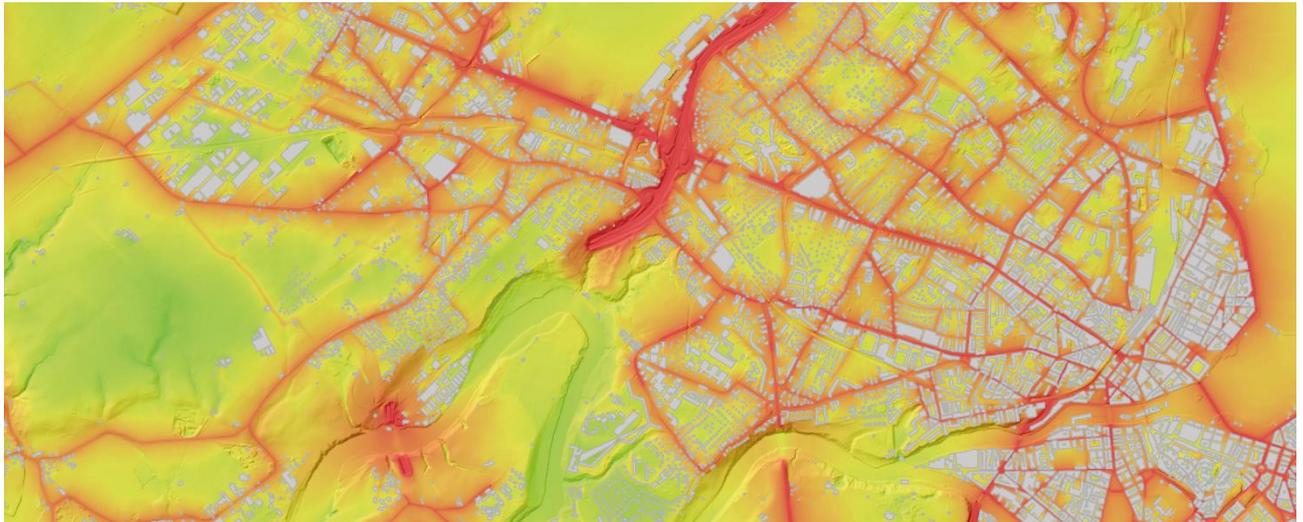


Vergleich Reflexionsordnung ISO9613-2

ANALYSEN ZUM EINFLUSS AUF DIE GENAUIGKEIT UND DIE RECHENZEIT



Empfänger **Stadt Zürich**
Umwelt- und Gesundheitsschutz
Fachbereich Lärmschutz
Stefanie Rüttener-Ott
Walchestrasse 31, Postfach 3251
8021 Zürich

Kontakt **n-Sphere AG**
Micha Köpfl
Räffelstrasse 29
CH-8045 Zürich
Telefon +41 44 454 30 10
www.n-sphere.ch

Version 1.1

Stand 05. November 2021

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Auftrag	3
3	Grundlagendaten und Methodik	3
	3.1 Rechengebiet.....	4
	3.2 Berechnungseinstellungen	4
	3.3 Methodik	4
4	Ergebnisse	5
	4.1 Lauteste Punkte.....	6
	4.1.1 Tag.....	6
	4.1.2 Nacht.....	8
	4.2 Leiseste Punkte.....	10
	4.2.1 Tag.....	10
	4.2.2 Nacht.....	12
	4.3 Einfluss nach Stockwerk	13
	4.4 Einfluss auf ein Bauprojekt in der ersten Baureihe im Baubewilligungsverfahren.....	13
	4.5 Rechenzeiten	15
5	Mögliche Optimierungsstrategien	17
6	Fazit	17

1 Einleitung

Im Rahmen der Einführung des neuen Strassenlärmrechnungsmodells sonROAD18 und der damit verbundenen Umstellung auf das Schallausbreitungsmodell ISO9613-2 möchte der Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) den Einfluss unterschiedlicher Reflexionsordnungen auf die Resultate der Lärmrechnungen prüfen.

Dazu sollen für ein repräsentatives Teilgebiet der Stadt Zürich Lärmrechnungen mit dem Emissionsmodell sonROAD18 und dem Ausbreitungsmodell ISO9613-2 mit unterschiedlichen Reflexionsordnungen durchgeführt werden.

Untersucht wird der Einfluss der Reflexionsordnung auf die Resultate, mit besonderem Augenmerk auf Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte, und auf die Rechenzeit. Zudem soll eine erste Abschätzung der Rechenzeit unter Anwendung möglicher Optimierungsstrategien durchgeführt werden.

2 Auftrag

Im Rahmen dieses Projektes werden folgende Arbeiten ausgeführt:

1. Erstellung von CadnaA-Templates für Berechnungen nach ISO9613-2 anhand der empfohlenen Settings gemäss «Untersuchung Beschleunigung von CadnaA-Berechnungen für grossflächige Projekte» durch Norsonic Brechbühl
2. Bestimmung repräsentatives Rechengebiet
3. Vorbereitung Datenbanken
4. Reduktion der Anzahl Empfangspunkte
5. Testberechnungen mit den Reflexionsordnungen 0, 1, 2, 3
6. Erstellung kurzer Bericht mit:
 - Informationen zu verwendeten Grundlagendaten
 - Beschreibung Vorgehen bei Berechnung
 - Vergleich der Resultate
 - Beschreibung möglicher Optimierungsstrategien und grobe Schätzung zu möglichen Rechenzeiten

3 Grundlagendaten und Methodik

Details zu den verwendeten Inputdaten und zur Datenaufbereitung sind dem Bericht «Testszenario III - Durchführung & Resultate - v1.7.docx» 1 zu entnehmen. Zusätzlich wurden die Bodenbedeckungsdaten, welche die n-Sphere AG für sonX aufbereitet hat, verwendet².

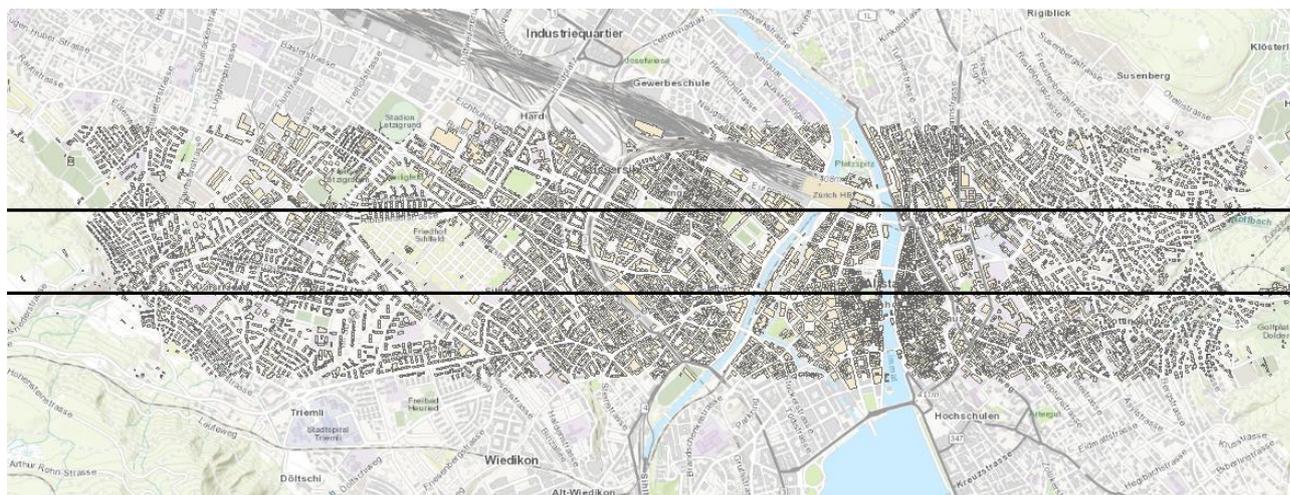
¹ Manuel Habermacher, «sonROAD18 - Testszenario III: Vergleich mit StL86+ anhand Stadtmodell, Durchführung & Resultate», V 1.7, 13.05.2020

² Christoph Zellmann, «Grundlagendaten für sonX» V 1.1., 10.12.2019

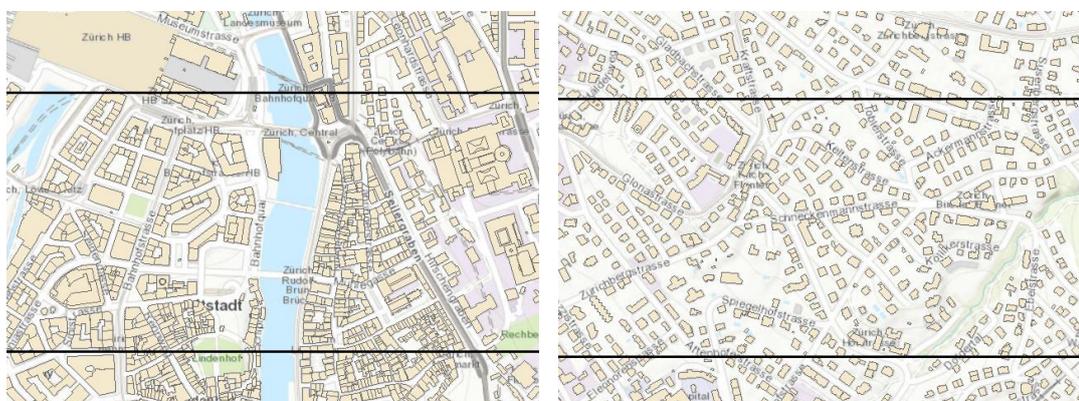
3.1 Rechengebiet

Als repräsentatives Teilgebiet wurde ein 11 km breiter Streifen mit 0.5 km Höhe gewählt, der quer durch die Stadt Zürich verläuft. Folgende Eckpunkt-Koordinaten definieren das Rechengebiet (CH1903+ LV95):

- Eckpunkt unten links: 2'677'000, 1'247'500
- Eckpunkt oben rechts: 2'688'000, 1'248'000



Im gewählten Rechengebiet sind Zonen mit unterschiedlicher Bebauungsdichte eingeschlossen, wie z.B. die Altstadt (Abbildung links) und ein Wohngebiet am Hang um Kirche Fluntern (Abbildung rechts).



3.2 Berechnungseinstellungen

Die Ausbreitungsberechnung wurde über die integrierte Schnittstelle nach CadnaA exportiert und dort durchgeführt. Folgende Einstellungen wurde für die Reflexionsordnungen von 0 bis 3 konsistent verwendet:

- Max. Suchradius [m]: 500
- Max. Reflexions-Distanz [m] 500
- Distanz Quelle/Empf. zu Reflektor [m]: 100

3.3 Methodik

Für die Vergleiche der Reflexionsordnung wurden vier Varianten der Ausbreitungsberechnung mit Reflexionen 0. Ordnung (entspricht einer Berechnung ohne Reflexionen) bis 3. Ordnung im gewählten Rechengebiet berechnet. Als Ausgangslage wurden identische sonROAD18 Emissionen sowie die gleichen Grundlagendaten verwendet.

Um die Rechenzeit zu reduzieren wurden anhand einer Berechnung mit 1. Reflexionsordnung aller Fassadenpunkte (FP) im Rechengebiet die jeweils leisesten und lautesten FP pro Stockwerk bestimmt. Alle anderen FP wurden entfernt und nur mit den jeweils leisesten und lautesten FP die weiteren Reflexionsordnungen berechnet. Hinter diesem Vorgehen steckt die Annahme, dass die lautesten und leisesten Orte am Gebäude durch Mehrfachreflexionen kaum verschieben. Als Ergebnis wurden die Beurteilungspegel LrT am Tag und LrN in der Nacht für Strassenlärm abgespeichert.

Die statistischen Auswertungen der Pegeldifferenzen erfolgten jeweils getrennt für die lautesten und leisesten FP. Hauptsächlich wurden folgende Szenarien verglichen:

- 1. Ordnung – 0. Ordnung
- 2. Ordnung – 1. Ordnung
- 3. Ordnung – 2. Ordnung
- 3. Ordnung – 1. Ordnung

Zusätzlich wurden die Stockwerke und Gebäude entsprechend der lautesten Lärmpegel in Lärmgrenzwerte klassiert. Auf diese Weise wurde der Anstieg an Stockwerken und Gebäuden mit Überschreitung des Immissionsgrenzwerts (IGW) ausgewertet. Je nach Auswertebene (Stockwerk oder Gebäude), unterscheidet sich die Zuordnung der Empfindlichkeitsstufe. Die Empfindlichkeitsstufe für Gebäude wurde anhand der flächenmässig grösseren Zone gewählt. Für Fassadenpunkte wird unabhängig vom zugehörigen Gebäude die zugrundeliegende Bauzone gewählt. Bei Gebäuden an Bauzonengrenzen können einzelne Fassadenpunkte daher eine andere Empfindlichkeitsstufe aufweisen als das Gebäude. Diese Unschärfe ist jedoch klein und betrifft nur wenige Gebäude bzw. lauteste/leiseste FP.

Der Fokus bei der Auswertung nach IGW-Überschreitungen lag auf «1. Ordnung – 0. Ordnung», der vom Leitfaden Strassenlärm vorgeschriebenen Reflexionsordnung, sowie «3. Ordnung – 1. Ordnung» als möglichen neuen Ansatz für Mehrfachreflexionen in städtischen Gebieten.

4 Ergebnisse

Die jeweils ausgewählten leisesten und lautesten FP pro Stockwerk sind in der Abbildung dargestellt. Die leisesten Punkte (blau) liegen häufig an der zur Strasse abgewandten Seite und die lautesten (lila) zur Strasse hin. Die Ergebnisse sind aufgeteilt nach lautesten und leisesten Fassadenpunkten sowie dem Beurteilungspegel LrT am Tag und LrN in der Nacht für Strassenlärm.

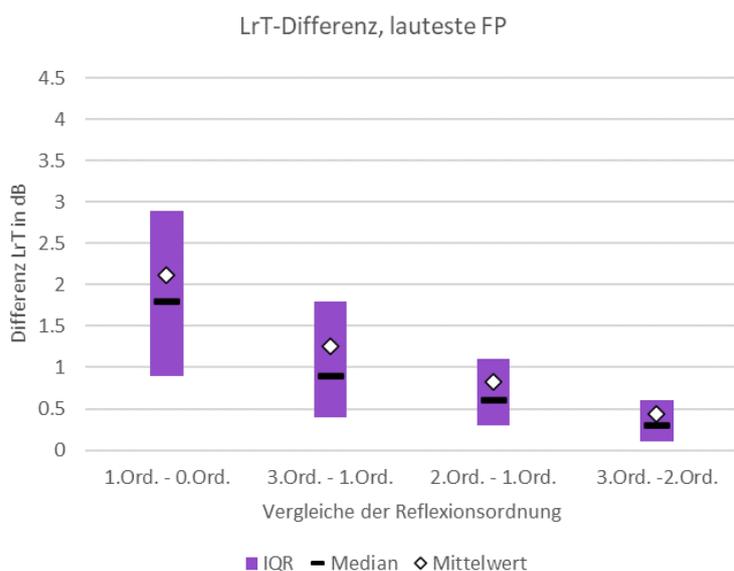


4.1 Lauteste Punkte

4.1.1 Tag

Der Mittelwert der Differenzen im LrT aller lautesten FP sinkt mit jeder zusätzlichen Ordnung von 2.1 dB (± 1.7 dB) zwischen 0. und 1. Ordnung bis zu 0.4 dB (± 0.5 dB) zwischen 2. und 3. Ordnung. Auch der Interquartilsabstand (IQR) verkleinert sich im dargestellten Box-Whisker Plot sichtbar (siehe auch Tabelle 1). Der zusätzliche Gewinn an Genauigkeit sinkt daher mit jeder Ordnung.

Mit einem Wechsel von 1. Ordnung zu 3. Ordnung wäre die mittlere Differenz mit 1.3 dB (± 1.2 dB) deutlich kleiner als die zwischen 0. und 1. Ordnung.



Das Histogramm zeigt auf, dass die Häufigkeit kleiner Differenzen ebenfalls stark zunimmt mit jedem Schritt zu einer höheren Reflexionsordnung.

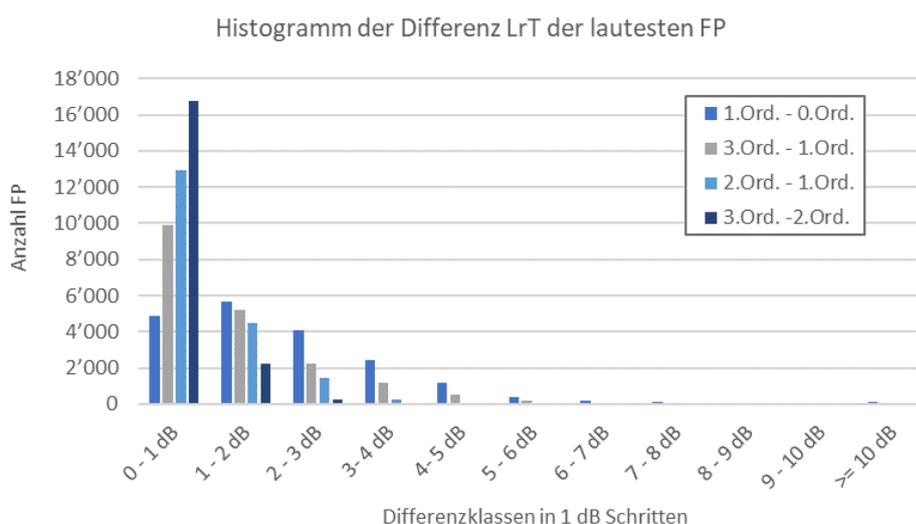


Tabelle 1 Pegeldifferenz LrT der lautesten Fassadenpunkte, Werte in dB

Vergleich	\sum FP	Mittelwert	\pm StdDev	Min	1. Quartil	Median	3. Quartil	Max
1.Ord. - 0.Ord.	19222	2.1	1.7	0.0	0.9	1.8	2.9	15.2
3.Ord. - 1.Ord.	19222	1.3	1.2	0.0	0.4	0.9	1.8	12.6
2.Ord. - 1.Ord.	19208	0.8	0.8	0.0	0.3	0.6	1.1	10.7
3.Ord. - 2.Ord.	19208	0.4	0.5	0.0	0.1	0.3	0.6	8.6

Bei Unterteilung der Fassadenpunkte nach Grenzwertklasse wird allerdings deutlich, dass die Änderungen bei Lärmpegeln über den IGW deutlich kleiner sind (Tabelle 2). So betragen die Differenzen (für $IGW < x < AW$) zwischen 0. und 1. Ordnung nur 0.6 dB (± 0.5 dB) und zwischen 1. und 3. Ordnung 0.2 dB (± 0.2 dB). Bei der Auswertung wurden jeweils die Grenzwertbeurteilung der höheren Ordnung verwendet.

Tabelle 2 Pegeldifferenz LrT der lautesten Fassadenpunkte nach Grenzwertklasse über IGW, Werte in dB

Vergleich	Grenzwertklasse	\sum FP	Mittelwert	\pm StdDev	Min	Max
1.Ord. - 0.Ord.	$IGW < x < AW$	1313	0.6	0.4	0.0	2.9
3.Ord. - 1.Ord.	$AW \leq x$	1	0.2	-	0.2	0.2
3.Ord. - 1.Ord.	$IGW < x < AW$	1459	0.2	0.2	0.0	1.0

Jedoch führen die geringen Differenzen bereits zu einem klaren Anstieg der FP mit IGW-Überschreitung. Zwischen 0. und 1. Ordnung steigt die Anzahl an FP (Stockwerke) mit IGW-Überschreitung um +28%, zwischen 1. und 3. Ordnung steigt sie nochmals um +11% an. Tabelle 3 beinhaltet die Zahlenwerte inklusive Unterteilung nach Empfindlichkeitsstufe.

Tabelle 3 Anzahl lautester FP mit IGW-Überschreitung tags und Zuwachs durch höhere Ordnung

Anzahl FP	LrT 1.Ord. - 0.Ord.			LrT 3.Ord. - 1.Ord.		
	Bisher	Neu	Anstieg	Bisher	Neu	Anstieg
2 - ES 2	792	164	21%	956	60	6%
3 - ES 3	232	125	54%	357	87	24%
Total	1024	289	28%	1313	147	11%

Eine zusätzliche Auswertung auf Gebäudeebene ergab, dass es bei Verwendung der 1. Ordnung insgesamt 77 neue Gebäude mit IGW-Überschreitungen gab (+23%). Bei der Berechnung mit 3. Ordnung gab es im Vergleich zur 1. Ordnung insgesamt 23 neue Gebäude mit IGW-Überschreitungen (+5.6%). Die kleineren relativen Zunahmen im Vergleich zur Auswertung der FP erklären sich damit, dass viele Stockwerke bei Berechnung mit der jeweils niedrigeren Ordnung in Gebäuden mit IGW-Überschreitung eines anderen Stockwerks liegen.

Tabelle 4 beinhaltet die Anzahl zusätzlicher Bewohner der neu von IGW-Überschreitung betroffener Stockwerke. Die Anzahl Bewohner mit IGW-Überschreitung steigt mit +28% (0. zu 1. Ordnung) und +12% ähnlich stark an (1. zu 3. Ordnung).

Tabelle 4 Anzahl Bewohner der lautesten FP mit IGW-Überschreitung tags und Zuwachs durch höhere Ordnung

Bewohner	LrT 1.Ord. - 0.Ord.			LrT 3.Ord. - 1.Ord.		
	Bisher	Neu	Anstieg	Bisher	Neu	Anstieg
2 - ES 2	1691	362	21%	2053	145	7%
3 - ES 3	347	203	58%	549	175	32%
Total	2037	565	28%	2602	320	12%

4.1.2 Nacht

Der Mittelwert der Differenzen im LrN aller lautesten FP sinkt mit jeder zusätzlichen Ordnung von 2.2 dB (± 1.7 dB) zwischen 0. und 1. Ordnung bis zu 0.5 dB (± 0.5 dB) zwischen 2. und 3. Ordnung. Die Ergebnisse von Tabelle 5 und den Grafiken sind sehr ähnlich zum Tag und werden daher nicht genauer diskutiert.

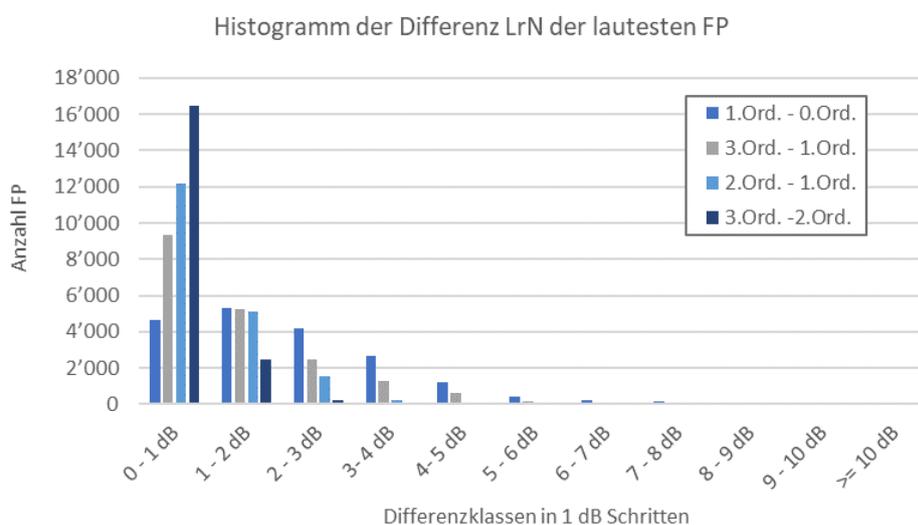
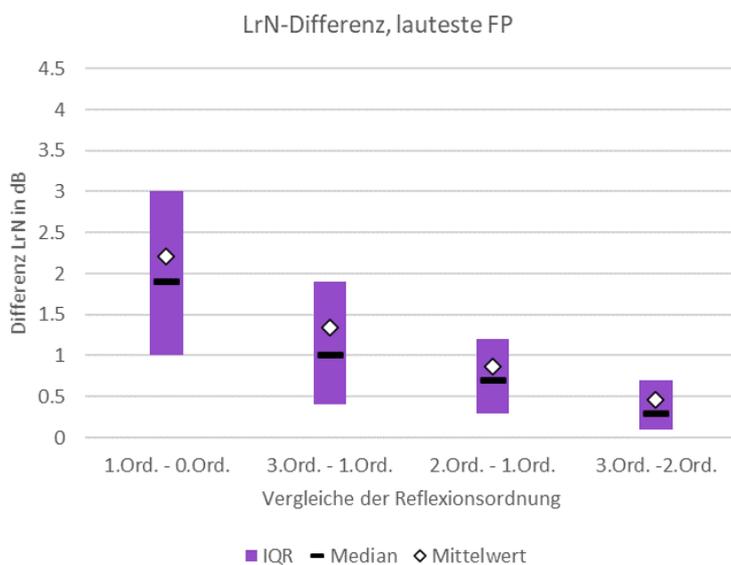


Tabelle 5 Pegeldifferenz LrN der lautesten Fassadenpunkte, Werte in dB

Vergleich	∑ FP	Mittelwert	± StdDev	Min	1. Quartil	Median	3. Quartil	Max
1.Ord. - 0.Ord.	19215	2.2	1.7	0.0	1.0	1.9	3.0	15.4
3.Ord. - 1.Ord.	19215	1.3	1.2	0.0	0.4	1.0	1.9	12.8
2.Ord. - 1.Ord.	19201	0.9	0.8	0.0	0.3	0.7	1.2	10.9
3.Ord. - 2.Ord.	19201	0.5	0.5	0.0	0.1	0.3	0.7	8.7

Bei Unterteilung der Fassadenpunkte nach Grenzwertklasse wird allerdings deutlich, dass die Änderungen bei Lärmpegeln über den IGW deutlich kleiner sind (Tabelle 6). So betragen die Differenzen (für $IGW < x < AW$) zwischen 0. und 1. Ordnung nur 0.8 dB (± 0.6 dB) und zwischen 1. und 3. Ordnung 0.4 dB (± 0.3 dB). Bei der Auswertung wurden jeweils die Grenzwertbeurteilung der höheren Ordnung verwendet.

Tabelle 6 Pegeldifferenz LrN der lautesten Fassadenpunkte nach Grenzwertklasse über IGW, Werte in dB

Vergleich	Grenzwertklasse	∑ FP	Mittelwert	± StdDev	Min	Max
1.Ord. - 0.Ord.	$AW \leq x$	3	0.6	0.1	0.5	0.7
1.Ord. - 0.Ord.	$IGW < x < AW$	3254	0.8	0.6	0.0	4.2
3.Ord. - 1.Ord.	$AW \leq x$	8	0.3	0.1	0.2	0.4
3.Ord. - 1.Ord.	$IGW < x < AW$	3430	0.4	0.3	0.0	2.4

In der Nacht führen die geringen Differenzen zu einem weniger klaren Anstieg der FP mit IGW-Überschreitung als am Tag. Zwischen 0. und 1. Ordnung steigt die Anzahl an FP (Stockwerke) mit IGW-Überschreitung um +16%, zwischen 1. und 3. Ordnung steigt sie nur noch um +6% an. Tabelle 7 beinhaltet die Zahlenwerte inklusive Unterteilung nach Empfindlichkeitsstufe.

Tabelle 7 Anzahl lautester FP mit IGW-Überschreitung nachts und Zuwachs durch höhere Ordnung

Anzahl FP	LrT 1.Ord. - 0.Ord.			LrT 3.Ord. - 1.Ord.		
	Bisher	Neu	Anstieg	Bisher	Neu	Anstieg
2 - ES 2	1070	157	15%	1227	92	7%
3 - ES 3	1736	294	17%	2030	89	4%
Total	2806	451	16%	3257	181	6%

Eine zusätzliche Auswertung auf Gebäudeebene ergab, dass es bei Verwendung der 1. Ordnung insgesamt 36 neue Gebäude mit IGW-Überschreitungen gab (+5.9%). Bei der Berechnung mit 3. Ordnung gab es im Vergleich zur 1. Ordnung insgesamt 22 neue Gebäude mit IGW-Überschreitungen (+3.4%). Die kleineren relativen Zunahmen erklären sich damit, dass viele Stockwerke bei Berechnung mit der jeweils niedrigeren Ordnung in Gebäuden mit IGW-Überschreitung eines anderen Stockwerks liegen.

Tabelle 8 beinhaltet die Anzahl zusätzlicher Bewohner der neu von IGW-Überschreitung betroffener Stockwerke. Die Anzahl Bewohner mit IGW-Überschreitung steigt mit +18% (0. zu 1. Ordnung) und +6% ähnlich stark an (1. zu 3. Ordnung).

Tabelle 8 Anzahl Bewohner der lautesten FP mit IGW-Überschreitung nachts und Zuwachs durch höhere Ordnung

Bewohner	LrT 1.Ord. - 0.Ord.			LrT 3.Ord. - 1.Ord.		
	Bisher	Neu	Anstieg	Bisher	Neu	Anstieg
2 - ES 2	2433	387	16%	2821	226	8%
3 - ES 3	3342	648	19%	3990	181	5%
Total	5776	1035	18%	6810	408	6%

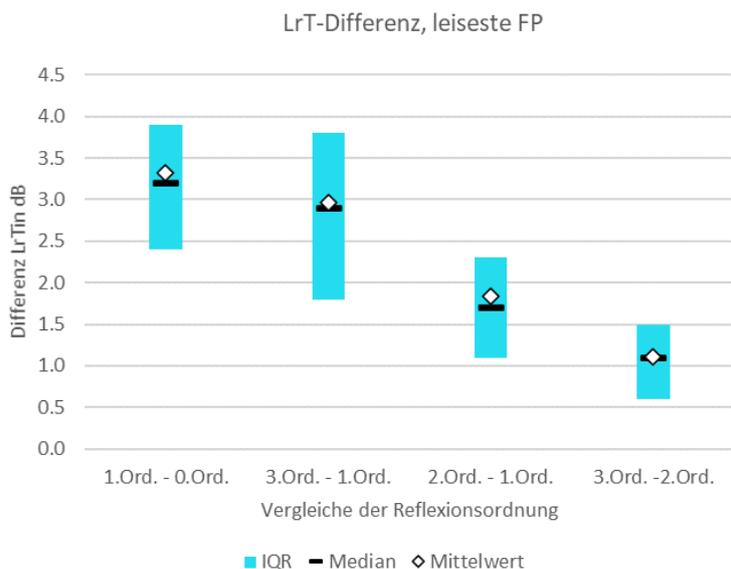
4.2 Leiseste Punkte

Bei den leisesten FP kam es nur selten zu IGW-Überschreitungen, weshalb diese nicht wie in Kapitel 4.1 nach Grenzwertklasse ausgewertet wurden. Insgesamt waren mit der Berechnung nach 3. Reflexionsordnung am Tag nur 4 leiseste FP am Tag vom IGW überschritten und 43 leiseste FP in der Nacht. Die Differenzen zwischen 1. und 3. Reflexionsordnung waren bei diesen FP gering und betragen am Tag weniger als 0.2 dB und in der Nacht weniger als 1.3 dB.

Um signifikante Reflexionseinflüsse bei leisesten FP sichtbar zu machen, wurde zum Bericht zusätzlich ein Kartensatz erstellt. Dieser enthält auf den Karten 1 und 3 die leisesten FP über IGW-5 dB für den Tag und die Nacht. Auf den Karten 2 und 4 sind die leisesten FP unter IGW-5 dB für Tag und Nacht dargestellt, wobei FP mit einer Differenz zwischen 1. und 3. Reflexionsordnung unter 3 dB nicht dargestellt wurden. Die maximalen Differenzen zwischen 1. und 3. Reflexionsordnung betragen hier bis etwa 13 dB, welche jedoch nur bei FP mit sehr tiefen Lärmpegeln auftreten.

4.2.1 Tag

Der Mittelwert der Differenzen im LrT aller leisesten FP sinkt mit jeder zusätzlichen Ordnung von 3.3 dB (± 1.7 dB) zwischen 0. und 1. Ordnung bis zu 1.1 dB (± 0.7 dB) zwischen 2. und 3. Ordnung (Tabelle 9). Im Vergleich zu den lautesten FP sind die mittleren Differenzen dabei etwa um 1.2 dB bzw. 0.7 dB höher. Der zusätzliche Gewinn an Genauigkeit sinkt daher auch bei den leisesten Punkten mit jeder Ordnung. Allerdings ist die mittlere Differenz bei einem Wechsel von 1.Ordnung zu 3.Ordnung mit 3.0 dB (± 1.7 dB) ähnlich hoch wie zwischen 0. und 1. Ordnung.



Das Histogramm zeigt auf, dass die Häufigkeit kleiner Differenzen ebenfalls stark zunimmt mit jedem Schritt zu einer höheren Reflexionsordnung. Im Vergleich zu den lautesten FP treten erwartungsgemäss deutlich häufiger höhere Differenzen auf, da Mehrfachreflexionen an zur Quelle abgewandten FP einen grösseren Einfluss haben.

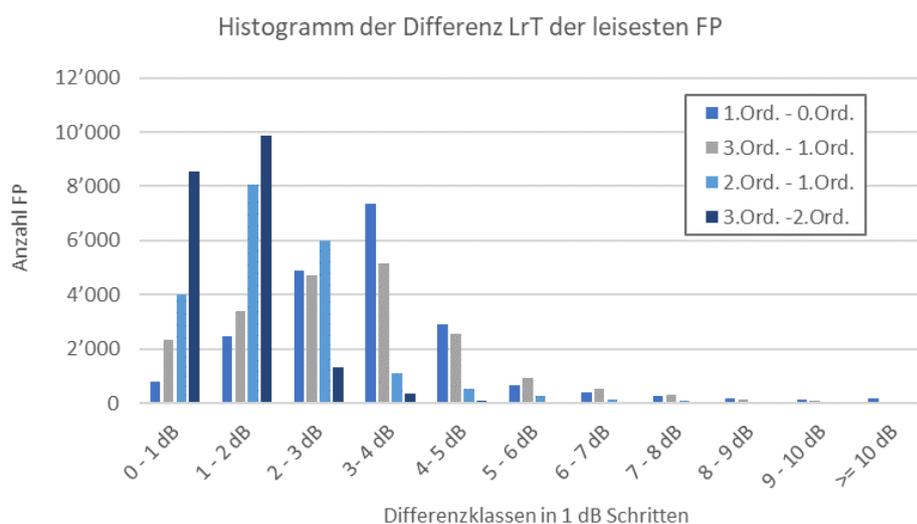


Tabelle 9 Pegeldifferenz LrT der leisesten Fassadenpunkte, Werte in dB

Vergleich	Σ FP	Mittelwert	\pm StdDev	Min	1. Quartil	Median	3. Quartil	Max
1.Ord. - 0.Ord.	20210	3.3	1.7	0.0	2.4	3.2	3.9	19.3
3.Ord. - 1.Ord.	20210	3.0	1.7	0.0	1.8	2.9	3.8	12.2
2.Ord. - 1.Ord.	20207	1.8	1.1	0.0	1.1	1.7	2.3	10.7
3.Ord. - 2.Ord.	20207	1.1	0.7	0.0	0.6	1.1	1.5	7.6

4.2.2 Nacht

Der Mittelwert der Differenzen im LrN aller leisesten FP sinkt mit jeder zusätzlichen Ordnung von 3.3 dB (± 1.7 dB) zwischen 0. und 1. Ordnung bis zu 1.1 dB (± 0.7 dB) zwischen 2. und 3. Ordnung. Die Ergebnisse von Tabelle 10 und den Grafiken sind sehr ähnlich zum Tag und werden daher nicht genauer diskutiert.

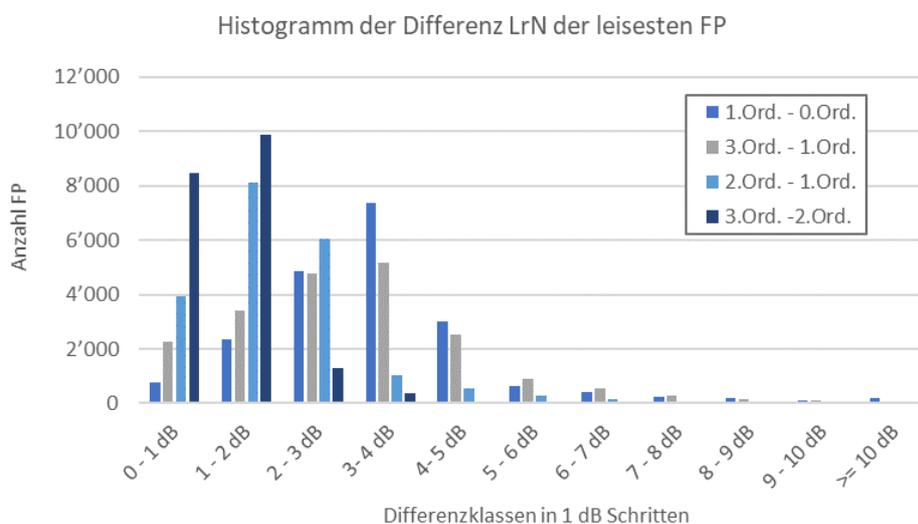
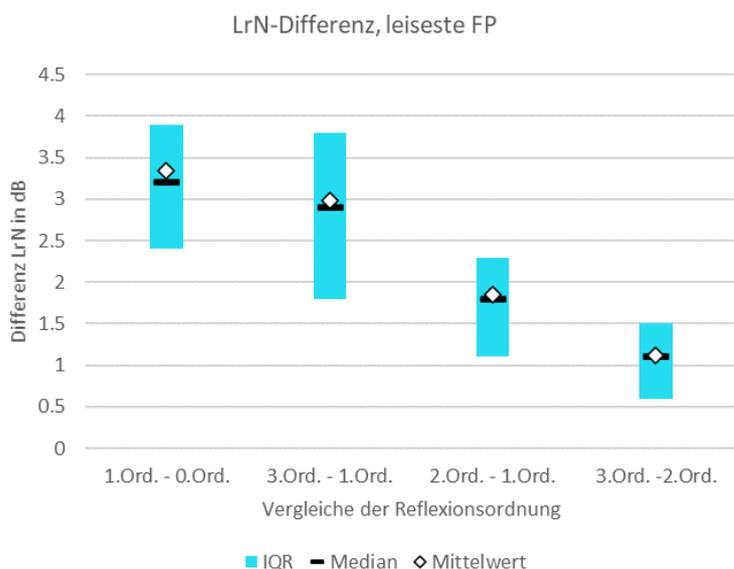


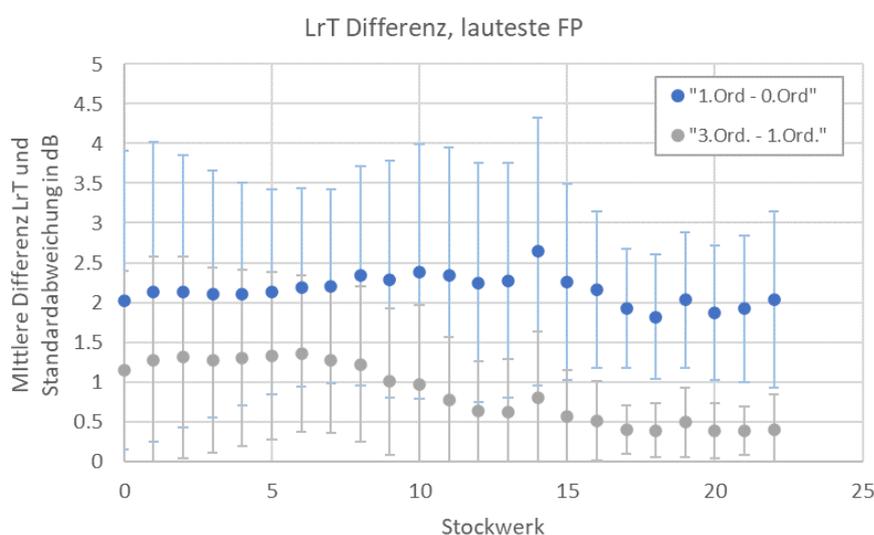
Tabelle 10 Pegeldifferenz LrN der leisesten Fassadenpunkte, Werte in dB

Vergleich	Σ FP	Mittelwert	\pm StdDev	Min	1. Quartil	Median	3. Quartil	Max
1.Ord. - 0.Ord.	20210	3.3	1.7	0.0	2.4	3.2	3.9	19.4
3.Ord. - 1.Ord.	20210	3.0	1.7	0.0	1.8	2.9	3.8	12.6
2.Ord. - 1.Ord.	20206	1.9	1.2	0.0	1.1	1.8	2.3	11.2
3.Ord. - 2.Ord.	20206	1.1	0.7	0.0	0.6	1.1	1.5	9.0

4.3 Einfluss nach Stockwerk

Der Einfluss des Stockwerks wurde exemplarisch für die lautesten FP des LrT in der folgenden Abbildung dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss des Stockwerks zwischen 0. und 1. Ordnung nicht besonders charakteristisch ist. Über alle Stockwerke hinweg scheint der Effekt der 1. Reflexion zu einem im mittel konstanten Pegelzuschlag zu führen. Einzig zwischen 8. Und 15. Stockwerk sind die mittleren Differenzen leicht höher.

Im Vergleich zwischen 1. und 3. Ordnung bleiben die mittleren Differenzen etwa bis zum 6. Stock konstant und fallen dann etwa linear bis zum 17. Stock ab. Dort bleiben die Differenzen dann wieder bis zum 22. Stock in etwa konstant. Die exemplarische Auswertung lässt vermuten, dass der Einfluss höherer Ordnungen einen grösseren Effekt auf tief liegende Stockwerke hat.

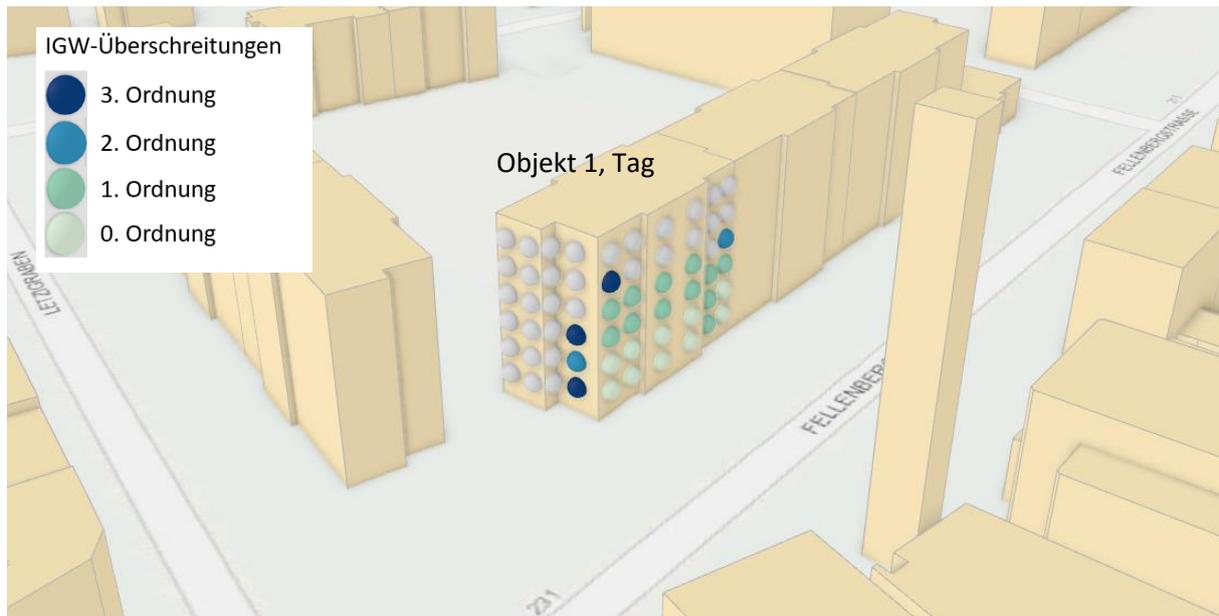


4.4 Einfluss auf ein Bauprojekt in der ersten Baureihe im Baubewilligungsverfahren

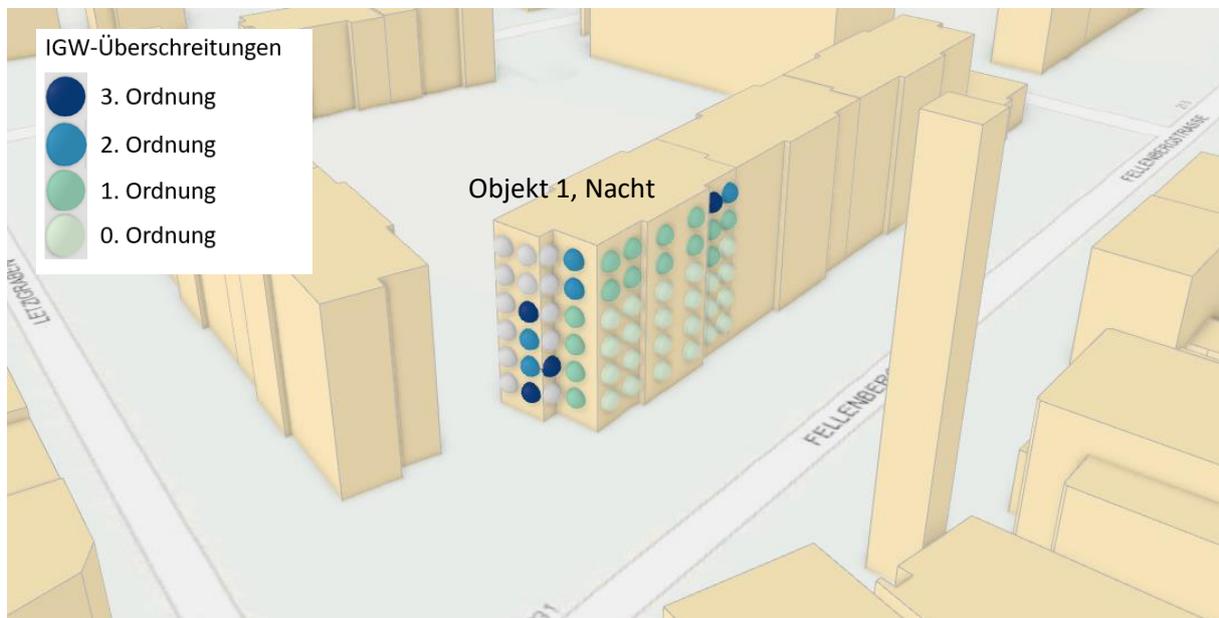
In diesem Abschnitt wurden für zwei ausgewählte Gebäude alle FP mit 0. Bis 3. Reflexionsordnung gerechnet und dargestellt. Ziel ist es, den Einfluss der Reflexionsordnung auf ein Bauprojekt in der ersten Baureihe im Baubewilligungsverfahren aufzeigen zu können. Von besonderem Interesse ist hierbei die Seitenfassade, welche also Lärmpegel zwischen leisesten FP (Rückseite des Gebäudes) und lautesten FP (Vorderseite des Gebäudes) aufweisen.

Objekt 1: Fellenbergstr. 228 (ES II, 17 Bewohner)

Am Tag sind die unteren vier Etagen an der Vorderseite des Gebäudes bei Berücksichtigung der 1. Reflexionsordnung überschritten. An der Seitenfassade kommt es bei Berücksichtigung der 2. Reflexionsordnung zu einer Überschreitung beim ersten Stockwerk und bei 3. Reflexionsordnung zu zwei weiteren Überschreitungen an Stockwerk 0 und 1. Zusätzlich kommt es bei 3. Reflexionsordnung am vierten Stockwerk an der Vorderseite zu einer IGW-Überschreitung. Die lautesten FP weisen einen LrT von 61.3 dB und LrN von 52.6 dB auf, welche jeweils um 0.3 dB bei 3. Ordnung ansteigen.

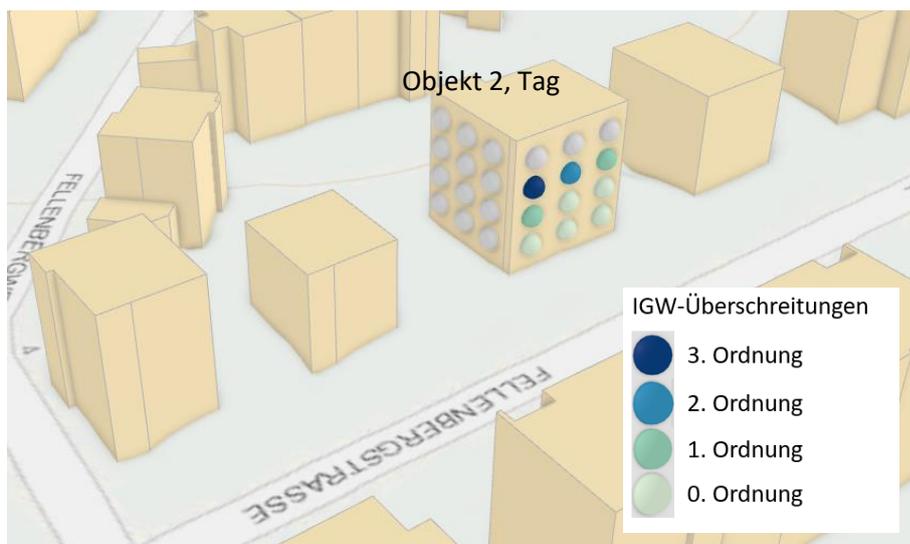


In der Nacht sind die FP der Vorderseite bereits bei 1. Reflexionsordnung an allen Stockwerken vom IGW überschritten. An den unteren 4 Stockwerken kommt es zudem bereits an der Seitenfassade zu IGW-Überschreitungen. Die FP der Seitenfassade von Stockwerk vier und fünf werden bei der 2. Reflexionsordnung vom IGW überschritten, sowie zusätzliche FP in den unteren Stockwerken. Die Rückseite des Gebäudes ist sowohl am Tag als auch in der Nacht nicht vom IGW überschritten.

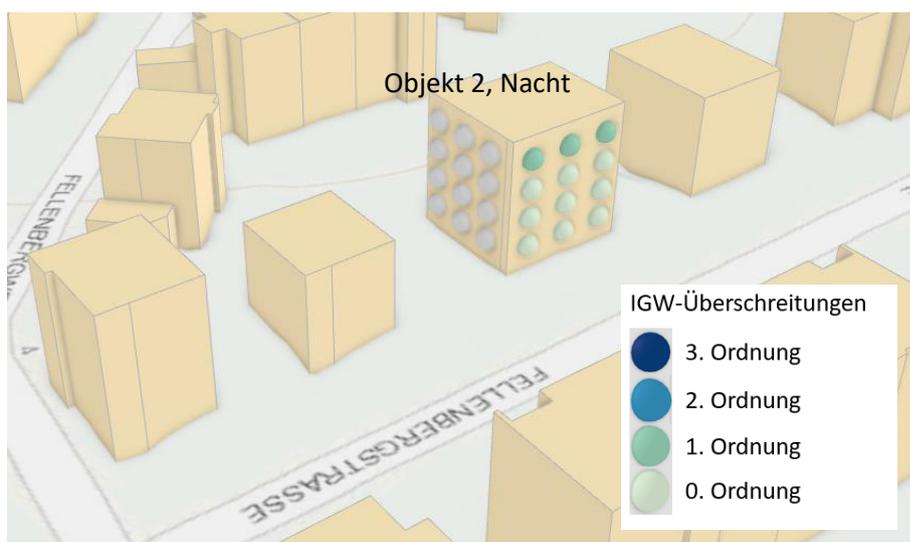


Objekt 2: Fellenbergstr. 257 (ES II, 5 Bewohner)

Am Tag kommt es durch höhere Reflexionsordnungen zu zwei weiteren FP über IGW in Stockwerk zwei, allerdings sind im Vergleich zur 1. Reflexionsordnung keine weiteren Stockwerke betroffen. Beide Seitenfassaden und Rückseite des Gebäudes werden nie überschritten. Die lautesten FP weisen einen LrT von 60.9 dB und LrN von 52.2 dB auf, welche jeweils um 0.1 dB bei 3. Ordnung ansteigen.



In der Nacht sind alle vier Stockwerke bereits bei 1. Reflexionsordnung vom IGW überschritten, die Seitenfassaden sind beide nicht von IGW-Überschreitungen betroffen. Durch die Berechnung von 2. und 3. Reflexionsordnung ändert sich an diesem Zustand nichts. Die Ursache wird darin vermutet, dass die umliegenden Reflektoren niedriger sind als bei Objekt 1 und einen grösseren Abstand aufweisen.



4.5 Rechenzeiten

Tabelle 11 fasst die benötigten Rechenzeiten für das Testgebiet zusammen und zeigt die Hochrechnung auf die ganze Stadt Zürich. Die Berechnungszeit von 0. auf 1. Ordnung stieg im gewählten Rechengebiet der Stadt Zürich um den Faktor 2.9. Die Berechnung der 3. Ordnung würde im Verhältnis zur 1. Ordnung nochmals einen Faktor von 70 bedeuten. Bei dem gewählten Rechengebiet kann es aufgrund der dichten Bebauung in der Altstadt zu einer Überschätzung der skalierten Rechenzeiten kommen.

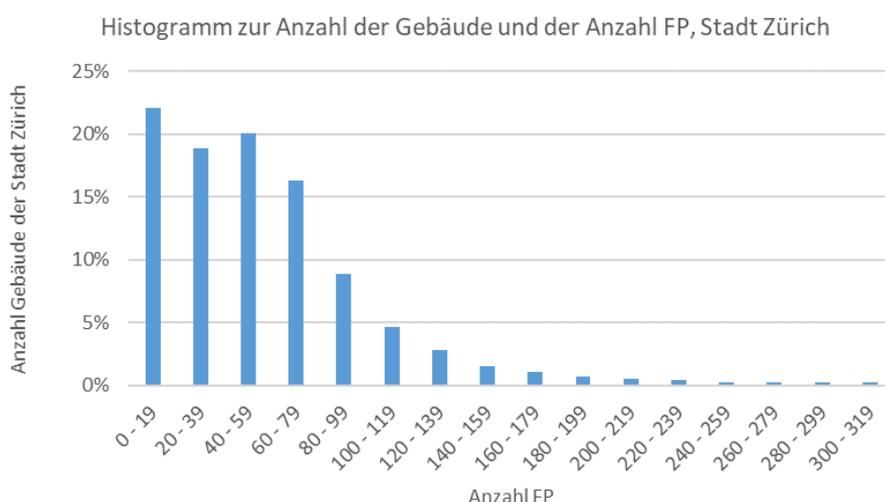
Generell wurden die Berechnungskacheln sehr fein gewählt, was zu einer Erhöhung der Rechenzeit bei allen Tasks geführt hat. Es ist zu erwarten, dass bei grösseren Kacheln der Faktor zwischen der 0. und 1. Ordnung um einen Faktor 2-3 höher ausfällt.

Für einen Rechner mit 30 Cores würde die Berechnung der ganzen Stadt Zürich mit 3. Ordnung daher bis zu 900 Tage benötigen. Dies stellt im Vergleich zu rund 13 Tagen bei einer Berechnung 1. Ordnung einen unverhältnismässig hohen Berechnungsaufwand dar. Es bedarf daher, falls der Entschluss gefällt wird mit höherer Ordnung zu rechnen, einer Optimierungsstrategie der Berechnung.

Tabelle 11 Berechnungsdauer für Testgebiet und Abschätzung für die Stadt Zürich in Abhängigkeit zur Reflexionsordnung

Reflexionsordnung	Dauer Testgebiet CPU-Stunden/Tage auf unserem Rechner mit 30 Cores	Abschätzung Dauer ganze Stadt CPU-Stunden/Tage auf unserem Rechner mit 30 Cores
0	40/0.056	3166/4.43
1	117/0.16	9261/12.9
2	887/1.23	70168/97.46
3	8203/11.4	649279/901.8

Um die Rechenzeit für ein typisches Bauprojekt abschätzen zu können, wurden die Anzahl FP aller Gebäude der Stadt Zürich statistisch in einem Histogramm (pro Klasse 20 FP) ausgewertet. Etwa 95% aller Gebäude haben dabei weniger als 160 FP. Die maximale Anzahl FP betrug etwa 2600 für ein Gebäude, dies wäre jedoch kein typisches Bauprojekt.



Auf Basis der Berechnungsdauer aus Tabelle 11 wurde die mittlere Berechnungszeit für einen FP je nach Reflexionsordnung bestimmt (Tabelle 12, Spalte 2). Für die ersten Klassen aus dem Histogramm wurden dann jeweils für die mittlere Anzahl FP eine mittlere Berechnungsdauer für die Gebäude dieser Klasse abgeschätzt. Die echte Berechnungsdauer kann von dieser Abschätzung je nach Bebauungsdichte, Anzahl und Grösse der Reflektoren sowie Geländeverlauf jedoch abweichen.

Unter Verwendung von einem Rechner mit 30 Cores kann daher nach Tabelle 12 ausgesagt werden, dass die Rechenzeit eines Bauprojekts auf Basis von 95 % der bestehenden Gebäude der Stadt Zürich meist unter einer Stunde liegen wird. Als Beispiel wurde für ein Gebäude mit IGW-Überschreitung in der zweiten Baureihe die Fellenbergstr. 296 ausgewählt. Das Gebäude mit 17 Bewohnern hat 5 Stockwerke und 96

Fassadenpunkte, womit sich eine mittlere Rechenzeit von 0.3 CPU-h für 1. Reflexionsordnung, 2.2 CPU-h für die 2. Reflexionsordnung und 20 CPU-h für eine Berechnung mit 3. Reflexionsordnung ergibt.

Tabelle 12 Mittlere Rechenzeit in CPU-h je nach Anzahl FP und Reflexionsordnung für 95% aller Gebäude der Stadt Zürich

Anzahl FP	1	10	30	50	70	90	110	130	150
0. Ordnung	0.001	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15
1. Ordnung	0.003	0.03	0.09	0.15	0.21	0.27	0.33	0.39	0.44
2. Ordnung	0.022	0.22	0.67	1.12	1.57	2.02	2.47	2.92	3.37
3. Ordnung	0.208	2.08	6.24	10.39	14.55	18.71	22.86	27.02	31.18

5 Mögliche Optimierungsstrategien

Die Rechenzeiten können durch die Verwendung von emissionsabhängigen, maximalen Ausbreitungsdistanzen generell um ca. einen Faktor 10 reduziert werden. Wenn zusätzlich die Reflexionsordnung und die maximale Distanz zwischen Reflektoren und Quellen/Empfänger in Abhängigkeit der Emission angepasst wird, kann die Rechenzeit weiter reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre, sämtliche Punkte mit Reflexionen erster Ordnung zu berechnen und in einem zweiten Schritt nur noch die potentiell lautesten Punkte je Gebäude/Etage mit höherer Reflexionsordnung zu berechnen.

Allerdings erhöhen alle diese Optimierungsstrategien die Inhomogenität der Berechnung, was sich auf die Kommunikation, Glaubwürdigkeit und Interpretierbarkeit auswirken kann. Um genauere Aussagen zum Potential und den resultierenden Unsicherheiten der einzelnen Optimierungsstrategien machen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig.

6 Fazit

Der Mittelwert der Differenzen im LrT und LrN aller lautesten sowie leisesten FP sinkt mit jeder zusätzlichen Ordnung, d.h. der zusätzliche Gewinn an Genauigkeit sinkt. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Berechnungsaufwand mit jeder Ordnung steigt. Jedoch konnte vor allem bei den lautesten FP ein signifikanter Anstieg an neuen IGW-Überschreitungen zwischen 1. und 3. Ordnung festgestellt werden. Am Tag stieg die Anzahl FP mit IGW-Überschreitungen um rund 11% an, in der Nacht um 6%. Betrachtet man die Grenzwertüberschreitungen auf Gebäudeebene, so stieg die Zahl der Gebäude mit IGW-Überschreitung am Tag um rund 5.6% und in der Nacht um 3.4% an.

Bei leisesten FP kam es nur zu wenigen Überschreitungen der IGW mit durchweg kleinen Differenzen zwischen 1. und 3. Reflexionsordnung von unter 1.3 dB. Hohe Differenzen zwischen den Reflexionsordnungen von bis zu etwa 13 dB treten vor allem bei FP auf, die sehr tiefe Lärmpegel haben und auch durch die Berücksichtigung höherer Reflexionsordnungen die IGW nicht überschreiten.

Die prognostizierte Berechnungszeit für die gesamte Stadt Zürich mit 3. Reflexionsordnung ist mit etwa 900 Tagen auf einem Rechner mit 30 Cores jedoch deutlich zu hoch. Es müssten daher eine oder mehrere Optimierungsstrategien für die Reflexionsberechnung 3. Ordnung angewendet werden. Auch mit Optimierungen wird die Rechenzeit auf 15 bis 30 Tage geschätzt. Der Nachteil der Optimierungen besteht darin, dass die Berechnungsmethodik nicht mehr homogen ist. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der

Kommunikation, Glaubwürdigkeit und Interpretierbarkeit der Ergebnisse führen. Für eine Anpassung von D-noise um die vorgeschlagenen Optimierungsstrategien müssten etwa 1-2 Monate Wartezeit für die Umsetzung eingerechnet werden.

Für die Betrachtung einzelner Bauprojekte im Bewilligungsverfahren kann die Berücksichtigung höherer Reflexionsordnungen jedoch durchaus Sinn machen. Hierzu wurde der Einfluss von höheren Reflexionsordnungen auf die Seitenfassade exemplarisch an zwei Objekten in der ersten Bautiefe untersucht. Bei Objekt 1 waren durch Berücksichtigung der 3. Reflexionsordnung tags und nachts zwei bis drei Stockwerke zusätzlich im Vergleich zur 1. Ordnung von IGW-Überschreitungen betroffen. Am 2. Objekt kam es hingegen zu keiner zusätzlichen IGW-Überschreitung an den Seitenfassaden.

Die Rechenzeit für ein einzelnes Bauprojekt ist dabei auch ohne Optimierungsstrategie unkritisch. Für ein Gebäude in der ersten oder zweiten Baureihe wie Objekt 1 (5 Stockwerke, 96 FP) würde eine Berechnung mit 3. Reflexionsordnung etwa 20 CPU-h benötigen, was auf einem Rechner mit 30 Cores gesamthaft weniger als eine Stunde dauern würde. In der Stadt Zürich liegt die mittlere Rechenzeit unter Berücksichtigung der 3. Reflexionsordnung bei 95% aller Gebäude unter 32 CPU-h, was bei einem Rechner mit 30 Cores meist weniger als 1 Stunde Rechenzeit bedeutet.