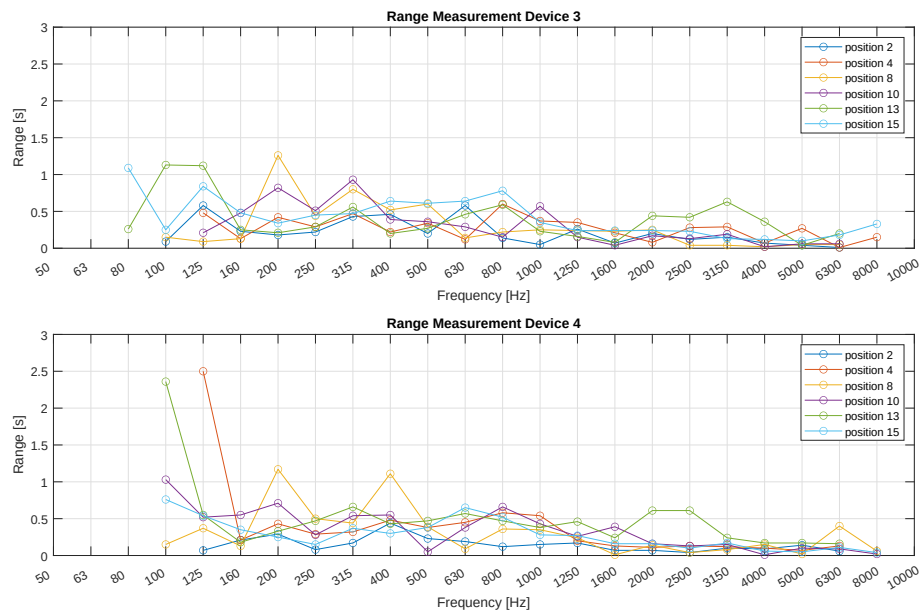


Abbildung 109: Ranges der Messwerte an 6 Messpositionen

Standardabweichung Die Standardabweichung wurde aus den Average-Werten für jede Frequenz berechnet (vgl. Abbildung 110). Zwischen 100 und 400 Hz zeigen beide Messgeräte erhöhte Werte bis 0.61 bzw. 0.77 Sekunden. Über 500 Hz beträgt die Abweichung zwischen 0.09 und 0.23 Sekunden.

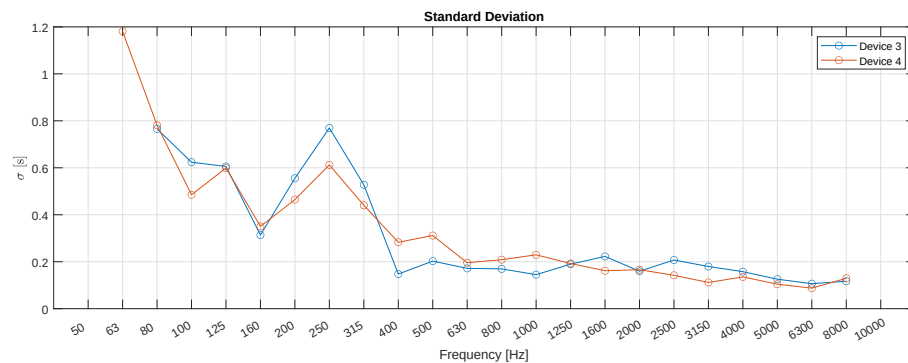


Abbildung 110: Standardabweichung RT60-Messwerte beider Messrichtungen

Mittelwerte aller Messpositionen Die Messwerte sind bei allen Messpositionen jeweils gemittelt (vgl. Abbildung 111). In Richtung Trakt III sind die Mittelwerte bei den ersten 5 Messpositionen tiefer als in Richtung Trakt V. Bei den restlichen Positionen gleichen sich die Kurven, decken sich aber nur bei den letzten drei Positionen.

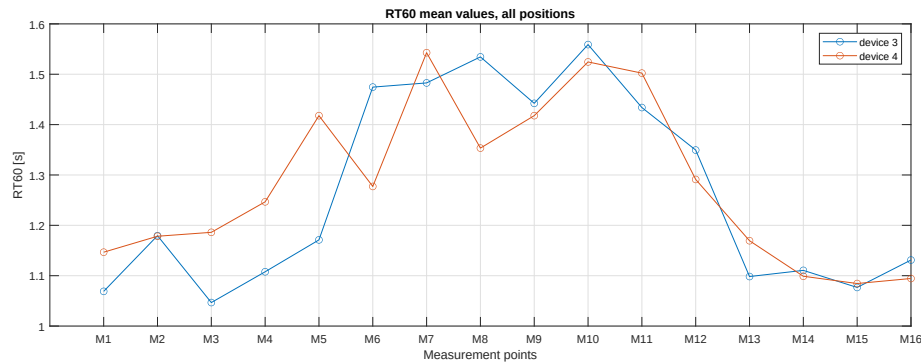


Abbildung 111: Mittelwerte RT60-Messwerte beider Messrichtungen

Gruppierung der Messpositionen In der Datenübersicht (vgl. Abbildung 108) sind bei einigen Messpunkten die Werte erhöht. Aufgrund der Anordnung wird vermutet, dass die drei Messlinien unterschiedliche Ergebnisse zeigen. Die Messungen werden darum in drei Gruppen aufgeteilt und die Werte gemittelt:

- Gruppe 1: Messpositionen 1-6 entlang Trakt II
- Gruppe 2: Messpositionen 7-11 entlang Trakt I
- Gruppe 3: Messpositionen 12-16 entlang Trakt III

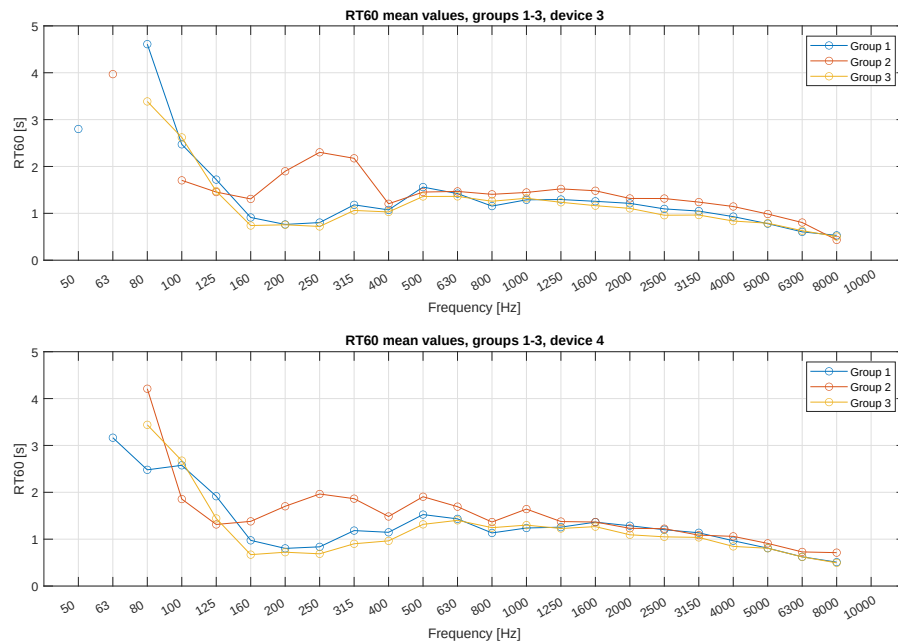


Abbildung 112: Aufteilung der Messpositionen in drei Gruppen und Mittelung der Messwerte, Messgeräte Nr. 3 und 4

Das Ergebnis in Abbildung 112 bestätigt die Vermutung. Während die Messlinien entlang der Trakte II und III um 250 Hz Werte beim Messgerät 3 zwischen 0.72 und 0.8 s aufweisen, liegt der Mittelwert der dritten Messlinie entlang Trakt I bei 2.3 s. Das Gerät mass die Nachhallzeit in Richtung Trakt 2.

Die Ergebnisse von Messgerät 4 zeigen dasselbe Bild, die Differenz der Werte ist mit 0.69 bzw. 0.84 Sekunden gegenüber 1.96 Sekunden wenig kleiner. Messgerät 4 mass in Richtung Trakt V.

Standardabweichung der Gruppen Die Standardabweichung der drei Gruppen wurde aus den jeweiligen Average-Werten der einzelnen Messpunkte für jede Messlinie berechnet. Beide Geräte zeigten bei 250 Hz bei der Gruppe 2 einen erhöhten Wert. Bei Gerät 3 sind es 0.35 Sekunden gegenüber 0.14 bzw. 0.18 Sekunden. Bei den nachfolgenden Frequenzen ist die Standardabweichung bei der Gruppe 2 teils tiefer als bei den anderen Gruppen. Gerät 4 zeigt bei der Gruppe 2 auch bei den höheren Frequenzen grösstenteils eine höhere Standardabweichung (Abbildung 113).

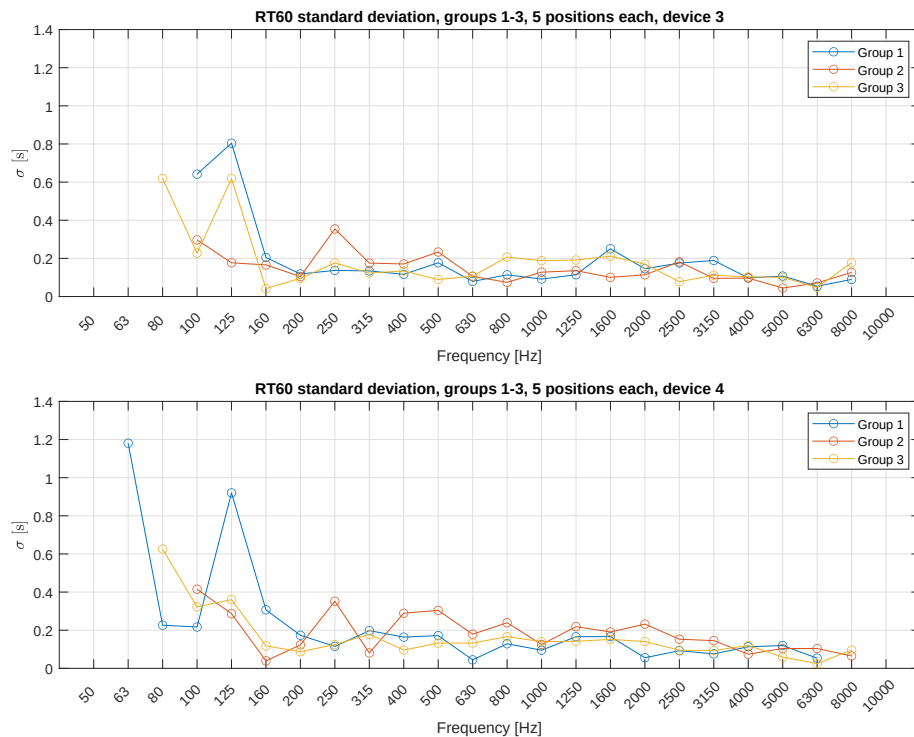


Abbildung 113: Standardabweichung gruppiert, Messgeräte Nr. 3 und 4

Vergleich der Mittelwerte bei 250 Hz, 500 Hz und 1kHz In Abbildung 114 sind die Werte bei jeweils einer bestimmten Frequenz über alle Messpunkte abgebildet. Um 250 Hz (oben) ist die Erhöhung entlang Trakt I bei beiden Messgeräten ersichtlich. Bei 500 Hz ist die Kurve bei beiden Geräten deutlich abgeflacht, nur Gerät 4 zeigt eine leichte Erhöhung. Bei 1kHz sind die Werte konstanter und bewegen sich zwischen 1.06 und 1.79 Sekunden.

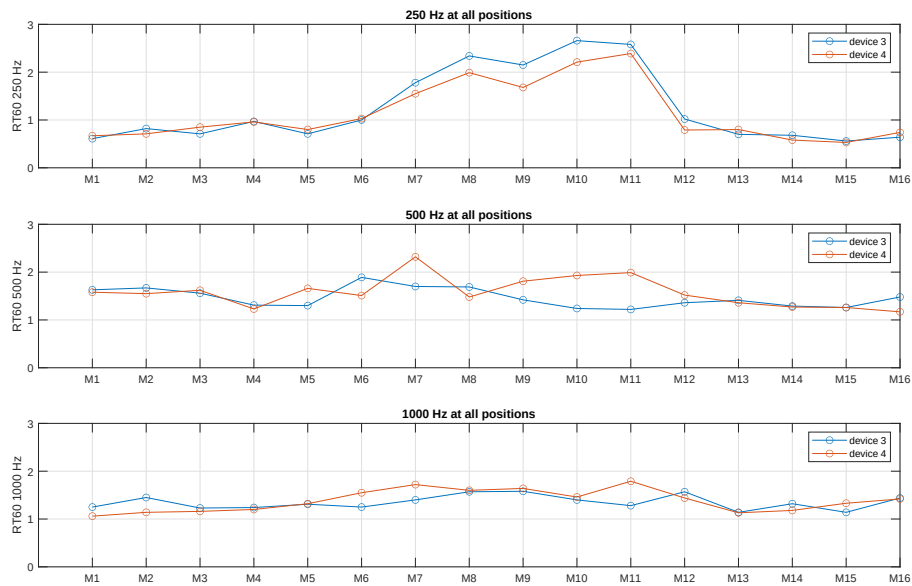


Abbildung 114: Mittelwerte bei den Frequenzen 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz

Resultate der STI-Intra-Raummessungen

Die Messung wurde am 23. Dezember 2023 durchgeführt.

SLM Messung An der Messposition 1 wurde eine SLM-Messung gemacht. LA_{eq} breitbandig beträgt 38.3 dB.

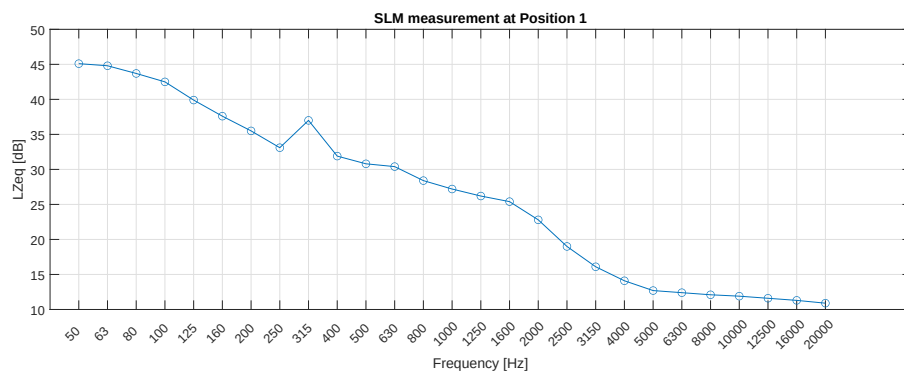


Abbildung 115: LZ_{eq} -Werte an der Messposition 1

Übersicht der STI-Messdaten an den Messpunkten 1-11 An den Messpunkten 1 bis 11 wurden jeweils zwei Messungen bei den Abständen 2m und 5m gemacht (vgl. Abbildung 106). Die Werte beim

Abstand 2m bewegen sich alle im maximalen Qualitäts-Rating A+. Bei einem Abstand von 5m sind die Werte wenig tiefer, aber durchgehend oberhalb der Grenze für ein Rating A (vgl. Anhang B.2).

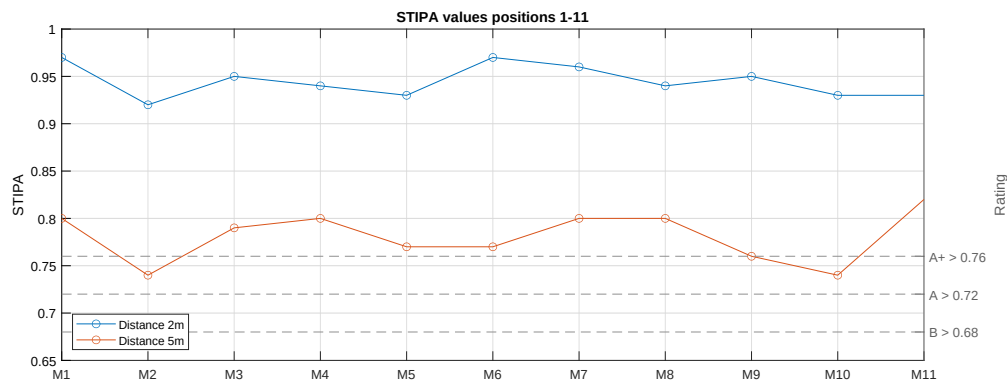


Abbildung 116: STIPA: Alle Messwerte liegen oberhalb von 0.72

STI-Messdaten an den Messpunkten 11.3,12,13 Die Messwerte an den Positionen 11.3, 12 und 13 sind in Abbildung 117 separat dargestellt.

Position 11.3 hat den Lautsprecher um 90° abgedreht, der Empfänger ist unverändert mit Abstand 2m. Die Position liegt nahe am Trakt 3. Der STIPA-Wert ist durch die Drehung des Lautsprechers tiefer geworden, bewegt sich aber mit 0.72 noch immer im Bereich A.

Die Messung an Position 12 hat mit 0.41 den tiefsten Wert der gesamten Messungen (I: PA in schwierigen Umgebungen). Zwischen Sender und Empfänger befindet sich an dieser Position eine Erhöhung mit Bäumen, welche die Messung stark beeinflusst.

Der Wert an Position 13 im Raum ohne Hindernis ist mit 0.91 wieder deutlich im ausgezeichneten Bereich.

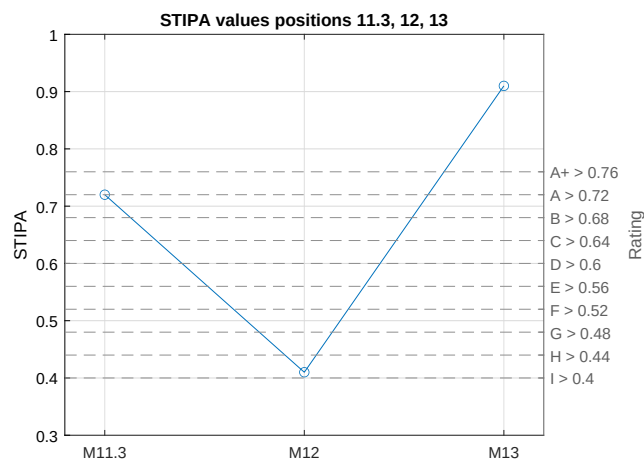


Abbildung 117: Messvarianten an drei Positionen

Modulation Ration mr1 und mr2 pro Frequenzband Es ist zu sehen, dass die Verschlechterung der Modulation (und somit des STIPA) mit der Distanz vor allem bei tiefen Frequenzen (125 und 250 Hz), sowie zunehmend gegen hohe Frequenzen (ab 2000 Hz und vor allem bei 8000 Hz) entsteht. Die Verschlechterung bei 500 und 1000 Hz ist sehr gering (Abbildung 118).

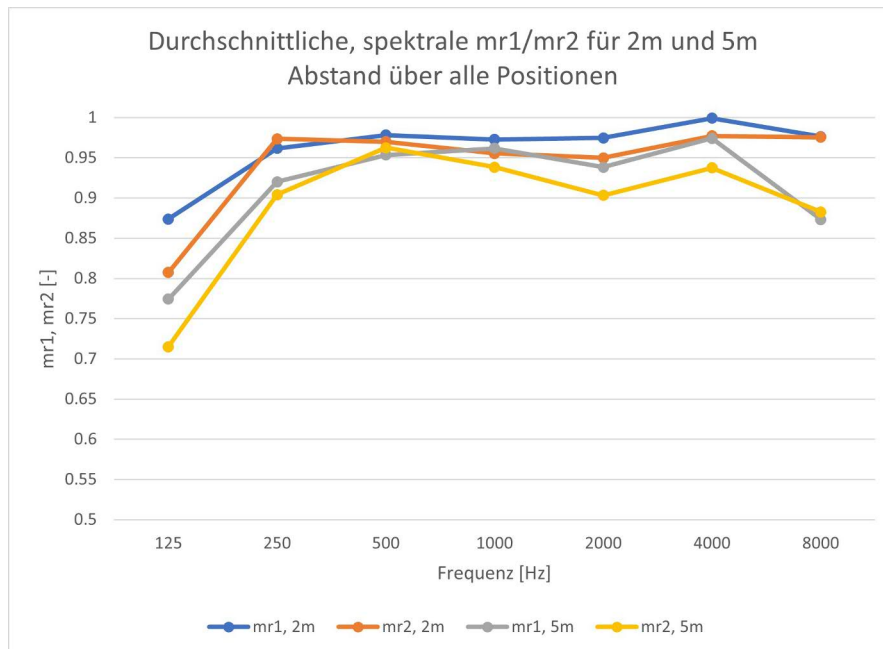


Abbildung 118: Stabile mr-Werte zwischen 250 Hz und 4000 Hz

Multiple STI-Messung am Messpunkt 1 Am Messpunkt 1 wurden zum Vergleich jeweils 6 einzelne Messungen mit Abstand 2m und 5m gemacht. Die Werte sind beim Abstand von 2m nahezu konstant über 0.95 (vgl. Abbildung 119). Beim Abstand von 5m bewegen sich die Werte zwischen 0.76 (Messung 4) und 0.83 (Messungen 3 und 5).

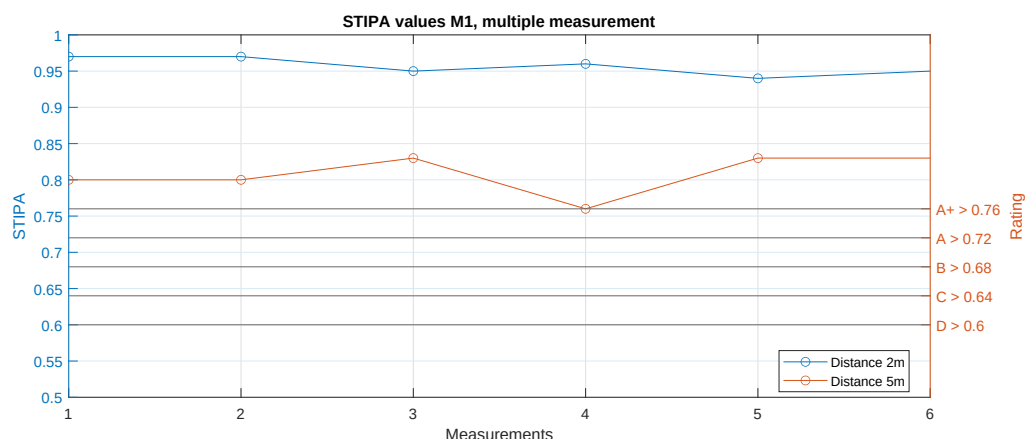


Abbildung 119: Konstante Messwerte bei 6 aufeinanderfolgenden Messungen

Range der STI-Werte aus den Messwiederholungen am Messpunkt 1 Aus den erhaltenen STI-Werten sind in Abbildung 120 die Range-Werte beider Abstände aufgeführt. Beim Abstand von 5m ist der Range mehr als doppelt so gross wie bei einem Abstand von 2m.

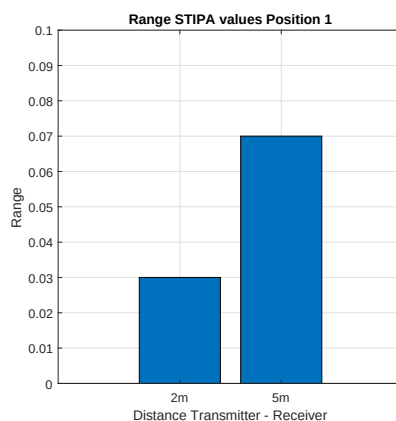


Abbildung 120: Messrange der multiplen STI-Messung am Messpunkt 1

Messvarianten am Messpunkt 6 Im Gegensatz zum Messpunkt 1 werden am Messpunkt 6 die beiden Messeinrichtungen zusätzlich nach Westen, Süden und Osten gedreht. Die blauen Punkte in Abbildung 121 zeigen die Werte in alle Richtungen mit Abstand 2m, die roten Punkte mit Abstand 5m. Je eine Messung erfolgt in die gewohnte Richtung Norden mit 10 m (grün) und 20 m (magenta). Mit der Erhöhung der Distanz wird die Sprachverständlichkeit deutlich kleiner.

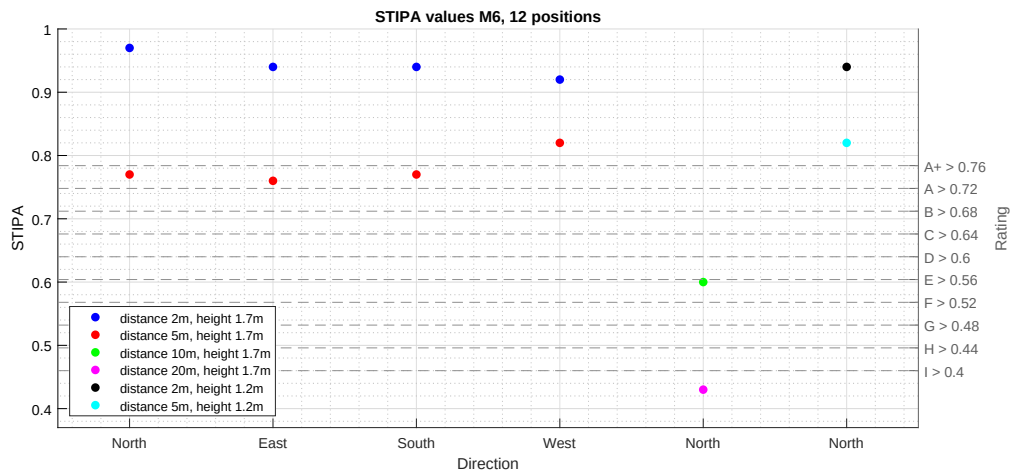


Abbildung 121: Messvarianten an der Messposition 6

Bei den letzten zwei Messungen wird die gewohnte Position mit den Abständen 2m und 5m eingenommen und die Empfänger-Position in der Höhe auf 1.20 m gesenkt. Das Ergebnis verhält sich gleich wie die Messung Richtung Westen. Vermutung: die Ausrichtung der Installation und die Höhe des Messgerätes haben auf die kurze Distanz wenig Einfluss. Die letzte dieser Messungen am Messpunkt 6 findet zu denselben Bedingungen statt wie die Messung, welche nach Westen ausgerichtet war. Das leicht veränderliche Hintergrundgeräusch scheint kaum Einfluss auf den STI zu haben.

Range der STIPA-Werte am Messpunkt 6 mit Richtungsänderung Im Unterschied zu den Range-Werten am Messpunkt 1 (vgl. Abbildung 120) werden beim Messpunkt 6 die Messwerte der vier unterschiedlichen Ausrichtungen verwendet (vgl. Abbildung 122). Der Range im Abstand von 2m ist höher als beim Messpunkt 1, im Abstand von 5m ist diese vergleichsweise tiefer. Die Umgebung beim Messpunkt 6 ist offener als beim Messpunkt 1. Die Distanz der Messgeräte scheint den Range der Messdaten weniger zu beeinflussen. Die Ausrichtungs-Änderung erhöht evtl. die Spannweite und gleicht die beiden Positionen (2m/5m) an.

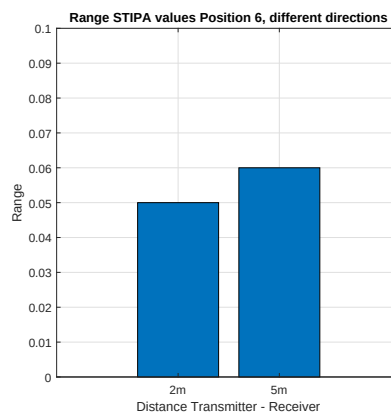


Abbildung 122: Messrange der STI-Messung am Messpunkt 6

LA_{eq} -Werte der STI-Messungen In Abbildung 123 ist erkennbar, dass der LA_{eq} -Wert bei abgedrehtem Lautsprecher am Messpunkt M11.3 im Abstand von 2 m ca. 3 dB tiefer ist. Ein klar tieferer Wert wird über ein Hindernis beim Messpunkt M12 gemessen. Die Messpositionen M1-M11 unterscheiden sich nur wenig.

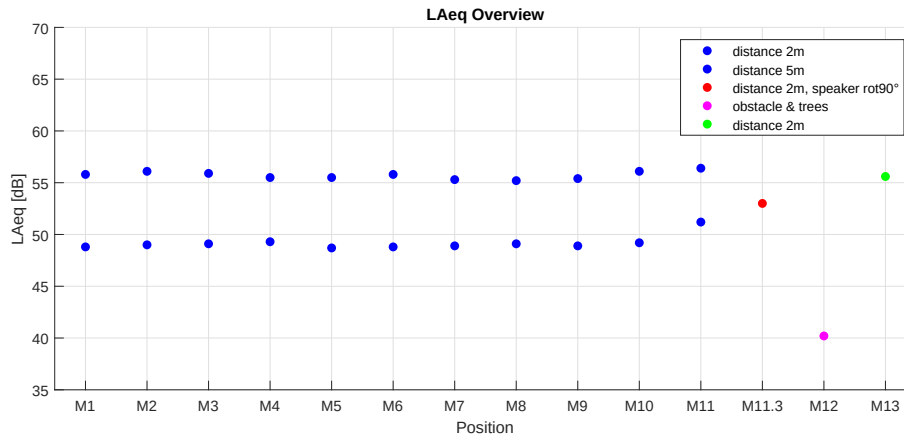


Abbildung 123: LA_{eq} -Werte der STIPA-Messungen an allen Mespositionen

Messkampagne für RT60- und STI-Intra-Raum-Verteilungen: Fazit

Die RT60-Messung war nicht robust gegenüber Schwankungen der Hintergrundgeräusche (SNR). Messanordnungen zur Erhöhung des Quellenpegels oder zur Verringerung des Geräuschpegels (Messung während der Nacht) sind möglicherweise nicht zulässig. Darum ist es sinnvoll, spektral angepasste Quellen zu verwenden und ausreichende Messwiederholungen durchzuführen. Fehlerhafte Messungen sollten vor der Analyse herausgefiltert werden. Darüber hinaus sind RT60-Messungen in Innenhöfen aufgrund unzureichender reflektierender Oberflächen problematisch. Die RT60-Ergebnisse variierten aufgrund der lokalen akustischen Bedingungen in den einzelnen Innenhöfen der vorausgehenden Feldmesskampagne (vgl. Kapitel 2.1), sodass ein einziger Wert zur Charakterisierung des gesamten Innenhofs nicht möglich war.

Der STI-Wert hing von den Hintergrundgeräuschen, dem Abstand zwischen Quelle und Empfänger, dem Abschirmeffekt und der Ausrichtung der Quelle ab. Es wurde keine offensichtliche Abhängigkeit des STI-Wertes von der Position im Innenhof der Hochschule für Technik und Architektur Luzern festgestellt. Während die Schwankungen der Hintergrundgeräusche nicht speziell für den STI-Wert untersucht wurden, wiesen separate SPL-Messungen auf Schwankungen hin, sodass die Wiederholbarkeit der STI-Messungen ähnlich schwierig ist wie die des SPL-Wertes selbst.

Die Vorstudie zeigt, dass SPL, RT60, STI und eine Reihe von psychoakustischen Parametern zur Bewertung und Beschreibung der akustischen Qualität von Wohnumgebungen im Freien verwendet werden können, allerdings mit Vorsicht. Es braucht eine höhere Anzahl von wiederholten Messungen (im Vergleich zu Innenräumen) und die Eliminierung fehlerhafter Daten vor der Analyse. Es sollten zudem Variationen der raumakustischen Eigenschaften innerhalb des Raums gesucht werden. Das heisst, es ist förderlich, den Aussenraum in kleinere Abschnitte mit gleichbleibender Raumakustik zu unterteilen. Darüber hinaus sollen bei der SPL- und psychoakustischen Analyse zeitliche Schwankungen berücksichtigt werden.

B.4 Messprotokoll WP2

Protokoll für Klangraummessungen, Juni 2024

Kurzfassung

Dieses Protokoll zielt darauf ab, die Arbeitsschritte zur Messung von Klangräumen zu beschreiben. Die Untersuchungsobjekte sind Aussenräume von Wohnbauten. Unter anderem kommen hierbei die Empfehlungen der Soundscape-Normen ISO 12913-1, 2, & 3, aber auch andere, akustische sowie raumakustische Messungen zum Einsatz.

1. Vorbereitung

Vor jeder Messung müssen die folgenden Schritte beachtet werden.

- Briefliche Information der Anwohner*innen mit
- Mobility-Auto reservieren
- Vier NTi-Messgeräte (XL2) reservieren und vorbereiten (besser sechs Geräte)
 - Eines der Geräte muss die Nr. 4 sein (STIPA-Messung)
 - Batterien aufladen
 - Dreieck-Spitze (2x) bereitstellen und mitnehmen
 - Stative bereitstellen und mitnehmen
 - Zusätzliche Batterien bereitstellen und mitnehmen
 - NTi-Kalibrator bereitstellen und mitnehmen
 - Koffer mitnehmen
 - Netzteile mitnehmen
 - Einstellungen überprüfen
 - Autosave: Assisted
 - Datum und Zeit
 - Folder: BAFU
 - Reporting: Spectra-Leq, LAeq, LAFmax, LAFmin, LAF5%, LAF10%, LAF50%, LAF90%, LAF95%, LCeq, LZeq
 - Logging: 1-sec-Interval, Spectra-Leq, Audio-24bit_48kHz, LAeq, LAFmax, LAFmin, LCeq, LZeq, LAF5%, LAF95%
- Laser-Distanzmeter und Zollstab bereitstellen und mitnehmen
- Dodekaeder-Lautsprecher DS3 inkl. Zubehör bei Michael Peter reservieren, bereitstellen und mitnehmen
- STI-Lautsprecher bereitstellen und mitnehmen
- Ein binaurales Aufnahmegerät und Headset (inkl. Zubehör) bereitstellen und mitnehmen
- Foto-Kamera/Handy-Kamera zur Mitnahme bereitstellen
- Laptop und Netzteil mitnehmen
- Tabelle, Taxonomie und Lageplan ausdrucken
- Zwei Kabelrollen à 25 Meter Länge zur Stromverlängerung bereitstellen und mitnehmen
- Audio-Interface RME Fireface UCX II bereitstellen und mitnehmen
- HiFi-Verstärker Sony bereitstellen und mitnehmen
- Lautsprecher B&W bereitstellen und mitnehmen
- Genügend Audio- (Cinch-Jack, XLR-XLR) und Netzkabel bereitstellen und mitnehmen

2. Messungen

Folgende Messungen müssen vor Ort an unterschiedlichen Positionen durchgeführt werden. Die Positionen müssen jeweils dokumentiert werden.

- RT60
- STI
- SPL
- Binaurale Audioaufnahme
- Impulsantwortmessungen

2.1. RT60

Verschiedene Teilräume müssen anhand subjektiver Einschätzung identifiziert werden (im Vorfeld via Online-Karten und Fotografien, sowie vor Ort durch Materialcharakterisierung und Höreindruck), welche potenziell unterschiedliche Nachhallzeiten aufweisen könnten.

RT60 Messungen sollten mit mind. zwei Empfängergeräten und in einem Quelle-Empfänger-Abstand von 2-5 m gemacht werden. Die Höhe der Quelle und des Empfängers liegt bei 170 cm. Es sollen pro Teilraum 6 Quelle-Empfänger-Kombinationen gemessen werden. Die Rauschquelle soll auf die maximale Lautstärke eingestellt werden. Es sollen 3 fehlerfreie Abklingvorgänge pro Position gemessen werden. Die einzelnen Messungen müssen überprüft werden und fehlerhafte Messungen wiederholt werden. Bei den NTi XL2 sollte ein Range von 30-130 eingestellt werden.

Quelle: Dodekaeder-Lautsprecher DS3, Rosa Rauschen

Messgerät: NTi XL2

2.2. STI

Es müssen 4 Quelle-Empfänger-Kombinationen bestimmt werden, welche sich als Treff- oder Aufenthaltsort eignen oder als solches vorgesehen sind. Dabei werden zwei Kombinationen gewählt, bei welchen zwei Menschen miteinander sprechen (Distanz 1m), sowie zwei Kombinationen, bei welchen jemand in der Nähe eines Gespräches (bspw. auf der Bank nebenan) zuhören könnte (Distanz 4m). Es sollen jeweils 8 Werte gemessen werden. Die generellen und speziellen Störgeräusche sollen notiert werden. Die Resultate müssen nach jeder Messung überprüft werden.

Quelle: NTi Talkbox

STIPA Measurement Signal (Standard, edition 5) 60 dBA @ 1m, ± 0.5 dBA

Messgerät: NTi XL2

2.3. SPL

Für die SPL-Messung wird einer der Orte, wo auch STI-Messungen stattfinden, ausgewählt. Es wird viermal am Tag innerhalb folgender Zeitfenster gemessen:

- Morgen: 08:00-10:30
- Mittag: 11:30-13:00
- Nachmittag: 14:30-16:00
- Abend: 17:00-18:30

Jede SPL-Messung dauert 15 Minuten. Zwei NTi XL2-Geräte auf der Höhe 120 bzw. 170 m nehmen die Geräuschkulisse und den Pegel auf. Zusätzlich und zur gleichen Zeit wird mit dem binauralen Gerät während 10 Minuten aufgenommen. Bei den NTi XL2 sollte ein Range von 10-110 eingestellt werden.

Messgerät: NTi XL2

2.4. Binaurale Aufnahme

Binaurale Aufnahmen finden zeitgleich zu den SPL-Messungen statt. Das Headset-Mikrofon BHS II wird einfach mit dem spezifischen BHS-Anschluss der SQobold verbunden. Die Konfiguration der beiden verwendeten Kanäle wird dann automatisch angepasst und es wird die korrekte Aufnahme-Entzerrung aktiviert. Die Aufnahme wird im Format .hdf gespeichert. Ebenfalls Position und Orientierung aufnehmen.

Aufnahmegerät: HEAD acoustics' BHS II & SQobold

2.5. Impulsantwortmessung

Messung von 3 charakteristischen Impulsantworten, angelehnt an die Positionen der STI-Messungen, mittels der Software Room Equalization Wizard (REW). Die Quelle muss genügend laut sein, um am Empfangsort in allen Frequenzbereichen mindestens 30 dB über dem Hintergrundgeräuschpegel zu liegen. Benutzt wird der Ausgang 3 des Audio-Interfaces und der CD-Cinch Eingang des Verstärkers. Das Mikrofon wird auf Eingang 1 gesteckt und benötigt Phantomspeisung. Ausgang 3 wird in Totalmix digital zurückgeschlaucht (Loopback). Der Verstärker benötigt üblicherweise eine Verstärkung von 2.5. Der digitale Ausgangspegel sollte bei ca. -12.5 dBFS liegen. Der Mikrofongain bei ca. 20 dB.

Gemessen werden dieselben Positionen wie bei der STI-Messung.

Quelle: Audio-Interface, Verstärker + Lautsprecher

Messgeräte: Laptop, NTi Audio Mikrofon

3. Beobachtungen/Protokollieren

Folgende Punkte müssen bei der Besichtigung/Messung protokolliert und kommentiert werden.

- Ausschnitt von Google-Maps des Innenhofs
- Wetter (Lufttemperatur, RH, Wind, Niederschlag)
- Nähe zur Strasse und Schiene?
- Bild-Aufnahme (Handy) zur Darstellung von Grösse, Form, Oberflächen, Bodenbeschaffenheit und besonderen Merkmalen
- Sitzmöglichkeiten? (Ja/nein, Art, Anzahl)
- Kinderspielplatz? (Ja/nein)
- Möglichkeiten für Sport? (ja/nein, welche?)
- Grüner Boden? Harter/weicher Boden? (Art und Prozentanteil)
- Erhöhungen und Abtrennungen vorhanden? (ja/nein)
- Wie offen vs. geschlossen? (Anteil ebenerdige Lücken in umliegenden Gebäuden, Prozent)
- Aussenfassadenoberflächenmaterial (Beton, grün, Schalldiffusoren, Fenster, usw.)
- Balkone/Loggien? (Ja/nein, Form, Parallelität, Absorber/Diffusoren)
- Bäume/Grünes? (Ja/nein, Menge)
- Morphologie: Lücken zwischen den Gebäuden? Parallele Oberflächen (Flutter-Echo)? Dachform (Akustischer Schatten)? Winkel zwischen Fassadenflächen (Grad °).
- Hintergrundgeräusche gemäss Typologie aus KI-Teilprojekt notieren (Wasser, Vögel, Vegetation/Blätter, Wind, Kinder, Gespräche, Baulärm, Strassenlärm, Fluglärm, Schienenlärm, Musik, usw.)? (Ja/nein, was?)

4. Messablauf

1. Anruf bei 117, um nochmals kurz Bescheid zu geben
2. Zw. 08.30-10.00 Uhr: Erste SPL-Messung, Binaurale Aufnahme
3. Zw. 10.00-12.00 Uhr: RT60-Messung und STI-Messung
4. Zw. 12.00-12.30 Uhr: Zweite SPL-Messung, Binaurale Aufnahme
5. Mittagspause, Messungen überprüfen
6. Zw. 13.30-14.30 Uhr: Messung der Impulsantworten
7. Zw. 14.30-15.00 Uhr: Dritte SPL-Messung, Binaurale Aufnahme
8. Zw. 15.00-17.00 Uhr: Allenfalls Messweiterführung oder Wiederholung, Notizen und Fotos machen
9. Zw. 17.00-18.30 Uhr: Vierte SPL-Messung, Binaurale Aufnahme

5. Auswertungen

- T20 und EDT
- Echokriterium nach Dietsch und Kraak
- Auswertung der Audioaufnahmen nach psychoakustischen Kriterien (Schärfe, Lautheit, Rauheit, Schwankungsstärke, Tonalität)
 - loudness exceeded in 5 % of the time interval N5 in accordance with ISO 532-1;
 - loudness exceeded in 95 % of the time interval N95 in accordance with ISO 532-1;
 - root mean cubed loudness Nrmc in accordance with ISO 532-1;
- Stärkemass G
- L10-L90
- TFSD: time frequency second derivative
- MFCC: Mel Frequency Cepstrum Coeff.
- Spectral Slope
- Anteil Grün und Anteil Blau in Fotos
- Anteil Naturmerkmale in Fotos

Literatur:

Lionello, Matteo, Francesco Aletta, and Jian Kang. "A systematic review of prediction models for the experience of urban soundscapes." *Applied Acoustics* 170 (2020): 107479.

Pheasant, Robert J., Kirill V. Horoshenkov, and Greg R. Watts. "Tranquillity rating prediction tool (TRAPT)." *Acoustics Bulletin* 35.6 (2010): 18-24.

B.5 Messequipment für die technische Datenerhebung

Geräte und Mikrofone:

Tabelle 51: Übersicht Messgeräte

Messung	Funktion	Gerät
RT60	Quelle	NTi Audio Dodekaeder-Lautsprecher DS3
	Empfänger	NTi Audio XL2
	Mikrofon	NTi Audio M2211
STI	Quelle	NTi Audio Talkbox
	Empfänger	NTi Audio XL2
	Mikrofon	NTi Audio M2211
SPL	Empfänger	NTi Audio XL2
	Mikrofon	NTi Audio M2211
Binaurale Aufnahme	Empfänger	HEAD acoustics SQobold 3302
	Mikrofon	HEAD acoustics BHS II
Impulsantwort	Software	Room Equalization Wizard (REW) V5.31.1
		RME TotalMix FX
	Quelle	RME Fireface UCX II
		Sony Receiver STR-DB940
		B&W DM602 S2 120W Lautsprecher
	Mikrofon	NTi Audio M2211

B.6 Masse der Messpositionen der Untersuchungsobjekte

Zwicky-Areal Zürich

Tabelle 52: Zwicky-Areal Zürich: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen

Messpunkte	Abstand [m]						
	A	B	C	D	E	F	G
SPL 1	8.8	11.6					
SPL 2			10.5			9.3	
SPL 3			25.9			11.6	
SPL 4				4.9	19.5		
RT60 1				6.5	27.6		
RT60 2				4.6	30.8		
RT60 3			11.6				15.3
RT60 4			24				11.5
RT60 5	15.7	12.3					
RT60 6	5.6	7.2					
STI 1	22.4	13.3					
STI 2			24.4			15.4	
STI 3			13.6			8.2	
STI 4				2.1	27.9		

Tabelle 53: Masse der Hof-Durchgänge Zürich

Durchgang	Breite [m]
D1	19.1
D2	36.8
D3	23.3
D4	13.9
D5	12.3

Erlenmatt Basel

Tabelle 54: Erlenmatt Basel: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen

Messpunkte	Abstand [m]			
	A	B	C	D
SPL 1	10.8	10.6		
SPL 2	13.1	55.8		
RT60 1		6.3		15.2
RT60 2		10.6		22.1
RT60 3		21.2		18.9
RT60 4	16.4	30.3		
RT60 5	19.7	41.5		
RT60 6	12	46.9		
STI 1	18.1	50.8		
STI 2	9.8	31.8		
STI 3	4.7		11.1	

Tabelle 55: Masse der Hof-Durchgänge Basel

Durchgang	Breite [m]
D1	20
D2	8.3
D3	13.5
D4	3.3

Himmelrich 3 Luzern

Tabelle 56: Himmelrich 3 Luzern: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen

Messpunkte	Abstand [m]					
	A	B	C	D	E	F
SPL 1	22.7				30.8	
SPL 2	9.8					10.2
SPL 3				11	11.2	
SPL 4		10.9	10.6			
RT60 1		7.8	9.9			
RT60 2	21.1					27.6
RT60 3	5.7					36
RT60 4				19.7	16.7	
STI 1		20.3	16.6			
STI 2		22.3	20.1			
STI 3				1.1	17.4	
STI 4	17					17.1

Tabelle 57: Masse der Hof-Durchgänge Luzern

Durchgang	Breite [m]
D1	
D2	

Park Humboldtstrasse Bern

Tabelle 58: Park Humboldtstrasse Bern: Abstände der Messpunkte zu den Bezugsflächen

Messpunkte	Abstand [m]						
	A	B	C	D	E	F	G
SPL 1	19.8					26.9	
SPL 2			51.8		18.2		
SPL 3		26.7	18.4				
SPL 4	60.3	13.7					
RT60 1	63.5	16.1					
RT60 2			47.2		19.7		
RT60 3		25.7	37.2				
RT60 4	37.8	20.6					
STI 1	48.1	29.1					
STI 2	15.1						21.6
STI 3	53.9					12.9	
STI 4			15.6	33.5			

Tabelle 59: Masse der Hof-Durchgänge Bern

Durchgang	Breite [m]
D1	15.4
D2	16.3
D3	16.1
D4	16.1

SPL L_{Aeq} Spektrum, alle Messpositionen

Zürich Positionen 2-4:

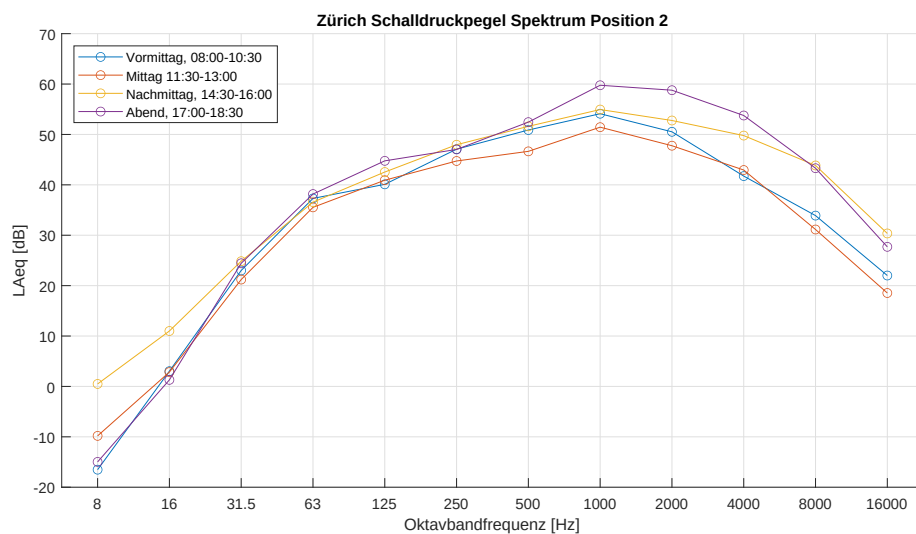


Abbildung 124: LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Zürich

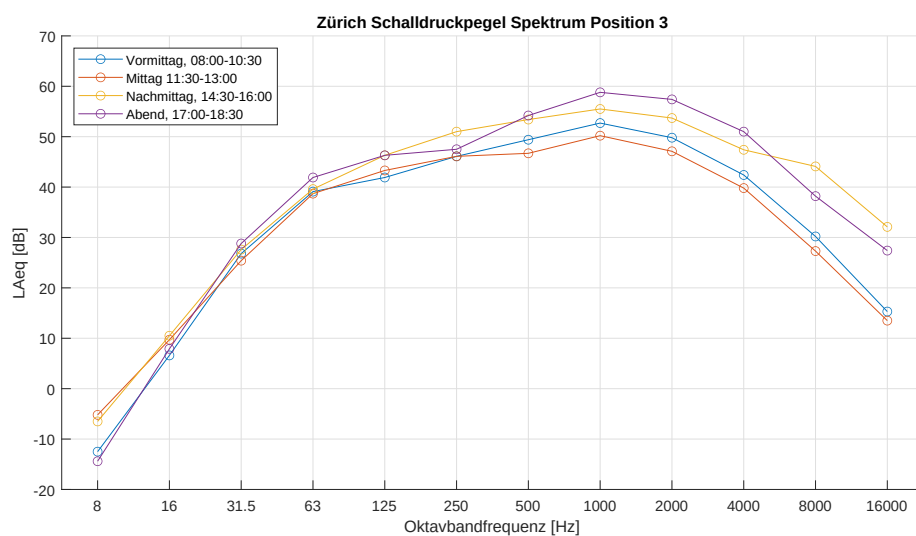


Abbildung 125: LA_{eq} Spektrum Messposition 3 Zürich

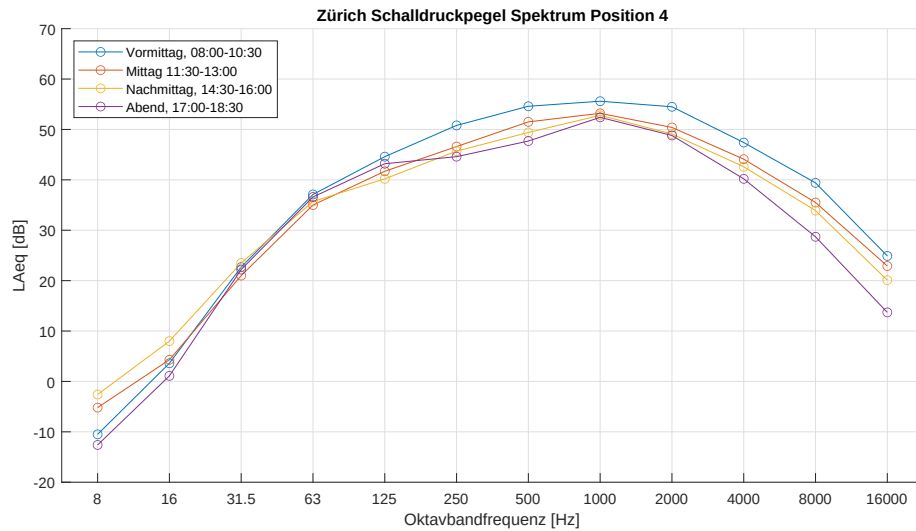


Abbildung 126: LA_{eq} Spektrum Messposition 4 Zürich

Basel Position 2:

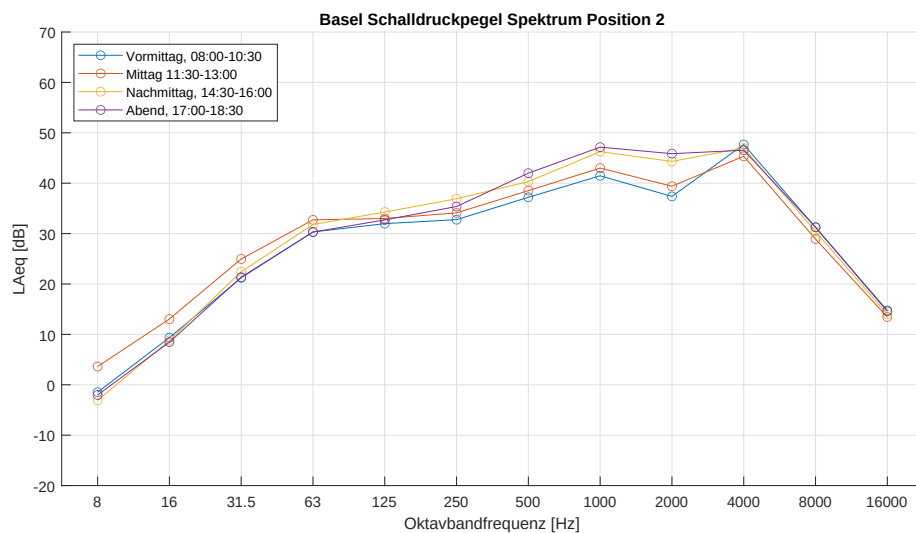


Abbildung 127: LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Basel

Luzern Positionen 2-4:

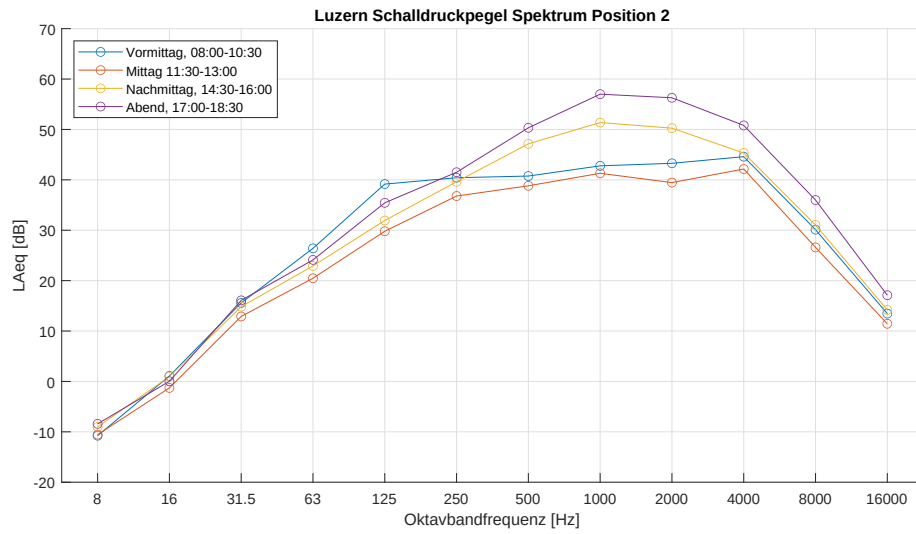


Abbildung 128: LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Luzern

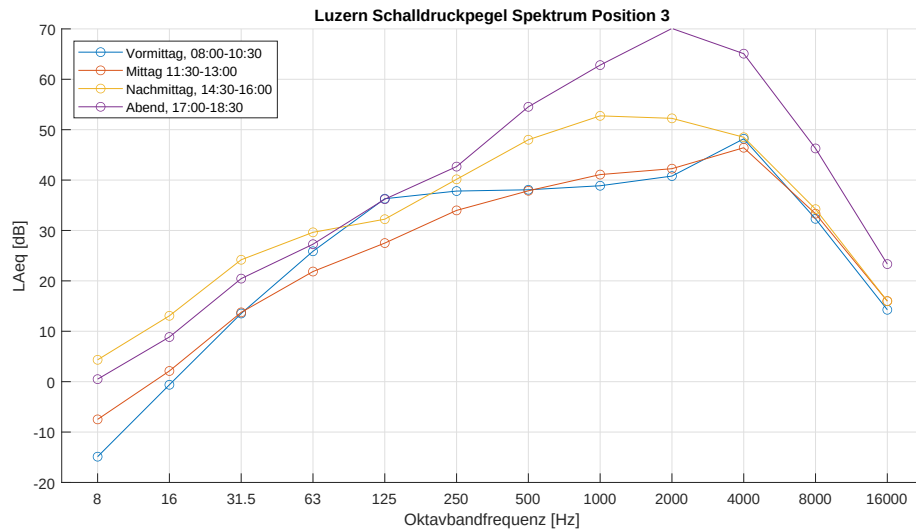


Abbildung 129: LA_{eq} Spektrum Messposition 3 Luzern

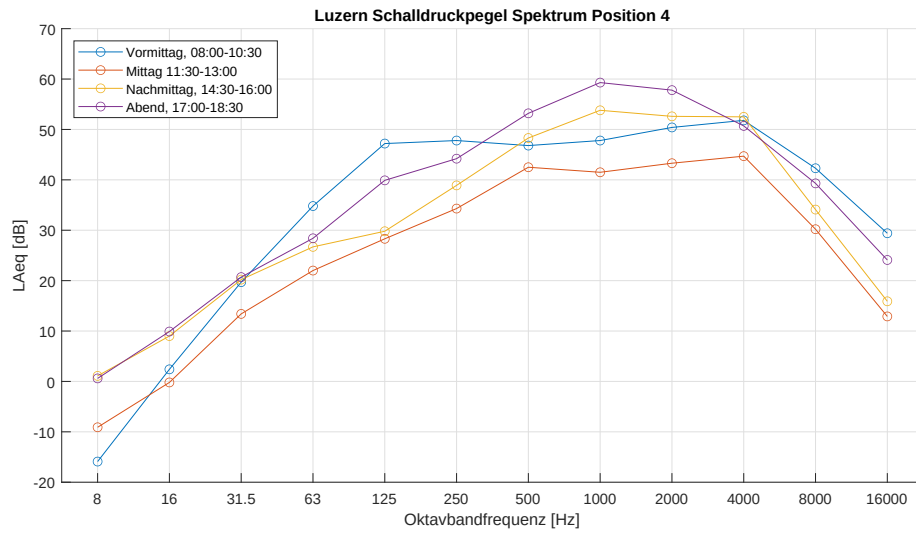


Abbildung 130: LA_{eq} Spektrum Messposition 4 Luzern

Bern Positionen 2-4:

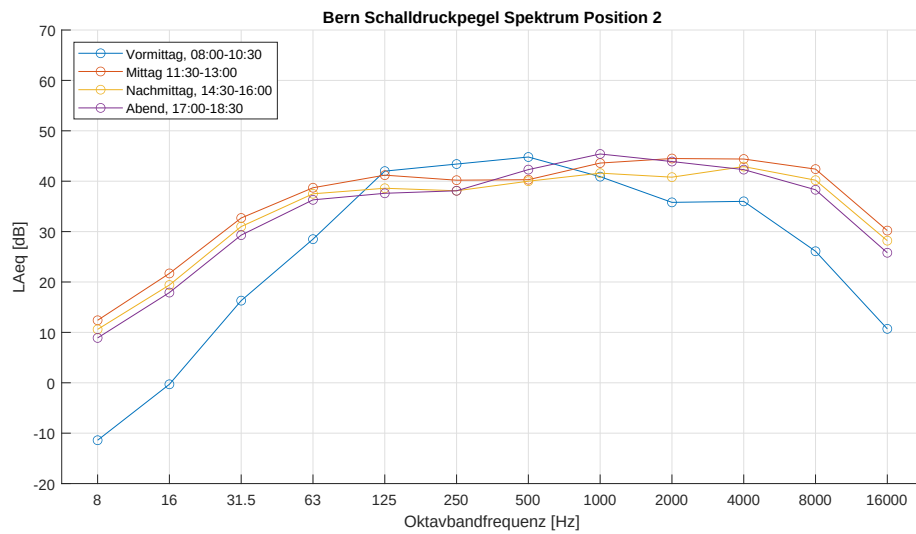


Abbildung 131: LA_{eq} Spektrum Messposition 2 Bern

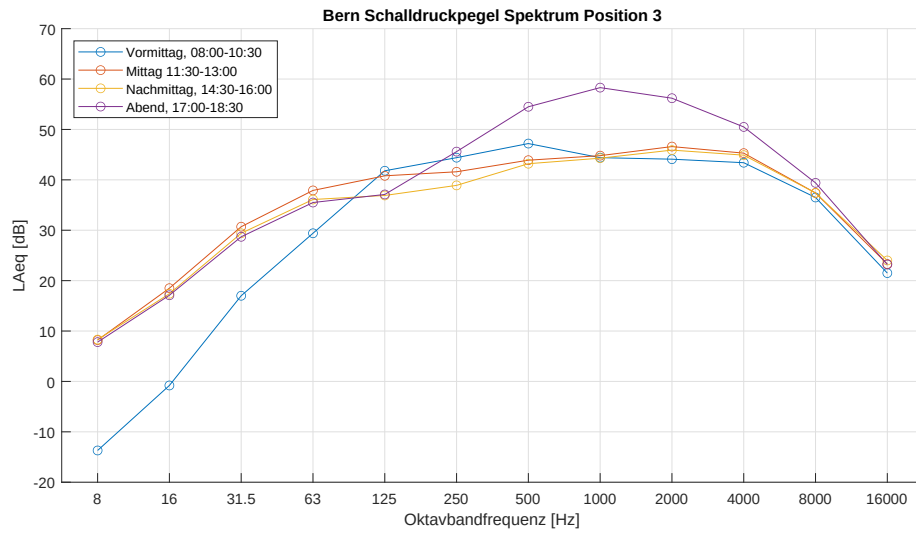


Abbildung 132: LA_{eq} Spektrum Messposition 3 Bern

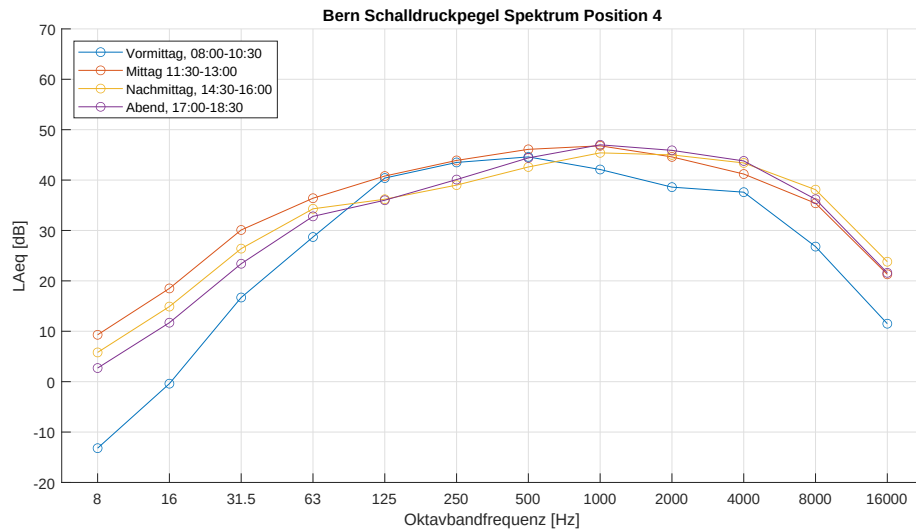


Abbildung 133: LA_{eq} Spektrum Messposition 4 Bern

HONEST

B.7 Resultate der KI-basierten Klangraum-Klassifizierung

Standorte der Audio-Aufnahmen

Tabelle 60: Adressen Standorte für Audio-Aufnahmen

Adresse	PLZ	Ort
Brünigweg	6048	Horw
Bifangweg	6048	Horw
Spiertunnel	6048	Horw
Seestrasse	6048	Horw
Im Sand	6048	Horw
Villa Krämerstein	6048	Horw
Mattenhof	6010	Kriens
Nidfeldstrasse	6010	Kriens
Langsägestrasse	6010	Kriens
Eichwald	6005	Luzern
Wilhelmshöhe	6003	Luzern
Militärstrasse	6003	Luzern
Säliststrasse	6005	Luzern
Obergundstrasse	6005	Luzern
Geissensteinring	6005	Luzern
Ufschötti	6005	Luzern
Urnerhofweg	6005	Luzern
Kasernenplatz	6003	Luzern
Libellenrain	6030	Ebikon
Seehof	6030	Ebikon
Rotseeweg	6030	Ebikon

Einzellabel Auswertung

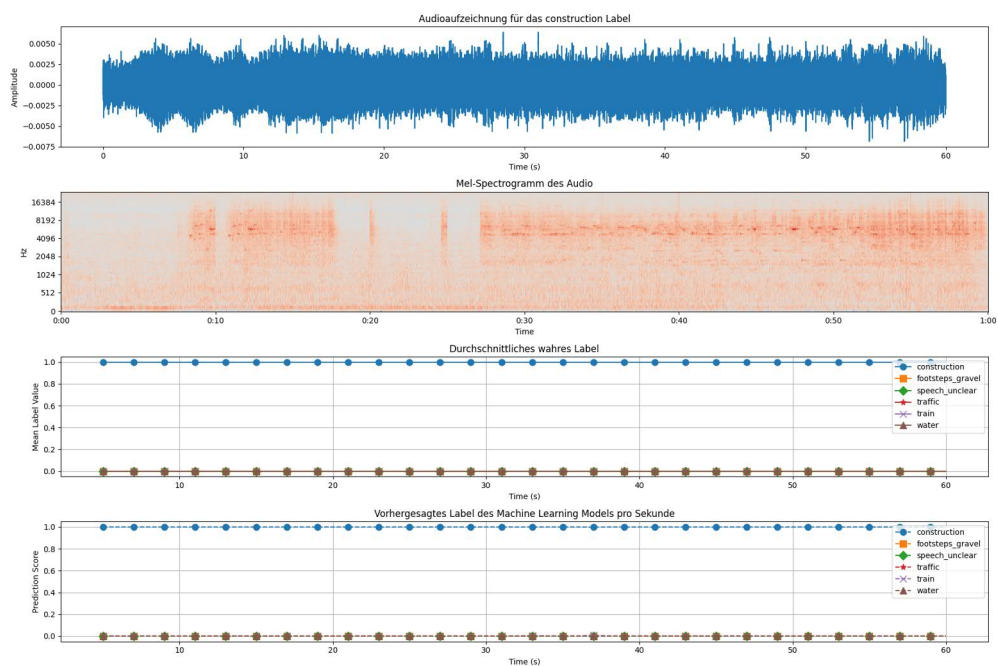


Abbildung 134: Überprüfung des Labels *construction*

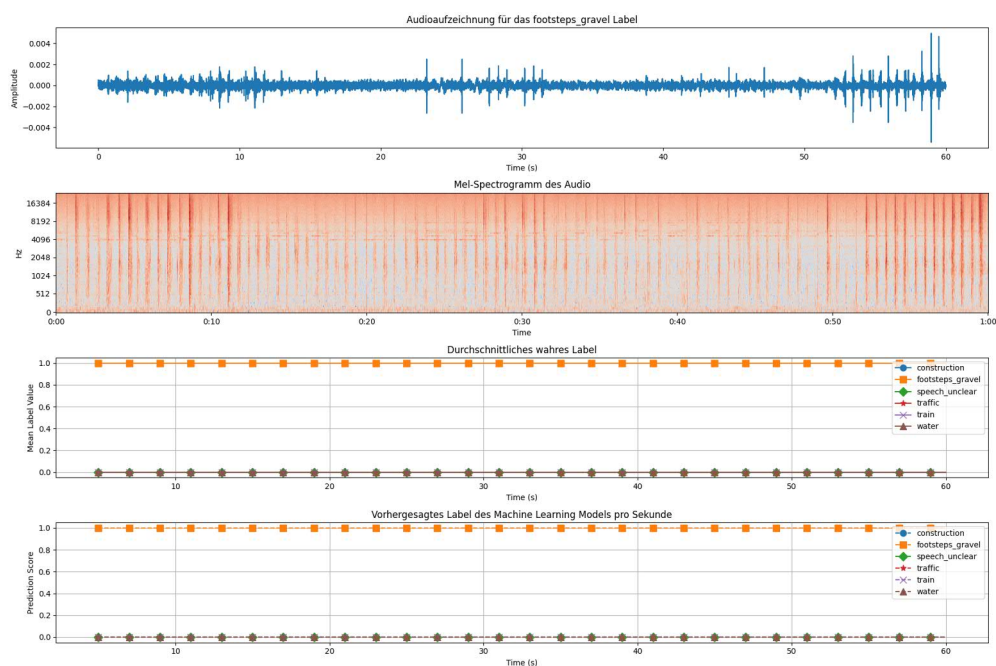


Abbildung 135: Überprüfung des Labels *footsteps_gravel*

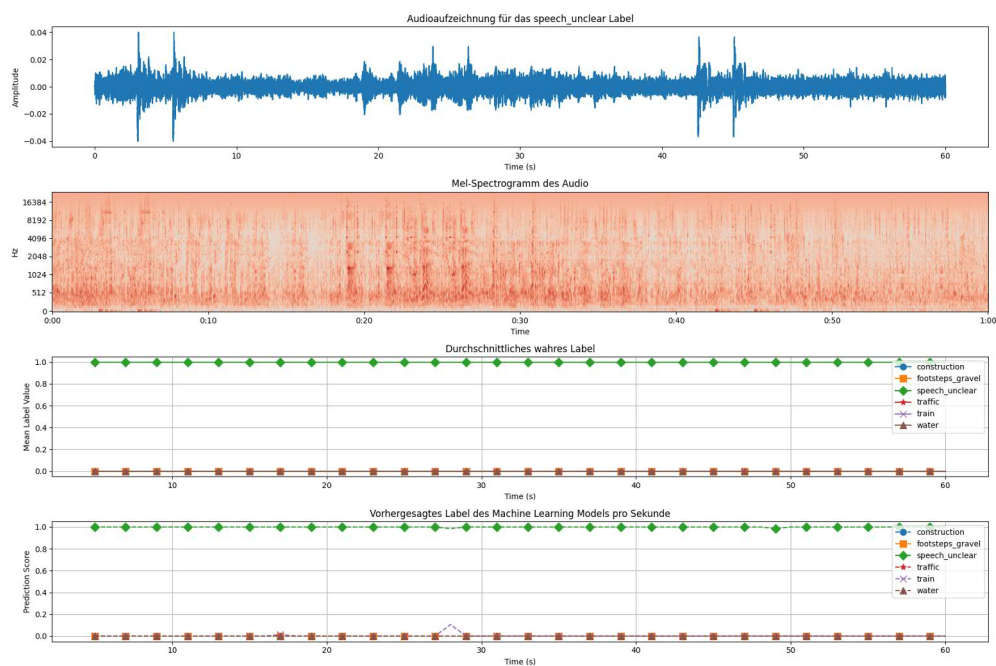


Abbildung 136: Überprüfung des Labels *speech_unclear*

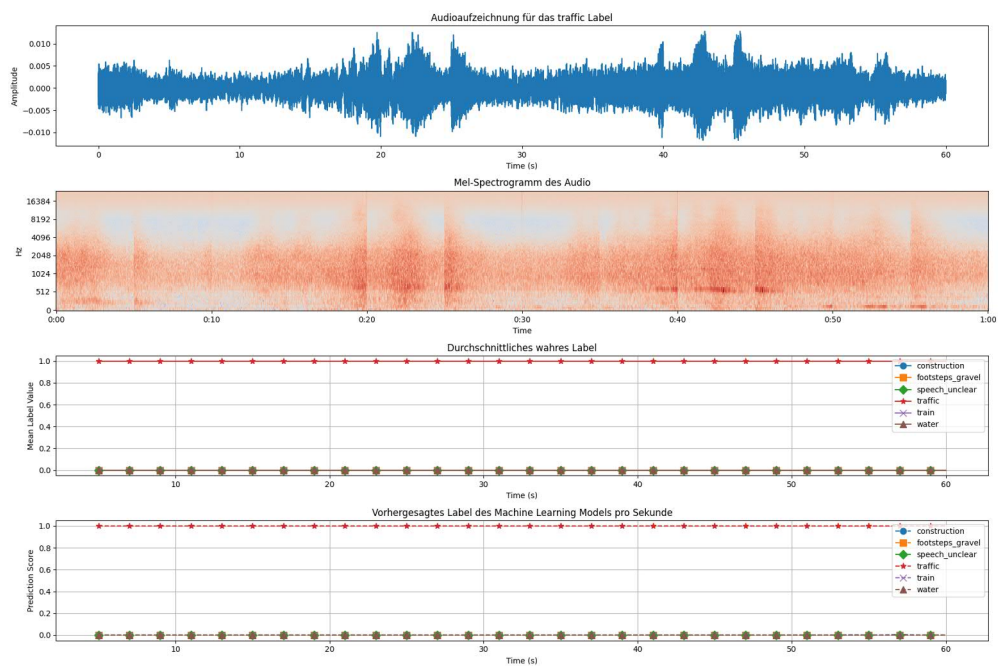


Abbildung 137: Überprüfung des Labels *traffic*

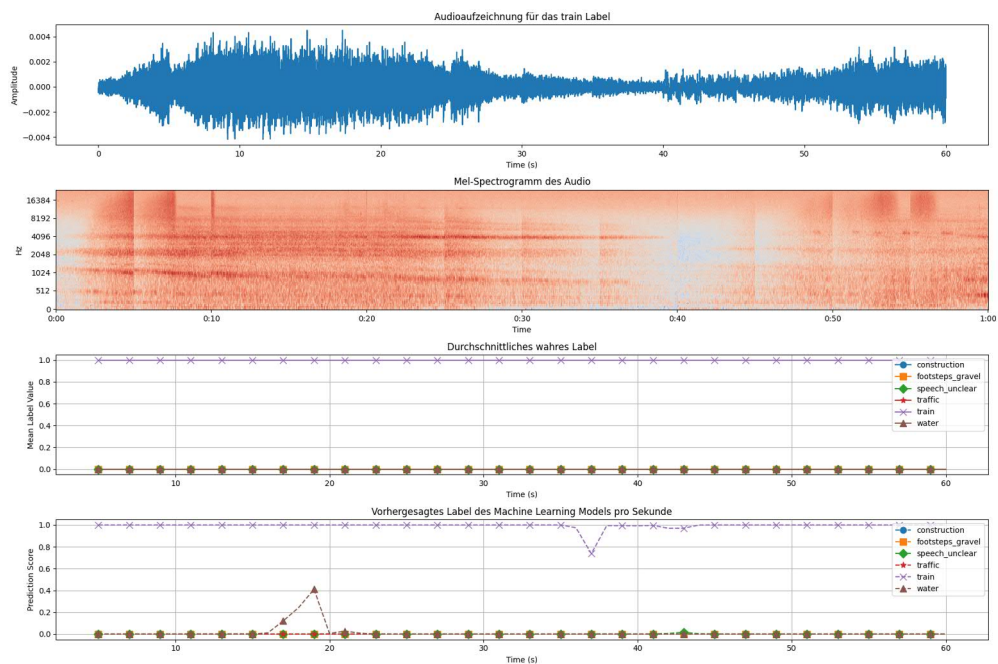


Abbildung 138: Überprüfung des Labels *train*

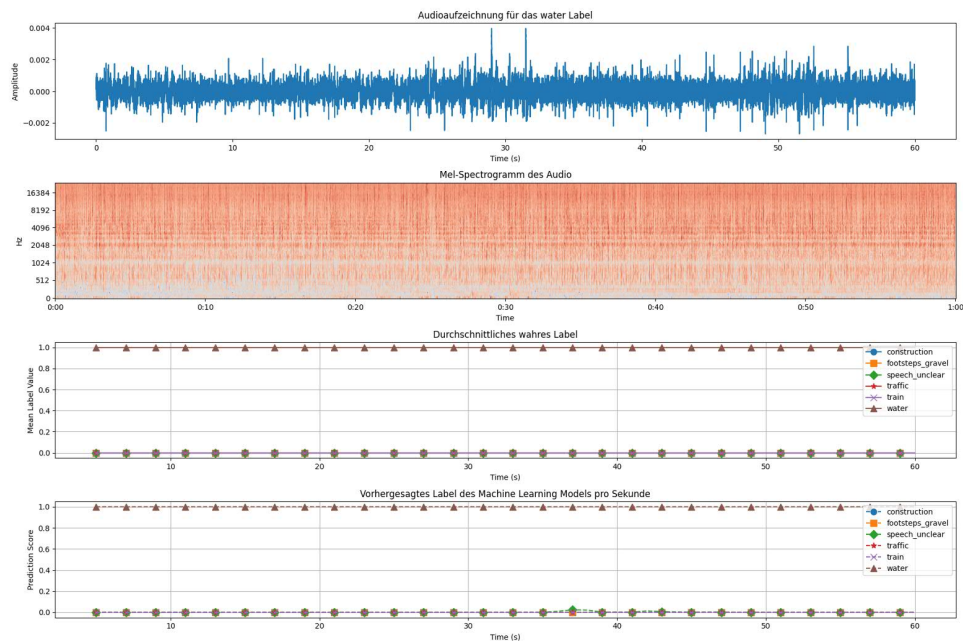


Abbildung 139: Überprüfung des Labels *water*

Multilabel Auswertung: 2 Label

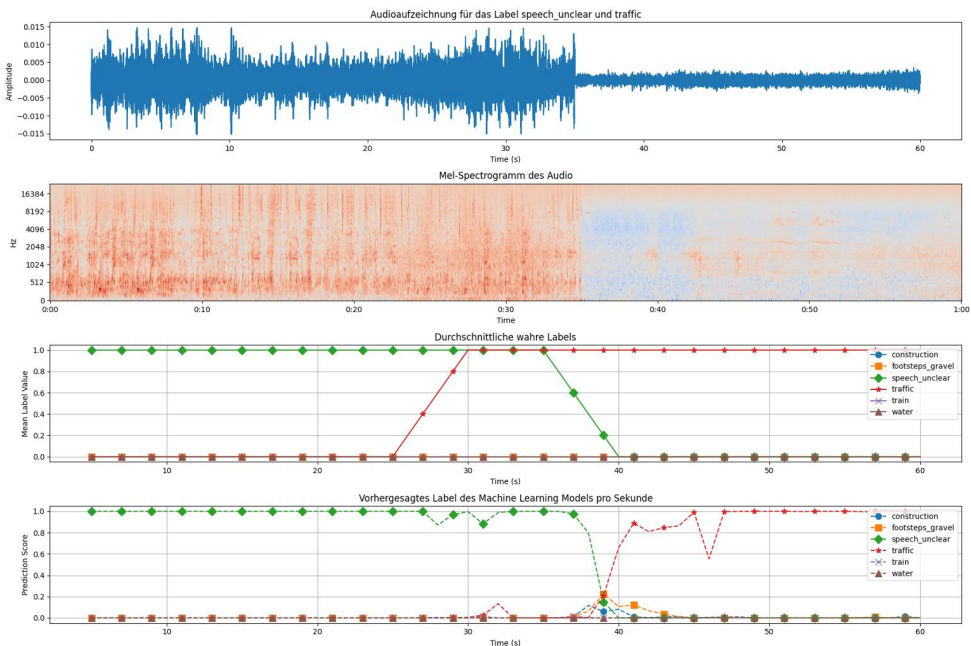


Abbildung 140: Überprüfung des Mischsignals mit den Labels *speech_unclear* und *traffic*

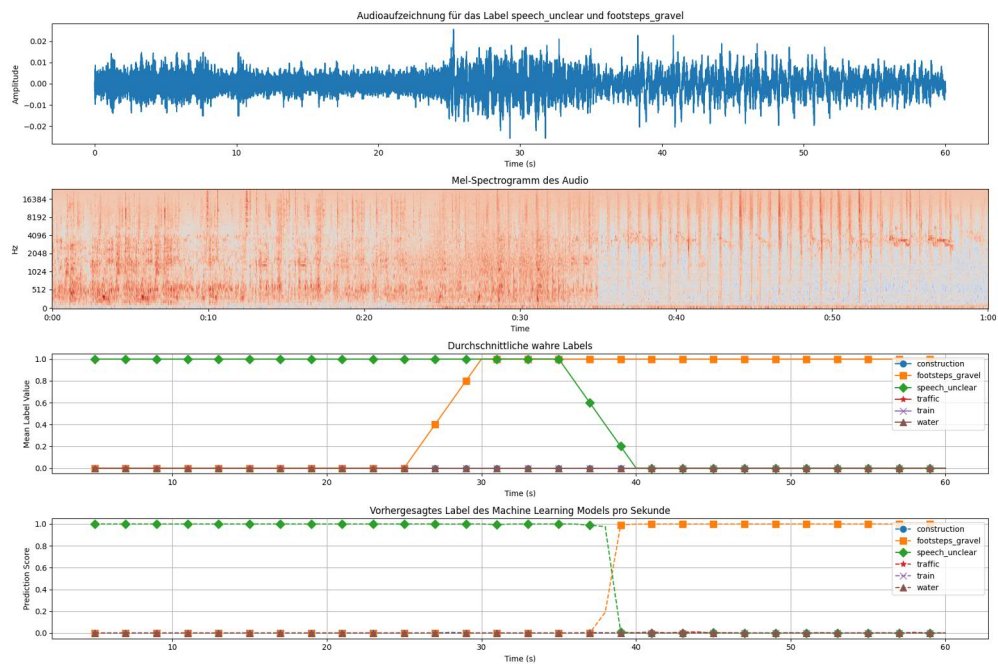


Abbildung 141: Überprüfung des Mischsignals mit den Labels *speech_unclear* und *footsteps_gravel*

Multilabel Auswertung: 6 Label

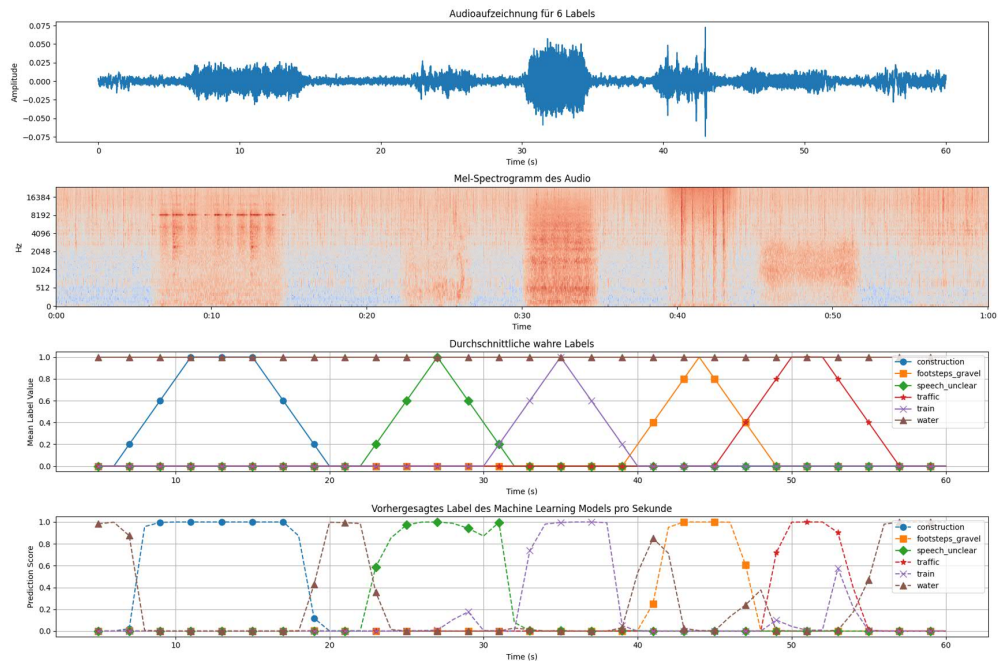


Abbildung 142: Überprüfung des Mischsignals mit 6 Labels und Wasser als konstantem Hintergrundsignal

ROC-Kurve

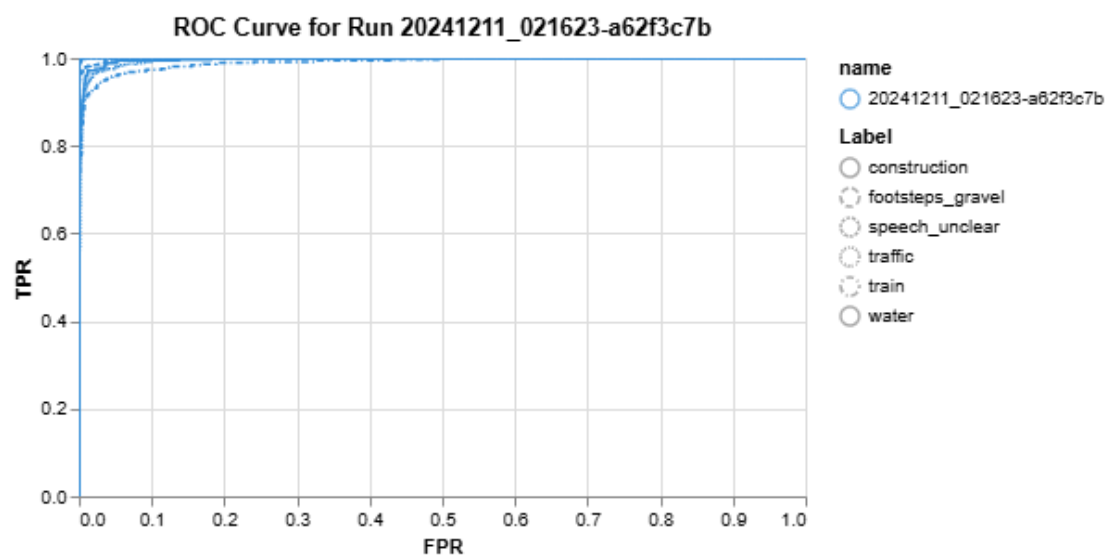


Abbildung 143: ROC-Kurve des besten KI-Modells