

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abt. Lärm und NIS
CH-3003 Bern

Einfluss der Gebäudeabschirmung und von Reflexionen auf die Fluglärmbelastung: Untersuchung anhand einer Jahresbelastungsrechnung für den Militärflugplatz Meiringen

Auftrags-Nr.:	5214.027323
Bericht-Nr.:	5214.027323-1
Auftraggeber:	Bundesamt für Umwelt BAFU, Kornel Köstli
Anzahl Seiten:	39
Beilagen:	-
Die Verfasser:	T. Ramseier S. Schalcher J.M. Wunderli B. Schäffer

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 5. Januar 2023
Der Projektleiter:

Abteilung Akustik / Lärminderung
Der Abteilungsleiter:

Dr. Beat Schäffer

Dr. Jean Marc Wunderli

Anmerkung: Bericht und Unterlagen werden 10 Jahre archiviert.

Zusammenfassung

Mit sonAIR wurde exemplarisch untersucht, wie stark sich die berechnete durchschnittliche Jahresbelastung gemäss Anforderungen nach Lärmschutz-Verordnung (LSV) durch Gebäude neben der Piste ändert, wenn Reflexions- und Abschattungseffekte durch Gebäude sowie Wald- und Felsreflexionen berücksichtigt werden. Dabei wurde die Wirkung der Berechnungsmodule in sonAIR (BASIC mit und ohne Gebäude, REFLECT, FOREST mit und ohne Gebäude) nicht nur integral, sondern auch einzeln untersucht (z.B. Berechnung mit und ohne Gebäudeabschattung), um die relative Wichtigkeit der einzelnen Ausbreitungsphänomene für die resultierende Lärmbelastung zu quantifizieren.

Als Rechenbeispiel wurde ein bebautes Gebiet von Unterbach beim Flugplatz Meiringen mit Immissionsgrenzwert-Überschreitungen gewählt. Das Untersuchungsgebiet mit einer Ausdehnung Ost-West von rund 1'100 m und Nord-Süd von rund 600 m befindet sich rund 300 m südlich des Flugplatzes. Basis für die Berechnungen bilden die Inputdaten (idealisierte Flugbahnen, Bewegungsstatistiken, Flugbahnstreuung) der aktuellsten verfügbaren Fluglärmrechnungen mit FLULA2 für den Flugplatz (Projekt Lärmbelastungskataster Prognose 2020, Projekt-Nr. 5214.019717), sowie die neu erstellten sonAIR-Quellenmodelle für das Strahlflugzeug F/A-18 Hornet.

Die Berechnungen zeigen, dass Reflexionen an Gebäuden die Lärmbelastung im Rechengebiet insgesamt (d.h. grossflächig) nur geringfügig beeinflussen, lokal – an pistenzugewandten Empfangspunkten – den Beurteilungspegel jedoch deutlich um bis zu 3–4 dB erhöhen können. Gebäudeabschattungen hingegen vermindern die Lärmbelastung grossflächig um mehr als 2 dB, lokal um bis zu 12 dB. Wald- und Felsreflexionen beeinflussen nur Empfangspunkte in unmittelbarer Nähe zu den Geländestrukturen und wirken sich somit nur lokal nennenswert auf die Immissionen aus, im Fall des Flugplatzes Meiringen in Gebieten mit tieferer Lärmbelastung.

Die Berechnungen legen nahe, dass eine detaillierte Berechnung wie die vorliegende für Spezialuntersuchungen wertvolle Einsichten liefern kann, z.B. um zu entscheiden, ob in Pistennähe Gebäudesanierungen auch bei Grenzwertüberschreitungen zulässig sind. Für Gesamtbelastungen sind hingegen Berechnungen ohne Gebäudeeffekte sowie auch ohne Wald- und Felsreflexionen zu empfehlen. Einerseits sind die Konturen mit Berücksichtigung der Gebäude für die Lärmkartierung zu unruhig, um einen grossflächigen Überblick über die Fluglärmbelastung zu erlauben, und andererseits wäre der Rechenaufwand für das ganze LSV-relevante Rechengebiet (immer noch) zu gross.

Inhaltsverzeichnis

1	Orientierung	4
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Auftrag.....	4
2	Umfang und Inhalt der Untersuchungen.....	5
2.1	Inhaltliche Systemabgrenzung.....	5
2.2	Zeitliche Systemabgrenzung	5
2.3	Räumliche Systemabgrenzung	6
3	Grundlagen und Methodik.....	7
3.1	Belastungsmasse und Berechnungsvorschrift – militärischer Betrieb	7
3.2	Analysierte sonX Module und resultierende Differenzen	8
3.3	Parametersetzung des sonX Rechenkerns für Wald- und Felsreflexionen.....	9
4	Berechnungsverfahren und Berechnungsablauf	11
4.1	Überblick Simulationsprogramm sonAIR	11
4.2	Berechnungsablauf sonAIR	12
5	Eingabedaten für die Fluglärm Berechnungen	14
5.1	Lagedaten.....	14
5.2	Gelände und Empfangspunkte	14
5.3	Flottenmix und Skalierungsfaktor für Energie-äquivalente Bewegungen	15
5.4	Flugverfahren.....	16
5.5	Flugbahndaten	16
5.6	Kennzahlen des militärischen Flugbetriebs	17
6	Ergebnisse.....	19
6.1	Auswirkung der Rechenmodule auf die Jahresbelastung (Lärmkartierung).....	19
6.2	Auswirkung der Rechenmodule auf die Jahresbelastung (Fassadenpunkte)	23
6.3	Auswirkung der Rechenmodule auf Footprints	26
6.4	Auswirkung der Rechenmodule auf die Jahresbelastung (Konturen)	29
7	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	31
8	Abkürzungen, Literatur	32
8.1	Abkürzungen.....	32
8.2	Literatur	33
9	Daten- und Berechnungsgrundlagen	34
9.1	Bewegungszahlen Flugzeuge mit Strahlantrieb.....	34
9.2	Ermittlung des Beurteilungspegels L_r	34
9.3	Einstellungen des sonX Rechenkerns.....	35

1 Orientierung

1.1 Ausgangslage

Fluglärm wird gemäss Art. 39 der Lärmschutz-Verordnung (LSV) [12] und gemäss der Vollzugshilfe "Leitfaden Fluglärm" [2] mittels grossräumigen Rasterberechnungen ermittelt, wobei weder Hinderniswirkungen noch Reflexionen von Gebäuden oder Wald- und Feldreflexionen berücksichtigt werden. Aus den Rasterberechnungen werden Lärmkonturen abgeleitet. Befindet sich ein Gebäude innerhalb einer Lärmkontur, welche den Belastungsgrenzwert gemäss LSV repräsentiert, so gilt der Belastungsgrenzwert als nicht eingehalten. Bei Gebäuden in unmittelbarer Nähe einer Piste eines Flughafens oder Flugplatzes kann auf der pistenabgewandten Seite die Hinderniswirkung des Gebäudes jedoch eine wichtige Rolle spielen. Dies zeigte auch eine erste exemplarische Untersuchung der Empa mit dem Fluglärmprogramm sonAIR [14] und ein Bericht von Ecoacoustique zur Situation in Genf [4]. Beide Untersuchungen basierten jedoch auf einzelnen Starts oder Landungen und lassen keine Rückschlüsse auf den Effekt auf Jahresbelastungen zu.

1.2 Auftrag

Im Mai 2021 beauftragte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) die Abteilung Akustik / Lärminderung der Empa, mit dem Fluglärmberechnungsprogramm sonAIR auf einem Gebiet in der Grössenordnung von einem Quadratkilometer detaillierte Fluglärmberechnungen durchzuführen, um den Einfluss von Gebäudeabschattungen und Reflexionen von Gebäuden, Wald und Fels zu untersuchen. Der Einfluss der Abschattungen und Reflexionen soll kartographisch mittels Differenzenplots und Fassadenpunktberechnungen sowie statistisch mittels Histogrammen und Boxplots quantifiziert werden. Als Grundlage für die Berechnungen dient eine Jahresbelastungsrechnung des Flugplatzes Meiringen (MEI) für den Betrieb der Strahlflugzeuge F/A-18 Hornet (F18) und Tiger F5 (TIG). Die Berechnungen sollen dabei gemäss Anforderungen nach Anhang 8 der LSV durchgeführt werden.

2 Umfang und Inhalt der Untersuchungen

2.1 Inhaltliche Systemabgrenzung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Berechnung der Fluglärmbelastung des Militärflugplatzes MEI für verschiedene sonX Module (Kap. 3.2). Er beschreibt die Grundlagen und Methodik zur Fluglärm Berechnung, die Eingabedaten, sowie die Berechnungsergebnisse und deren Interpretation. Als Lärmass wird der Beurteilungspegel L_r nach LSV Anhang 8 [12] berechnet (Kap. 3.1). Hierbei wird ausschliesslich der Betrieb der Strahlflugzeuge ausgewiesen (Kap. 3.1). Auf die Berechnung der Fluglärmbelastung von Flugzeugen mit Propellerantrieb (Propellerflugzeuge und Helikoptern) wird verzichtet, da deren Beitrag zur Gesamtbelastung im Falle des hier betrachteten Betriebsszenarios von MEI vernachlässigbar ist und da die vorliegende Berechnung nicht für eine offizielle Beurteilung nach LSV verwendet wird. Die Berechnungen erfolgen mit dem Simulationsprogramm sonAIR [15][16] (sonAIR Dienstleistungstool Version 5.4.2022.0921, sonX Version 3.3.0).

Parallel zu dieser Untersuchung wurden im Auftrag des Generalsekretariats des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (GS-VBS) im selben Untersuchungsgebiet Messungen des durch die Flugzeuge mit Strahlantrieb verursachten Fluglärms durchgeführt und analysiert [10]. Im Anschluss wurden die Immissionen an den Messpunkten mithilfe von sonAIR nachsimuliert [11]. Diese Validierung zeigte, dass sonAIR Gebäudeabschattungen und -reflexionen gut zu reproduzieren vermag. Die beiden Projekte (das hier vorliegende Projekt sowie das Projekt im Auftrag des GS-VBS) ergänzen einander. Zusätzlich zur vorliegenden Untersuchung wird auch eine Berechnung im gesamten LSV-relevanten Bereich mit denselben Inputdaten und analogen Einstellungen wie für die bestehende Belastungsrechnung mit FLULA2 [6] durchgeführt (offizielle Berechnung des Lärmbelastungskatasters LBK [8]), um den Einfluss des Programms (sonAIR vs. FLULA2) und der zugrunde liegenden unterschiedlichen Quelldaten der beiden Programme auf die Resultate zu quantifizieren. Diese Resultate werden in einem separaten Teilbericht zum vorliegenden Projekt dokumentiert (Bericht Nr. 5214.027323-2) und ergänzen die Projekte der ersten Jahresbelastungsrechnungen für die Flughäfen Zürich und Genf [9] sowie der zusätzlichen Jahresbelastungsrechnungen mit dem sonAIR DL-Tool (sonAIR_LOOP, Projekt-Nr. 5214.028869).

2.2 Zeitliche Systemabgrenzung

Die massgeblichen Bezugszeiten sind durch Anhang 8 der LSV [12] vorgegeben. Dabei müssen bei bestehenden Flugplätzen die Flugbewegungszahlen der sechs verkehrsreichsten Monate eines Betriebsjahres getrennt nach den Bewegungen von Flugzeugen mit Strahlantrieb (im Folgenden auch als Jets bezeichnet) und mit Propellerantrieb (hier vernachlässigt) ermittelt werden. Dazu wird die Fluglärmbelastung der Jets als Jahresmittlungspegel mit einer Bezugsdauer von zwölf Stunden berechnet, unter Berücksichtigung der sechs verkehrsreichsten Monaten auf einen mittleren Spitzenbetrieb hochgerechnet und schliesslich daraus mittels Pegelkorrekturen der Beurteilungspegel L_{rj} bestimmt. Letzterer ist die Zielgrösse für die vorliegende Berechnung. Die Berechnungen beziehen sich dabei auf die Inputdaten einer Prognose der Luftwaffe aus dem Jahr 2018 für den Flugbetrieb im Jahre 2020 [8].

Bei einer vollständig LSV-konformen Berechnung würde der Beurteilungspegel L_{rp} für die Propellerflugzeuge berechnet und daraus der Beurteilungspegel L_{rm} des gesamten militärischen Flugbetriebs ermittelt (Details siehe [5]). Darauf wird in der vorliegenden Berechnung jedoch verzichtet.

2.3 Räumliche Systemabgrenzung

Die Berechnungen zum Einfluss von Gebäudeabschattungen und Reflexionen von Gebäuden, Wald und Fels werden innerhalb eines rechteckigen Gebiets mit einer West-Ost Ausdehnung von rund 1'100 m und einer Nord-Süd Ausdehnung von rund 600 m durchgeführt (Planviereck mit folgenden Schweizer Landeskoordinaten (CH1903+/LV95): südwestliche Ecke: 2'650'940 / 1'176'220; nordöstliche Ecke: 2'652'065 / 1'176'830). Das Einflussgebiet besteht aus einem rechteckigen Gebiet mit einer West-Ost Ausdehnung von rund 21 km und einer Nord-Süd Ausdehnung von rund 21 km (Planviereck mit folgenden Schweizer Landeskoordinaten (CH1903+/LV95): südwestliche Ecke: 2'640'940 / 1'166'220; nordöstliche Ecke: 2'662'065 / 1'186'830). Für die Simulation mit sonAIR wird das Rechengebiet in ein Gitter mit einer Maschenweite von 5 m \times 5 m unterteilt. Das Gebiet wurde ausgewählt, da es nah an der Piste liegt, so dass starke Effekte von Gebäuden auf die Jahresbelastung zu erwarten sind. In anderen Gebieten, beispielsweise wo die Flugzeuge bereits in der Luft sind oder welche von den Flugzeugen überflogen werden, sind deutlich geringere Effekte zu erwarten.

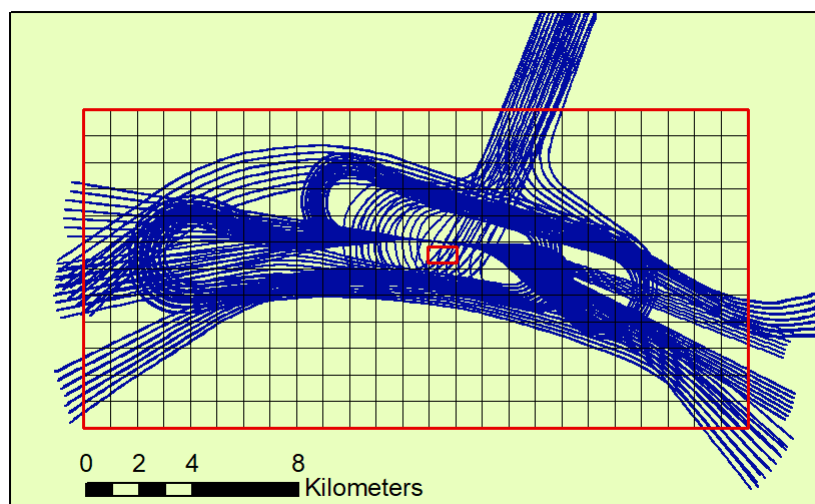


Abbildung 1: Rechengebiet (kleines rotes Rechteck in der Bildmitte) zur Untersuchung des Einflusses von Gebäuden und von Wald- und Felsreflexionen. Zur Orientierung wird auch das Gebiet für den Vergleich mit FLULA2 dargestellt (Bericht Nr. 5214.027323-2), welches den LSV-relevanten Bereich abdeckt (grosses rotes Rechteck). Die Flugspuren der Trajektorien sind in blau abgebildet.

3 Grundlagen und Methodik

3.1 Belastungsmasse und Berechnungsvorschrift – militärischer Betrieb

Die Berechnungen des rein militärischen Betriebs von MEI folgen den Anforderungen nach LSV Anhang [12] bzw. den Präzisierungen des Leitfadens Fluglärm [2].

Generell berücksichtigt Anhang 8 der LSV folgende Betriebsarten, namentlich (i) den militärischen Betrieb und (ii) den gemischten Betrieb, d.h. militärischer Betrieb mit ziviler Mitbenutzung. Der Beurteilungspegel L_r von Anlagen mit rein militärischem Betrieb – wie hier in MEI – wird gemäss Abbildung 2 berechnet, wobei der Teilbeurteilungspegel des militärischen Betriebs L_{r_m} bei rein militärischem Betrieb dem Beurteilungspegel L_r für den Lärm von Militärflugplätzen entspricht. Im vorliegenden Projekt werden Bewegungen von Flugzeugen mit Propellerantrieb nicht berücksichtigt (ausgegraut in Abbildung 2), da der Fokus auf den akustisch dominanten Flugzeugen mit Strahlantrieb liegt. Letztere dominieren den Gesamtbeurteilungspegel L_{r_m} der Prognoseberechnung [8], da deren Lärmemissionen deutlich höher sind als die der Flugzeuge mit Propellerantrieb (vgl. Kennwerte in [6]). Zur Ermittlung des L_{r_m} wird die Fluglärmbelastungen als Jahresmittelungspegel (Jets) mit einer Bezugsdauer von 12 Stunden berechnet, danach unter Berücksichtigung der sechs verkehrsreichsten Monate auf den mittleren Spitzenbetrieb hochgerechnet und schliesslich daraus mittels Pegelkorrekturen der Beurteilungspegel L_{r_j} , welcher annähernd L_{r_m} bzw. L_r entspricht, bestimmt. Details zur Berechnung finden sich in [5] sowie in Kapitel 9.2.

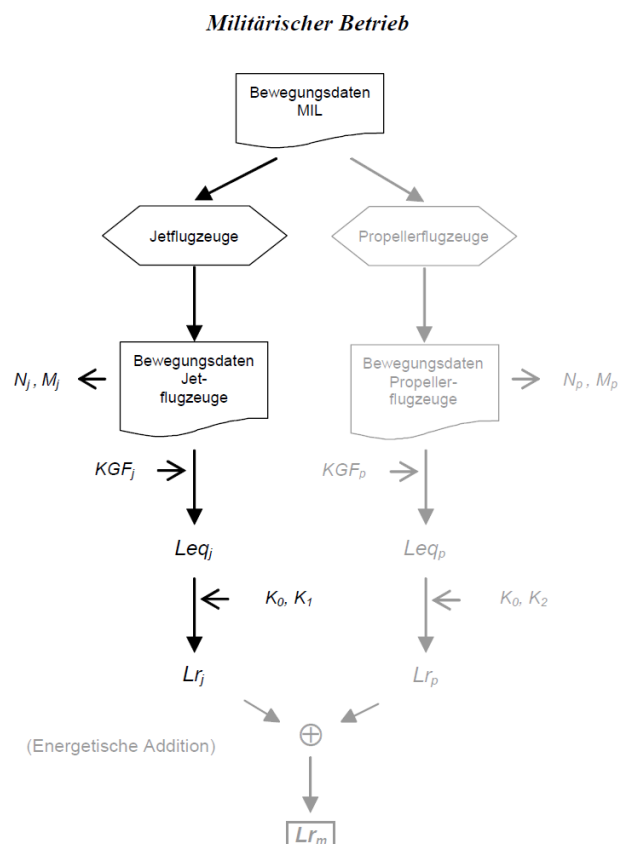


Abbildung 2: Ermittlung der Beurteilungspegel L_{r_j} , L_{r_p} und L_{r_m} (aus [3]). Ausgegraut ist die Berechnung der Belastung durch Flugzeuge mit Propellerantrieb, welche hier nicht berechnet wird.

3.2 Analyisierte sonX Module und resultierende Differenzen

Aussagen zum Einfluss von Gebäuden sowie von Wald- und Felsreflexionen lassen sich aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse der folgenden Simulationen ableiten:

Berechnungen ohne Gebäude:

- Berechnung V2.1: BASIC ohne Gebäude
- Berechnung V2.2: BASIC ohne Gebäude + FOREST ohne Gebäude

Berechnungen mit Gebäuden:

- Berechnung V3.1: BASIC mit Gebäuden
- Berechnung V3.2: BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden
- Berechnung V3.3: BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden

Um die verschiedenen Belastungen zu berechnen, werden aus den Hauptversionen verschiedene Versionen abgeleitet (vgl. Abbildung 3). Durch die separat gehaltenen Dämpfungsdatenbanken (VERSION 2: BASIC und FOREST ohne Gebäude; VERSION 3: BASIC, REFLECT und FOREST mit Gebäuden) können für die Basis-simulation (Einzelflugsimulationen) die richtigen Dämpfungen ausgewählt werden, um die Immissionen zu erhalten.

Aus der arithmetischen Differenz V3.1 – V2.1 lassen sich Pegelreduktionen aufgrund von Gebäudeabschirmungen ermitteln, und aus der Differenz V3.2 – V3.1 können Pegelerhöhungen aufgrund von Reflexionen bestimmt werden. Die Differenz V3.2 – V2.1 zeigt schliesslich die Gesamtwirkung der Gebäude (Abschirmung und Reflexionen). In obigen Vergleichen sind Beiträge von Wald- und Felsreflexionen noch nicht berücksichtigt. Ohne Gebäude werden diese mittels Differenz V2.2 – V2.1 und mit Gebäuden mit der Differenz V3.3 – V3.2 quantifiziert. Schliesslich wird der Einfluss aller Module mittels der Differenz V3.3 – V2.1 quantifiziert.

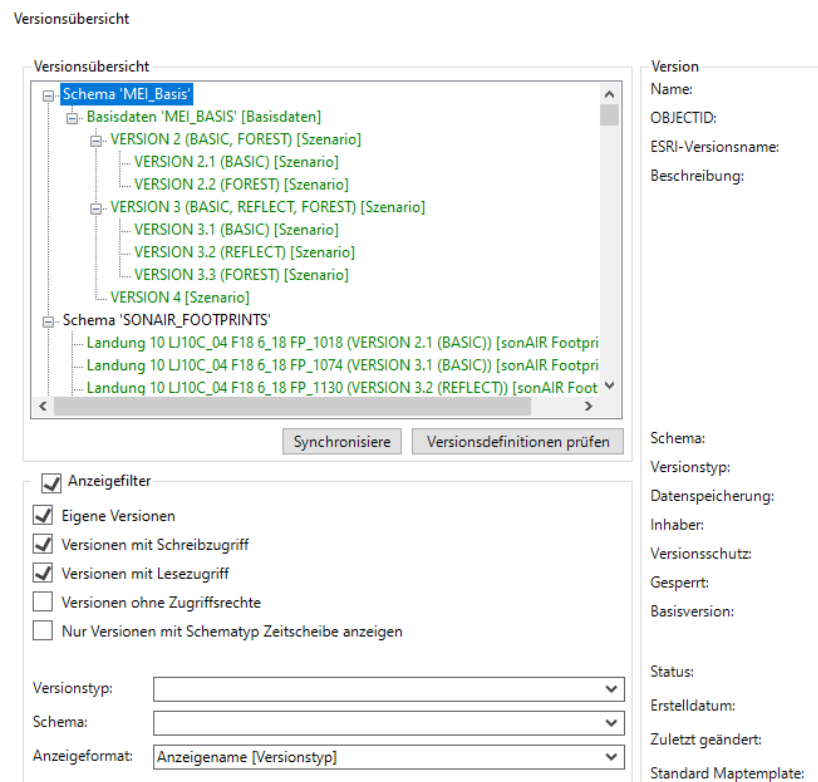


Abbildung 3: Abgeleitete sonAIR-Versionen des Projekts, im Dienstleistungstool dargestellt.

3.3 Parametersetzung des sonX Rechenkerns für Wald- und Felsreflexionen

In Abschnitt 9.3 sind die für die Simulationen verwendeten Parametersetzungen des sonX-Rechenkerns aufgeführt. Da bis anhin noch nie Wald- und Felsreflexionen für Fluglärm berechnet wurden, waren diese bisher nicht definiert worden. Ein wichtiger, frei wählbarer Parameter stellt hier die maximale Ausbreitungsdistanz für den Pfad Quelle-Reflektor-Empfänger dar, welche über die Parameter *maxDistForestPropagation* bzw. *maxDistRockPropagation* definiert wird.

Mit Hilfe von sonARMS, welches eine Laufzeitanalyse anbietet, wurden exemplarische Berechnungen für verschiedene Distanzen durchgeführt. Hierzu wurden die Quellendaten des F18 beim Start (MAX Starts mit Nachbrenner [NB] und MIL Starts mit 100% Leistung [VG]) in vereinfachter Form (nur zweidimensionale Richtcharakteristik (RC), d.h. kein lateraler Emissionswinkel) aufbereitet und in der Waffendatenbank als Mündungsknall integriert. Der Vorteil von sonARMS ist, dass es eine Laufzeitanalyse der verschiedenen Ausbreitungspfade liefert und so die zeitliche Struktur des diffusen Echos von den Talflanken untersucht werden kann. sonAIR liefert zwar auch Pegel-Zeit-Verläufe, aber diese entstehen vor allem wegen der Bewegung der Quelle. Dabei wird nur für den Direktschall eine Laufzeit berechnet. Die Signale von Direktschall und Reflexion treffen gleichzeitig ein, und es gibt bei den Reflexionen keine zeitliche Verschmierung. Das ist eine Vereinfachung, die eingebaut wurde, um die Performance hoch zu halten und die Komplexität zu reduzieren.

Abbildung 4 zeigt eine Situation des Empfangspunktes G1, der auch bei den Messungen verwendet wurde (vgl. [10][11]). In Abbildung 5 sind exemplarisch die berechneten Pegelzeitverläufe für die maximalen Ausbreitungsdistanzen von 2 bzw. 5 km für den ersten Quellenpunkt auf der Piste dargestellt. Der Direktschall des ersten Quellenpunktes trifft nach 1.69 s beim Empfänger ein. Erste Wald- und Felsreflexionen treffen nach rund 4 s ein. Im Falle der Maximaldistanz von 2 km sind nach rund 6 s kaum noch nennenswerte Reflexionen feststellbar, da der von den Reflexionen verursachten Pegel unterhalb von 40 dB gesunken ist. Bei der Maximaldistanz von 5 km ist auch ein Pegelabfall erkennbar, der aber deutlich langsamer erfolgt. Hier treten bis 15 s nach dem Ereignis noch Reflexionen auf. Diese Reflexionen sind für das in Tallagen charakteristische lange Echo verantwortlich. Sie tragen jedoch meist nur noch unwesentlich zum Ereignispegel bei. Im vorliegenden Fall (abgeschirmter Punkt G1) beträgt die Pegelerhöhung des Reflexionsanteiles beim Wechsel von 2 auf 5 km 0.8 dB. Hierbei ist zu bedenken, dass in Situationen mit abgeschirmtem Direktschall Reflexionen deutlich stärkere Pegelerhöhungen verursachen können als mit Direktschall. Im vorliegenden Fall ist der Pegel nicht sehr tief, da die Piste sehr nah ist (siehe Abbildung 4). Ohne Abschirmung dürfte der Beitrag des reflektierten Schalls deutlich geringer ausfallen. Der Rechenaufwand nimmt im Quadrat mit der maximalen Ausbreitungsdistanz zu. Dennoch wurde hier beschlossen, für die vorliegenden Berechnungen die maximale Ausbreitungsdistanz auf 5 km festzulegen, um den Grossteil der Reflexionen und somit deren grösstmöglichen Beitrag zur Gesamtbelastung erfassen. Der Einfluss dieser Setzung (5 statt 2 km) auf den Gesamtpegel bleibt jedoch mehrheitlich vernachlässigbar, d.h. in späteren Berechnungen könnte man die maximale Ausbreitungsdistanz auch auf 2 km setzen.



Abbildung 4: Ausschnitt aus der sonARMS Benutzeroberfläche mit den Flugbahnpunkten auf der Piste im oberen Bereich und dem Empfangspunkt G1 unten links im Bild (blaues Kreuz in rotem Kreis). Karte: Bundesamt für Landestopografie (swisstopo), Swiss Map Raster 25.

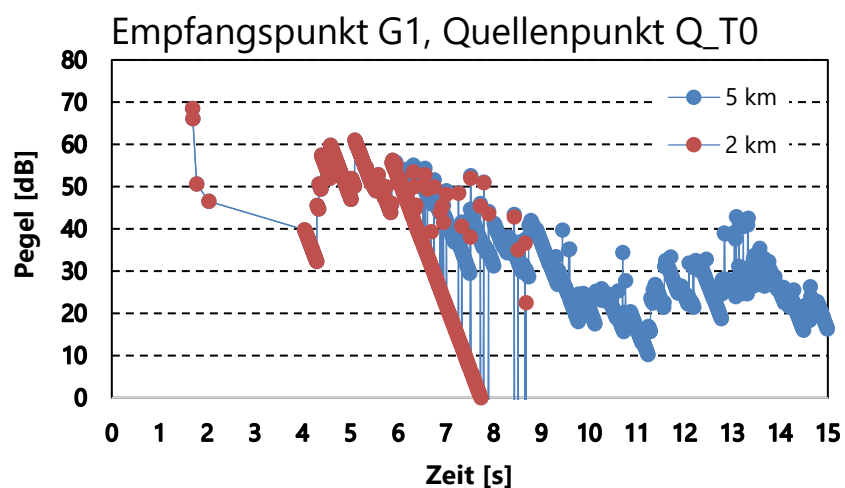


Abbildung 5: Laufzeitanalyse aus sonARMS für maximale Ausbreitungsdistanzen für Wald- und Felsreflexionen von 5 bzw. 2 km, dargestellt für den ersten Quellenpunkt auf der Piste (mit Start MAX mit Nachbrenner).

4 Berechnungsverfahren und Berechnungsablauf

4.1 Überblick Simulationsprogramm sonAIR

sonAIR ist im Detail in [15][16] beschrieben. Ein Überblick zu sonAIR inkl. Unterschieden zu den heutigen Best Practice Programmen AEDT und FLULA2 bezüglich des Modellierungsansatzes findet sich in [13].

Bei Grossflugzeugen (*Airliners*) beschreibt sonAIR die Flugzeuge als typen- und triebwerkspezifische Schallquellen mit dreidimensionaler Richtwirkung (longitudinal und lateral) und separaten Umströmungs- und Antriebslärm-Modellen in Abhängigkeit der Leistungssetzung und Flugzeugkonfiguration [16]. Im vorliegenden Fall hingegen ist der Modellierungsansatz vereinfacht. Der F18 wird mittels Prozedural-Modellen charakterisiert, welche die Richtwirkung separat dreidimensional (longitudinal und lateral) für Starts ohne Nachbrenner und für Landungen sowie zweidimensional (longitudinal) für Starts mit Nachbrenner beschreiben (Abbildung 6). Der Ansatz für die *Airliners* ist somit deutlich detaillierter als derjenige für den F18. Die Quelldaten für den F18 von sonAIR stammen aus den Messkampagnen in MEI [10] sowie in Payerne im Rahmen der Evaluation des neuen Kampffjets.

In sonAIR werden Emission und Ausbreitung separat modelliert. Weiter verwendet sonAIR ein physikalisch basiertes Ausbreitungsmodell (vgl. Dokumentation sonX [7]) und berücksichtigt Boden-, Gebäude-, Wald- und Felsreflexionen sowie Gebäude und Geländeabschattungen [14][15]. sonAIR rechnet die Dämpfungen in einem vorgeschalteten Schritt, bevor die Basissimulationen durchgeführt werden, wobei bei der Erstellung der Dämpfungsdatenbank entschieden werden kann, ob ein Luftraumgitter verwendet wird [15] oder die Dämpfungen für die individuellen Trajektorien-Punkte ermittelt werden.

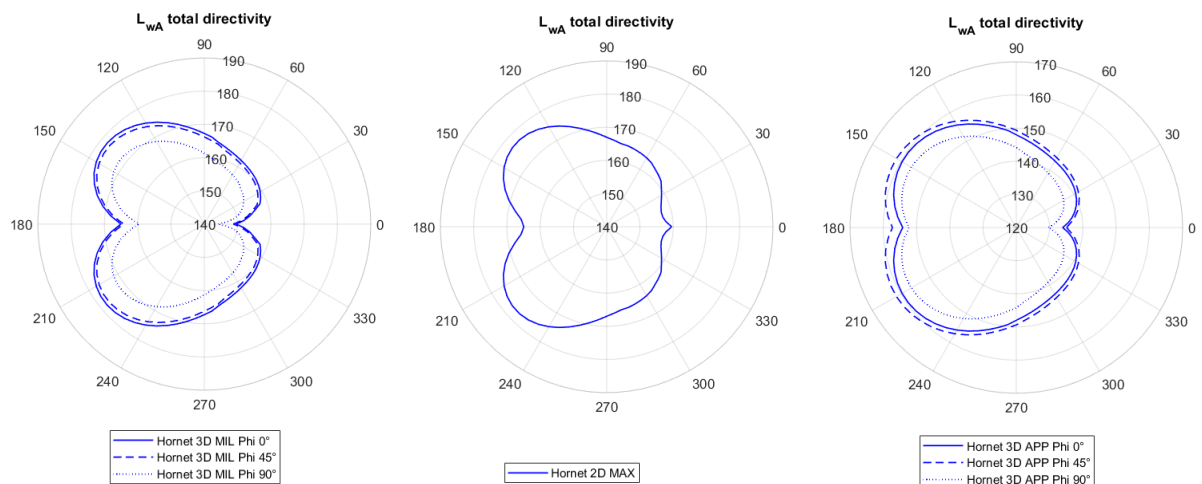


Abbildung 6: Richtcharakteristiken des F18 für MIL Starts (Starts mit 100% Leistung [VG], vgl. Tabelle 3) ohne Nachbrenner (links), Starts MAX mit Nachbrenner (Mitte) und Landungen AP (rechts), Quellenmodelle sonAIR (für MIL Starts und Landungen 3D-Richtcharakteristiken, bei lateralen Emissionswinkeln von 0°, 45° und 90°).

Bemerkung zu Abbildung 6: Die Emissionen um 0° sind messtechnisch nicht abgedeckt, da man die Flugzeuge unter diesem Winkelbereich nicht vermessen kann. Daher zeigen die RCs dort eine Extrapolation des gefitteten Modellansatzes. Selbst wenn die RC jedoch unter diesem Winkel optisch nicht plausibel aussieht ("Spitze" beim Start mit Nachbrenner), ist dies für die Berechnungen nicht kritisch, da dieser Winkelbereich kaum zu den Lärmimmissionen am Boden beiträgt.

4.2 Berechnungsablauf sonAIR

Die Berechnungen erfolgen mit dem an der Empa entwickelten Fluglärmsimulationsprogramm sonAIR (sonAIR Dienstleistungstool Version 5.4.2022.0921, sonX Version 3.3.0). Die Berechnungen wurden grundsätzlich gemäss Vorgaben des Leitfadens Fluglärm durchgeführt [2]. Der Berechnungsablauf ist grob wie folgt (für Details siehe Kap. 4.2 in [9]):

Eingabedatenaufbereitung und Aufsetzen des Projekts in ArcGIS: Die Eingabedaten wurden grossenteils von [8] übernommen (vgl. Kap. 5). Eine Ausnahme ist das Quellenmodell für den F18, welches im Rahmen der Quellenvermessungen in MEI sowie [10] für die Evaluation der neuen Kampfflugzeuge für sonAIR erstellt und im vorliegenden Projekt aus dem Wissenschaftlichen Tool ins Dienstleistungstool importiert wurde. (FLULA2 hingegen hat ein eigenes Quellenmodell des F18, welches aus früheren Quellenvermessungen aus dem Jahr 1998 stammt.) Das Aufsetzen des Projekts beinhaltet die folgenden Schritte:

1. **Import des digitalen Terrains und Bodenbedeckungsdaten.** Sowohl das digitale Terrain als auch das Bodenbedeckungsraster (Eigenschaften des Bodens wie z.B. Grasland, Wasser etc.) werden in einer groben (25 m × 25 m) und feinen (5 m × 5 m) Auflösung verwendet. Das grobe Terrain geht etwas weiter hinaus als das feine und wird verwendet, damit in der Simulation keine Artefakten am Rand des Gebiets entstehen.
2. **Definition der Pistengeometrie und Empfangspunkte** (übernommen aus [8])
3. **Import der konvertierten Flugbahnen** (FLULA2-Flugbahndaten aus [8] für sonAIR konvertiert)
4. **Definition der Projekteinstellungen** (Abbildung 7).

Projekteinstellungen

Grundeeinstellungen

VERSION 2 (BASIC, FOREST)

Ausgabeverzeichnis: \\DDM06818\sonAIR_Tasks

Rechengebiet: MEI_RG (1)

Einflussgebiet: MEI_EG (2)

Flugplatz: MEI

☒ Berechnungskacheln an Rechengebiet schneiden

Optionen

☐ Gebäude exportieren

☐ Erstelle Empfangspunktgitterpunkte innerhalb Gebäude

Berechnungseinstellungen

Programm Schallausbreitung: sonAIR v3.3.0

Parameter Schallausbreitung: sonAIRParameter für Flugplätze v3.3+

Programm Simulation: SimTool v1.6.0

Parameter Simulation: SimParameter v1.6+

Reduktionsdaten: Reduktionsdaten Flugplatz ohne Gitter

Exportiere

☒ Bodenbedeckungs-Raster

☐ Bodenbedeckungs-Polygone

Bodenbedeckungsraster fein: Bodenbedeckung 5m (1)

Bodenbedeckungsraster grob: Bodenbedeckung 25m (2)

Geländeeraster fein: DTM 5m (1)

Geländeeraster grob: DTM 25m (2)

Meteorologische Eigenschaften

Temperatur [°C]: 15

Relative Luftfeuchtigkeit [%]: 70

Luftdruck [mBar]: 1013.25

Erweiterte Einstellungen

Gittergrösse Empfangspunktgitter [m]: 5

Minimale Distanz Quelle-Empfänger: 50

Gittergrösse Berechnungskacheln [m]: 50

☐ Absolute Höhen bei Empfangspunkten verwenden

Ausrichtung Empfangspunktgitter: ☐ Anhand Gittergrösse ☒ Verschiebung um 0.5*Gittergrösse

Gewünschte Resultate

☒ Fassadenpunkte

☒ Beurteilungspunkte

☒ Empfangspunktgitter: 4.0 Meter

Ausbreitungsberechnung

☒ Basis-Ausbreitung

☒ Reflexionen an Wald und Fels

☐ Meteoroeinfluss

☐ Reflexionen an Gebäuden und Lärmschutzwänden

Abbildung 7: Zusammenfassungen der sonAIR-Recheneinstellungen. Die einzelnen Einstellungen sind im Text erklärt.

Versionen ableiten: In diesem Projekt wurden verschiedene sonX/sonAIR Einstellungen verwendet, welche auf denselben Eingabedaten basieren. Daher wurden verschiedene Versionen abgeleitet. Hierbei wird die originale Version des Projekts kopiert; danach können die Recheneinstellungen geändert werden (z.B. BASIC Berechnung mit statt ohne Gebäude).

Berechnung der Dämpfungen: Mithilfe des Ausbreitungsprogramms sonX [7] werden die Ausbreitungsdämpfungen zwischen den Flugbahn- und Empfangspunkten gerechnet und in Lookup-Tables gespeichert [15]. Die Dämpfungen werden mit sonX für jeden Flugbahnpunkt zu den Empfängerpunkten gerechnet, d.h. im Gegensatz zu den Landesflughäfen [9] wird für Berechnungen bei einer limitierten Anzahl idealisierter Flugbahnen kein Luftraumgitter verwendet. Die Ausbreitungsrechnung (wie auch nachfolgende Basissimulation) wird durch Anwendung eines flexiblen Zeitschrittverfahrens in Abhängigkeit der Abweichung des

Momentanpegels vom Maximalpegel rechenoptimiert, d.h. je näher der Momentanpegel vom Maximalpegel ist, desto feiner die Auflösung und *vice versa* (vgl. [15]).

Dennoch bleibt die Ausbreitungsrechnung der rechenintensivste Schritt des Simulationsprozesses. Je nach sonX Simulations-Modus wird dieser Schritt sehr unterschiedlich zeitaufwändig. Die Berücksichtigung von Gebäuden (Abschirmung und Reflexionen) verlängern den Rechenaufwand nicht erheblich, hingegen sind Wald- und Felsreflexionen deutlich rechenintensiver und verlängern die Rechenzeit entsprechend stark. So brauchte beispielsweise die Berechnung eines einzelnen Fluges im vorliegenden kleinen Rechenggebiet (Kap. 2.3) ein paar Minuten für das Modul BASIC ohne oder mit Gebäuden (d.h. Gebäudeabschirmungen). Das Modul REFLECT brauchte etwas mehr Zeit, aber die Rechenzeit blieb im Rahmen von 10–20 Minuten. Wird jedoch zudem FOREST berechnet (Wald- und Felsreflexionen), steigt die Rechenzeit auf rund zwei Stunden. Unter Verwendung von zwei Workstations zog die Berechnung der 490 Trajektorien mit allen Modulen entsprechend einen Rechenaufwand von ungefähr 2–3 Wochen nach sich.

Basissimulation: Die Basissimulation liefert sogenannte *Footprints*. Als *Footprint* bezeichnet man die flugzeugtypen- und flugroutenspezifischen mittleren Ereignispegel (L_{AE}), welche auf eine Bewegung normiert und auf eine Sekunde bezogen werden. Als Inputdaten benötigt sonAIR die Fluggeometrien inkl. Prozedur (hier: Starts mit oder ohne Nachbrenner; Landungen; vgl. Kap. 4.1) und die akustischen Quellendaten (Schallemissionsmodelle) des F18 (Quellendatensatz 2022_06). Die typenspezifischen Schallquellen werden bei der Basissimulation mit sonAIR in diskreten Zeitschritten von einer Sekunde (bzw. bei tieferen Pegeln in größeren Schritten, vgl. oben) entlang den Flugbahnen bewegt. Daraus wird der *Footprint* als auf einem gitterförmigen Raster resultierende Fluglärmbelastung berechnet. Dabei wird für MEI pro Flugroute (bestehend aus idealisierten Mittel- und Offsetsuren) ein typen- und flugbahnspezifischer *Footprint* berechnet.

Substitution: Da für den TIG kein sonAIR-Modell verfügbar ist, wurden die TIG-Flüge mit dem F18 Hornet Modell substituiert und die Bewegungszahlen des TIG entsprechend skaliert (energieäquivalente Bewegungen). Diese Methode, welche in ECAC Doc.29 beschrieben wird (Kap. 6.4.4.2 in Vol. 1 von [3]), wurde wie bei früheren sonAIR Projekten angewandt (vgl. [9]). Der Skalierungsfaktor k wurde mit folgender Gleichung berechnet:

$$k = 10^{(L_{AE}(TIG) - L_{AE}(F18))/10}$$

Die verwendeten L_{AE} Werte (Kennwerte FLULA2 [6]) sind in Kapitel 5.3 aufgeführt. Die TIG Bewegungszahlen werden anschliessend mit dem Faktor k multipliziert, um die energetisch korrigierten Bewegungszahlen zu erhalten, welche in die nachfolgende Superposition einfließen.

Superposition: Die *Footprints* aus der Basissimulation bilden die Grundlage für die Berechnung der Fluglärmbelastung. Hierzu werden die *Footprints* unter Verwendung von Bewegungsstatistiken (Kap. 9.1) und Angaben zur Verteilung der Bewegungen auf die Mittel- und Seiten-Flugbahnen (pro Flugroute 7 Flugbahnen gemäss Anforderungen des Leitfadens Fluglärm [2]) zu jährlichen Fluglärmbelastungen superponiert (Jahresmittel). Aus diesen werden schliesslich mit den Gewichtungsfaktoren (Hochrechnung auf einen mittleren Spitzenbetrieb) und Pegelkorrekturen (gemäss LSV Anhang 8) die Beurteilungspegel für Flugzeuge mit Strahlantrieb L_r bzw. (unter Vernachlässigung des Betriebs der Flugzeuge mit Propellerantrieb, s.o.) der Gesamtbeurteilungspegel L_r ermittelt. Details zur Berechnung findet sich [8] und Kapitel 9.2.

5 Eingabedaten für die Fluglärmberechnungen

5.1 Lagedaten

Die Pistenschwellen sowie Start- und Landepunkte wurden unverändert aus [8] übernommen.

Tabelle 1: *Lagedaten für die Fluglärmberechnung.*

Pisten	Jetflugzeuge	Bezeichnung	10/28
		Koordinaten Pistenschwelle 10	(2'650'257 / 1'177'116)
		Koordinaten Pistenschwelle 28	(2'652'182 / 1'176'911)
		Pistenhöhe	577 m ü. M.
		Pistenlänge	1'936 m
		Pistenbreite	40 m
		Startpunkt Piste 10	Pistenschwelle 10
		Landepunkt Piste 10	Pistenschwelle 28
		Startpunkt Piste 28	Pistenschwelle 28
		Landepunkt Piste 28	Pistenschwelle 10
	Jetflugzeuge Volten	Startpunkt Piste 10	Pistenschwelle 10
		Landepunkt Piste 10	Pistenschwelle 28
		Startpunkt Piste 28	Pistenschwelle 28
		Landepunkt Piste 28	Pistenschwelle 10
		Höhe	577 m ü. M.

5.2 Gelände und Empfangspunkte

Der Geländeausschnitt (aktueller Geländedatensatz DTM5 in Auflösung von 5 m × 5 m [swissALTI3D LV95, Ausgabe 2018]) wurde so gewählt, dass er das Rechengebiet abdeckt (Kap. 2.3).

Die Berechnungen werden für das Empfangspunktgitter in einer Auflösung von 5 m × 5 m durchgeführt (Kap. 2.3). Dieses Gitter wird für die Lärmkartierung (Lärmkonturen und Differenzenplots) verwendet. Bei Berücksichtigung von Gebäuden werden für Empfangspunkte innerhalb der Gebäude keine Belastungen ausgewiesen, da dort wegen der Abschirmung durch die Gebäudewände sehr tiefe Immissionen resultieren würden. Zusätzlich werden für die Berechnungen mit Gebäuden die Fassadenpunkte, d.h. Empfangspunkte auf den Häuserfassaden, definiert und für diese ebenfalls Simulationen durchgeführt. Die Fassadenpunkte können in sonAIR direkt anhand vorgegebener Parameter an den importierten Gebäude automatisch erstellt werden (siehe Abbildung 8).

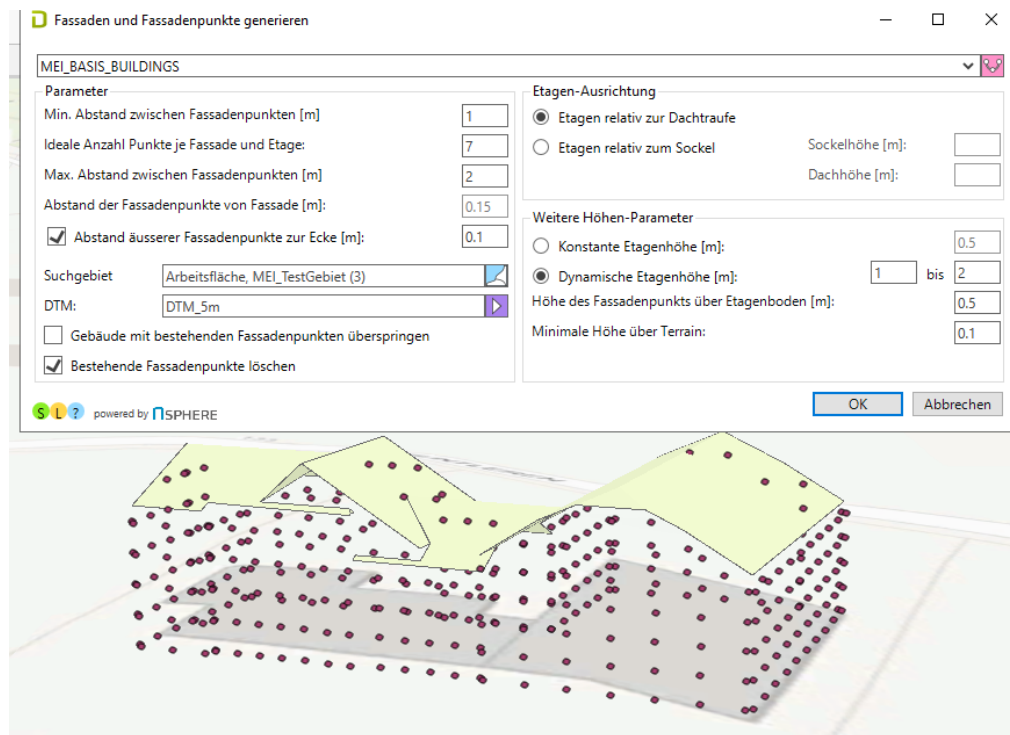


Abbildung 8: Automatisierte Erstellung der Fassadenpunkte in sonAIR.

Schliesslich werden Beurteilungspunkte definiert, an welchen die Messungen durchgeführt worden waren [10]. Die Berechnungsergebnisse für diese Punkte können mit letzteren Messresultaten verglichen werden.

5.3 Flottenmix und Skalierungsfaktor für Energie-äquivalente Bewegungen

Der berücksichtigte Flottenmix ist für den militärischen Betrieb von MEI ausgelegt. Für die vorliegende Berechnung wird ausschliesslich der Betrieb von Flugzeugen mit Strahlantrieb berücksichtigt (vgl. Kap.3.1), welche den F18 und den TIG umfassen. Die L_{AE} -Werte für die drei Flugphasen (Starts mit Nachbrenner [NB], Starts mit 100% Leistung [VG] und Landungen [AP]) sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Skalierungsfaktoren k für die Energie-äquivalenten Bewegungszahlen des TIG. Die L_{AE} -Kennwerte stammen aus der FLULA2-Dokumentation [6].

Flugzeugtyp	L_{AE} , dB(A)		
	Starts mit Nachbrenner (NB)	Starts mit 100% Leistung (VG)	Landungen (AP)
F18	120.6	116.4	102.2
Tig	112.7	109.1	86.6
Faktor k	0.16	0.19	0.03

5.4 Flugverfahren

Folgende Flugverfahren werden unterschieden und mit entsprechenden RCs simuliert (Tabelle 3).

Tabelle 3 Flugverfahren für Start mit Nachbrenner (NB), Start mit 100% Startleistung (VG), Start mit Abschalten des Nachbrenners (D1) und für Landungen (AP).

Verfahren	Abkürzung	Beschreibung
Start	VG	Flugverfahren Start; bei Jets ohne Nachbrenner
	NB	Flugverfahren Start Jets mit NB, NB während gesamtem Startvorgang eingeschaltet. NB wird nach 10'000 m abgewickelter Distanz abgeschaltet.
	D1	Flugverfahren Start Jets mit NB. NB bei 1'300 m (F18) und 3'000 m (TIG) abgewickelter Distanz ausgeschaltet (Verwendung von NB, dann Umschalten auf VG) ¹
Landung	AP	Flugverfahren Landung

¹ In den vorliegenden Berechnungen im kleinen Rechengebiet (Kap. 2.3) wurde für den TIG die Distanz des Abschaltens wie für den F18 auf 1'300 m gesetzt. Im kleinen Rechengebiet hat diese Einstellung jedoch kaum einen Einfluss auf die Ergebnisse, da die Flugzeuge bei Abschalten bereits recht weit weg vom Empfangspunktgitter sind.

5.5 Flugbahndaten

Im vorliegenden Projekt werden die Fluglärmberechnungen mittels idealisierter Flugtrajektorien durchgeführt. Die Trajektorien werden durch sogenannte Faltung von routenspezifischen Spuren sowie flugzeugtyp- und prozedurspezifischen Profilen erstellt.

Die Datengrundlage der Spuren und Profile wurden unverändert aus [8] übernommen und ins Inputdatenformat für die Berechnung in sonAIR konvertiert. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die dreidimensionalen Trajektorien des F18 und des TIG, unterteilt durch Flugprozedur. Die Flugspuren (Projektion der Flugbahnen auf die horizontale Ebene) und die Flugprofile (Höhen- und Geschwindigkeitsprofile) in [8] aufgeführt.

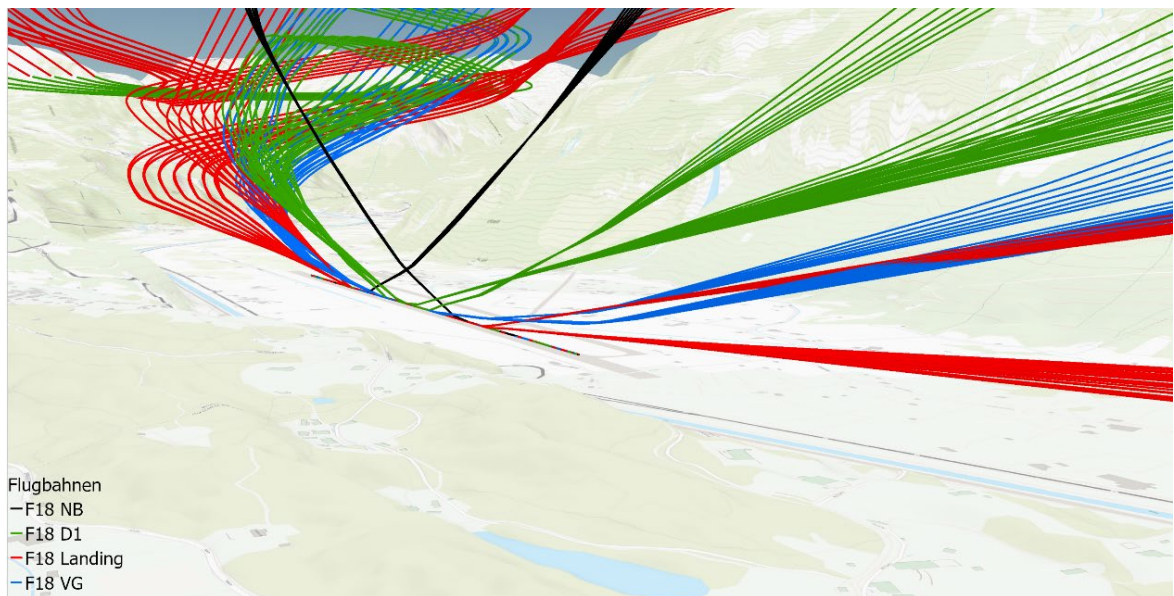


Abbildung 9: F18-Trajektorien nach Prozedur gefärbt (Start VG, D1, NB; Landung). Karte © OpenStreet-Map contributors, and the GIS User Community.

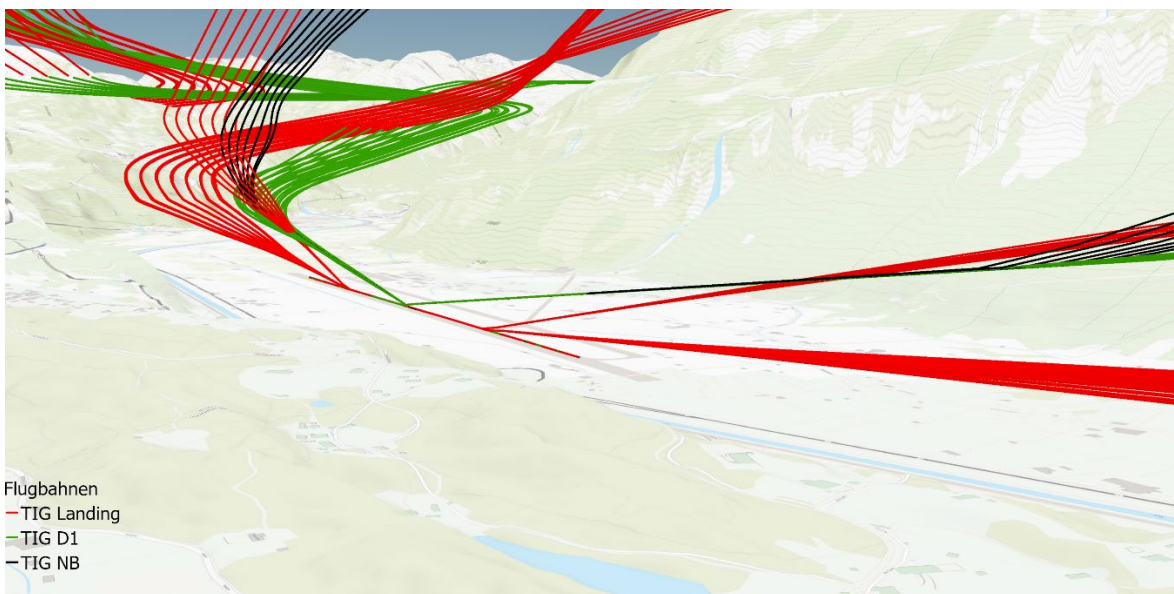


Abbildung 10: TIG-Trajektorien nach Prozedur gefärbt (Start D1, NB; Landung). Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

5.6 Kennzahlen des militärischen Flugbetriebs

Die Flugbewegungszahlen basieren auf Angaben der Luftwaffe; sie wurden aus [8] übernommen. Die originalen Bewegungsstatistiken finden sich in [8]; die für der Berechnung verwendeten Bewegungsstatistiken mit den Energie-äquivalenten Bewegungen des TIG finden sich in Kapitel 9.1.

Tabelle 4 zeigt die in den Berechnungen einflussenden originalen Bewegungszahlen sowie die darauf basierenden, in den Berechnungen verwendeten Gewichtungsfaktoren und Pegelkorrekturen für die Flugzeuge mit Strahlantrieb (aus [8]). Tabelle 5 vergleicht die originalen mit den hier verwendeten Energie-äquivalenten Bewegungen des TIG.

Tabelle 4: Kennzahlen für den Militärbetrieb MEI für Flugzeuge mit Strahlantrieb (Jets) für das Jahr 2020 (aus [8]). Die Kennzahlen werden in Kapitel 9.2 definiert.

	Flugzeugklasse		Jahr 2020	
Jährliche Flugbewegungszahlen	J	N_j	5'000	
Flugbewegungszahlen der sechs verkehrsreichsten Monate	J	M_j	3'925	
Stündliche Flugbewegungszahlen $n_x = M_x / (12 \cdot 130)$	J	n_j [/h]	2.516	
Gewichtsfaktoren		GF_j	1.570	
$GF_x = 2 \cdot M_x / N_x$	J	KGF_j	1.959	dB
$KGF_x = 10 \cdot \log(GF_x)$				
Pegelkorrekturen	alle	K_0	-8.000	dB
	J	K_1	0.000	dB

Tabelle 5: Originale und Energie-äquivalente Bewegungen des TIG pro Flugprozedur (Skalierungsfaktoren: Tabelle 2). Die D1-Starts werden mit dem Skalierungsfaktor für VG skaliert.

	Originale Bewegungszahlen	Energie-äquivalent Bewegungszahlen
Jährliche NB Starts des TIG	70	11.4
Jährliche D1 Starts des TIG	280	52.1
Jährliche Landungen des TIG	350	9.6

6 Ergebnisse

Um die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Differenzen zwischen den verschiedenen Modulen mit absoluten Lärmbelastungen in Verbindung zu bringen, werden zur Orientierung die Lärmkonturen von FLULA2 dargestellt (aus [8]). Diese Konturen wurden gewählt, da sie die offizielle Lärmbeurteilung repräsentieren und – wegen des einfacheren Rechenansatzes von FLULA2 [6] – einen glatten Verlauf aufweisen.

6.1 Auswirkung der Rechenmodule auf die Jahresbelastung (Lärmkartierung)

Abbildung 11 zeigt den Einfluss von Gebäudeabschirmungen auf die Jahresbelastung L_r (Differenz V3.1 – V2.1 in Kap. 3.2). Eine deutliche Pegelreduktion von mehr als 2 dB ist in mehr als der Hälfte des Rechengebiets ersichtlich. Direkt hinter den Gebäuden beträgt die Wirkung der Abschirmung bis zu 12 dB. Auch wenn die Gebäude relativ niedrig sind (rund 10 m), haben sie somit einen starken Abschirmungseffekt, da sich die Flugzeuge in der Phase des Vorbeiflugs meist noch auf der Piste befinden.

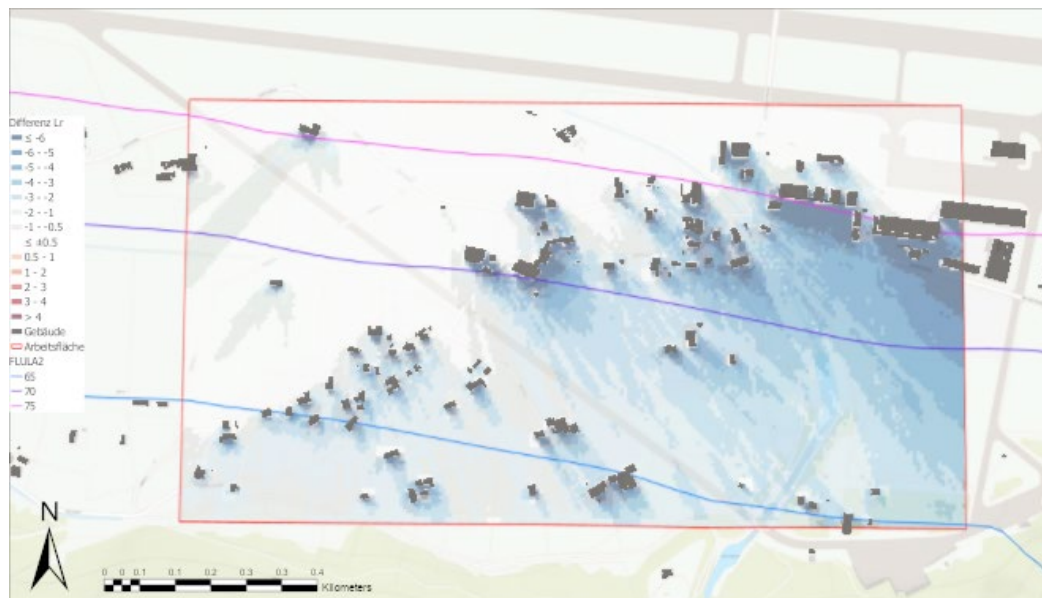


Abbildung 11: L_r -Differenz V3.1 (Modul BASIC mit Gebäuden) – V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 12 zeigt den Einfluss von Reflexionen an Gebäuden (Differenz V3.2 – V3.1 in Kap. 3.2). Diese sind besonders an den gegen die Piste gerichteten Fassaden ausgeprägt (Pegelerhöhungen von 3–4 dB), d.h. die Reflexionen an den Fassaden führen lokal zu Pegelerhöhungen. Im Gegensatz zu Gebäudeabschirmungen ist der Einfluss der Gebäudereflexionen jedoch lokal beschränkt und somit für die Gesamtbelastung (Lärmkartierung) nicht kritisch, ausser direkt vor den Fassaden (vgl. auch Kap. 6.2 zu den Fassadenpunkten). Zusätzlich bietet die geringe Anzahl an Gebäuden nur eine geringe Anzahl an Reflektoren. Dennoch wäre auch bei höheren Gebäuden und/oder höherer Gebäudedichte kein sehr starker Einfluss von Gebäudereflexionen zu erwarten (vgl. [14]).

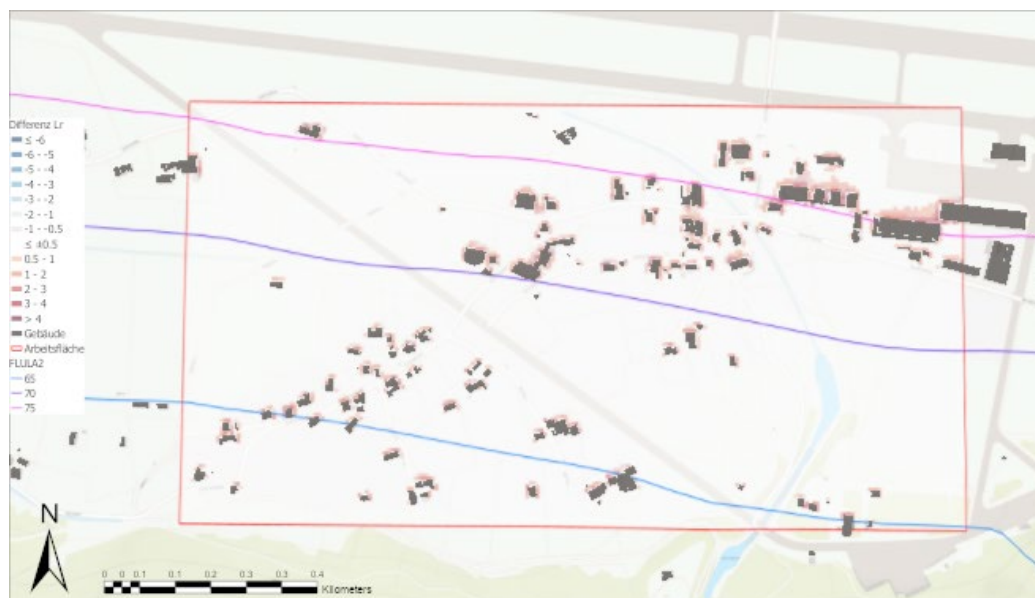


Abbildung 12: *Lr-Differenz V3.2 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden) – V3.1 (Modul BASIC mit Gebäuden). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.*

Abbildung 13 zeigt die kombinierte Wirkung von Gebäudeabschirmungen und -reflexionen (Differenz V3.2 – V2.1 in Kap. 3.2). Die grossflächige lärmvermindernde Wirkung von Gebäudeabschirmungen ist deutlich wichtiger als die lokal lärm erhöhende Wirkung der Reflexionen. Zudem sind Reflexionen insbesondere in Gebieten ohne direkten Schalleinfall wichtig, und solche Situationen sind in der vorliegenden Situation selten.

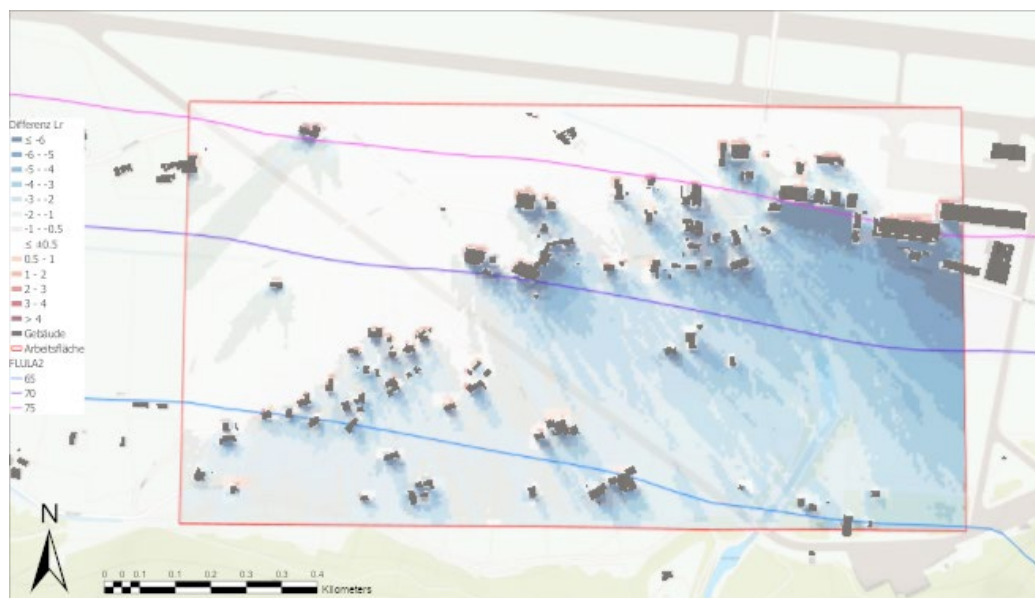


Abbildung 13: *Lr-Differenz V3.2 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden) – V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.*

Abbildung 14 zeigt den Einfluss von Wald- und Felsreflexionen ohne Berücksichtigung der Gebäudeabschirmungen (Differenz V2.2 – V2.1 in Kap. 3.2). Wald- und Felsreflexionen sind in der vorliegenden Situation von untergeordneter Bedeutung. Lediglich am südöstlichen Rand des Rechengebiets, welcher sich in der Nähe der Südseite des Tals befindet, d.h. nahe der Felsen und in Gebieten mit etwas tieferer Fluglärmbelastung, sind Pegelerhöhungen von wenigen dB sichtbar (lokal bis zu 5 dB).

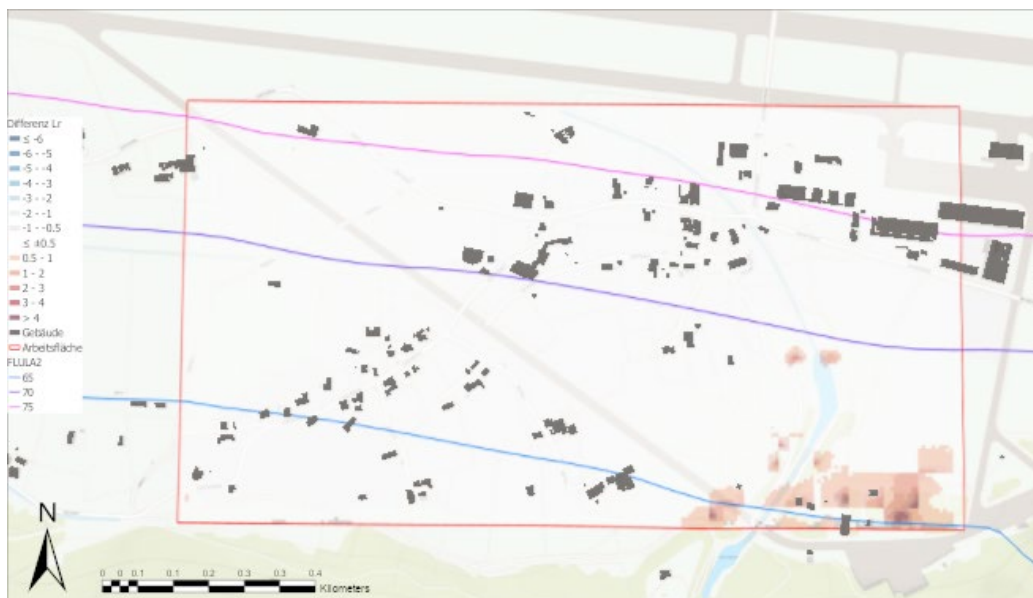


Abbildung 14: *Lr-Differenz V2.2 (Module BASIC ohne Gebäude + FOREST ohne Gebäude) – V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt.*

Wenn bei der FOREST-Berechnung Gebäudeabschirmungen berücksichtigt werden (Differenz V3.3 – V3.2 in Kap. 3.2), wird der Einfluss von Wald- und Felsreflexionen etwas ausgeprägter (Abbildung 15), da die Lärmbelastung im südlichen Bereich des Rechengebiet tiefer ist und Reflexionen in solchen Gebieten wichtiger sind als in Gebieten mit Direktschall. Der Einfluss von Wald- und Felsreflexionen bleibt jedoch – wie auch ohne Berücksichtigung der Gebäude – lokal auf Gebiete nahe der Talflanke beschränkt.

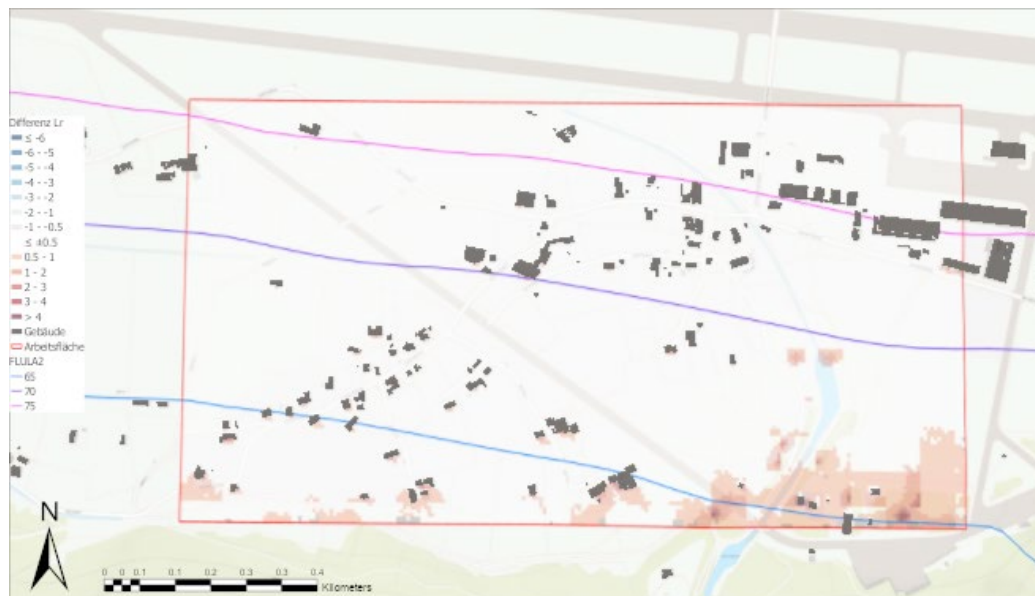


Abbildung 15: *Lr-Differenz V3.3 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden) – V3.2 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.*

Schliesslich zeigt Abbildung 16 die Differenz der Berechnung aller sonX Module mit der BASIC-Berechnung (Differenz V3.3 – V2.1 in Kap. 3.2). Gebäudeabschirmungen wirken sich am stärksten (vermindernd) auf die Lärmbelastung aus, während die Pegelerhöhungen durch Gebäude-, Wald- und Felsreflexionen nur lokal zu Pegelerhöhungen führen.

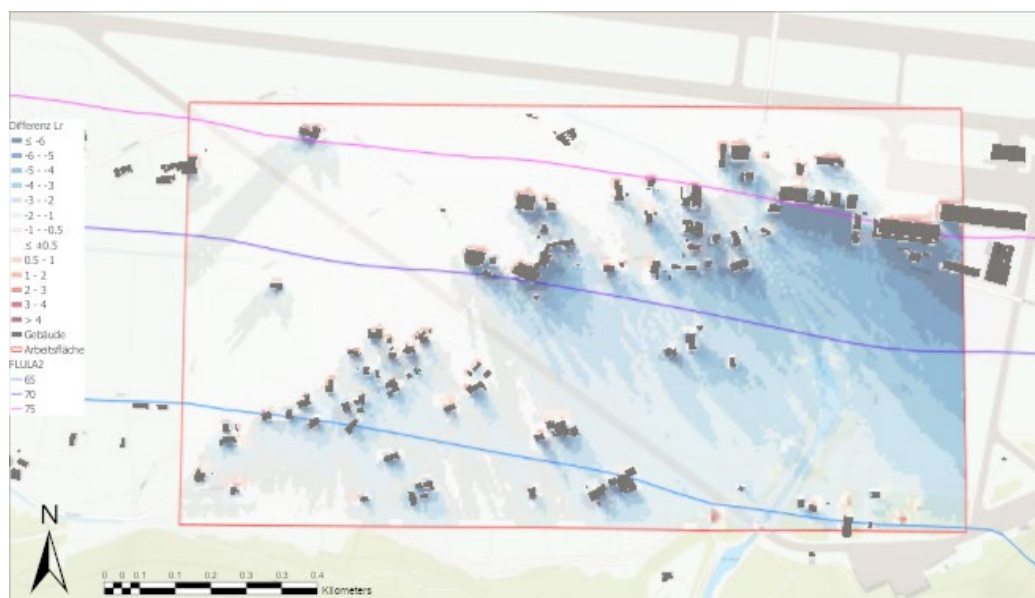


Abbildung 16: *Lr-Differenz V3.3 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden) - V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreet-Map contributors, and the GIS User Community.*

Die dominante Pegelverminderung der Gebäudeabschattungen in Pegelbereichen $L_r \leq 74$ dB sieht man auch deutlich in der statistischen Auswertung der Pegeldifferenzen V3.3 – V2.1 als Boxplots pro Pegelklasse

für alle Empfangspunkte des Rechengebiets (Abbildung 17). Für hohe Pegelklassen ($L_r > 74$ dB) sind die Differenzen zwischen den Berechnungen (und somit der Einfluss der verschiedenen Module auf die Belastung) sehr gering, da dieser Bereich hoher Belastungen in Gebieten nahe bzw. auf dem Flughafengelände liegt, welcher eben und gebäudfrei ist. Deshalb dominiert dort der Direktschall; die geringen Pegelerhöhungen werden durch die Gebäudereflexionen verursacht.

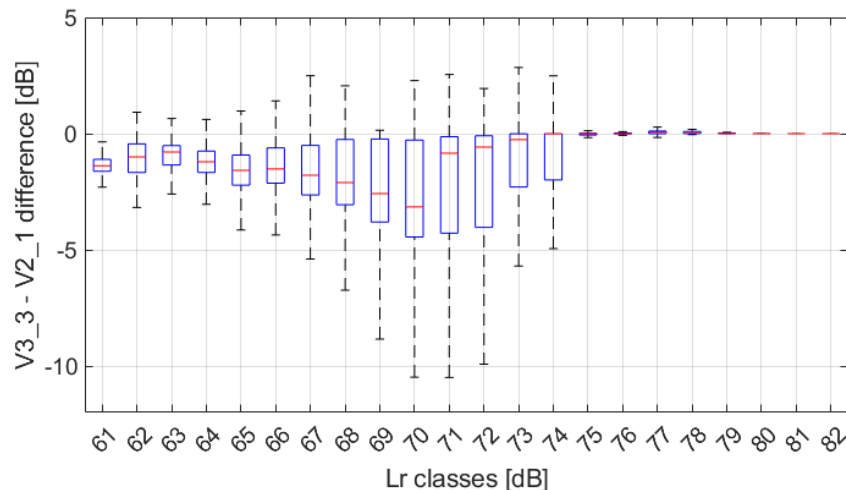


Abbildung 17: Statistische Auswertung der L_r -Differenzen V3.3 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden) – V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude) für verschiedene Pegelklassen (Referenz: Belastung V2.1).

6.2 Auswirkung der Rechenmodule auf die Jahresbelastung (Fassadenpunkte)

Um die Wirkung der Module auf die ermittelte Fluglärmbelastung der Wohnbevölkerung detaillierter zu quantifizieren, wurde der Beurteilungspegel (L_r) an den Fassadenpunkten der Gebäude als Proxy für die Lärmexposition der Anwohner untersucht. Abbildung 18 zeigt ein Teil der simulierten Fassadenpunkte im Rechengebiet.



Abbildung 18: Lärmbelastung L_r an den Fassadenpunkten für V3.3 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden). Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung der Pegelklassen für die an den Fassaden definierten Empfangspunkte. Wie erwartet führen die Module zur Berücksichtigung von Gebäude- sowie Wald und Felsreflexionen lokal zu leicht höheren Pegeln (V2.2 vs. V2.1 und V3.2/V3.3 vs. V3.1). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass an den Fassadenpunkten die Reflexionen der entsprechenden Fassade selbst nicht berücksichtigt werden, da die Fassadenpunkte innerhalb des Minimalabstands von 1 m für die Berücksichtigung dieser Reflexionen gesetzt wurden. Das entspricht der Situation einer Messung im offenen Fenster (allerdings ohne das zusätzliche 1 dB wegen Reflexionen aus dem Raum [1]). Dennoch wird es teilweise etwas lauter, z.B. an von der Piste abgewandten Fassadenpunkten, wo der Pegel generell tief(er) ist und somit Reflexionen der weiter entfernten, dahinter liegenden Gebäude den Pegel etwas erhöhen.

Weiter führt die Berücksichtigung von Gebäuden zu deutlich tieferen Pegeln: Ohne Gebäudeabschirmungen dominieren höhere Pegelklassen (V2.1/V2.1 vs. V3.1/V3.2/V3.3).

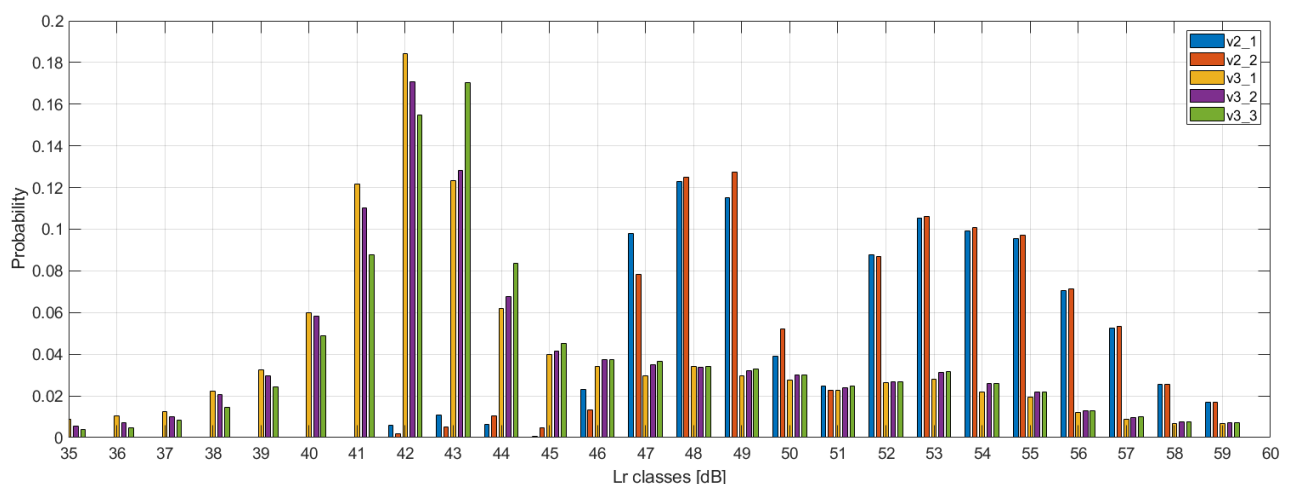


Abbildung 19: *Lr-Histogramm der Fassadenpunkte für die verschiedenen sonX Module. Häufigkeitsdichtefunktion (Probability) der Lärmbelastung in Pegelklassen von 1 dB. Module: V2.1: BASIC ohne Gebäude; V2.2: BASIC ohne Gebäude + FOREST ohne Gebäude; V3.1: BASIC mit Gebäuden; V3.2: BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden; V3.3: BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden.*

Zusätzlich wurden die Fassadenpunkte derjenigen Gebäude, an welchen in der Messkampagne [10] gemessen wurde, separat ausgewertet. Es wurde für diese Fassadenpunkte die Lärmbelastung vor und hinter dem Gebäude bestimmt und somit die abschirmende Wirkung der Gebäude quantifiziert. Diese Wirkung kann mit den Resultaten der Messkampagne verglichen werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die vorliegende Berechnung einen mittleren Jahresbetrieb (Beurteilungspegel L_r) abbildet, während in der Messkampagne Einzelereignisse (Ereignispegel L_{AE}) erfasst wurden. Abbildung 20 zeigt die Standorte der Messpunkte. Die entsprechenden Fassaden bei den Messpunkten (jeweils vor und hinter dem Gebäude) wurden bezüglich des L_r analysiert. Dabei wurde pro Fassadenpunkt ein L_r bestimmt und die Streuung über die Fassadenpunkte in Boxplots dargestellt.



Abbildung 20: Messpunkte bei den Gebäuden (Beurteilungspunkte) der Messkampagne, dargestellt als grüne Kreise [10]. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 21 zeigt die Gebäudeabschirmung für die Fassadenpunkte der zugewandten und abgewandten Seite der Piste. Die Streuung der Boxplots resultiert daraus, dass pro Fassade die L_r aller Fassadenpunkte ermittelt wurden und dass jeder Punkt einen anderen L_r aufweist. Die Auswertung zeigt deutlich, dass die abschirmende Wirkung der Gebäude mit zunehmender Distanz zur Piste abnimmt. So beträgt beim Gebäude mit Messpunkt G1 die abschirmende Wirkung rund 12 dB und beim am weitesten entfernten Gebäude (Messpunkt G4) nur rund 3 dB. Interessanterweise ist bei allen drei Gebäuden die Lärmbelastung auf der von der Piste abgewandten Seite sehr ähnlich (rund 42–43 dB). Im Vergleich zu den Messungen [10] ist die Pegeldifferenz bei der (berechneten) Jahresbelastung (L_r) etwas geringer als bei den gemessenen Einzelereignissen. So betrug die berechnete Differenz im L_r bei den Messpunkten (bzw. Beurteilungspunkten) G2/G3 7 dB, während die Messungen eine Differenz von rund 9 dB ergaben. Dieses Resultat ist nachvollziehbar, da bei den Messungen nur einzelne Starts erfasst wurden, bei welchen sich die Flugzeuge auf Höhe der Gebäude noch in Bodennähe befinden. Wird der gesamte Flugbetrieb betrachtet, so kommen zusätzliche Ereignisse mit grösseren Flughöhen und Flugwegen dazu, welche hinter den Gebäuden verlaufen. Entsprechend reduziert sich die abschirmende Wirkung der Gebäude.

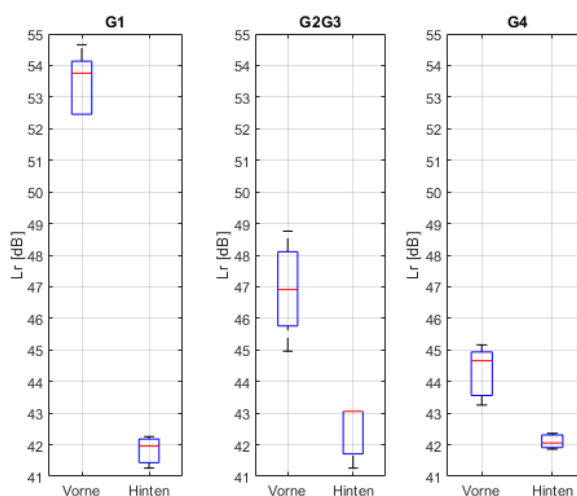


Abbildung 21: Verteilung der Ereignispegel L_r im Jahresmittel pro Fassadenpunkt für alle Bewegungen, Prozeduren und Flugzeugtypen. Die Boxplots zeigen die Streuung über die berücksichtigten Fassadenpunkte auf der pistenzu- (Vorne) und -abgewandten Seite (Hinten).

6.3 Auswirkung der Rechenmodule auf Footprints

Zusätzlich zu den Jahresbelastungen (unter Berücksichtigung aller Flugbahnen) werden im nachfolgenden exemplarisch Differenzen eines L_{AE} -Footprints für einen geraden Nachbrenner-Start eines F18 in Richtung Westen (*Footprint* unter Berücksichtigung der Streuung, d.h. energetisch gemittelter L_{AE} über die sieben Streuspuren) gezeigt. Abbildung 22 zeigt eine dreidimensionale Darstellung dieser Trajektorie, welche unter anderem erlaubt, den Abhebe- und Landepunkt zu identifizieren.

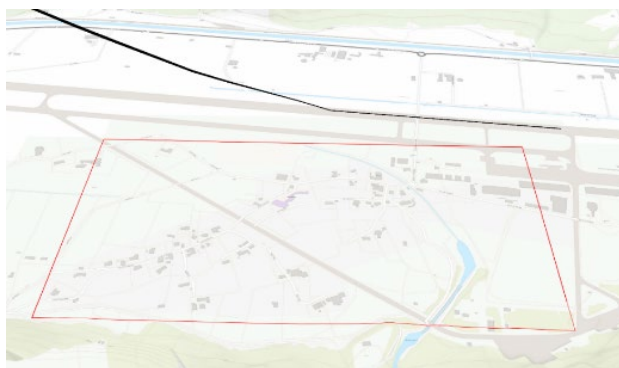


Abbildung 22: 3D Darstellung der ausgewählten Trajektorie (F18, Flugroute SJ28I, Start mit Nachbrenner, mit Flugbahnstreuung). Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 23 zeigt den Einfluss von Gebäudeabschirmungen für diesen exemplarischen Start (Differenz V3.1 – V2.1 in Kap. 3.2). Die Gebäudeabschirmung wirkt im westlichen Bereich des Rechengebiets deutlich schwächer als in der Jahresbelastung (vgl. Abbildung 11). Im vorliegenden Beispiel hebt der F18 relativ früh ab, sodass die abschirmende Wirkung der Gebäude deutlich vermindert wird. Bei anderen *Footprints* bzw. Einzelereignissen können sich – je nach Ereignis – andere Ausprägungen der Effekte ergeben. In der Jahresbelastung (unterschiedliche Verfahren, Start- und Landerichtungen) werden solche Unterschiede verschmiert.

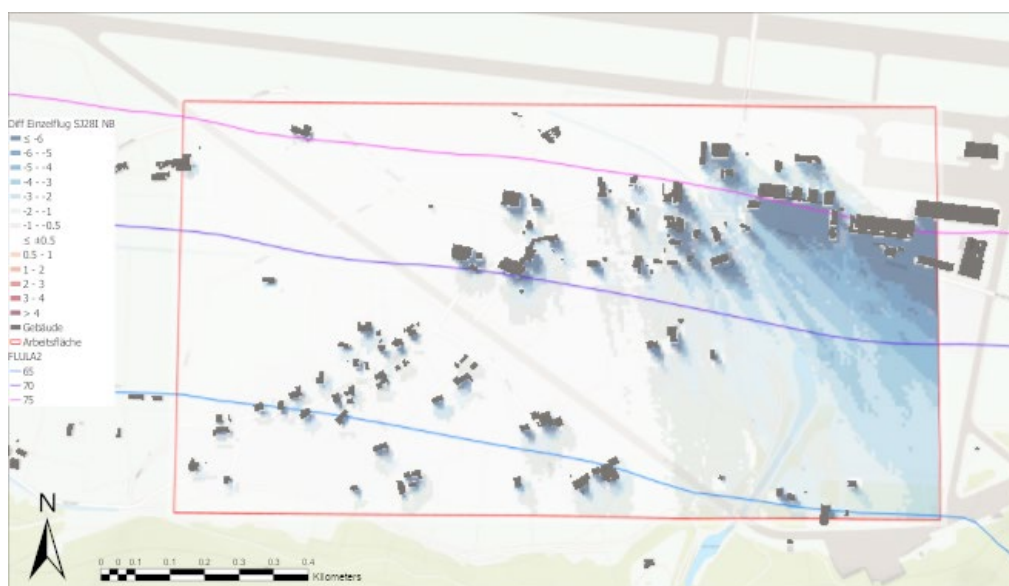


Abbildung 23: L_{AE} -Footprint-Differenz V3.1 (Modul BASIC mit Gebäuden) – V2.1 (Modul ASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 24 (Differenz V3.2 – V3.1 in Kap. 3.2) zeigt, dass – im Gegensatz zu den Gebäudeabschirmungen – der Effekt der Gebäudereflexionen ähnlich wie bei der Jahresbelastung (Abbildung 12) wirkt, da Reflektoren auch bei hohen Quellen (d.h. Flugzeug in der Luft) wirken. Die der Piste zugewandten Fassaden sind wiederum am stärksten betroffen.

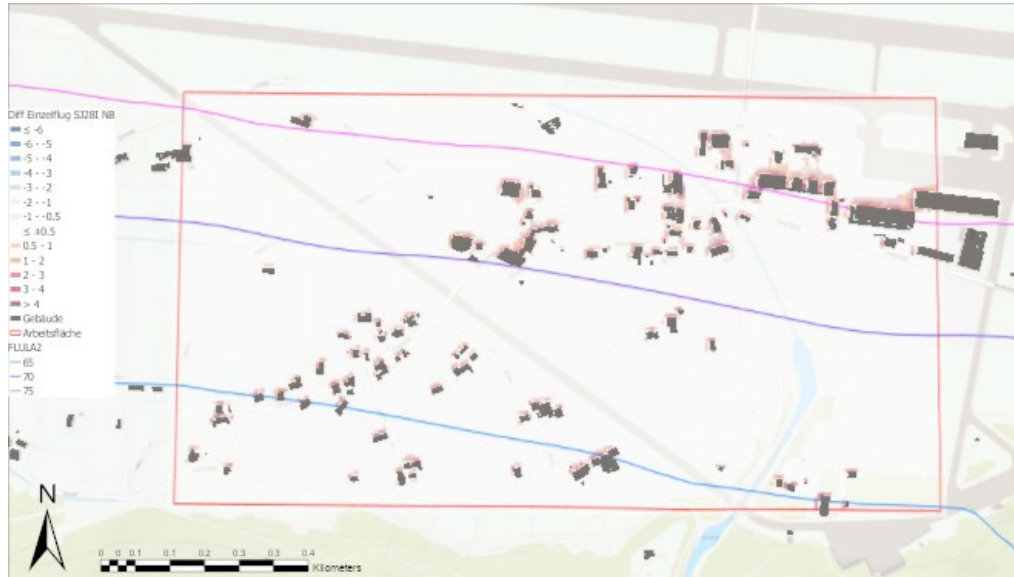


Abbildung 24: L_{AE} -Footprint-Differenz V3.2 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden) – V3.1 (Modul BASIC mit Gebäuden). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 25 zeigt die Gesamtwirkung der Gebäude (Differenz V3.2 – V2.1 in Kap. 3.2) für den Einzelflug. Qualitativ gelten dieselbe Beobachtung wie für die Jahresbelastung: Die Gebäudeabschirmung wirkt sich deutlich stärker auf die Belastung aus als die Reflexionen.

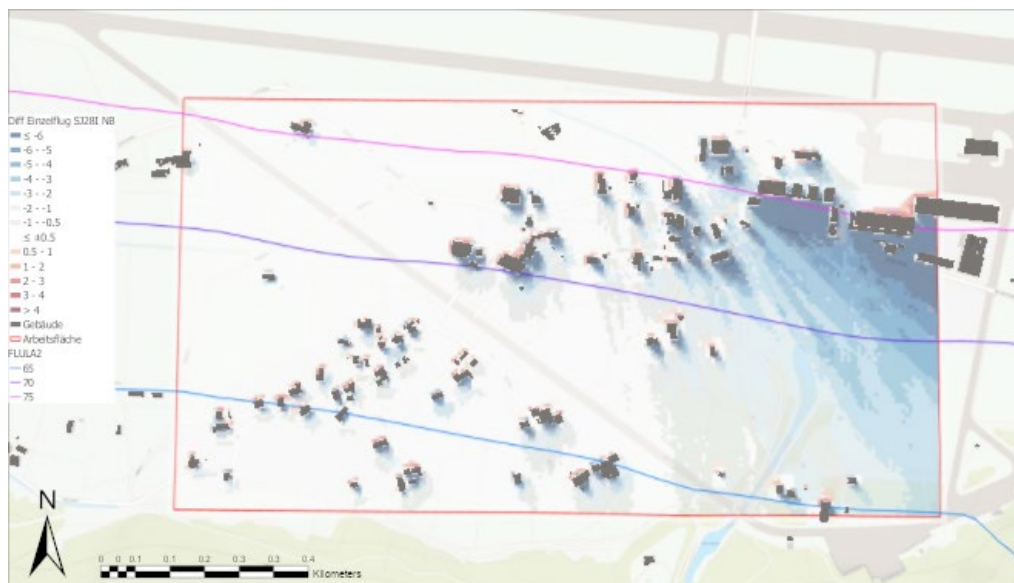


Abbildung 25: L_{AE} -Footprint-Differenz V3.2 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden) – V2.1 (Modul BASIC mit Gebäuden). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 26 (Differenz V2.2 – V2.1 in Kap. 3.2) zeigt, dass die vom Modul FOREST ohne Gebäude erzeugten Differenzen sehr ähnlich sind wie diejenigen für die Jahresbelastung (Abbildung 14). Auch hier wirken die Wald- und Felsreflexionen lokal beschränkt auf Gebiete nahe der Felswände.

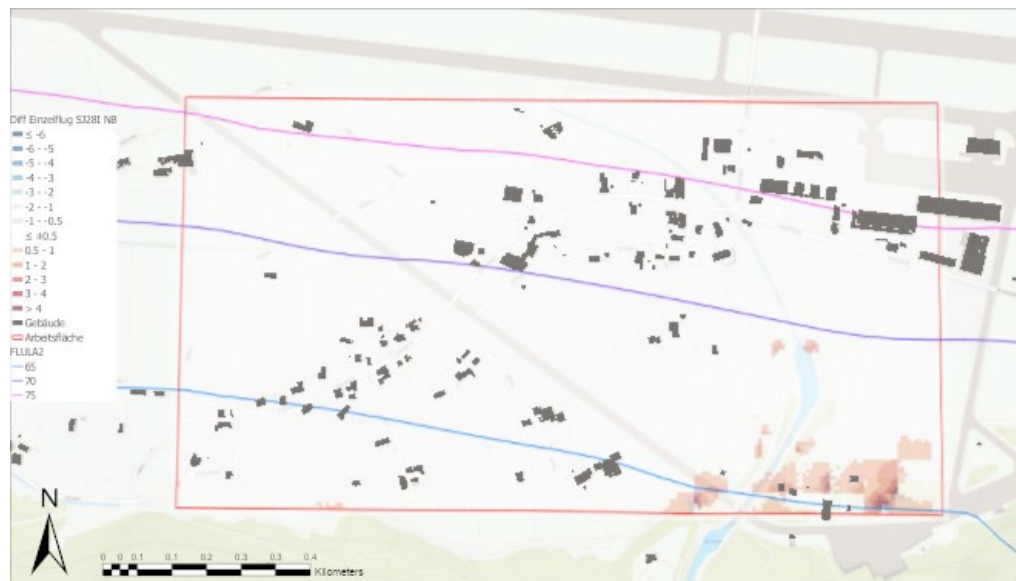


Abbildung 26: L_{AE} -Footprint-Differenz V2.2 (Module BASIC ohne Gebäude + FOREST ohne Gebäude) – V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 27 (Differenz V3.3 – V3.2 in Kap. 3.2) zeigt, dass das Modul FOREST mit Gebäuden für den Einzelflug im gesamten südlichen und insb. südöstlichen Bereich des Rechengebiets weniger wirksam ist als in der Jahresbelastung (Abbildung 15), was auf die flächenmässig geringere Gebäudeabschirmung und somit auf kleinere Gebiete, wo die Wald- und Felsreflexionen deutlich wirken, zurückzuführen ist.

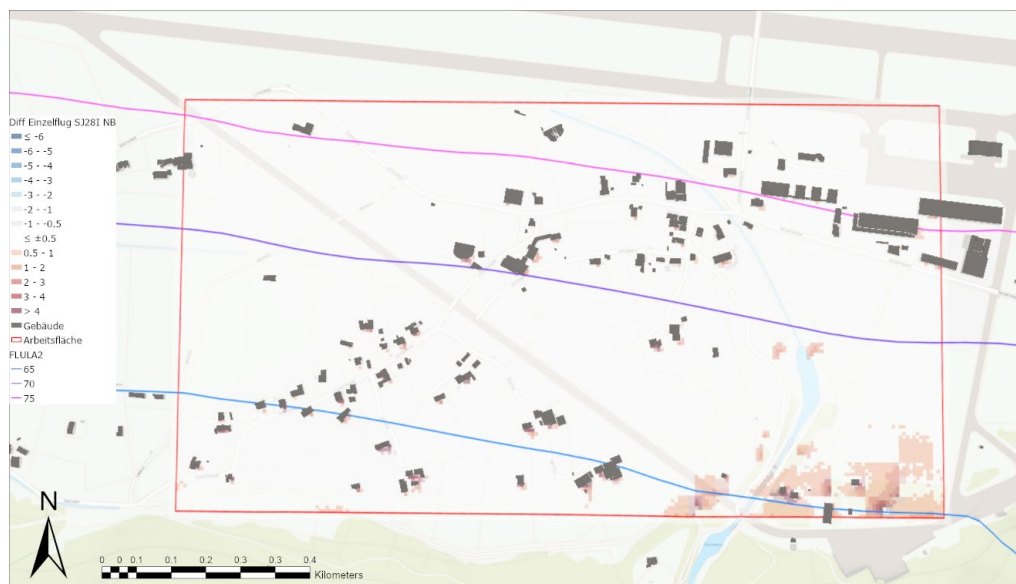


Abbildung 27: L_{AE} -Footprint-Differenz V3.3 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden) – V3.2 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Abbildung 28 schliesslich zeigt die Wirkung aller Module für den gewählten Start (Differenz V3.3 – V2.1 in Kap. 3.2). Wie bei der Jahresbelastung (Abbildung 16) wirken sich die Gebäudeabschirmungen deutlich stärker auf die Lärmbelastung aus als die Gebäude-, Wald- und Felsreflexionen. Während in diesem Beispiel (steiler Nachbrenner-Start) die Wirkung der einzelnen Module auf die Lärmbelastung geringer ausfiel als die Jahresbelastung, könnte dieser Befund für ein anderes Ereignis anders ausfallen (z.B. flache Landung). Insgesamt ist jedoch die Wirkung auf die Jahresbelastung massgebend.

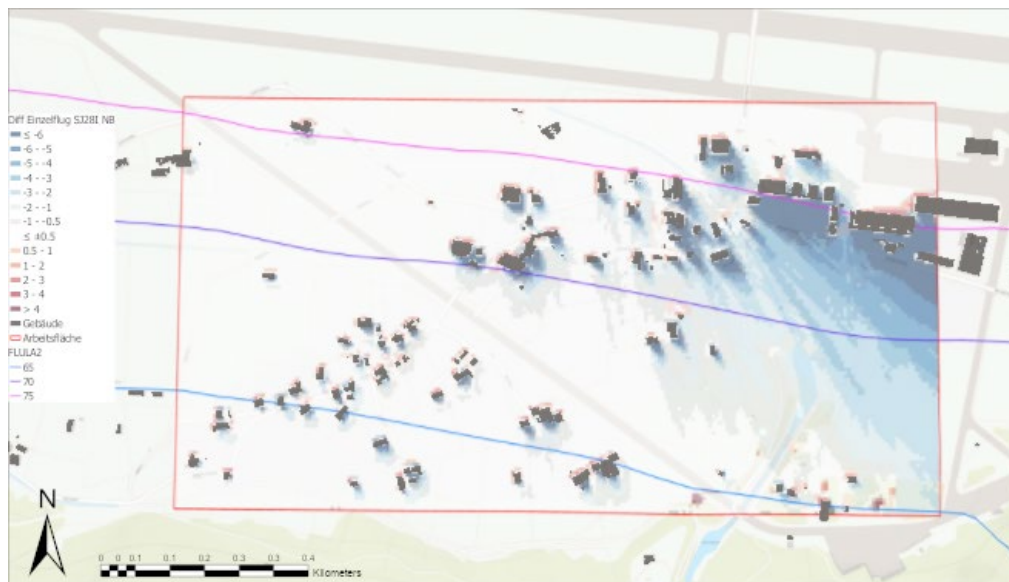


Abbildung 28: L_{AE} -Footprint-Differenz V3.3 (Module BASIC mit Gebäuden + REFLECT mit Gebäuden + FOREST mit Gebäuden) – V2.1 (Modul BASIC ohne Gebäude). Zur Orientierung der absoluten Lärmbelastung werden die Lärmkonturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

6.4 Auswirkung der Rechenmodule auf die Jahresbelastung (Konturen)

Abbildung 29 zeigt exemplarisch für die Berechnung V3.1 (Modul BASIC mit Gebäuden) die Wirkung der Berücksichtigung von Gebäuden auf die Konturen. Zum Vergleich werden die Konturen von FLULA2 (aus [8]) dargestellt. Die sonAIR-Kurven sind sehr unruhig und vermögen kaum einen grossflächigen Überblick über die Lärmsituation zu geben. Zudem werden innerhalb der Gebäude keine Belastungen ausgewiesen, da dort keine Aussenwerte ermittelt werden können (vgl. Kap. 5.2). Dies resultiert in vielen zusätzlichen Konturen um die Gebäude (der Übersichtlichkeit halber in Abbildung 29 nicht dargestellt), da der Pegel von aussen nach innen (rechnerisch) kleinräumig stark abfällt und somit alle Pegelbereiche abgedeckt werden. (Als Beispiel: Bei einer Aussenbelastung vor einem Gebäude von 70 dB entsteht kleinräumig eine Vielzahl von Konturen von 70 bis 40 dB (oder tiefer), da der Pegel innerhalb des Gebäudes rechnerisch zu beliebig tiefen Werten abfällt.

Daher empfehlen wir für Lärmkartierungen, lediglich die Berechnung ohne Gebäude zu verwenden. Die übrigen Module können wertvolle Hinweise für Spezialuntersuchungen wie im vorliegenden Fall liefern.

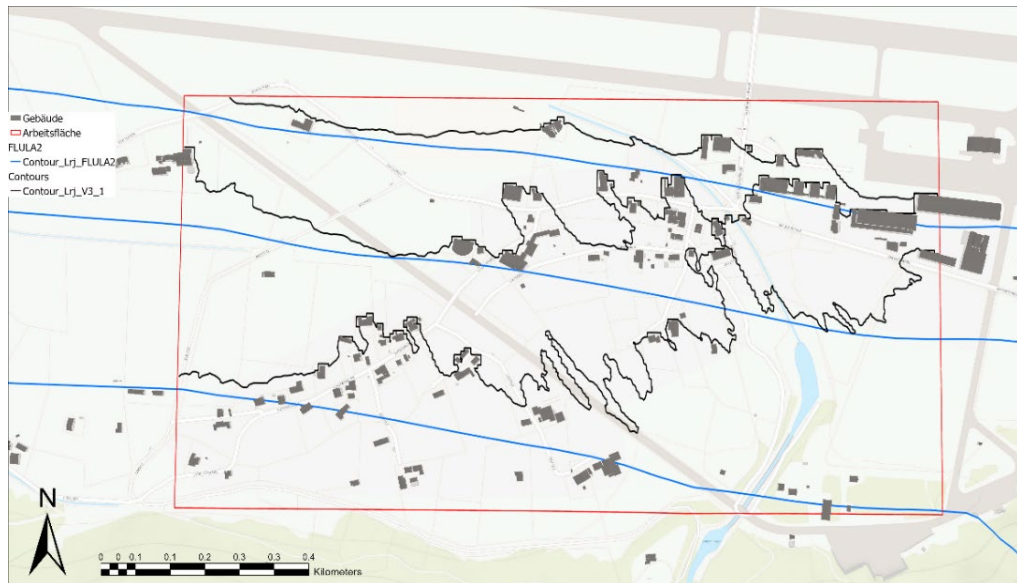


Abbildung 29: Vergleich zwischen den LSV-relevanten Lr Konturen (65 dB, 70 dB und 75 dB) von sonAIR (Berechnung V3.1, Modul BASIC mit Gebäuden, schwarz) mit FLULA2 (aus [8]) (blau). Karte © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community.

Bemerkung: Im Rahmen dieser Untersuchung wurden für alle Berechnungen, auch für die Berechnungen V2.1 und V2.2 ohne Gebäude (Kap. 3.2), die Belastungen der Empfangspunkte innerhalb der Gebäude nicht ermittelt. Auch hier würden daher viele zusätzliche Konturen um die Gebäude resultieren. Dies hätte man bei der Dämpfungsberechnung auch anders einstellen können. Bei vollständig flächendeckender Berechnung würden die zusätzlichen Konturen um die Gebäude wegfallen, und man könnte in Abbildung 29 auch die Konturen von V2.1, neben denjenigen von V3.1 und von FLULA2, ausweisen. Die Konturen von V2.1 würden zwar unruhiger als diejenigen von FLULA2 verlaufen, aber deutlich ruhiger als diejenigen von V3.2 (vgl. hierzu analoge Konturen-Vergleiche in [9] sowie in Projekt-Nr. 5214.028869 [sonAIR_LOOP]).

7 Diskussion und Schlussfolgerungen

In dieser Untersuchung wurde erstmals grossflächig und für einen Jahresbetrieb (Beurteilungspegel L_r) der Einfluss von Gebäudeabschirmungen, Gebäudereflexionen sowie Wald- und Felsreflexionen auf die resultierende Lärmbelastung quantifiziert. Die Resultate zeigen, dass die Belastungsrechnungen mit den verschiedenen Modulen (Kap. 3.2) sinnvolle Ergebnisse liefern und grundsätzlich für die rechnerische Ermittlung von Lärmbelastungen anwendbar sind.

Die hier dargestellten Differenzen in den ermittelten Jahresbelastungen in Abhängigkeit der verschiedenen sonX-Module zeigen, dass die Berücksichtigung von Gebäudeabschirmungen die ermittelte Lärmbelastung am stärksten, lärmindernd beeinflusst. Hier resultieren grossflächige Pegelabnahmen von mehr als 2 dB, bzw. von bis zu 12 dB direkt an den von der Piste abgewandten Gebädefassaden. Gebäudereflexionen an Fassaden beeinflussen die Lärmbelastung hingegen nur lokal und erhöhen die Lärmbelastung bei pistenzugewandten Seiten von Gebäuden um bis zu 3–4 dB. Prinzipiell kann sich die Wirkung besonders stark in abgeschirmten Situationen ohne Direktschall zeigen, wo Reflexionen den (tiefen) Pegel massgeblich erhöhen können. Im Vorliegenden Fall, mit relativ niedrigen Gebäuden und wenig dichter Bebauung, ist dieser Effekt jedoch kaum sichtbar. Diese Befunde stimmen gut mit den exemplarischen ersten Untersuchungen der Empa in [14] überein und belegen die Übertragbarkeit auf Jahresbelastungen. Ähnlich wie die Gebäudereflexionen wirken auch die Wald- und Felsreflexionen nur lokal, besonders in abgeschirmten Gebieten ohne Direktschall und nahe der Reflektoren (Felsen, Wald), und haben auf die Lärmbelastung somit nur eine begrenzte Auswirkung.

Die hier untersuchten Gebäude- und Geländeeinflüsse können somit lokal wichtig sein. Es zeigt sich aber, dass die Berücksichtigung der Gebäude zu unruhigen Lärmkonturen führen kann und dieser hohe Detaillierungsgrad für eine Lärmkartierung eher ungeeignet ist. Weiter gelten die vorliegenden Befunde für eine Situation in ausgeprägter Tallage. Für weniger ausgeprägte Situationen muss das Modul FOREST nicht berücksichtigt werden. Weiter gelten die Befunde für einen Jahresbetrieb in einem Gebiet direkt neben einer Piste, wo Gebäudeeinflüsse besonders ausgeprägt sind. In Gebieten fernab von Flugplätzen oder Flughäfen und insbesondere unter Flugrouten sind die Einflüsse von Gebäudeabschattungen und -reflexionen sowie von Wald- und Felsreflexionen hingegen gering und müssen in einer Jahresbelastung nicht berücksichtigt werden. Schliesslich fanden die Berechnungen im Vergleich zu einer Jahresbelastung für den gesamten LSV-relevanten Bereich in einem sehr kleinen Rechengebiet statt. Mit der heutigen Rechenleistung ist es somit kaum mit vertretbarem Aufwand möglich, eine Jahresbelastung für das gesamte Rechengebiet zu rechnen.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass zur Untersuchung von Spezialfragestellungen die Module FOREST und REFLECT unter Berücksichtigung von Gebäuden wichtige Hinweise und Einsichten liefern können. Für die Lärmkartierung ist dieser Detaillierungsgrad in der Berechnung hingegen nicht empfehlenswert.

8 Abkürzungen, Literatur

8.1 Abkürzungen

AP	Flugverfahren Landung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
D1	Flugverfahren Jets Start mit Nachbrenner, Nachbrenner bei einer festgesetzten abgewickelten Distanz ausgeschaltet (Verwendung von NB, dann Umschalten auf VG)
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
F18	F/A-18 Hornet
FLULA2	Fluglärmrechnungsprogramm der Empa
GF_j	Gewichtsfaktor zur Umrechnung der Bewegungszahlen der Jets im Jahresmittel auf die Bewegungszahlen eines Tages mit durchschnittlichem Spitzenbetrieb (sechs verkehrsreichste Monate)
KGF_j	Gewichtsfaktor zur Umrechnung der Bewegungszahlen der Jets im Jahresmittel auf die Bewegungszahlen eines Tages mit durchschnittlichem Spitzenbetrieb (sechs verkehrsreichste Monate) in dB
K_j	Bewegungszahlkorrektur der Jets
L_{AE}	Ereignispegel
LBK	Lärmbelastungskataster
Leq_j	Mittelungspegel der Jets
Lr_j	Beurteilungspegel für den Lärm des Betriebs auf Militärflugplätzen, mit x = j (Jet), p (Propeller) oder m (Militär)
LSV	Lärmschutz-Verordnung
MEI	Militärflugplatz Meiringen
M_j	Flugbewegungszahlen der Jets der sechs verkehrsreichsten Monate
NB	Flugverfahren Start Jets mit Nachbrenner, Nachbrenner während gesamtem Startvorgang eingeschaltet
N_j	Jährliche Flugbewegungszahl der Jets
N_j	Stündliche Flugbewegungszahl der Jets; Anzahl Flugbewegungen pro Stunde der sechs verkehrsreichsten Monate
RC	Richtcharakteristik (Quellenbeschreibung der Abstrahlcharakteristik eines Flugzeuges)
TIG	Tiger F5
VG	Flugverfahren Start; bei Jets ohne Nachbrenner

8.2 Literatur

- [1] BAFU, 1995. *Mitteilungen zur Lärmschutz-Verordnung (LSV) Nr. 7, Ermittlung der Aussenlärm-Immissionen bei geschlossenem Fenster*. Bundesamt für Umwelt (ehemals Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL), Bern.
- [2] BAFU, BAZL, GS-VBS, 2021. *Leitfaden Fluglärm, Vorgaben für die Lärmermittlung. Umwelt-Vollzug, Lärm Nr. 1625*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), Generalsekretariat des Eidg. Departementes für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS (GS VBS), Bern. URL: www.bafu.admin.ch/fluglaerm-ermittlung (ersetzt Fassung des Leitfadens Fluglärm von 2016).
- [3] ECAC, 2016. *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, 4th Edition (3 Volumes)*. European Civil Aviation Conference (ECAC), Neuilly-sur-Seine Cedex, F. URL: <https://www.ecac-ceac.org/documents/ecac-documents-and-international-agreements>.
- [4] EcoAcoustique SA, 2018. *Grand Projet Vernier-Meyrin-Aéroport, Étude du bruit des avions et des formes urbaines, Rapport final. Réf. 6032/DM-BA*. EcoAcoustique SA, Lausanne.
- [5] Empa, 2002. *Ermittlung des Fluglärms bei Militärflugplätzen (FLB MIL)*. Bericht Nr. 850'138-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [6] Empa, 2010. FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf. <http://www.empa.ch/web/s509/flula2>.
- [7] Empa, 2022: *Dokumentation des sonX Ausbreitungsmodells. Programmversion vom 21. Januar 2022: sonRAIL V6.4.0 bzw. sonARMS V5.4.0 bzw. sonAIR V3.3.0 (vom 25. Januar 2022)*. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] Empa, 2022. *Militärflugplatz Meiringen Lärmbelastungskataster Prognose 2020, Berechnungen 2018/2019*. Bericht Nr. 5214.019717-3. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2022. *sonAIR – First calculation of annual aircraft noise exposure for Geneva 2017 and Zurich 2017*. Bericht Nr. 5214.020920/5214.025794. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Empa, 2022. *F/A-18 Hornet Messkampagne in Meiringen – Teil 1: Dokumentation der Messungen*. Bericht Nr. 5214028449-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [11] Empa, 2022. *F/A-18 Hornet Messkampagne in Meiringen – Teil 2: Modellbildung und Nachsimulation*. Bericht Nr. 5214028449-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [12] LSV, 1986. Lärmschutz-Verordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Juli 2021). SR 814.41. <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19860372/index.html>.
- [13] Meister, J., Schalcher, S., Wunderli, J. M., Jäger, D., Zellmann, C., Schäffer, B., 2021. *Comparison of the aircraft noise calculation programs sonAIR, FLULA2 and AEDT with noise measurements of single flights. Paper No. 388*. Aerospace 8, 16 pp.
- [14] Schlatter F., Wunderli J.M., Köpfli M., 2022. *Relevance of buildings in aircraft noise predictions*. In: Proceedings of the Inter-Noise 2018, Chicago, IL, 26-29 August 2022.
- [15] Wunderli, J.M., Zellmann, C., Köpfli, M., Habermacher, M. Schwab, O., Schlatter, F., Schäffer, B., 2018: *sonAIR – a GIS-integrated spectral aircraft noise simulation tool for single flight prediction and noise mapping*. Acta Acustica united with Acustica 104, 440-451.
- [16] Zellmann, C., Schäffer, B., Wunderli, J.M., Isermann, U., Paschereit, C.O., 2017: *Aircraft noise emission model accounting for aircraft flight parameters*. Journal of Aircraft 55, 682-695.

9 Daten- und Berechnungsgrundlagen

9.1 Bewegungszahlen Flugzeuge mit Strahlantrieb

Tabelle 6: Jährliche Starts und Landungen von Flugzeugen mit Strahlantrieb. Die Bewegungszahlen des TIG entsprechen den Energie-äquivalenten Bewegungen (modifiziert aus [8]).

Starts		RWY10					RWY28					Total	Anteil
RC	Perf	SJ10E	SJ10I	SJ10N	SJ10V	SJ10W	SJ28E	SJ28I	SJ28N	SJ28V	SJ28W		
F18	D1	300	154	14	2	261	450	233	14	2	413	1'843	83%
F18	NB	0	10	0	0	0	0	15	0	0	0	25	1%
F18	VG	44	8	7	20	40	66	10	7	20	60	282	13%
TIG	D1	10	0	1	1	9	16	0	1	1	14	52	2%
TIG	NB	0	5	0	0	0	0	7	0	0	0	11	1%
Total		354	177	22	23	310	532	265	22	23	487	2'213	100%
Route		16%	8%	1%	1%	14%	24%	12%	1%	1%	22%	100%	
Piste				40%					60%			100%	

Original-File: LBKM18_MEI_JET_S_rout.txt; F5: Energie-äquivalente Bewegungen

Landungen		RWY10						RWY28						Total	Anteil
RC	Perf	LJ10C	LJ10E	LJ10I	LJ10N	LJ10V	LJ10W	LJ28C	LJ28E	LJ28I	LJ28N	LJ28V	LJ28W		
F18	AP	43	215	172	43	22	365	64	172	258	65	22	709	2'150	100%
TIG	AP	0	1	1	0	0	2	0	1	1	0	0	3	10	0%
Total		43	216	173	43	22	367	64	173	259	65	22	712	2'160	100%
Route		2%	10%	8%	2%	1%	17%	3%	8%	12%	3%	1%	33%	100%	
Piste				40%						60%				100%	

Original-File: LBKM18_MEI_JET_L_rout.txt; F5: Energie-äquivalente Bewegungen

[be5214027323_MEI_Reflexionen_Anhang_V1.xlsx]

9.2 Ermittlung des Beurteilungspegels L_{rj}

Der nachfolgende Text wurde [8] entnommen und leicht modifiziert. Der Beurteilungspegel L_{rj} für die Flugzeuge mit Strahlantrieb wird wie folgt berechnet. Aus den Bewegungsdaten (Monatsstatistiken, d.h. Bewegungsverteilung über die 12 Monate eines Jahres) werden die Flugbewegungszahlen N_j des ganzen Betriebsjahres (52 Wochen zu 5 Betriebstagen bzw. 260 Tage zu 12 Stunden) und die Flugbewegungszahlen M_j der sechs verkehrsreichsten Monate bestimmt. Aus M_j werden die stündlichen Flugbewegungen n_j berechnet, indem M_j auf 130 Tage (26 Wochen zu 5 Betriebstagen) und 12 Tagesstunden bezogen werden:

$$\text{Gleichung 1} \quad n_j = \frac{M_j}{12 \cdot 130}$$

Aus dem Verhältnis von M_j und der jährlichen Flugbewegungszahl N_j ergibt sich der Gewichtungsfaktor GF_j bzw. der dem Gewichtungsfaktor entsprechende additive Term KGF_j . Der Gewichtungsfaktor gibt an, wie sich der durchschnittliche Flugbetrieb während der sechs verkehrsreichsten Monate zum durchschnittlichen Betrieb im Jahresmittel verhält.

$$\text{Gleichung 2} \quad GF_j = \frac{2 \cdot M_j}{N_j} \quad KGF_j = 10 \cdot \log(GF_j) \text{ [dB]}$$

Die Bewegungsdaten dokumentieren die Routenbelegung und den Flottenmix des betrachteten Betriebsjahres. Sie werden mit sog. Bewegungsstatistiken beschrieben, d.h. Kreuztabellen, welche in den Spaltenköpfen die An- oder Abflugrouten, in den Zeilenköpfen die Flugzeugtypen und in den Feldern die Anzahl

Flugbewegungen pro Typ und Route enthalten. Diese Daten bilden die Grundlage, um aus den Ergebnissen der Basissimulation (sog. *Footprints*) mittels Superposition (energetischen Addition) die Fluglärmbelastung zu ermitteln. Aus den Bewegungsdaten der Flugzeuge mit Strahlantrieb wird der dem mittleren Jahresbetrieb entsprechende Mittelungspegel Leq'_j ermittelt. Daraus wird der Mittelungspegel Leq_j des durchschnittlichen Flugbetriebs während des mittleren Spitzenbetriebs (sechs verkehrsreichste Monate) unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren wie folgt berechnet:

$$\text{Gleichung 3} \quad Leq_j = Leq'_j + KGF_j$$

Diese Art der Berechnung des Mittelungspegels berücksichtigt die Routenbelegung und den Flottenmix des gesamten Betriebsjahres und die Bewegungszahlen des durchschnittlichen Spitzenbetriebs während der sechs verkehrsreichsten Monate.

Der Teilbeurteilungspegel Lr_j für den Lärm des Verkehrs von Flugzeugen mit Strahlantrieb ist die Summe des A-bewerteten Mittelungspegels Leq_j und den Pegelkorrekturen K_0 und K_1 :

$$\text{Gleichung 4} \quad Lr_j = Leq_j + K_0 + K_1$$

Die Pegelkorrektur K_0 (in dB) beträgt hierbei

$$\text{Gleichung 5} \quad K_0 = -8$$

Die Pegelkorrektur K_1 (in dB) wird anhand der jährlichen Flugbewegungszahl N_j der Flugzeuge mit Strahlantrieb wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \text{Gleichung 6} \quad K_1 &= 0 && \text{für } N_j < 15'000 \text{ Bewegungen} \\ K_1 &= 10 \cdot \log \frac{N_j}{15'000} && \text{für } N_j \geq 15'000 \text{ Bewegungen} \end{aligned}$$

Im vorliegenden Fall entspricht der resultierende Lr_j dem Teilbeurteilungspegel des militärischen Betriebs Lr_m bei rein militärischem Betrieb, bzw. dem Beurteilungspegel Lr für den Lärm von Militärflugplätzen.

9.3 Einstellungen des sonX Rechenkerns

```
////////////////////////////////////  
//  
// sonX-Parameter.txt - Reference setting for sonAIR  
// =====  
//  
////////////////////////////////////
```

```
// Table of contents  
// =====  
//  
// 0.) Change history since January 2015  
// 1.) General parameters for in- and output control  
// 2.) General parameters for the setup of the calculation model, sorted according the modules:  
//   Basic - Meteo - Reflect - Forest  
// 3.) Spezific parameters for sonRAIL  
// 4.) Spezific parameters for sonARMS  
// 5.) Spezific parameters for sonAIR
```

```
// Note: recommendet parameter settings are given for the following applications:  
// =====  
// - S = Survey (quick calculation with reduced accuracy)  
// - E = Engineering (balanced)
```

```
// - P = Precision (high accuracy, but longer calculation times)
// - D = Debug (with additional information for validation purposes)
```

```
////////////////////////////////////
//
// 0.) Change history since January 2015
// -----
//
// 15-Apr-15: phm Neuer Parameter MaxWarnPercent (darf fehlen)
// 17-Apr-15: phm Neuer Parameter LiftRcvBelowGround (darf fehlen; SonRail, sonAir, nicht sonArms)
// 24-Aug-15: phm Neuer Parameter AatmCorrBroadBand (Luftdämpfung nicht für Terzbandmittenfrequenz)
// 07-Sep-15: phm Neuer Parameter OutPutsSrcRcv
// 27-Okt-15: phm Parameter MeteoModify erweitert auf Wert 2
// 25-Apr-16: Neuer Parameter ResMeteoMinMax
// 07-Dez-18: Neuer Parameter ForestReflectors_Reduction
// 25-Nov-21: Neue Parameter RockGrid und ForestGrid
//
////////////////////////////////////
```

```
////////////////////////////////////
//
// 1.) General parameters for in- and output control
// =====
```

```
// -----
InputTriage      0      S=E=P=D=0
DxfMaxHeightGnd  80 m
DxfMinHeightGnd  0.001 m
DxfMaxHeightEdges 80 m
DxfMinHeightEdges 0.001 m
// -----
FileNameNumbers  0      S=E=P=D=0
// -----
PlotRelief       0      S=E=P=0 D=1
// -----
LogSize          1      S=E=P=1 D=2oder3
MaxWarnPercent   10 %
// -----
LinLogProfilesHeight 200 m
LinLogProfilesDelta  0.1 m
WriteAbsMeteoProfiles 0      S=E=P=0 D=0oder1
// -----
ErrorPopUp       0      S=E=P=0 D=1
```

```
////////////////////////////////////
//
// 2.) General parameters for the setup of the calculation model, sorted according the modules:
//   Basic - Meteo - Reflect - Forest
//
=====
```

```
// -----
AccelTrigonom    16384
AccelWofz        2000
// -----
OptimizeGndSeg   1      S=E=P=D=1
HarmonoiseDist1Rmax 50 m S=E=P=D=50
HarmonoiseDist2Rmax 500 m S=E=P=D=500
HarmonoiseR1     0.25 m S=E=P=D=0.25
HarmonoiseR2     1 m   S=E=P=D=1
HarmonoiseDist1Dsegm 20 m S=E=P=D=20
```

```

HarmonoiseDist2Dsegm 200 m   S=E=P=D=200
HarmonoiseD1         5 m     S=E=P=D=5
HarmonoiseD2         50 m    S=E=P=D=50
// -----
MinDistRecBarr       0 m     S=E=P=D=0
LiftRcvBelowGround   0 m
// -----
PathDmin             0.33 m
// -----
CoherenceLoss        1       S=E=P=D=1
// -----
ReliefSmoothing      0       S=E=P=D=0
// -----
[MeteoSettings]
// -----
AatmCorrBroadBand    1
AatmMorePrecision    1
AatmMaxHeight        10000 m
AatmDelta            100 m
// -----
FlowResSigma         300
// -----
TerrainTypeGrid      5 m     S=10 E=5 P=D=2
TerrainTypeGridLarge 50 m
// -----
ForestHeight         20 m
FoliageDistLimit     200 m
// -----
[MaxDistance]
// -----
SingleBarrierMaxAtt  25 dB
MultiBarrierMaxAtt   25 dB
BarrierUsePierce     0
AdditionalGroundReflections 0
NegZobstacles 1

// -----
// Raytracing
// -----
RtDeltaX             2 m     S=E=P=D=2
MeteoModify          2       S=E=P=D=2
SimpleMeteo          1       S=E=P=D=1
MeteoDmax            15 dB
MeteoDmin            -20 dB
// -----
ReflUebergangsFrequenz 1.0    S=1 (only incoherent) E=1 P=300 D=300
ReflSpacingFactorKohaerent 0.11 S=E=P=D=0.11
ReflSpacingInkohaerent 1.0    S=E=P=D=1
ReflIterationsWalls   2       S=1 E=2 P=3 D=2
ReflZugskoerper       0       S=0 E=0 P=1 D=1
ReflMaxDist           500 m    S=300 E=D=500 P=600 für SonArms s. Hinweis oben.
ReflLimit             0.001
SourceConst          100
ReflLogVisibility     0
// -----
maxDistForestPropagation 5000 m   S=1000 E=2000 P=5000 D=2000
maxDistRockPropagation  5000 m   S=1500 E=3000 P=5000 D=3000
maxRockReflAngle        1.3963 corresponds to 80°   S=E=P=D=1.3963
minDistRockReflector    20 m     S=E=P=D=20
RasterRatioRock         10 times RockGrid   S=E=5=5=5
DiffusThreshold         0.2       S=0.3 E=D=0.2 P=0.1
RockGrid                5 m
ForestGrid              25 m
ForestReflectors_Reduction 3
ForestRimPointsDist     25 m     S=100 E=25 P=5 D=25
LogReflectionPoints     0       S=E=P=0 D=1

```

```

ForestMaxHorAngle 1.5707963 = Pi/2 = 90°      S=E=P=D=1.5707963
CliffReflectorsOn 1                          S=E=P=D=1
ForestReflectorsOn 1                          S=E=P=D=1
MinForestDepth 20 m                          S=E=P=D=20
ForestReflectors_NrOfSpheres 350
ForestReflectors_Reduction 5

```

```

////////////////////////////////////
//
// 3.) Spezific parameters for sonRAIL
// =====
//
// -----
OutPutsDetail 0 S=E=P=0 D=1
OutPutsSummary 1 S=E=P=1 D=1
OutputDbPrecision 2 S=E=P=D=2
OutSuppressDb 0.3 dB S=0.9 E=0.3 P=0.1 D=0.3
OutSuppressBelow 30 dB S=40 E=30 P=20 D=30
InpMeteoSuppress 0 S=E=1 P=D=0
// -----
LineSourcePointsDistFOREST 25 m S=100 E=25 P=5 D=25
LineSourcePointsDistREFLECT 10 m S=25 E=10 P=5 D=10
LineSourcePointsDistTunnel 2 m S=2 E=2 P=1 D=2
LineSourcePointsDistLowBASIC 1 m S=2 E=1 P=1 D=1
LineSourcePointsDistUppBASIC 100 m S=200 E=100 P=50 D=100
LineSourcePointsDistSlopeBASIC 0.1 S=0.1 E=0.1 P=0.1 D=0.1
LineSourcePointsDistLowMETEO 10 m S=20 E=10 P=5 D=5
LineSourcePointsDistUppMETEO 100 m S=200 E=100 P=50 D=100
LineSourcePointsDistSlopeMETEO 0.1 S=0.1 E=0.1 P=0.1 D=0.1
// -----
NearSourceMaxDist 10 m S=10 E=10 P=25 D=10
NearSourceRecords 2000000000 S=100 E=2000000000 P=2000000000 D=100

```

```

////////////////////////////////////
//
// 4.) Spezific parameters for sonARMS
// =====
//
// -----
ArmsWriteInternalData 0 S=E=P=0 D=1
ArmsWriteDetailsP 1 S=E=P=0 D=1
ArmsWriteDetailsR 0 S=E=P=0 D=1
ArmsWriteTimeResponse 0 S=E=P=0 D=1
DeleteOutput 0 S=E=P=1 D=0
LogDominantReflector 1 S=E=P=0 D=1
// -----
ArmsTimeResponseStep 0.010 (=10ms)
ArmsTimeResponseLength 1000 (1000 x ArmsTimeResponseStep = 10 sec total time)
ArmsDirectAtoMaxAF 9 dB
// -----
REFLECTwithMETEO 2 S=E=P=D=2
// -----
Abuild 0.0
ResMeteoMinMax 0

```

```

////////////////////////////////////
//
// 5.) Spezific parameters for sonAIR
// =====
//
// -----
//OutPutsDetail 1 S=E=P=0 D=1 ==> wird schon unter 3) definiert!
//OutPutsSummary 1 S=E=P=1 D=1 ==> wird schon unter 3) definiert!
//OutputDbPrecision 2 S=E=P=D=2 ==> wird schon unter 3) definiert!

```

SourceDimension 50 m
AirAttenuationOutput 1
OutPutsSrcRcv 0 S=E=P=0 D=1
DeltaSlope 0.1
AatmOnlyBASIC 0
MaxThreads 0