

## Dokumentation zum Fluglärm-Berechnungsmodell sonAIR

Programmversion: sonAIR Emissionsdatenbank 2019\_11 (Stand 28. November 2019)  
sonAIR Ausbreitungsmodell, Version 3.0.0 (Stand 21. März 2019)  
sonAIR Simulationskern Version 2.8.E+ (Stand Dezember 2019)

Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 18

### Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangslage
  - 2 Modellaufbau / Konzept
  - 3 Implementation in GIS
  - 4 Validierung
  - 5 Weiterführende Dokumentationen
- Beilagen

### Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm / NIS, CH-3003 Bern  
Auftragnehmer: Empa, Abteilung Akustik / Lärmminderung  
Autoren: Jean Marc Wunderli, Christoph Zellmann  
Begleitung BAFU: Kornel Köstli  
Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.  
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

---

Dübendorf, 07. Februar 2020

Der Verfasser:



Dr. Christoph Zellmann

Abteilung Akustik / Lärmminderung

Der Abteilungsleiter:



Dr. Jean Marc Wunderli

## Zusammenfassung

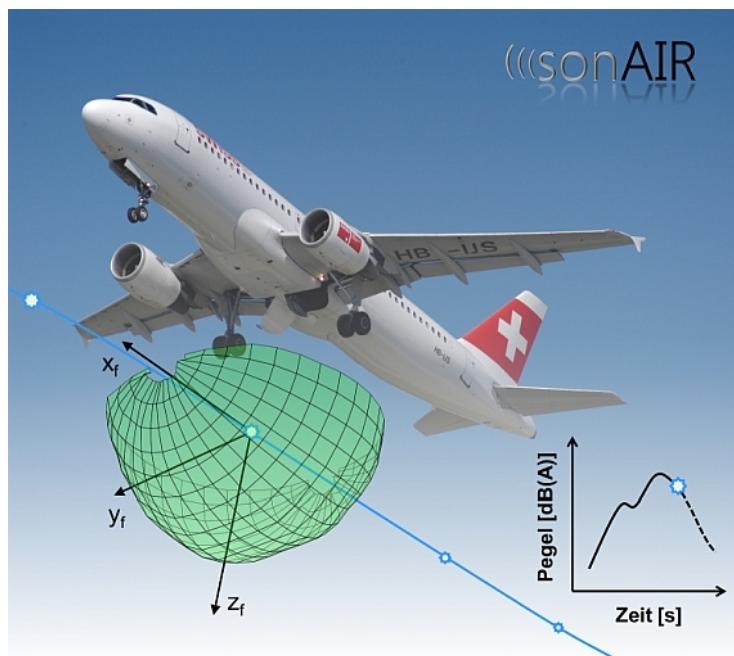
sonAIR ist ein Berechnungsmodell für Fluglärm, das an der Empa Abteilung Akustik/Lärmreduktion entwickelt wurde und laufend aktualisiert wird. Kernstück von sonAIR ist ein akustisches Emissionsmodell zur detaillierten Beschreibung der richtungsabhängigen Schallemissionen in Abhängigkeit des Flugzustandes (Leistungssetzung und Flugkonfiguration wie Klappen- und Fahrwerkstellung). Die Einzelflugsimulation erfolgt nach einem Zeitschrittverfahren und kombiniert das Emissionsmodell mit dem Schallausbreitungsmo dell sonX der Empa. Das Gesamtmodell kann zum einen die Lärmbelastung auch in grösseren Abständen vom Flughafen mit hoher Genauigkeit ausweisen. Zum anderen kann das Modell dazu verwendet werden, lärmarme An- und Abflugverfahren zu entwickeln und so einen Beitrag zur Reduktion der Lärmelastung zu liefern.

sonAIR existiert als wissenschaftliches Modell auf Matlab-Basis und als Dienstleistungstool in Form einer Implementation in ein geographisches Informationssystem (GIS). Die GIS-Integration von sonAIR wurde im Auftrag des BAFU durch die Firma n-Sphere realisiert. Die Benutzeroberfläche von sonAIR wurde als Esri ArcGIS-basierte Lösung aufbauend auf den Produkten D-gen und D-noise von n-Sphere implementiert. Die Lösung ermöglicht die Vereinheitlichung und integrierte Ausführung von Datenimport, Datenaufbereitung, Lärmrechnung, sowie Visualisierung und Auswertung der Resultate. Eine spezifische Schnittstelle dient der Datenübergabe und Ansteuerung der sonAIR-Rechenkerne für Ausbreitungsrechnungen und *Footprint*-Berechnungen. Datengrundlage dieser Berechnungen sind in erster Linie Geodaten wie Flugbahnen, Terrain, Informationen zur Bodenbedeckung, Gebäudearten, etc.

Das sonAIR Dienstleistungstool wird für Lärmrechnungen nach Schweizerischer Lärmschutz-Verordnung oder zu Forschungszwecken gratis zur Verfügung gestellt und kann für andere Anwendungen in Lizenz erworben werden.

## Disclaimer

sonAIR wird zum aktuellen Zeitpunkt durch das BAFU noch nicht als Lärmrechnungsprogramm empfohlen. Die Resultate sind durch einen Akustikexperten zu plausibilisieren. Die Anwendung und Interpretation der Resultate liegt in der Verantwortung des Benutzers.



## 1 Ausgangslage

sonAIR wurde als Forschungswerkzeug entwickelt und wird laufend weiterentwickelt. In Zusammenarbeit mit der Firma n-Sphere AG wurde sonAIR zu einem GIS-basierten Dienstleistungswerkzeug zur Berechnung von Jahresbelastungen erweitert. Diese Programmversion wird einem breiteren Nutzerkreis zugänglich gemacht. sonAIR wurde und wird im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftverkehr vom Schweizerischen Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL gefördert. Zusätzliche Unterstützung erfuhr bzw. erfährt das Projekt durch die Empa, die Flughafen Zürich AG, den internationalen Flughafen Genf (AIG), das Amt für Verkehr des Kantons Zürich sowie skyguide, im Rahmen des Projektes CHIPS. Die Umsetzung des Berechnungsmodells in einem geographischen Informationssystem GIS wird durch das Schweizerische Bundesamt für Umwelt BAFU finanziert. Ein Überblick zu den Teilprojekten der sonAIR Entwicklung ist in der Beilage angefügt.

## 2 Modellaufbau / Konzept

### 2.1 Emissionsmodelle

Als Methode zur Erstellung der akustischen Emissionsmodelle wurde die multiple lineare Regression gewählt. Mit diesem Ansatz gelingt es, die spektralen Schallemissionen in Abhängigkeit der Richtwirkung sowie des Flugzustandes zu beschreiben. Dies wäre ohne den statistischen Ansatz nicht möglich, da sich die einzelnen Effekte der Flugparameter überlagern. Für Grossflugzeuge wurde zusätzlich eine Methode entwickelt, um die zurückgerechneten Schallemissionspegel  $L_{em}$  in die beiden Hauptschallquellen Umströmung und Antrieb aufzuteilen. Dies ermöglicht eine präzisere Modellierung der beiden Quellenarten mit den jeweils massgeblichen physikalischen Gesetzen.

#### 2.1.1 Grossflugzeuge

##### Umströmungsmodell

Das Umströmungsmodell  $\hat{L}_{em,afm}$  ist in Gleichung (1) mit seinen Modellparametern zusammengefasst. Unter der Voraussetzung, dass FDR<sup>1</sup>-Daten verfügbar sind, ist  $\hat{L}_{0,afm}$  neben den transformierten aeroakustischen Größen Machzahl  $Ma$  und Dichte  $\rho$  auch in Abhängigkeit der Konfiguration beschrieben. Hierzu gehören die Einstellung des Hochauftriebssystems (*Flaps*), die Fahrwerke (*Gears*) und die Störklappe (*SB*). Die Richtwirkung wird für die Umströmungsquellen als rotationssymmetrisch angenommen ( $\Delta\hat{L}_{\theta,afm}(\theta)$ ).

$$\hat{L}_{em,afm} = \hat{L}_{0,afm}(Ma, \rho, Flaps, Gears, SB, Proc) + \Delta\hat{L}_{\theta,afm}(\theta) \quad (1)$$

##### Antriebsmodell

Das Antriebsmodell  $\hat{L}_{em,eng}$  ist in Gleichung (2) mit seinen Modellparametern zusammengefasst.  $\hat{L}_{0,eng}$  ist abhängig von der  $Ma$ , der Dichte  $\rho$  und der Drehzahl des Triebwerks  $N1$  (Polynomansatz 2. Grades). Die longitudinale Richtwirkung ist über  $\Delta\hat{L}_{\theta,eng}$  modelliert. Die Art und Weise, wie die Triebwerke am Flugzeug montiert sind (unter den Flügeln, am Heck) führt zu Reflexionen des Antriebsgeräusches am Flugzeug und somit zu einer lateralen Richtwirkung  $\Delta\hat{L}_{\varphi,eng}$ . Zusätzlich hängt die gesamte Richtwirkung von  $N1$  ab, das heisst die Richtwirkung ist eine Funktion der Triebwerksleistung.

$$\hat{L}_{em,eng}(f) = \hat{L}_{0,eng}(Ma, \rho, N1, N1^2) + \Delta\hat{L}_{\theta,eng}(\theta, N1, N1^2) + \Delta\hat{L}_{\varphi,eng}(\varphi, N1) \quad (2)$$

<sup>1</sup> FDR = Flight Deck Recordings. Diese beinhalten im realen Flugbetrieb aufgezeichnete Parameter wie die Triebwerksdrehzahl  $N1$ , Umgebungsbedingungen, Lagewinkel etc.

Je nachdem, welche Flugparameter zur Erstellung der Emissionsmodelle vorhanden waren oder verwendet werden, können unterschiedlich detaillierte Regressionsmodelle erstellt werden:

- 3D:** Das bestverfügbare Modell mit Einfluss der Konfiguration und dreidimensionalen Richtwirkung. Dieses Modell kann derzeit nur für die Swiss-Typen erzeugt und angewandt werden, bei denen FDR-Daten verfügbar sind. Diese Variante wird für detaillierte Vergleiche von Einzelflügen und zur Optimierung von lärmarmen An- und Abflügen empfohlen.
- 3Dred:** Reduziertes Modell ohne Einfluss der Konfiguration. Der Einfluss der typischen Konfiguration ist durch deren *Ma*-Abhängigkeit im Mittel dennoch sehr gut abgebildet. Diese Variante wird als Standard für Jahresbelastungen empfohlen, da die durchschnittliche Konfiguration für einen Flugbetrieb wie in Zürich bereits im Modell abgebildet ist. Im Normalfall ist die Konfiguration auch für die Jahresberechnung nicht verfügbar.
- 2Dred:** Reduziertes Modell ohne Einfluss der Konfiguration und zweidimensionalen Richtwirkung. Diese Variante könnte Verwendung finden, falls die Messdaten für die Identifikation der lateralen Richtwirkung nicht ausreichen. Sie wird auch verwendet, um neue Emissionsmodelle für FLULA2 zu erzeugen oder Kenndaten zu vergleichen [5].
- Flugphasen:** Für Flugzeugtypen, für die kein N1 verfügbar ist oder welche aus der SANC-DB bereits basierend auf Flugphasen mit unterschiedlichen Emissionen beschrieben werden, können vereinfachte Emissionsmodelle erstellt werden. Sie unterscheiden nicht zwischen Umströmungs- und Antriebslärm, basieren auf einem Richtwirkungsansatz in 2D oder 3D und enthalten als Ersatz für die Flugparameter die aktuelle Flugphase. Je nach Datengrundlage können zusätzlich weitere Flugparameter, wie z.B. die Machzahl oder die Luftdichte, in die Emissionsmodelle einfließen. So wurde das Modell für die B788 auf Basis der Machzahl, der Dichte und der Flugphasen Initial Climb, Continous Climb, Initial Approach und Final Approach erzeugt.

## 2.1.2 Kleinluftfahrzeuge und Helikopter

Die Emissionsmodelle von Kleinluftfahrzeugen und Helikoptern basieren auf Regressionsmodellen, die die dreidimensionale Richtwirkung in Abhängigkeit der Flugphase (*Proc*) modellieren. Es wurde zwischen den drei Flugphasen Start, Überflug und Landung unterschieden. Eine Unterscheidung zwischen Umströmungs- und Antriebslärm war nicht möglich, daher kann das Emissionsmodell anhand einer Gleichung beschrieben werden.

$$\hat{L}_{em} = \hat{L}_0(Proc) + \Delta\hat{L}_\theta(\theta, Proc) + \Delta\hat{L}_\varphi(\varphi, Proc) \quad (3)$$

Auch die Emissionsmodelle für Kleinluftfahrzeuge und Helikopter wurden zusätzlich mit einer zweidimensionalen Richtwirkung modelliert und erzeugt. Es wird jedoch die Verwendung der dreidimensionalen Richtwirkung empfohlen.

## 2.2 Quellenvermessungen

Die akustischen Emissionsmodelle werden anhand von Messungen von Flugereignissen im realen Betrieb erstellt. Nachfolgend werden die verschiedenen bisher durchgeführten Messkampagnen kurz vorgestellt:

- 1) In den Jahren 2013 und 2014 wurden Messungen des realen Flugbetriebes im Nah- und Fernbereich des Flughafens Zürich durchgeführt, um die wichtigsten in der Schweiz verkehrenden Grossflugzeuge zu erfassen. Insgesamt wurden rund 2'600 Überflüge mit jeweils acht Mikrofonen im direkten Nahbereich des Flughafens gemessen, und während sechs Monaten rund 11'000 Überflüge im Fernbereich des Flughafens an zehn Messstellen vom Pfannenstiel bis nach Winterthur als auch Bellikon (Aargau) aufgezeichnet. Für Swiss und Edelweiss Flüge waren FDR-Daten zugänglich – eine

ideale Grundlage, um die akustischen Messungen mit dem jeweiligen Flugzeugzustand zu korrelieren. Für Flugzeuge anderer Fluggesellschaften wurden neben Radardaten im Nahbereich des Flughafens ergänzend ein optisches Ortungssystem sowie ein spezielles Auswertverfahren eingesetzt, welches die Bestimmung der Triebwerktdrehzahl aus den akustischen Messungen der an- und abfliegenden Luftfahrzeuge erlaubt.

- 2) Im Juni 2016 wurden auf dem Flugplatz Grenchen Kleinflugzeuge und Helikopter vermessen. Neben dem realen Flugbetrieb wurden auch gezielte Helikopterflüge durchgeführt und zusätzlich durch das BAZL organisierte An- und Abflüge von Flächenflugzeugen erfasst. Zusätzlich zu akustischen Messungen an elf Mikrofonpositionen wurden Positionsdaten durch das photogrammetrische Institut der ETH Zürich aufgezeichnet. Die Flugbahnverfolgung der Flächenflugzeuge und Helikopter erfolgte dabei mittels zweier manuell bedienter Theodoliten. Als Resultat wurden Flugphasen-Emissionsmodelle von sieben Flächenflugzeugen und vier Helikoptern erstellt.
- 3) Schliesslich wurde ein Monitoringsystem für weitgehend automatisierte Fluglärmessungen mit insgesamt zehn autonomen Messstationen entwickelt. Das System wurde erfolgreich getestet und in den Jahren 2017 und 2018 an insgesamt 37 Standorten rund um den Flughafen aufgebaut, um Messdaten der neuen Flugzeugtypen Bombardier BCS1 und BCS3 sowie der Boeing B77W zu erfasst. Im Zuge der Messkampagne wurden außerdem die Emissionsmodelle der Airbus A320-Familie aktualisiert, welche seit 2016 eine aerodynamische Anpassung an der Flügelunterseite zur Unterdrückung auffälliger Reintonkomponenten installiert haben (sog. Wirbelgeneratoren).

Die aus den verschiedenen Messkampagnen erzeugten Emissionsmodelle für sonAIR sind in der Beilage dokumentiert.

## 2.3 Ausbreitungsmodell

Das Ausbreitungsmodell, welches in sonAIR eingesetzt wird, stellt eine abgeleitete Variante des sonX-Rechenmodells dar. Der Frequenzbereich wurde für Fluglärm anwendungen auf die Terzen von 25 Hz bis 5 kHz beschränkt.

Das sonX-Ausbreitungsmodell ist in vier Module unterteilt. Das Berechnungsmodul BASIC wird für jede Ausbreitungsrechnung benötigt. In diesem Modul wird die Schallausbreitung zwischen Quelle und Empfänger in einem Vertikalschnitt unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre berechnet. Die Berechnung der Luftpärfung sowie der Walddämpfung wird gemäss der ISO-Norm 9613 vorgenommen. Die Berechnung des Bodeneffektes erfolgt ausgehend von einem Ansatz für Kugelwellenreflexionen an ebenem, homogenem Terrain. Mittels einer Fresnelzonen-Betrachtung wird das Modell für unebenes Gelände und wechselnde Bodeneigenschaften erweitert. Zusätzlich werden Kohärenzverluste zwischen Direktschall und Reflexion in Abhängigkeit der Frequenz und der Ausbreitungsdistanz abgebildet.

Die übrigen Module können zur Verfeinerung der Berechnungsresultate zugeschaltet werden. Im zweiten Modul METEO werden meteorologische Effekte auf die Schallausbreitung berechnet. Als Eingangsdaten werden dazu eine Windrichtung, vertikale Profile des Windes, die Temperatur und die Feuchte benötigt. Werden Absolutprofile vorgegeben, so gelten diese einheitlich im ganzen Rechengebiet. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Profile nach einem LinLog-Ansatz zu parametrisieren, was es erlaubt, die Profile zusätzlich je nach Untergrund zu variieren. Diese Variante wird aber in der Regel für terrestrische Quellen verwendet und kommt für Fluglärm nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Das Modul METEO berücksichtigt verschiedene Einflüsse des Wetters auf die Schallausbreitung. Zum einen wird der Einfluss von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck auf die Luftabsorption bestimmt. Zum anderen werden die resultierenden Schallgeschwindigkeitsprofile in einem Schallstrahl-Verfolgungs-Algorithmus eingesetzt, welcher Veränderungen bei den Hinderniswirkungen sowie die Ausbildung von akustischen Schattenzonen ermittelt. Die

Pegelabnahme wird dabei aus geometrischen Parametern des Schallstrahles abgeleitet, welcher dem Empfänger am nächsten kommt. Neben einzelnen Wettersituationen können auch direkt Wetterstatistiken bearbeitet werden. Es werden dazu mehrere Einzelsituationen definiert und mit einer Auftretenshäufigkeit ergänzt. Als Resultat wird ein mit der Auftretenshäufigkeit gewichtetes energetisches Mittel der für jede Einzelsituation berechneten Immissionen ausgegeben. Entsprechend dem Day-Evening-Night-Konzept, welches bereits in sonRAIL verwendet wurde, können die Gewichtungen der einzelnen Wettersituationen für die Zeiträume Tag, Abend und Nacht separat definiert werden.

Das dritte und vierte Modul behandeln Pegelerhöhungen als Folge von Reflexionen. Im Modul REFLECT werden Reflexionen an Gebäuden und anderen künstlichen Objekten bestimmt, im Modul FOREST werden diffuse Reflexionen an Waldrändern und Felswänden berechnet.

Für eine ausführliche Zusammenstellung der Ausbreitungsalgorithmen sowie der notwendigen Eingangsparameter wird auf die Dokumentation von sonX verwiesen (siehe Kapitel 5).

## 2.4 Einzelflugsimulation

Bei der Fluglärmimulation kommt ein Zeitschritt-Verfahren zur Anwendung, welches einzelne Flüge auf individuellen Flugbahnen im Modell nachbildet. In feiner zeitlicher Auflösung fließen für die Flugereignisse Position und Orientierung im Raum sowie Schubsetzung und Konfiguration ein. Dies erlaubt es, die Lärmbelastung an jedem Immissionspunkt detailliert auszuweisen und neben Spektren auch Pegel-Zeit-Verläufe zu ermitteln.

Im wissenschaftlichen Tool wird vorgängig die Fluggeometrie diskretisiert und für jede Quellenpunkt-Empfängerpunkt-Kombination eine Ausbreitungsrechnung mit sonX gestartet. Bei der Einzelflugsimulation wird anschliessend für jede Quellenpunkt-Empfängerpunkt-Kombination die Emission in Abstrahlrichtung berechnet und davon die Ausbreitungsdämpfung subtrahiert. Beim Empfangspunkt werden die Beiträge laufzeitrichtig addiert (siehe Abbildung 1).

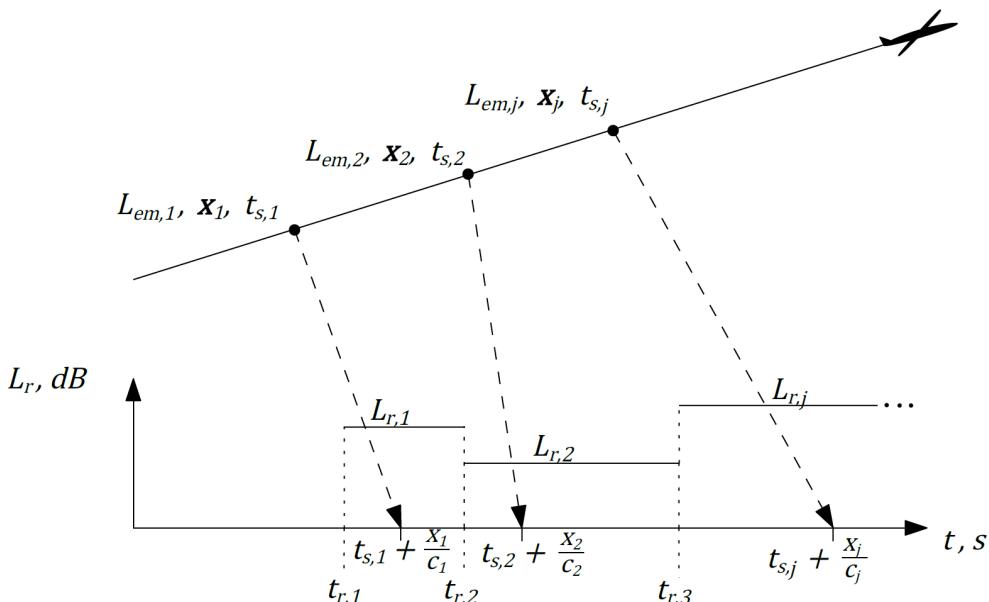


Abbildung 1: Darstellung des Zeitschritt-Verfahrens. Aufgrund der Bewegung der Quelle resultieren uneinheitliche Zeitschritte beim Empfänger (Quelle: Zellmann et al. 2018).

## 3 Implementation in GIS

### 3.1 Emissionsdatenbank

Für das Dienstleistung-Simulationstool (DL) und als potentielles Austauschformat wurde eine Emissionsdatenbank in Form einer Lookup-Tabelle angelegt. Für das DL ermöglicht das Konzept einer Lookup-Tabelle eine einfache Schnittstelle, mit der Jahresbelastungen effizient berechnet werden können.

#### Datenbankstruktur

Die Schallemissionspegel der beiden Teilschallquellen-Modelle werden für alle benötigten Datenbereiche in diskreten Winkelschritten vorhergesagt und in zwei separaten Tabellen abgespeichert. Um den Speicherbedarf zu reduzieren, sind die physikalischen Werte über IDs mit entsprechenden Zuordnungs-Tabellen verknüpft (Tabelle 1). Pro Kombinationsmöglichkeit aller Parameter wird jeweils ein Emissionsspektrum mit 24 Werten abgelegt (Le1 bis Le24).

Die Emissionsmodelle werden für einen eingeschränkten Datenbereich in die Datenbank exportiert, der sich aus dem Regressionsdatensatz ergibt mit dem die Emissionsmodelle erstellt wurden. Sobald die Wertebereiche der Emissionsdatenbank überschritten werden, wie etwa bei grossen Höhen mit niedriger Dichte, werden die Spektren der nächstliegenden Parameterwerte verwendet, d.h. die Werte werden konstant gelassen und nicht extrapoliert.

Die Struktur der Emissionsdatenbanken für Antrieb und Umströmung ist in Zuordnungstabellen definiert, wobei die Auflösung (Schrittweite) jedes Parameters konstant ist. Konzeptionell erlaubt die Datenstruktur eine flexible Wahl an Modellparametern und Wertebereichen. Somit können nicht nur verschiedene Modellvarianten für zivile Grossflugzeuge mit reduziertem Parametersatz in der Datenbank abgelegt werden, sondern auch Modelle aus der SANC-DB oder aus Messkampagnen für Kleinluftfahrzeuge, Helikopter und Multikopter.

*Tabelle 1: Zuordnungstabellen beispielhafter Modellparameter für Grossflugzeuge (\* Maximale Werte für N1 je nach Flugzeugtyp)*

#### Flugzeug-Typen mit Eigenschaften

Typ	1
ID	1 (int16)
Typ	A320V
Art	G
S/L	S
Triebwerk	V2500
...	

#### Beschreibung der Emission als spektrale Richtcharakteristik (3D)

Theta	16	Phi	10	Terzband	24
ID_Theta	int8	ID_Phi	int8	ID_Terz	int8
Values	20°:10°:170°	Values	0°:10°:90°	Values	25 Hz-5 kHz

#### Flugparameter (kontinuierlich)

Machzahl	10	Rho	7	N1	25
ID_Ma	int8	ID_Rho	int8	ID_N1	int8
Values	0.17:0.03:0.44	Values	0.9:0.05:1.2	Values	25:3:100*

#### Konfiguration (kategorisch)

Gears	2	Flaps	5	Speedbrakes	2	Proc	2
ID_Gears	int8	ID_Flaps	int8	ID_Speedbrakes	int8	ID_Proc	int8
Values	0:1	Values	0:1:4	Values	0:1	Values	0:1

Die Emissionsdatenbank ist im DL so eingebunden, dass sämtliche Parameter interpoliert werden können. Interpolationen erhöhen jedoch den Rechenaufwand, weshalb alternativ der nächstgelegene Wert verwendet werden kann. Damit es durch die Diskretisierung der Flugparameter nicht zu Sprüngen im Emissionspegel kommt, werden jedoch alle Modellparameter in Tabelle 2 interpoliert.

*Tabelle 2: Interpolationseinstellungen für das DL*

Interpolation	
Parameter	Interpoliere
IDTheta	1
IDPhi	1
IDMa	1
IDRho	1
IDN1	1

### Physikalische Schnittstelle

Die physikalischen Grundlagen der in der Datenbank abgespeicherten Schallemissionspegel ( $L_{em}$ ) werden nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst.

- Die in den Lookup-Tabellen gespeicherten Schallemissionspegel ( $L_{em}$ ) sind unbewertet und in der Einheit dB. Der  $L_{em}$  ist äquivalent zum Schalleistungspegel  $L_w$ , aber beinhaltet bereits die Richtwirkung  $D$  der unbewegten Schallquelle. Der Schallemissionspegel wird für jedes Terzband in Abhängigkeit der Abstrahlrichtung abgelegt.
- Zur Berücksichtigung der Pegelverstärkung einer bewegten Quelle wurde der Pegel um  $-40 \log_{10}(DF^{-1})$  korrigiert. Die Frequenzverschiebung aufgrund des Dopplereffekts wurde nach der Rückrechnung unter der Annahme gleichverteilter Schallleistung innerhalb eines Terzbandes berücksichtigt. Somit werden bei der Simulation sowohl die Frequenzverschiebung als auch die Pegelverstärkung korrekt anhand der Fluggeschwindigkeit berechnet und sind nicht, wie bei anderen Modellen, bereits implizit im Emissionsmodell enthalten.

$$L_{em}(f, \theta, \varphi) = L_w(f) + D(f, \theta, \varphi) - 40 \log_{10}(DF^{-1})$$

mit  $DF = 1 - Ma \cdot \cos\theta$

- In der Rückrechnung wurden mit den Modulen BASIC und METEO der Ausbreitungsberechnung mit sonX die geometrische Dämpfung, die atmosphärische Dämpfung, der Bodeneffekt inkl. Kohärenzverlust und Strahlenphänomene aufgrund vertikaler Schichtung der Atmosphäre berücksichtigt.
- Die Modellvorhersagen für Umströmungs- und Antriebsmodelle reproduzieren arithmetische Mittelwerte. Sie werden beim Export des sonAIR Modell jeweils unter der Annahme einer Normalverteilung mit einer aus Messungen abgeleiteten Standardabweichung auf den energetischen Mittelwert korrigiert.

### 3.2 Implementation der Einzelflugsimulation im Dienstleistungstool

Um mit einem hochentwickelten und damit rechenaufwändigen Ausbreitungsmodell wie sonX auch Full-Size-Simulationen (Verwendung mehrerer 10'000 Einzelflugbahnen) durchführen zu können, wurden für dieses Dienstleistungswerkzeug verschiedene Optimierungen umgesetzt:

Anstatt jeden Flug einzeln zu berechnen, verwendet sonAIR ein Quellengitter, ein Empfangspunktgitter und Dämpfungsdatenbanken mit Ausbreitungsdämpfungen je Quellen-Empfangspunktpaar. Durch die Verwendung der Dämpfungsdatenbank kann der Berechnungsaufwand für Jahresberechnungen massiv reduziert

werden, da die Dämpfungen der einzelnen Quellen-Empfangspunktpaare nur einmal berechnet werden müssen und die resultierenden Immissionen aus den einzelnen Flugbewegungen effizient aus den Dämpfungen der angrenzenden, bereits berechneten Quellenpunkte interpoliert werden können.

### a) Zellkonzept - Dämpfungsdatenbank

Die Ausbreitungsrechnung wird nicht während der Einzelflugsimulation, sondern in einem vorgeschalteten Prozess durchgeführt. Dabei wird der Luftraum in ein Zellgitter unterteilt. Die Zellen haben eine einheitliche Grundfläche von 100 x 100 m und eine mit zunehmender Höhe anwachsende Zellhöhe. Ausgehend von einer Grundhöhe von 5 m und einer pro Zellschicht um 25% zunehmenden Höhe kann mit 25 Zellen bereits ein Luftraum von über 5 km Höhe abgedeckt werden. Die Zellen folgen dabei dem Geländeverlauf, sind also zueinander leicht versetzt.

Eine Ausbreitungsrechnung wird für jede Gitterecke durchgeführt. Die resultierenden Ausbreitungsdämpfungen werden in einer Datenbank abgelegt. In der Einzelflugsimulation wird für jede Flugzeugposition die entsprechende Gitterzelle bestimmt und die Ausbreitungsdämpfungen der Eckpunkte geladen. Die Ausbreitungsdämpfung der Flugzeugposition wird als über den Abstand von den Zellecken arithmetisch gewichtetes Mittel der Eckpunkt-Dämpfungen berechnet. Abbildung 2 zeigt eine Visualisierung des Konzeptes.

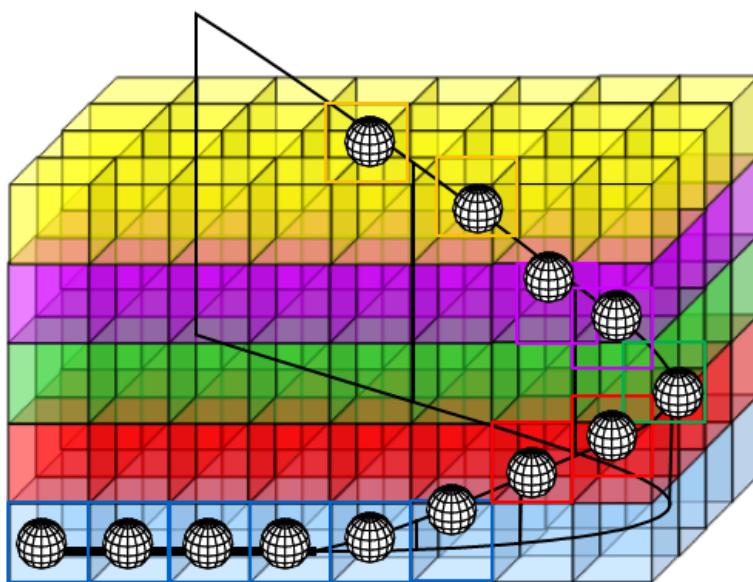


Abbildung 2: Anwendung der Einzelflugsimulation im Zellgitter mit vorberechneten Dämpfungsdaten.

### b) Hybridmodell-Ansatz mit Fokus auf akustisch anspruchsvolle Situationen

Aus akustischer Sicht anspruchsvolle Ausbreitungssituationen sind solche mit Schallpfaden in Bodennähe, d.h. flachen Schalleinfallswinkeln. Hier können Hinderniswirkungen auftreten, und auch Boden- und andere Reflexionen können einen bedeutenden Einfluss auf die resultierenden Immissionspegel haben. Des Weiteren können hier vertikale Wind- und Temperaturgradienten zu starken Meteoeffekten führen. Bei steilem Schalleinfall hingegen kann die Schallausbreitungsrechnung deutlich vereinfacht werden, da neben der geometrischen Dämpfung und der Luftpumfung kaum pegelrelevante Phänomene auftreten.

Aus diesem Grund wird in sonAIR eine Fallunterscheidung angewandt. Befindet sich eine Quellposition von einem Empfangspunkt aus betrachtet um  $15^\circ$ <sup>2</sup> über dem Sichtwinkel auf den Horizont (inkl. künstlichen Hindernissen), so wird auf eine Vorausberechnung der Ausbreitungsdämpfung verzichtet, und es kommt während der Einzelflugsimulation eine vereinfachte Ausbreitungsrechnung zur Anwendung. Die vereinfachte Ausbreitungsrechnung berücksichtigt die geometrische Dämpfung und die Luftpärfung, wobei dazu eine von sonX für die entsprechenden Bedingungen vorausberechnete Nachschlagetabelle mit Dämpfungswerten pro Frequenz und Höhenstufe zur Anwendung kommt. In dieser mit *\*AirAtt.txt* bezeichneten Tabelle sind auch die Laufzeiten pro m für sämtliche Höhenstufen abgelegt. Zusätzlich zur geometrischen Dämpfung und zur Luftpärfung wird ein repräsentatives Bodeneffektspektrum gemäss Tabelle 3 verwendet. Auf weitere Ausbreitungseffekte, namentlich auf die Walddämpfung, wird verzichtet.

### c) Maximale Ausbreitungsdistanz

Es wird keine Ausbreitungsrechnung durchgeführt, weder mit sonX noch mit dem vereinfachten Modell, wenn eine maximale horizontale Ausbreitungsdistanz überschritten wird. Für grössere Distanzen wird somit kein Beitrag der Quelle mehr berücksichtigt. Für militärische und zivile Flugplätze wird eine Maximaldistanz von 30 km, für Flugfelder und Heliporterlandeplätze (Kleinfliegerei) 10 km empfohlen.

*Tabelle 3: Idealisiertes Bodeneffektspektrum für vereinfachte Ausbreitungsrechnungen.*

Freq	-Agrbar	Freq	-Agrbar	Freq	-Agrbar
<b>12.5</b>	2.30	<b>125</b>	2.30	<b>1260</b>	1.60
<b>16</b>	2.30	<b>157</b>	2.30	<b>1587</b>	1.48
<b>20</b>	2.30	<b>198</b>	2.30	<b>2000</b>	1.37
<b>25</b>	2.30	<b>250</b>	2.30	<b>2520</b>	1.25
<b>31.5</b>	2.30	<b>315</b>	2.30	<b>3175</b>	1.13
<b>40</b>	2.30	<b>397</b>	2.18	<b>4000</b>	1.02
<b>50</b>	2.30	<b>500</b>	2.07	<b>5040</b>	0.90
<b>62</b>	2.30	<b>630</b>	1.95	<b>6349</b>	0.78
<b>79</b>	2.30	<b>794</b>	1.83	<b>8000</b>	0.67
<b>99</b>	2.30	<b>1000</b>	1.72	<b>10079</b>	0.55

### d) Gitterausdünnung

Um die Anzahl Ausbreitungsrechnungen und den zum Ablegen der Resultate notwendigen Speicherbedarf zu reduzieren, werden in einem vorgeschalteten Prozess diejenigen Zellen bestimmt, die effektiv durchflogen werden. Nur für diese Zellen wird eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt.

Des Weiteren wird das Berechnungsgitter mit zunehmendem horizontalem Abstand zwischen Empfangspunkt und Gitterpunkt ausgedünnt. Ab 2 km Distanz wird die Grundfläche verdoppelt, d.h. die Anzahl Berechnungen reduziert sich um einen Faktor 4. Weitere Verdoppelungsschritte finden bei 4, 8 und 16 km Distanz statt, so dass in grossen Abständen Zellgrundflächen von 800 m Seitenlänge resultieren. Die Regeln für die Gitterausdünnung sowie das Sichtwinkelkriterium des Hybridansatzes werden in einer Datei abgelegt, welche typischerweise mit *ReduktionsParameter.txt* bezeichnet wird und sich am gleichen Ort wie die *sonAIRParameter*-Datei befindet.

<sup>2</sup> Die  $15^\circ$  wurden mittels Simulationen ermittelt und werden als Standardsetzung empfohlen. Der Modellparameter kann aber verändert werden, wobei dies Einfluss auf die Rechenzeiten hat.

### 3.3 Berechnungsablauf

Die Umsetzung im DL bietet über verschiedene Eingabemasken die Aufbereitung der Inputdaten einer Fluglärmberechnung an. Diese Daten können grafisch direkt kontrolliert und verifiziert werden. Für die Parallelisierung der Berechnung wird das erstellte Rechengebiet und damit alle Raster, Empfangspunkte und Luftraumgitterpunkte in Berechnungskacheln aufgeteilt. Nach der Aufbereitung der Inputdaten folgt der Export der Daten für alle Berechnungskacheln zur Ausbreitungsberechnung.

Die Ausbreitungsberechnung füllt die Dämpfungsdatenbank und ist der rechenintensivere Teil der Berechnung. Anschliessend kann die Simulation der *Footprints* pro Typ und Route (und allenfalls Tageszeit) durchgeführt werden, welche ebenfalls parallelisiert erfolgt. Mit der Szenarienberechnung können mittels der Überlagerung von Einzelflügen Gesamtbelastungen berechnet werden.

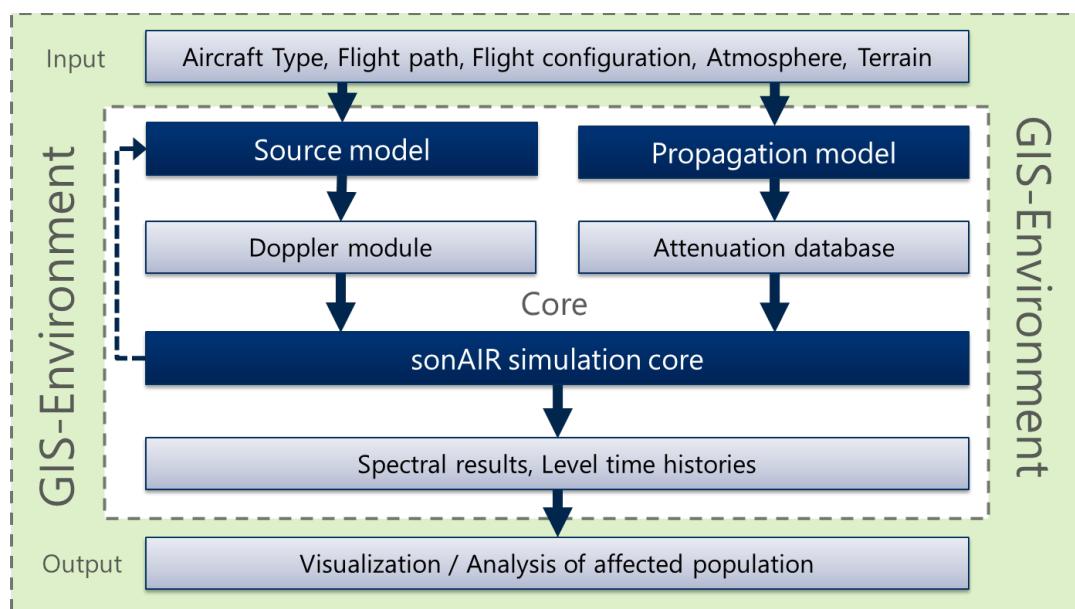


Abbildung 3: Berechnungsablauf von sonAIR inklusive der im GIS eingebetteten Module.

### 3.4 Berechnungsresultate

Grundsätzlich können Empfangspunktgitter, einzelne Beurteilungspunkte oder Fassadenpunkte berechnet werden. Standardmässig werden hierbei der A-bewertete Ereignis- und Maximalpegel für jeden Empfänger abgespeichert (*Summary*, siehe unten) und als Punktschema bzw. als Raster nach sonAIR importiert.

Als Resultatdateien für die Empfangspunkte stehen fünf Varianten zur Auswahl, wobei auch Mehrfachauswahlen möglich sind:

- *Summary*: Pro Empfangspunkt werden der energetisch gemittelte A-bewertete Ereignis- und Maximalpegel unter Berücksichtigung der Gewichtung von Streuspuren ausgegeben. Bei mehreren Flügen auf der gleichen Route (und allenfalls Tageszeit), wird für den Maximalpegel zusätzlich die Standardabweichung angegeben. Zusätzlich wird ein energetisch gemitteltes Ereignispegelspektrum (nicht A-bewertet) abgelegt.
- *Flights*: Pro Empfangspunkt und Flugereignis werden der energetisch gemittelte A-bewertete Ereignis- und Maximalpegel ausgegeben. Zusätzlich wird ein energetisch gemitteltes Ereignispegelspektrum (nicht A-bewertet) abgelegt.

- *Detail*: Pro Flug und Empfangspunkt wird der Immissionspegel-Zeit-Verlauf auf Basis der Immissionszeit dargestellt. Ausgegeben wird der als A-bewerteter Kurzzeit-Mittelungspegel  $L_{AEq}(t)$  und der mit der Zeitkonstante SLOW oder FAST geglättete Pegel  $L_{AS}(t)$  bzw.  $L_{AF}(t)$ .
- *Emission*: Für jeden Flugbahnpunkt wird die energetisch gemittelte Schallleistung über die Kugelsphäre berechnet und als Schallleistungs-Zeit-Verlauf auf Basis der Emissionszeit ausgegeben.
- *Internal*: Pro Flug und Empfangspunkt werden pro Zeitschritt umfangreiche Detailresultate wie die Quellenposition, das Emissions- und Immissionsspektrum, sowie Hinweise auf den Berechnungsablauf, namentlich ob Dämpfungsdaten nachgeschlagen wurden oder das vereinfachte Ausbreitungsmodell verwendet wurde, abgespeichert.

Die Möglichkeit der Ausgabe von zusätzlichen Resultaten ist nur mit entsprechenden Lizenzberechtigungen möglich. Bei der Verwendung von *Internal* und *Detail* können sehr grosse Resultatdateien entstehen. Es wird deshalb empfohlen, diese Resultatausgaben nur für wenige Empfänger zu aktivieren.

## 4 Validierung

In den Jahren 2017 und 2018 wurde eine Validierung von sonAIR für Grossflugzeuge durchgeführt, welche zum einen auf umfangreichen Messungen um den Flughafen Zürich basierte und zum anderen Datensätze des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums DLR und der TU Delft umfasste. Zusätzlich zur Validierung, dem Vergleich von Messung und Berechnung, wurde auch die Äquivalenz des Dienstleistungs- und des wissenschaftlichen Tools verifiziert. Es konnte gezeigt werden, dass die beiden sonAIR-Implementationen WS und DL für den  $L_{AE}$  und den  $L_{AS,max}$  äquivalente Berechnungen liefern, mit im Mittel vernachlässigbaren Differenzen.

Die Validierung der Flugzeugtypen mit FDR-Daten zeigte, dass die Berechnung den  $L_{AE,t10}$  im Vergleich zu Messungen etwas überschätzt und den  $L_{AS,max}$  unterschätzt. Die Emissionsmodelle 3D und 3Dred liefern sehr ähnliche Resultate und vermögen die Messungen annähernd gleich gut zu reproduzieren. 2Dred hingegen berücksichtigt die laterale Richtwirkung nicht, was in gewissen Situationen zu starken über- oder Unterschätzung der Pegel führt. Dieser Modellansatz wird für zukünftige Berechnungen daher nicht empfohlen. Basierend auf der Validierung wird empfohlen, das 3Dred-Emissionsmodell für zukünftige Berechnungen von Jahresbelastungen zu verwenden. Insgesamt liegen die Differenzen zwischen Berechnungen und Messungen, abhängig von Prozedur (Start, Landung) und Flugzeugtyp, für die FDR-Typen im Bereich von  $\Delta L_{AE,t10} = -0.1$  dB bis  $+0.5$  dB resp.  $\Delta L_{AS,max} = -0.8$  dB bis  $+0.4$  dB und für die Nicht-FDR-Typen im Bereich von  $\Delta L_{AE,t10} = -0.8$  dB bis  $+1.3$  dB resp.  $\Delta L_{AS,max} = -1.5$  dB bis  $+1.1$  dB.

## 5 Weiterführende Dokumentationen

- Online Benutzerhandbuch zum sonAIR DL in ArcGIS: <https://n-sphere.gitbook.io/project/>
- Dokumentation des sonX-Ausbreitungsmodells (Dokumentation sonX 2019 vom 21. März 2019)
- Wissenschaftliche Publikationen und Konferenzbeiträge (siehe Beilage)

An der Empa einsehbar sind zusätzlich die Abschlussberichte der verschiedenen Projekte:

- a) Entwicklung Emissionsmodell und Aufbau Emissionsdatenbank (Berichts-Nr. 5211.00687.100.12 vom 30.09.2016)
- b) Quellenvermessung und Auswertung (Berichts-Nr. 5211.00687.100.13 vom 30.09.2016) inkl. dreier Begleitdokumente
- c) Umsetzungen der Einzelflugsimulation (Berichts-Nr. 5211.00687.100.15 vom 30.09.2016)
- d) Validierung (Berichts-Nr. 5211.00687.100.16 vom 30.09.2016)
- e) Akustische Kenndaten und Vergleich mit FLULA2 (Berichts-Nr. 5211.00687.100.17 vom 30.09.2016)

- f) Abschätzung von Flugparametern auf der Basis von Radardaten (Berichts-Nr. 5211.01322.100.01 vom 15.05.2018)
- g) Validierung sonAIR – Teil 1: Maximalpegelkorrektur (Berichts-Nr. 5211.01324.100.01 - 1 vom 25.10.2018)
- h) Validierung sonAIR – Teil 2: Quellenseparation sonAIR im Nahbereich am Beispiel des A340-300 (Berichts-Nr. 5211.01324.100.01 - 2 vom 25.10.2018)
- i) Validierung sonAIR – Teil 3: Einfluss Waldreflexionen und Anpassungen Primärflächen (Berichts-Nr. 5211.01324.100.01 - 3 vom 25.10.2018)
- j) Validierung sonAIR – Teil 4: Vergleiche mit unabhängigen Messungen (Berichts-Nr. 5211.01324.100.01 - 4 vom 25.10.2018)
- k) Aufbau eines Monitoringsystems und Erweiterung der sonAIR Emissionsdatenbank (Berichts-Nr. 5211.01323.100.01 - 1 vom 31.05.2019)
- l) Konzept zur Weiterentwicklung des Monitoringsystems (Berichts-Nr. 5211.01323.100.01 - 2 vom 31.05.2019)

# Beilagen

## sonAIR Emissionsmodelle

*Tabelle 4: Vermessene Grossflugzeuge mit Mantelstromtriebwerken (AD: Airflow Deflector = Wirbelgenerator)*

Emissionsmodell	Bezeichnung	Datenbasis	Eng.Config	#Eng
A319_CFM56-5B	Airbus A319-100 CFM56-5B	FDR	Wing	2
A319_CFM56-5B_AD	Airbus A319-100 CFM56-5B mit Wirbelgenerator	FDR	Wing	2
A320_CFM56-5B	Airbus A320-200 CFM56-5B	FDR	Wing	2
A320_CFM56-5B_AD	Airbus A320-200 CFM56-5B mit Wirbelgenerator	FDR	Wing	2
A321_CFM56-5B	Airbus A321-200 CFM56-5B	FDR	Wing	2
A321_CFM56-5B_AD	Airbus A321-200 CFM56-5B mit Wirbelgenerator	FDR	Wing	2
A32X_CFM56-5A	Airbus A320-Familie CFM56-5A	N1	Wing	2
A32X_CFM56-5A_AD	Airbus A320-Familie CFM56-5A mit Wirbelgenerator	N1	Wing	2
A32X_V2500	Airbus A320-Familie V2500	N1	Wing	2
A32X_V2500_AD	Airbus A320-Familie V2500 mit Wirbelgenerator	N1	Wing	2
A333_TRENT7	Airbus A330-300 mit TRENT7	FDR	Wing	2
A343_CFM56-5C	Airbus A340-300 mit CFM56-5C	FDR	Wing	4
A388_GP7270	Airbus A380-800 mit GP7270	N1	Wing	4
A388_TRENT9	Airbus A380-800 mit TRENT9	N1	Wing	4
B737_CFM56-3	Boeing B737 Classic (-300, -400, -500) mit CFM56-3	N1	Wing	2
B737_CFM56-7B	Boeing B737 NG (-600, -700, -800, -900) mit CFM56-7B	N1	Wing	2
B763_PW4060	Boeing 767-300 mit PW4060	N1	Wing	2
B76X_CF6-80C2	Boeing 767-Familie (-200,-300,-400) mit CF6-80C2	N1	Wing	2
B77W_GE90-115B	Boeing 777-300 mit G90-115B	FDR	Wing	2
B788_Genx-1B <sup>3</sup>	Boeing 787-800 mit Genx1	N1	Wing	2
BCS1_PW1500G	Bombardier C-Series 100/ A220-100 mit PW1500G	FDR	Wing	2
BCS3_PW1500G	Bombardier C-Series 300/ A220-300 mit PW1500G	FDR	Wing	2
CRJ9_CF34-8C	Bombardier Regional Jet CRJ-900 mit CF34-8C5	N1	Fuselage	2
E170_CF34-8E	Embraer ERJ 170 mit CF34-8E	N1	Wing	2
E190_CF34-10E	Embraer ERJ 190 mit CF34-10E	N1	Wing	2
F100_TAY650-15	Fokker 100 mit TAY650-15	N1	Fuselage	2
FA7X_PW307	Dassault Falcon 7X mit PW307	N1	Fuselage	3
RJ1H_LF507	BAE SYSTEMS AVRO RJ-100 mit LF507	FDR	Wing	2

*Tabelle 5: Vermessene Kleinluftfahrzeuge mit Kolbenflugtriebwerken und Propeller*

Emissionsmodell	Typ ICAO	Subtyp	Triebwerkstyp	Propellertyp
AC11_IO-540-T4B5D	AC11	114A	IO-540-T4B5D	B3D34C405
C152_O-235-L2C	C152	F152	O235-L2C	1A103TCM6958
P28A_O-320-D3G	P28A	PA-28-161	O-320-D3G	74DM6-0-60
P28A_O-360-A4M	P28A	PA-28-181	O-360-A4M	76EM8S5-0-62
PA46_TIO-540-AE2A	PA46	PA-46-350P	TIO-540-AE2A	MTV-14-B195-30a
DR40_O-320-D2A	DR40	ROBIN DR 400/140 B	O-320-D2A	74DM6S5-2-64
DR40_IO-360-A1B6	DR40	ROBIN DR 400/500	IO-360-A1B6	HC-C2YK-1

<sup>3</sup> Modell basiert vereinfacht auf Flugphasen

*Tabelle 6: Vermessene Helikopter mit Wellentriebwerken*

Emissionsmodell	Typ ICAO	Subtyp	Triebwerkstyp
A119_PT6B	A119	A119	PT6B-37A
AS35_ARRIEL-1	AS35	AS 350 B2	ARRIEL 1D1
A109_PW200	A109	AW109SP	PW207C
EC20_ARRIUS-2	EC20	EC120 B	ARRIUS 2F

*Tabelle 7: SANC-DB Referenztypen mit ihren ursprünglichen Flugzeugtypen, und SANC-DB ID und Herkunft der Emissionsdaten*

ID	Referenztyp	Flugzeugtyp	SANC-DB ID	Herkunft
1	Single engine, fixed pitch propeller	Cessna 172 N	1896	BAZL
2	Single engine, variable pitch propeller	Diamond Aircraft DA 40 D	1686	BAZL
3	Twin engine, variable pitch propeller	Diamond Aircraft DA 42	1684	BAZL
4	Turboprop, single engine with 895 kW	Pilatus PC-12/47E	1999	BAZL
5	Turboprop, twin engine each 469 kW	Piper PA-31T	2049	BAZL
6	Helicopter, single engine, turbine	Eurocopter AS350B3	10150	BAZL
7	Helicopter, single engine, piston	Robinson Helicopter Co. R 22 Beta II	10120	BAZL
8	Helicopter, twin engine, turbine	Agusta A109SP	10179	BAZL
9	Motor glider	Diamond Aircraft HK 36TTC	1236	BAZL
10	Gyrocopter	MAGNI GYRO M16 Tandem Trainer	2243	BAZL
11	Business Jet I	Cessna Citation II	20043	FLULA2
12	Business Jet II	Learjet 25	20064	FLULA2
13	Business Jet III	Learjet 35	20065	FLULA2
14	Large turboprop, twin engine each 3096 kW	Saab 2000 SB20	20087	FLULA2

*Tabelle 8: SANC-TE Emissionsdatensatz mit ihren ursprünglichen Flugzeugtypen, deren SANC-DB ID und Herkunft der Emissionsdaten*

SANC-TE Typ	Flugzeugtyp	SANC-DB ID	Herkunft
A109	Agusta A109K2	20001	FLULA2
A320	Airbus A320	20005	FLULA2
AT43	ATR42 (all series)	20015	FLULA2
B744	Boeing 747-400	20025	FLULA2
B763	Boeing 767-300	20029	FLULA2
C172	Cessna Aircraft Company 172 R	1254	BAZL
C340	Cessna Aircraft Company 340	340	BAZL
C550	Cessna 550 Citation II	20043	FLULA2
F18	McDonnel Douglas F/A-18 Hornet	20056	FLULA2
F70	Fokker 70	20060	FLULA2
MCR1	Experimental Dyn-Aero MCR-01 Club	1617	BAZL
MD81	McDonnell Douglas MD-80/81/82	20069	FLULA2
R44	Robinson Helicopter Co. R 44	10052	BAZL

## Überblick zu Teilprojekten der sonAIR Entwicklung

**Bemerkung:** Projekte, welche sich mit der Entwicklung und Validierung des Ausbreitungsmodells beschäftigt haben, werden nicht aufgeführt.

### sonAIR Basisentwicklung

Die Entwicklung von sonAIR wurde im Rahmen eines Projektes der Spezialfinanzierung Luftverkehr des Schweizerischen Bundesamtes für Zivilluftfahrt BAZL initiiert. Zusätzliche Unterstützung erfuhr das Projekt durch die Empa, die Flughafen Zürich AG, den internationalen Flughafen Genf (AIG), das Amt für Verkehr des Kantons Zürich sowie skyguide, im Rahmen des Projektes CHIPS. Als Partner eingebunden waren die Firmen SciTracks GmbH für die mobile Flugbahnerfassung und BeSB GmbH Berlin für die Bestimmung der Triebwerksdrehzahl. Als Teil dieses Initialprojektes wurden in den Jahren 2013 und 2014 umfangreiche Quellenvermessungen durchgeführt und daraus Emissionsmodelle für Grossflugzeuge entwickelt. Ebenso wurde das Ausbreitungsmodell sonX für die spezifischen Anforderungen der Fluglärmmodellierung erweitert und es wurde die Simulationskette aufgebaut.

Projektpartner: Empa, n-Sphere, BeSB, SciTracks

Projektförderung: BAZL, BAFU, Kanton Zürich, Flughäfen Zürich und Genf, skyguide

Projektdauer: 2013–2016

### Integration sonAIR in sonBASE, Phasen I bis III

Kurz nach dem Start der Entwicklung des wissenschaftlichen Tools von sonAIR wurde im Auftrag des BAFU eine Integration in eine GIS-Umgebung, basierend auf den Produkten D-gen und D-noise von n-Sphere, in Angriff genommen. Die Umsetzung erfolgte in drei Projektphasen, wobei zusätzlich zur Modellierung von Grossflugzeugen auch eine Anbindung an die SANC-DB<sup>4</sup> und die Kleinfliegerei vorgenommen wurde.

Projektpartner: Empa, n-Sphere

Projektförderung: BAFU

Projektdauer: 2013–2017

### sonAIR Visualisierung

Im Auftrag des BAZL wurden Südstarts im Simulator geflogen und die Lärmbelastung mit sonAIR berechnet. Die Resultate wurden in einer interaktiven Webapplikation integriert. Im Projekt wurde eine Schnittstelle für die direkte Anbindung von sonAIR an Flugsimulatoren implementiert.

Projektpartner: n-Sphere Empa, ESRI Schweiz

Projektförderung: BAZL

Projektdauer: 2016

### Fluglärmessungen Grenchen

Mit der Messkampagne für Kleinluftfahrzeuge in Grenchen während einer Woche im Juni 2016 wurden akustische Daten und Positionsdaten von Flächenflugzeugen und Helikoptern gesammelt. Mit diesen Grundlagen wurden für 4 Helikoptertypen und 7 Flächenflugzeugtypen sonAIR-Emissionsmodelle erstellt. Die so erstellten Emissionsmodelle ermöglichen einen Vergleich mit der vom Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) unterhaltenen Swiss Aircraft Noise Calculation Database (SANC-DB).

<sup>4</sup> Swiss Aircraft Noise Calculation Database

Projektpartner: Empa, ETHZ

Projektförderung: BAFU

Projektdauer: 2017

### **Validierung des Fluglärm simulationsmodells sonAIR**

Zur Validierung des Fluglärm simulationsmodells sonAIR wurden zusätzliche Messdaten erhoben, welche nicht für die Modellentwicklung verwendet worden waren. Zusätzlich wurden auch Messdaten von externen Partnern verwendet. Zudem wurden einige spezifische Fragen (namentlich: der Einfluss einer Quellenseparation, die Frage nach einer Maximalpegelkorrektur und der Einfluss von Waldreflexionen) untersucht, welche im sonAIR Entwicklungsprojekt offen geblieben sind.

Partner: Empa, Swiss International Air Lines, DLR, TU Delft

Projektförderung: BAZL im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftfahrt (BV87)

Laufzeit: 2017–2018

### **Abschätzung von Flugparametern auf der Basis von Radardaten**

Das Emissionsmodell von sonAIR benötigt als Eingangsgrößen neben Position, Orientierung und Geschwindigkeit auch Angaben zur Schubsetzung (bzw. N1) und idealerweise Konfiguration des Flugzeuges. Da *Flight Data Recorder*-Daten in der Regel nicht zugänglich sind, kann der Anwendungsbereich des Modells massiv erweitert werden, wenn es gelingt, Schubsetzung und Konfiguration aus Radardaten abzuleiten. Es wurde deshalb ein Verfahren entwickelt, implementiert und validiert, welches die Bestimmung von Masse, Schubsetzung und Konfiguration aus Radardaten erlaubt.

Partner: Empa, Swiss International Air Lines

Projektförderung: BAZL im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftfahrt (BV87)

Laufzeit: 2017–2018

### **Aufbau und Betrieb eines Monitoringsystems zur laufenden Erweiterung der sonAIR Emissionsdaten**

Das Projekt umfasste primär zwei Ziele. A) Entwicklung eines mobilen Monitoring- und Auswertesystems für die laufende Erfassung der Schallemissionen (Quellendaten) von Flugzeugen und zur messtechnischen Kontrolle der realen Lärmbelastung an frei wählbaren Standorten. B) Betrieb des Systems am Flughafen Zürich mit dem Ziel, Emissionsmodelle für neue oder modifizierte Flugzeuge der Swiss, namentlich die Bombardier C-Series BCS1 und BCS3, die Boeing B77W und die modifizierte Airbus A320er-Familie zu erstellen.

Partner: Empa, Swiss International Air Lines, skyguide

Projektförderung: BAZL im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftfahrt (BV87)

Laufzeit: 2017–2019

### **Fluglärm Support BAFU**

In Zusammenarbeit mit n-Sphere wurden verschiedene Erweiterungen und Verbesserungen beim Dienstleistungstool implementiert. Namentlich werden Werkzeuge zur Definition von Profilen und zur Faltung von Spuren mit Profilen zur Verfügung gestellt.

Partner: Empa, n-Sphere

Projektförderung: BAFU

Laufzeit: 2019

## Wissenschaftliche Publikationen

- 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(3), 440-451.  
<https://doi.org/10.3813/AAA.919180>
- Zellmann, C., Schäffer, B., Wunderli, J. M., Isermann, U., & Paschereit, C. O. (2018). Aircraft noise emission model accounting for aircraft flight parameters. *Journal of Aircraft*, 55(2), 682-695.  
<https://doi.org/10.2514/1.C034275>
- Zellmann, C. (2018). *Development of an aircraft noise emission model accounting for flight parameters* (Doctoral dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin, 168 p.  
<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6712>

## Wissenschaftliche Konferenzbeiträge

- Schäffer, B., Zellmann, C., Krebs, W., Plüss, S.; Eggenschwiler, K., Bütkofer, R., Wunderli, J.M., 2012. Sound source data for aircraft noise calculations – state of the art and future challenges. Proceedings of Euro-noise 2012, Ninth European Conference on Noise Control. Prague, Czech Republic, pp. 589-594
- Zellmann, C., Wunderli, J. M., & Schäffer, B. (2013). *sonAIR – data acquisition for a next generation aircraft noise simulation model*. Presented at the 42nd international congress and exposition on noise control engineering (INTER-NOISE 2013). Noise control for quality of life. Innsbruck, Austria.
- Zellmann, C., & Wunderli, J. M. (2014). Influence of the atmospheric stratification on the sound propagation of single flights. In J. Davy, M. Burgess, C. Don, L. Dowsett, T. McMinn, & N. Broner (Eds.), *Proceedings of the INTER-NOISE. Proceedings of the INTER-NOISE 2014. 43rd international congress and exposition on noise control engineering. Improving the world through noise control* (p. (10 pp.). Melbourne, Australia.
- Zellmann, C., Wunderli, J. M., & Paschereit, C. O. (2016). The sonAIR sound source model: spectral three-dimensional directivity patterns in dependency of the flight condition. In O. von Estorff, W. Kropp, & B. Schulte-Fortkamp (Eds.), *Proceedings of the INTER-NOISE. Proceedings of the INTER-NOISE 2016. 45th international congress and exposition on noise control engineering. Towards a quieter future* (pp. 786-794). Hamburg, Germany: DEGA.
- Wunderli, J. M., Zellmann, C., Köpfli, M., Schwab, O., Schlatter, F., & Schäffer, B. (2017). The sonAIR aircraft noise simulation tool. In *Proceedings of the INTER-NOISE. Proceedings of the INTER-NOISE 2017. 46th international congress and exposition on noise control engineering. Taming noise and moving quiet* (pp. 3317-3326). Hong Kong, China: I-INCE.
- Schlatter, F., Wunderli, J. M., & Köpfli, M. (2018). Relevance of buildings in aircraft noise predictions. In *Proceedings of the Inter-Noise 2018. 47th international congress and exposition on noise control engineering. Impact of noise control engineering* (p. (10 pp.). Chicago, Illinois: I-INCE.
- Jäger, D., Zellmann, C., Wunderli, J. M., Simons, D. G., & Snellen, M. (2018). Validation of the sonAIR aircraft noise simulation model – a case study for Schiphol Airport. In *Proceedings of the Inter-Noise 2018. 47th international congress and exposition on noise control engineering. Impact of noise control engineering* (p. (9 pp.). Chicago, Illinois: I-INCE.
- Zellmann, C., Jäger, D., & Schlatter, F. (2018). Model adjustment and validation to account for the airflow deflector retrofit of the A320 family. In M. Taroudakis (Ed.), *Proceedings of Euronoise 2018* (pp. 225-230).
- Zellmann, C., Bertsch, L., Schwab, O., Wolters, F., & Delfs, J. (2019). Aircraft noise assessment of next-generation narrow-body aircraft. In *Inter-noise. International conference on noise control engineering. Proceedings of Internoise 2019. The 48th international congress and exhibition on noise control engineering* (p. 12 pp.). Madrid: Sociedad Española de Acústica (SEA).