

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 58 765 11 11  
F +41 58 765 11 22  
www.empa.ch



Bundesamt für Umwelt BAFU  
Abteilung Lärm und NIS  
CH-3003 Bern

# **Vergleich der mit den Modellen FLULA2, AEDT und sonAIR berechneten Immissions- pegel von Einzelflügen mit Messungen**

## **Abschlussbericht zum Forschungsprojekt CompAIR Teil 1: Modellvergleich anhand der sonAIR-Validierungs- messungen**

<b>Auftrags-Nr.:</b>	<b>5211.01812.100.01</b>
Bericht-Nr.:	5211.01812.100.01 - 1
Auftraggeber:	Bundesamt für Umwelt BAFU, Kornel Köstli
Anzahl Seiten:	54
Beilagen:	-
Die Verfasser:	S. Schalcher J. Meister D. Jäger C. Zellmann J. M. Wunderli B. Schäffer

Status: genehmigter Bericht

---

Dübendorf, 04. Februar 2021  
Der Projektleiter:

Dr. Beat Schäffer

Abteilung Akustik / Lärmminderung  
Der Abteilungsleiter:

Dr. Jean Marc Wunderli

## Zusammenfassung

Vergleichsberechnungen zwischen dem neuen Fluglärmrechnungsmodell sonAIR und den bestehenden *Best Practice* Modellen FLULA2 bzw. IMMPAC im Referenzrahmen SANC-TE ergaben teilweise deutliche Abweichungen. Grosse Abweichungen zwischen sonAIR und FLULA2/IMMPAC traten insbesondere in Regionen mit grossen Ausbreitungsdistanzen und streifendem Schalleinfall auf, wo die heutigen *Best Practice* Modelle zur Beschreibung der Ausbreitungsphänomene eine empirische sogenannte "Boden-zusatzdämpfung" (engl. *Lateral Attenuation*) verwenden. sonAIR hingegen kennt keine entsprechende Korrektur und nimmt für sich in Anspruch, eine allfällige Zusatzdämpfung bereits durch die dreidimensionalen Quellenmodelle, die phasenrichtige Berechnung der Bodenreflexionen sowie die Berücksichtigung akustischer Schattenzonen abzubilden (wobei SANC-TE ohne Meteeinflüsse berechnet wurde).

Es stellt sich deshalb die Frage, welches Modell – sonAIR oder ein *Best Practice* Programm wie FLULA2 oder das weitgehend ECAC Doc.29 konforme Programm AEDT – die reale Exposition besser abbildet. Dies soll im vorliegenden Projekt CompAIR (*Comparison of Aircraft noise models*) geklärt werden. Dazu werden für Messdatensätze von Zürich, Genf und Payerne Vergleichsberechnungen mit den drei Modellen sonAIR, FLULA2 und AEDT durchgeführt. Der Fokus liegt auf Vergleichen des Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  resp.  $L_{AE}$ , es werden aber auch exemplarisch Pegelzeitverläufe analysiert. Die Resultate werden in drei Teilberichten dokumentiert.

Der Vergleich simulierter mit gemessenen  $L_{AE,t10}$  von Einzelflugereignissen von Grossflugzeugen im **vorliegenden Teilbericht 1** zeigt, dass sonAIR die Messungen genau zu reproduzieren vermag, sowohl im Nah-, als auch im Fernbereich, mit mittleren absoluten Differenzen im  $L_{AE,t10}$  zwischen Simulation und Messung ( $\Delta L_{AE,t10}$ ) von  $< 0.5$  dB. FLULA2 reproduziert im Mittel die Messwerte im Nahbereich ebenfalls exakt ( $\Delta L_{AE,t10} < 0.5$  dB) und im Fernbereich befriedigend (Landungen 28:  $\Delta L_{AE,t10} = 0.8$  dB; Landungen 34:  $\Delta L_{AE,t10} = 3.2$  dB). Die Differenzen im Fernbereich hängen hierbei stark vom jeweiligen Flugzeugtypen ab und sind auf die vereinfachten Quellenmodelle von FLULA2 zurückzuführen. AEDT schliesslich reproduziert im Mittel die Messwerte im Nah- und Fernbereich befriedigend, wobei die Starts im Mittel etwas unterschätzt ( $\Delta L_{AE,t10} = 1.1$  dB) und die Landungen etwas überschätzt werden ( $\Delta L_{AE,t10} = 0.6$  dB). Die Genauigkeit von sonAIR widerspiegelt sich auch in der Streuung der Differenzen zwischen Berechnung und Messung. Diese ist für sonAIR geringer als für FLULA2 und AEDT, insb. für die sogenannten "FDR-Typen" (d.h. Flugzeugtypen, für welche bei der Modellerstellung wie auch Simulation FDR-Daten verfügbar waren bzw. sind; im Gegensatz zu den sogenannten "nonFDR-Typen", für welche lediglich Radardaten verfügbar sind). So betragen die Standardabweichungen zwischen Berechnungen und Messungen für die FDR-Typen bei sonAIR 1.6 dB im Nahbereich bzw. 1.3 dB im Fernbereich, bei FLULA2 2.0 dB bzw. 2.7 dB und bei AEDT 2.5 dB bzw. 2.2 dB. Bei den nonFDR-Typen im Nahbereich ist die Streuung der drei Modelle ähnlich, mit Standardabweichungen von 2.2 dB für sonAIR, 2.2 dB für FLULA2 und 2.5 dB für AEDT.

Der Vergleich simulierter mit gemessenen  $L_{AE,t10}$  in Situationen mit streifendem Schalleinfall im **Teilbericht 2** zeigt für Grossflugzeuge wie auch für den F/A-18, dass sonAIR solche Situationen gut abbilden kann. Die laterale Richtwirkung der sonAIR-Emissionsmodelle sowie das Bodeneffektmodell von sonX scheinen somit

ausreichend, und es drängen sich keine Modellanpassungen auf. Namentlich erscheint eine ergänzende Bodenzusatzdämpfung nicht notwendig und wäre im Gegenteil sogar kontraproduktiv. Letztere zeigt jedoch gute Resultate in heutigen *Best Practice* Modellen, hier FLULA2, um Meteo- und Bodeneffekte pauschal mit einer empirischen Korrektur abzubilden. Die Bodenzusatzdämpfung in FLULA2 kompensiert somit zumindest teilweise den Umstand, dass mit den zweidimensionalen FLULA2-Quellenmodellen die seitliche Richtwirkung der Flugzeuge nicht abgebildet werden kann. Allerdings zeigt FLULA2 eine Tendenz zur Überschätzung der Pegel in kleinen Distanzen und zur Unterschätzung in grossen Distanzen. Die Überschätzung in kleinen Distanzen wird darauf zurückgeführt, dass FLULA2 im Unterschied zu anderen *Best Practice* Modellen nicht zwischen quellenseitigen Installationseffekten und einem distanzabhängigen Ausbreitungsterm unterscheidet.

Die Untersuchungen zeigen für die vorliegenden Geometrien und Messdaten keinen massgeblichen Meteeinfluss. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass dieser bei grösseren Ausbreitungsdistanzen und flachen Schalleinfallswinkeln dennoch zum Tragen kommen könnte. Grössere Abweichungen zwischen FLULA2 und sonAIR, wie sie bei den SANC-TE-Vergleichen festgestellt wurden, traten denn auch erst in Situationen mit mehreren Kilometern Schallausbreitungsdistanz auf, wo keine Messungen verfügbar waren. Es wird deshalb in **Teilbericht 3** ein Konzept vorgestellt, wie solche Ausbreitungsbedingungen künftig in sonAIR für Jahresberechnungen berücksichtigt werden könnten. Dieses basiert auf der Idee, dass für Fluglärm zwei meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung massgeblich von Bedeutung sind, nämlich die Variation der Luftdämpfung und bei streifendem Schalleinfall das Auftreten von akustischen Schattenzonen. Diese Effekte werden bei der Berechnung mit sonX separat behandelt. Der Effekt akustischer Schattenzonen wird im METEO-Modus berücksichtigt. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wird eine für hinderliche Situationen repräsentative atmosphärische Schichtung definiert und eine einzelne Meteoberechnung unter diesen Bedingungen durchgeführt. Das Jahresmittel wird im Anschluss als über die Auftretenshäufigkeit hinderlicher Situationen gewichtetes energetisches Mittel einer neutralen und einer hinderlichen Atmosphäre ermittelt. Die Auftretenshäufigkeit wird basierend auf lokalen Wetterstatistiken für einen vorgegebenen Zeitraum bestimmt, so dass sich je nach Zeitraum und Ausbreitungsrichtung unterschiedliche Gewichtungen ergeben.

## Inhalt

1. Einleitung und Auftrag .....	5
2. Konzept .....	7
2.1. Stand der laufenden Arbeiten zu Vergleichen von Jahresbelastungen .....	7
2.2. Modellvergleiche für Grossflugzeuge im Nah- und Fernbereich .....	7
3. Messlayouts, verfügbare Datengrundlagen .....	9
3.1. Vergleich Grossflugzeuge (FLULA2, AEDT, sonAIR): Nah- und Fernbereich .....	9
3.2. Messunsicherheit .....	11
3.3. Bewilligungen .....	12
4. Methodik, Arbeitsschritte .....	13
4.1. Vorbereitungsarbeiten .....	13
4.2. Berechnungen sonAIR .....	13
4.3. Berechnungen FLULA2 .....	15
4.4. Berechnungen AEDT .....	17
4.5. Eigenschaften und Einstellungen der Modelle .....	21
5. Resultate .....	23
5.1. Modellvergleiche für Grossflugzeuge: FDR-Typen im Nahbereich .....	24
5.2. Modellvergleiche für Grossflugzeuge: nonFDR-Typen im Nahbereich .....	29
5.3. Modellvergleiche für Grossflugzeuge: FDR-Typen im Fernbereich .....	34
5.4. Direktvergleich der Modelle sonAIR, FLULA2 und AEDT .....	38
6. Diskussion .....	41
6.1. Vergleiche von Berechnungen und Messungen .....	41
6.2. Vergleiche der Berechnungen unabhängig der Messungen .....	42
7. Schlussfolgerungen .....	42
8. Dank .....	42
9. Abkürzungen .....	43
10. Literatur .....	44
11. Anhang .....	46
11.1. Tabellen: Differenzen $L_{AE,t10}$ Simulation – Messungen .....	46
11.2. Substitutionen und Pegelkorrekturen AEDT .....	50
11.3. Zusatzauswertung: FLULA2 – FDR-Typen im Fernbereich .....	51
11.4. Datengrundlagen .....	52

## 1. Einleitung und Auftrag

Die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, entwickelte in den letzten Jahren ein neues Fluglärm-berechnungsmodell mit der Bezeichnung sonAIR. Vergleichsberechnungen mit den bestehenden, vom Bundesamt für Umwelt BAFU empfohlenen Modellen FLULA2 bzw. IMMPAC im Rahmen des *Swiss Aircraft Noise Calculation Test Environment* (SANC-TE) [1], ergaben teilweise deutliche Abweichungen von sonAIR zu den anderen Modellen (siehe Abbildung 1-1). Es stellt sich deshalb die Frage, welches Modell die reale Exposition besser abbilden kann. Zudem ist auch von Interesse, wie die Resultate im Vergleich zu dem weltweit benutzten Programm AEDT [19] ausfallen. Letzteres Programm ist grossenteils ECAC Doc.29 [4] konform (bzw. vollständig ICAO Doc.9911 [15] konform) und entspricht somit ebenfalls grossenteils den Anforderungen der Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm (Anhang II [14] zur Richtlinie 002/49/EG [13]), nach welcher die Mitgliedstaaten Fluglärm-berechnungen durchzuführen haben.

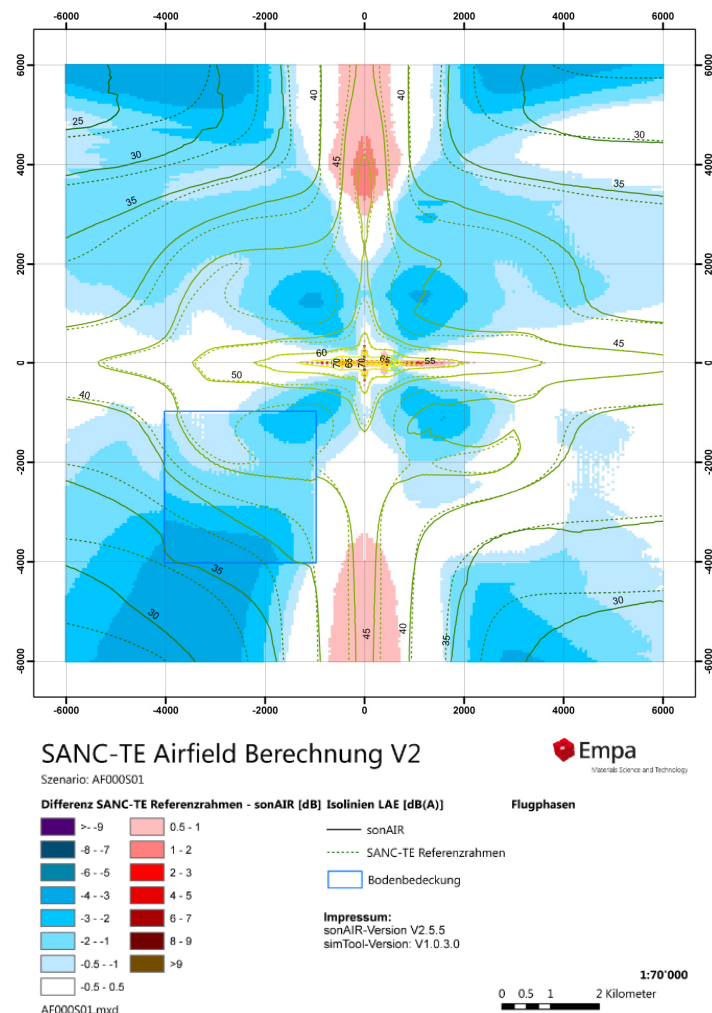


Abbildung 1-1: Differenz SANC-TE Referenzrahmen – sonAIR, Basisszenario ohne Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Flugbahnen (Abbildung 10 aus [10]).

Das Bundesamt für Umwelt BAFU, vertreten durch Kornel Köstli, erteilte daher der Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, im Januar 2020 den Auftrag, für an der Empa verfügbare Messdatensätze der Flughäfen Zürich (ZRH) und Genf (GVA) sowie des Militärflugplatzes Payerne (PAY) Vergleichsberechnungen mit drei Modellen, namentlich sonAIR, FLULA2 und AEDT (als ECAC Doc.29 bzw. ICAO Doc.9911 konformes Programm) durchzuführen. Der Fokus soll auf Vergleichen basierend auf dem  $L_{AE,t10}$  liegen, aber es sollen auch exemplarisch Pegelzeitverläufe analysiert werden. Es sollen für sonAIR, FLULA2 und AEDT Vergleiche von Grossflugzeugen im Nah- und Fernbereich der Flughäfen Genf und Zürich durchgeführt werden, wobei für gewisse Flugzeugtypen FDR-Daten für die Modellerstellung wie auch Simulation (*Flight Data Recorder* Daten) vorlagen bzw. vorliegen (FDR-Typen), während für andere Typen lediglich Radardaten zur Verfügung standen bzw. stehen (nonFDR-Typen). Separat hierzu werden für sonAIR und FLULA2 Vergleiche für Situationen mit streifendem Schalleinfall für Grossflugzeuge (Flughafen Zürich) und das Kampfflugzeug F/A-18 Hornet (Flugplatz Payerne) untersucht. Im Falle einer schlechten Übereinstimmung in Situationen mit streifenden Schalleinfall sollen zudem allfällige Modifikationen an sonAIR geprüft werden. Im Vordergrund stehen dabei zum einen Anpassungen an den Emissionsmodellen für seitliche Emissionswinkel  $> 75^\circ$  und zum anderen Anpassungen an den standardisierten LinLog-Meteoprofilen, da diese bisher nur im Hinblick auf bodennahe Quellen- und Empfängerpositionen entwickelt worden waren. Die Resultate sollen zuhänden des Auftraggebers dokumentiert werden.

Das Projekt wurde unter dem Akronym CompAIR (*Comparison of AIRcraft noise models*) bearbeitet. Die Arbeiten am Projekt wurden in Form von drei Teilberichten dokumentiert:

- **Teilbericht 1** zeigt die Vergleiche von sonAIR, FLULA2 und AEDT für Grossflugzeuge im Nah- und Fernbereich der Flughäfen Genf und Zürich,
- **Teilbericht 2** die Vergleiche von sonAIR und FLULA2 in Situationen mit streifendem Schalleinfall für Grossflugzeuge (Zürich) und das Kampfflugzeug F/A-18 (Payerne),
- **Teilbericht 3** schliesslich präsentiert das Konzept zur Berechnung von Jahresbelastungen inklusive Meteo mit sonAIR.

Der **vorliegende Teilbericht 1** gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird das Konzept der Vergleiche erläutert, Kapitel 3 beschreibt die Messlayouts und Kapitel 4 die Berechnungsmethoden und Arbeitsschritte. Die Resultate werden in Kapitel 5 aufgeführt, separat für Grossflugzeuge FDR-Typen (Kap. 5.1) und Grossflugzeuge nonFDR-Typen (Kap. 5.2) im Nahbereich, sowie Grossflugzeuge FDR-Typen im Fernbereich (Kap. 5.3). Der Bericht schliesst mit einer Diskussion (Kap. 6) und Schlussfolgerungen (Kap. 7).

## **2. Konzept**

### **2.1. Stand der laufenden Arbeiten zu Vergleichen von Jahresbelastungen**

In separaten Projekten laufen zurzeit Arbeiten zum Vergleich von realen Jahresbelastungsrechnungen mit sonAIR und FLULA2. Im Rahmen dieser laufenden Arbeiten werden die Jahresbelastungen der Flughäfen Genf und Zürich für das Jahr 2017 mit sonAIR berechnet. Diese Arbeiten nehmen vergleichsweise viel Zeit in Anspruch, da es verschiedene Arbeitsschritte gibt, welche für Jahresbelastungen neu erarbeitet werden müssen (z.B. Typenzuordnungen/Gruppierung). Die Berechnung in sonAIR erfolgt unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre, also nur mit dem Modul BASIC, da die Frage, ob und wie das Wetter berücksichtigt werden muss bzw., erst im Rahmen dieses Projektes behandelt wurde (vgl. Teilbericht 3). Die sogenannte Bodenzusatzdämpfung von FLULA2 für streifenden Schalleinfall über grosse Distanzen, welche in sonAIR nicht implementiert ist, wurde als wichtige Ursache für die bei den SANC-TE-Berechnungen festgestellten Unterschiede zwischen den Modellen sonAIR und FLULA2 identifiziert. Deshalb wurde Genf 2017 erneut mit FLULA2, aber ohne Bodenzusatzdämpfung, berechnet. Diese Ergebnisse werden für Genf mit der resultierenden Belastungsrechnung von sonAIR verglichen (sonAIR vs. FLULA2 mit bzw. ohne Bodenzusatzdämpfung). Hingegen sind für Jahresbelastungen – zumindest vorerst – keine Vergleichsberechnungen mit AEDT geplant.

Diese Arbeiten werden zeigen, wie stark sich die methodischen Unterschiede von FLULA2 und sonAIR auf die Resultate von Jahresberechnungen auswirken. Diese Erkenntnisse sind insbesondere hinsichtlich einer späteren Ablösung von FLULA2 mit sonAIR wichtig. Sie beantworten jedoch nicht die Frage, welches Programm Messwerte besser abzubilden vermag. Letztere Frage wird im Rahmen des vorliegenden Projektes CompAIR beantwortet.

### **2.2. Modellvergleiche für Grossflugzeuge im Nah- und Fernbereich**

In den Jahren 2017 und 2018 wurden im Rahmen einer Validierung berechnete Immissionspegel des Fluglärmsimulationsprogramms sonAIR mit Einzelflugmessungen von Monitoringstationen (Nahbereich) der Flughäfen Zürich und Genf sowie mit Empa-eigenen Messungen (Fernbereich) verglichen, wobei neben akustischen Messdaten auch Radar- und FDR-Daten verwendet wurde [8][11][16]. Die in diesem Projekt untersuchten Berechnungen sind für sonAIR somit bereits verfügbar. Die Vergleichsberechnungen, bei welchen Messungen und Berechnungen von Einzelflügen gegenübergestellt werden, werden für die Modelle FLULA2 und AEDT wiederholt um die Fähigkeit der drei Programme sonAIR, FLULA2 und AEDT, Einzelereignissen abzubilden, zu prüfen. Falls für ein Programm systematische (mittlere) Abweichungen zwischen Berechnungen und Messungen resultieren (beispielsweise im Fernbereich des Flughafens), ist dies ein Hinweis auf die Grenzen des entsprechenden Programms. Zudem können die Vergleiche Hinweise darauf geben, wo (Modell-)Anpassungen angezeigt wären, um solche Abweichungen zu vermeiden oder zu vermindern.

Bei den Vergleichen ist zu berücksichtigen:

- AEDT wie FLULA2 wurden – im Gegensatz zu sonAIR – primär für Jahresbelastungen ( $L_{Aeq}$ ) ausgelegt und nicht für Einzelflugberechnungen. Zumindest eine höhere Streuung zwischen Messung und Berechnung als in sonAIR ist somit zu erwarten.
- Auf Einzelflugbasis ist der Vergleich FLULA2 mit sonAIR insofern interessant, als beide Quelldatensätze mittels der gleichen Messkampagne am Flughafen Zürich erstellt wurden: Die 25 wichtigsten Quelldatensätze von FLULA2 wurden aus den sonAIR-Quellenmodelle abgeleitet [12]. Bei diesem Vergleich liegt der Fokus somit auf dem Einfluss des Detaillierungsgrads der Quellenmodellierung und des Ausbreitungsmodells.
- Bei AEDT ist zu berücksichtigen, dass hier vorgegebene NPD-Tabellen (*Noise Power Distance* Tabellen) verwendet wurden, die nicht auf die lokalen Gegebenheiten angepasst wurden. Zusätzlich können zumindest die Flugprofile der real geflogenen Flugbahnen nur teilweise abgebildet werden (s.u.). Es wird somit u.a. geprüft, wie gut diese standardmässig in AEDT enthaltenen Daten die Flotte und die Verfahren der Flughäfen Genf und Zürich wiederzugeben vermögen. Grundsätzlich wäre es jedoch möglich und auch zulässig, die NPD-Tabellen mit lokalen Messungen zu justieren, was sich voraussichtlich positiv auf die Übereinstimmung mit den Messdaten auswirken würde. Dieser Schritt ist jedoch aufwändig und in diesem Projekt nicht vorgesehen.



### 3. Messlayouts, verfügbare Datengrundlagen

#### 3.1. Vergleich Grossflugzeuge (FLULA2, AEDT, sonAIR): Nah- und Fernbereich

Die für die vorliegenden Vergleiche verwendeten Datengrundlagen stammen aus zwei Projekten, nämlich aus der sonAIR-Validierung 2016 [8] und dem sonAIR-Monitoring 2016 und 2017 [11]. Als Messstandorte im Nahbereich (Kap. 6 in [8]) standen insgesamt 13 Monitoringstationen (*Noise Monitoring Terminals*, NMT) in Zürich (Abbildung 3-1; Tabelle 12 in [8]) und 4 NMT in Genf zur Verfügung (Abbildung 3-2; Tabelle 13 in [8]). (NMT 14 von Zürich trug aufgrund der gewählten Pufferzonen (s.u.) keine Messwerte bei; somit wurden 13 NMT von Zürich verwendet.) Es wurden insgesamt 5 Typen mit FDR-Daten (FDR-Typen mit Modellvariante 3D) und 31 Typen ohne FDR-Daten (nonFDR-Typen mit Modellvariante 3Dred) erfasst. Für den Fernbereich (Kap. 4 in [8]) standen 4 Messstationen der Empa zur Verfügung (Abbildung 3-3; Tabelle 5 in [8]). Hier wurden 5 Typen mit FDR-Daten erfasst (FDR-Typen mit Modellvariante 3D).

Als Messstandorte im Nahbereich (Kap. 5 in [11]) standen dieselben 13 NMT in Zürich (Abbildung 3-1) und 4 NMT in Genf zur Verfügung (Abbildung 3-2). Es wurden insgesamt 3 zusätzliche Typen mit FDR-Daten (FDR-Typen mit Modellvariante 3D) erfasst, namentlich die B77W, BCS1 und BCS3. Hingegen wurden für diese Typen keine Messungen im Fernbereich durchgeführt.

Details zu den Messlayouts inkl. Informationen zu den dargestellten kreisförmigen Pufferzonen (Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2) und Gates (Abbildung 3-3) finden sich in [8][11]. Man beachte, dass die Modellvariante 3D (FDR-Typen) das beste verfügbare Modell mit Einfluss der Konfiguration und dreidimensionaler Richtwirkung ist, während die Modellvariante 3Dred (nonFDR-Typen) ein reduziertes Modell ohne Einfluss der Konfiguration Richtwirkung darstellt (Details vgl. [7]).

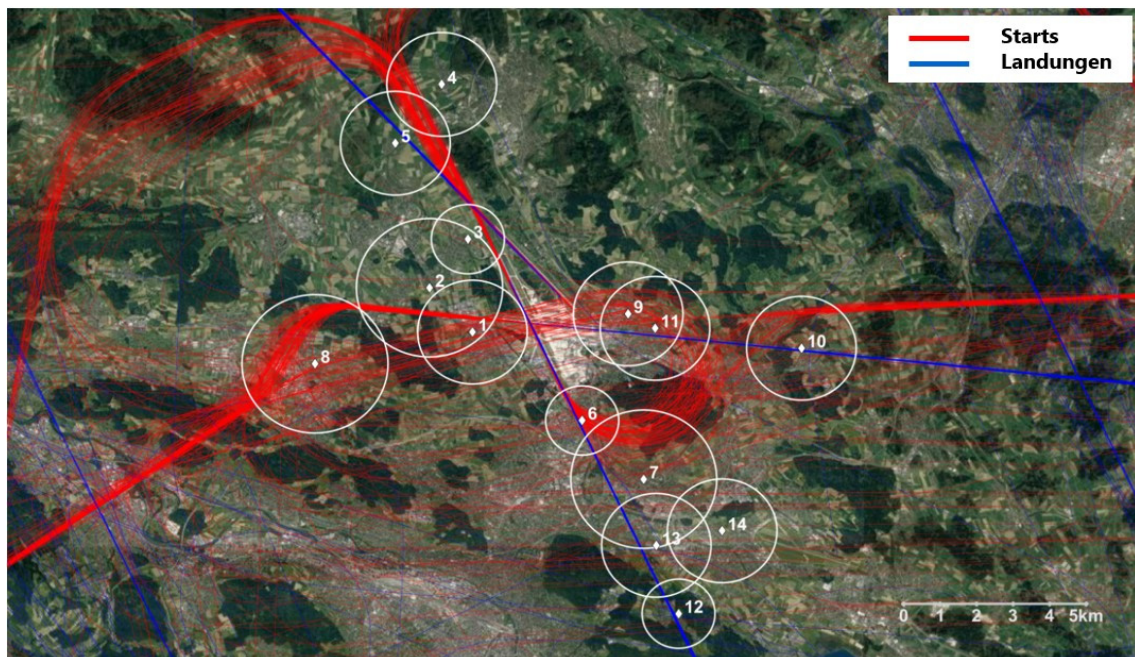


Abbildung 3-1 Übersicht der Messpunkte im Nahbereich des Flughafens Zürich mit Flugspuren [8][11]. NMT 14 trug für die Vergleiche keine Messwerte bei. (Karte: © Google Maps, by Google).



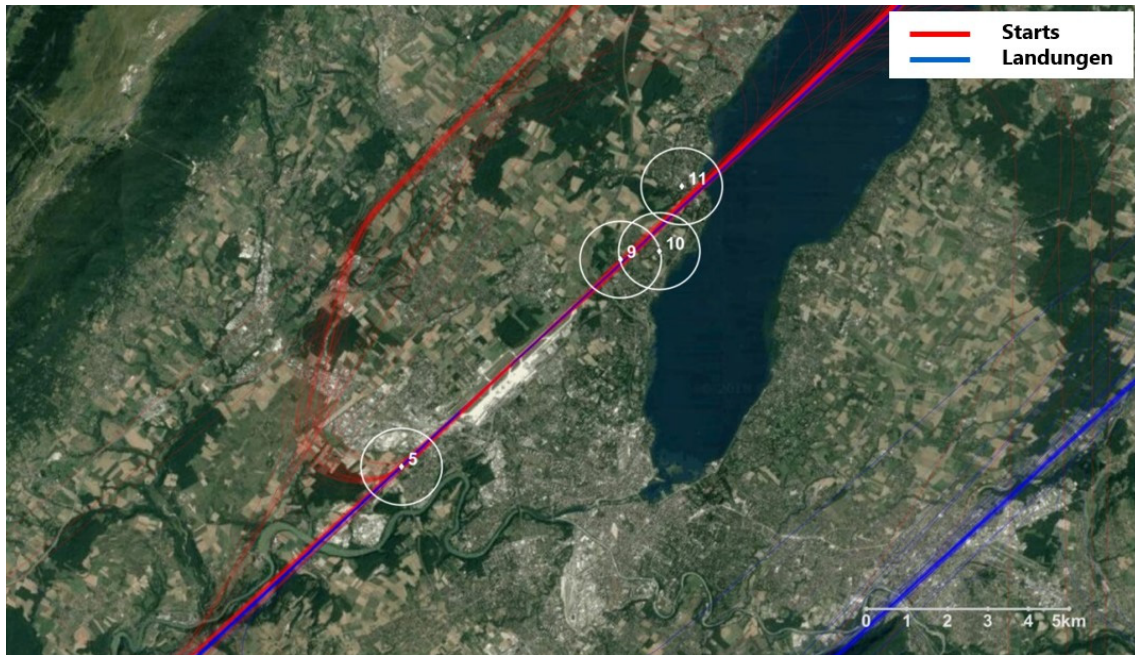


Abbildung 3-2 Übersicht der Messpunkte im Nahbereich des Flughafens Genf mit Flugspuren [8][11].  
(Karte: © Google Maps, by Google).



Abbildung 3-3 Übersicht der Messpunkte im Fernbereich des Flughafens Zürich mit Flugspuren der Landungen 28 und 34 [8][11]. (Karte: © Google Maps, by Google).

Im Projekt zur Validierung von sonAIR [8] zeigte sich, dass sonAIR die Messwerte beim Messpunkt NMT 5 von Genf im Mittel um ungefähr 2 dB überschätzt. Dies ist die deutlich grösste Abweichung zwischen Simulation und Messung aller untersuchten Messpunkte in Zürich und Genf, obwohl NMT5 direkt unterhalb der Flugbahn und somit nicht in einer prinzipiell schwierig zu simulierenden Ausbreitungssituation liegt. Die im vorliegenden Projekt durchgeführten Simulationen mit FLULA2 und AEDT zeigten denselben Trend. Dies legt den Schluss nahe, dass die Abweichungen nicht auf die Simulation, sondern auf die Messungen zurückzuführen sind. Gegebenenfalls könnte die Platzierung des Mikrophons auf einem relativ niedrigen Garagendach, welches von dichtem und hohem Baumbewuchs umgeben ist, die systematisch zu tiefen Messpegel erklären. Da von den NMTs nur Kennwerte ohne Audioaufzeichnung zur Verfügung standen, konnte jedoch keine weiterführende Untersuchung der Ursachen durchgeführt werden, um daraus z.B. einen verlässlichen Korrekturwert herzuleiten. Aus diesem Grund werden die Daten von NMT 5 des Flughafens Genf, wie auch in der früheren Validierung [16], aus der hier präsentierten Datenanalyse ausgeschlossen.

Untenstehende Tabelle 3-1 fasst die verfügbaren Ereignisse zusammen, wobei der Messpunkt 5 in GVA nicht mitaufgeführt ist. Die erfassten Flugzeugtypen finden sich im Anhang (Kap. 11.1).

*Tabelle 3-1      Verfügbare Ereignisse der Flughäfen Zürich (ZRH) und Genf (GVA) (Übersicht). Bei GVA wurde der Messpunkt 5 aus dem Vergleich ausgeschlossen und ist hier nicht aufgeführt.*

Bereich	# FDR-Typen	# non-FDR-Typen	Flughafen	# Ereignisse / # Flüge	# Mess-Pos.
Nah	8		ZRH	3'055 / 1'355	13
	8		GVA	981 / 377	3
		30	ZRH	10'120 / 4'635	13
		29	GVA	5'127 / 2'024	3
Fern	5		ZRH	550 / 394	4
			GVA	-	
		-	ZRH	-	
		-	GVA	-	

### 3.2. Messunsicherheit

Die für die vorliegenden Vergleichsberechnungen von CompAIR verwendeten Messdatensätze von Zürich und Genf sind mit Messunsicherheiten behaftet. Messunsicherheiten werden durch die verwendeten Messgeräte sowie durch lokale Einflussfaktoren bestimmt. Gemäss [21] sollte zwischen begleiteten Messungen und automatischen, unbegleiteten Messungen unterschieden werden.

Begleitete Messungen, wie diejenigen im Fernbereich des Flughafens Zürich, zeichnen sich durch gut kontrollierte Messbedingungen aus. Lokale Einflussfaktoren wie Fremdgeräusche oder Reflexionen an Gebäuden können verhindert oder vermieden werden. Übrig bleibt die Messunsicherheit der verwendeten Geräte, die rund 0.5 dB beträgt.

Automatische Messungen, wie diejenigen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf, zeichnen sich durch weniger kontrollierte Messbedingungen aus. Hier sind die Standorte aus messtechnischer Sicht oft nicht ideal. Neben gerätebedingten Unsicherheiten beeinflussen hier Bebauung und Fremdgeräusche die Unsicherheit der Messung. Je nach untersuchten Standorten in [21] bewegt sich die Messunsicherheit automatischer Messungen zwischen 0.6 und 0.9 dB.

Diese Unsicherheiten sollten in den Vergleichen der Berechnungen mit den Messungen berücksichtigt werden (vgl. hierzu auch Kap. 6 in [21] "*Vergleich zwischen Berechnung und Messung*").

### 3.3. Bewilligungen

Die Bewilligung zur Verwendung der Daten und Darstellung der Resultate in aggregierter Form für die Flughäfen Genf und Zürich (ursprünglich bereitgestellt für [8][11]) liegen der Empa vor:

- FDR-Daten für Genf und Zürich: Datenbewilligung der SWISS vom 07.10.2020 (Patrick Aschwanden, SWISS, E-Mail "*RE: Vergleich von sonAIR mit FLULA2 und AEDT*").
- NMT-Messdaten, Radardaten Zürich: Datenbewilligung des Flughafens Zürich (FZAG) vom 29.09.2020 (Nutzungsvereinbarung der FZAG).
- NMT-Messdaten, Radardaten Genf: Datenbewilligung des Flughafens Genf (AIG) vom 12.10.2020 (Alison Grimond-Teste, AIG, E-Mail "*RE: CompAIR: Comparison of sonAIR, FLULA2, AEDT with measurements*").

## **4. Methodik, Arbeitsschritte**

In diesem Kapitel werden für die drei Modelle die jeweiligen Arbeitsschritte und Methoden der Einzelflugberechnungen dokumentiert. Die Programmstruktur von AEDT ist nicht darauf ausgelegt, eine Vielzahl an Einzelflugereignissen zu simulieren und Einzelereignispegel auszugeben. Im Rahmen dieses Projektes wurde daher eine Methodik entwickelt, um solche Berechnungen automatisiert durchzuführen. Diese wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

Die wichtigsten Daten, Speicherorte und Skripte sind im Anhang (Kap. 11.4) aufgeführt.

### **4.1. Vorbereitungsarbeiten**

In einem ersten Schritt wurden die Bewegungslisten, Flugbahndaten und Empfängerpunkte (Messstandorte) zusammengestellt, um vollständige Datensätze für die Berechnungen der Flughäfen Genf und Zürich zu erhalten. Zudem wurden die bereits verfügbaren, ausserhalb von CompAIR erarbeiteten Berechnungsergebnisse von sonAIR zusammengestellt.

### **4.2. Berechnungen sonAIR**

Die sonAIR-Simulationen der Grossflugzeuge an den Flughäfen Zürich und Genf stammen aus dem Validierungs- [8] und Monitoring-Projekt [11]. Für die vorliegende Untersuchung wurden mit sonAIR keine neuen Simulationen durchgeführt. Entsprechend kann die detaillierte Methodik der Datenaufbereitung in den Berichten [8] und [11] nachgelesen werden. Da die Methodik jedoch für die Interpretation der Ergebnisse wichtig ist, werden der Vollständigkeit halber die wichtigsten Aufbereitungsschritte und Simulationseinstellungen im Folgenden dennoch stichwortartig dokumentiert.

#### **4.2.1. Aufbereitung Messdaten**

- a. Messungen im Nahbereich (NMT-Messungen ZRH und GVA): Die Daten wurden bereits flughafenseitig aufbereitet, es wurden Kennwerte extrahiert und mit Flugplandaten verknüpft. Empa-seitig wurden weiter sämtliche Messungen ausgeschlossen, welche bei Windgeschwindigkeiten  $> 5 \text{ m/s}$  oder bei Regen erfasst wurden, sowie Messungen mit einer Event-Dauer  $< 60 \text{ s}$  oder einer TG-Zeit  $< 10 \text{ s}$  (TG-Zeit: Zeitraum über einer messpunktspezifische Pegelschwelle (ZRH) bzw. einer dynamischen Pegelschwelle (GVA), vgl. [8]). Weiterführende Kontrollen wurden nicht durchgeführt, da entsprechende Audiodateien nicht zur Verfügung standen.
- b. Messungen im Fernbereich ZRH (von der Empa durchgeführt): Ausschneiden der Einzelereignisse aus kontinuierlichem Messsignal mittels Abgleich mit FDR-Daten, automatisierte und manuelle Kontrolle auf Störgeräusche, Ausschluss von Schlechtwettersituationen (hohe Windgeschwindigkeit, Regen), Berechnung der akustischen Kenndaten aus der Audioaufzeichnung.

#### 4.2.2. Ereignisauswahl

- c. Filterung der Ereignisse nach Flugzeugtyp-Triebwerks-Kombination, Ausschluss von Ereignissen, für welche kein sonAIR Quellenmodell vorhanden ist. Aufteilung der Ereignisse in Flüge der Swiss und anderen Airlines. Auswahl eines Daten-Subsets aus beiden Gruppen mittels stratifizierter Auswahl, sodass sämtliche vorkommenden Abfluggewichte, Flugprozeduren und Wetterbedingungen gleichmässig vertreten sind.

#### 4.2.3. Aufbereitung Flugbahndaten

- d. Swiss-Typen: Beschaffung von FDR-Daten der ausgewählten Ereignisse, Prüfung der Daten auf Ausreisser und Inkonsistenzen, gegebenenfalls Korrektur oder Ausschluss.
- e. Übrige Typen: Aufbereitung der Radar-Daten, Parameterschätzung gemäss [9].

#### 4.2.4. Zusammentragen weiterer Inputdaten

- f. Meteorologische Profile: Beschaffung von atmosphärischen Profilen gemäss COSMO1-Modell. Im Fernbereich von ZRH Verwendung der originalen 1 km × 1 km Auflösung der Profile. Im Nahbereich (NMT) Mittelung der Profile auf 10 km × 10 km Kacheln (ZRH: zwei Kacheln für Gebiete nördlich und südlich des Flughafens; GVA: eine Kachel für gesamtes Untersuchungsgebiet; vgl. Übersichtskarte in [8]).
- g. Geländedaten: im Fernbereich DTM mit 25 m × 25 m Auflösung. Im Nahbereich DTM mit 2 m × 2 m Auflösung, wobei Gebäude, auf welchen die NMTs installiert waren, manuell aus dem DOM als Gelände-Feature integriert wurden (für realistischere Dachreflexionen).
- h. Bodenbedeckung: im Fernbereich aus Vector25-Daten extrahiert (Auflösung 5 m × 5 m) und im Nahbereich aus amtlicher Vermessung der Kantone extrahiert (Auflösung 5 m × 5 m). Messgebäude mit begrüntem Dach manuell von Kategorie *Gebäude* auf Kategorie *Wiese* geändert.
- i. Gebäudedaten: im Fernbereich keine Gebäudedaten verwendet, im Nahbereich vektorieller Gebäudedatensatz aus swissBUILDINGS3D verwendet, sonAIR berücksichtigt Abschirmung durch Gebäude, aber keine Reflexionen.

#### 4.2.5. Einzelflugsimulation

- j. Dämpfungsberechnung mit sonX Version 2.8.8 im METEO-Modus.
- k. Emissionsberechnung mit sonAIR Wissenschaftstool Version 7 und Emissionsmodellen Version 1.1-0013. Swiss-Typen (FDR-Typen) wurden mit dreidimensionaler Richtwirkung und unter Berücksichtigung der Konfiguration simuliert (Modellvariante 3D), Flüge anderer Airlines (nonFDR-Typen) mit dreidimensionaler Richtwirkung und ohne Berücksichtigung der Konfiguration (Modellvariante 3Dred).

Als Resultat der Simulation wird pro Ereignis ein Pegel-Zeit-Verlauf erzeugt. Ausserdem werden pro Ereignis die Pegelmasse  $L_{AE}$ ,  $L_{AE,t10}$  (über die 10-dB-down-Zeit) bzw.  $L_{AE,tg}$  (über die TG-Zeit) sowie  $L_{AS,max}$  berechnet und in der Bewegungsliste zum zugehörigen Eintrag ergänzt. Für die vorliegenden Vergleiche werden der  $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$  verwendet, mit Fokus auf den  $L_{AE,t10}$ . Ebenfalls werden die entsprechenden Pegelmasse aus den Messdaten ergänzt, sodass basierend auf der Bewegungsliste ein Vergleich zwischen Simulation

und Messung erfolgen kann. Schliesslich erfolgte eine statistische Auswertung (Boxplots, Scatterplots, mittlere Differenzen) analog zu den Berichten [8][11].

### 4.3. Berechnungen FLULA2

Als Input für die Einzelflugsimulation in FLULA2 [6] wurden die sonAIR-Trajektorien aus dem sonAIR Validierungsprojekt [8] und dem Monitoring-Projekt [11] verwendet. Die Flugbahndaten mussten hierfür in einem ersten Schritt in typen-spezifische, für FLULA2 lesbare Flugbahnen (sog. TC-Files) umgewandelt werden.

Dies geschah mit einem Matlab-Skript, welches die notwendigen Informationen für die Simulation wie Koordinaten, Prozedur oder Zeitintervall herausliest und in das TC-Format übersetzt. Die Information des Rollwinkels (*Bank Angle*) (siehe Abbildung 4-1) wird zwar für den Aufbau des Formats des TC-Files benötigt, bleibt jedoch in der Simulation von FLULA2 unberücksichtigt (rotationssymmetrische, zweidimensionale Quellenmodelle). Im gleichen Schritt parallel dazu erfolgte auch die Übersetzung der sonAIR-Typenbezeichnung in die FLULA2-Bezeichnung TYP10 und den zugehörigen akustischen Referenztypen RC-TYP gemäss Bericht [12].

Zusammen mit weiteren Inputdaten wie den Koordinaten der Messstationen und dem Geländemodell DHM25 (Auflösung 25 m × 25 m) erfolgte die Simulation der Einzelereignisse von Zürich und Genf. Es wurden alle verwertbaren Flugereignisse gemäss Tabelle 3-1 an allen Messstandorten (Mess-/Monitoringstationen) berechnet. Für die Einzelflugsimulation wurde der aktuelle Quellendatensatz RC2019\_01 [12] verwendet. FLULA2 verwendet für die Simulation standardmässig die ISA-Standardatmosphäre ( $T = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 1013 \text{ mbar}$ , rel. Feuchte = 70%) sowie als Untergrundtyp Grasland. Gebäude werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

FLULA2 unterscheidet für den Startvorgang aufgrund des Verhältnisses zwischen aktuellem (ATOW) und maximalem Abfluggewicht (MTOW) zwei unterschiedliche Richtcharakteristiken: die reduzierte Startleistung VG ( $\text{ATOW/MTOW} < 0.85$ ) und die hohe Startleistung FT ( $\text{ATOW/MTOW} \geq 0.85$ ). Die Simulation in FLULA2 wurde daher zwei Mal, für beide Leistungssetzungen, durchgeführt. Die Zuweisung der korrekten Werte (basierend auf VG oder FT) erfolgte in einem separaten, letzten Schritt, indem die Information des Startgewichts der Flugzeuge aus den Bewegungslisten der sonAIR-Projekte berücksichtigt wurden.

Als Resultat wurden der  $L_{AE}$ ,  $L_{AS,max}$  und  $L_{AE,t10}$  pro simuliertem Einzelflug ausgegeben. Für die vorliegenden Vergleiche werden der  $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$  verwendet, mit Fokus auf den  $L_{AE,t10}$ . Die Ergebnisse wurden in tabellarischer Form zusammengestellt und anhand der Event ID mit den Bewegungslisten aus den sonAIR-Projekten verknüpft. Schliesslich erfolgte eine statistische Auswertung (Boxplots, Scatterplots, mittlere Differenzen) analog zu den Berichten [8][11].

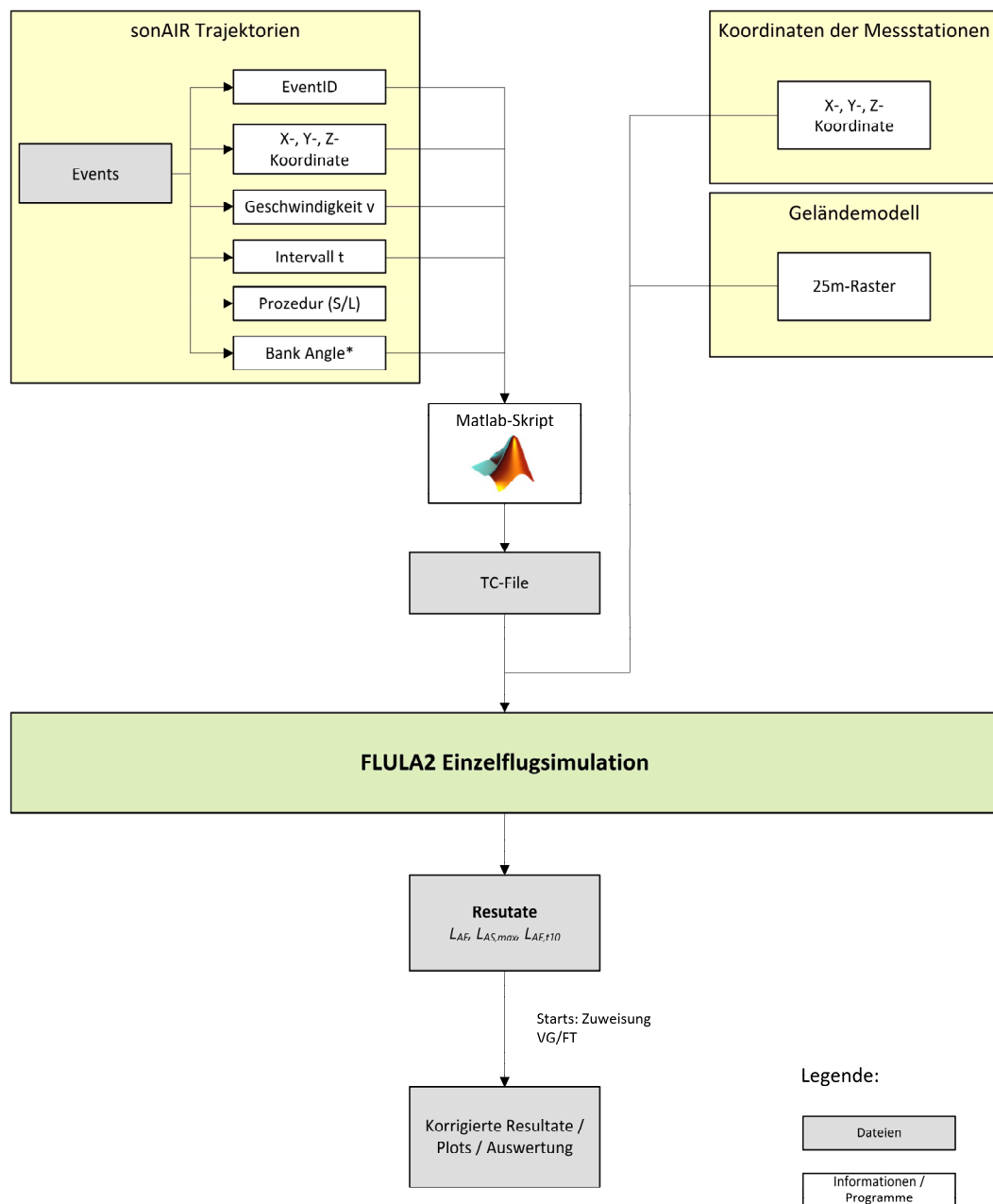


Abbildung 4-1 Überblick über die Arbeitsschritte für die Einzelflugsimulation mit FLULA2.



## 4.4. Berechnungen AEDT

### 4.4.1. Berechnungsgrundlagen

AEDT ist ein Modell zur Berechnung von Treibstoffverbrauch, Emissionen, Lärm und Auswirkungen auf die Luftqualität [19]. Der Lärm-Berechnungsansatz unterscheidet sich grundlegend von sonAIR und FLULA2. Lärmberechnungen werden mit sogenannten *Noise-Power-Distance (NPD)* Tabellen durchgeführt. Diese beinhalten Immissionspegel in Abhängigkeit von Schub und Distanz zum Empfänger, die standardmässig auf der SAE-AIR-1845 Referenz-Atmosphäre basieren [17], wobei sie auch in die Bedingungen der ISA Standardatmosphäre oder einer lokalen Atmosphäre umgerechnet werden können. Leistungsberechnungen werden anhand der ISA-Standard-Atmosphäre durchgeführt (vgl. AEDT Technical Manual [19], Kap. 11.2.3.1.2, Table 11-14). Die Daten werden spezifisch pro Flugzeugtyp, Prozedur und Pegelmass ( $L_{A,max}$ ,  $L_{AE}$ , etc.) angegeben. Für die segmentweise Lärmberechnung eines Fluges wird zwischen einzelnen Werten der NPD-Tabelle interpoliert. Tabelle 4-1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines NPD-Datensatzes.

Tabelle 4-1 Ausschnitt eines NPD-Datensatzes aus ECAC Doc. 29 Vol.1 [4].

NPD Identifier	Noise Descriptor	Op Mode	Power Setting	L_200ft	L_400ft	L_630ft	L_1000ft	L_2000ft	L_4000ft	L_6300ft	L_10000ft	L_16000ft	L_25000ft
V2527A	SEL	A	2000.00	93.1	89.1	86.1	82.9	77.7	71.7	67.1	61.9	55.8	49.2
V2527A	SEL	A	2700.00	93.3	89.2	86.2	83.0	77.7	71.8	67.2	62.0	55.8	49.3
V2527A	SEL	A	6000.00	94.7	90.5	87.4	83.9	78.5	72.3	67.7	62.5	56.3	49.7
V2527A	SEL	D	10000.00	95.4	90.7	87.3	83.5	77.7	71.1	66.3	60.9	54.6	47.4
V2527A	SEL	D	14000.00	100.4	96.1	93.0	89.4	83.5	77.0	72.2	66.7	60.1	53.0
V2527A	SEL	D	18000.00	103.2	99.1	96.2	92.9	87.4	81.1	76.5	71.1	64.9	57.9
V2527A	SEL	D	22500.00	105.1	101.2	98.5	95.4	90.3	84.3	79.9	74.8	68.7	62.0
V2527A	LAmx	A	2000.00	89.3	82.8	78.2	73.4	65.8	57.4	51.2	44.4	36.7	28.6
V2527A	LAmx	A	2700.00	89.5	83.0	78.3	73.5	65.8	57.4	51.3	44.4	36.7	28.6

Für die Lärmberechnung eines Flugereignisses verwendet AEDT grundsätzlich Standard-Prozedural-Flugprofile; eingegeben wird lediglich die reale Flugspur. Ein solches Profil beschreibt dabei Höhe, Geschwindigkeit, Schub in Funktion der Höhe über Boden (vgl. Kap. 3.6 in [19]). Aus den Profilen und Flugspuren werden dreidimensionale Flugbahnen gebildet und mittels Segmentierung in eine Folge geradliniger Segmente unterteilt. Die energetischen Beiträge der Segmente (d.h. Teilflugbahnen) zur Lärmimmission werden separat bestimmt und schliesslich energetisch superponiert, um den  $L_{AE}$  des Fluges zu erhalten.

### 4.4.2. Simulationsmethodik

AEDT ist im vorliegenden Berechnungsumfang wie FLULA2 für die Berechnung von mittleren Lärmbelastungen ausgelegt (vgl. z.B. [18]). Dabei fliessen in eine Belastungsrechnung zahlreiche Flugbewegungen ein und werden gesamthaft simuliert. Die Simulation von Einzelfügen ist zwar ebenfalls möglich, die Berechnung einer Vielzahl von Einzelfügen ist von der Programmstruktur her jedoch nicht vorgesehen.

AEDT bietet zwei Möglichkeiten, einzelne oder mehrere Flugereignisse zu definieren: alle zur Berechnung nötigen Einstellungen (i) mittels *Graphical User Interface* (GUI) zur manuellen Bedienung des Programms oder (ii) mittels einer *AEDT Standard Input File* (ASIF, siehe unten) vorzunehmen [20]. Da im Rahmen dieses

Projektes mehrere tausend Einzelflugereignisse simuliert werden (vgl. Tabelle 3-1), eignet sich das GUI zur manuellen Bedienung des Programms für die Berechnung nicht und diene lediglich der Verifizierung von Berechnungen mittels ASIFs. Alle Flugereignisse werden folglich mithilfe von ASIFs definiert, wobei für die vorliegende Untersuchung (individuelle  $L_{AE}$  und  $L_{A,max}$  vieler Einzelereignisse) für jedes Flugereignis ein separates ASIF erstellt werden musste. Es können zwar mehrere bzw. viele Flugereignisse gleichzeitig mit einem ASIF simuliert werden, doch ist es postum nicht möglich, die entsprechenden Ergebnisse pro Flugereignis einzeln auszuwerten.

Um ein ASIF in AEDT einzulesen, besteht wiederum die Möglichkeit, dies manuell via GUI vorzunehmen, was aber erneut einen zu hohen Zeitaufwand bedeuten würde. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das *ASIF Importer Command-Line Tool* zu verwenden, welches via cmd.exe aufgerufen werden kann [19]. Dieses Tool liest ein ASIF als neue sogenannte "study" in AEDT ein und vermeidet so die Interaktion mit dem GUI.

Mit den oben beschriebenen Methoden ist es möglich, die jeweiligen Flugereignisse einzeln einzulesen. Damit ist jedoch in AEDT noch nicht festgelegt, was berechnet soll ( $L_{AE}$ ,  $L_{AS,max}$ , etc.), da die Berechnungseinstellungen nicht mittels ASIF definiert werden können. Alle Grundlagedaten von AEDT (Flughafendaten, NPD-Tabellen, Informationen zu einem Flugereignis etc.) sind in einer spezifischen SQL-Datenbank hinterlegt. Dort werden auch die Berechnungseinstellungen definiert. Diese können mithilfe von SQL-Skripts via cmd.exe eingestellt werden. Um diese Einstellungen vorzunehmen, wurden daher die entsprechenden SQL-Befehle programmiert und für jeden Flug ausgeführt.

Um die eigentliche Berechnung durchzuführen, kann das AEDT Tool *Run-Study.exe* via cmd.exe aufgerufen werden, wodurch ein bestimmtes Flugereignis mit den entsprechenden Einstellungen simuliert wird.

Ist die Berechnung eines Flugereignisses abgeschlossen, speichert AEDT die Lösungsdaten in der SQL-Datenbank, aus welcher diese mithilfe eines weiteren SQL-Skripts via cmd.exe ausgelesen und an einem definierten Ort gespeichert werden können. Für die vorliegenden Vergleiche wurden der  $L_{AE}$  und  $L_{AS,max}$  verwendet, mit Fokus auf den  $L_{AE}$  (keine Ausgabe von  $L_{AE,t10}$  möglich). Die Ergebnisse wurden wiederum in tabellarischer Form zusammengestellt und mit den Bewegungslisten aus den sonAIR-Projekten verknüpft, um die Daten analog zu den Berichten [8][11] statistisch auszuwerten (Boxplots, Scatterplots, mittlere Differenzen).

Eine Übersicht der oben beschriebenen Arbeitsschritte in Form eines Flussdiagramms findet sich in der folgenden Abbildung 4-1, welche auch das jeweils verwendete Programm zur Durchführung des Arbeitsschrittes in Klammern angibt. Eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsschritte findet sich in Abbildung 4-3.

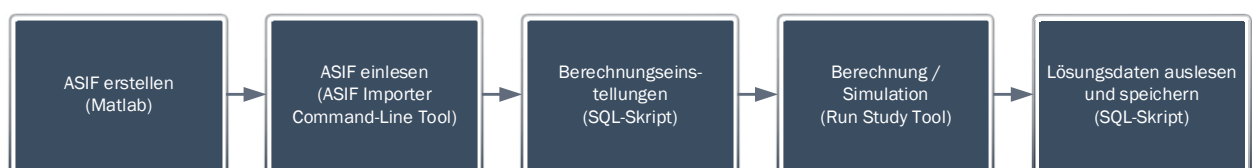


Abbildung 4-2 Vereinfachtes Flussdiagramm zur Simulation von Einzelflügen mit AEDT.

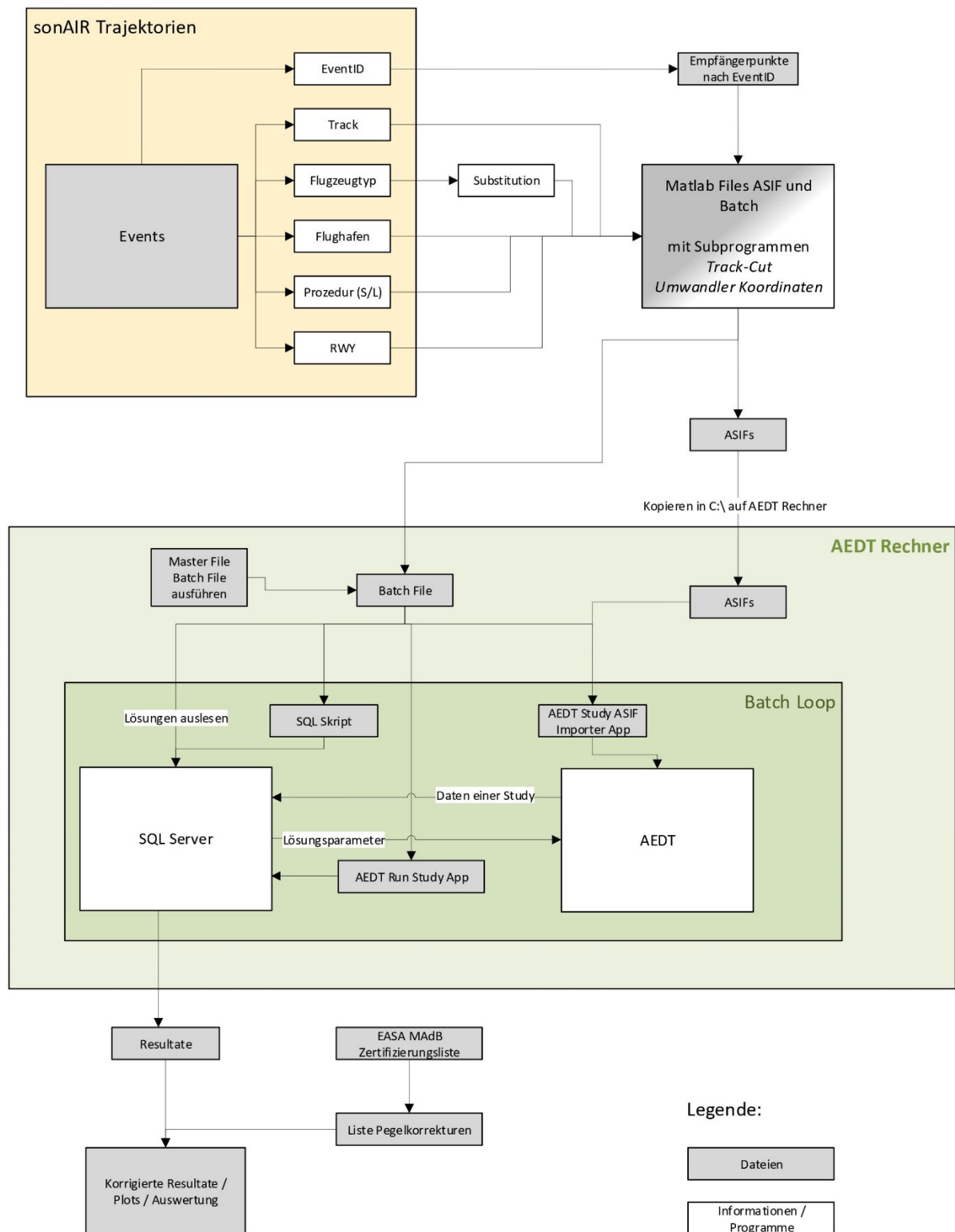


Abbildung 4-3 Detaillierte Beschreibung der Arbeitsschritte und verwendeten Inputdaten für die Einzelflugberechnung mit AEDT.

#### 4.4.3. Erstellen der ASIFs

Ein ASIF ist ein spezifisches Datenformat basierend auf XML, mit dem Daten ins AEDT eingelesen werden können. Im Rahmen der vorliegenden Berechnungen werden dabei folgende Daten eingelesen:

- Bestimmung des Flughafens, zu welchem die entsprechenden Daten bereits vorliegen (ZRH, GVA)
- Koordinaten der Empfängerpunkte (gleich wie die Koordinaten der NMT-Stationen)
- Flugdaten wie Flugzeugtyp, Triebwerkstyp, Prozedur (Start / Landung), Start- und Landepiste, Flugroute, x- y- und z-Koordinaten

Die dazu benötigten Daten werden aus dem sonAIR Validierungs- [8] und Monitoring-Projekt [11] mithilfe von Matlab eingelesen und im ASIF-Format ausgegeben. Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Inputdaten genauer beschrieben.

#### 4.4.4. Inputdaten

Die jeweiligen Einzelflugtrajektorien werden als Text-File eingelesen (sonAIR-spezifisches Format), wobei lediglich die Flugspuren verwendet wurden und AEDT diesen je nach Flugzeugtyp und Prozedur ein spezifisches Standard-Flugprofil aus der eigenen Datenbank zuweist. In AEDT sind für jede Start- und Landepiste die jeweiligen Abhebe- und Absetzpunkte als fixe Koordinaten angegeben. Dabei wird eine Flugspur so beschrieben, dass sie auf einem dieser Punkte beginnt bzw. endet; Programm-intern wird sie dann bis zum jeweiligen Pistenanfang bzw. -ende verlängert. Die aus der sonAIR-Validierung verwendeten Flugspuren reichen jedoch über diese Punkte hinaus (namentlich bis zum jeweiligen Pistenanfang bzw. -ende) und müssen vorab gekürzt werden, um Fehler in den resultierenden Flugbahnen zu vermeiden.

Koordinatenangaben von Flugspuren und Mikrophonstandorten liegen in Schweizer Landeskoordinaten (CH1903+ LV95) vor und werden in das globale Referenzsystem WGS84 transformiert.

Die Flugzeug- und Triebwerksbezeichnungen von sonAIR stimmen nicht mit den Bezeichnungen in AEDT überein und mussten daher im ASIF entsprechend angepasst werden. Da die Anzahl Flugzeugtypen in diesem Projekt überschaubar ist, wurden diese Anpassungen manuell vorgenommen. AEDT stellt eine umfassende Liste von Flugzeug- und Triebwerkstypen zur Verfügung; die Anzahl der Quellenmodelle (NPD-Tabellen) ist jedoch wesentlich geringer. Die Zuweisung der gewählten Flugzeug/Triebwerk-Typen (Gruppierung nach ECAC Doc.29 Vol1 [3]) zu einem akustischen Referenztypen (Proxy-Typen) erfolgt in AEDT automatisch. So wird beispielsweise der BSC3 mit dem Triebwerkstyp PW1500G für die Berechnung dem Modell Boeing 737-700/CFM56-7B24 zugeordnet. Da sich diese Typen bezüglich Lärmemissionen jedoch deutlich unterscheiden, müssen diese Pegeldifferenzen in der Berechnung mittels einer Pegelkorrektur berücksichtigt werden. Als Datengrundlage hierfür diente die *Jet Aeroplanes Noise Database* (sog. MAdB-Zertifizierungsliste) der European Union Aviation Safety Agency (EASA). Die dort enthaltenen Lärm-Zertifizierungswerte wurden den entsprechenden Typen zugewiesen. Die Pegelkorrektur wurde daraus anschliessend gemäss Doc.29 Kapitel 6.4 nach der Methode A ermittelt [4]. Die Pegelkorrektur erfolgt in AEDT nicht automatisch und wurde daher nachträglich auf die Simulationsergebnisse angewandt. Die Liste der Typen mit deren Ersatzmodell in AEDT und entsprechenden Pegelkorrekturen findet sich im Anhang (Kap. 11.2).

## 4.5. Eigenschaften und Einstellungen der Modelle

Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die gewählten Berechnungseinstellungen der drei Modelle für das vorliegende Projekt CompAIR. Die deutlichsten Unterschiede bestehen in der Methode der Lärmberechnung. Während sonAIR ein semi-empirisches Quellenmodell mit physikalischem Ausbreitungsmodell benutzt, beruhen FLULA2 und AEDT auf zwei unterschiedliche Immissionsmodellen. Zudem verwendet sonAIR ein dreidimensionales Quellenmodell für die Berechnung, FLULA2 und AEDT hingegen ein zweidimensionales Quellenmodell, wobei AEDT die laterale Richtwirkung, d.h. den sogenannten "*installation effect*", mittels eines Korrekturterms ebenfalls berücksichtigt.

Weiter kann sonAIR bei Verfügbarkeit von Cockpit-Daten (FDR-Daten) Flugzeugkonfigurationen wie ausgefahrene Klappen oder Fahrwerk berücksichtigen. Während bei AEDT diese zusätzlichen Flugparameter implizit in die Schubberechnung miteinfließen, kann FLULA2 diese Information nicht in der Berechnung berücksichtigen.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Modellen wurde für AEDT im Rahmen dieses Projektes kein Gelände berücksichtigt. Geländeabschattungen bleiben somit unberücksichtigt, spielen bei den Messstandorten aber auch keine Rolle. Die Höhe der Empfänger (bzw. der NMT) wurde jedoch in den Berechnungen mit AEDT wie bei sonAIR und FLULA2 ebenfalls korrekt berücksichtigt (Geländehöhe+ Mikrophonhöhe über Grund). Zudem wurden in AEDT Standard-Prozedural-Profile (statt der real geflogenen Profile) für die Flugtrajektorien verwendet, wobei diese Flugplatz- und Pisten-spezifisch sind. In einer zukünftigen Berechnung wären Anpassungen in den Einstellungen möglich, um das Modell den lokalen Gegebenheiten von Zürich und Genf besser anzupassen, namentlich durch Einbezug von Geländedaten, durch spezifische Anpassungen der Standardprofile an die lokalen Gegebenheiten und/oder durch die Berücksichtigung genauerer Meteodaten.

*Tabelle 4-2 Eigenschaften und Einstellungen der drei Modelle: Hellgrau hinterlegte Einstellungen sind wählbar, wurden aber für das Projekt CompAIR nicht gewählt. Für Details zu den Modell-vergleichen siehe auch [2] und [5].*

<b>Faktor</b>	<b>sonAIR</b>	<b>FLULA2</b>	<b>AEDT</b>
Modellansatz	<i>Zeitschrittmodell</i>	<i>Zeitschrittmodell</i>	<i>segmentiertes Modell</i>
Gelände	<i>Ja</i>	<i>Ja</i>	<i>Ja oder Nein</i>
Bodenbedeckung wählbar	<i>Ja</i>	<i>Nein, Grasland (soft ground)</i>	<i>Nein, Grasland (soft ground)</i>
Wetter wählbar	<i>COSMO1 Profile oder ISA Atmosphäre</i>	<i>ISA Atmosphäre</i>	<i>SAE-AIR-1845 Referenz-Atmosphäre oder ISA Atmosphäre oder lokale Atmosphäre</i>
Trajektorie	<i>3D</i>	<i>3D</i>	<i>2D mit Standard-Prozedural-Profil</i>
Flugzeugtyp	<i>Gruppiert (Emissionsmodell)</i>	<i>Gruppiert (RC-Typ)</i>	<i>Gruppiert (Proxy-Typ)</i>
Triebwerk	<i>Ja (in Emissionsmodell)</i>	<i>Nein</i>	<i>Ja</i>
Spektrale Berechnung	<i>Ja</i>	<i>Nein (A-Pegel)</i>	<i>Nein (A-Pegel)</i>
Quellenmodell	<i>3D, 3Dred, (2D)</i>	<i>2D</i>	<i>2D + installation effect</i>
Methode Lärmberechnung	<i>Semi-empirisches Quellenmodell Physikalisches Ausbreitungsmodell</i>	<i>Immissionsmodell (empirische Emission und Ausbreitung in Richtcharakteristik kombiniert)</i>	<i>Immissionsmodell (NPD Tabellen)</i>
Bodenzusatzdämpfung (Lateral Attenuation)	<i>Implizit (physikalische Modellierung der Ausbreitungsphänomene)</i>	<i>Empirisch</i>	<i>Empirisch</i>
Flugzeug-Parameter Leistung	<i>N1 aus FDR-Daten oder geschätzt</i>	<i>Nein</i>	<i>Schub (berechnet)</i>
Flugzeug-Parameter Flaps	<i>aus FDR-Daten (nur bei 3D, nicht bei 3Dred)</i>	<i>Nein</i>	<i>Fliesst implizit in Schub-berechnung ein</i>
Flugzeug-Parameter Gears	<i>aus FDR-Daten (nur bei 3D, nicht bei 3Dred)</i>	<i>Nein</i>	<i>Fliesst implizit in Schub-berechnung ein</i>
Flugzeug-Parameter Slats	<i>aus FDR-Daten (nur bei 3D, nicht bei 3Dred)</i>	<i>Nein</i>	<i>Fliesst implizit in Schub-berechnung ein</i>
Landung Umkehrschub	<i>Nein</i>	<i>Nein</i>	<i>Ja</i>
Start Cut-Back	<i>Ja (über N1)</i>	<i>Ja (Pegeldifferenz)</i>	<i>Ja (über Prozedural-Profile)</i>
Atmosphärische Dämpfung	<i>ISO 9613-1</i>	<i>ISO 9613-1</i>	<i>SAE-ARP-5534</i>
Triebwerksinstallation	<i>Ja (in 3D-Richtcharakteristik)</i>	<i>nein</i>	<i>Ja (installation effect)</i>
Wind	<i>Ja (in COSMO1-Profilen)</i>	<i>Nein</i>	<i>Nein (bei Berechnung wird immer Gegenwind angenommen)</i>
Gewicht	<i>nur als Proxy bei Parameterschätzung, ansonsten implizit über N1</i>	<i>S: unterschiedliche Richtcharakteristik je nach Gewicht</i>	<i>S: Angepasst nach Strecke L: Max. Landegewicht</i>
Bank Angle	<i>Ja (aus FDR-Daten oder aus Trajektorie berechnet)</i>	<i>Nein (2D Richtcharakteristik)</i>	<i>Ja</i>
Bodenreflexion	<i>Ja (abhängig von Bodenbedeckungsklasse)</i>	<i>Ja, lateral Attenuation</i>	<i>Ja, lateral Attenuation</i>
Gebäude (Hindernismwirkung)	<i>Ja</i>	<i>Nein</i>	<i>Nein</i>
Gebäude (Reflexion)	<i>Ja oder Nein</i>	<i>Nein</i>	<i>Nein</i>
Geländeabschattungen	<i>Ja</i>	<i>Ja</i>	<i>Nein oder Ja, falls Gelände berücksichtigt</i>

## 5. Resultate

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der drei Modelle mit den Messungen sowie untereinander verglichen und diskutiert. Es werden zuerst die Resultate im Nahbereich des Flughafens gezeigt, und zwar separat für die FDR-Typen (Kap. 5.1) und nonFDR-Typen (Kap. 5.2). Dabei werden die Messungen aus Zürich und Genf jeweils gemeinsam dargestellt. Die Resultate der FDR-Typen im Fernbereich der Flughafens Zürich werden schliesslich in Kapitel 5.3 gezeigt.

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem  $L_{AE}$  bzw.  $L_{AE,t10}$ , da die  $L_{AS,max}$  durch kurzzeitige Fluktuationen der Messungen (z.B. infolge von Turbulenzen, vgl. auch Teilbericht 2) mit erhöhter Unsicherheit behaftet ist, was den Modellvergleich bezüglich Fähigkeit, die Messungen zu reproduzieren, erschwert.

Die folgenden Abbildungen sind jeweils gleich angeordnet: Die Graphik oben links stellt einen Scatterplot (Streudiagramm) dar, welcher die simulierten  $L_{AE}$  (y-Achse) mit den gemessenen  $L_{AE}$  (x-Achse) vergleicht. Die Punkte sind dabei farblich aufgeteilt, getrennt nach Starts und Landungen. Zudem zeigt der Scatterplot die wichtigsten Kennwerte wie Anzahl Events und Flüge, sowie die Mittelwerte und Mediane der Differenzen zwischen Simulation und Messung, wobei positive Werte eine Überschätzung durch die Modellberechnung bedeuten. Zudem wird die Standardabweichung ( $SD$ ) der Differenz zwischen Berechnung und Messung angegeben. Die Graphik oben rechts zeigt Boxplots der Differenzen zwischen Berechnungen und Messungen, aufgeteilt nach Starts und Landungen. Die Graphik unten zeigt ebenfalls Boxplots, jedoch aufgeschlüsselt nach den in Abbildung 3-1 bis Abbildung 3-3 dargestellten Messpunkten.

## 5.1. Modellvergleiche für Grossflugzeuge: FDR-Typen im Nahbereich

### 5.1.1. sonAIR: FDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

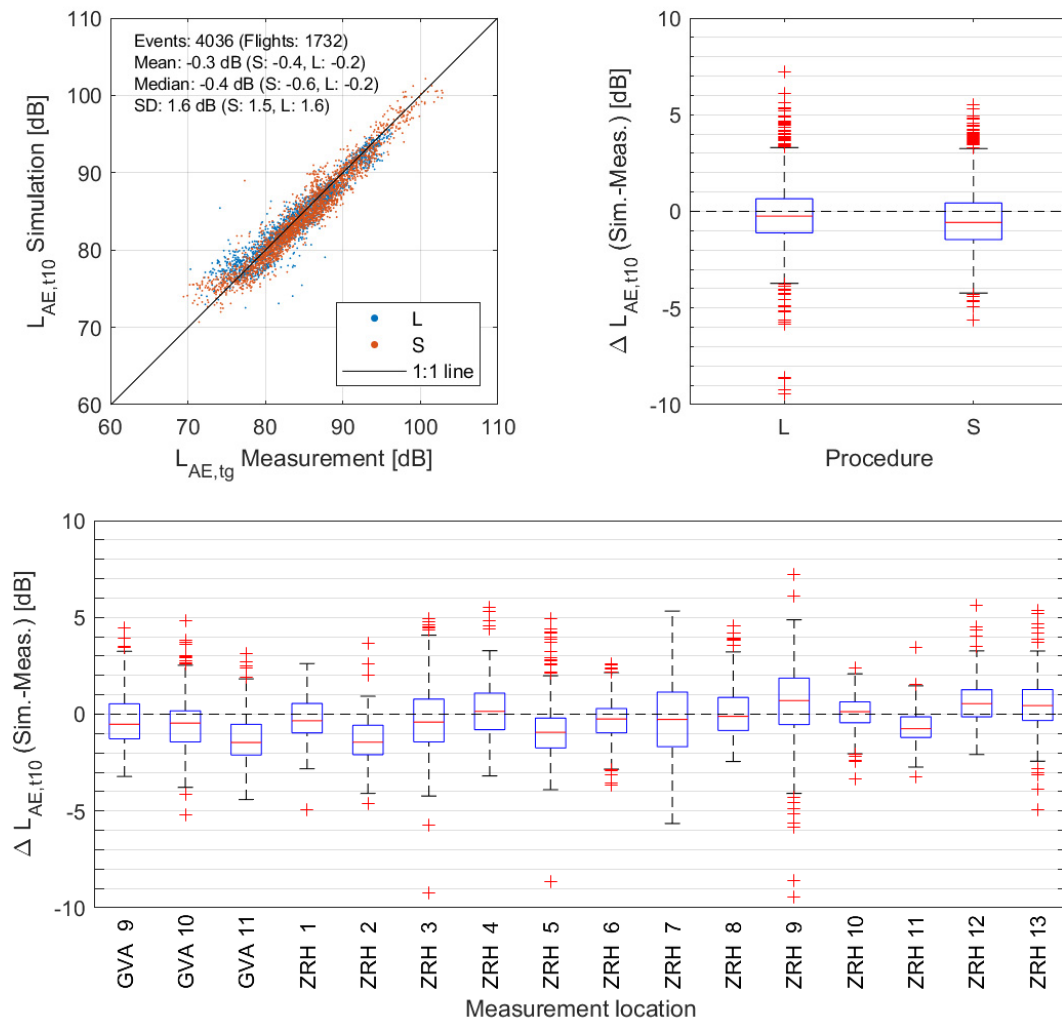


Abbildung 5-1: Vergleich der Simulationen (sonAIR) mit den Messungen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Start und Landung (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten). Daten aus [8][11].

Insgesamt zeigt sich im Nahbereich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und den Berechnungen mit sonAIR. Der Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  wird mit -0.3 dB (Mittelwert) bzw. -0.4 dB (Median) leicht unterschätzt, wobei vor allem die Starts zu dieser Unterschätzung beitragen. Die Standardabweichung beträgt für den  $L_{AE,t10}$  1.6 dB.

Die einzelnen Messpunkte werden unterschiedlich gut nachgebildet. An den Messpunkten ZRH 4, 6, 7, 8 und 10 werden die Messungen sehr genau reproduziert. Die Messpunkte ZRH 1, 2, 3, 5 und 11 sowie GVA



9, 10 und 11 werden im Mittel etwas unterschätzt, während die Messpunkte ZRH 9, 12 und 13 etwas überschätzt werden. Es ist kein Muster bezüglich Distanz zum Flughafen oder seitlichem Abstand zu den Flugspuren erkennbar; alle messtechnisch erfassten Situationen können im Mittel adäquat und mit geringer Streuung reproduziert werden.

Die Differenzen sind für die verschiedenen Flugzeugtypen ähnlich (siehe Tabelle 11-1 im Anhang, Kap. 11.1.1). Es zeigt sich bei allen Typen ein Trend zu einer Unterschätzung der Starts.

Der Maximalpegel  $L_{AS,max}$  (nicht dargestellt) zeigt ein ähnliches Verhalten, allerdings mit ausgeprägterer Unterschätzung. Die Differenz zwischen Simulation und Messung beträgt hier für den Mittelwert  $-0.9 \pm 1.8$  dB, wobei wiederum die Starts wesentlich stärker unterschätzt wurden als die Landungen.

### 5.1.2. FLULA2: FDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

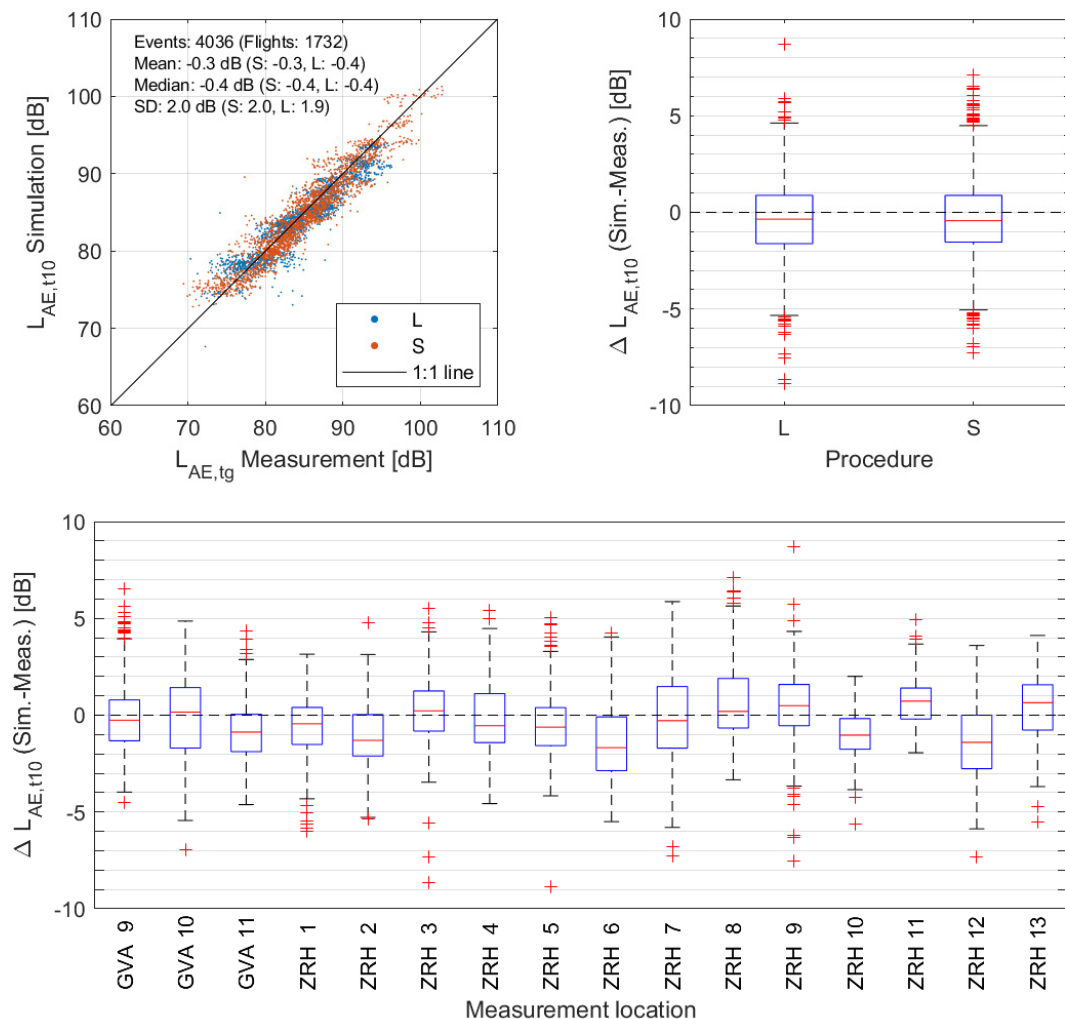


Abbildung 5-2: Vergleich der Simulationen (FLULA2) mit den Messungen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten).

Die mit FLULA2 berechneten Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Gesamthaft werden die  $L_{AE,t10}$  leicht unterschätzt, doch ist die Unterschätzung deutlich geringer als die Standardunsicherheit. Im Scatterplot sind besonders bei Starts im Bereich hoher Pegel leichte Gruppierungen in der Horizontalen sichtbar ("horizontale Schichtung", vgl. Abbildung 5-2), welche auf die starren, d.h. nicht Leistungs-abhängigen (ausser Cutback) Richtcharakteristiken, die FLULA2 pro Flug verwendet, zurückzuführen sind. Bei den analogen Vergleichen für sonAIR (siehe Abbildung 5-1) sind diese Gruppierungen nicht ersichtlic, da sonAIR für die Simulation im Gegensatz zu FLULA2 mit nicht-starren, d.h. variablen Quellendaten den realen Flugzustand (Leistungssetzung und Flugkonfiguration) berücksichtigt.

Die Standardabweichung ( $SD$ ) ist mit 2.0 dB höher als bei sonAIR (1.6 dB). Die maximale Abweichung pro Messstation ZRH und GVA liegt etwas unter 2 dB, die Streuung variiert jedoch über die Messpunkte.

### 5.1.3. AEDT: FDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

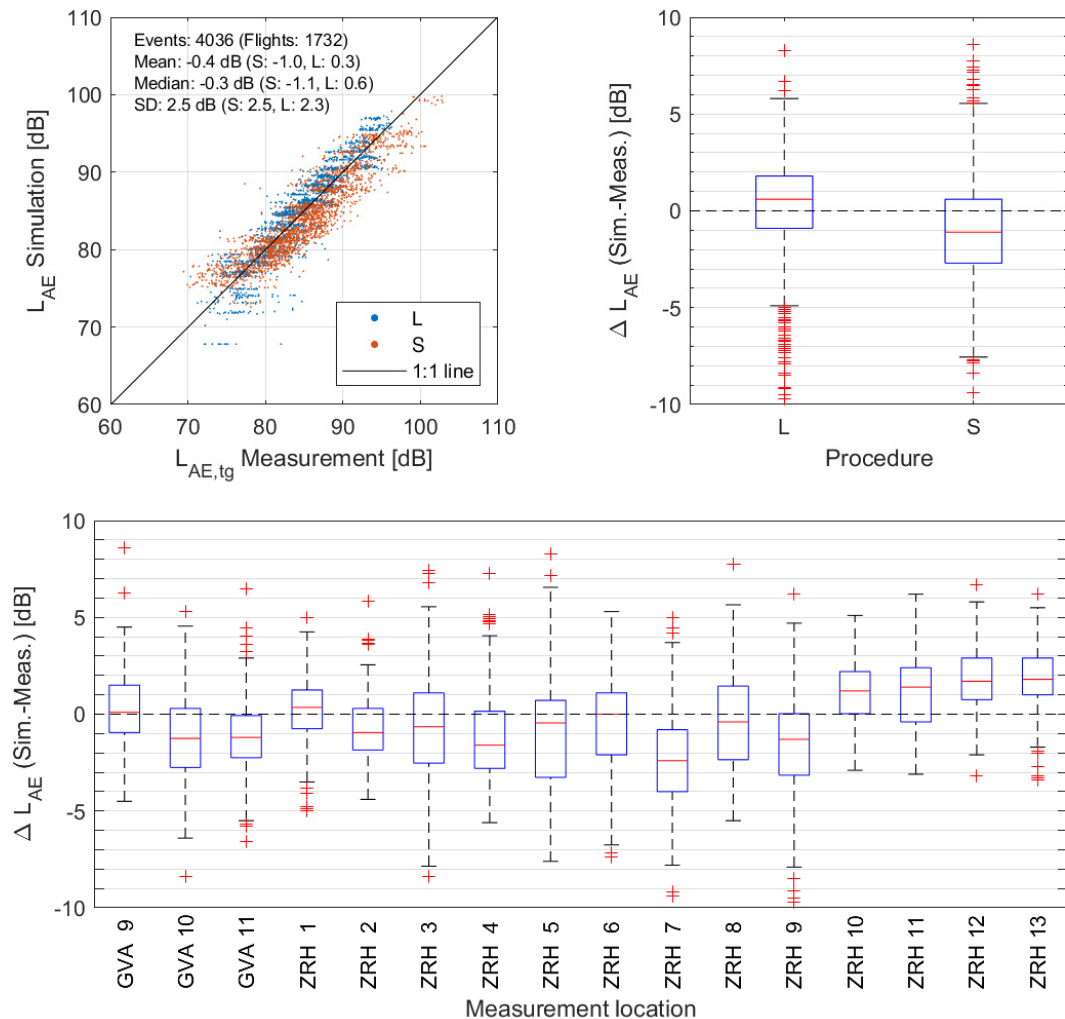


Abbildung 5-3: Vergleich der Simulationen (AEDT) mit den Messungen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf für den  $L_{AE}$  gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten).

Die Simulationsergebnisse stimmen gesamthaft gut mit den Messungen überein. Die Streuung ist deutlich grösser als bei sonAIR und FLULA2. Dabei werden die Ereignispegel  $L_{AE}$  bei Starts generell unterschätzt und bei Landungen überschätzt. Im Scatterplot sind wie bei FLULA2 deutlich horizontale Gruppierungen sichtbar (Abbildung 5-3). Die Grund liegt in diesem Fall darin, dass AEDT für die Berechnungen Typen-spezifische Standard-Prozedural-Profile verwendet (siehe Kap. 4.4.1), bei welchen das Schubprofil für alle Flüge mit ähnlicher Flugdistanz gleich ist.

Die Messpunkt-spezifisch grösste Abweichung liegt bei Messpunkt ZRH 7 mit etwas über 2 dB.

Im Scatterplot zu sehen sind deutliche Unterschätzungen der gemessenen  $L_{AE}$  für Landungen im Bereich simulierter Pegel unter 70 dB. Die (gruppierten) Differenzen dieser Ereignisse sind in der Regel Flugzeug-typ-, und Messpunkt-spezifisch und wiederum auf die Verwendung von Standard-Prozedural-Profilen zurückzuführen, welche die entsprechenden Typen-Messpunkt-Kombinationen nicht adäquat wieder-zugeben vermögen.

## 5.2. Modellvergleiche für Grossflugzeuge: nonFDR-Typen im Nahbereich

### 5.2.1. sonAIR: nonFDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

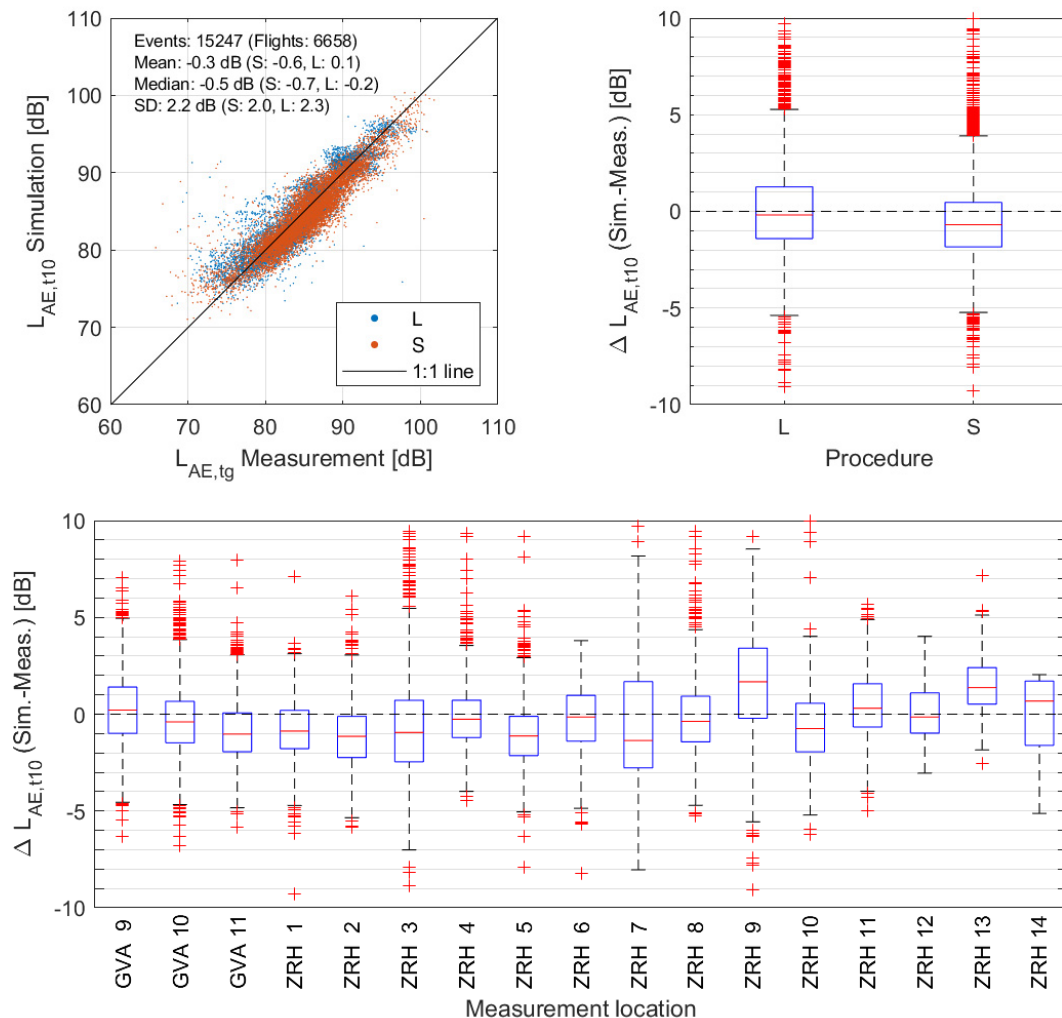


Abbildung 5-4: Vergleich der Simulationen (sonAIR) mit den Messungen der nonFDR-Typen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Start und Landung (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten). Daten aus [8][11].

Alle Flüge ohne FDR-Daten wurden mit den reduzierten sonAIR Quellenmodellen 3Dred ohne explizite Berücksichtigung der Konfiguration simuliert. Im Mittel reproduzierte sonAIR die Messungen mit Differenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  von -0.3 dB (Mittelwert) bzw. -0.5 dB (Median) ähnlich gut wie die FDR-Typen, allerdings mit einer grösseren Streuung von 2.2 dB. Die Starts wurden wiederum etwas unterschätzt, während die Landungen im Mittel sehr gut mit den Messungen übereinstimmen. Unterteilt nach Messpunkten zeigen sich wiederum Situationen mit überschätzten, unterschätzten und gut reproduzierten Messwerten, wobei

auch hier kein Zusammenhang mit der Überflughöhe oder Distanz zur Flugbahn zu beobachten ist. Die Messpunkte ZRH 3, 7 und 9 weisen wie schon bei den FDR-Typen die grösste Streuung auf.

Unterteilt nach Flugzeugtyp zeigten die meisten nonFDR-Typen vergleichbare Ergebnisse (siehe Tabelle 11-2 im Anhang, Kap. 11.1.2). Es gibt jedoch wenige, aber deutliche Ausnahmen. So wurden die Landungen der A388 mit Triebwerk GP7270 stark überschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für diesen Subtypen keine Messungen von Landungen für die Modellerstellung zur Verfügung standen, weshalb das Umströmungsmodell aus den Messungen der A388 mit Triebwerk TRENT9 abgeleitet wurde [7]. Bei der B762 und B764, welche beide mit demselben Emissionsmodell B76X\_CF6-80C2 simuliert wurden, zeigte sich ein ähnliches Bild aufgrund unsichererer Quelldaten, was vor allem bei den Landungen zu grossen Differenzen führte.

Wie bei den obigen Typen B762 und B764 wurden auch bei anderen Typen, bei welchen für die Modellerstellung nur wenige Messungen verfügbar waren, alle Daten einer Flugzeugfamilie zu einem einzigen Quellenmodell zusammengefasst. Der Vergleich mit den Messungen zeigt, dass diese Modelle je nach Flugzeugfamilie eine erhöhte Unsicherheit aufweisen. So erkennt man sowohl beim Modell B737\_CFM56-7B als auch beim Modell A32X\_V2500 eine zunehmende Differenz zwischen Simulation und Messung vom kleinsten zum grössten Subtypen (B737 → B738 → B739 bzw. A319 → A320 → A321). Beim Modell CRJ9\_CF34-8C5, welches ausschliesslich auf Messdaten der CRJ9 beruht, zeigt sich hingegen eine gute Übertragbarkeit auf die Subtypen CRJ7 und CRJX.

### 5.2.2. FLULA2: nonFDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

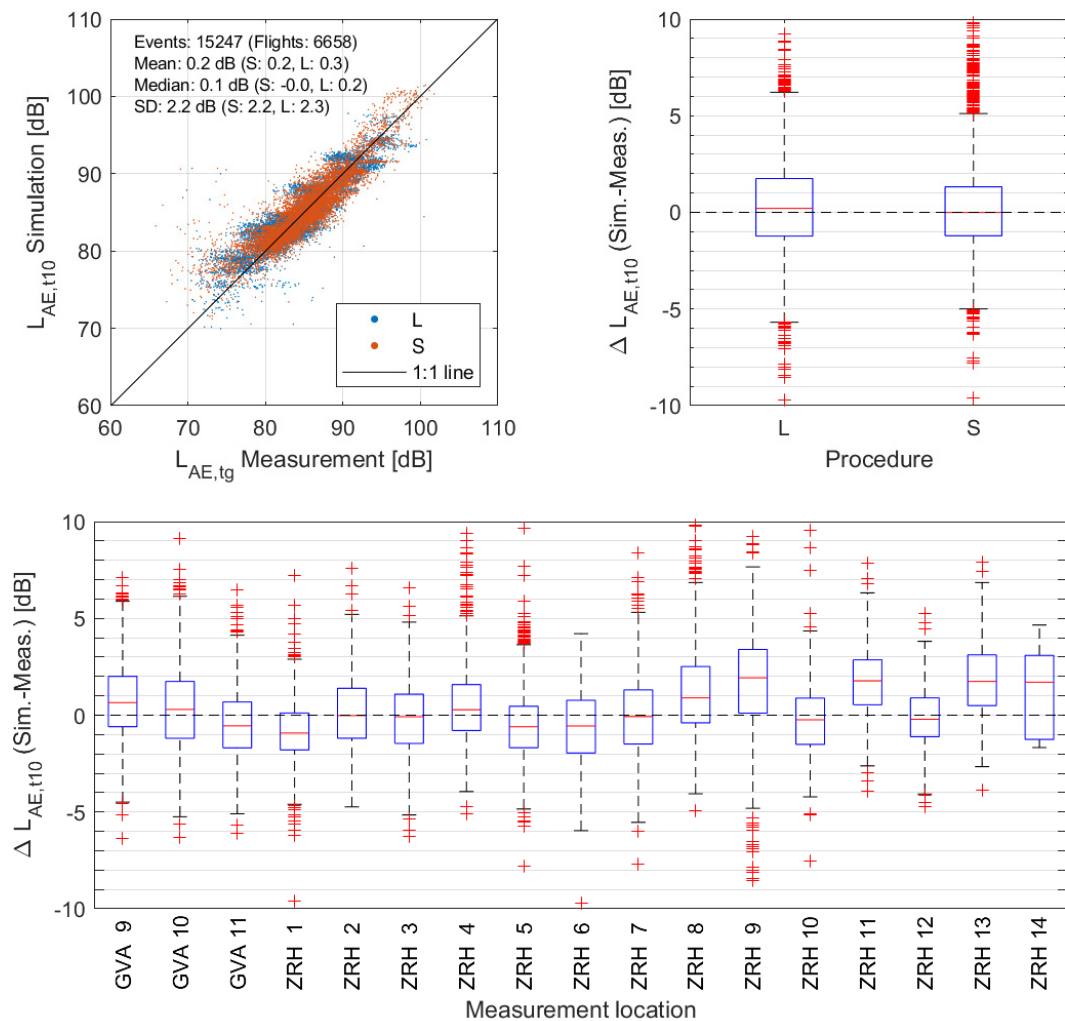


Abbildung 5-5: Vergleich der Simulationen (FLULA2) mit den Messungen der nonFDR-Typen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten).

Gesamthaft zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnungen und Messungen. Die Streuung ist mit 2.2 dB leicht höher als bei Berechnungen mit FDR-Typen mit 2.0 dB. Deutlich ersichtlich ist jedoch eine grössere Anzahl stark abweichender Werte, besonders im Bereich tieferer gemessener Pegel.

Die maximale messpunktspezifische Abweichung liegt wie bei den FDR-Typen auch hier nicht über 2 dB, wobei die Streuungen lokal (d.h. pro Messpunkt) etwas grösser sind.

### 5.2.3. AEDT: nonFDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

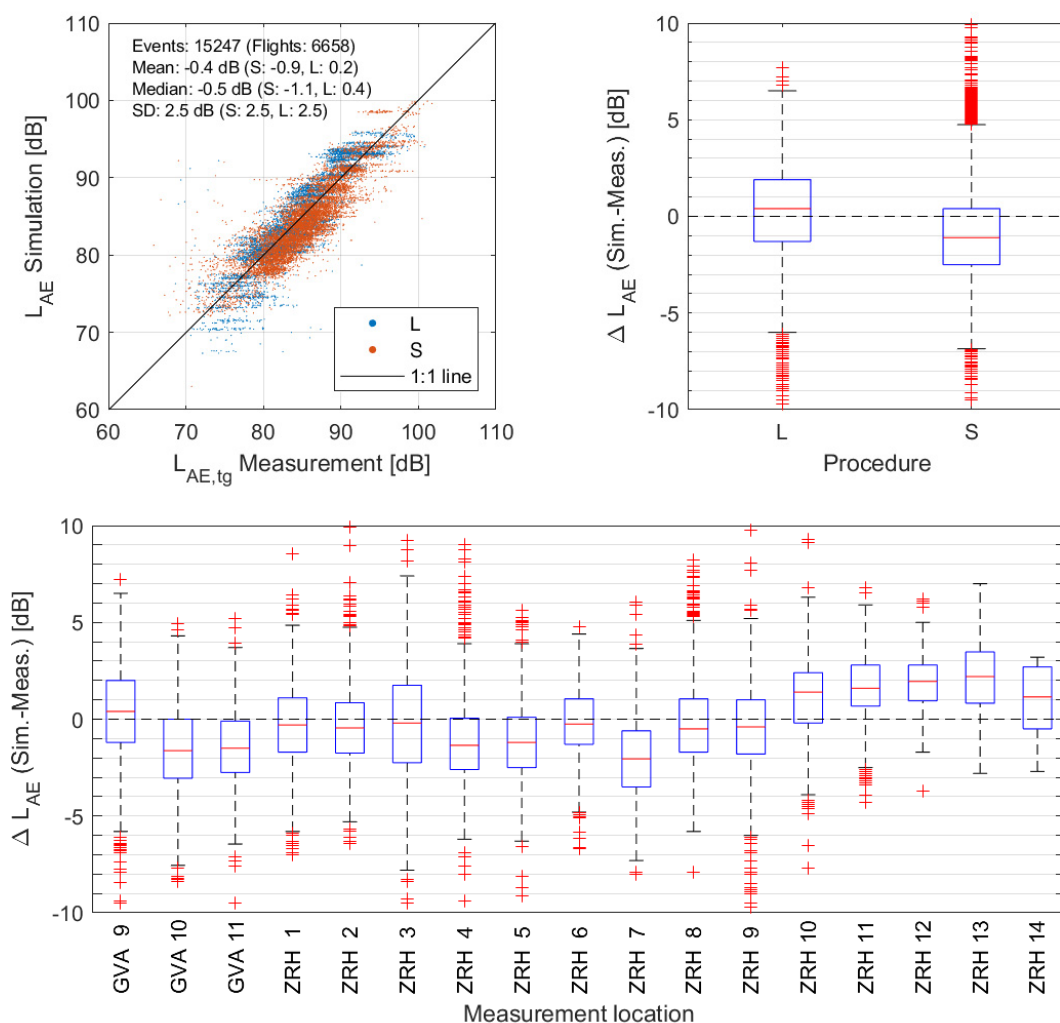


Abbildung 5-6: Vergleich der Simulationen (AEDT) mit den Messungen der nonFDR-Typen im Nahbereich der Flughäfen Zürich und Genf für den  $L_{AE}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten).

Die Berechnungen von Einzelflügen mit nonFDR-Typen zeigen im Mittel eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Wie schon bei den FDR-Typen werden die Landungen generell überschätzt und die Starts unterschätzt. Die Standardabweichung ist mit 2.5 dB gleich wie bei Berechnungen mit FDR-Daten. Dies war zu erwarten, da AEDT im Gegensatz zu sonAIR die zusätzlichen Parameter aus den FDR-Daten, welche in den Radardaten der nonFDR-Typen fehlen, nicht in die Berechnung einbezieht. Hier (nonFDR-Typen) wurden jedoch wesentlich mehr Flugzeugtypen berechnet, die unterschiedlich gut abgebildet werden können (siehe Tabelle 11-2 im Anhang, Kap. 11.1.2).

Die messpunktspezifisch grösste Abweichung zeigt sich beim Messpunkt ZRH 13 mit etwas über 2 dB.



Weiter zeigen sich bei besonders leisen Ereignissen bei Landungen wiederum mehrere horizontale Gruppierungen, bei denen der  $L_{AE}$  deutlich unterschätzt wird. Das umgekehrte Phänomen (Überschätzung) ist bei sehr lauten Starts ersichtlich. Diese gruppierten Abweichungen sind auch in diesem Fall Flugzeugtyp- und Messpunkt-spezifisch, was wiederum auf die Verwendung von Standard-Prozedural-Profilen zurückzuführen sein dürfte, welche die entsprechenden Typen-Messpunkt-Kombinationen nicht adäquat wiedergeben vermögen.

### 5.3. Modellvergleiche für Grossflugzeuge: FDR-Typen im Fernbereich

Die Fernbereichsmessungen aus 2017 wurden im Rahmen des Monitoring-Projektes [11] für die Erstellung der Quellenmodelle der neuen Swiss-Typen BCS1, BCS3 und B777 verwendet. Sie stellen für diese Typen daher keine unabhängigen Validierungsmessungen dar, weshalb diese Typen hier nicht analysiert wurden. Die folgenden Graphiken zeigen deshalb nur Daten der FDR-Typen A319, A320, A321, A333 und A343.

#### 5.3.1. sonAIR: FDR-Typen, Zürich, Fernbereich

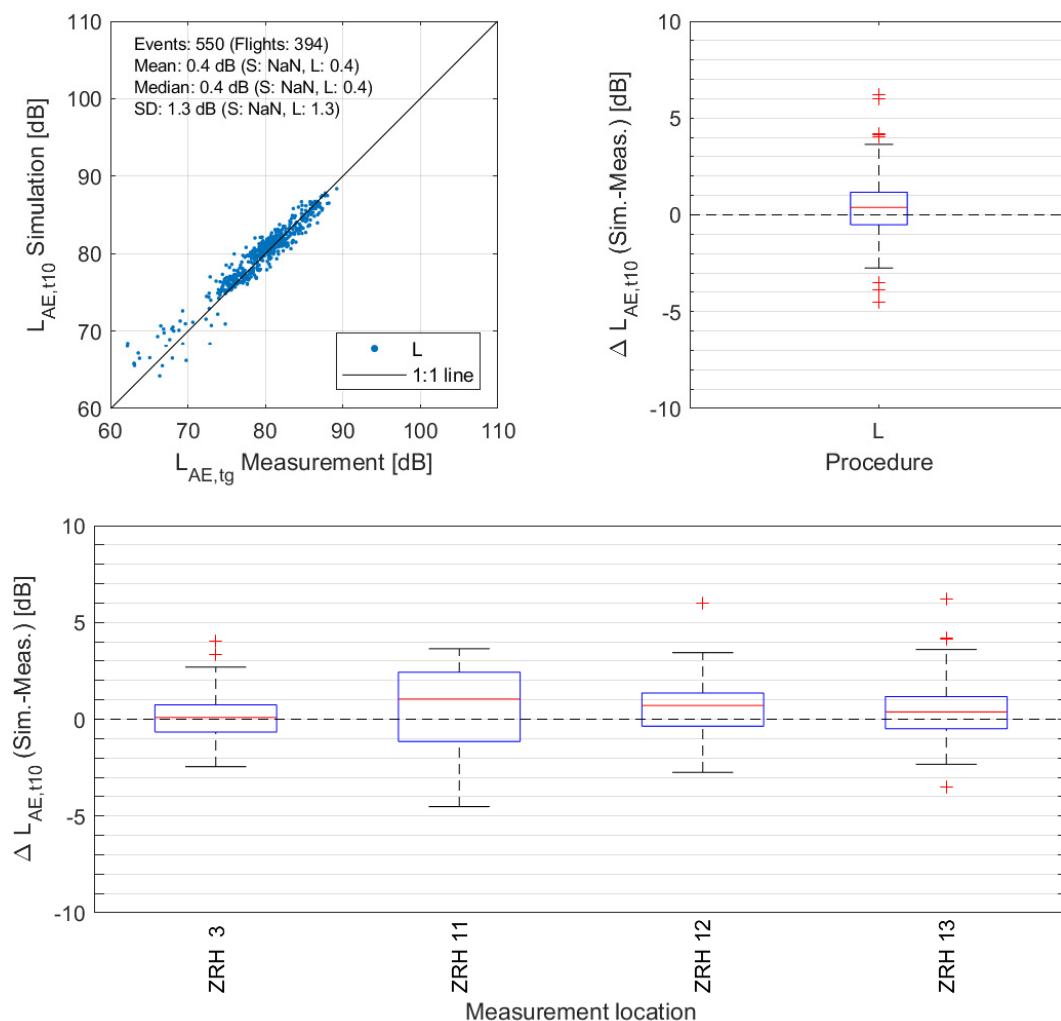


Abbildung 5-7: Vergleich der Simulationen (sonAIR) mit den Messungen im Fernbereich des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten). Daten aus [11].

sonAIR reproduziert die Messwerte über den gesamten Pegelbereich gut. Im Mittel zeigt sich eine leichte Überschätzung der Messungen, mit einer Differenz (Median) von  $0.4 \pm 1.3$  dB. Im Bereich tieferer Pegel bzw. grösserer Ausbreitungsdistanzen und/oder grösseren Flugdistanzen zum Aufsetzpunkt auf dem Flughafen Zürich ist eine leicht erhöhte Streuung zu beobachten. Dies kann mit dem erhöhten Einfluss von Hintergrundgeräuschen bei tiefen Ereignispegeln  $L_{AE,t10}$  sowie grösserer Unsicherheit bei der Ausbreitungsrechnung erklärt werden. Eine weitere Unsicherheitsquelle ist, dass die Quellenmodelle die Emissionen ausserhalb des für die Modellerstellung messtechnisch erfassten Parameterbereichs schätzen müssen, wobei die Quellenmodelle nicht extrapoliert wurden, sondern auf ihren Wertebereich eingeschränkt waren.

Im nach Messpunkt aufgeteilten Boxplot (Abbildung 5-7 unten) zeigt der Messpunkt 11 eine höhere Streuung als die anderen Messstationen. Dies liegt hauptsächlich an der geringen Anzahl von 13 verwendbaren Messungen an diesem Standort sowie den grossen Überflughöhen. Bei den Messpunkten 12 und 13 sind Anflügen auf Piste 34 mit grossen Überflughöhen und Anflüge auf Piste 28 vermischt. Die Analyse nach Flugzeugtyp zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den Typen (Tabelle 11-3 im Anhang, Kap. 11.1.3).

Beim Maximalpegel (nicht abgebildet) zeigt sich insgesamt ein ähnliches Bild, wobei die Mittelwerte der Differenzen um ca. 0.4 dB tiefer liegen, was insgesamt zu einer leichten Unterschätzung der Messungen um  $-0.1$  dB bei einer Standardabweichung von 1.5 dB führt.

### 5.3.2. FLULA2: FDR-Typen, Zürich, Fernbereich

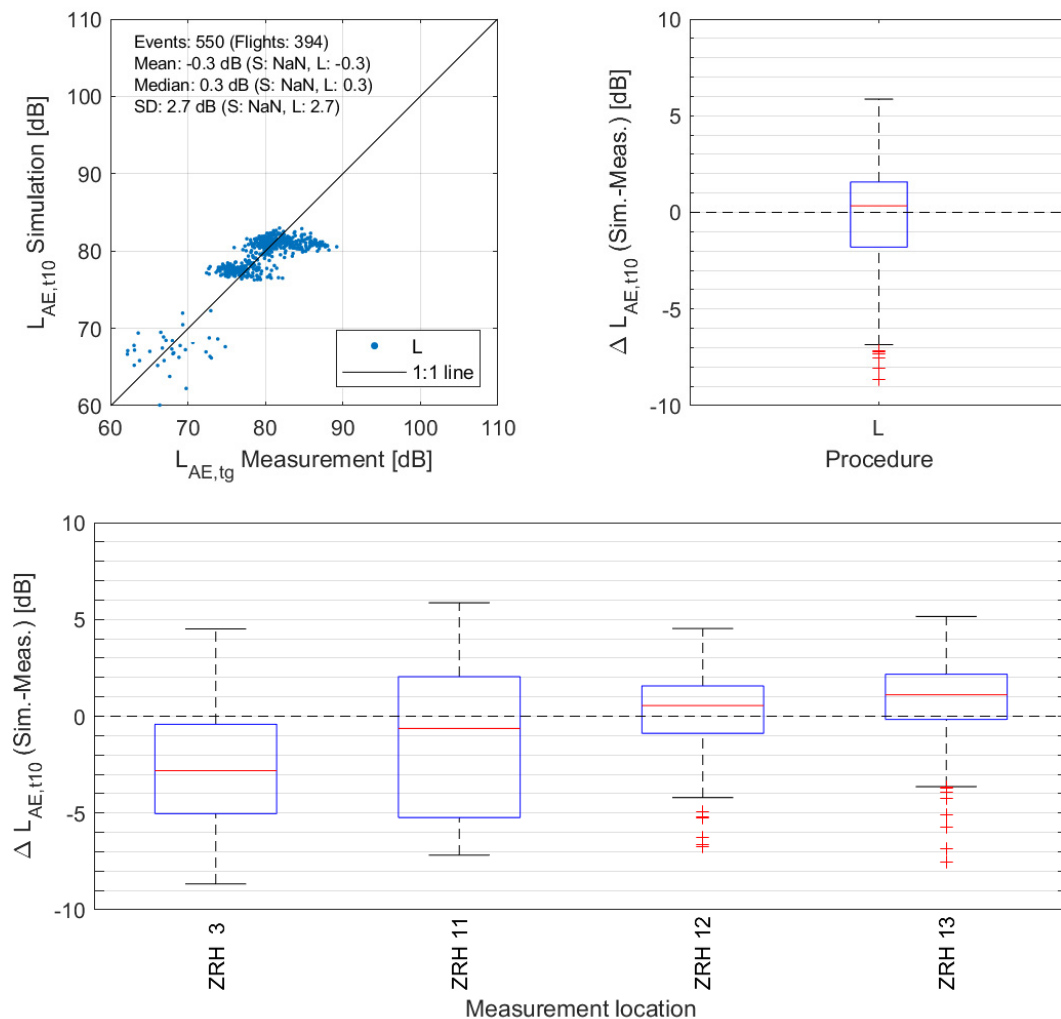


Abbildung 5-8: Vergleich der Simulationen (FLULA2) mit den Messungen im Fernbereich des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten).

Die Berechnungen mit FLULA2 zeigen im Mittel eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Die Streuung ist hier jedoch deutlich grösser als im Nahbereich. Im Pegelbereich um 70 dB und darunter ist die Streuung verglichen mit den lautereren Ereignissen grösser, da dort die Überflughöhen deutlich grösser sind. Zudem ist die Gruppierung (horizontale Schichtung) der Ereignisse im Scatterplot deutlicher als im Nahbereich. Beim Messpunkt ZRH 3 zeigen sich die grössten Differenzen mit knapp 3 dB im Median.

Die teilweise deutlichen Differenzen zwischen Berechnung und Messungen sind auf einzelne grosse Typen-spezifische Abweichungen zurückzuführen. So vermag FLULA2 die Messungen im Fernbereich für einige Typen wie den A320 zwar befriedigend zu reproduzieren. Die Berechnungen anderer Typen weichen jedoch deutlich von den Messungen ab, insbesondere diejenigen der grossen Airbustypen A333 und

(etwas weniger) A343 mit im Mittel  $-3.7$  dB (vgl. Tabelle 11-3 im Anhang, Kap. 11.1.3, sowie Anhang, Kap. 11.3). Dies wirkt sich besonders stark auf die Differenzen am Messpunkt ZRH 3 aus. Diese systematischen, Flugzeugtypen-spezifischen Abweichungen zeigen die Grenzen der Anwendbarkeit von FLULA2 (vgl. Diskussion in Kap. 6): Die FLULA2-Richtcharakteristiken, welche die Konfiguration des *Final Approach* abbilden, repräsentieren Flugzustände fernab der Flughäfen nur bedingt.

### 5.3.3. AEDT: FDR-Typen, Zürich, Fernbereich

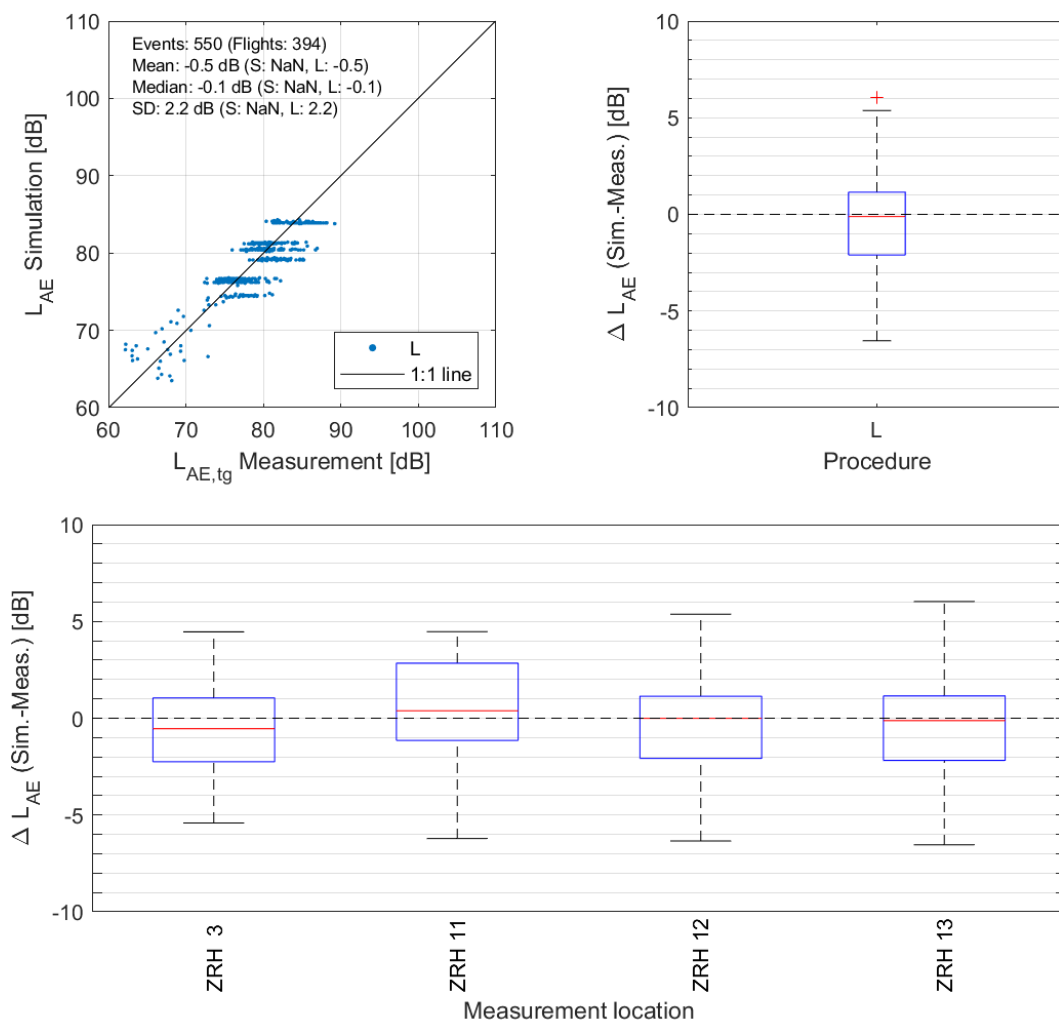


Abbildung 5-9: Vergleich der Simulationen (AEDT) mit den Messungen im Fernbereich des Flughafens Zürich für den  $L_{AE}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot oben) sowie Messpunkten (Boxplot unten).

Die Berechnungen mit AEDT zeigen über alle Messpunkte eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Im Gegensatz zu sonAIR und FLULA2 sind kaum messpunktspezifische Abweichungen zu erkennen. Die Standardabweichung ist mit 2.2 dB in derselben Grössenordnung wie im Nahbereich.

Die horizontalen Gruppierungen im Scatterplot sind, analog zu FLULA2, stärker ausgeprägt als im Nahbereich, wobei sich zwei Punktegruppierungen deutlich rechts der 1:1-Linie befinden (Unterschätzung der Messungen). Dies sind Ereignisse der A319-Typen auf unterschiedlichen Anflugrouten, deren Ereignispegel vom Modell unterschätzt werden (vgl. Tabelle 11-3).

## 5.4. Direktvergleich der Modelle sonAIR, FLULA2 und AEDT

### 5.4.1. Vergleich der Modelle anhand der Messübereinstimmung

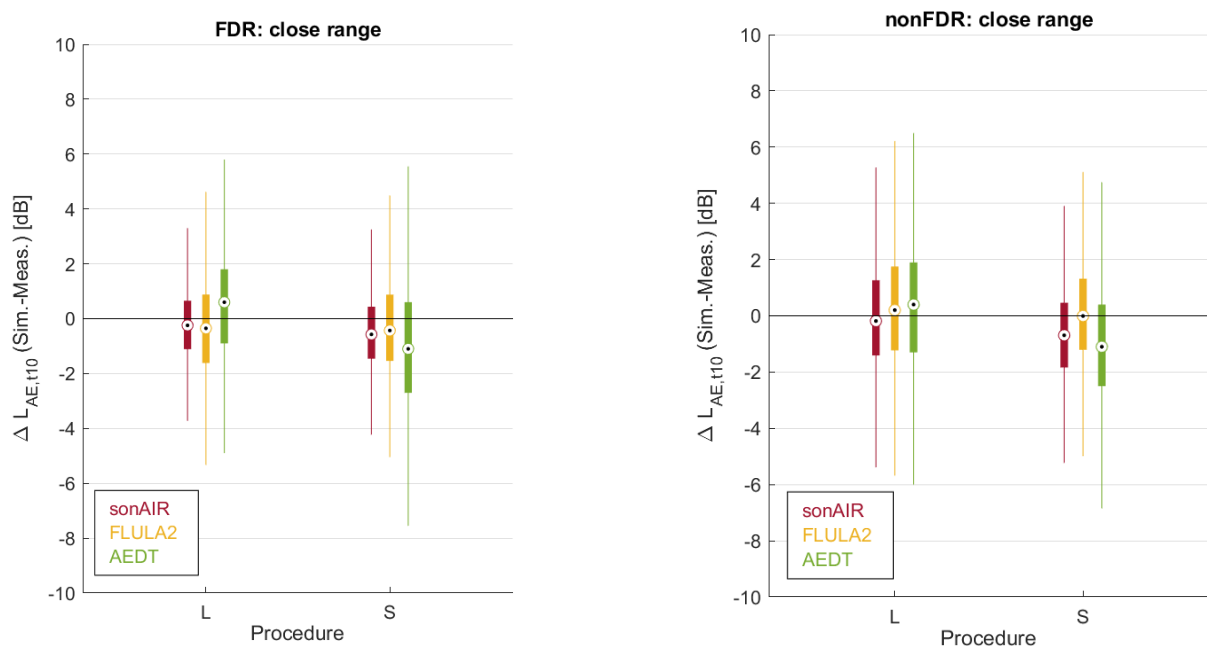


Abbildung 5-10 Vergleich der Modelle im Nahbereich (Differenz Simulation – Messungen), links der FDR-Typen und rechts der nonFDR-Typen, unterteilt nach Start und Landung.

Auch im Direktvergleich liefern alle Modelle im Nahbereich sehr gute Resultate. Während sonAIR und FLULA2 nah beieinander liegen und die Messwerte ähnlich gut reproduzieren, überschätzt AEDT die Landungen jeweils um bis zu 0.6 dB und unterschätzt die Starts etwas deutlicher um bis zu –1.1 dB (siehe Tabelle 5-1).

Ausserdem verdeutlicht der Direktvergleich, dass sonAIR insbesondere für die FDR-Typen die geringste (bis 1.6 dB) und AEDT (bis 2.5 dB) die grösste Streuung aufweist. FLULA2 befindet sich dabei bezüglich Streuung zwischen den beiden Modellen. Somit kann insbesondere sonAIR durch Berücksichtigung der FDR-Daten das volle Potential ausschöpfen, d.h. bei Verwendung des bestmöglichen dreidimensionalen Quellenmodells unter detaillierter Berücksichtigung der Flugkonfiguration.

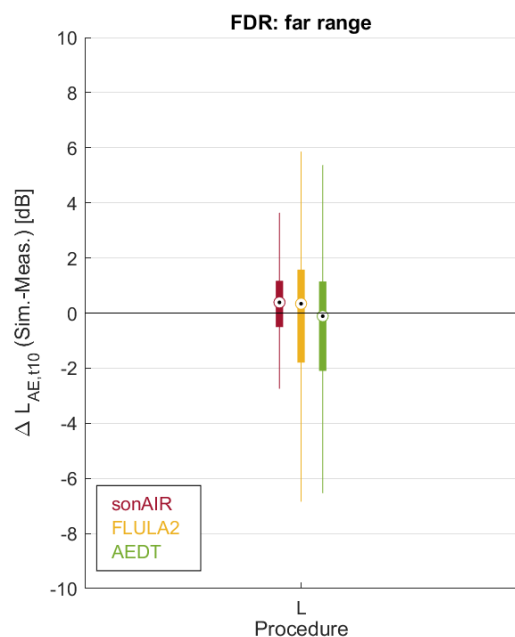


Abbildung 5-11 Vergleich der Modelle im Fernbereich (Differenz Simulation – Messungen) für Landungen.

Im Fernbereich zeigen alle drei Modelle im Mittel eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Deutlich sichtbar ist die geringste Streuung der Berechnungen mit sonAIR.

Tabelle 5-1 zeigt für alle Vergleiche (FDR-Typen im Nah- und Fernbereich, nonFDR-Typen im Fernbereich) und Modelle jeweils die Mediane der Differenz zwischen Simulation und Messung und die entsprechenden Standardabweichungen (SD).

Tabelle 5-1 Median und Standardabweichung (SD) der Differenzen Simulation – Messung.

Vergleich	Modell	Median [dB]	SD [dB]
FDR, Nahbereich	sonAIR	-0.4 (S: -0.6, L: -0.2)	1.6
	FLULA2	-0.4 (S: -0.4, L: -0.4)	2.0
	AEDT	-0.3 (S: -1.1, L: +0.6)	2.5
nonFDR, Nahbereich	sonAIR	-0.5 (S: -0.7, L: -0.2)	2.2
	FLULA2	+0.1 (S: 0.0, L: +0.2)	2.2
	AEDT	-0.5 (S: -1.1, L: +0.4)	2.5
FDR, Fernbereich	sonAIR	+0.4 (L28: 0.5, L34: 0.2)	1.3
	FLULA2	+0.3 (L28: 0.8, L34: -3.2)	2.7
	AEDT	-0.1	2.2

#### 5.4.2. Vergleich der Modelle unabhängig der Messungen

Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 vergleichen die berechneten Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  bzw.  $L_{AE}$  (für AEDT) zwischen den Modellen, jeweils im Nahbereich für die FDR- und nonFDR-Typen. Dies gibt einen Hinweis auf die Übereinstimmung der Modellberechnungen. Über die Anpassungsgüte der Modelle bezogen auf die Messungen lässt sich aus diesen Vergleich hingegen keine Aussage machen.

Die mit sonAIR und FLULA2 berechneten Ereignispegel stimmen sowohl bei den FDR- als auch nonFDR-Typen gut überein; die Standardabweichung ist mässig, und die Daten liegen auf der 1:1-Linie. Dies war zu erwarten, da die Quellendaten von FLULA2 aus denjenigen von sonAIR abgeleitet wurden [12]. Interessanterweise verschwinden einzelne grössere Differenzen beim Modellvergleich, welche in den Vergleichen mit den Messungen beobachtet wurden (s.o.). Die Vergleiche von AEDT mit FLULA2 und sonAIR zeigen etwas grössere Streuungen (2.2–2.5 dB). Die Daten liegen auf der 1:1-Linie, wobei sich einzelne Gruppen ("Bänder") mit grösseren Abweichungen von der 1:1-Linie zeigen, was auf Flugzeugtyp- oder Messpunkt-spezifische Unterschiede in den berechneten Pegeln zurückzuführen sein dürfte. Die Streuung der Vergleiche von AEDT mit sonAIR und FLULA2 ist für die FDR-Typen im Nahbereich mit 2.2–2.3 dB etwas geringer als die des Vergleichs mit den Messungen (2.5 dB). Insgesamt sind keine systematischen Differenzen zwischen den drei Modellen zu erkennen, so dass deren Rechenergebnisse im Mittel äquivalent sind.

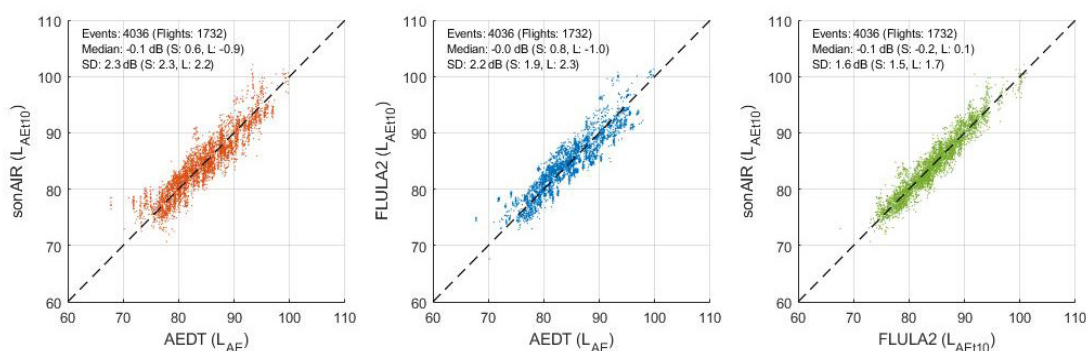


Abbildung 5-12 Vergleiche der berechneten Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  bzw.  $L_{AE}$  (für AEDT) zwischen den Modellen für die FDR-Typen im Nahbereich.

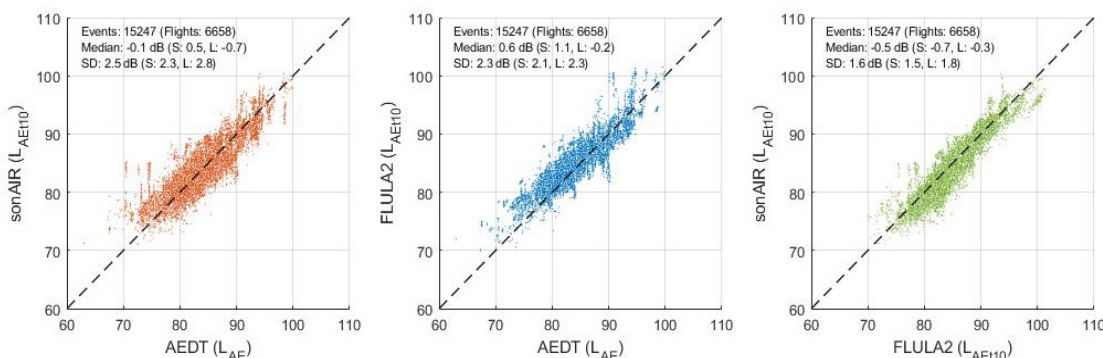


Abbildung 5-13 Vergleiche der berechneten Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  bzw.  $L_{AE}$  (für AEDT) zwischen den Modellen für die nonFDR-Typen im Nahbereich.



## 6. Diskussion

### 6.1. Vergleiche von Berechnungen und Messungen

Die Berechnungen mit sonAIR zeigen im Schnitt eine hohe Übereinstimmung mit den Messungen, sowohl im Nah- als auch im Fernbereich, wobei der  $L_{AE,t10}$  der Starts gesamthaft leicht unterschätzt wird. Die Standardabweichungen der Differenzen zwischen Berechnungen mit FDR-Daten und Messungen sind dabei deutlich geringer als die der beiden *Best-Practice-Modelle* FLULA2 und AEDT. Dies zeigt sich vor allem im Fernbereich, wo sonAIR eine Standardabweichung von 1.3 dB aufweist, FLULA2 und AEDT hingegen 2.7 dB bzw. 2.2 dB. Durch die Berücksichtigung der Konfigurationen und der Auftrennung von Antriebs- und Umströmungslärm können somit insbesondere Landeanflüge genauer reproduziert werden. Systematische Abweichungen sind bei sonAIR im Nah- und im Fernbereich kaum ersichtlich. Lediglich einzelne nonFDR-Typen zeigen eine grössere mittlere Abweichung.

Im Nahbereich stimmen im Mittel die von FLULA2 berechneten  $L_{AE,t10}$  ebenfalls gut mit den Messungen überein, wobei die Standardabweichungen der nonFDR-Typen mit denen von sonAIR vergleichbar sind. Dennoch vermag FLULA2 die Immissionspegel verschiedener Flugzeugtypen nicht gleich genau zu reproduzieren wie sonAIR. Daher resultiert mit FLULA2 insgesamt eine grössere Anzahl von Flugzeugtypen-spezifischen Differenzen > 1 dB als bei sonAIR. Im Fernbereich zeigt sich bei FLULA2 eine deutliche Unterschätzung von -3.2 dB bei den Landungen auf Piste 34. FLULA2 berücksichtigt für die Berechnung in der Quellenmodellierung während des ganzen Anflugs die *Final Approach* Konfiguration. Dies führt zu einer Unterschätzung des Umströmungslärms fernab des Flughafens, wenn die Fluggeschwindigkeiten wesentlich höher als kurz vor dem Aufsetzen sind. Aus Tabelle 11-3 im Anhang (Kap. 11.1.3) ist ersichtlich, dass vor allem der  $L_{AE,t10}$  des Airbus A333 deutlich unterschätzt wird, mit einer mittleren Differenz von -4.3 dB zwischen Berechnung und Messung. Die FLULA2-Richtcharakteristiken repräsentieren Flugzustände fernab der Flughäfen daher nur bedingt.

Wie auch sonAIR und FLULA2 bildet AEDT die Messungen insgesamt gut ab. Im Nahbereich werden dabei im Mittel die Landungen überschätzt und die Starts unterschätzt. Im Fernbereich stimmen die Resultate über alle Messpunkte gut mit den Messungen überein. Erwartungsgemäss ist die Streuung bei FDR- und nonFDR-Typen ähnlich, da AEDT keine zusätzlichen Informationen aus den FDR-Daten bei der Berechnung berücksichtigt. Die Streuung ist im Nahbereich generell grösser als bei sonAIR und FLULA2, wobei es Typen- und Messpunkt-spezifisch deutliche Unterschiede gibt.

Die generell hohe Übereinstimmung der AEDT-Berechnungen mit den Messungen war überraschend, da AEDT auf die Flughäfen Zürich und Genf angepasste Standard-Prozedural-Profile sowie Standard-NPD-Tabellen verwendet. Durch Flughafen-spezifische Anpassungen in den Profilen und Quelldaten könnte die Genauigkeit der Berechnungen weiter erhöht werden, allerdings würde dies einen grossen Aufwand nach sich ziehen.

## 6.2. Vergleiche der Berechnungen unabhängig der Messungen

Die Vergleiche der Modellberechnungen untereinander (Kap. 5.4) zeigen generell eine gute Übereinstimmung mit geringer Streuung zwischen sonAIR und FLULA2, sowohl bei den FDR- sowie nonFDR-Typen. Dies war zu erwarten, da die Quelldaten von FLULA2 aus denen von sonAIR abgeleitet worden waren. Bei den Vergleichen von AEDT mit sonAIR und FLULA2 zeigen sich einzelne Gruppen ("Bänder") mit grösseren Abweichungen von der 1:1-Linie, welche auf Flugzeugtyp- oder Messpunkt-spezifische Abweichungen zurückzuführen sind. Insgesamt sind jedoch keine systematischen Differenzen zwischen den drei Modellen zu erkennen, so dass deren Rechenergebnisse im Mittel äquivalent sind.

## 7. Schlussfolgerungen

Alle drei Modelle, sonAIR, FLULA2 und AEDT, erzielen gesamthaft eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Dabei weist sonAIR unter Verwendung von FDR-Daten sowohl für Starts als auch für Landungen insbesondere im Fernbereich eine wesentlich geringere Streuung auf als FLULA2 und AEDT. Ohne verfügbare FDR-Daten ist die Streuung hingegen ähnlich wie bei FLULA2. Dennoch treten bei den Berechnungen von FLULA2 deutlich mehr grössere Flugzeugtyp- und Messpunkt-spezifische Abweichungen ( $> 1$  dB) auf als bei sonAIR, insbesondere im Fernbereich. Hier zeigt sich der Vorteil des Modellansatzes von sonAIR mit den Teilschallquellenmodellen für Antriebs- und Umströmungslärm, welcher insbesondere die Resultate im Fernbereich verbessert. AEDT schliesslich reproduzierte trotz Standard-Prozedural-Profilen und nicht auf die lokalen Gegebenheiten angepassten NPD-Tabellen die Messungen sowohl im Nah- als auch im Fernbereich erstaunlich gut, auch wenn die mittleren Differenzen und die Streuung der Differenzen leicht grösser sind als bei FLULA2 und sonAIR. Hier könnten jedoch mit einer entsprechenden Anpassung der Datengrundlagen auf Zürich und Genf die Ergebnisse weiter verbessert werden.

Abschliessend zeigt die vorliegende Untersuchung, dass alle drei inhärent unterschiedlichen Modellansätze die Messungen im Nah- wie auch im Fernbereich im Mittel gut bis befriedigend zu produzieren vermögen. Dabei zeigt sich die Stärke von sonAIR, insbesondere bei verfügbaren FDR-Daten, Einzelereignisse sehr genau reproduzieren zu können (geringe Streuung), und zwar sowohl im Nah- wie auch im Fernbereich des Flughafens.

## 8. Dank

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt BAFU für die Finanzierung des Projektes CompAIR sowie der SWISS, der Flughafen Zürich AG und dem Flughafen Genf für die Bewilligung zur Nutzung der Daten im Rahmen dieses Projektes.

## 9. Abkürzungen

$\Delta L_{AE,t10}$	absolute Differenzen im $L_{AE,t10}$ zwischen Simulation und Messung
ASIF	AEDT Standard Input File: Input File von AEDT zur Definition einer Study.
ATOW	Actual Take Off Weight (aktuelles Abfluggewicht)
FDR	Flight Data Recorder ("Cockpit-Daten")
GVA	Flughafen Genf
$L_{AE}$	A-Bewerteter Ereignispegel: Gesamtenergieinhalt eines Ereignisses normiert auf eine Sekunde, ausgedrückt als Pegelgrösse
$L_{AE,t10}$	$L_{AE}$ eines Ereignisses normiert für die in der Zeitspanne, während welcher der $L_{AS}$ weniger als 10 dB unter dem $L_{AS,max}$ liegt
$L_{AS,max}$	A-bewerteter Maximalpegel (Integration mit der Zeitkonstante Slow von 1 s)
MTOW	Maximum Take Off Weight (maximales Abfluggewicht)
NMT	Noise Monitoring Terminal (Monitoringstation)
NPD	Noise Power Distance: AEDT verwendet für Lärmberechnungen sog. NPD-Tabellen.
PAY	Militärflugplatz Payerne
ZRH	Flughafen Zürich

## 10. Literatur

- [1] BAFU, BAZL, GS VBS, 2016. *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](http://www.bafu.admin.ch/fluglaerm-ermittlung).
- [2] Bütikofer, R., 2007. *Concepts of aircraft noise calculations*. Acta Acustica united with Acustica 93, 253-262.
- [3] ECAC, 2016. *ECAC.CEAC Doc 29, 4th Edition, Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, Volume 1: Applications Guide*, as endorsed by DGCA/147 on 7 December 2016. ECAC, Neuilly-sur-Seine Cédex, France. URL: <https://www.ecac-ceac.org/ecac-docs>.
- [4] ECAC, 2016. *ECAC.CEAC Doc 29, 4th Edition, Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, Volume 2: Technical Guide*, as endorsed by DGCA/147 on 7 December 2016. ECAC, Neuilly-sur-Seine Cédex, France. URL: <https://www.ecac-ceac.org/ecac-docs>.
- [5] Empa, 2004. *Übersicht über Fluglärmberechnungsverfahren. Situationsanalyse und Standortbestimmung im Rahmen der vom BUWAL zu erlassenden Empfehlung für Fluglärmberechnungsverfahren (LSV Art. 38 Abs. 2)*. Bericht Nr. 433'411 - 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.  
URL: <http://www.empa.ch/web/s509/flula2>.
- [7] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Entwicklung Emissionsmodell und Aufbau Emissionsdatenbank*. Bericht Nr. 5211.00687.100.12. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] Empa, 2018. *Validierung sonAIR. Teil 4: Vergleiche mit unabhängigen Messungen*. Bericht-Nr. 5211.01324.100.01-4. Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2018. *Abschätzung von Flugparametern auf der Basis von Radardaten*. Bericht-Nr. 5211.01322.100.00. Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Empa, 2018. *Dokumentation SANC-TE -Berechnung mit sonAIR*. Bericht-Nr. 5214.017372. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [11] Empa, 2019. *Dokumentation sonAIR Monitoring Projekt*. Bericht-Nr. 5211.01323.100.01-1. Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf.
- [12] Empa, 2019. *FLULA2 — Auswirkungen neuer, aus sonAIR abgeleiteter Quelldaten auf Fluglärm-Belastungsrechnungen*. Bericht-Nr. 5214.019893. Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf.
- [13] European Union, 2002. *Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise*. European Union, Bruxelles, Belgium. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32002L0049>.
- [14] European Union, 2015. *COMMISSION DIRECTIVE (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the*

- Council European Union*. European Union, Bruxelles, Belgium. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0996&from=EN>.
- [15] ICAO, 2018. *Doc 9911. 2nd Edition, Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports*. International Civil Aviation Organization (ICAO), Montréal, Canada.
- [16] Jäger, D., C. Zellmann, F. Schlatter, J.M. Wunderli, 2021. *Validation of the sonAIR aircraft noise simulation model*. Noise Mapping 8, 95–107.
- [17] SAE, 1986. *Procedure for the Calculation of Airplane Noise in the Vicinity of Airports*. Aerospace Information Report SAE AIR 1845. Society of Automotive Engineers (SAE), Committee A-21 Aircraft Noise, Warrendale, PA (aktualisierte Dokument-Version; 16.08.2012).
- [18] Schäffer, B., C. Zellmann, W. Krebs, S. Plüss, K. Eggenschwiler, R. Bütikofer, J.M. Wunderli, 2012. *Sound source data for aircraft noise calculations – state of the art and future challenges*. Proceedings of Euronoise 2012, Ninth European Conference on Noise Control. Prague, Czech Republic, 589-594.
- [19] U.S. DOT, 2019. *Aviation Environmental Design Tool (AEDT), Technical Manual, Version 3b*. U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 468 pp.  
URL: [https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT3b\\_UserGuide.pdf](https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT3b_UserGuide.pdf).
- [20] U.S. DOT, 2017. *Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Version 2d, AEDT Standard Input File (ASIF) Reference Guide, September 2017*. U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 443 pp. URL: [https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT2d\\_ASIFReferenceGuide.pdf](https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT2d_ASIFReferenceGuide.pdf).
- [21] Thomann, G., 2007. *Mess- und Berechnungsunsicherheit von Fluglärmbelastungen und ihre Konsequenzen*. Dissertation, Diss. ETH Nr. 17433. ETH Zürich, Zürich.  
URL: <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-005484556>.

## 11. Anhang

### 11.1. Tabellen: Differenzen $L_{AE,t10}$ Simulation – Messungen

#### 11.1.1. FDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

Tabelle 11-1 FDR-Typen, ZRH & GVA, Nahbereich.

Typ	sonAIR Emissionsmodell	FLULA2 Emissionsmodell	AEDT Emissionsmodell	Prozedur	N	sonAIR Mean	sonAIR SD	FLULA2 Mean	FLULA2 SD	AEDT Mean	AEDT SD
A319	A319 CFM56-5B	RCLAPA319	A319-131\IAE V2522-A5	L	245	-0.2	1.9	-0.1	2.1	-2.4	2.5
A319	A319 CFM56-5B	RCSVGA319	A319-131\IAE V2522-A5	S	258	-1.0	1.3	-0.5	1.4	-1.5	1.7
A320	A320 CFM56-5B	RCLAPA320	A320-211\CFM56-5A1	L	251	-0.3	1.5	-0.3	1.9	-0.8	1.8
A320	A320 CFM56-5B	RCSVGA320	A320-211\CFM56-5A1	S	255	-0.6	1.3	-0.5	1.4	-1.7	1.7
A321	A321 CFM56-5B	RCLAPA321	A321-232\V2530-A5	L	276	0.3	1.3	0.4	1.7	1.2	1.8
A321	A321 CFM56-5B	RCSVGA321	A321-232\V2530-A5	S	279	-0.7	1.5	-0.2	1.7	0.0	2.2
A333	A333 TRENT7	RCLAPA3303	A330-343\RR TRENT 772B	L	195	-0.2	1.7	-0.4	1.7	0.8	1.9
A333	A333 TRENT7	RCSVGA3303	A330-343\RR TRENT 772B	S	181	-1.1	1.3	-2.3	1.8	-3.0	2.0
A343	A343 CFM56-5C	RCLAPA3403	A340-211\CFM56-5C2	L	197	0.3	1.3	0.4	1.7	1.4	1.6
A343	A343 CFM56-5C	RCSVGA3403	A340-211\CFM56-5C2	S	249	-0.5	1.9	-0.1	1.7	-2.5	2.2
B77W	B77W GE90-115B	RCLAPB7773	Boeing 777-300ER/GE90-115B-EIS	L	272	-0.6	1.3	-0.9	1.8	1.4	1.9
B77W	B77W GE90-115B	RCSVGB7773	Boeing 777-300ER/GE90-115B-EIS	S	320	0.4	1.4	0.8	2.4	-1.5	2.6
BCS1	BCS1 PW1500G	RCLAPBCS1	Boeing 737-700/CFM56-7B24	L	229	-0.4	1.6	-1.4	2.0	0.4	1.8
BCS1	BCS1 PW1500G	RCSVGBCS1	Boeing 737-700/CFM56-7B24	S	312	0.1	1.5	0.0	1.9	0.2	2.0
BCS3	BCS3 PW1500G	RCLAPBCS3	Boeing 737-700/CFM56-7B24	L	225	-0.2	1.8	-1.0	1.9	0.8	1.7
BCS3	BCS3 PW1500G	RCSVGBCS3	Boeing 737-700/CFM56-7B24	S	292	-0.6	1.5	-0.3	1.8	1.1	2.1
<b>L</b>					<b>1890</b>	<b>-0.2</b>	<b>1.6</b>	<b>-0.4</b>	<b>1.9</b>	<b>0.3</b>	<b>2.3</b>
<b>S</b>					<b>2146</b>	<b>-0.4</b>	<b>1.5</b>	<b>-0.3</b>	<b>2.0</b>	<b>-1.0</b>	<b>2.5</b>
<b>Total</b>					<b>4036</b>	<b>-0.3</b>	<b>1.6</b>	<b>-0.3</b>	<b>2.0</b>	<b>-0.4</b>	<b>2.5</b>

### 11.1.2. nonFDR-Typen, Zürich & Genf, Nahbereich

Tabelle 11-2 nonFDR-Typen, ZRH & GVA, Nahbereich.

Typ	sonAIR Emissionsmodell	FLULA2 Emissionsmodell	AEDT Emissionsmodell	Prozedur	N	sonAIR Mean	sonAIR SD	FLULA2 Mean	FLULA2 SD	AEDT Mean	AEDT SD
A319	A319 CFM56-5B	RCLAPA319	A319-131\IAE V2522-A5	L	365	1.7	1.5	1.7	1.8	0.1	1.9
A319	A319 CFM56-5B	RCSVGA319	A319-131\IAE V2522-A5	S	526	0.5	1.7	0.7	1.7	-0.9	2.0
A319	A32X_CFM56-5A	RCLAPA319	A319-131\IAE V2522-A5	L	141	-0.6	1.4	2.1	1.8	0.4	2.1
A319	A32X_CFM56-5A	RCSVGA319	A319-131\IAE V2522-A5	S	226	-0.1	1.4	-0.2	1.6	0.0	1.6
A319	A32X_V2500	RCLAPA319	A319-131\IAE V2522-A5	L	344	1.3	1.9	3.4	2.0	2.7	1.9
A319	A32X_V2500	RCSVGA319	A319-131\IAE V2522-A5	S	321	0.2	1.3	1.3	1.5	-1.0	1.7
A320	A320 CFM56-5B	RCLAPA320	A320-211\CFM56-5A1	L	378	0.7	1.8	0.7	1.9	0.3	1.7
A320	A320 CFM56-5B	RCSVGA320	A320-211\CFM56-5A1	S	576	0.1	1.8	0.1	1.9	-1.5	2.1
A320	A32X_CFM56-5A	RCLAPA320	A320-211\CFM56-5A1	L	243	-0.8	1.6	0.9	1.6	0.6	1.6
A320	A32X_CFM56-5A	RCSVGA320	A320-211\CFM56-5A1	S	300	-0.8	1.3	-0.5	1.6	-0.9	1.7
A320	A32X_V2500	RCLAPA320	A320-232\V2527-A5	L	355	0.7	1.7	2.0	1.8	2.6	1.9
A320	A32X_V2500	RCSVGA320	A320-232\V2527-A5	S	320	-0.7	1.8	0.4	1.8	0.2	1.8
A321	A321 CFM56-5B	RCLAPA321	A321-232\V2530-A5	L	314	0.3	1.9	0.6	1.9	1.4	2.2
A321	A321 CFM56-5B	RCSVGA321	A321-232\V2530-A5	S	424	-0.7	1.6	-0.4	2.0	-0.5	2.2
A321	A32X_V2500	RCLAPA321	A321-232\V2530-A5	L	305	0.7	1.9	2.0	2.0	1.4	2.0
A321	A32X_V2500	RCSVGA321	A321-232\V2530-A5	S	330	-3.0	1.5	-0.7	1.7	-1.8	2.1
A333	A333 TRENT7	RCLAPA3303	A330-343\RR TRENT 772B	L	191	-0.4	2.1	-0.5	1.6	0.9	1.6
A333	A333 TRENT7	RCSVGA3303	A330-343\RR TRENT 772B	S	290	-1.5	2.2	-1.6	2.3	-2.8	2.3
A343	A343 CFM56-5C	RCLAPA3403	A340-211\CFM56-5C2	L	119	0.3	1.9	0.5	1.8	1.1	1.9
A343	A343 CFM56-5C	RCSVGA3403	A340-211\CFM56-5C2	S	201	-0.1	1.6	0.1	1.6	-1.7	2.0
A388	A388_GP7270	RCLAPA380	A380-861\EA GP7270	L	168	3.7	2.8	2.0	2.0	0.3	2.3
A388	A388_GP7270	RCSVGA380	A380-861\EA GP7270	S	157	-1.0	1.9	1.2	1.8	-0.1	2.3
A388	A388_TRENT9	RCLAPA380	A380-841\RR trent970	L	127	-0.4	2.9	-1.2	2.9	-2.2	2.3
A388	A388_TRENT9	RCSVGA380	A380-841\RR trent970	S	58	-0.6	1.1	0.1	1.0	-0.7	1.1
B733	B737_CFM56-3	RCLAPB7373	BOEING 737-300/CFM56-3B-1	L	134	-1.2	1.5	-1.0	1.5	-1.3	1.6
B733	B737_CFM56-3	RCSVGB7373	BOEING 737-300/CFM56-3B-1	S	267	-0.2	1.9	0.0	2.0	0.1	2.2
B734	B737_CFM56-3	RCLAPB7374	BOEING 737-400/CFM56-3C-1	L	259	-1.5	1.4	-2.3	1.3	-2.1	1.6
B734	B737_CFM56-3	RCSVGB7374	BOEING 737-400/CFM56-3C-1	S	190	-0.6	1.9	0.2	1.8	-0.5	1.8

Typ	sonAIR Emissionsmodell	FLULA2 Emissionsmodell	AEDT Emissionsmodell	Prozedur	N	sonAIR Mean	sonAIR SD	FLULA2 Mean	FLULA2 SD	AEDT Mean	AEDT SD
B735	B737_CFM56-3	RCLAPB7375	BOEING 737- 500/CFM56-3C-1	L	210	-1.4	1.4	-1.7	1.2	-0.9	1.6
B735	B737_CFM56-3	RCSVGB7375	BOEING 737- 500/CFM56-3C-1	S	332	-0.9	1.4	-0.9	1.7	-0.8	1.5
B736	B737_CFM56-7B	RCLAPB7376	BOEING 737- 700/CFM56-7B24	L	224	-1.2	2.0	-0.7	2.3	1.0	2.5
B736	B737_CFM56-7B	RCSVGB7376	BOEING 737- 700/CFM56-7B24	S	246	1.1	2.0	0.1	1.8	-0.7	1.6
B737	B737_CFM56-7B	RCLAPB7377	BOEING 737- 700/CFM56-7B24	L	254	-0.9	1.6	-0.4	1.4	1.4	1.6
B737	B737_CFM56-7B	RCSVGB7377	BOEING 737- 700/CFM56-7B24	S	263	-0.4	1.9	-0.6	2.0	0.3	2.1
B738	B737_CFM56-7B	RCLAPB7378	BOEING 737- 800/CFM56-7B26	L	246	-1.5	1.8	-1.0	1.6	-0.2	1.7
B738	B737_CFM56-7B	RCSVGB7378	BOEING 737- 800/CFM56-7B26	S	312	-1.2	2.1	0.2	2.1	1.0	2.7
B739	B737_CFM56-7B	RCLAPB7378	BOEING 737- 800/CFM56-7B26	L	210	-2.2	1.6	-1.6	1.4	-1.1	1.6
B739	B737_CFM56-7B	RCSVGB7378	BOEING 737- 800/CFM56-7B26	S	209	-2.2	2.0	-0.8	2.3	0.2	2.7
B762	B76X_Cf6-80C2	RCLAPB7672	BOEING 767-200/CF6- 80A	L	18	4.4	1.7	5.1	1.2	-2.6	1.3
B762	B76X_Cf6-80C2	RCSVGB7672	BOEING 767-200/CF6- 80A	S	10	2.6	1.3	2.5	2.4	0.6	1.7
B763	B763_PW4060	RCLAPB7673	BOEING 767-300/CF6- 80A	L	147	-0.7	2.0	-0.1	1.7	-2.1	1.8
B763	B763_PW4060	RCSVGB7673	BOEING 767-300/CF6- 80A	S	252	-1.0	2.5	1.1	2.5	-0.1	3.2
B763	B76X_Cf6-80C2	RCLAPB7673	BOEING 767-300/CF6- 80A	L	266	2.0	2.3	-0.8	1.5	-1.9	1.9
B763	B76X_Cf6-80C2	RCSVGB7673	BOEING 767-300/CF6- 80A	S	229	-0.8	2.2	2.0	2.5	1.1	2.7
B764	B76X_Cf6-80C2	RCLAPB7674	BOEING 767-300/CF6- 80A	L	241	2.0	2.7	1.2	1.9	-3.5	1.9
B764	B76X_Cf6-80C2	RCSVGB7674	BOEING 767-300/CF6- 80A	S	215	-1.3	2.3	0.4	2.8	-1.7	3.5
CRJ7	CRJ9_Cf34-8C5	RCLAPCL90	CL-600-2D15/CL-600- 2D24/CF34-8C5	L	189	-0.5	1.4	0.0	1.6	0.9	1.6
CRJ7	CRJ9_Cf34-8C5	RCSVGCL90	CL-600-2D15/CL-600- 2D24/CF34-8C5	S	338	0.3	1.7	1.5	2.0	-2.8	1.8
CRJ9	CRJ9_Cf34-8C5	RCLAPCL90	CL-600-2D15/CL-600- 2D24/CF34-8C5	L	301	-0.8	1.7	-0.5	2.0	0.6	2.2
CRJ9	CRJ9_Cf34-8C5	RCSVGCL90	CL-600-2D15/CL-600- 2D24/CF34-8C5	S	236	0.1	1.9	1.5	2.3	0.4	3.6
CRJX	CRJ9_Cf34-8C5	RCLAPCL90	CL-600-2D15/CL-600- 2D24/CF34-8C5	L	41	-1.9	1.2	-0.9	1.3	0.4	1.0
CRJX	CRJ9_Cf34-8C5	RCSVGCL90	CL-600-2D15/CL-600- 2D24/CF34-8C5	S	68	-0.5	1.3	1.3	1.9	-2.0	1.9
E170	E170_Cf34-8E	RCLAPE170	ERJ170-100	L	181	-0.1	2.1	-0.1	2.2	1.8	2.3
E170	E170_Cf34-8E	RCSVGE170	ERJ170-100	S	186	-0.1	1.7	-0.5	1.8	-1.8	1.7



Typ	sonAIR Emissionsmodell	FLULA2 Emissionsmodell	AEDT Emissionsmodell	Prozedur	N	sonAIR Mean	sonAIR SD	FLULA2 Mean	FLULA2 SD	AEDT Mean	AEDT SD
E190	E190_CF34-10E	RCLAPE190	ERJ190-100	L	362	-0.5	1.5	-0.4	1.7	0.5	1.7
E190	E190_CF34-10E	RCSVGE190	ERJ190-100	S	476	-1.0	1.6	-0.4	1.8	-1.4	1.8
E195	E190_CF34-10E	RCLAPE190	ERJ190-200	L	102	-1.2	1.1	-0.7	1.2	-0.2	1.4
E195	E190_CF34-10E	RCSVGE190	ERJ190-200	S	102	-0.9	1.4	-0.6	1.8	-2.0	1.5
F100	F100_TAY650-15	RCLAPFK10	F100/TAY 650-15	L	311	0.3	2.4	0.1	2.6	0.2	3.0
F100	F100_TAY650-15	RCSVGFK10	F100/TAY 650-15	S	449	-1.5	1.7	0.9	2.0	-1.8	2.4
FA7X	FA7X_PW307	RCLAPFA7X	GULFSTREAM GIV- SP/TAY 611-8	L	179	0.3	1.9	0.7	1.8	-3.5	2.3
FA7X	FA7X_PW307	RCSVGFA7X	GULFSTREAM GIV- SP/TAY 611-8	S	213	0.3	2.8	0.0	3.3	-3.7	3.2
				<b>L</b>	<b>6925</b>	<b>0.1</b>	<b>2.3</b>	<b>0.3</b>	<b>2.3</b>	<b>0.2</b>	<b>2.5</b>
				<b>S</b>	<b>8322</b>	<b>-0.6</b>	<b>2.0</b>	<b>0.2</b>	<b>2.2</b>	<b>-0.9</b>	<b>2.5</b>
				<b>Total</b>	<b>15247</b>	<b>-0.3</b>	<b>2.2</b>	<b>0.2</b>	<b>2.2</b>	<b>-0.4</b>	<b>2.5</b>

### 11.1.3. FDR-Typen, Zürich, Fernbereich

Tabelle 11-3 FDR-Typen, ZRH, Fernbereich.

Typ	sonAIR Emissionsmodell	FLULA2 Emissionsmodell	AEDT Emissionsmodell	Prozedur	N	sonAIR Mean	sonAIR SD	FLULA2 Mean	FLULA2 SD	AEDT Mean	AEDT SD
A319	A319 CFM56-5B	RCLAPA319	A319-131\IAE V2522-A5	L	97	0.1	1.3	0.0	1.7	-2.7	1.6
A320	A320 CFM56-5B	RCLAPA320	A320-211\CFM56- 5A1	L	176	0.5	1.3	0.4	2.3	-0.1	2.1
A321	A321 CFM56-5B	RCLAPA321	A321-232\V2530- A5	L	170	0.6	1.2	0.9	1.8	0.5	1.7
A333	A333 TRENT7	RCLAPA3303	A330-343\RR TRENT 772B	L	86	-0.1	1.3	-4.3	2.0	-1.0	2.1
A343	A343 CFM56-5C	RCLAPA3403	A340-211\CFM56- 5C2	L	21	0.5	0.6	-1.3	2.1	0.9	2.0
				<b>L</b>	<b>550</b>	<b>0.4</b>	<b>1.3</b>	<b>-0.3</b>	<b>2.7</b>	<b>-0.5</b>	<b>2.2</b>
				<b>Total</b>	<b>550</b>	<b>0.4</b>	<b>1.3</b>	<b>-0.3</b>	<b>2.7</b>	<b>-0.5</b>	<b>2.2</b>

## 11.2. Substitutionen und Pegelkorrekturen AEDT

Tabelle 11-4 zeigt auf, mit welchem Emissionsmodell einzelne Flugzeug-Triebwerks-Kombinationen mit AEDT berechnet wurden. Zusätzlich gibt sie die entsprechenden Pegelkorrekturen gemäss ECAC Doc. 29 Vol. 1 [3] an.

*Tabelle 11-4 Mit AEDT simulierte Flugzeugtypen, deren Emissionsmodelle und entsprechende Pegelkorrekturen.*

Flugzeugtyp (ICAO)	Triebwerkstyp	Berechnungsmodell AEDT	Korr. Starts	Korr. Landungen
A319	CFM56-5A	A319-131\IAE V2522-A5	1.9	0.3
A319	CFM56-5B	A319-131\IAE V2522-A5	0.75	-0.6
A319	V2500	A319-131\IAE V2522-A5	-0.15	0.1
A320	V2500	A320-232\V2527-A5	0.15	0.2
A320	CFM56-5A	A320-211\CFM56-5A1	0.05	-0.1
A320	CFM56-5B	A320-211\CFM56-5A1	-1.0	-0.7
A321	CFM56-5B	A321-232\V2530-A5	1.8	1.3
A321	V2500	A321-232\V2530-A5	0.1	0.0
A333	TRENT7	A330-343\RR TRENT 772B	-0.3	0.1
A343	CFM56-5C	A340-211\CFM56-5C2	0.7	-0.2
A388	GP7270	A380-861\EA GP7270	0.0	0.0
A388	TRENT9	A380-841\RR trent970	-0.05	0.0
B733	CFM56-3	BOEING 737-300/CFM56-3B-1	0.45	-0.3
B734	CFM56-3	BOEING 737-400/CFM56-3C-1	-0.05	0.0
B735	CFM56-3	BOEING 737-500/CFM56-3C-1	0.0	0.4
B736	CFM56-7B	BOEING 737-700/CFM56-7B24	-2.1	-0.3
B737	CFM56-7B	BOEING 737-700/CFM56-7B24	0.2	0.0
B738	CFM56-7B	BOEING 737-800/CFM56-7B26	0.05	0.1
B739	CFM56-7B	BOEING 737-800/CFM56-7B26	0.95	0.0
B762	CF6-80C2	BOEING 767-200/CF6-80A	-0.85	-5.1
B763	CF6-80C2	BOEING 767-300/CF6-80A	-0.05	-3.1
B763	PW4060	BOEING 767-300/CF6-80A	0.0	-3.1
B764	CF6-80C2	BOEING 767-300/CF6-80A	0.35	-3.0
B77W	GE90-115B	Boeing 777-300ER/GE90-115B-EIS	-0.25	-0.2
CRJ7	CF34-80C5	CL-600-2D15/CL-600-2D24/CF34-8C5	0.0	0.0
CRJ9	CF34-80C5	CL-600-2D15/CL-600-2D24/CF34-8C5	5.0	0.0
CRJX	CF34-80C5	CL-600-2D15/CL-600-2D24/CF34-8C5	0.7	0.7
E170	CF34-8E	ERJ170-100	-0.1	0.5
E190	E190_CF34-10E	ERJ190-100	0.0	0.0
E195	E190_CF34-10E	ERJ190-200	0.0	0.0
F100	TAY650-15	F100/TAY 650-15	0.0	0.0
FA7X	PW307	GULFSTREAM GIV-SP/TAY 611-8	1.8	-2.2
B788	Genx-1B	Boeing 787-8/T1000-C/01 Family Plan Cert	1.05	2.0
B789	Genx-1B	Boeing 787-8/T1000-C/01 Family Plan Cert	2.35	1.4

### 11.3. Zusatzauswertung: FLULA2 – FDR-Typen im Fernbereich

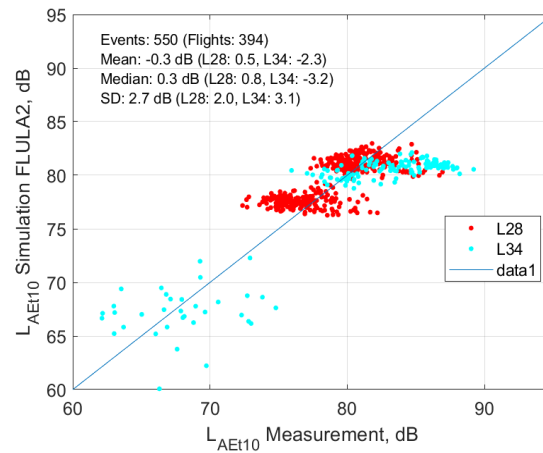


Abbildung 11-1: Scatterplot: Vergleich der Simulationen (FLULA2) mit den Messungen der FDR-Typen im Fernbereich des Flughafens Zürich, gruppiert nach Landungen auf Piste 28 (L28) und 34 (L34).

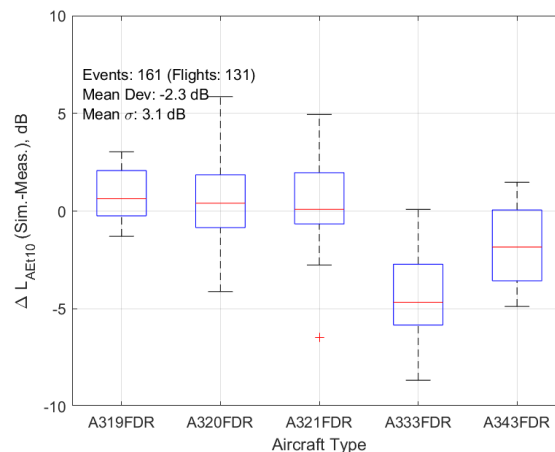


Abbildung 11-2: Boxplots: Vergleich der Simulationen (FLULA2) mit den Messungen der FDR-Typen im Fernbereich des Flughafens Zürich (Landungen auf Piste 34), gruppiert nach Flugzeugtypen.

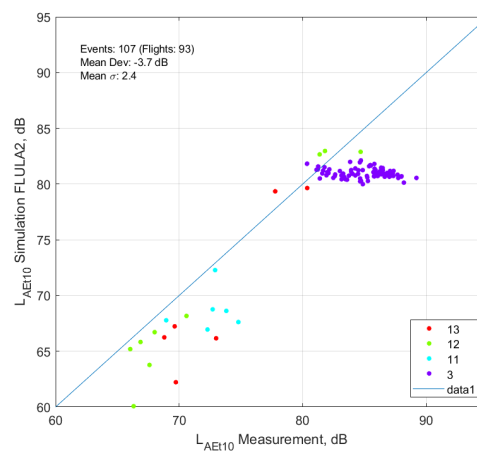


Abbildung 11-3: Scatterplot: Vergleich der Simulationen (FLULA2) mit den Messungen der FDR-Typen A333 und A343 im Fernbereich des Flughafens Zürich (Landungen 34), gruppiert nach Messpunkten.

## 11.4. Datengrundlagen

Hauptverzeichnis (\*) Projektordner: \*\5211.01812.100.01\_CompAIR\

### 11.4.1. Berechnungsgrundlagen

Nahbereich aus sonAIR Validierung:

K:\sonAIR\BV86-Anträge2016\5211.01324 Validierung\

- Bewegungslisten
- sonAIR Trajektorien
- Messstandorte

Fernbereich aus Monitoring Projekt:

K:\sonAIR\BV86-Anträge2016\5211.01323 Monitoring\

- Bewegungslisten
- sonAIR Trajektorien
- Messstandorte

Zusammenstellung aller Berechnungsdaten:

\*\Berechnungen\Plots\Daten\

- Alle Daten aus den Berechnungen der Einzelflüge für alle drei Modelle inklusive EventID, Flugzeugtypen, Triebwerkstyp, Emissionsmodelle, Messpunkte, Messkampagne, Prozedur und Ausschluss gemäss sonAIR Validierung

### 11.4.2. Modellspezifische Daten

**sonAIR:**

(Daten aus [8][11])

**FLULA2:**

- FLULA2 TC-Files:  
\* \Berechnungen\FLULA2\xxxx\xxxx\TC\  
*(Jeweils pro Messkampagne ein Unterordner, z.B. \xxxx\xxxx\ = \ZRH\_mitFDR\NMT\)*
- FLULA2 Steuer- und Inputfiles für die Simulation:  
\*\Berechnungen\FLULA2\xxxx\xxxx\Steuerfiles\
- FLULA2 RC-Files:  
DDM0625\D:\RC\RC2019\_01\
- FLULA2 Geländemodell ZRH:  
DDM0625\D:\ZRH\ZRH\_634206\_742310\_25.ASC
- FLULA2 Geländemodell GVA:

DDM0625\D:\GVA\GVA\_462088\_534157\_25.ASC

- FLULA2 Footprints (Resultate)  
\*\Berechnungen\FLULA2\xxxx\xxxx\Resultate\

#### **AEDT:**

- Pegelkorrekturen:  
\*\Berechnungen\AEDT\ASIFs\Auswertung\Pegelkorrekturen\
- Substitutionen:  
\*\Berechnungen\AEDT\Inputdaten\Airplane\_Substitution\

#### **11.4.3. Plots**

\*\Berechnungen\Plots\

- *Auswertung\_alleProgramme.m* (alle Plots von Vergleichen von Grossflugzeugen mit Messungen)
- Plots Kapitel 5.4.2 in Subordner Vergleiche\_ohne\_Messungen\; (*Vergleiche\_ohne\_Messungen.m*)

Workflows:

\*\Berichte\Abbildungen\Workflows\

- Flussdiagramme AEDT und FLULA2

#### **Datenherkunft:**

\*\Berechnungen\Plots\Daten\

#### **11.4.4. Skripte**

##### **sonAIR:**

-

##### **FLULA2:**

\*\Berechnungen\FLULA2\xxxx\xxxx\Matlab\

(Jeweils pro Messkampagne ein Unterordner, z.B. \xxxx\xxxx\ = \ZRH\_mitFDR\NMT\)

- *A\_txt\_to\_TC.m*: Zur Umwandlung der sonAIR-Trajektorien in TC-Files
- *B\_create\_BEW.m*: Zur Erstellung des Bew-File, notwendig für FLULA2-Simulation
- *C\_FLULA2\_to\_Excel.m*: Zur Auswertung und Zuweisung der FLULA2-Resultate zu den Events

##### **AEDT:**

\* \Berechnungen\AEDT\ASIFs\

- Run files als *Run\_file\_XXXX.txt*
- SQL Skripte in Subordner SQL\_Files

- Matlab Skripte in Subordner Matlab\; jeweils pro Messkampagne ein Skript für die Erstellung von ASIFs (*Txt\_to\_ASIF\_XXXX.m*) und von Batch Files (*Create\_Batch\_File\_XXXX.m*)
- Batch Skripte in Subordner Batch\_Files