

## Validierung sonAIR

### Teil 4: Vergleiche mit unabhängigen Messungen

Auftrag-Nr.: 5211.01324.100.01  
**Bericht-Nr.:** **5211.01324.100.01 - 4**  
Anzahl Seiten: 100  
Finanzierung: BAZL, Empa  
Verfasser: D. Jäger  
C. Zellmann  
J.M. Wunderli

K:\sonAIR\BV86-Anträge2016\5211.01324 Validierung\Berichte\TB4 Validierung\5211.01324.100.01-4\_Validierung\_V1.docx

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 25. Oktober 2018  
Der Verfasser:



Dr.-Ing. C. Zellmann

Abteilung Akustik / Lärminderung  
Der Abteilungsleiter:



K. Eggenschwiler

## Zusammenfassung

Der vorliegende Teilbericht umfasst die Validierung von sonAIR auf Grundlage unabhängiger Datensätze und ist damit der wichtigste Teil des Projekts. Er baut auf den bereits durchgeführten Untersuchungen auf, bei denen die Notwendigkeit einer Maximalpegelkorrektur [9], der Einfluss der ausgedehnten Emissionsquellen eines Flugzeugs [10] sowie der Einfluss von Waldreflexionen und der Bodenbedeckung [11] untersucht wurden. Während vorerst keine geeignete Maximalpegelkorrektur gefunden werden konnte und auch die Modellierung einer ausgedehnten Quelle zu keinem Mehrwert führte, so wurden jedoch die Bodenbedeckungsdaten verbessert und Waldreflexionen in die Rückrechnung integriert. Basierend auf diesen Änderungen wurden die Emissionsmodelle neu erstellt und validiert.

Als Grundlage für die Validierung dienten umfangreiche Datensätze unabhängiger Messungen aus verschiedenen Quellen. Von der TU Delft wurde eine Messung eines Mikrofonarrays am Flughafen Schiphol bereitgestellt, aus der ein Mikrofonkanal für den Vergleich von Landungen im Final Approach kurz vor Aufsetzen auf der Piste für verschiedene Flugzeugtypen verwendet wurde. Um auch Unterschiede in der Konfiguration beim Anflug validieren zu können, wurden am Flughafen Zürich zusätzlich eigene Messungen von Landungen zwischen 13 und 53 km entfernt von der Piste durchgeführt und verglichen. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt führte im Rahmen der etablieren wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der Empa einen Abgleich der Simulationen mit sonAIR auf Basis einer Messkampagne durch, bei der verschiedene An- und Abflugverfahren einer A319 vermessen wurden. Die umfangreichsten und aussagekräftigsten Datensätze stellten die Noise Monitoring Stationen der Flughäfen Genf und Zürich dar, aus denen für alle Emissionsmodelle Messungen ausgewählter Flüge aus dem Jahr 2016 verglichen wurden.

Für jeden Datensatz wurden anhand der Flugbahnen sowie meteorologischer und geografischer Grundlagendaten die Ausbreitungsdämpfungen mit sonX berechnet. Im Anschluss wurden auf Basis von FDR-Daten oder einer Parameterschätzung für jeden Flug die Emissionsparameter ermittelt und anschliessend eine Einzelflugsimulation durchgeführt. Dabei wurden jeweils Berechnungen mit verschiedenen Qualitätsstufen der Ausbreitung (homogene und stratifizierte Atmosphäre) als auch der Emissionsmodelle (reduzierte Modellvarianten) nachgerechnet.

Die Ergebnisse der Validierung waren insgesamt sehr zufriedenstellend. Die simulierten Ereignispegel wichen im Mittel über alle Flugzeugtypen nie mehr als  $\pm 1$  dB vom gemessenen Ereignispegel  $L_{AE}$  ab und die Standardabweichungen reichten von 1.1 bis 2.6 dB. Allerdings zeigte der Vergleich mit dem Maximalpegel nach wie vor eine systematische Unterschätzung auf, weshalb weiterhin eine Korrekturfunktion für den Maximalpegel benötigt wird.

Es hat sich wie erwartet gezeigt, dass Flugzeugtypen auf Basis von FDR-Daten besser mit den Messungen übereinstimmen als Flugzeugtypen ohne FDR-Daten. Hierzu tragen erhöhte Unsicherheiten der Emissionsmodelle und der Parameterschätzung bei. Bezüglich der Übertragbarkeit der Modelle hat sich trotz der guten Übereinstimmung zu den Daten in Parchim und Schiphol gezeigt, dass die Differenzen zwischen Simulation und Messung einen Jahresgang aufweisen. Eine detaillierte Analyse ergab, dass das Antriebsmodell mit einem atmosphärischen Parameter ergänzt werden könnte, um den Jahresverlauf besser abzubilden und um die Übertragbarkeit der Emissionsmodelle auf andere Standorte zu verbessern.

# Inhalt

1. Einleitung.....	5
2. Grundlagen und Methodik .....	7
2.1. Ausbreitungsmodell .....	7
2.2. Emissionsmodelle.....	8
2.3. Parameterschätzung .....	9
2.4. Simulationstool .....	12
2.5. Vergleiche .....	13
3. TU Delft Messungen in Schiphol .....	14
3.1. Messlayout.....	14
3.2. Aufbereitung der Messdaten.....	15
3.3. Eingabedaten für die Simulation.....	16
3.4. Ergebnisse.....	18
3.5. Untersuchung der Unterschätzung in der Simulation.....	20
4. Messungen in grossen Abständen zum Flughafen Zürich .....	23
4.1. Messlayout.....	23
4.2. Aufbereitung der Messdaten.....	23
4.3. Eingabedaten für die Simulation.....	25
4.4. Ergebnisse.....	26
5. DLR Messkampagne.....	30
5.1. Messlayout.....	30
5.2. Aufbereitung der Messdaten.....	31
5.3. Eingabedaten für die Simulation.....	32
5.4. Ergebnisse.....	34
6. Noise Monitoring Daten der Flughäfen Zürich und Genf.....	40
6.1. Messlayout.....	40
6.2. Aufbereitung der Messdaten.....	41
6.3. Eingabedaten für die Simulation.....	45
6.4. Ergebnisse für Typen mit FDR-Daten .....	50
6.5. Ergebnisse für Typen ohne FDR-Daten.....	58
6.6. Abhängigkeiten der Differenzen .....	65
7. Diskussion .....	72
8. Fazit .....	74
9. Ausblick.....	76
10. Abkürzungen, Datengrundlagen, Literatur.....	77

10.1.	Abkürzungen.....	77
10.2.	Datengrundlagen .....	77
10.3.	Literatur.....	78
11.	Anhang.....	80
11.1.	FDR-Datenstruktur.....	80
11.2.	Zuweisung der AV-Bodenbedeckungsdaten zu sonX-Kategorien .....	81
11.3.	Anzahl simulierte Flüge pro Typ-Triebwerk-Kombination .....	82
11.4.	NMT Zürich: Ergebnisse bei Verwendung der Standard-Inputdaten .....	84
11.5.	Validationsergebnisse für nicht-FDR Typen.....	87
11.6.	Ergänzung zur Messkampagne in Parchim .....	90
11.7.	Ergänzungen zu den NMT-Ergebnissen in Zürich .....	93
11.8.	Ergänzungen zu den NMT-Ergebnissen in Genf .....	96
11.9.	Verzeichnisse und Skripte in Matlab.....	99

# 1. Einleitung

Im Rahmen des Projektes sonAIR wurde an der Abteilung Akustik / Lärminderung der Empa ein neues Berechnungsmodell für Fluglärm entwickelt [1], welches ein Emissionsmodell zur detaillierten Beschreibung der richtungsabhängigen Schallemissionen in Abhängigkeit des Flugzustandes (Leistungssetzung und Flugkonfiguration wie Klappen- und Fahrwerkstellung) enthält [2]. Die Entwicklung von sonAIR wurde 2013-2016 im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftverkehr vom Schweizerischen Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL gefördert. Zusätzliche Unterstützung erfuhr das Projekt durch die Empa, die Flughafen Zürich AG, den internationalen Flughafen Genf (AIG), das Amt für Verkehr des Kantons Zürich sowie skyguide, im Rahmen des Projektes CHIPS.

Das Projekt wurde erfolgreich abgeschlossen und es konnte gezeigt werden, dass sonAIR dazu in der Lage ist, die lärmrelevanten Auswirkungen von An- und Abflugverfahren zuverlässig abzuschätzen und somit zu deren akustischer Optimierung und zur Minimierung der verursachten Belästigung Tags, der Schlafstörungen Nachts und schliesslich der (Lärm-)Kosten beizutragen.

In diesem Anschlussprojekt sollen zwei Punkte adressiert werden. Zum einen soll eine Validierung des Modells mit externen bzw. für die Modellentwicklung nicht verwendeten Daten vorgenommen werden (1). Zum anderen sollen einige Detailfragen untersucht werden, welche im Rahmen des Hauptprojektes aufgetaucht sind (2).

- (1) Für die bisher durchgeführten Funktionskontrollen des Modells wurden primär Daten verwendet, welche auch für die Modellentwicklung gebraucht wurden. Das zählt nicht als unabhängige Validierung. Es soll deshalb eine Modellvalidierung mit fremden bzw. neu ermittelten Daten durchgeführt werden. Dazu wurden Validierungsdaten aus vier Quellen verwendet:
  - a. Umfangreiche Messungen inkl. FDR-Daten, welche das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum DLR zusammen mit Lufthansa an einer Airbus A319 in Parchim durchgeführt hat,
  - b. Aufnahmen mit einer akustischen Kamera am Flughafen Schiphol durch die TU Delft,
  - c. Eigene zusätzliche Messungen an interessanten Standorten in grösseren Abständen,
  - d. Messdaten der Noise Monitoring Terminals der Flughäfen Zürich und Genf.
- (2) Folgende spezifischen Phänomene, welche bei der Verifizierung von sonAIR im Hauptprojekt festgestellt wurden, sollen eingehend untersucht werden:
  - a. Es wurde festgestellt, dass sonAIR bei grossen Abständen eine Tendenz zur Unterschätzung gemessener Maximalpegel aufweist. Es wird vermutet, dass diese eine Folge turbulenzinduzierter Pegelfluktuationen ist. Nach Möglichkeit soll eine Korrektur entwickelt werden.
  - b. Bei den Messpunkten in sehr kurzen Abständen wurde bei Flugzeugen mit grosser Ausdehnung wie z.B. die A340 eine Tendenz zur Überschätzung festgestellt. Es stellt sich die Frage, ob in diesen Situationen die Annahme einer Punktquelle noch gerechtfertigt ist

und was für Konsequenzen ein Unterschreiten der minimalen Distanzen für die Emissionsmodelle zur Folge hat.

- c. Bei einzelnen Fernmesspunkten wurde eine geringfügige Tendenz zur Unterschätzung festgestellt. Es soll abgeklärt werden, ob dies allenfalls die Folge von nicht berücksichtigten Waldreflexionen ist.

Durch die Validierung von sonAIR mit unabhängigen Messdaten sowie durch punktuelle Kontrollen und allenfalls Anpassungen des Modells sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Die Kontrollen und Anpassungen führen zu einer weiteren Verbesserung des Modells.
- Die Validierung erlaubt eine Quantifizierung der Genauigkeit von Immissionsberechnungen.
- Dies erlaubt es, für den Vergleich verschiedener Flugverfahren oder verschiedener Betriebs-szenarien eines Flughafens zwischen systematischen und zufälligen Differenzen zu unterscheiden und fördert allgemein die Glaubwürdigkeit des Modells.
- Durch den Vergleich mit Monitoringdaten aus Genf sowie Messdaten des DLR aus Parchim und denjenigen der TU Delft aus Amsterdam kann gezeigt werden, dass sonAIR nicht nur in der Lage ist, die Situation am Flughafen Zürich korrekt wiederzugeben, sondern dass das Modell eine allgemeine, standortunabhängige Einsetzbarkeit hat.

Der vorliegende Teilbericht behandelt ausschliesslich Teil (1), die Validierung der Emissionsmodelle mit unabhängigen Daten. Die Detailfrage aus Teil (2) zur Maximalpegelunterschätzung wird in Teilbericht 1 [9], zur Annahme der Punktquelle in Teilbericht 2 [10] und zum Einfluss der Waldreflexionen in Teilbericht 3 [11] untersucht. Da die Detailuntersuchungen des dritten Teilberichts zu Änderungen in den Grundlagendaten geführt haben, wurden die Emissionsmodelle aktualisiert. Der vorliegende Teilbericht berücksichtigt diese Änderungen und verwendet ausschliesslich die neuen Emissionsmodelle der Version V1.1-0013. Diese basieren auf den Regressionsdaten der Version 3.1, welche mit sonX Version 2.8.8 neu zurück gerechnet wurden.

## 2. Grundlagen und Methodik

Für die Validierung der Emissionsmodelle von sonAIR wurde ausschliesslich das wissenschaftliche Tool für Einzelflugsimulationen (WS-Tool) verwendet [3]. Grund dafür ist die Verwendung von individuellen meteorologischen Profilen für jeden Einzelflug, eine hohe Flexibilität der Matlab-Umgebung für Weiterentwicklungen (Ereigniszuordnung bei Mehrfachüberflügen) und die direkte Anbindung der Ergebnisauswertung in der gleichen Umgebung. Im Unterschied zum Dienstleistungs-Tool (DL-Tool) werden hier die Regressionsgleichungen der Emissionsmodelle direkt verwendet und die Dämpfungen zu jeder Quellen-Empfänger-Position berechnet. Dass die Ergebnisse des WS-Tools trotz der Vereinfachungen zur Optimierung der Rechenzeit mit dem DL-Tool übertragbar sind, wurde bereits in [4] gezeigt.

Grundsätzlich wurden für jeden Vergleich der Kapitel 5 bis 5 zuerst die Grundlagendaten aufbereitet oder ergänzt. Hierzu gehört eine Bewegungsliste, die jede Flugbewegung mit dazugehörigen Metadaten enthält. Zwingend erforderlich sind ein Zeitstempel, der Flugzeug- und Triebwerkstyp sowie die Prozedur (Start oder Landung). Jeder Kombination aus Flugzeug- und Triebwerkstyp wird ein passendes Emissionsmodell zugeordnet und wenn verfügbar eine Datei mit meteorologischen Profilen. Die Flugbahndaten müssen ebenfalls in das richtige Format gebracht werden, auf eine zeitliche Auflösung von 0.5 s oder 1 s interpoliert werden. Falls nicht aus FDR-Daten verfügbar, müssen zusätzlich die für das Emissionsmodell benötigten Flugparameter geschätzt werden.

Der erste Berechnungsschritt umfasst die Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen, basierend auf allen Quellenpunkten aus der Flugbahn einer Bewegung und den Messpunkten als Empfänger. Zusätzlich benötigt die Ausbreitungsberechnung Informationen zur Meteorologie, zum Gelände, zur Bebauung und zur Bodenbedeckung. Im zweiten Schritt werden für jeden Messpunkt Pegel-Zeit-Verläufe simuliert und folgende akustischen Masse abgespeichert: Ein Ereignispegelspektrum, der Ereignispegel  $L_{AE}$  und der Maximalpegel  $L_{ASmax}$ . Der Ereignispegel wurde dabei entweder über ein Zeitintervall integriert, bei dem der Pegel nicht mehr als 10 dB unter dem Maximalpegel liegt oder eine definierten Messschwelle überschreitet, um den Vergleich zur Messung ohne Hintergrundpegel zu gewährleisten.

### 2.1. Ausbreitungsmodell

Als Ausbreitungsmodell wurde sonX in der Version 2.8.8. verwendet [5]. Das Modell bietet verschiedene Modi für die Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen an. Mit dem Modus BASIC wird die geometrische Verdünnung, die atmosphärische Dämpfung, der Bodeneffekt inkl. Hinderniswirkung und Bewuchsdämpfung berücksichtigt. Die Basis hierfür ist die Ausbreitung in einer homogenen Atmosphäre, die anhand einer Studie für den Flughafen Zürich auf eine Temperatur von 14°C, einem Druck von 1000 mbar und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% festgelegt wurde. Mit diesen Werten wurde für einen Dreijahreszeitraum die gleichen mittleren Ausbreitungsbedingungen erzeugt wie mit dem effektiv vorliegenden Wetter [3]. Ein Vergleich zum BASIC-Modus zeigt daher auf, wie gut die Einzelflüge auch mit mittleren meteorologischen Werten reproduziert werden können.

Mit dem Modus METEO können zusätzlich lokale Wettereinflüsse berücksichtigt werden. Hierbei wird die Wellenausbreitung auf gekrümmten Bahnen aufgrund von Temperatur- und Windschwindigkeitsgradienten mit der Höhe und der Einfluss der absoluten Temperatur und der relativen Feuchtigkeit auf die Luftdämpfung berücksichtigt. Der METEO-Modus ist der bevorzugte Detaillierungsgrad für die Validierung, um die Einzelereignisse so genau wie möglich reproduzieren zu können. Bereits für die Rückrechnung als Basis für die Modellerstellung wurde dieser Modus verwendet, um die Luftdämpfung der hohen Terzbänder möglichst genau berechnen zu können.

Die Modi FOREST und REFLECT, welche Wald- und Felsreflexionen bzw. Reflexionen an künstlichen Objekten berücksichtigen, wurden bei der Validierung nicht verwendet.

## 2.2. Emissionsmodelle

Die Emissionsmodelle für Grossflugzeuge mit Mantelstromtriebwerk beschreiben die Emissionen der Flugzeuge in Funktion von Frequenz, Abstrahlwinkel und Flugparametern. Dabei werden Umströmungslärm und Triebwerkslärm separat über Regressionsgleichungen beschrieben. Der Umströmungslärm ist für jedes Terzband zwischen 25 Hz und 5 kHz durch eine zweidimensionale Richtwirkung ( $\theta$ ) beschrieben. Diese skaliert mit den logarithmierten Parametern Flugmachzahl  $lMa$  und Umgebungsdichte  $l\rho$ . Sofern Informationen zur Konfiguration des Flugzeugs vorhanden waren, berücksichtigt das Modell dies mit geschwindigkeitsabhängigen Termen oder einfachen Zuschlägen. Zur Konfiguration gehören die Fahrwerke ( $LG$ ), die Stellung der Hochauftriebshilfen ( $FH$ ) und die Störklappen ( $SB$ ). Als Ersatzgrösse um die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Klappen abzubilden, ist auch die Prozedur  $Proc$  im Modell enthalten.

Das Triebwerksmodell ist durch eine dreidimensionale Richtwirkung ( $\theta, \varphi$ ) pro Terzband beschrieben, die nicht nur mit den Flugparametern wie der Machzahl  $Ma$  skaliert, sondern die Form mit der Drehzahl  $N1$  verändert. Die Drehzahl  $N1$  stellt die wichtigste Variable für die Leistungssetzung im Triebwerk dar und ist mit einem linearen und einem quadratischen Term modelliert.

Je nach Datengrundlage und Anwendungszweck stehen vier Modellvarianten für die Emissionsmodelle zur Verfügung:

**3D:** Das bestverfügbare Modell mit Einfluss der Konfiguration und dreidimensionaler Richtwirkung. Dieses Modell wurde nur für die sechs Swiss-Typen erzeugt, bei denen FDR-Daten verfügbar waren. Diese Variante wird für detaillierte Vergleiche von Einzelflügen und zur Optimierung von lärmarmen An- und Abflügen empfohlen. Die Modellvariante basiert auf folgenden Parametern:

$$\begin{aligned}\hat{L}_{em,afm} &= f(\theta, lMa, l\rho, FH, LG, SB, Proc) \\ \hat{L}_{em,eng} &= f(\theta, \varphi, Ma, N1, N1^2)\end{aligned}\tag{1}$$

**3Dred:** Reduziertes Modell ohne Einfluss der Konfiguration und dreidimensionaler Richtwirkung. Der Einfluss der Konfiguration ist durch deren  $Ma$ -Abhängigkeit im Mittel dennoch sehr gut abgebildet und repräsentiert die durchschnittliche Konfiguration für einen Flugbetrieb wie in Zürich. Diese Variante wird als Standard für Jahresbelastungen empfohlen, da im



Normalfall die Konfiguration für Jahresberechnungen nicht verfügbar ist. Die Modellvariante basiert auf folgenden Parametern:

$$\begin{aligned}\hat{L}_{em,afm} &= f(\theta, lMa, lp, Proc) \\ \hat{L}_{em,eng} &= f(\theta, \varphi, Ma, N1, N1^2)\end{aligned}\tag{2}$$

**2D:** Berücksichtigung der Konfiguration im Umströmungsmodell aber nur zweidimensionale Richtwirkung im Antriebsmodell. Diese Variante kann z.B. dafür verwendet werden, den Einfluss der lateralen Richtwirkung aufzuzeigen. Diese Modellvariante wird ausser für reine Vergleichszwecke keine Anwendung finden und wurde daher nicht validiert. Der Einfluss der 2D-Richtwirkung wird mit der Variante 2Dred abgedeckt.

**2Dred:** Reduziertes Modell ohne Einfluss der Konfiguration und zweidimensionaler Richtwirkung. Diese Variante wird verwendet um neue RC-Typen für FLULA2 zu erzeugen oder die Kenn-  
daten zu vergleichen. Die Modellvariante basiert auf folgenden Parametern:

$$\begin{aligned}\hat{L}_{em,afm} &= f(\theta, lMa, lp, Proc) \\ \hat{L}_{em,eng} &= f(\theta, Ma, N1, N1^2)\end{aligned}\tag{3}$$

Die in diesem Bericht validierten Emissionsmodelle basieren auf Messungen aus [6] und sind ausführlich in [2, 16, 18] dokumentiert. Aufgrund der Ergebnisse von Teilbericht [11] des Validierungsprojekts hatte sich die Auswertung der Messdaten leicht geändert und die Emissionsmodelle wurden vor der Validierung aktualisiert (V1.1-0013). Hierbei wurden die Bodenbedeckungsdaten angepasst, da festgestellt wurde, dass reflektierende Rollwege auf dem Flughafenareal im Vektor25 Datensatz fehlten und eine Waldfläche in den Nähe von Messpunkt 8 zu ungenau die Realität abbildete. Für die Rückrechnung der Regressionsdaten wurden zudem die sonX Version 2.8.8 verwendet und bei Messungen im Nahbereich zusätzlich zu den Modi BASIC und METEO das Modul FOREST zur Berücksichtigung von Reflektionen an Waldrädern verwendet. Die Regressionsgleichungen blieben unverändert.

In Tabelle 1 sind alle 31 Kombinationen aus Flugzeugtyp und Triebwerkstyp aufgeführt, welche im vorliegenden Projekt validiert wurden. Je nach Flugzeugtyp gibt es bis zu drei Triebwerksoptionen, sodass für einen Flugzeugtypen entsprechend bis zu drei verschiedene Emissionsmodelle verwendet wurden. Für jedes Emissionsmodell sind zudem die verfügbaren Modellvarianten und die Modellierung des Startschubs (s. Kapitel 2.3) aufgeführt.

## 2.3. Parameterschätzung

Die für die Validierung zur Verfügung stehenden Datensätze beinhalten häufig bereits Angaben zur verwendeten Drehzahl bei An- und Abflug. Dies ist der wichtigste Modellparameter für das Antriebsmodell und wird daher zwingend benötigt. Für den Vergleich aller Flugzeugtypen mit den NMT-Daten der Flughägen Genf und Zürich fehlen diese Angaben jedoch für die meisten Emissionsmodelle. FDR-Daten waren nur für die Flugzeugtypen der Swiss verfügbar. Aus diesem Grund wurde in einem parallelen Projekt [12] eine Methodik entwickelt, um die Drehzahl beim An- und Abflug auf Basis von Radardaten zu schätzen.

Die Schätzung der Drehzahl während eines Abflugs wurde in zwei Segmente aufgeteilt. Im ersten Segment wird mit Startschub auf der Piste beschleunigt und bis zur Cutbackhöhe bei konstanter Geschwindigkeit und konstantem Steigwinkel gestiegen. Die Cutbackhöhe ist in der Schweiz auf 1500 ft festgelegt, kann aber auf anderen Flughäfen je nach Flugverfahren davon abweichen. Anschliessend beginnt das Steigschubsegment, bei dem meistens mit reduziertem Schub weiter gestiegen wird.

**Tabelle 1: Validierte Grossflugzeuge mit Mantelstromtriebwerken (ICAO-Typ und Triebwerksgruppe) und dem zugeordneten sonAIR Emissionsmodell. Je nach Emissionsmodell stehen verschieden Detaillierungsgrade der Modellvariante und der Startschubschätzung zur Verfügung.**

ICAO-Typ	Triebwerk	Emissionsmodell	Modellvarianten	Startschub
A319	CFM56-5A	A32X_CFM56-5A	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
A319	CFM56-5B	A319_CFM56-5B	3D, 2D, 3Dred, 2Dred	Flex ( $m/v_{LO}$ )
A319	V2500	A32X_V2500	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
A320	CFM56-5A	A32X_CFM56-5A	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
A320	CFM56-5B	A320_CFM56-5B	3D, 2D, 3Dred, 2Dred	Flex ( $m/v_{LO}$ )
A320	V2500	A32X_V2500	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
A321	CFM56-5B	A321_CFM56-5B	3D, 2D, 3Dred, 2Dred	Flex ( $m/v_{LO}$ )
A321	V2500	A32X_V2500	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
A333	TRENT7	A333_TRENT7	3D, 2D, 3Dred, 2Dred	Flex ( $m/v_{LO}$ )
A343	CFM56-5C	A343_CFM56-5C	3D, 2D, 3Dred, 2Dred	Flex ( $m/v_{LO}$ )
A388	GP7270	A388_GP7270	3Dred, 2Dred	Median
A388	TRENT9	A388_TRENT9	3Dred, 2Dred	Median
B733	CFM56-3	B737_CFM56-3	3Dred, 2Dred	Median
B734	CFM56-3	B737_CFM56-3	3Dred, 2Dred	Median
B735	CFM56-3	B737_CFM56-3	3Dred, 2Dred	Median
B736	CFM56-7B	B737_CFM56-7B	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
B737	CFM56-7B	B737_CFM56-7B	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
B738	CFM56-7B	B737_CFM56-7B	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
B739	CFM56-7B	B737_CFM56-7B	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
B762	CF6-80C2	B76X_CF6-80C2	3Dred, 2Dred	Median
B763	CF6-80C2	B76X_CF6-80C2	3Dred, 2Dred	Median
B763	PW4060	B763_PW4060	3Dred, 2Dred	Median
B764	CF6-80C2	B76X_CF6-80C2	3Dred, 2Dred	Median
CRJ7	CF34-8C5	CRJ9_CF34-8C5	3Dred, 2Dred	Median
CRJ9	CF34-8C5	CRJ9_CF34-8C5	3Dred, 2Dred	Median
CRJX	CF34-8C5	CRJ9_CF34-8C5	3Dred, 2Dred	Median
E170	CF34-8E	E170_CF34-8E	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
E190	CF34-10E	E190_CF34-10E	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
E195	CF34-10E	E190_CF34-10E	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
F100	TAY650-15	F100_TAY650-15	3Dred, 2Dred	Flex ( $v_{LO}$ )
FA7X	PW307	FA7X_PW307	3Dred, 2Dred	Median

Der Schub im Startsegment wird bei den meistens Triebwerkstypen stufenlos soweit reduziert, dass unter Berücksichtigung von Startgewicht, Startstrecke, Wetterbedingungen und Hindernisfreiheit sicher gestartet werden kann. Das Triebwerk wird dabei weitestgehend geschont und der Treibstoffverbrauch gesenkt. Die Drehzahl während des Startsegments wird in Abhängigkeit vom mittleren Steigwinkel  $\bar{\gamma}$  und dem Abfluggewicht  $m$  bzw. der Abhebegeschwindigkeit  $v_{LO}$  (als Stellvertreter für das Abfluggewicht) geschätzt.

$$\begin{aligned} N1_h^2 &= f(m, \bar{\gamma}, T_h) \\ N1_h^2 &= f(v_{LO}, \bar{\gamma}, T_h) \end{aligned} \quad (4)$$

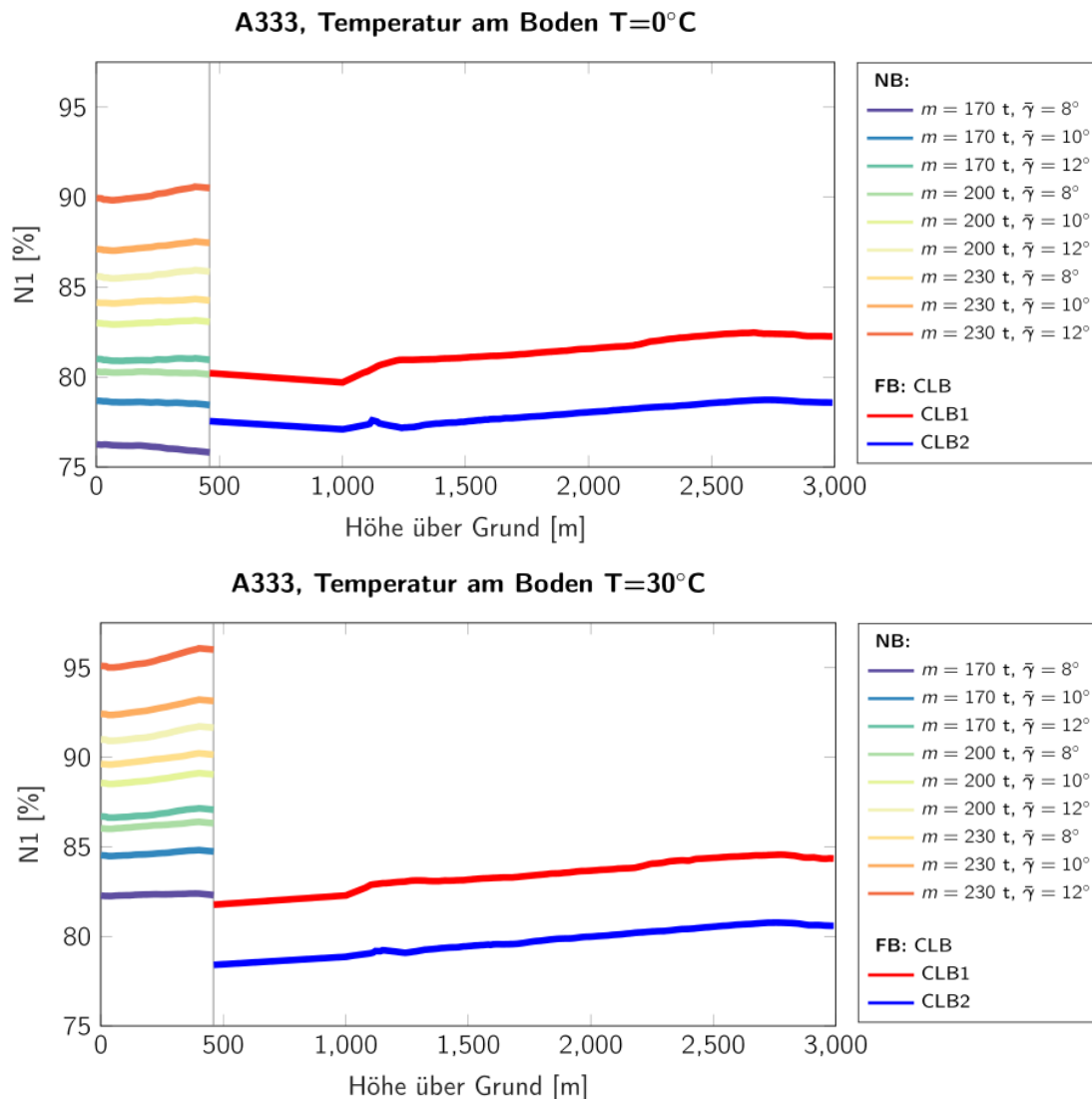
Durch eine zusätzliche Abhängigkeit von der Aussentemperatur  $T_h$  ändert die Drehzahl je nach Wetterbedingungen und mit der Höhe. Tabelle 1 zeigt auf, für welches Emissionsmodell reduzierter Startschub über  $m$  bzw.  $v_{LO}$  oder nur über  $v_{LO}$  geschätzt werden kann. Als Datengrundlage zur Erstellung der Regressionskoeffizienten lagen für die Flotte der Swiss (alle in 3D verfügbaren Emissionsmodelle) hochwertige FDR-Daten aus dem Jahr 2016 vor. Für alle anderen Emissionsmodelle wurden die akustisch bestimmten  $N1$ -Verläufe aus der Quellenvermessung für sonAIR verwendet [6]. Da bei einigen Emissionsmodellen die Datengrundlage zu gering war um die Regressionskoeffizienten zu bestimmen, wurde für diese Fälle ein Median aus den  $N1$ -Profilen erstellt.

Im zweiten Steigsegment, wird bei fast allen Triebwerkstypen, für welche Emissionsmodelle erstellt wurden, eine feste Schubstufe verwendet. Aufgrund der Leistungsgrenze des Triebwerks, die Triebwerksregelung verhindert damit eine Überhitzung der Turbine, ändert sich die Drehzahl allerdings in Abhängigkeit von der Aussentemperatur und der Höhe.

$$N1_h = f(|T_h|) \quad (5)$$

Abbildung 1 zeigt exemplarisch  $N1$ -Abflugprofile für unterschiedliche Parameterkombinationen der A333\_TRENT7. Bei diesem Flugzeugtyp gibt es zwei sogenannte Derate-Schuboptionen (CLB1, CLB2), die je nach Steiganforderung an das Flugprofil gewählt wird. Über eine Klassifizierung wird anhand der Flugzeugmasse (oder der Abhebegeschwindigkeit) und der Totalenergie in einem längeren Segment nach dem Cutback die entsprechende Schuboption gewählt (s. [12]).

Bei Landungen wurden für jedes Emissionsmodell individuelle Mediane der  $N1$ -Verläufe in Abhängigkeit der Höhe aus der damaligen Vermessung von sonAIR verwendet [6]. Diese idealisierten  $N1$ -Profile werden zusammen mit Machzahl und Dichte, welche unter Annahme einer Standardatmosphäre und korrigiert mit den momentanen Bedingungen am Flugplatz berechnet werden, an die Flugbahn angefügt. Abschliessend werden die Flugbahnparameter auf eine Zeitachse mit einem Zeitschritt von 0.5 s interpoliert.



**Abbildung 1:** Beispielhafte N1-Abflugprofile für den A333\_TRENT7 bei verschiedenen Abflugmassen, Steigwinkeln und Aussentemperaturen. Das Startschubsegment endet mit dem Cutback bei einer Höhe von 480 m, anschliessend wird je nach Totalenergie und Masse eine der zwei Schuboptionen gewählt. Auch diese sind wiederum abhängig von der Höhe und der Aussentemperatur.

## 2.4. Simulationstool

Die in diesem Bericht durchgeführten Simulationen und Berechnungsergebnisse basieren auf dem wissenschaftlichen Tool für Einzelflugsimulationen (WS-Tool) der Version 8, welches in Matlab R2017b ausgeführt wurde. Im Unterschied zum Dienstleistungs-Tool für Einzelflugsimulationen (DL-Tool), der Umsetzung in Esri ArcGis, konnten so gewissen Anforderungen des Vergleiches zwischen Messung und Berechnung flexibel implementiert werden. Es mussten zum Beispiel Ereignispegel über unterschiedliche Integrationszeiten implementiert werden um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Auch die Auswahl von Ereignissen und die Zuordnung der Messungen zum Simulationereignis bei Mehrfachüberflügen konnte über eine zeitliche Zuordnung leichter umgesetzt werden.

In [4] wurde bereits gezeigt, dass die Umsetzung der beiden Simulationsumgebungen sehr ähnliche Ergebnisse liefern, sodass die hier erlangten Validierungsergebnisse auch für das DL-Tool gelten. Da beide Implementationen seit [4] weiterentwickelt wurden, müsste der Vergleich streng genommen allerdings wiederholt werden. Da derzeit weitere Änderungen am DL-Tool durchgeführt werden, wurde beschlossen diesen Vergleich vorerst zu verschieben.

Folgende Einstellungen lassen sich mit dem WS-Tool wählen:

- a. Die Modellvariante: 1: 3D, 2: 2D, 3: 2Dred, 4: 3Dred, 0: Monopol 120 dB (siehe [2])
- b. Energetisch korrigierter Pegel 0= nein, 1= ja (standard). Die Korrektur korrigiert das durch die Regression bestimmte arithmetische Mittel auf einen energetischen Mittelwert des Schallleistungspegels (siehe [2]).
- c. sonX Dämpfungen BASIC- oder METEO-Modul
- d. Einschränkung der Extrapolation der Regressionsgleichungen:  
restrict=0: Extrapolation von Machzahl, Dichte  
restrict=1 (standard): eingeschränkter Wertebereich (Machzahl, Dichte) auf die bei der Modellerstellung vorliegenden Werte getrennt nach Start und Landung  
restrict=2: maximaler Wertebereich der bei Modellerstellung vorliegenden Werte (Machzahl, Dichte), unabhängig von Start und Landung (v.a. Landungen werden zu höheren Machzahlen extrapoliert)  
Bei 1 und 2 wird der longitudinale Richtwirkungswinkel auf 20° bis 170° eingeschränkt.
- e. Cavity-Ton bei Landungen der A320-Familie: cavity=0: Ton entfernt, cavity=1: Ton enthalten
- f. Zeitauflösung des  $L_{AS}$ -Verlaufs: DT=0.2
- g. Zeitkonstante des  $L_A$  RC=1 (für Slow)
- h. Export von Pegel-Zeit Verläufen als Textdatei
- i. Export der internen Resultate als Exceldatei (Immissionspektren für jeden Zeitschritt)

Fall nicht anders dokumentiert, wurden in diesem Bericht die Emissionsmodelle immer mit energetischer Korrektur sowie restrict=1 und cavity=0 gerechnet. Bei den meisten Messstationen der Flughäfen spielen die Parameter restrict und cavity keinen Einfluss, da die Wertebereiche der Prozeduren bekannt sind und die Cavity-Töne vor allem bei grösseren Abständen zum Flughafen eine Rolle spielen.

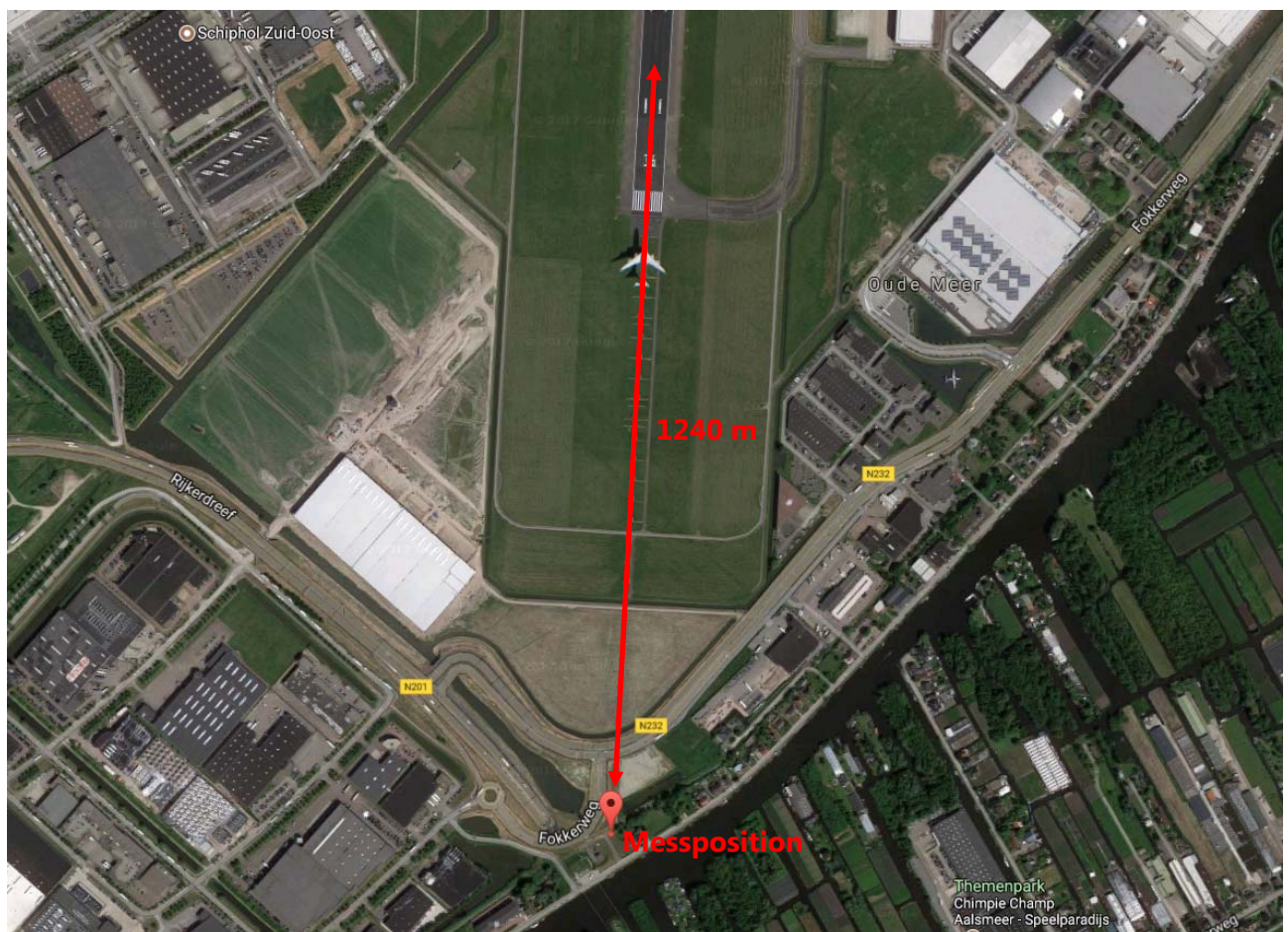
## 2.5. Vergleiche

Die Validierung basiert je nach Verfügbarkeit auf unterschiedlichen Datengrundlagen. Soweit verfügbar, wurden FDR-Daten für die Simulation verwendet. Im Vergleich mit den Daten der Noise Monitoring Terminals werden die Ergebnisse daher unterteilt nach Emissionsmodellen mit FDR-Daten und Emissionsmodellen ohne FDR-Daten. Dieses Vorgehen ist konsistent zur Verifizierung der Emissionsmodelle [4]. Details zur Methodik der jeweiligen Vergleiche sind in den jeweiligen Unterkapiteln dokumentiert. Unabhängig von der Häufigkeit oder dem Energiebeitrag eines Typs oder einer Prozedur basieren die Boxplots und Scatterplots jeweils auf den ungewichteten Pegeldifferenzen aller Ereignisse. Auch die Mittelwerte und Standardabweichungen wurden so berechnet und angegeben.

### 3. TU Delft Messungen in Schiphol

#### 3.1. Messlayout

Vom Flughafen Schiphol in den Niederlanden standen für die Validierung insgesamt 106 Audioaufnahmen von 24 unterschiedlichen Flugzeug-Triebwerkskombinationen zur Verfügung. Die Messungen wurden von Studenten der TU Delft an zwei Tagen im Juni und August 2013 im Rahmen der Entwicklung einer kostengünstigen akustischen Kamera durchgeführt [14, 15]. Gemessen wurden Landeanflüge auf die Piste 36R, wobei sämtliche Messungen von einer einzigen Messposition senkrecht unterhalb der Endanflugtrajektorie ca. 1240 Meter südlich des Landepunktes durchgeführt wurden (siehe Abbildung 2). Die Überflughöhe des Messstandortes betrug zwischen 60 und 70 Meter.

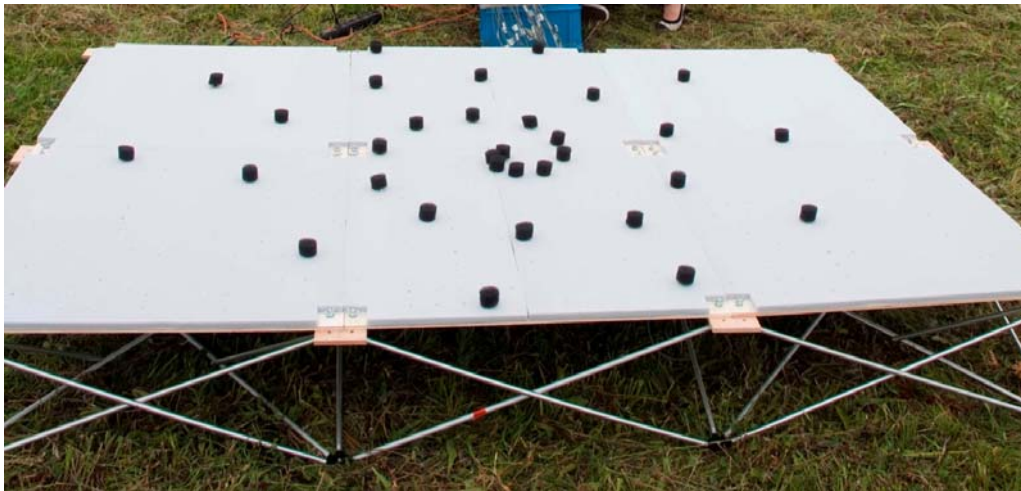


**Abbildung 2:** Messposition bei Piste 36R am Flughafen Schiphol in den Niederlanden (Luftaufnahme ©2018 Google).

Der Messaufbau (Abbildung 3) bestand aus einer 2.3 x 1.6 Meter grossen Holzplatte, welche mittels eines Gerüsts horizontal 20 Zentimeter über dem Boden aufgestellt wurde. Auf dieser Platte wurden 32 Mikrofone in unterschiedlicher Anordnung jeweils ca. 2 Zentimeter über der Holzplatte installiert. Die Mikrofone wiesen einen Dynamikbereich von 60 – 126 dB auf. Die hier zur Verfügung stehenden Messungen stammen jeweils von einem einzelnen Mikrofon in der Plattenmitte. Zur Verminde-



rung der Schallreflexion durch die Holzplatte wurde diese mit einem schallabsorbierenden Schaumstoff bedeckt (siehe Kapitel 3.3.2).



**Abbildung 3:** Messaufbau der akustischen Kamera [15].

## 3.2. Aufbereitung der Messdaten

### 3.2.1. Audiosignale

Die Messdaten wurden von der TU Delft [A] als bereits kalibrierte Drucksignale mit einer Abtastrate von 40 kHz geliefert. Die genaue Aufbereitung der Daten kann in [15] nachgelesen werden. Aus dem Drucksignal wurde mittels Matlab für jedes Ereignis der  $L_{AS,max}$ , der  $L_{AE}$  sowie der  $L_{AE,t10}$  berechnet. Zusätzlich wurden für einen detaillierteren Vergleich der Pegelzeitverläufe jeweils der  $L_{AS}$  über das gesamte Drucksignal berechnet.

### 3.2.2. Wetter- und Flugparameter

Zusätzlich zu dem Drucksignal standen pro Ereignis folgende Informationen zur Verfügung:

- Messdatum und -zeitpunkt
- Flugzeug- und Triebwerkstyp
- Flughöhe und –geschwindigkeit zum Zeitpunkt des vertikalen Mikrofonüberflugs
- Drehzahl der Niederdruckwelle  $N1$  in % zum Zeitpunkt des vertikalen Mikrofonüberflugs
- Relativer Zeitpunkt des vertikalen Überfluges innerhalb des Audiosignals
- Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und –Richtung

Die Meteodaten stammten vom Königlich-Niederländischen Meteorologischen Institut KNMI und wiesen eine zeitliche Auflösung von einer Stunde auf. Die Luftdichte pro Ereignis wurde mit dem idealen Gasgesetz aus dem Luftdruck und der Lufttemperatur berechnet. Da keine detaillierten meteorologischen Profile vorhanden waren, wurde als Grundlage für die Ausbreitungsberechnung mit sonX der Verlauf einer labilen Standardatmosphäre verwendet und an die jeweilige Lufttemperatur

angepasst. Da die Überflughöhen sehr gering sind, kann der Einfluss der Atmosphäre jedoch als vernachlässigbar eingeschätzt werden.

Aus der Flughöhe und -geschwindigkeit wurde für jedes Ereignis unter der Annahme eines konstanten Sinkwinkels von  $3^\circ$  eine vereinfachte, geradlinige Anflugtrajektorie berechnet. Die Berechnung erfolgte für einen Zeitraum von 60 Sekunden vor dem Mikrofonüberflug bis zum Zeitpunkt der Landung (Schnittpunkt der Trajektorie mit der DTM-Ebene) in konstanten Zeitschritten von 0.2 Sekunden. Die Fluggeschwindigkeit wurde unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit in eine Machzahl umgerechnet. Die Drehzahl  $N1$  und die Machzahl wurden als konstant für den gesamten Anflug angenommen. Ebenso wurden ein vollständig ausgefahrenes Hochauftriebssystem sowie ein komplett ausgefahrenes Fahrwerk während des gesamten Messzeitraums angenommen, da sich die Flugzeuge so kurz vor der Piste im stabilen Landeanflug befinden.

### 3.3. Eingabedaten für die Simulation

Von den 24 vermessenen Flugzeug-Triebwerkskombinationen existierten zum Zeitpunkt der Validierung für 10 Kombinationen keine passenden sonAIR-Emissionsmodelle. Die entsprechenden Flugereignisse wurden deshalb aus der Analyse ausgeschlossen. Damit verblieben für die Validierung 74 Flugereignisse (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Übersicht über die für die Validierung berücksichtigten Flugzeuge und Anzahl Messungen N.**

Flugzeugtyp	Triebwerkstyp	sonAIR Emissionsmodell	N
A319	CFMI CFM56-5B5/P	A319_CFM56-5B	2
A319	IAE V2524-A5	A32X_V2500	1
A320	IAE V2500-A1	A32X_V2500	1
A321	CFMI CFM56-5B2/P	A321_CFM56-5B	2
A321	IAE V2533-A5	A32X_V2500	1
A388	GP7270 67	A388_GP7270	1
B733	CFMI CFM56-3C1	B737_CFM56-3	4
B734	CFMI CFM56-3C1	B737_CFM56-3	2
B735	CFMI CFM56-3C1	B737_CFM56-3	3
B737	CFMI CFM56-7B	B737_CFM56-7B	12
B738	CFMI CFM56-7B	B737_CFM56-7B	30
B739	CFMI CFM56-7B	B737_CFM56-7B	4
B763	PW PW4060	B763_PW4060	1
E190	GE CF34-10E5	E190_CF34-10E	10
<b>Total</b>			<b>74</b>

#### 3.3.1. Geländemodell

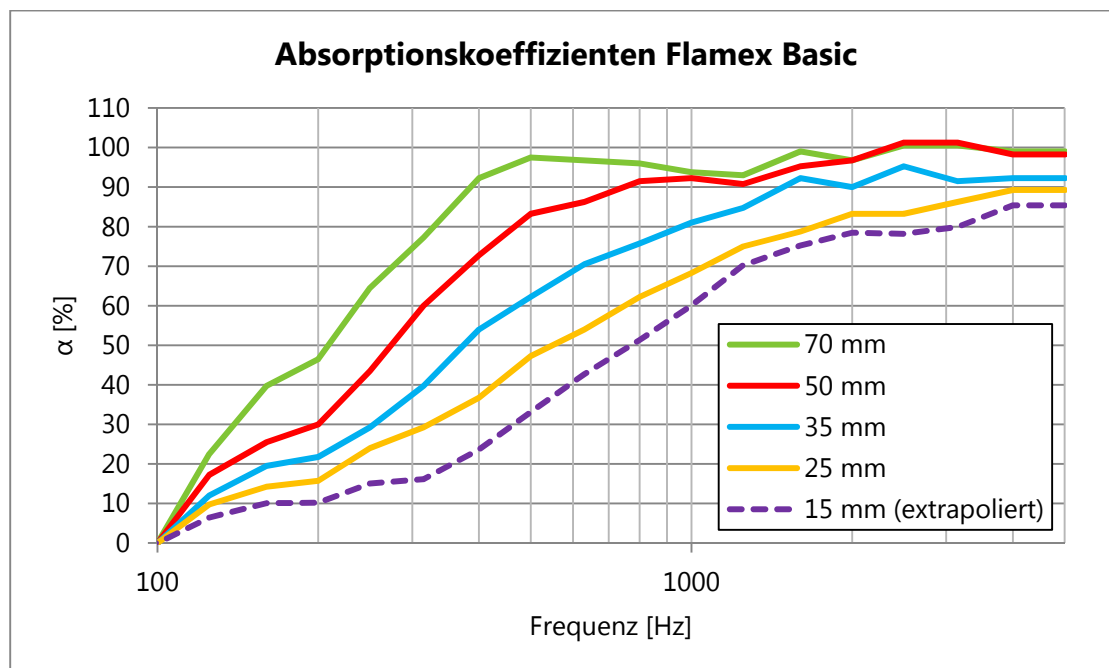
Um die Besonderheit des Messaufbaus im Ausbreitungsmodell berücksichtigen zu können, wurde die Messplattform manuell in das Geländemodell (DTM) integriert. Dazu wurde sie als Podest mit einer Höhe von 20 Zentimetern modelliert, während die Umgebung als Ebene ohne Geländeerhebungen angenommen wurde. Aufgrund der maximal möglichen DTM-Auflösung von einem Meter wurde die Plattform mit einem Podest von 2 x 2 Metern Ausdehnung angenähert, wobei die Mikrofonposition genau in der Podestmitte definiert wurde. Die akustischen Eigenschaften des Podests



wurden als „schallhart“ (Strömungswiderstand  $\Sigma = 20'000$ ) definiert, die umliegende Ebene als „Grasland“ ( $\Sigma = 300$ ).

### 3.3.2. Absorptionsmaterial Flamex Basic

Die Holzplatte des Messaufbaus war mit einer 15 mm dicken Schicht aus einem schallabsorbierenden Schaumstoff (Flamex Basic des Herstellers Merford, [15]) bedeckt. Dieser Schaum verringerte den Anteil des reflektierten Schalls und musste daher in die Simulation miteinbezogen werden. Die Absorptionskoeffizienten waren von Herstellerseite für Schaumdicken von 70 mm, 50 mm, 35 mm sowie 25 mm und für die Terzbänder von 125 – 4000 Hz angegeben. Die Koeffizienten für die im Versuchsaufbau verwendeten 15 mm Schaumdicke waren herstellerseitig nicht verfügbar und wurden daher durch lineare Extrapolation der Koeffizienten für 50 mm, 35 mm und 25 mm bestimmt. Die Absorption für Frequenzen grösser als 4 kHz wurde als konstant angenommen, jene ab 100 Hz und tiefer auf Null gesetzt (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Absorptionskoeffizienten über Frequenz des Flamex Basic Schaumstoffs für verschiedene Materialstärken (25 – 70 mm: Herstellerangaben; 15 mm: Extrapolation aus grösseren Materialstärken).

Aus den Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  wurde für jedes Terzband ein Korrekturfaktor  $C$  berechnet. Dabei wurde angenommen, dass die Schallwellen vollständig an der schallharten Oberfläche der Messplattform reflektiert werden. Da die Korrektur auf den Ereignispegel eines Überfluges angewendet wird, bei dem sowohl konstruktive als auch destruktive Interferenzen enthalten sind, wurde eine energetische Überlagerung von Direktschall und Reflexion angenommen. Entsprechend wurde der Korrekturfaktor  $C$  wie folgt definiert:

$$C = 10 \cdot \log(1 + \alpha)$$

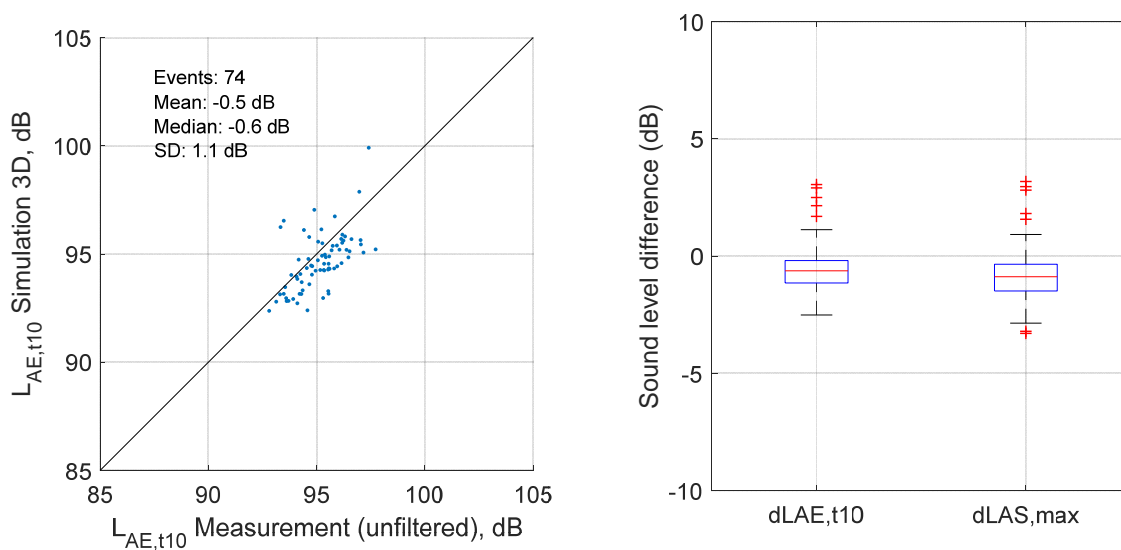
Durch Subtraktion dieses Korrekturfaktors vom simulierten Gesamtpegel  $L_{\text{ges}}$  pro Terzband wurde der Gesamtpegel unter Berücksichtigung des Absorptionsmaterials berechnet:

$$L_{ges,ged\ddot{a}mpft} = L_{ges} - C$$

Die Dämpfungen wurden mit sonX Version 2.8.8 berechnet, die Einzelflugsimulation erfolgte mit dem wissenschaftlichen sonAIR-Simulationstool Version 7 im 3Dred-Modus und Emissionsmodelle der Version 1.1-0013 (Details in Kapitel 2).

### 3.4. Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt den Vergleich von  $L_{AS,max}$  und  $L_{AE,t10}$  zwischen Messung und Simulation von allen berücksichtigten Flugereignissen. Im Mittel unterschätzte die Simulation die Messung, mit einem  $\Delta L_{AE,t10}$  von  $-0.5 \pm 1.1$  dB und einem  $\Delta L_{AS,max}$  von  $-0.8 \pm 1.2$  dB (siehe Tabelle 3).



**Abbildung 5:** Vergleich der Simulation mit den Messungen am Flughafen Schiphol für den  $L_{AE,t10}$  als Scatterplot (links) und den  $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$  als Boxplot (rechts).

Für eine detailliertere Untersuchung wurden die mittleren Differenzen zwischen Berechnung und Messung für jedes Emissionsmodell einzeln berechnet (siehe Tabelle 3). Bei diesen Werten muss beachtet werden, dass von allen hier berücksichtigten Typen mit Ausnahme der B737 und der E190 nur sehr wenige Einzelanflüge zur Verfügung standen, was die Aussagekraft der einzelnen Werte stark verringert.

**Tabelle 3: Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AS,max}$  und  $\Delta L_{AE,t10}$  (Berechnung minus Messung) am Flughafen Siphof für die verschiedenen sonAIR Emissionsmodelle.**

sonAIR Emissionsmodell	N	Differenzen [dB]	Max.	Min.	Mittelwert	SD
A319_CFM56-5B	2	$\Delta L_{AE,t10}$	0.9	0.9	0.9	0.0
		$\Delta L_{AS,max}$	0.9	0.7	0.8	0.2
A321_CFM56-5B	2	$\Delta L_{AE,t10}$	1.1	0.57	0.8	0.4
		$\Delta L_{AS,max}$	0.9	0.3	0.6	0.5
A32X_V2500	3	$\Delta L_{AE,t10}$	3.1	1.7	2.6	0.7
		$\Delta L_{AS,max}$	3.2	1.8	2.6	0.7
A388_GP7270	1	$\Delta L_{AE,t10}$	2.5	2.5	2.5	0
		$\Delta L_{AS,max}$	3.0	3.0	3.0	0
B737_CFM56-3	9	$\Delta L_{AE,t10}$	0.6	-1.4	-0.5	0.6
		$\Delta L_{AS,max}$	-0.0	-1.8	-1.0	0.5
B737_CFM56-7B	46	$\Delta L_{AE,t10}$	0.2	-2.5	-0.8	0.7
		$\Delta L_{AS,max}$	0.3	-2.9	-1.0	0.7
B763_PW4060	1	$\Delta L_{AE,t10}$	0.9	0.9	0.9	0
		$\Delta L_{AS,max}$	0.7	0.7	0.7	0
E190_CF34-10E	10	$\Delta L_{AE,t10}$	2.2	-2.4	-0.9	1.3
		$\Delta L_{AS,max}$	1.6	-3.3	-1.5	1.3
<b>Gesamthaft</b>	<b>74</b>	$\Delta L_{AE,t10}$	<b>3.1</b>	<b>-2.5</b>	<b>-0.5</b>	<b>1.1</b>
		$\Delta L_{AS,max}$	<b>3.2</b>	<b>-3.3</b>	<b>-0.8</b>	<b>1.2</b>

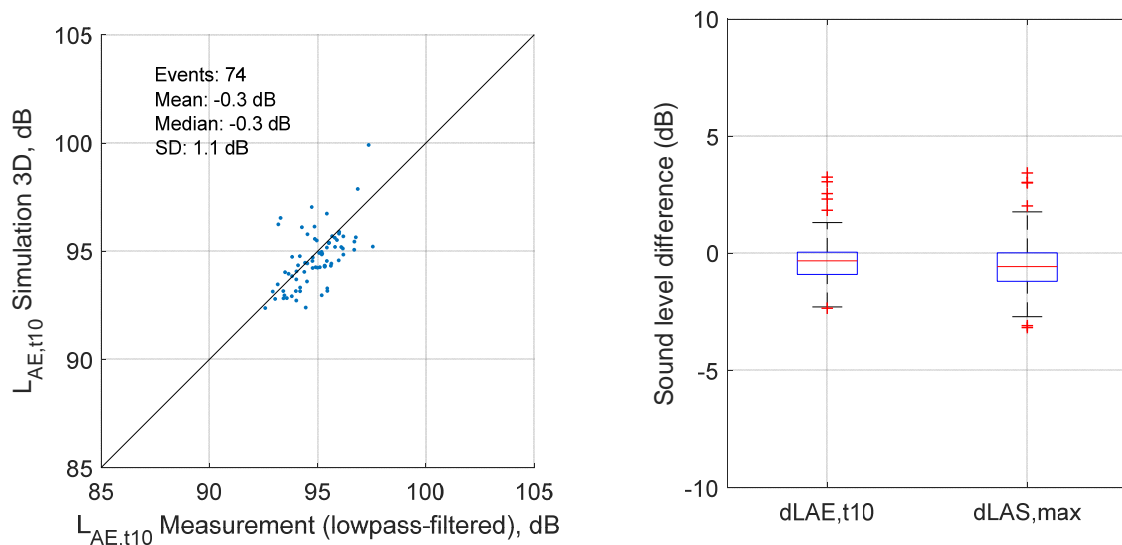
### 3.4.1. Einfluss des sonAIR Frequenzbereichs

sonAIR berücksichtigt bei der Immissionsberechnung nur die Terzbänder von 25 – 5000 Hz [2]. Im Normalfall ist dieser Frequenzbereich ausreichend, da höhere Frequenzen bei den im operationellen Kontext typischerweise verwendeten Quellen-Empfänger-Abständen durch die Atmosphäre stark absorbiert werden. Bei den hier gegebenen sehr niedrigen Überflughöhen von 60 – 70 Metern enthielten die Messungen jedoch noch signifikante Energieanteile im Frequenzbereich über 5 kHz, welche von sonAIR nicht abgebildet werden. Dies führte zu einer systematischen Unterschätzung des simulierten Maximalpegels. Zur Quantifizierung dieses Effektes wurden die Messungen mit einem Tiefpassfilter mit einer Cutoff-Frequenz von 5610 Hz (Obergrenze des 5 kHz-Terzbandes) gefiltert und anschliessend mit den ungefilterten Messungen verglichen. Dabei ergab sich durch die Filterung im Schnitt über alle Messungen eine Reduktion des Maximalpegels von 0.4 dB und eine Reduktion des  $L_{AE,t10}$  von 0.2 dB.

Mit den tiefpassgefilterten Messwerten wurde ein erneuter Vergleich mit den sonAIR-Simulationen durchgeführt. Tabelle 4 sowie Abbildung 6 zeigen die entsprechenden Resultate. Im Durchschnitt werden die tiefpassgefilterten Messungen immer noch unterschätzt, die Abweichung von  $-0.3 \pm 1.1$  dB für den  $L_{AE,t10}$  ist nun aber nur noch sehr klein. Es ist allerdings zu beachten, dass die zwei am häufigsten vorkommenden Flugzeugtypen mit  $-0.6 \pm 0.8$  dB (B737\_CFM56-7B) resp.  $-0.8 \pm 1.3$  dB (E190\_CF34-10E) deutlich höhere Abweichungen aufweisen.

**Tabelle 4: Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AS,max}$  und  $\Delta L_{AE,t10}$  (Berechnung minus tiefpassgefilterte Messung) am Flughafen Schiphol für die verschiedenen sonAIR Emissionsmodelle.**

sonAIR Emissionsmodell	N	Differenzen [dB]	Max.	Min.	Mittelwert	SD
A319_CFM56-5B	2	$\Delta L_{AE,t10}$	1.3	1.3	1.3	0.0
		$\Delta L_{AS,max}$	1.5	1.1	1.3	0.3
A321_CFM56-5B	2	$\Delta L_{AE,t10}$	1.3	0.7	1.0	0.4
		$\Delta L_{AS,max}$	1.1	0.5	0.8	0.4
A32X_V2500	3	$\Delta L_{AE,t10}$	3.2	1.8	2.7	0.8
		$\Delta L_{AS,max}$	3.4	2.0	2.8	0.7
A388_GP7270	1	$\Delta L_{AE,t10}$	2.5	2.5	2.5	0.0
		$\Delta L_{AS,max}$	3.0	3.0	3.0	0
B737_CFM56-3	9	$\Delta L_{AE,t10}$	0.9	-1.0	-0.1	0.6
		$\Delta L_{AS,max}$	0.5	-1.3	-0.4	0.5
B737_CFM56-7B	46	$\Delta L_{AE,t10}$	0.5	-2.3	-0.6	0.8
		$\Delta L_{AS,max}$	0.7	-2.7	-0.6	0.7
B763_PW4060	1	$\Delta L_{AE,t10}$	1.0	1.0	1.0	0.0
		$\Delta L_{AS,max}$	0.9	0.9	0.9	0
E190_CF34-10E	10	$\Delta L_{AE,t10}$	2.3	-2.3	-0.8	1.3
		$\Delta L_{AS,max}$	1.8	-3.2	-1.4	1.4
<b>Gesamthaft</b>	<b>74</b>	$\Delta L_{AE,t10}$	<b>3.2</b>	<b>-2.3</b>	<b>-0.3</b>	<b>1.1</b>
		$\Delta L_{AS,max}$	<b>3.4</b>	<b>-3.2</b>	<b>-0.4</b>	<b>1.2</b>



**Abbildung 6: Vergleich der Simulation mit den tiefpassgefilterten Messungen am Flughafen Schiphol für den  $L_{AE,t10}$  als Scatterplot (links) und für den  $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$  als Boxplot (rechts).**

### 3.5. Untersuchung der Unterschätzung in der Simulation

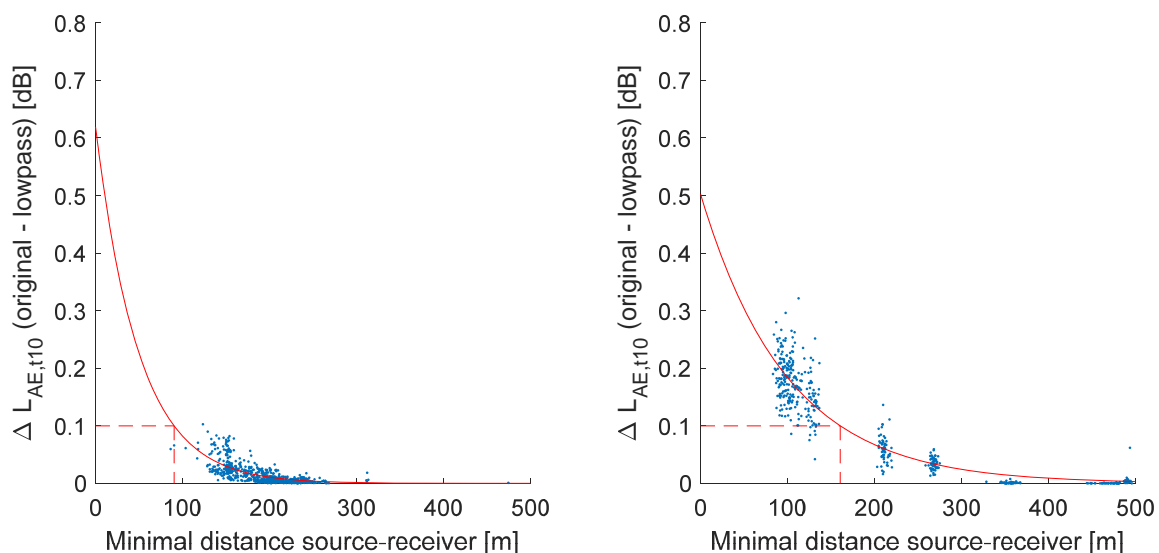
In Kapitel 3.4.1 wurde die leichte systematische Unterschätzung der simulierten Maximalpegel in den Schiphol-Daten beschrieben. Als Teilursache dieser Unterschätzung wurden Energieanteile oberhalb des 5 kHz Frequenzbandes identifiziert, welche aufgrund der sehr tiefen Überflughöhe noch in den Messdaten enthalten waren, von sonAIR jedoch nicht simuliert werden können. Um diesen Umstand allgemein zu quantifizieren und um zu entscheiden, ob allenfalls eine Modellkor-

rektur für hohe Frequenzanteile nötig ist, wurde eine separate, vom Flughafen Schiphol unabhängige Untersuchung durchgeführt.

### 3.5.1. Messdaten und Methodik

Der gesamte für die sonAIR Modellgenerierung aufgezeichnete Datensatz an Fluglärmmessungen wurde reanalysiert. Es handelt sich dabei um 2'600 Einzelmessungen im Nahbereich und 11'000 Messungen im Fernbereich des Flughafen Zürich aus den Jahren 2013 und 2014 [6].

Sämtliche Messsignale wurden tiefpassgefiltert mit einer Cutoff-Frequenz von 5610 Hz. Für jedes Messereignis wurde danach die Differenz zwischen ungefilterten und gefilterten Pegeln berechnet (sowohl für den  $L_{AS,max}$  als auch für  $L_{AE,t10}$ ) und als Funktion der minimalen Quellen-Empfänger-Distanz als Scatterplot dargestellt, unterteilt nach Flugzeugtyp und Prozedur. In diese Punktwolken wurden anschliessend Exponentialfunktionen eingepasst, welche den mittleren Zusammenhang zwischen Distanz und Differenz zwischen gefilterten und ungefilterten Messpegeln beschreiben (siehe Beispiel in Abbildung 7). Mittels dieser Exponentialkurven konnte pro Flugzeugtyp und Prozedur diejenige Quellen-Empfänger-Distanz ermittelt werden, bei welcher die Energieanteile oberhalb des 5 kHz-Bandes noch 0.1 dB, 0.2 dB resp. 0.3 dB des Gesamtpegels ausmachen. Durch Anwendung der so ermittelten Distanzen auf die pro Piste, Flugzeugtyp und Prozedur gemittelten Flugpfade konnten schlussendlich Zonen ermittelt werden, innerhalb derer hochfrequente Pegelanteile noch einen signifikanten Einfluss auf Messungen haben und innerhalb derer sonAIR folglich leicht unterschätzte Pegel erzeugt (siehe Abbildung 8).



**Abbildung 7:**  $L_{AS,max}$ -Differenz zwischen ungefilterten und tiefpassgefilterten Messungen mit eingepasster Exponentialfunktion und abgelesener Distanz für  $dL_{AE,t10} = 0.1$  dB am Beispiel des A333 für Starts (links) und Landungen (rechts).

### 3.5.2. Resultate und Schlussfolgerung

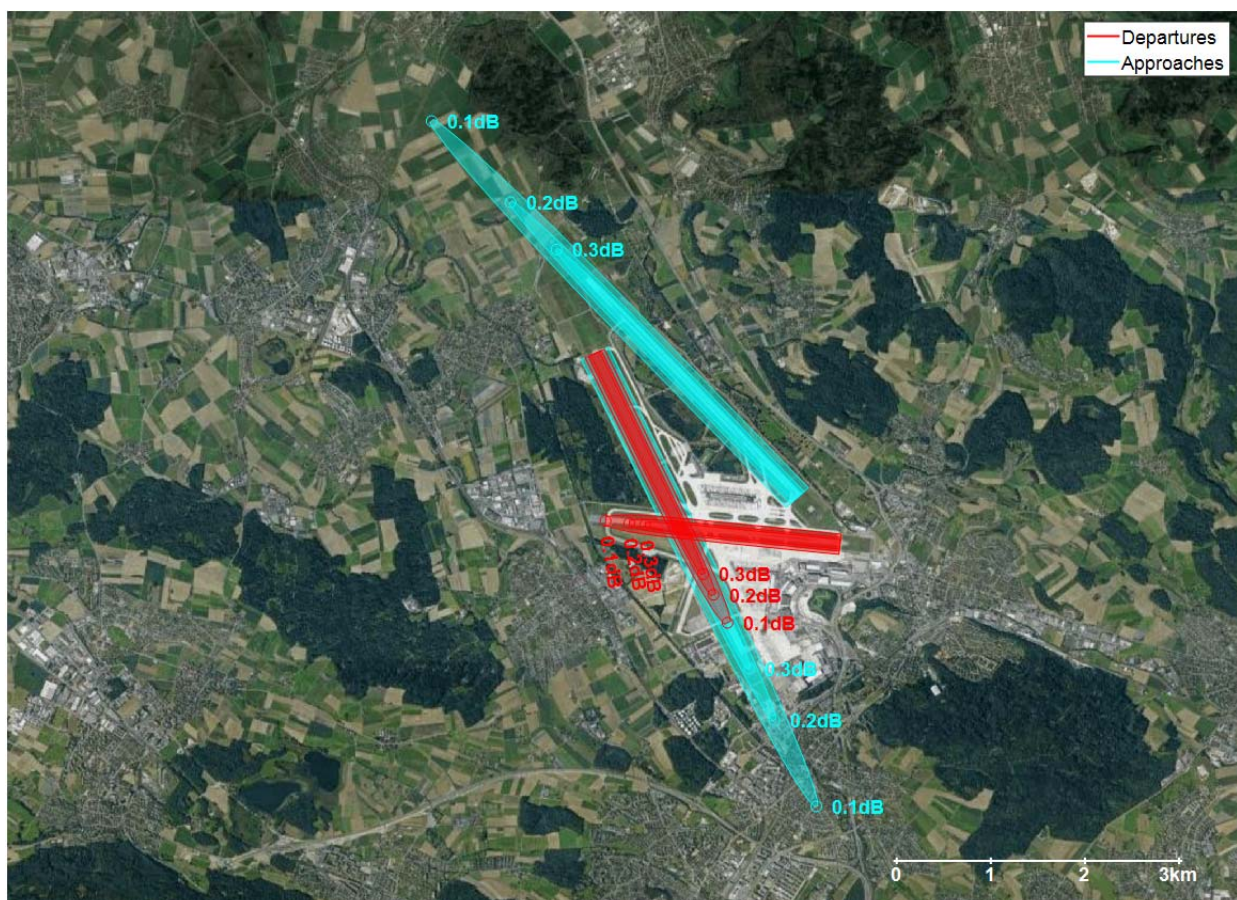
Für jeden Flugzeugtyp wurden die Zonen mit Energieanteilen über dem 5 kHz Band individuell berechnet. Bei den grösseren Flugzeugtypen erstrecken sich diese Einflusszonen tendenziell über et-



was grössere Distanzen als bei kleineren Typen. Daneben zeigen ältere Modelle etwas grössere Einflussbereiche als neuere Typen.

Bei den Starts beschränken sich die Zonen mit hochfrequenten Energieanteilen bei allen Typen auf Gebiete innerhalb des Flughafenareals. Bei Landungen erstreckt sich die 0.1 dB-Zone bei grossen und schweren Flugzeugtypen bis in eine Distanz von maximal 3 Kilometer vom Flughafengelände. Wird die Analyse über sämtliche in sonAIR enthaltenen Typen gemittelt, zeigt sich bei den Landungen eine maximale Einflussdistanz vom Flughafengelände von ca. 2 Kilometern. Wenn man nur Differenzen von 0.3 dB oder höher berücksichtigt, beschränkt sich der Einflussbereich auch bei den Landungen auf die Ausdehnung des Flughafengeländes (siehe Abbildung 8).

Die hier beschriebene Analyse zeigt, dass die bei der Validierung der Schiphol-Messdaten entdeckte leichte Unterschätzung der Maximalpegel aufgrund von hochfrequenten Schallanteilen nur in unmittelbarer Flughafennähe eine Rolle spielt. Direkt unterhalb der Flugbahn kann bei Landungen je nach Flugzeugtyp bis maximal 3 Kilometer vom Pistenende weg eine Unterschätzung der Simulation von 0.1 dB erwartet werden, allerdings ist diese nur sehr klein und bereits mit wenig seitlichem Versatz von der Flugbahn nicht mehr nachweisbar. Insgesamt kann dieser Effekt für operationelle Fluglärmsimulationen daher vernachlässigt werden, eine Modellkorrektur für hochfrequente Energieanteile ist nicht nötig.



**Abbildung 8:** Gebiete um den Flughafen Zürich, in welchen Energieanteile über 5610 Hz den gemessenen LAE,t10 um 0.1 dB, 0.2 dB und 0.3 dB erhöht, separat dargestellt für Landungen in blau und Starts in rot. (Luftaufnahme ©2018 Google)

## 4. Messungen in grossen Abständen zum Flughafen Zürich

### 4.1. Messlayout

Im Fernbereich des Flughafens Zürich wurden vier Empa-eigene mobile Lärmmonitoring-Stationen installiert. Die Positionierung erfolgte so, dass Anflüge auf Piste 34 in unterschiedlichen Distanzen zur Landung möglichst senkrecht unterhalb der Anflugtrajektorien gemessen werden konnten. Zwei Stationen (12&13) wurden so platziert, dass sie zusätzlich auch Anflüge auf Piste 28 erfassen konnten. Die Abstände zwischen Messpunkt und Landepunkt betrugen zwischen 13 km und 53 km. Die Messungen wurden vom 26.09.2017 – 12.10.2017 täglich zwischen 6 und 23 Uhr durchgeführt.

Gemessen wurde mit omnidirektionalen Freifeld-Mikrofonen von NTi (M2230-WP) der Klasse 1 nach IEC 61672. Sie bieten einen Dynamikbereich von 16 - 139 dB(A) und einen Frequenzbereich von 5 Hz – 20 kHz. Die wetterfesten Mikrofone wurden auf Metallmasten, welche entweder an einem Stativ oder an einem Anhänger vom Flughafen Zürich befestigt waren, in einer Höhe zwischen 6 und 10 Metern über Boden installiert. Die genaue Position der Messstationen kann der Tabelle 5 entnommen werden.

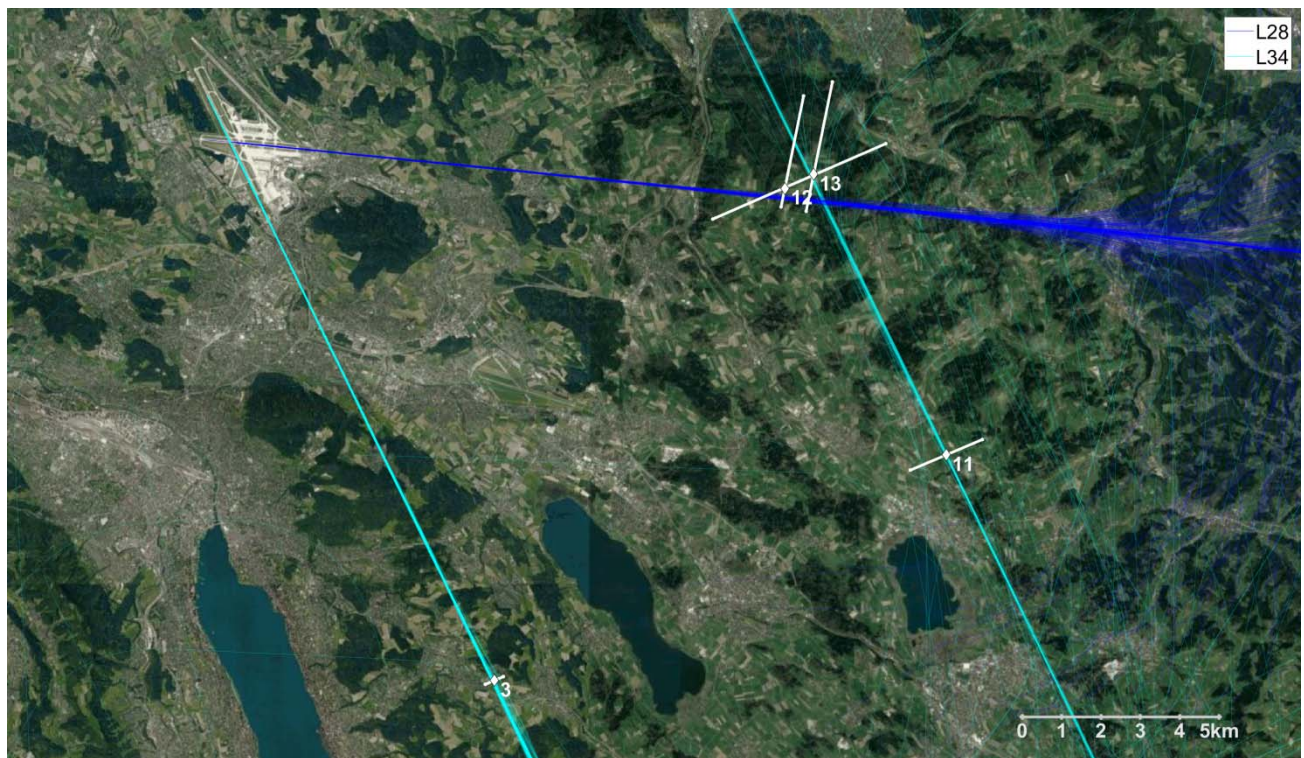
**Tabelle 5: Bezeichnung und Position der Messstationen im Fernbereich des Flughafens Zürich**

Nr	Bezeichnung	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe abs. [m]	Höhe rel. [m]	Kampagne	Distanz bis Touchdown [km]
3	Zumikon	690566.2	242749.2	713.6	10	L34FB	15
11	Sibenbuechen	701948.1	248930.7	673.5	6	L34FB	44
12	Ettenhausen	697733.5	255940.7	672.8	6	L34FB/L28	53 (L34) / 13 (L28)
13	Reservoir Kyburg	698458.0	256326.0	665.1	6	L34FB/L28	53 (L34) / 13 (L28)

### 4.2. Aufbereitung der Messdaten

Für jeden Messpunkt wurde eine Ebene definiert, mittels derer Hilfe relevante Flüge ausgewählt wurden (Abbildung 9). Durch Abgleich von Radardaten der Flugbahnen mit diesen Ebenen erstellte die Flughafen Zürich AG Bewegungslisten [D] mit allen Flügen welche während dem Messzeitraum eine der Ebenen durchfliegen. Basierend auf diesen Bewegungslisten wurden aus den kontinuierlich aufgezeichneten Audiosignalen einzelne Ereignisse mit einer Länge von 120 Sekunden (Durchstosszeitpunkt  $\pm$  60s) ausgeschnitten. Diese Ereignisse wurden mit Informationen aus den Bewegungslisten verknüpft (Flugnummer, Typ, Piste, Route, Aufsetzzeitpunkt sowie Koordinaten des Durchstosspunktes) und einzeln abgelegt. Zusätzlich zu den flugspezifischen Informationen wurden die Ereignisse mit Wetterinformationen von Messstationen der MeteoSchweiz verknüpft. Dazu wurden für jede Lärmmessstation möglichst nahe gelegene Wetterstationen ausgewählt, welche sowohl Windgeschwindigkeit als auch Niederschlag aufzeichnen. Die Überflugereignisse wurden dann mit der jeweils zeitlich nächstliegenden Wettermessung der entsprechenden Station verknüpft.



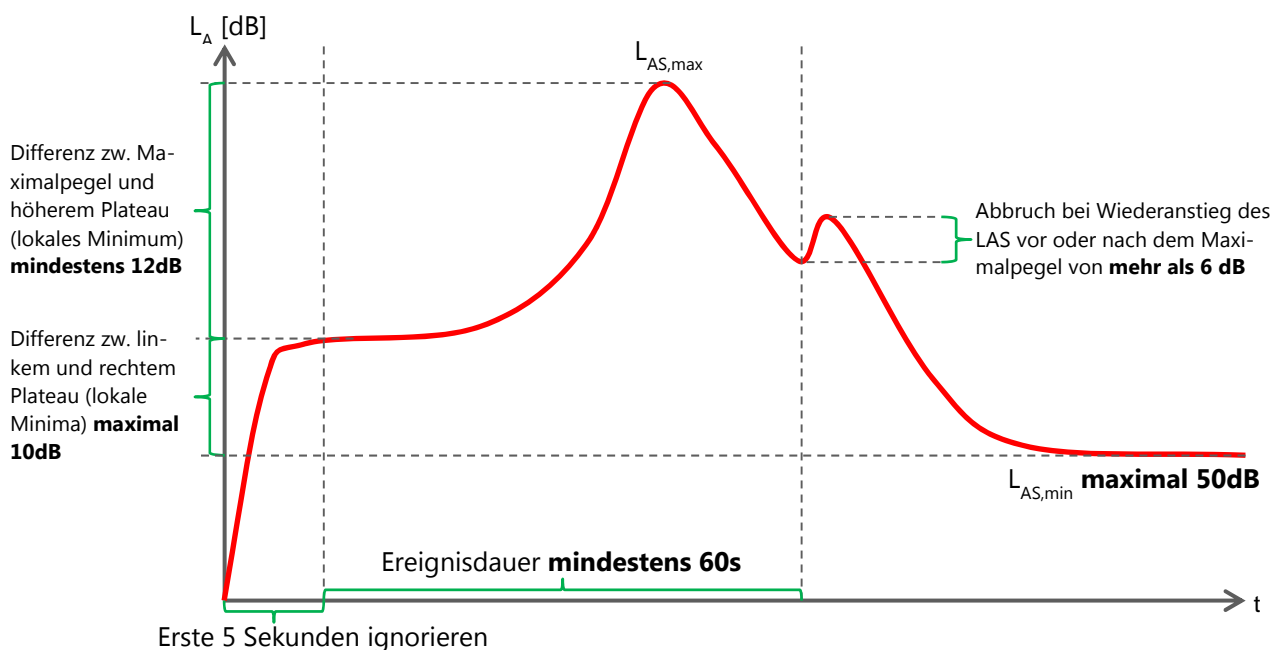


**Abbildung 9: Position der Messpunkte mit Durchstossebenen und berücksichtigten Flugspuren (Luftaufnahme ©2018 Google)**

Die ausgeschnittenen und mit Zusatzinformationen aufbereiteten Messereignisse wurden vor der Simulation in einem mehrstufigen Verfahren bereinigt, um mit Störereignissen kontaminierte Messungen möglichst vollständig auszuschliessen:

1. Automatisierte Meteo-Bereinigung: Um Störgeräusche, welche am Mikrofon durch Regen und Wind erzeugt werden, aus der Analyse auszuschliessen, wurden einzelne Ereignisse gemäss Daten von Wetterstationen aussortiert. Dabei durfte die höchste Windgeschwindigkeit aller berücksichtigten Wetterstationen zum Zeitpunkt des Überflugeignisses maximal 4 m/s betragen (Windkriterium). Die aufaddierte Niederschlagsmenge aller berücksichtigten Wetterstationen über einen Zeitraum von 30 Minuten vor dem Überflugeignis musste 0 mm betragen (Niederschlagskriterium).
2. Weitere Störereignisse, welche zu einem kurzzeitigen Pegelanstieg von mehr als 6 dB im LAS-Verlauf führten, wurden automatisch aussortiert (Abbildung 10). Zusätzlich wurden weitere Kriterien in Abbildung 7 definiert, wie eine Minstdauer des Ereignisses, ein Mindestabstand des Ereignisses vom Hintergrundpegel und einen maximal zulässigen Hintergrundpegel.





**Abbildung 10: Kriterien zur automatischen Identifikation von Störereignissen.**

3. In einem letzten Schritt wurden die Spektrogramme der automatisiert bereinigten Ereignisse visuell überprüft zur Identifikation von Störgeräuschen, welche sich mit dem Ereignis überlagerten und daher von der automatischen Störgeräuschidentifikation nicht erkannt wurden. Im Zweifelsfall wurde das Audiosignal zusätzlich angehört.

### 4.3. Eingabedaten für die Simulation

Die bereinigten Ereignisse wurden nach Anflügen von Flugzeugen der Swiss International Air Lines (Swiss) auf Pisten 28 und 34 gefiltert. Daraus wurden für die Simulation pro Flugzeugtyp und Route zufällig maximal 100 Ereignisse ausgewählt, für welche bei der Swiss FDR-Daten [F] bezogen wurden (Flugparameter siehe Anhang 11.1). Diese wurden auf Inkonsistenzen, insbesondere im räumlichen Verlauf der Trajektorien, überprüft. Ereignisse mit fehlerhaften Daten wurden von der Analyse ausgeschlossen. Die Flugparameter der berücksichtigten Ereignisse wurden von einer zeitlichen Auflösung von 2 Sekunden auf 0.5 Sekunden interpoliert, damit der Maximalpegel bei der Einzelflugsimulation nicht aufgrund der geringen Auflösung der Flugbahn unterschätzt wird.

Die Dämpfungen wurden mit sonX Version 2.8.8 berechnet. Neben den interpolierten Flugparametern kamen folgende Inputdaten zum Einsatz:

- Geländemodell (DTM) mit 25 Meter Auflösung
- Bodenbedeckung aus Vector25 Primärflächen, Gitterauflösung von 5 m
- COSMO-Wetterprofile für 1x1 km-Gebiete pro Messpunkt (für Messpunkte 12 & 13 wurde dasselbe Profil verwendet)

Die Einzelflugsimulation erfolge mit dem wissenschaftlichen sonAIR-Simulationstool Version 7 mit Emissionsmodellen der Version 1.1-0013 (Details in Kapitel 2).

## 4.4. Ergebnisse

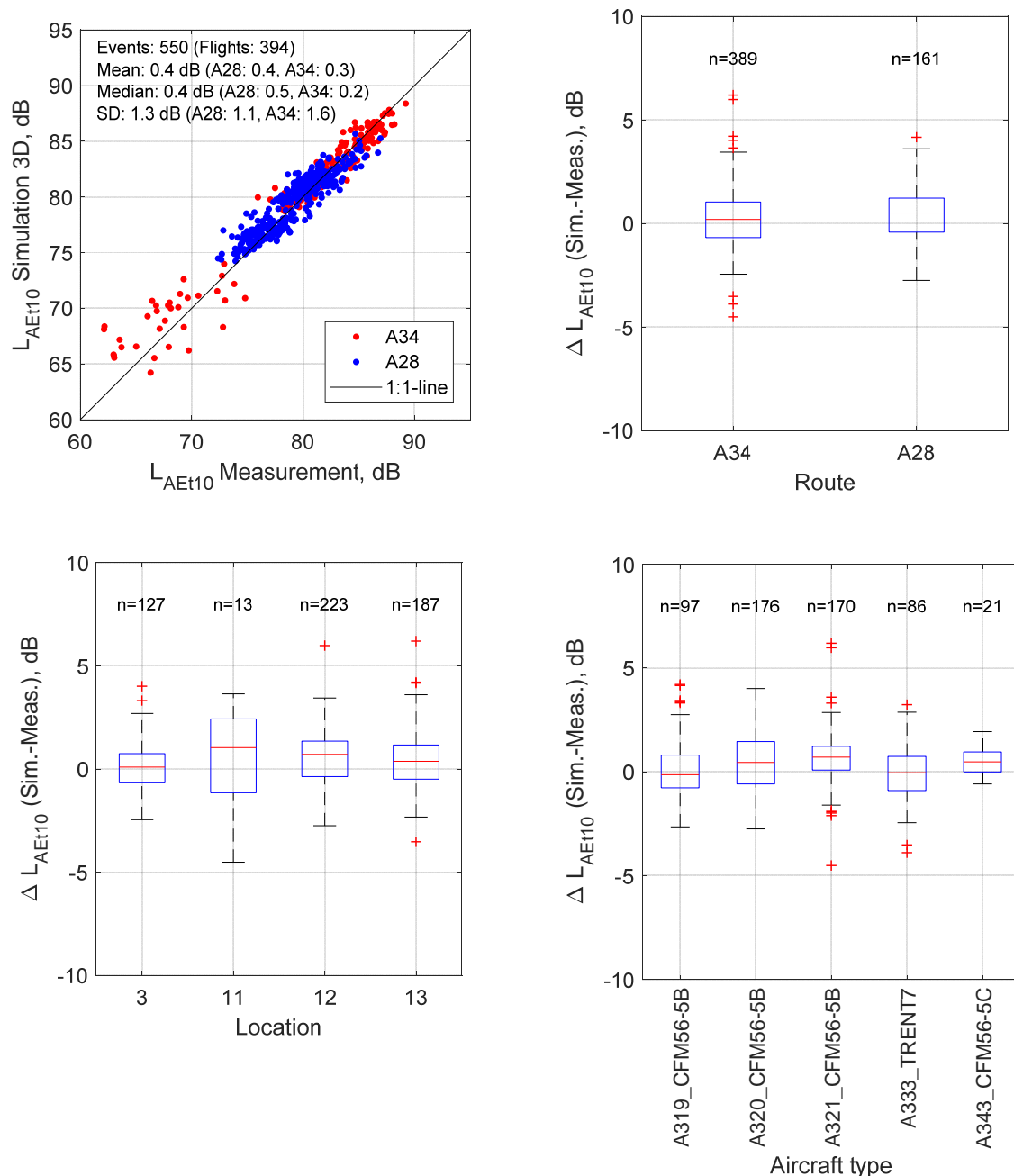
Insgesamt wurden 550 Messereignisse aus 394 Anflügen simuliert.

### 4.4.1. Vergleich Simulation (3D, METEO) vs. Messungen

Abbildung 11 vergleicht die Berechnungen mit 3D-Modellen im METEO-Modus mit den Messungen. Die Messwerte wurden über den gesamten Pegelbereich gut reproduziert. Im Mittel zeigt sich eine leichte Überschätzung der Messungen, mit einem  $\Delta L_{AE,t10}$  von  $0.4 \pm 1.3$  dB. Im Bereich tieferer Pegel bzw. grösserer Ausbreitungsdistanzen ist eine leicht erhöhte Streuung zu beobachten. Dies kann mit dem erhöhten Einfluss der Hintergrundgeräusche auf den  $L_{AE,t10}$  bei tiefen Ereignispegeln und einer grösseren Unsicherheit bei der Ausbreitungsrechnung erklärt werden. Eine weitere Unsicherheiten stammt daher, dass die Emissionsmodelle Pegel ausserhalb ihres bekannten Parameterbereichs schätzen müssen, wobei die Modelle nicht extrapoliert wurden sondern eingeschränkt auf ihren Wertebereich waren (restrict=1, s. Kap. 2.4).

Im nach Messpunkt aufgeteilten Boxplot (Abbildung 11 unten links) zeigt der Messpunkt 11 eine wesentlich höhere Streuung als die anderen Messstationen. Dies liegt hauptsächlich an der kleinen Anzahl von 13 brauchbaren Messungen an diesem Standort und den grossen Überflughöhen. An den Messpunkten 12 und 13 sind grosse Überflughöhen von Anflügen auf Piste 34 mit Anflügen auf Piste 28 vermischt. Bei einer Analyse nach Flugzeugtyp (Abbildung 11, unten rechts) zeigt der A319 und der A333 eine leichte Unterschätzung der Messungen, während alle anderen Typen eine leichte Überschätzung aufweisen. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen sind jedoch klein.

Beim Maximalpegel (nicht abgebildet) zeigt sich insgesamt ein sehr ähnliches Bild, allerdings liegen die Mittelwerte überall um ca. 0.4 dB tiefer, was insgesamt zu einer leichten Unterschätzung der Messungen um -0.1 dB bei einer Standardabweichung von 1.5 dB führt (siehe Tabelle 6).

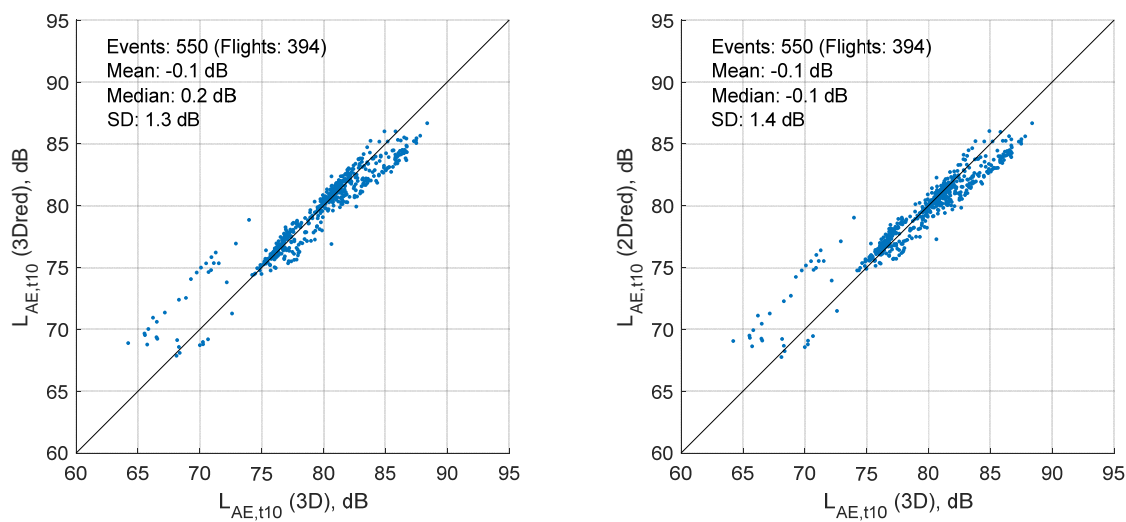


**Abbildung 11:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen im Fernbereich des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Route (Scatter- und Boxplot oben), Messpunkt (Boxplot unten links) und Flugzeugtyp (Boxplot unten rechts).

#### 4.4.2. Vergleich 3D vs. 3Dred und 3D vs. 2Dred

Abbildung 12 vergleicht die Simulationsergebnisse unter Verwendung der 3D-, 3Dred- und 2D-Emissionsmodelle für den  $L_{AE,t10}$ . Der  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein sehr ähnliches Bild. Es zeigen sich deutliche Abweichungen zwischen dem 3D-Modell und den reduzierten Modellen, insbesondere in den tieferen Pegelbereichen. Dies lässt sich durch die fehlende Konfiguration der Flugzeuge (Fahrwerk, Klappen) in den reduzierten Modellen erklären. Die hier untersuchten Messstellen liegen

in einem Bereich, in welchem die Klappen und das Fahrwerk ausgefahren werden, was einen grossen Einfluss auf den Lärmpegel hat. Diese Pegelsprünge können mit den 3D-Modellen dank genauen Informationen über Ausfahrzeitpunkt und –stufe der Klappen und des Fahrwerkes nachgebildet werden. In den reduzierten Modellen fehlen solche genauen Inputdaten, was zu den Abweichungen zwischen den Modellen führt. Diese Abweichungen zeigen sich vor allem in einer erhöhten Streuung, im Mittel unterscheiden sich die drei Emissionsmodelle jedoch kaum (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7).



**Abbildung 12:** Vergleich 3Dred vs. 3D (links) und 2Dred vs. 3D (rechts) im Fernbereich des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,t10}$ .

**Tabelle 6:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3Dred–3D und 2Dred–3D, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

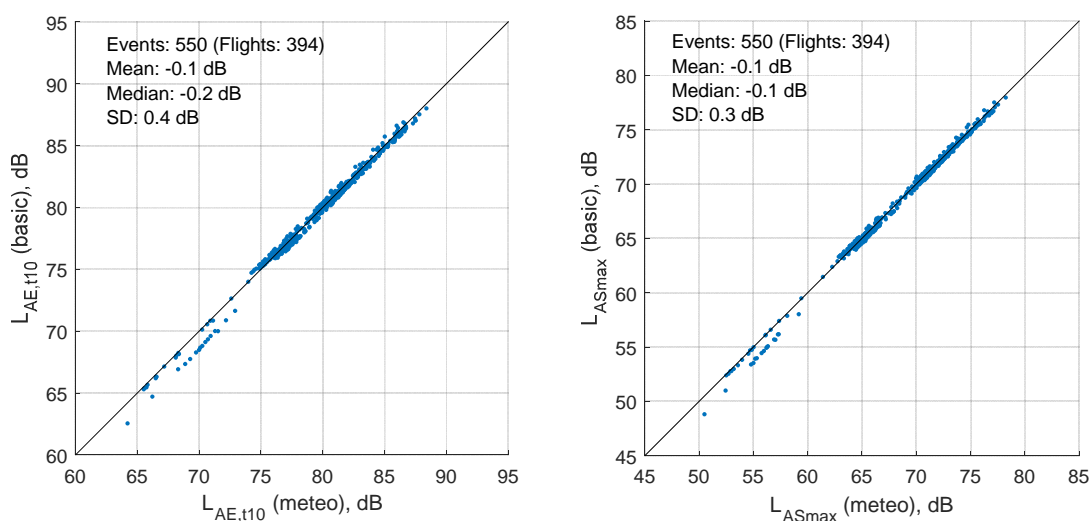
Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
3Dred–3D	$\Delta L_{AE,t10}$	4.9	-3.7	-0.1	1.3	0.33
	$\Delta L_{AS,max}$	5.0	-3.9	-0.1	1.3	0.04
2Dred–3D	$\Delta L_{AE,t10}$	5.1	-3.3	-0.1	1.4	0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	5.2	-3.6	-0.2	1.4	<0.01

**Tabelle 7:** Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3D-Messung, 3Dred-Messung und 2Dred-Messung (METEO-Modus) für alle Typen mit FDR-Daten inkl. Anzahl simulierter Ereignisse N im Fernbereich des Flughafens Zürich.

Typ	Proc.	N	3D		3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
A319_CFM56-5B	L	97	0.1 ( $\pm 1.4$ )	-0.3 ( $\pm 1.5$ )	-0.1 ( $\pm 1.6$ )	-0.4 ( $\pm 1.5$ )	-0.1 ( $\pm 1.6$ )	-0.5 ( $\pm 1.6$ )
A320_CFM56-5B	L	176	0.5 ( $\pm 1.3$ )	0.1 ( $\pm 1.6$ )	0.5 ( $\pm 2.0$ )	0.1 ( $\pm 2.2$ )	0.5 ( $\pm 2.0$ )	0.1 ( $\pm 2.2$ )
A321_CFM56-5B	L	170	0.6 ( $\pm 1.2$ )	0.2 ( $\pm 1.3$ )	0.6 ( $\pm 1.5$ )	0.1 ( $\pm 1.7$ )	0.5 ( $\pm 1.5$ )	-0.1 ( $\pm 1.6$ )
A333_TRENT7	L	86	-0.1 ( $\pm 1.3$ )	-0.7 ( $\pm 1.5$ )	-0.4 ( $\pm 2.7$ )	-1.1 ( $\pm 2.5$ )	-0.4 ( $\pm 2.9$ )	-1.1 ( $\pm 2.6$ )
A343_CFM56-5C	L	21	0.5 ( $\pm 0.6$ )	-0.1 ( $\pm 0.7$ )	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.8 ( $\pm 1.9$ )	0.0 ( $\pm 1.8$ )	-0.7 ( $\pm 1.8$ )
Gesamt	L	550	0.4 ( $\pm 1.3$ )	-0.1 ( $\pm 1.5$ )	0.3 ( $\pm 2.0$ )	-0.2 ( $\pm 2.0$ )	0.2 ( $\pm 2.0$ )	-0.3 ( $\pm 2.0$ )

#### 4.4.3. Vergleich BASIC vs. METEO

Abbildung 13 zeigt den Vergleich der Simulationen mit dem 3D-Modell im METEO-Modus und im BASIC-Modus. Die Unterschiede zwischen den zwei Modi sind sowohl für den  $L_{AE,t10}$  als auch für den  $L_{AS,max}$  sehr klein. Die grössten Differenzen zeigen sich bei tiefen Pegeln, wo der METEO-Modus im Mittel höhere Pegel erzeugt als der BASIC-Modus. Im Mittel liefern die beiden Modi jedoch annähernd identische Resultate (siehe Tabelle 8).



**Abbildung 13:** Vergleich der Simulationen mit dem 3D-Modell im METEO-Modus vs. BASIC-Modus im Fernbereich des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,t10}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts).

**Tabelle 8:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche BASIC-METEO, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
BASIC-METEO	$\Delta L_{AE,t10}$	0.7	-1.7	-0.1	0.4	<0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	0.7	-1.7	-0.1	0.3	<0.01

## 5. DLR Messkampagne

Im Rahmen des seit vielen Jahren etablierten wissenschaftlichen Austausches, stellte das Deutsche Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) anonymisierte Flugbahnen, meteorologische Profile und relative Messpunktkoordinaten zur Verfügung [B]. Auf Basis dieser Grundstruktur konnten Simulationen mit sonAIR durchgeführt werden und wurden anschliessend vom Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik am DLR in Göttingen mit den akustischen Messdaten verglichen. Einzelne Beispiele der im Bericht vorgestellten Abbildungen wurden ebenfalls vom DLR erstellt, da es aus rechtlichen Gründen leider nicht möglich war, den Datensatz zu erhalten. Im Folgenden wird die Messkampagne des Abgleichs auf Grundlage des Abschlussberichts für Lärmoptimierte An- und Abflugverfahren des Forschungsverbund Leiser Verkehr [13] dokumentiert.

### 5.1. Messlayout

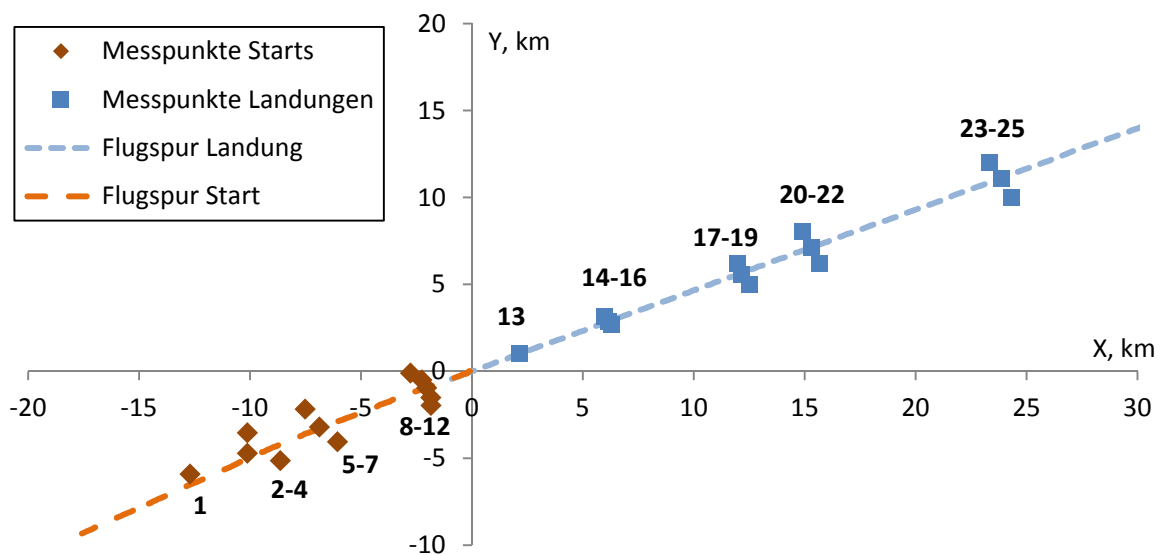
Die Messkampagne des DLR in Parchim besteht aus einem aufwändigen Messlayout mit 12 Messpunkten für Starts mit Distanzen von 2.5 km bis 14 km und 13 Messpunkten für Landungen zwischen 2.4 km und 26 km. Die Koordinaten der Flugbahnen und Messpunkte beziehen sich auf ein relatives Koordinatensystem, dessen Ursprung die Pistenschwelle 24 des Flughafens Parchim ist (Abbildung 14). An jeder der 25 Positionen wurde ein Kondensatormikrofon auf einer Bodenplatte installiert und ein weiteres auf einer Höhe von 1.2 m (wie vorgeschrieben für Lärmzulassungsmessungen).

Für die Messkampagne stellte die Deutsche Lufthansa eine Airbus A319 (Triebwerkstyp CFM56-5A5<sup>1</sup>) mit Besatzung zur Verfügung. Vor den Tankdruckausgleichsöffnungen waren Wirbelgeneratoren installiert, die die Entstehung von Resonanzen in den Hohlräumen verhindern. Das Gewicht des Flugzeugs wurde über die Betankung vor jedem Start auf exakt  $61 \text{ t} \pm 0,1 \text{ t}$  eingestellt.

Die Messungen fanden am 3.10.2006 und am Vormittag des 4.10.2006 statt. Insgesamt wurden neun Platzrunden geflogen, bei denen jeweils unterschiedliche Abflug- und Anflugverfahren durchgeführt wurden. Die Versuchsmatrix mit allen Flugverfahren ist in Tabelle 9 dokumentiert. Zusätzlich zu den akustischen Daten wurden Flugbetriebsdaten der A319 und meteorologische Daten am Boden mit einem Wettermast als auch bis auf 1 km Höhe mit einer Radiosonde aufgezeichnet.

---

<sup>1</sup> Quelle: Persönliches Gespräch mit Ullrich Isermann vom DLR Göttingen



**Abbildung 14:** Messlayout von Parchim in relativen Koordinaten. Der Ursprung liegt mittig der Pisteschwelle (Piste 24), bei dem das Testflugzeug bei jeder Platzrunde startet und wieder aufsetzt. Die Messpunkte 1-12 werden nur für Starts und Messpunkte 13-25 nur für Landungen verwendet.

## 5.2. Aufbereitung der Messdaten

Die Messdaten wurden beim DLR aufbereitet, auf Qualität geprüft und erst anschliessend mit den Simulationen von sonAIR abgeglichen. Zuvor wurden vom DLR Störereignisse durch manuelles abhören der Audioaufnahmen aussortiert. Für den Abgleich mit sonAIR wurden alle Ereignisse mit dem Status 0 und -1 entfernt. Dies entspricht bei den Starts zwei Aufnahmen von insgesamt 107 und bei Landungen 21 von 117 Aufnahmen. Bei der Mikrofonposition 13 ist während des Projektverlaufs anhand der Maximalpegeldifferenz aufgefallen, dass das Bodenmikrofon mit dem Mikrofon auf 1.2 m vertauscht wurde. Die Zuordnung wurde vom DLR entsprechend für alle Ereignisse korrigiert.

Insgesamt standen damit für den Abgleich zur Simulation je 9 Starts und Landungen zur Verfügung. Tabelle 9 dokumentiert die verschiedenen Flugverfahren, welche mit sonAIR abgeglichen werden konnten. Insgesamt standen dem DLR 200 Aufnahmen an 25 verschiedenen Messpositionen zur Verfügung.

**Tabelle 9: Versuchsablauf der DLR Messkampagne in Parchim. Zu jedem Ereignis sind Tag, Uhrzeit und das geflogene Verfahren dokumentiert.**

Ereignis	D/A	Verfahren	Messtag	Zeit
r01	D	MODATA-FLX-1	1	09:30
r02	A	LDLP-1	1	
r03	D	MODATA-FLX-2	1	10:30
r04	A	LDLP-2	1	
r05	D	ICAOA-FLX-1	1	11:30
r06	A	LCDA-1	1	
r07	D	ICAOA-FLX-2	1	12:30
r08	A	LCDA-2	1	
r09	D	MODATA-TOGA-1	1	13:40
r10	A	SLDLP-1	1	
r11	D	MODATA-TOGA-2	1	14:40
r12	A	SLDLP-2	1	
r13	D	ICAOA-TOGA-1	1	15:40
r14	A	SCDA-1	1	
r15	D	ICAOA-TOGA-2	1	16:40
r16	A	SCDA-2	1	
r17	D	MODATA-FLX-3	2	09:30
r18	A	LDLP-3	2	

### 5.3. Eingabedaten für die Simulation

Für die Simulation wurde das Emissionsmodell A32X\_CFM56-5A gewählt, das auf Messdaten von A319 und A320 mit dem in Parchim verwendeten Triebwerkstyp basiert (siehe [2]). Da die Messpunkte bei der Landung bis zu 26 km vor der Pistenschwelle installiert waren, spielt die Installation der Wirbelgeneratoren am Versuchsflugzeug eine wichtige Rolle. Bei Distanzen grösser als 12 km vor dem Aufsetzen und damit verbundenen höheren Anfluggeschwindigkeiten können aufgrund der Cavity-Töne Pegeldifferenzen von 3 dB oder mehr auftreten [17]. Daher wurde das nach [17] modifizierte Emissionsmodell verwendet, dass die Installation der Wirbelgeneratoren berücksichtigt.

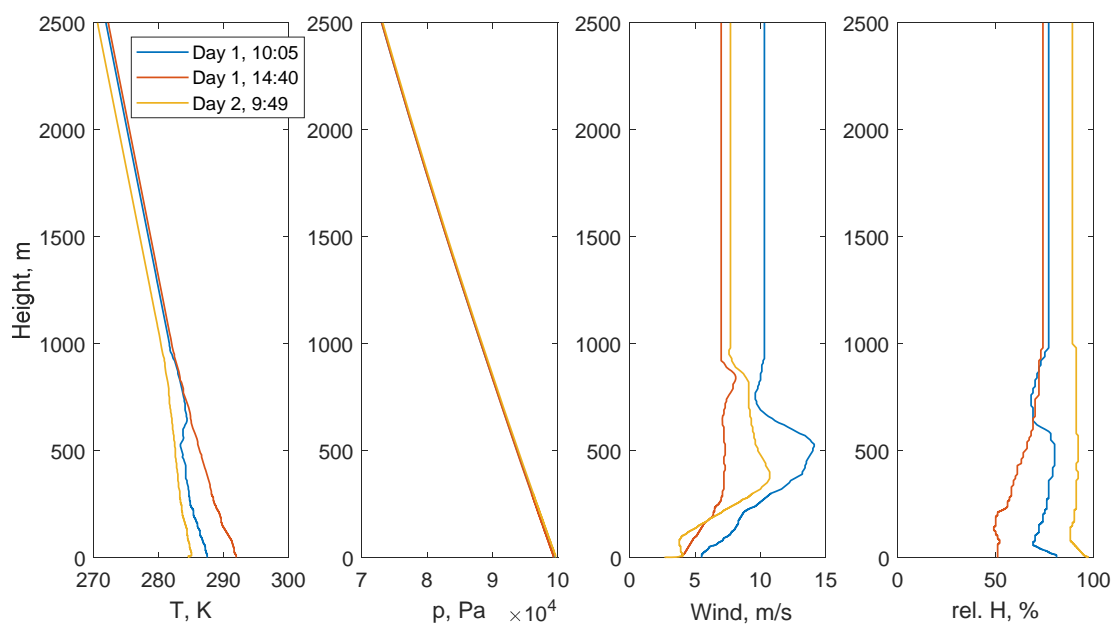
#### 5.3.1. Meteorologische Profile

Als Grundlage für die Ausbreitungsberechnung wurden die meteorologischen Profile aus den Aufstiegen der Radiosonde verwendet. In einem ersten Schritt wurden die etwa alle 2.5 Stunden durchgeführten Messungen auf die Startzeiten der Flugereignisse interpoliert. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Meteoprofile in UTC-Zeit und die Startzeiten in Lokalzeit vorliegen. In einem zweiten Schritt wurden die Profile von 1 km Höhe bis auf 2.5 km extrapoliert, da die Flugbahnen diese Höhen erreichen. Dabei wurden Druck- und Temperaturverlauf auf Basis der internationalen Standardatmosphäre (Temperaturgradienten von -6.5 K/km) erweitert (Abbildung 15). Die Windgeschwindigkeit und die relative Feuchte wurden als konstant angenommen. Die Daten des Wetter-



mastes wurden nicht benötigt und stellten aufgrund des langen Ausfalls am ersten Messtag auch keinen Mehrwert dar.

Die Ausbreitungsberechnung erfolgte mit dem METEO-Modul und berücksichtigt die Änderung der lokalen Schallgeschwindigkeit mit der Höhe sowie die Änderung der atmosphärischen Dämpfung aufgrund der sich ändernden Temperatur und Luftfeuchtigkeit.



**Abbildung 15:** Ausgewählte meteorologische Profile beider Messtage mit Höhenprofilen von Temperatur, Druck, Wind und relativer Feuchte.

### 5.3.2. Geografische Daten

Aufgrund der normierten Koordinaten für alle Messpositionen und Flugbahnen konnte kein reales Gelände bzw. reale Bodenbedeckungsdaten verwendet werden. Bemühungen, die relativen Koordinaten in Gauss-Krüger-Koordinaten im 4. Meridianstreifen darzustellen, waren leider nicht erfolgreich (Messpunkt 25 befand sich beispielsweise in einem See).

Da die Region um den Flugplatz Parchim verhältnismässig flach ist, wurde ein ebenes Gelände mit konstanter Höhe auf Flugplatzniveau verwendet. Die Bodenbedeckung wurde als Grasland mit einem Strömungswiderstand von 300 Rayl angenommen. Letztere Annahme kann zu deutlicher Unterschätzung der Pegel bei Messpunkten in der Nähe von versiegelten Flächen (Strassen, Piste) führen. Auf eine detailliertere Modellierung der verwendeten Bodenplatten bei den Bodenmikrofonen wurde aufgrund deren geringen Grösse verzichtet. Sowohl das Gelände als auch die Bodenbedeckung sind daher eine starke Vereinfachung der realen Messgeometrie, vor allem da die Mikrofonhöhen sehr tief sind. Besonders bei bodennahen Quellen können somit meteorologische Effekte wie Schattenzonen und Geländeabschattungen nicht korrekt berücksichtigt werden (Messpunkte 8 bis 12).

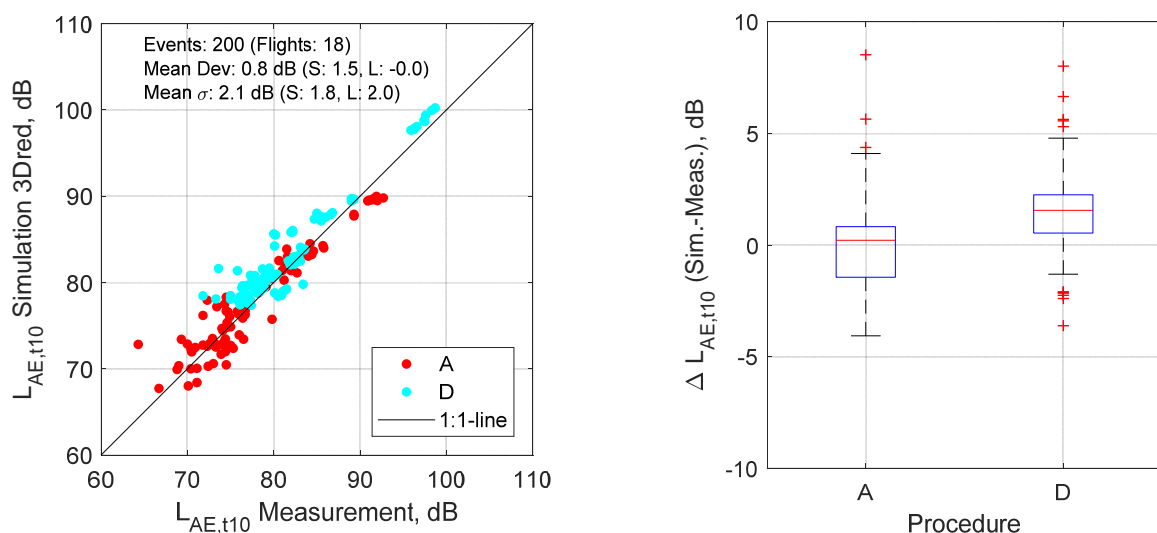
## 5.4. Ergebnisse

Der Vergleich zwischen Messung und Simulation wird hier für die Mikrofonhöhe von 1.2 m gezeigt. Lediglich in den beispielhaften Pegel-Zeit-Verläufen werden auch Ergebnisse der Bodenmikrofone dargestellt. Generell ist die Übereinstimmung zu den Bodenmikrofonen schlechter, was vermutlich auf die fehlende Modellierung der Bodenplatten zurückzuführen ist.

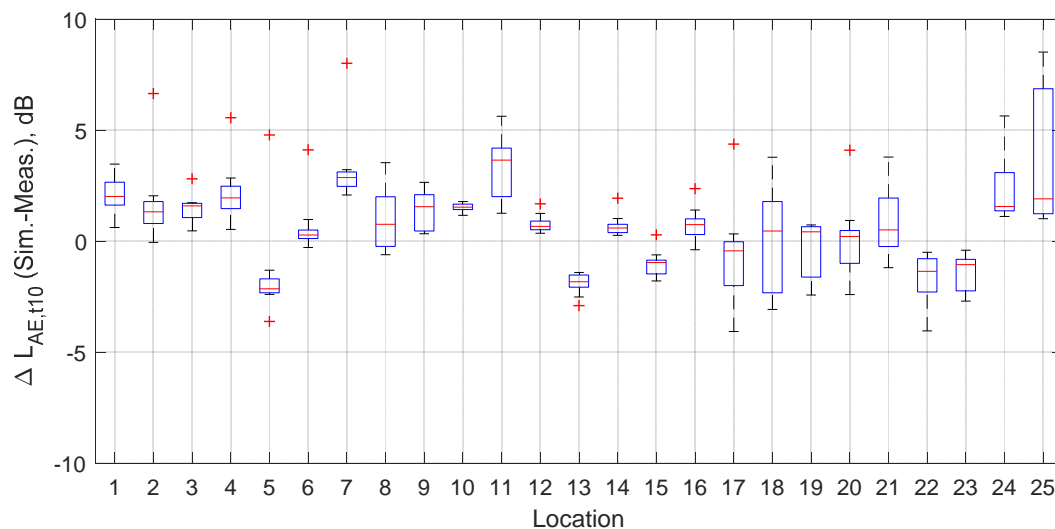
### 5.4.1. Vergleich Simulation (3Dred, METEO) vs. Messungen

Abbildung 16 vergleicht die Berechnungen des 3Dred-Modells im METEO-Modus mit den Messungen. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Der Ereignispegel  $L_{AE,t10}$  wird über alle Ereignisse um 0.8 dB überschätzt, wobei vor allem die Starts zu dieser Überschätzung beitragen (1.5 dB). Die Landungen weisen einen Mittelwert von 0.0 dB auf. Die Standardabweichung beträgt für den  $L_{AE,t10}$  gesamthaft 2.1 dB.

Bei detaillierter Betrachtung der Ergebnisse in einem nach Messpunkt aufgeschlüsselten Box-Whisker-Plot (Abbildung 17), zeigt sich ein recht inhomogenes Bild. Die Messpunkte unter den Abflügen werden durchweg (Ausnahme Messpunkt 5) durch die Simulation überschätzt. Die in einer Reihe liegenden Messpunkte 5 bis 7 zeigen jedoch ein asymmetrisches Verhalten auf, bei dem die Pegel rechts der Flugbahn um 2.1 dB unterschätzt werden während die Pegel links der Flugbahn um 2.9 dB überschätzt werden. Direkt unter den Flugbahnen stimmen die Pegel auf 0.3 dB mit den Messungen überein. Ursache für die Überschätzung an Messpunkt 7 könnte ein Waldstück sein, das in der Realität den Schall dämpft, aber nicht modelliert werden konnte.

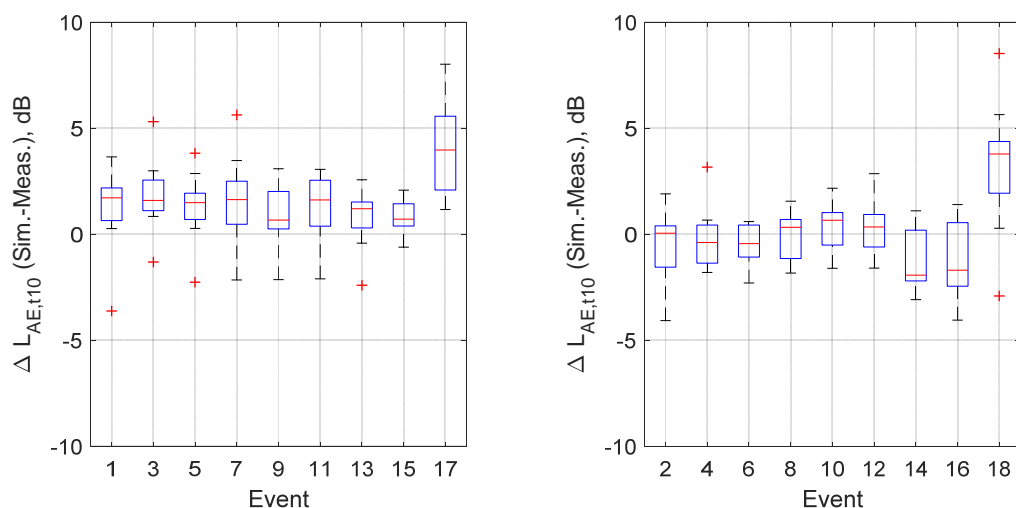


**Abbildung 16:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen am Flughafen Parchim für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.



**Abbildung 17:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen am Flughafen Parchim für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Messpunkt. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

Ein Vergleich der Abweichungen zwischen Simulation und Messung aufgeschlüsselt nach Flugverfahren ist von besonderer Bedeutung, da das Emissionsmodell hier über seine bekannten Flugverfahren hinaus getestet werden kann. Abbildung 18 zeigt die Abweichungen als Boxplot für Abflüge (links) und Anflüge (rechts). Hierbei ergibt sich ein relativ konstantes Bild bei den Abflügen, bei denen der Median bei allen Verfahren um 0.7 dB bis 1.7 dB überschätzt wird. Lediglich Flug 17 weicht mit +4 dB deutlich von den restlichen Verfahren ab.



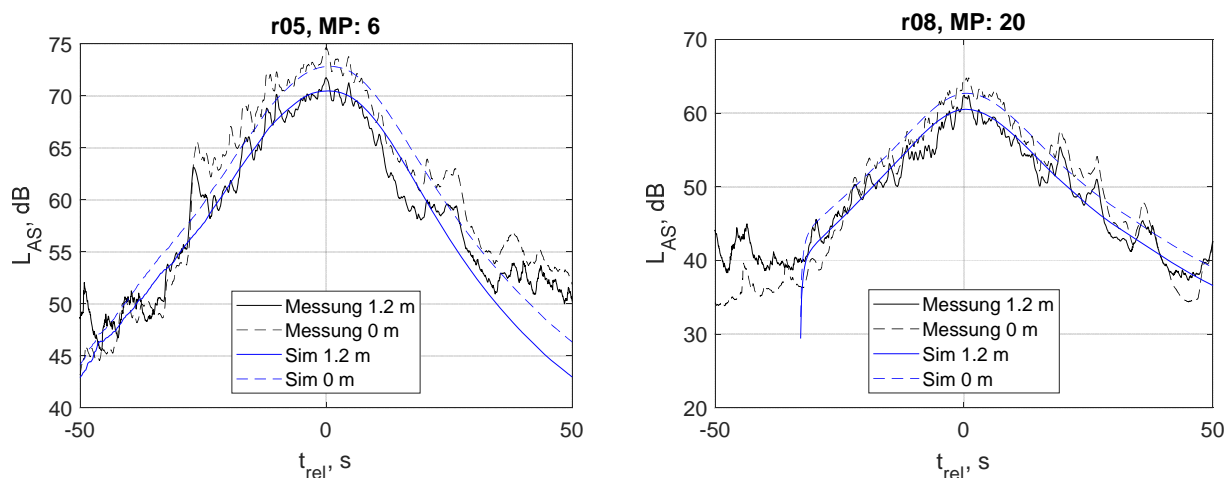
**Abbildung 18:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen am Flughafen Parchim für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Ereignisnummer (siehe Tabelle 9) für Abflüge (links) und Anflüge (rechts). Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

Bei den Anflügen liegen die Mediane für die Flüge 2-12 nahe 0 dB. Die Flugverfahren 14 und 16 werden über alle Messpunkte jedoch um 1.9 dB bzw. 1.7 dB unterschätzt. Bei diesen Flugverfahren (SCDA-1 und -2) können die Emissionen vermutlich nicht korrekt geschätzt werden. Dies liegt unter anderem daran, dass für die A319\_CFM56-5A nur ein reduziertes Modell (3Dred) vorhanden ist, wel-

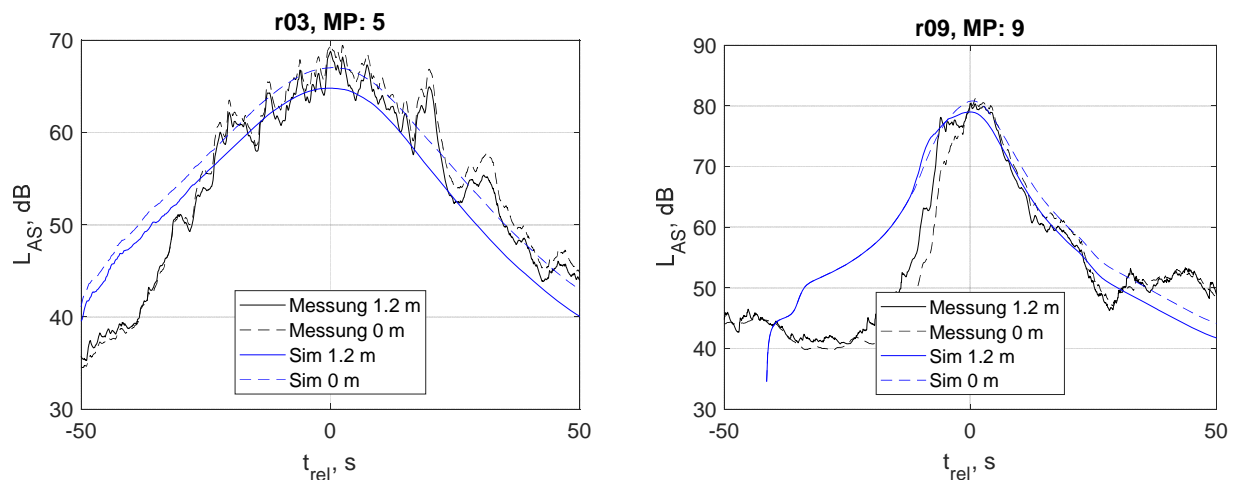
ches Wechsel in der Konfiguration nicht berücksichtigen kann. Im Unterschied zum LDLP Verfahren wird die Konfiguration (Hochauftriebshilfen und Fahrwerke) bei den SCDA-Verfahren bei ungefähr 10 m/s höheren Geschwindigkeiten gesetzt. Zudem wird mit steilem Winkel und ohne ein horizontales Zwischensegment spät auf den Gleitpfad übergegangen.

Die Streuung der Differenzen ist bei diesen beiden Verfahren vergleichsweise höher. Flug 18 weicht ebenfalls deutlich um +3.8 dB ab. Da Flug 17 (MODATA-FLX-3) als auch 18 (LDLP-3) nur Varianten der Flüge vom ersten Messtag sind, wird die Abweichung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vom Emissionsmodell stammen. Es ist wahrscheinlicher, dass die Ausbreitungsbedingungen am Morgen des 2. Messtages nicht abgebildet werden können. Dies wird dadurch unterstützt, dass die Pegel vor allem bei weiter entfernten Messpunkten (2-8 bei Abflügen und 17-25 bei Anflügen) stark von Pegeln mit vergleichsweise ähnlichen geflogenen Verfahren abweichen. Im Anhang 11.6 wurde daher die Auswertung nochmals ohne die Flüge 17 und 18 am vom zweiten Messtag aufgeführt.

Abbildung 19 zeigt zwei exemplarische Pegel-Zeitverläufe mit guter Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Sowohl das Mikrofon am Boden als auch das auf 1.2 m werden über das gesamte Ereignis gut nachgebildet. Bereits bei diesen Beispielen ist auffällig, wie hoch die Variation des gemessenen Pegel-Zeit-Verlaufs ist. Wie gut die Simulation im Einzelfall sogar einzelne Terzbänder inkl. Bodeneffekt nachbilden kann, zeigt Abbildung 53 im Anhang 11.6.



**Abbildung 19:** Beispiel zweier Pegel-Zeit-Verläufe (LAS) mit guter Übereinstimmung an beiden Mikrofonhöhen. Ein Abflug am Messpunkt 6 (links) und ein Anflug am Messpunkt 20 (rechts). Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

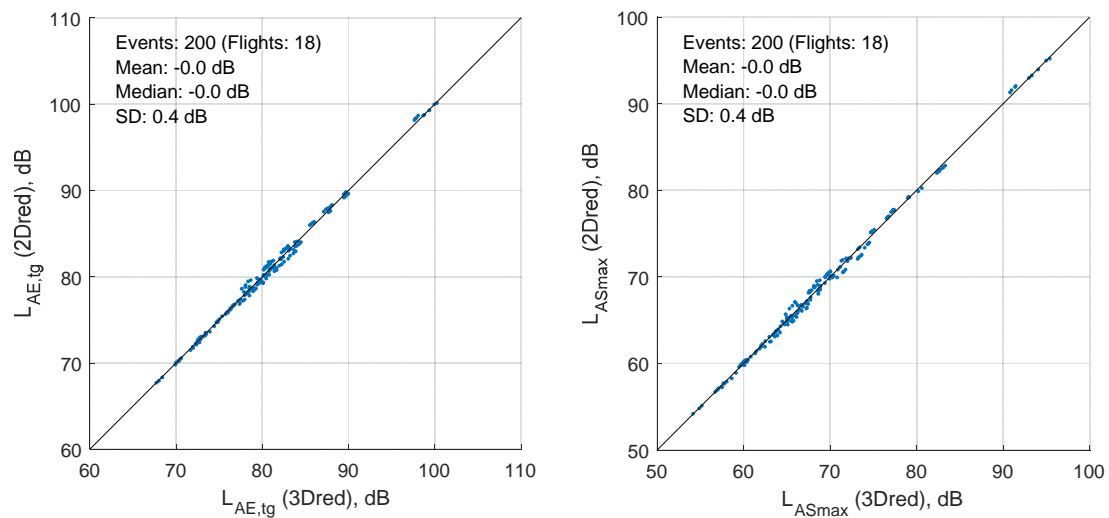


**Abbildung 20:** Beispiel zweier Pegel-Zeit-Verläufe ( $L_{AS}$ ) mit schlechter Übereinstimmung. Messpunkt 5 (links) vom Morgen des ersten Messtags mit hohen Windgeschwindigkeiten zeigt auf, dass der gemessene Pegel-Zeit-Verlauf - trotz einer Zeitkonstante von 1 s - Pegelschwankungen von bis zu 6 dB aufweist. Messpunkt 9 (rechts) zeigt auf, dass ein Ausbreitungseffekt bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde, der offensichtlich die ansteigende Pegelflanke reduziert (vermutlich Hinderniswirkung durch das Gelände). Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

Im Gegensatz zum vorigen Abschnitt zeigt Abbildung 20 (links) zwei Pegel-Zeit-Verläufe mit starker Abweichung zwischen Messung und Simulation. Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten von über 4 m/s am Boden bis zu 14 m/s auf 500 m Höhe (vgl. Abbildung 15) erzeugt die hohe Turbulenz in der Atmosphäre Pegelschwankungen des  $L_{AS}$  von bis zu 6 dB. Der Maximalpegel als auch der Ereignispegel werden in diesem Beispiel deutlich unterschätzt. Abbildung 20 (rechts) zeigt die Unzulänglichkeiten der geografischen Modellierung auf, welche aufgrund fehlender, absoluter Messpunktkoordinaten nicht möglich war. Da beim Start sowohl die Quelle als auch der Empfänger (1.2 m) sehr niedrig sind, kommt es deutlich zu einer Hinderniswirkung während des Pegelanstiegs.

#### 5.4.2. Vergleich 3Dred vs. 2Dred

Abbildung 21 vergleicht die Simulationsergebnisse unter Verwendung der 3Dred- und 2D-Emissionsmodelle für den  $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$  (siehe auch Tabelle 20). Die Unterschiede im  $L_{AE,t10}$  zwischen den 3Dred- und den 2Dred-Modellen sind sehr klein: Der Mittelwert weicht nicht von 0 dB ab (signifikant), die Streuung liegt bei 0.4 dB. Der  $L_{AS,max}$  zeigt ein sehr ähnliches Bild.



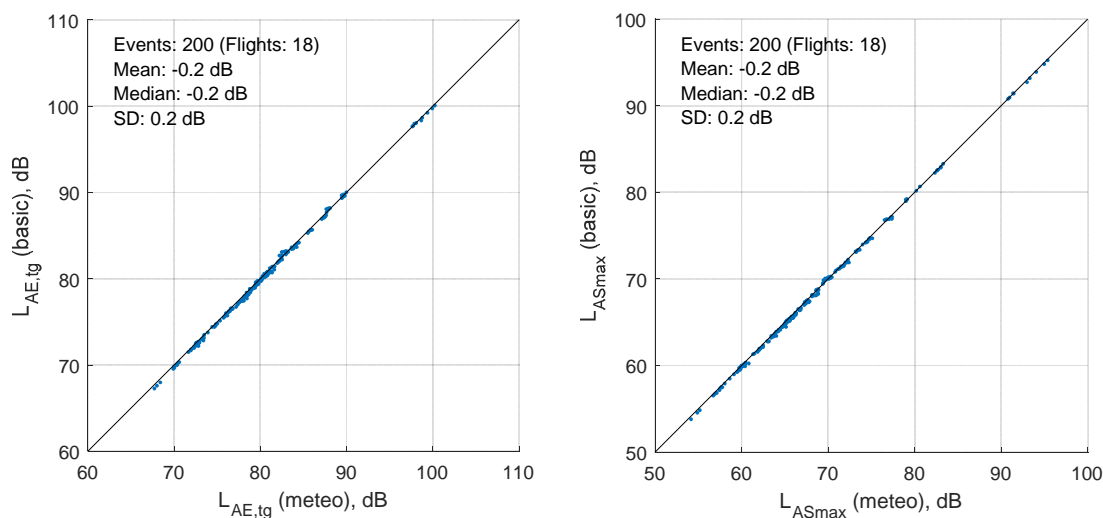
**Abbildung 21:** Vergleich 3Dred vs. 2Dred  $L_{AE,t10}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) für den Datensatz der Messkampagne am Flughafen Parchim. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

**Tabelle 10:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für den Vergleich 2Dred–3Dred, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	<i>p</i>
2Dred–3Dred	$\Delta L_{AE,tg}$	1.1	-0.9	-0.0	0.4	0.8
	$\Delta L_{AS,max}$	1.2	-1.1	-0.0	0.4	0.6

### 5.4.3. Vergleich BASIC vs. METEO

Abbildung 22 zeigt den Vergleich der Simulationen mit dem 3Dred-Modell im METEO- und im BASIC-Modus. Die Unterschiede zwischen den zwei Modi sind vernachlässigbar klein (siehe Tabelle 11). Eine Berechnung im BASIC-Modus würde im Mittel um 0.2 dB geringere Pegel ( $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$ ) führen. Die Streuung ist über den gesamten Pegelbereich mit 0.2 dB sehr klein. Ein Grund für die geringen Unterschiede ist, dass die reale Atmosphäre der zwei Messtage (vgl. Abbildung 15) gut durch die Standardwerte ( $T=16^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1000\text{ hPa}$ ,  $\text{rel.H}=60\%$ ) repräsentiert wird. Ausserdem liegen die Messpunkte alle direkt oder sehr nahe unterhalb der Flugspur, sodass immer mit steilem Schalleinfallswinkel gemessen wurde, was den Einfluss von Wetterphänomenen auf die Schallausbreitung reduzierte.



**Abbildung 22:** Vergleich der Simulationen mit dem 3Dred-Modell im METEO-Modus vs. BASIC-Modus für den  $L_{AE,tg}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) für den Datensatz der Messkampagne am Flughafen Parchim. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

**Tabelle 11:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche BASIC-METEO, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	<i>p</i>
BASIC-METEO	$\Delta L_{AE,tg}$	0.6	-0.7	-0.2	0.2	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	0.4	-0.7	-0.2	0.2	< 0.01

## 6. Noise Monitoring Daten der Flughäfen Zürich und Genf

### 6.1. Messlayout

Die Flughäfen Zürich und Genf betreiben ein Netz von ortsfesten Messstationen, sogenannte Noise Monitoring Terminals (NMT), welche den Lärm rund um die Flughafenareale kontinuierlich messen. Die dazu verwendeten Mikrofone sind auf mehrere Meter langen Masten fest auf Hausdächern in bewohnten Gebieten installiert. Die Lärmmessungen werden automatisch mit Wetterdaten, Radarspuren und den flughafeneigenen Flugplandaten verknüpft, sodass aus dem kontinuierlichen Geräuschsignal einzelne Lärmereignisse identifiziert und automatisch den entsprechenden Flugereignissen zugeordnet werden können. Pro Ereignis speichert das System den Maximalpegel  $L_{AS,max}$ , den äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  sowie den Ereignispegel  $L_{AE,tg}$  über die Zeit TG. Das Messsystem des Flughafens Zürich definiert den Zeitraum TG über eine messpunktspezifische Pegelschwelle. Das Messsystem des Flughafen Genfs verwendet den Hintergrundpegel als dynamische Pegelschwelle, der aus dem Momentanpegel von jeweils 60 s vor und nach einem Ereignis berechnet wird. Hierbei muss der Maximalpegel des Ereignisses einen Abstand vom Hintergrundpegel von mindestens 12 dB ausweisen.

Der Flughafen Zürich betreibt 14 NMTs in Abständen zwischen 1 und 8 Kilometer vom Flughafengelände. Die Messstation 21 wurde nicht berücksichtigt, da der Messstandort für Betriebslärm am Flughafen ausgelegt ist und mit einer anderen Zeitkonstante als alle anderen NMTs arbeitet. Beim Flughafen Genf sind es 4 NMTs mit Abständen zwischen 2 und 4 Kilometern. Die genauen Positionen aller Stationen sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführt.

**Tabelle 12: Bezeichnung und Position der NMTs im Nahbereich des Flughafens Zürich.**

Nr.	Bezeichnung	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe abs. [m]	Höhe rel. [m]	Distanz zum Flughafen [km]
1	Rümlang	2682073	1256678	460.1	9.1	1.0
2	Oberhasli	2680880	1257945	448.5	3.5	2.3
3	Oberglatt	2681910	1259362	446.5	4.5	1.0
4	Hochfelden	2681134	1263826	432.1	8.1	5.3
5	Höri	2679889	1262109	424.0	7.0	4.0
6	Glattbrugg	2685115	1254165	444.1	4.1	1.7
7	Wallisellen	2686825	1252493	477.8	4.8	4.0
8	Furttal	2677776	1255703	457.0	5.0	5.3
9	Kloten-Chasern	2686329	1257266	470.6	3.6	1.1
10	Nürensdorf	2691085	1256344	540.2	4.2	5.8
11	Kloten-Halden	2687068	1256857	465.0	5.8	1.7
12	Gockhausen	2687836	1248619	573.5	6.5	7.8
13	Zürich Mattenhof	2687196	1250588	469.7	8.7	5.8
14	Dübendorf	2688995	1251032	457.1	3.5	6.6



**Tabelle 13: Bezeichnung und Position der NMTs im Nahbereich des Flughafens Genf.**

Nr.	Bezeichnung	Rechts- wert [m]	Hochwert [m]	Höhe abs. [m]	Höhe rel. [m]	Distanz zum Flughafen [km]
5	Satigny	2494595	1118901	443.8	3.5	2.0
9	Valavran	2500086	1124209	434.0	5.0	1.8
10	Genthod	2501044	1124413	423.2	4.0	2.7
11	Versoix	2501625	1126092	421.4	4.0	4.2

## 6.2. Aufbereitung der Messdaten

Die Aufbereitung der Daten wurde in mehreren Schritten durchgeführt, welche unten im Detail beschrieben werden. Als Datengrundlage für den Vergleich wurden NMT-Daten der Flughäfen Zürich [H] und Genf [G], [I] verwendet und gefiltert. Diese Schritte wurden jeweils getrennt für Bewegungen mit FDR-Daten (ausschliesslich Swiss Flugzeuge) und Bewegungen ohne FDR-Daten (explizit keine Swiss Flugzeuge) durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurden die NMT-Daten mittels eines Matlabskripts mit weiteren Angaben aus den Bewegungslisten [7, 8] und Wetterdaten ergänzt. Da die zur Verfügung stehende Anzahl an FDR-Daten begrenzt ist, wird in einem dritten Schritt für jeden Flugzeugtyp eine repräsentative Auswahl an Ereignissen ausgewählt. Auch für Typen ohne FDR-Daten wird dieses Vorgehen angewendet, damit der Rechenaufwand der Ausbreitungsberechnung nicht zu gross wird.

Für die ausgewählten Flugereignisse stellte entweder die Swiss International Airlines FDR-Daten zur Verfügung (Zürich [C] und Genf [E]) oder es wurden Radardaten aus den Jahresbelastungen [7, 8] verwendet. Letztere wurden aus dem bestehenden internen Format an der Empa ausgelesen und mit der Parameterschätzung [12] um Flugparameter ergänzt, die das Emissionsmodell bei der Simulation benötigt.

### 6.2.1. Lärmereignisse und Bewegungslisten

Die Grundlage für den Vergleich bilden die von den Flughäfen aufbereiteten und mit dem Flugplan verknüpften Lärmereignisse für das Jahr 2016 in einer Access-Datenbank. Hierin befinden sich für jeden Messpunkt alle aufgezeichneten Flugereignisse mit den akustischen Kenngrössen  $L_{AS,max}$ ,  $L_{eq}$  und  $L_{AE,tg}$ . Aus dem Flugplan werden Zeitpunkt (zum Aufsetzen/Abheben), Flugzeugtyp, Kennzeichen, Flugnummer, Herkunfts-/Zielort, Prozedur und Piste angegeben. Ausserdem liefern die Flughäfen bzw. Messsysteme spezifische Felder, die in der Aufbereitung individuell berücksichtigt wurden:

#### Flughafen Zürich

- Alle Zeitangaben basieren auf der koordinierten Weltzeit (UTC).
- Es wird jeweils der Ereigniszeitpunkt, die gültige Messschwelle (SF) sowie die Route/SID mitgeliefert.
- Liste wird wie folgt gefiltert: Plausi=1 (als plausibles Ereignis markiert), Wind=No (Windstärke < 10 m/s), Corr=Single (nur ein möglicher Kandidat für Ereignis).

## Flughafen Genf

- Alle Zeitangaben basieren auf lokaler Zeit (UTC+1 im Winter, UTC+2 im Sommer).
- Es wird der jeweilige Ereigniszeitpunkt sowie Start- und Endzeitpunkt des Ereignisses mitgeliefert.
- Das Qualitätsfeld wurde nicht verwendet, da es sich hier vor allem um ein Distanzkriterium zur Messstation handelt.

Für den Vergleich von Typen mit FDR-Daten wurden die Listen ausschliesslich nach Flugzeugen der Swiss gefiltert (über Flugzeugtyp, Flugnummer und Immatrikulation). Da die Swiss immer die gleiche Triebwerksvariante für einen Flugzeugtyp in der Flotte führt, ist diese wie das zu verwendende Emissionsmodell bereits vordefiniert. Für Typen ohne FDR-Daten wurden alle Flugzeuge der Swiss-Flotte explizit aussortiert. Die Triebwerkstypen für jedes Flugereignis sind an dieser Stelle noch unbekannt.

In einem zweiten Aufbereitungsschritt wurden die gefilterten Lärmereignisse in Matlab mit verschiedenen Datenquellen ergänzt. Aus den Wetterdaten der Stationen KLO für Zürich und GVE für Genf wurden die einstündigen Mittelwerte der MeteoSwiss über die UTC-Zeit aus dem Flugplan (Aufsetzen/Abheben) verknüpft. Zusätzlich wurden Typen mit FDR-Daten um das aktuelle Abfluggewicht (ATOM) aus der Bewegungsliste ergänzt. Für Typen ohne FDR-Daten wurde die Triebwerkstypbezeichnung aus der Bewegungsliste ausgelesen und einem Triebwerkstyp zugeordnet, damit jede Kombination aus Flugzeug- und Triebwerkstyp eindeutig einem Emissionsmodell zugeordnet werden kann. Die Zuordnung erfolgte mit der Liste „Typ Engine V3.xlsx“, die zuvor manuell um Einträge aus den Bewegungslisten aus Zürich und Genf des Jahres 2016 ergänzt worden war.

Aufgrund des komplexen Betriebs am Flughafen Zürich wurde ausserdem darauf geachtet, dass mindestens ein relevanter Messpunkt pro Route bei Abflügen bzw. Piste bei Anflügen vorhanden ist. Somit wurde sichergestellt, dass im nächsten Schritt keine Flugbahnen für einen Vergleich gewählt werden, die an keinem relevanten Messpunkt aufgezeichnet wurden. Pro Route wurden hierbei manuell drei bis vier Messpunkte gewählt, die dem Verlauf der Flugspuren folgen und nicht zu weit entfernt sind.

### 6.2.2. Gesteuerte Auswahl zufälliger Ereignisse

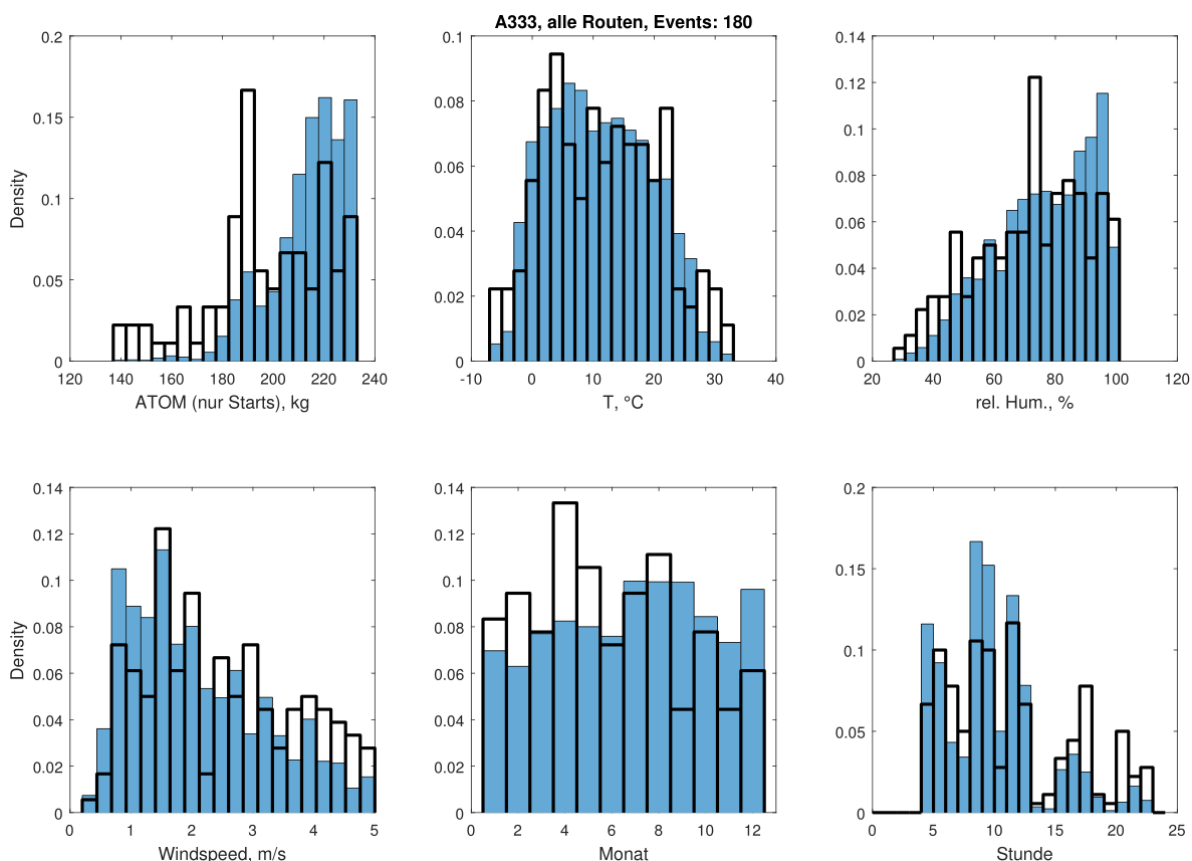
Die im vorigen Kapitel beschriebenen aufbereiteten NMT-Daten wurden auf Basis der ergänzten Wetterdaten um Ereignisse reduziert, bei denen Niederschlag fiel oder eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s überschritten wurde um Störgeräuschen auszuschliessen. Die Reduktion aufgrund der Witterung betraf im Mittel ein Fünftel aller Aufnahmen, wobei Niederschlag zu etwa 14% und Starkwindsituationen (>5m/s) zu 8% vorkamen (Überlappung beider Faktoren kommen vor). Starkwindsituationen sind somit explizit nicht Teil der Validierung, die allerdings im Jahresdurchschnitt unter 10% auftreten und deshalb weitgehend vernachlässigbar sind.

Aus dieser reduzierten Ereignisliste wurden zufällig Ereignisse für jede Kombination von Flugzeug- und Triebwerkstyp gewählt, die mit einem der bestehenden Emissionsmodelle simuliert und verglichen werden können. Da bei einer rein zufälligen Auswahl sehr wahrscheinlich Ereignisse mit den

häufigsten Abfluggewichten und Wetterbedingungen aus der Gesamtverteilung ausgewählt werden, wurde die Auswahl gesteuert. Dabei wurden die Ereignisse als Stichprobe ohne Zurücklegen so gewählt, dass sie den gesamten Wertebereich bestimmter Parameter gleichmässig abdecken.

So wurde z.B. am Flughafen Genf für Starts eines Flugzeugtypen mit FDR-Daten zuerst je 10 Ereignisse pro Pistenrichtung aus dem gesamten ATOM-Wertebereich gewählt. Der Wertebereich wurde dabei in jeweils 20 gleich grosse Sektoren aufgeteilt und aus diesen gewählt. Anschliessend wurden aus den restlichen Ereignissen je 10 Ereignisse pro Piste aus dem gesamten Temperaturbereich und abschliessend aus dem gesamten Bereich der relativen Feuchte ausgewählt. Bei Typen mit FDR-Daten wurden am Flughafen Genf pro Prozedur und Pistenrichtung (05, 23) je bis zu 30 Ereignisse ausgewählt, maximal also 120 Ereignisse.

Bei Typen mit FDR-Daten wurden am Flughafen Zürich pro Abflugroute (E16, F16, I28, K28, N32, N34, O32, O34) bis zu 15 Ereignisse gewählt und pro Anflugrichtung (14, 34, 28) bis zu 30 Ereignisse. Dies ergibt bis zu 210 Ereignisse, sollten alle Routen durch dieses Typ abgedeckt sein. Abbildung 23 zeigt die ursprüngliche Verteilung aller Ereignisse gegenüber den 180 gewählten Ereignissen über alle Routen.



**Abbildung 23:** Verteilungsdichte der ausgewählten Ereignisse (schwarze Balken) der A333\_Trent7 am Flughafen Zürich gegenüber der ursprünglichen Verteilungsdichte über das gesamte Jahr 2016 (blaue Balken). Bei den oberen Parametern wurden gezielt Ereignisse ausgewählt um den gesamten Parameterbereich abzudecken. Die unteren Parameter zeigen auf, dass alle Windgeschwindigkeiten bis 5 m/s, alle Monate und alle Stunden des Tages gut repräsentiert sind.

Es wird deutlich, dass entgegen der häufigeren Beladung von mehr als 180 t viele Ereignisse mit geringem Abfluggewicht von unter 180 t gewählt wurden bzw. bei Randtemperaturen unter 0°C und über 25°C. Dies dient der Validierung des Modells für einen grossen Bereich an meteorologischen Bedingungen bzw. für Starts auch für einen grossen Bereich an Abfluggewichten, d.h. Startschüben und Steigwinkeln. Die Auswahl stellt damit höhere Anforderungen an die Validierung des Simulationsmodells als eine rein normalverteilte Auswahl.

Bei Typen ohne FDR-Daten sind die Angaben über das ATOM nicht vorhanden oder nicht brauchbar [12]. Es wurden daher jeweils 40 Ereignisse pro Prozedur und Piste gewählt, maximal 280 Ereignisse in Zürich und 160 Ereignisse in Genf.

### **6.2.3. Bereinigung der Lärmereignisse**

Je nach Situation (z.B. bei turbulenter Luft oder bei leisen Ereignissen, welche nur knapp die Messschwelle überschreiten) kann es bei den Daten vom Flughafen Zürich vorkommen, dass der Geräuschpegel während eines Überflugs kurzzeitig unter die Messschwelle fällt. Dies führt dazu, dass ein einzelner Überflug in mehrere Lärmereignisse unterteilt wird, was zu Fehlern beim Vergleich mit der Simulation führen kann. Aus diesem Grund wurden sämtliche Events eines einzelnen Überfluges, welche innerhalb von weniger als 60 Sekunden von demselben Messpunkt erfasst wurden, von der Analyse ausgeschlossen. Mehrfachüberflüge, welche korrekterweise mehr als einmal von derselben Messstation erfasst wurden, sind davon nicht betroffen da zwischen den Einzelmessungen typischerweise mehr als 1 Minute liegt und sie so getrennt verglichen werden können. Hierfür wurde die flexible Matlab-Umgebung des WS-Tools entsprechend erweitert, um einen Zeitabgleich der Ereigniszeit und der in Frage kommenden Flugbahnsegmente durchzuführen.

Auch bei einem Durchstart-Manöver kommt es zu Mehrfachmessungen an den Messpunkten. Diese wurden jedoch entweder ganz entfernt oder es wurde nur die eigentliche Landung verwertet. Die Messungen während des Durchstart-Manövers wurden nicht verglichen.

Das automatisierte Verfahren der NMT-Messungen kann Störereignisse wie z.B. eine Autovorbeifahrt nicht zu 100% ausschliessen. Da zum Zeitpunkt der Analyse die Rohdaten der Messungen nicht mehr verfügbar waren, konnten keine genaueren Analysen des LAS-Verlaufs zur Identifikation von Störgeräuschen durchgeführt werden. Eine Untersuchung von Flügen, welche von mehreren Messstationen erfasst wurden, zeigte jedoch, dass Lärmereignisse mit einer sehr kurzen TG-Zeit im Vergleich zu den an den anderen Standorten gemessenen Pegeln mit längeren TG-Zeiten stark aus der Reihe fallen. Es wurde daher angenommen, dass es sich bei Lärmereignissen mit sehr kurzen TG-Zeiten entweder um Störereignisse oder um sonstige Probleme bei der Messung handelt. Für die weitere Analyse wurde daher angenommen dass ein valides Lärmereignis eine TG-Zeit von mindestens 10 Sekunden aufweisen muss, ansonsten wurde es ausgeschlossen.

## 6.3. Eingabedaten für die Simulation

### 6.3.1. Flugzeugtypen

Generell wird bei der Simulation und der Präsentation der Ergebnisse zwischen Typen mit FDR Daten und Typen ohne FDR-Daten unterschieden. Die Typen mit FDR-Daten entsprechen der Swiss-Flotte von 2013 und 2014, als die Emissionsmodelle erstellt wurden (A319, A320, A321, A333, A343). Da der RJ1H mittlerweile durch die BCS1 und BCS3 ausgetauscht wurde, konnte dieser Typ nicht validiert werden.

Aus dem Flugverkehr der Flughäfen Zürich und Genf des Jahres 2016 wurden alle Flugzeugtypen simuliert, zu denen ein Emissionsmodell vorhanden war (siehe Tabelle 1). Dabei wurden auch Flugzeugtypen validiert, die aufgrund fehlender Messdaten nicht in die Modellerstellung eingegangen sind, aber zu einem Emissionsmodell mit gleichem Triebwerkstyp zugeordnet werden können. Zum Beispiel wurde für das Emissionsmodell der CRJ9\_CF34-8C5 zusätzlich die CRJ7 und CRJX validiert, auch wenn für diese keine eigenen Emissionsmodelle existieren. Ausserdem wurden die Emissionsmodelle der Swiss-Flotte auch auf Basis ohne FDR-Daten abermals simuliert. Hierbei wurden ausschliesslich Typen von anderen Airlines ausgewählt und die Drehzahl, wie bei allen anderen Typen, mittels Parametereschätzung aus Radardaten geschätzt.

### 6.3.2. Flugbahnen und Flugparameter

Vor der Simulation der Flüge mit FDR-Daten wurden die von der Swiss gelieferten Cockpitdaten auf Inkonsistenzen, insbesondere im räumlichen Verlauf der Trajektorien, überprüft. Ereignisse mit fehlerhaften Daten wurden von der Analyse ausgeschlossen. Die Flugparameter der berücksichtigten Ereignisse wurden von einer zeitlichen Auflösung von 2 Sekunden auf 0.5 Sekunden interpoliert, um die Auflösung des Pegel-Zeit-Verlaufs während der Simulation zu verbessern.

Für Flüge, welche nicht von der Swiss durchgeführt wurden, waren keine FDR-Daten erhältlich. Stattdessen wurden Flugbahnen aus Radardaten verwendet, die bereits aufbereitet für die Berechnung der Jahresbelastungen [7, 8] vorlagen. Bei der Aufbereitung der Radardaten für die Jahresbelastung mit dem Programm SELFA2 wurden die Flugbahnen bereits bis zur Piste extrapoliert, mit einem B-Spline geglättet und mit einer Auflösung von 1 s abgelegt. Neben der Flugbahn werden auch Geschwindigkeit und Hängewinkel des Flugzeugs gespeichert.

Landungen liegen nach der Verarbeitung in SELFA2 von der Piste beginnend vor. Für die Simulation in sonAIR werden sie daher umgekehrt und beginnen beim Zeitpunkt 0 beim zeitlich ersten Punkt des Anflugs. Alle Winkel (Steigwinkel, Hängewinkel, Bahnazimut) wurden auf dieser Basis berechnet und ebenfalls der Flugbahn angefügt. Die genauen Zeitpunkte aus den Radardaten der Flughäfen gehen bei der Verarbeitung mit SELFA2 verloren. Daher konnten nur relative Zeitvektoren abgelegt werden, die für den Vergleich mit den Messdaten um die Flugplanzeit beim Abheben bzw. Aufsetzen ergänzt wurde. Die Zeit aus dem Flugplan ist allerdings ungenau, da sie von der Flugsicherung manuell eingetragen wird.

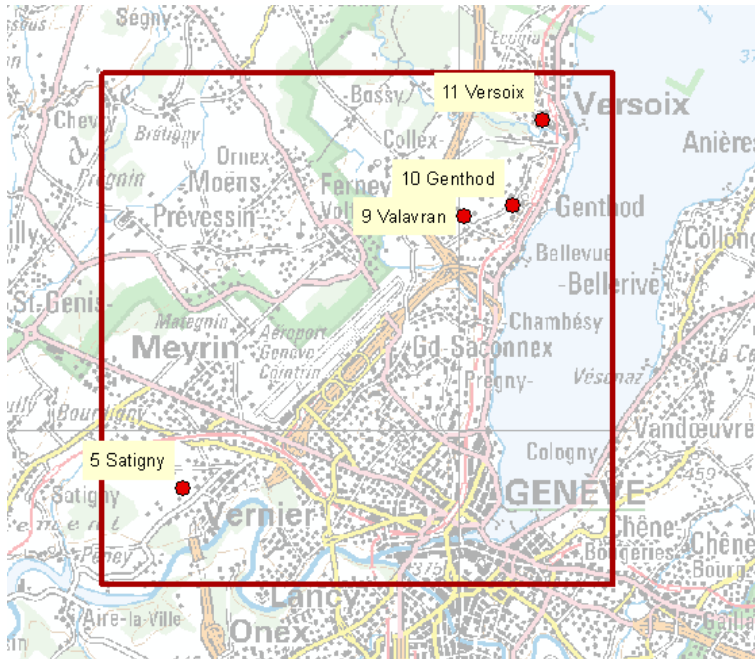
Die durch das BAZL zur Verfügung gestellten Abfluggewichte waren mit Ausnahme bei Flügen der Swiss Airlines nicht verwertbar, da die Angaben offensichtlich meist Standardwerten entsprachen, die die Realität nicht nachbilden. Daher wurde die Abhebegeschwindigkeit als Stellvertreter für das Abfluggewicht bei der Schätzung des  $N1$  verwendet.

Als Meteoinput wurden COSMO1-Wetterprofile verwendet, welche in einer räumlichen Auflösung von 1x1 km vorliegen. Diese ursprünglichen COSMO-Gitterzellen wurden jeweils über 10x10 km grosse Gebiete gemittelt, um den Berechnungsprozess handhabbar zu halten. Die Messstellen des Flughafens Genf sind vollständig in einem solchen Gebiet enthalten (Abbildung 24).

The map shows the following numbered locations:

- 1 Rümlang
- 2 Oberhasli/Oberglatt
- 3 Oberglatt
- 4 Hochfelden
- 5 Hori
- 6 Glattbrugg
- 7 Wallisellen
- 8 Furtal
- 9 Adlikon
- 10 Nürensdorf
- 11 Kloten Halden
- 12 Gockhausen
- 13 Zürich Mattenhof
- 14 Dübendorf

**Abbildung 24:** Messpunkte der NMT-Stationen des Flughafens Zürich, aufgeteilt in zwei 10x10 km Gebiete (Karte ©2017 Swisstopo).



**Abbildung 25:** Messpunkte der NMT-Stationen des Flughafens Genf mit einfassendem 10x10 km Gebiet (Karte ©2017 Swisstopo).

#### 6.3.4. Geografische Daten

Als weitere Inputdaten wurden ein Geländemodell und Bodenbedeckungsdaten verwendet. Die Installation der NMT-Messstellen auf Hausdächern in zum Teil dicht besiedeltem Gebiet machte eine Anpassung dieser Daten notwendig, um die lokalen Gegebenheiten in der Simulation hinreichend genau abbilden zu können. Die Anpassungen erfolgten iterativ in mehreren Schritten:

1. Anwendung des bisherigen Standardansatzes: Gelände aus einem DTM mit 25 Metern Auflösung, Bodenbedeckung aus Vector25-Primärflächendatensatz (siehe auch Kapitel 4.3). Das Problem mit diesem Ansatz ist, dass damit die Mikrofonpositionen auf Hausdächern nicht hinreichend genau abgebildet werden konnten. Da die Simulation so keine Gebäude berücksichtigt, werden bei Verwendung von absoluten Höhenwerten die Messpunkte weit über dem Boden (Mikrofonhöhe + Gebäudehöhe) simuliert, was die berechnete Bodenreflexion stark vermindert.
2. Im Geländedatensatz (DTM) wurden die Gebäude, auf welchen die Messstationen installiert sind, manuell aus einem Oberflächenmodell (DOM) eingefügt, sodass die Gebäude als Geländefeature berücksichtigt werden. Dies ermöglichte die realistischere Berechnung der Dachreflexionen. Um die Gebäude hinreichend genau abbilden zu können, wurde die Auflösung des Geländemodells von 25 auf 2 Meter erhöht.
3. Bei vielen Messstellen befanden sich in unmittelbarer Nähe zum Messgebäude weitere Gebäude, welche die Messung durch Hinderniswirkung beeinflussten. Um diese Effekte in der Simulation zu berücksichtigen, wurde ein vektorieller Gebäudedatensatz in die Simulation miteinbezogen. Die Messgebäude wurden vorher manuell gelöscht, da diese im vorangegangenen Iterationsschritt bereits als Geländefeature integriert wurden.

4. Im Gegensatz zum Freifeld treten in besiedeltem Gebiet viele kleinräumige Änderungen der Bodenbedeckung auf. Diese wurden vom Primärflächendatensatz aus Vector25 nur unzureichend abgebildet. Um den tatsächlich auftretenden kleinräumigen Änderungen Rechnung zu tragen wurden stattdessen Bodenbedeckungsdaten der amtlichen Vermessung (AV) der jeweiligen Kantone verwendet (Zuweisung siehe Anhang 11.1). Da sich das Genfer Untersuchungsgebiet über die Landesgrenze hinaus erstreckte und für französisches Gebiet keine Vermessungsdaten erhältlich waren, wurde der Primärflächendatensatz für den Flughafen Genf zusammengesetzt aus AV-Daten für die Flächen auf Schweizer Boden und Vector25-Daten für Flächen auf französischem Boden.
5. Gebäude werden in sonAIR standardmässig als schallhart definiert. Einige der Messgebäude wiesen jedoch ein bekiestes oder begrüntes Flachdach auf, was die Schallreflexion am Dach reduziert. Um diese Reduktion in der Simulation abbilden zu können, wurde für diese Gebäude die Bodenbedeckungskategorie manuell von *Gebäude* auf *Wiese* geändert. Die Gebäude der folgenden Messstationen wurden geändert: ZRH Messpunkte 2, 4, 8, 9 & 10.
6. Der Messpunkt 5 in Genf befindet sich auf einem niedrigen Garagendach, welches auf drei Seiten von dichtem Baumbewuchs umgeben ist. Die Bäume erreichen oder übersteigen dabei die Mikrofonhöhe. Es ist anzunehmen, dass diese Bäume eine leicht dämpfende Wirkung auf den einfallenden Schall haben. Um dies in der Simulation abzubilden, wurde die Kategorie der entsprechenden Primärfläche von *bestockt* auf *Wald* geändert, sodass die Walddämpfung teilweise berücksichtigt wird. Allerdings weist die ISO-Norm 9613-2 erst ab 10 m Ausbreitungsweg eine zusätzliche Dämpfung aus, weshalb der Wald weiterhin Ursache für die Unterschätzung sein könnte.

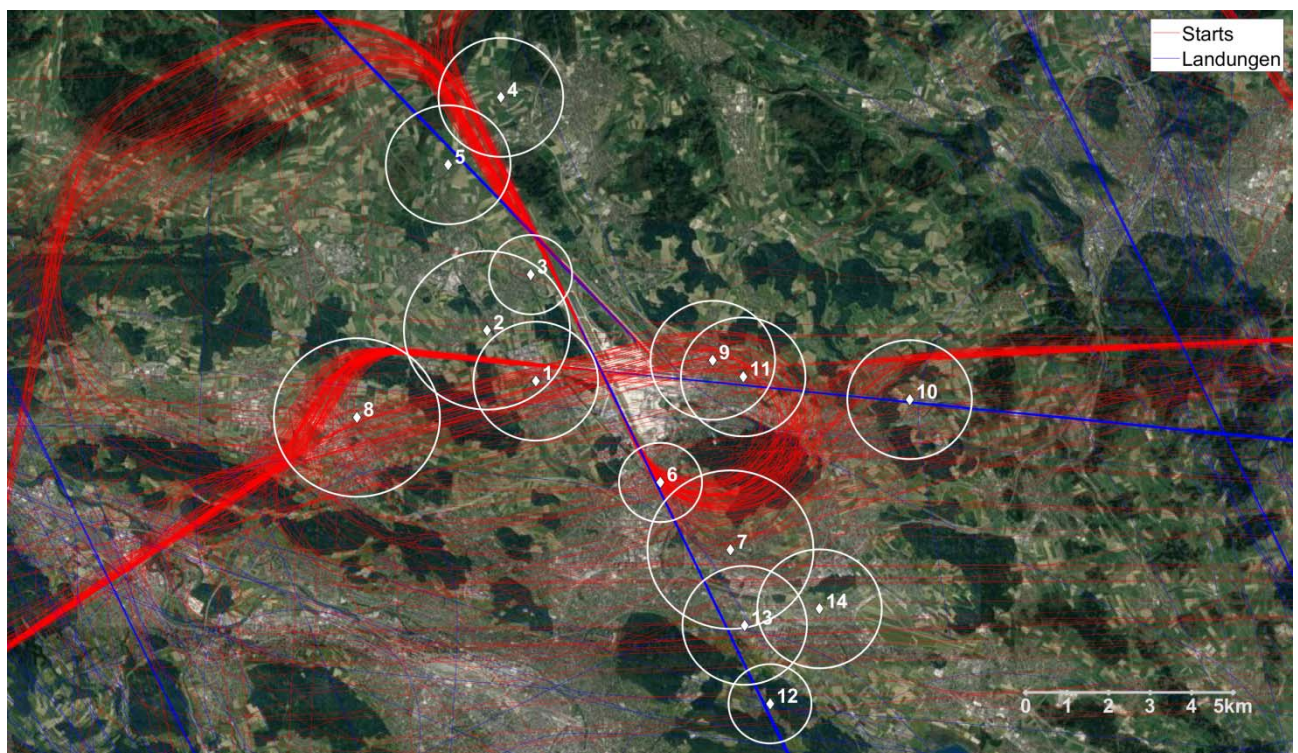
Die in diesem Kapitel beschriebenen Validierungsergebnisse wurden alle mit den so angepassten Inputdaten berechnet. Die erhöhte DTM-Auflösung und das Miteinbeziehen eines vektoriellen Gebäudedatensatzes erhöhte die benötigte Rechenzeit jedoch erheblich, sodass im operationellen Kontext von deren Einsatz abgeraten wird. Um den Effekt der angepassten Inputdaten quantifizieren zu können, wurde zum Vergleich die Berechnung für die Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich mit den Standard-Inputs (DTM25, Primärfläche aus Vector25, kein Gebäudedatensatz) wiederholt. Diese Resultate sind in Anhang 11.4 beschrieben.

Neben der Optimierung der Inputdaten erforderte das Layout der NMT-Messstationen und das Flugroutenregime insbesondere beim Flughafen Zürich auch gewisse Anpassungen im wissenschaftlichen Simulationstool. Diese sind im Folgenden beschrieben.

1. Die Messstationen um Zürich wurden teilweise von demselben Flug mehrfach überflogen. Das wissenschaftliche Simulationstool wurde daher so angepasst, dass mehrfache Überflüge erkannt und getrennt simuliert sowie zu Vergleichszwecken automatisch der richtigen Messung zugeordnet werden.
2. Nahe am Flughafen installierte Messstationen erfassten teilweise auch Lärmereignisse, welche durch Flugzeuge auf der Piste ausgelöst wurden (Beschleunigung am Pistenanfang, Bremsen nach dem Aufsetzen). Da die Emissionsmodelle nicht darauf ausgelegt sind, Rollvorgänge auf der

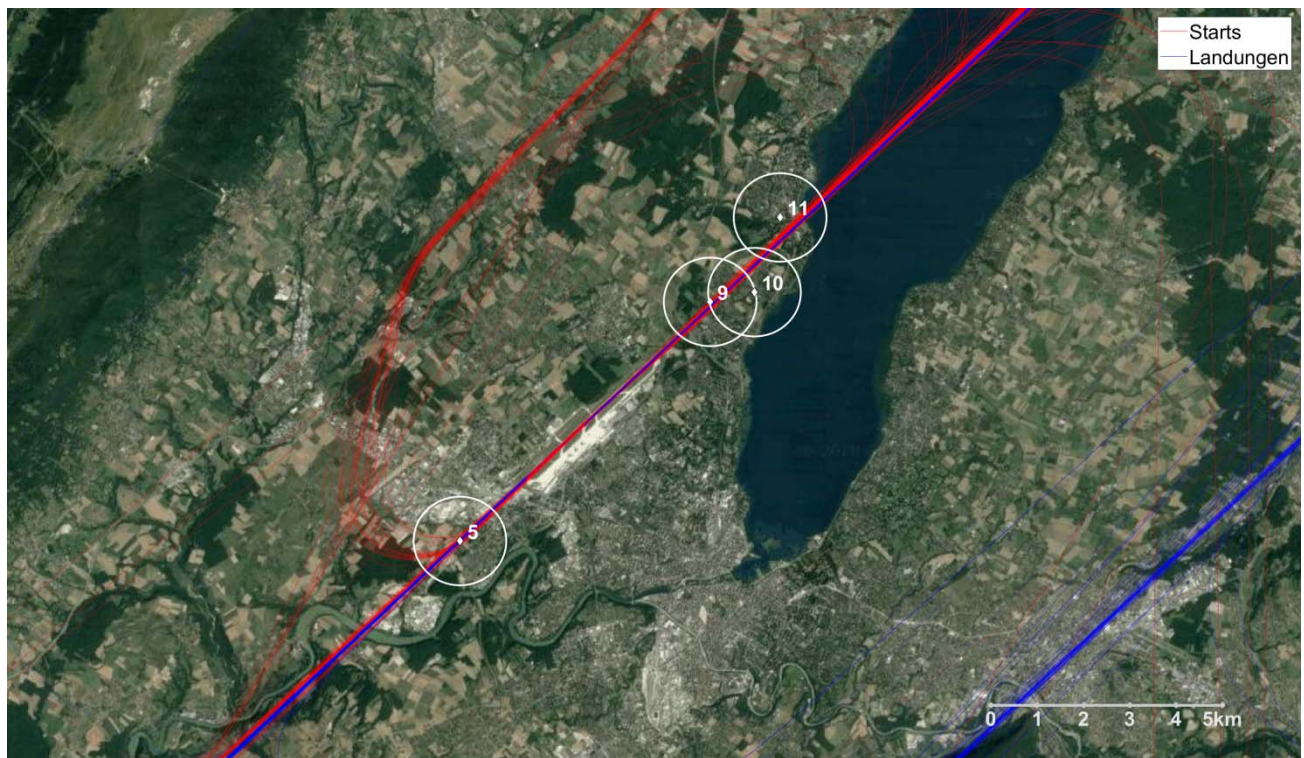


Piste exakt zu reproduzieren, erzeugten diese Ereignisse zum Teil grosse Differenzen in der Vergleichsanalyse. Um solche Ereignisse aus der Analyse auszuschliessen, ohne dass gleichzeitig valide Überflüge desselben Fluges ignoriert werden, wurde um jeden Messpunkt eine kreisförmige Pufferzone gelegt. Der Radius der Pufferzone wurde je nach Streuung der Flugspuren an der entsprechenden Stelle auf 1 km, 1.5 km oder 2 km gesetzt, sodass möglichst alle relevanten Überflugereignisse berücksichtigt wurden, die Pisten jedoch vollständig ausserhalb der Pufferzonen lagen. Bei der Simulation wurden dann nur Flugbahnen berücksichtigt, welche die Pufferzone durchqueren. Abbildung 26 zeigt die Messstationen mit Pufferzonen und berücksichtigten Flugspuren für den Flughafen Zürich, Abbildung 27 zeigt die Messstationen für Genf.



**Abbildung 26:** NMT-Messstationen um den Flughafen Zürich mit Pufferzonen und berücksichtigten Flugspuren (nur FDR-Trajektorien dargestellt). Luftbild ©2018 Google.

Die Dämpfungen wurden mit sonX Version 2.8.8 berechnet, die Einzelflugsimulation erfolgte mit dem wissenschaftlichen sonAIR-Simulationstool Version 7 im 3D-Modus mit Emissionsmodellen der Version 1.1-0013 (Details in Kapitel 2).



**Abbildung 27:** NMT-Messstationen um den Flughafen Genf mit Pufferzonen und berücksichtigten Flugspuren (nur FDR-Trajektorien dargestellt). Luftbild ©2018 Google.

## 6.4. Ergebnisse für Typen mit FDR-Daten

Nach Bereinigung und Auswahl der Ereignisse gemäss Kapitel 6.3 standen für den Flughafen Zürich insgesamt 2'111 Messereignisse aus 843 Flügen für die Simulation zur Verfügung. Beim Flughafen Genf waren es 769 Ereignisse aus 429 Flügen.

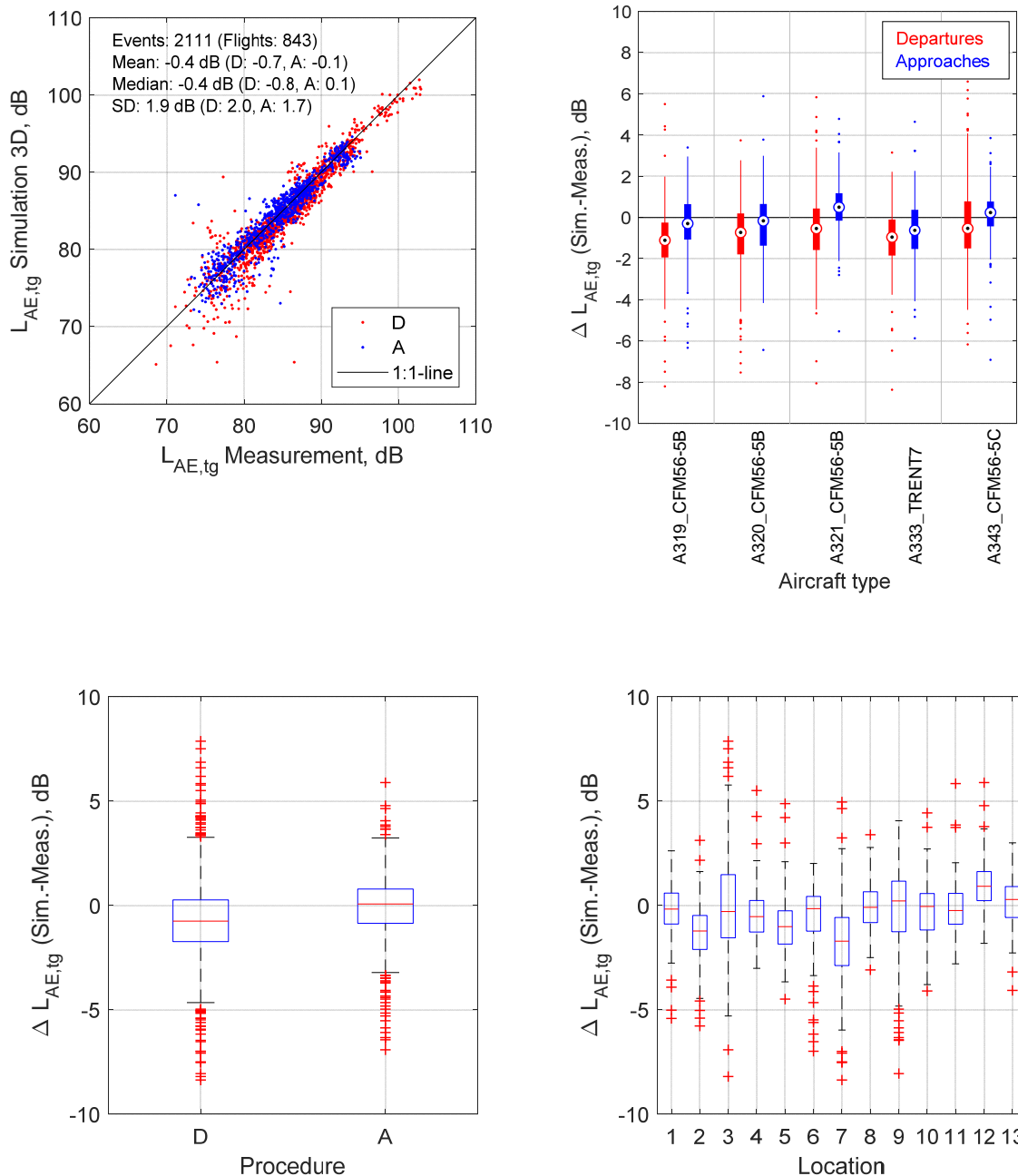
### 6.4.1. Vergleich Simulation (3D, METEO) vs. Messungen für den Flughafen Zürich

Abbildung 28 vergleicht die Berechnungen mit 3D-Modellen im METEO-Modus mit den Messungen. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Der Ereignispegel  $L_{AE,tg}$  wird mit -0.4 dB leicht unterschätzt, wobei vor allem die Starts zu dieser Unterschätzung beitragen. Die Standardabweichung beträgt für den  $L_{AE,tg}$  1.9 dB.

Die einzelnen Messpunkte werden unterschiedlich gut nachgebildet. An den Messpunkten 1, 6, 8, 10 und 11 werden die Messungen sehr gut reproduziert. Die Messpunkte 2, 3, 4, 5 und 7 werden im Mittel etwas unterschätzt, während die Messpunkte 9, 12 und 13 etwas überschätzt werden. Es ist kein Muster bezüglich Distanz zum Flughafen oder seitlicher Abstand zu den Flugspuren erkennbar. Die Ursachen für Differenzen werden daher eher in lokalen Gegebenheiten rund um den Messpunkt vermutet, welche in der Simulation aufgrund der Platzierung der Messstellen in teilweise dicht besiedeltem Gebiet nur schwer abgebildet werden können. Die Differenzen zwischen den verschiedenen Flugzeugtypen sind dagegen nur sehr klein. Es zeigt sich jedoch bei allen Typen ein Trend zu einer Unterschätzung der Starts.



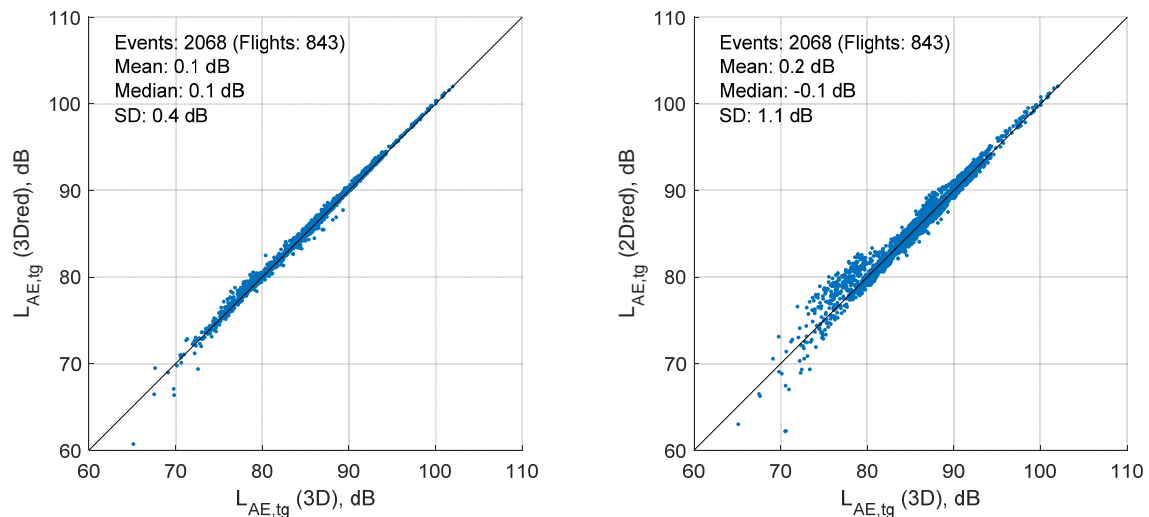
Der Maximalpegel  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein ähnliches Verhalten, allerdings mit deutlich grösserer Unterschätzung. Die Differenz zwischen Simulation und Messung beträgt hier  $-1.0 \pm 2.1$  dB, wobei wiederum die Starts wesentlich stärker unterschätzt wurden als die Landungen (siehe Tabelle 14).



**Abbildung 28:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen des Flughafen Zürich für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur (links oben und unten), Flugzeugtyp (rechts oben) und Messpunkt (rechts unten).

#### 6.4.2. Vergleich 3D vs. 3Dred und 3D vs. 2Dred für den Flughafen Zürich

Abbildung 29 vergleicht die Simulationsergebnisse unter Verwendung der 3D-, 3Dred- und 2D-Emissionsmodelle für den  $L_{AE,t10}$ . Der Maximalpegel  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein sehr ähnliches Bild (siehe Tabelle 14). Die Unterschiede zwischen den 3D- und den 3Dred-Modellen sind sehr klein. Das 2Dred-Modell zeigt grössere Abweichungen ( $SD=1.1$  dB) gegenüber dem 3D-Modell, insbesondere bei tieferen Pegeln.



**Abbildung 29:** Vergleich 3Dred vs. 3D (links) und 2Dred vs. 3D (rechts) für den  $L_{AE,t10}$  im Nahbereich des Flughafens Zürich.

**Tabelle 14:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3Dred–3D und 2Dred–3D, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
3Dred–3D	$\Delta L_{AE,tg}$	2.1	-4.4	0.1	0.4	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	2.0	-1.7	0.1	0.3	< 0.01
2Dred–3D	$\Delta L_{AE,tg}$	4.6	-8.4	0.2	1.1	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	3.2	-2.1	0.1	0.9	< 0.01

Im Vergleich zu den Messwerten liefern die Varianten 3D, 3Dred und 2Dred jedoch annähernd identische Resultate (siehe Tabelle 15). Da die Parameter des 3Dred Modells nur um die Konfiguration (Fahrwerk, Klappenstellungen) reduziert sind, zeigen sich im Vergleich zum 3D Modell kaum Unterschiede. Erstaunlicherweise trifft dies auch für Landungen zu. Dies kann damit erklärt werden, dass alle Messpunkte der Landungen relativ nahe am Flughafen sind und sich somit im Bereich des stabilen Endanflugs befinden, bei dem die Flugzeuge bereits vollständig konfiguriert sind. Unterschiede des Lärmpegels aufgrund der Konfiguration sind nur an weiter entfernten Messpunkten erkennbar, wie bei der Verifizierung der Landungen von sonAIR [4].

**Tabelle 15: Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3D-Messung, 3Dred-Messung und 2Dred-Messung (METEO-Modus) für alle Typen mit FDR-Daten inkl. Anzahl simulierter Ereignisse N im Nahbereich des Flughafen Zürich, aufgeteilt nach Prozedur (Starts und Landungen).**

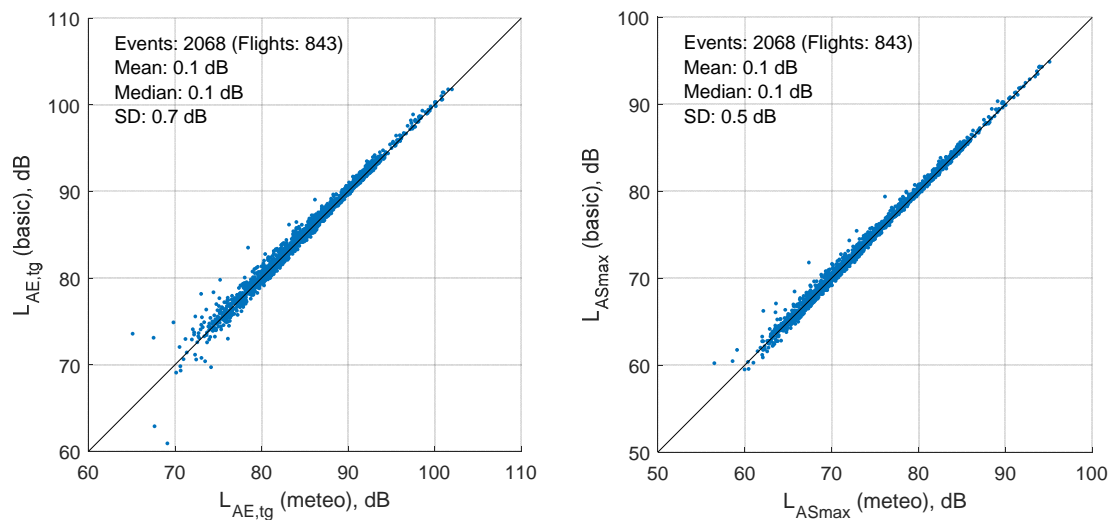
Typ	Proc.	N	3D		3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,tg}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,tg}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,tg}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
<b>A319_CFM56-5B</b>	L	183	-0.3 ( $\pm 1.8$ )	-0.7 ( $\pm 2.2$ )	-0.1 ( $\pm 1.8$ )	-0.5 ( $\pm 2.1$ )	0.5 ( $\pm 2.1$ )	-0.1 ( $\pm 2.3$ )
	S	226	-1.2 ( $\pm 1.8$ )	-1.6 ( $\pm 1.7$ )	-1.1 ( $\pm 2.4$ )	-1.5 ( $\pm 1.8$ )	-1.6 ( $\pm 2.2$ )	-2.0 ( $\pm 1.8$ )
<b>A320_CFM56-5B</b>	L	185	-0.2 ( $\pm 2.0$ )	-0.5 ( $\pm 2.3$ )	-0.2 ( $\pm 2.1$ )	-0.4 ( $\pm 2.4$ )	0.1 ( $\pm 2.2$ )	-0.3 ( $\pm 2.6$ )
	S	252	-1.0 ( $\pm 2.3$ )	-1.4 ( $\pm 2.0$ )	-0.9 ( $\pm 2.5$ )	-1.3 ( $\pm 2.0$ )	-1.5 ( $\pm 2.7$ )	-1.7 ( $\pm 2.1$ )
<b>A321_CFM56-5B</b>	L	200	0.5 ( $\pm 1.3$ )	0.2 ( $\pm 1.6$ )	0.4 ( $\pm 1.3$ )	0.1 ( $\pm 1.6$ )	0.5 ( $\pm 1.6$ )	0.1 ( $\pm 1.9$ )
	S	256	-0.5 ( $\pm 1.8$ )	-1.4 ( $\pm 1.9$ )	-0.5 ( $\pm 1.7$ )	-1.3 ( $\pm 1.8$ )	-0.8 ( $\pm 2.2$ )	-1.7 ( $\pm 2.0$ )
<b>A333_TRENT7</b>	L	133	-0.6 ( $\pm 1.9$ )	-1.0 ( $\pm 1.8$ )	-0.5 ( $\pm 2.0$ )	-0.9 ( $\pm 1.9$ )	0.1 ( $\pm 2.0$ )	-0.5 ( $\pm 1.9$ )
	S	171	-1.0 ( $\pm 1.7$ )	-1.7 ( $\pm 1.9$ )	-1.0 ( $\pm 2.2$ )	-1.5 ( $\pm 2.0$ )	-0.9 ( $\pm 2.5$ )	-1.6 ( $\pm 2.5$ )
<b>A343_CFM56-5C</b>	L	201	0.1 ( $\pm 1.2$ )	-0.1 ( $\pm 1.5$ )	0.5 ( $\pm 1.3$ )	0.2 ( $\pm 1.5$ )	1.0 ( $\pm 1.5$ )	0.6 ( $\pm 1.8$ )
	S	304	-0.2 ( $\pm 2.3$ )	-1.4 ( $\pm 2.4$ )	-0.1 ( $\pm 2.3$ )	-1.3 ( $\pm 2.4$ )	0.4 ( $\pm 2.5$ )	-0.9 ( $\pm 2.6$ )
<b>Gesamt</b>	L	902	-0.1 ( $\pm 1.7$ )	-0.4 ( $\pm 1.9$ )	0.1 ( $\pm 1.7$ )	-0.3 ( $\pm 1.9$ )	0.5 ( $\pm 1.9$ )	0.0 ( $\pm 2.1$ )
	S	1209	-0.7 ( $\pm 2.0$ )	-1.5 ( $\pm 2.0$ )	-0.7 ( $\pm 2.3$ )	-1.4 ( $\pm 2.1$ )	-0.8 ( $\pm 2.6$ )	-1.6 ( $\pm 2.3$ )

Im Vergleich zwischen 2Dred und 3D über alle Typen nimmt die Streuung aufgrund der achsensymmetrischen Richtwirkung für Landungen um 0.2 dB und für Starts um 0.6 dB zu. Hierdurch zeigt sich, dass die laterale Richtwirkung besonders bei Starts eine wichtige Rolle spielt. Die Mittelwerte sind ähnlich.

#### 6.4.3. Vergleich BASIC vs. METEO für den Flughafen Zürich

Abbildung 30 zeigt den Vergleich der Simulationen mit dem 3D-Modell im METEO- und im BASIC-Modus. Die Unterschiede zwischen den zwei Modi sind relativ klein. Beim  $L_{AE,tg}$  zeigt sich vor allem bei tieferen Pegeln eine erhöhte Streuung. Dies lässt darauf schliessen, dass der Wettereffekt vor allem bei grösseren Quellen-Empfänger-Abständen relevant ist, während bei niedrigeren, lauterer Überflügen der BASIC-Ansatz ausreicht. Beim  $L_{AS,max}$  zeigt sich ein ähnlicher Trend, wobei die Streuung über den gesamten Pegelbereich kleiner ist als bei  $L_{AE,tg}$ . Im Mittel liefern die beiden Modi sehr ähnliche Resultate (siehe Tabelle 16).

Der Flughafen Zürich lieferte zusätzlich zum Ereignispegel ein gesamthaftes Spektrum des Überflugs. Im Anhang 11.7 werden alle 2068 simulierten Ereignisse nochmal spektral mit den Messungen verglichen. In Abbildung 54 wurde dabei die Ausbreitung mit dem METEO-Modus berechnet und in Abbildung 55 mit dem BASIC-Modus. Es zeigt sich, dass die Berücksichtigung vertikaler Profile mit dem METEO-MODUS (Luftdämpfung und Strahlkrümmung) für Terzen unterhalb 160 Hz kaum zu Verbesserungen führt und bis 1 kHz zu geringen Verbesserungen führt (kleinere Streuung von etwa 0.2 dB). Über 1 kHz führt die Berücksichtigung des METEO-Modus qualitativ zu einer deutlichen Verbesserung im Ereignispegelspektrum, die Streuung um die 1:1 Linie sinkt erheblich. Quantitativ können hier ohne grösseren Aufwand keine Aussagen mehr gemacht werden, da viele gemessene Ereignisse bei etwa 50 dB nur noch den Hintergrundpegel ausweisen und damit den Mittelwert und die Standardabweichung verzerren.



**Abbildung 30:** Vergleich der Simulationen mit dem 3D-Modell im METEO-Modus vs. BASIC-Modus für den  $L_{AE,t10}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) im Nahbereich des Flughafen Zürich.

**Tabelle 16:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche BASIC-METEO, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

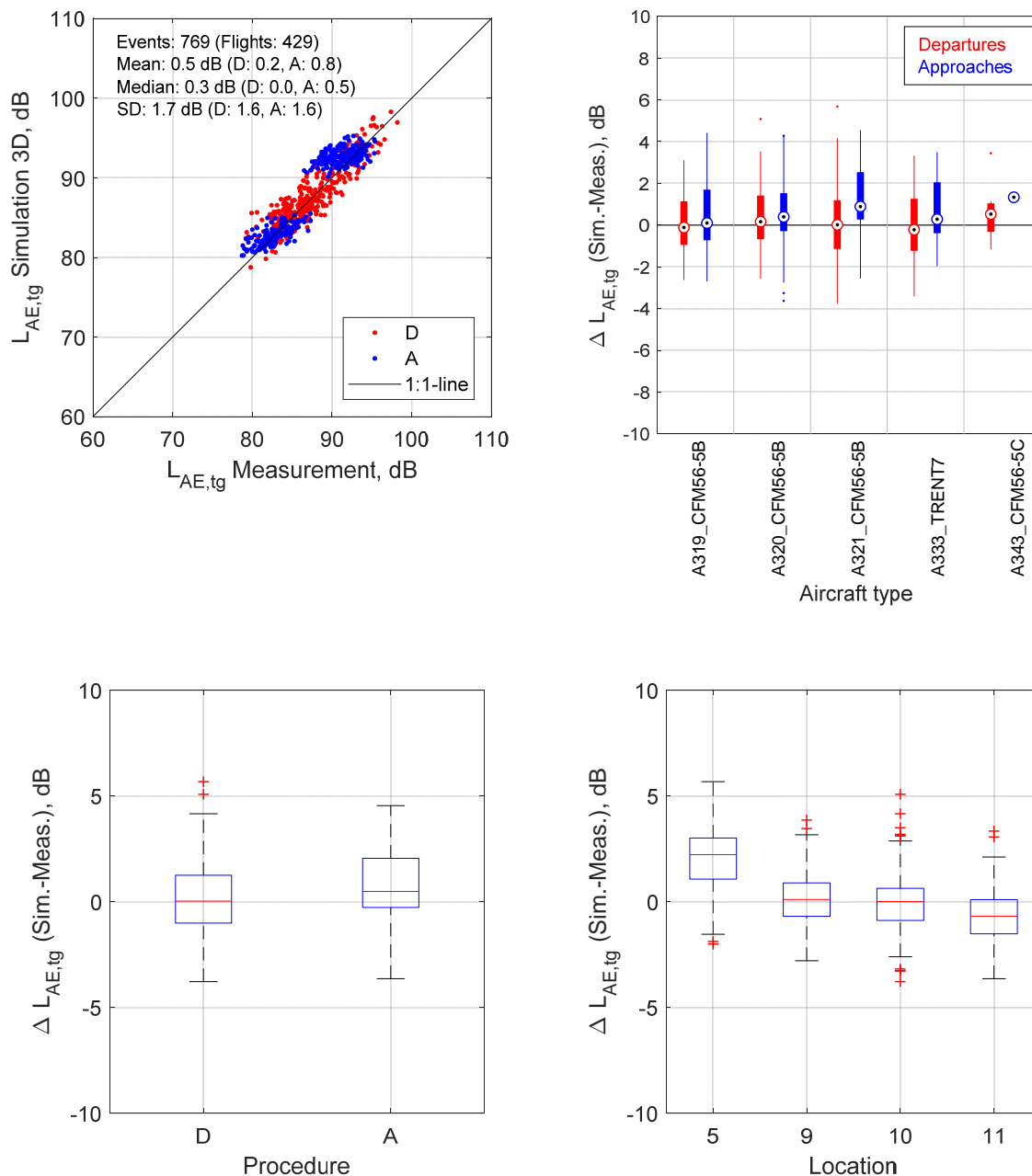
Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
BASIC-METEO	$\Delta L_{AE,tg}$	8.5	-8.2	0.1	0.7	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	4.6	-1.4	0.1	0.5	< 0.01

#### 6.4.4. Vergleich Simulation (3D, METEO) vs. Messungen für den Flughafen Genf

Abbildung 31 vergleicht die Simulation mit den 3D-Modellen im METEO-Modus mit den Messungen für den  $L_{AE,tg}$ . Es zeigt sich eine leichte Überschätzung der Simulation von 0.5 dB bei einer Standardabweichung von 1.7 dB. Die Überschätzung betrifft dabei hauptsächlich die Landungen, die Starts stimmen im Mittel sehr gut mit den Messungen überein. Eine Analyse nach Flugzeugtyp zeigt keine grösseren Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen.

Nach Messpunkt analysiert zeigt sich, dass die Messungen am Messpunkt 5 stark überschätzt wurden, während die anderen Messpunkte sehr genau reproduziert werden konnten. Diese Abweichung kann nicht durch die Positionierung der Messstelle erklärt werden, da sie sich gleich wie die anderen Messpunkte direkt unterhalb der Trajektorien und in einem ähnlichen Abstand zum Flughafen befindet. Vermutlich treten an dieser Stelle lokale Effekte auf (Mikrofon auf einem Wellblechdach, dichter und hoher Baumbewuchs um Messstelle), welche in sonAIR nicht vollständig nachgebildet werden können. Wird der Messpunkt 5 aus der Analyse ausgeschlossen, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation mit einem  $\Delta L_{AE,tg}$  von  $-0.1 \pm 1.3$  dB.

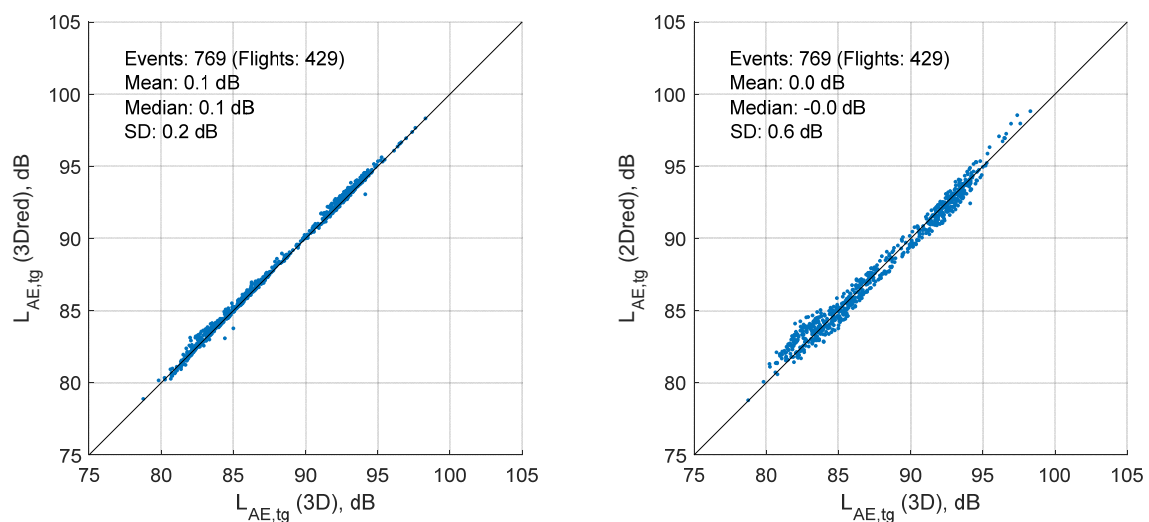
Der  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein ähnliches Verhalten, jedoch mit tieferem Mittelwert und einer leicht erhöhten Standardabweichung. Über alle Messpunkte resultiert ein  $\Delta L_{AS,max}$  von  $0.3 \pm 1.9$  dB, bei Ausschluss des Messpunkt 5 ergibt sich ein  $\Delta L_{AS,max}$  von  $-0.4 \pm 1.6$  dB. Auch hier erzeugen die Landungen höhere Differenzen als die Starts, sodass die Landungen über- und die Starts unterschätzt werden (siehe Tabelle 18).



**Abbildung 31:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen des Flughafen Genf für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Prozedur (links oben und unten), Flugzeugtyp (rechts oben) und Messpunkt (rechts unten).

#### 6.4.5. Vergleich 3D vs. 3Dred und 3D vs. 2Dred für den Flughafen Genf

Abbildung 32 vergleicht die Simulationsergebnisse unter Verwendung der 3D-, 3Dred- und 2D-Emissionsmodelle für den  $L_{AE,t10}$ . Der Maximalpegel  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein sehr ähnliches Bild (siehe Tabelle 17). Die Unterschiede zwischen den 3D- und den 3Dred-Modellen sind sehr klein. Das 2Dred-Modell zeigt etwas grössere Abweichungen, wobei die Abweichungen über den gesamten Pegelbereich ungefähr gleich gross sind. Die Berechnungen mit den drei Emissionsmodellen liefern im Mittel annähernd identische Resultate, allerdings steigt im Vergleich mit den Messungen mit dem abnehmenden Detailgrad der Modelle die Streuung leicht an (siehe Tabelle 18).



**Abbildung 32:** Vergleich 3Dred vs. 3D (links) und 2Dred vs. 3D (rechts) für den  $L_{AE,t10}$  im Nahbereich des Flughafen Genf.

**Tabelle 17:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3Dred–3D und 2Dred–3D, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
3Dred–3D	$\Delta L_{AE,tg}$	1.1	-1.3	0.1	0.2	<0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	1.0	-1.4	0.1	0.2	<0.01
2Dred–3D	$\Delta L_{AE,tg}$	2.1	-1.7	0.0	0.6	0.48
	$\Delta L_{AS,max}$	2.0	-1.7	0.0	0.6	0.90

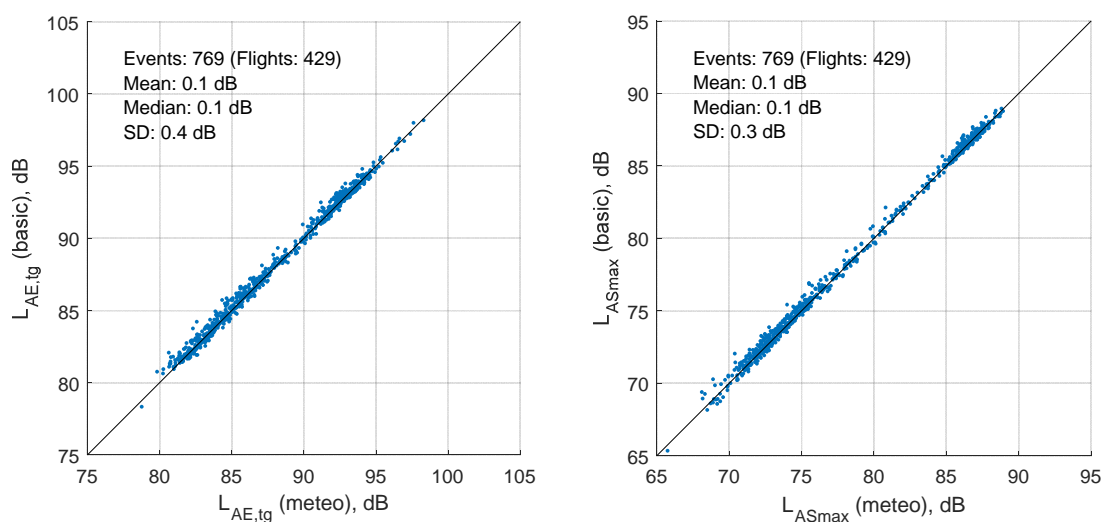


**Tabelle 18:** Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3D-Messung, 3Dred-Messung und 2Dred-Messung (METEO-Modus) für alle Typen mit FDR-Daten inkl. Anzahl simulierter Ereignisse N im Nahbereich des Flughafen Genf, aufgeteilt nach Prozedur (Starts und Landungen).

Typ	Proc.	N	3D		3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
<b>A319_CFM56-5B</b>	L	75	0.4 ( $\pm 1.6$ )	0.2 ( $\pm 1.8$ )	0.7 ( $\pm 1.6$ )	0.4 ( $\pm 1.7$ )	0.7 ( $\pm 1.7$ )	0.4 ( $\pm 1.9$ )
	S	71	0.1 ( $\pm 1.4$ )	-0.4 ( $\pm 1.5$ )	0.2 ( $\pm 1.3$ )	-0.3 ( $\pm 1.5$ )	-0.0 ( $\pm 1.5$ )	-0.4 ( $\pm 1.7$ )
<b>A320_CFM56-5B</b>	L	99	0.6 ( $\pm 1.7$ )	0.7 ( $\pm 2.1$ )	0.9 ( $\pm 1.8$ )	0.9 ( $\pm 2.1$ )	0.8 ( $\pm 1.8$ )	0.8 ( $\pm 2.2$ )
	S	97	0.4 ( $\pm 1.5$ )	-0.2 ( $\pm 1.6$ )	0.4 ( $\pm 1.5$ )	-0.2 ( $\pm 1.6$ )	0.2 ( $\pm 1.6$ )	-0.4 ( $\pm 1.8$ )
<b>A321_CFM56-5B</b>	L	104	1.3 ( $\pm 1.6$ )	1.4 ( $\pm 1.9$ )	1.3 ( $\pm 1.7$ )	1.4 ( $\pm 1.9$ )	1.3 ( $\pm 1.7$ )	1.3 ( $\pm 2.0$ )
	S	107	0.2 ( $\pm 1.9$ )	-0.1 ( $\pm 2.1$ )	0.3 ( $\pm 1.8$ )	0.0 ( $\pm 2.1$ )	0.1 ( $\pm 1.9$ )	-0.2 ( $\pm 2.2$ )
<b>A333_TRENT7</b>	L	103	0.7 ( $\pm 1.5$ )	0.9 ( $\pm 1.6$ )	0.9 ( $\pm 1.6$ )	1.2 ( $\pm 1.7$ )	0.9 ( $\pm 1.5$ )	1.1 ( $\pm 1.6$ )
	S	105	-0.1 ( $\pm 1.6$ )	-0.7 ( $\pm 1.7$ )	0.0 ( $\pm 1.6$ )	-0.6 ( $\pm 1.7$ )	-0.1 ( $\pm 2.0$ )	-0.7 ( $\pm 2.1$ )
<b>A343_CFM56-5C</b>	L	1	1.3 ( $\pm 0.0$ )	1.3 ( $\pm 0.0$ )	2.1 ( $\pm 0.0$ )	2.0 ( $\pm 0.0$ )	1.9 ( $\pm 0.0$ )	1.8 ( $\pm 0.0$ )
	S	7	0.6 ( $\pm 1.5$ )	0.9 ( $\pm 2.0$ )	0.6 ( $\pm 1.4$ )	0.9 ( $\pm 2.0$ )	0.2 ( $\pm 1.6$ )	0.4 ( $\pm 2.2$ )
<b>Gesamt</b>	L	382	0.8 ( $\pm 1.6$ )	0.9 ( $\pm 1.9$ )	1.0 ( $\pm 1.7$ )	1.0 ( $\pm 1.9$ )	0.9 ( $\pm 1.7$ )	1.0 ( $\pm 2.0$ )
	S	387	0.2 ( $\pm 1.6$ )	-0.3 ( $\pm 1.8$ )	0.2 ( $\pm 1.6$ )	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	0.1 ( $\pm 1.8$ )	-0.4 ( $\pm 2.0$ )

#### 6.4.6. Vergleich BASIC vs. METEO für den Flughafen Genf

Abbildung 33 zeigt den Vergleich der Simulationen mit dem 3D-Modell im METEO- und im BASIC-Modus. Die Unterschiede zwischen den zwei Modi sind relativ klein (siehe Tabelle 19). Dies ist dadurch zu erklären, dass sich sämtliche Messstationen direkt unterhalb der Trajektorien und relativ nahe am Flughafen befinden, sodass die Quellen-Empfänger-Abstände eher klein sind. Dadurch wird der Einfluss verschiedener Wetterlagen minimiert. Die Streuung ist über den gesamten Pegelbereich ungefähr gleich und insgesamt sehr klein.



**Abbildung 33:** Vergleich der Simulationen mit dem 3D-Modell im METEO-Modus vs. BASIC-Modus für den  $L_{AE,t10}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) im Nahbereich des Flughafen Genf.

**Tabelle 19:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche BASIC-METEO, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

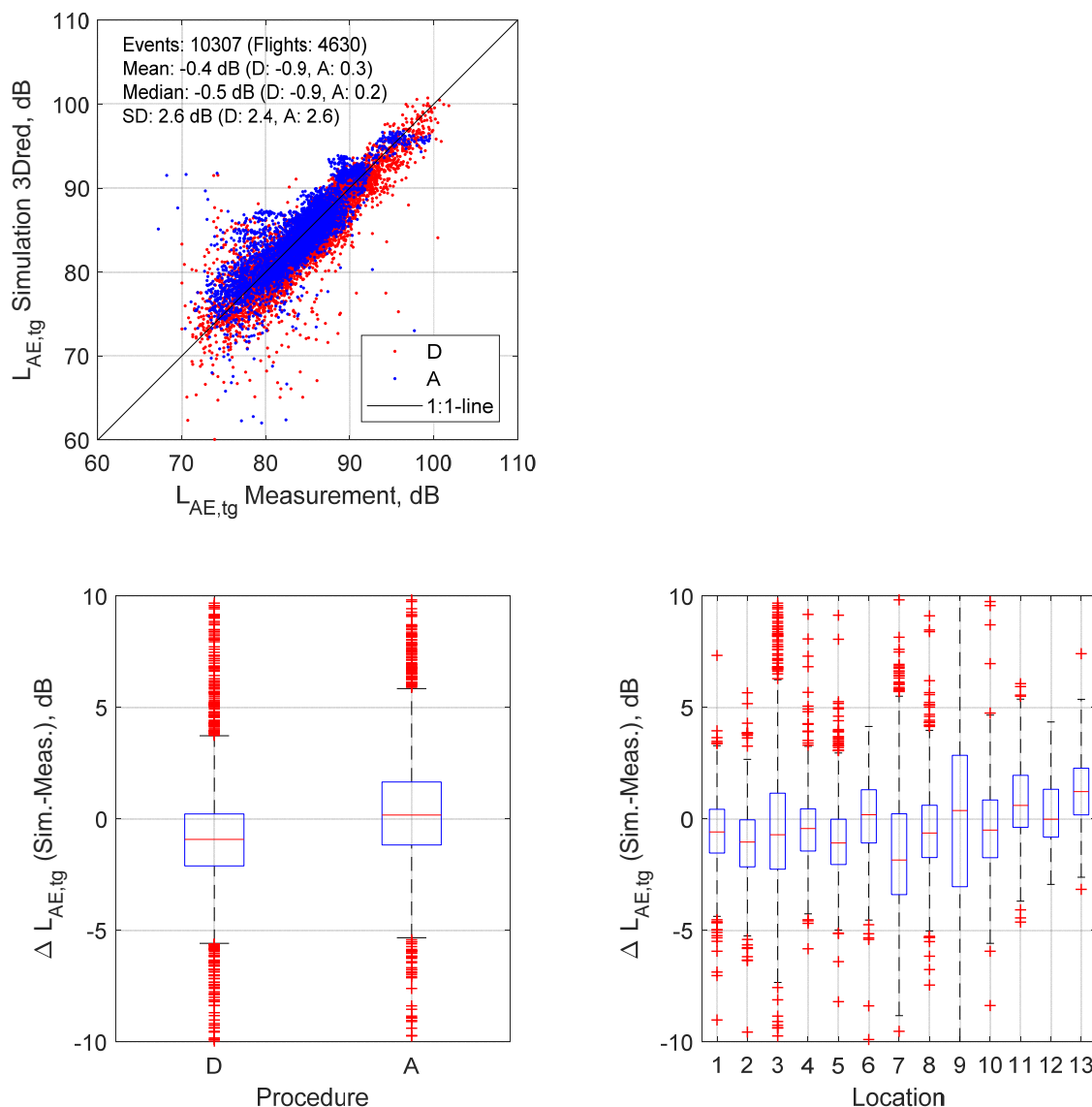
Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
BASIC-METEO	$\Delta L_{AE,tg}$	1.7	-0.7	0.1	0.4	<0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	1.7	-0.6	0.1	0.3	<0.01

## 6.5. Ergebnisse für Typen ohne FDR-Daten

Nach Bereinigung und Auswahl der Ereignisse gemäss Kapitel 6.3 standen für den Flughafen Zürich insgesamt 10'307 Messereignisse aus 4'630 Flügen ohne FDR-Daten für die Nachsimulation zur Verfügung. Beim Flughafen Genf waren es 7'116 Ereignisse aus 4'012 Flügen.

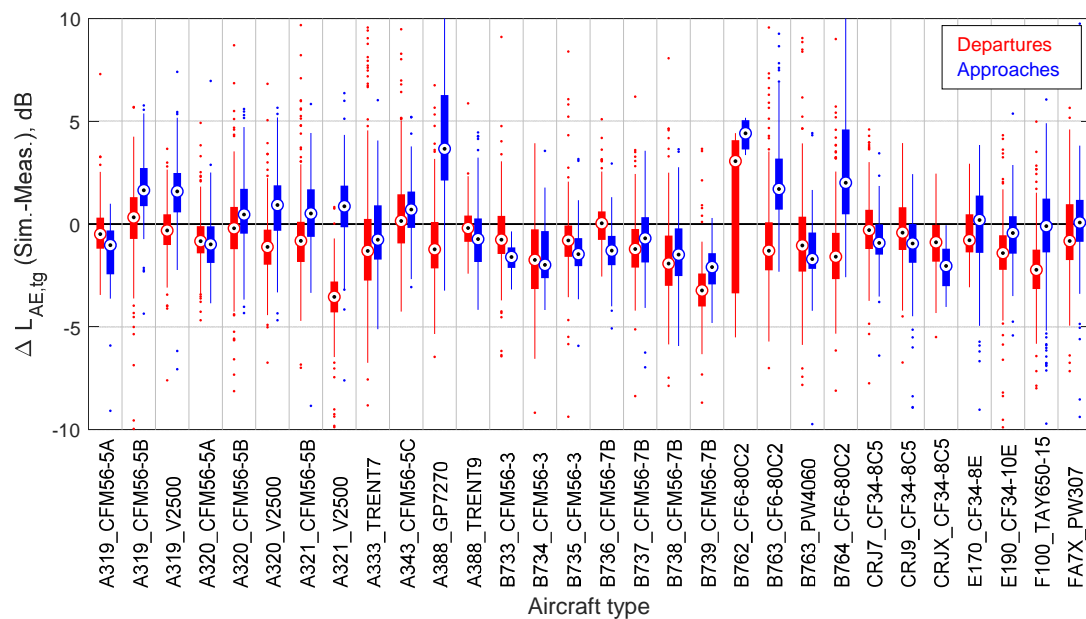
### 6.5.1. Vergleich Simulation (3Dred, METEO) vs. Messungen für den Flughafen Zürich

Abbildung 34 zeigt den Vergleich der Simulation der nicht-FDR Typen (3Dred-Modelle) im METEO-Modus mit den Messungen für den  $L_{AE,tg}$ . Im Mittel wurden die Messungen leicht unterschätzt mit einem  $\Delta L_{AE,tg}$  von -0.4 dB bei einer Standardabweichung von 2.6 dB. Die Unterschätzung ist dabei hauptsächlich auf die Starts mit  $\Delta L_{AE,tg} = -0.9 \pm 2.4$  dB zurückzuführen. Die Landungen mit  $\Delta L_{AE,tg} = 0.3 \pm 2.6$  dB wurden im Mittel gut nachsimuliert, die Streuung ist jedoch etwas höher als bei den Starts. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Parameterschätzung für Landungen nur mediane N1-Profile als Standardwerte verwendet, wogegen bei Starts der Einfluss von Abflugmasse, Steigleistung und Aussentemperatur in die N1-Bestimmung einfliesst [12]. Eine Validierung in [12] ergab für Landungen eine zusätzliche Streuung der simulierten Ereignispegel von 0.4 bis 0.9 dB aufgrund der medianen N1-Profile im Vergleich zum effektiven N1 Verlauf. Der Maximalpegel  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein ähnliches Verhalten, jedoch wurde dieser von der Simulation stärker unterschätzt. Der  $\Delta L_{AS,max}$  beträgt  $-1.1 \pm 2.6$  dB, wobei wiederum die Starts ( $\Delta L_{AS,max} = -1.8 \pm 2.3$  dB) deutlich stärker unterschätzt wurden als die Landungen ( $\Delta L_{AS,max} = 0.1 \pm 2.6$  dB).



**Abbildung 34:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot links) und Messpunkt (Boxplot rechts unten).

Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse aufgeteilt nach Flugzeug- und Triebwerktyp sowie Prozedur. Die meisten Typen wurden von der Simulation gut abgebildet. Einzelne Typen zeigen jedoch grössere Abweichungen und Streuungen wie z.B. die A388 mit GP7270-Triebwerk, die B762 mit CF6-80C2-Triebwerk und die B764 mit CF6-80C2-Triebwerk. Bei der A388 gab es bei der Modellerstellung keine Messungen von Landungen, so dass für diesen Typ das Antriebsmodell der A388\_Trent9 verwendet wurde. Bei B762 und B764, welche beide mit demselben Emissionsmodell B76X\_CF6-80C2 simuliert wurden, zeigt sich, dass vor allem die Landungen stark abweichen. Bei der Modellerstellung wurden beide Typen zwar vermessen, aber es fehlten Messdaten wichtiger Routen. Bei der B762 kommt erschwerend hinzu, dass der Vergleich auf nur 7 Messungen beruht (siehe Tabelle 28 in Anhang 11.3.3).



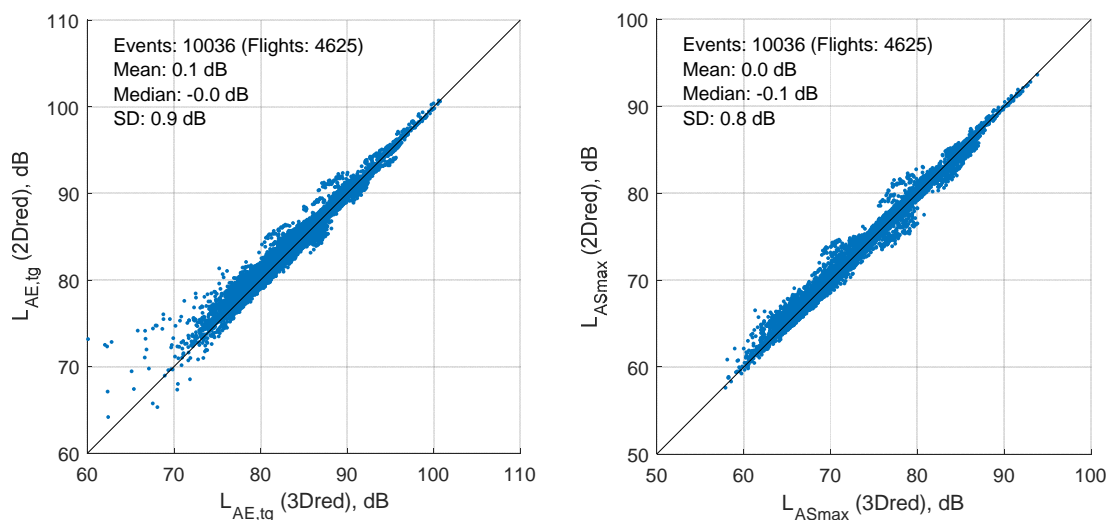
**Abbildung 35: Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen des Flughafens Zürich für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Typ und Triebwerk.**

Bei Flugzeugtypen die mit dem Emissionsmodell B737\_CFM56-5B simuliert wurden, konnten ebenfalls systematische Abweichungen festgestellt werden. Ausgehend von der B737 wurden die Mittelwerte der Starts und Landungen immer stärker unterschätzt umso länger und damit schwerer die Flugzeuge (B738 und B739) sind. Dies könnte bedeuten, dass verschiedene Flugzeugtypen mit gleichem Triebwerk nicht zwingend in einem Emissionsmodell gruppiert werden können. Auch wenn alle Flugzeugtypen bei der Modellerstellung vermessen wurden, reichte die Datengrundlage jedoch nicht aus, um separate Emissionsmodelle zu erstellen. Positiv hingegen zeigt der Vergleich der CRJ7, CRJ9 und CRJX, dass sogar Flugzeugtypen die nicht bereits in der Modellerstellung vermessen wurden (CRJ9\_CF34-8C5 basiert ausschliesslich auf CRJ9) gut mit den Messungen übereinstimmen können.

Die Emissionsmodelle, welche bereits mit FDR-Daten validiert wurden (alle Swiss-Flugzeuge), wurden abermals auf Basis von Radardaten und Parameterschätzung simuliert. Um die Modelle unabhängig von der Airline zu überprüfen, wurden explizit keine Swiss-Flugzeuge sondern nur Flugzeuge anderer Airlines ausgewählt. Der Vergleich zur Messung zeigt sehr gute Ergebnisse. Die numerischen Validierungsergebnisse pro Flugzeug-Triebwerk-Kombination und Prozedur können im Detail der Tabelle 30 in Anhang 11.4 entnommen werden.

### 6.5.2. Vergleich 3Dred vs. 2Dred für den Flughafen Zürich

Abbildung 36 vergleicht die Simulationsergebnisse unter Verwendung der 3Dred- und 2Dred-Emissionsmodelle für den  $L_{AE,t10}$  und  $L_{AS,max}$  (siehe auch Tabelle 20). Die Unterschiede im  $L_{AE,t10}$  zwischen den 3Dred- und den 2Dred-Modellen sind für hohe Pegel sehr klein, nehmen mit abnehmenden Pegeln jedoch zu. Insbesondere bei Pegeln unter 80 dB zeigt sich eine erhöhte Streuung. Der  $L_{AS,max}$  zeigt insgesamt ein ähnliches Bild, allerdings mit weniger ausgeprägter Streuung bei tieferen Pegeln.



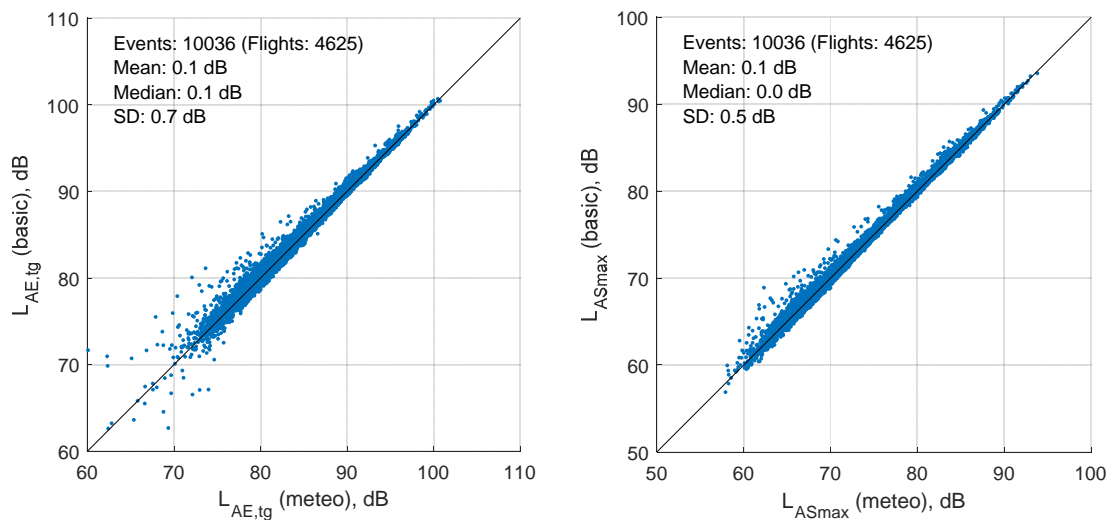
**Abbildung 36:** Vergleich 3Dred vs. 2Dred  $L_{AE,t10}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) im Nahbereich des Flughafens Zürich für nicht-FDR Typen.

**Tabelle 20:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für den Vergleich 2Dred–3Dred, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
2Dred–3Dred	$\Delta L_{AE,tg}$	15.0	-4.9	0.1	0.9	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	5.2	-3.7	0.0	0.8	< 0.01

### 6.5.3. Vergleich BASIC vs. METEO für den Flughafen Zürich

Abbildung 37 zeigt den Vergleich der Simulationen mit dem 3Dred-Modell im METEO- und im BASIC-Modus. Die Unterschiede zwischen den zwei Modi sind relativ klein. Beim  $L_{AE,tg}$  zeigt sich eine Zunahme der Abweichungen mit abnehmenden Pegeln. Dies lässt darauf schliessen, dass der Wettereffekt vor allem bei grösseren Quellen-Empfänger-Abständen relevant ist, während bei niedrigeren, lauterem Überflügen der BASIC-Ansatz ausreicht. Beim  $L_{AS,max}$  zeigt sich ein ähnlicher Trend, wobei die Streuung insgesamt etwas kleiner ist als bei  $L_{AE,tg}$ . Im Mittel liefern die beiden Modi sehr ähnliche Resultate (siehe Tabelle 21).



**Abbildung 37:** Vergleich der Simulationen mit dem 3Dred-Modell im METEO-Modus vs. BASIC-Modus für den  $L_{AE,tg}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) im Nahbereich des Flughafen Zürich für nicht-FDR Typen.

**Tabelle 21:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche BASIC-METEO, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

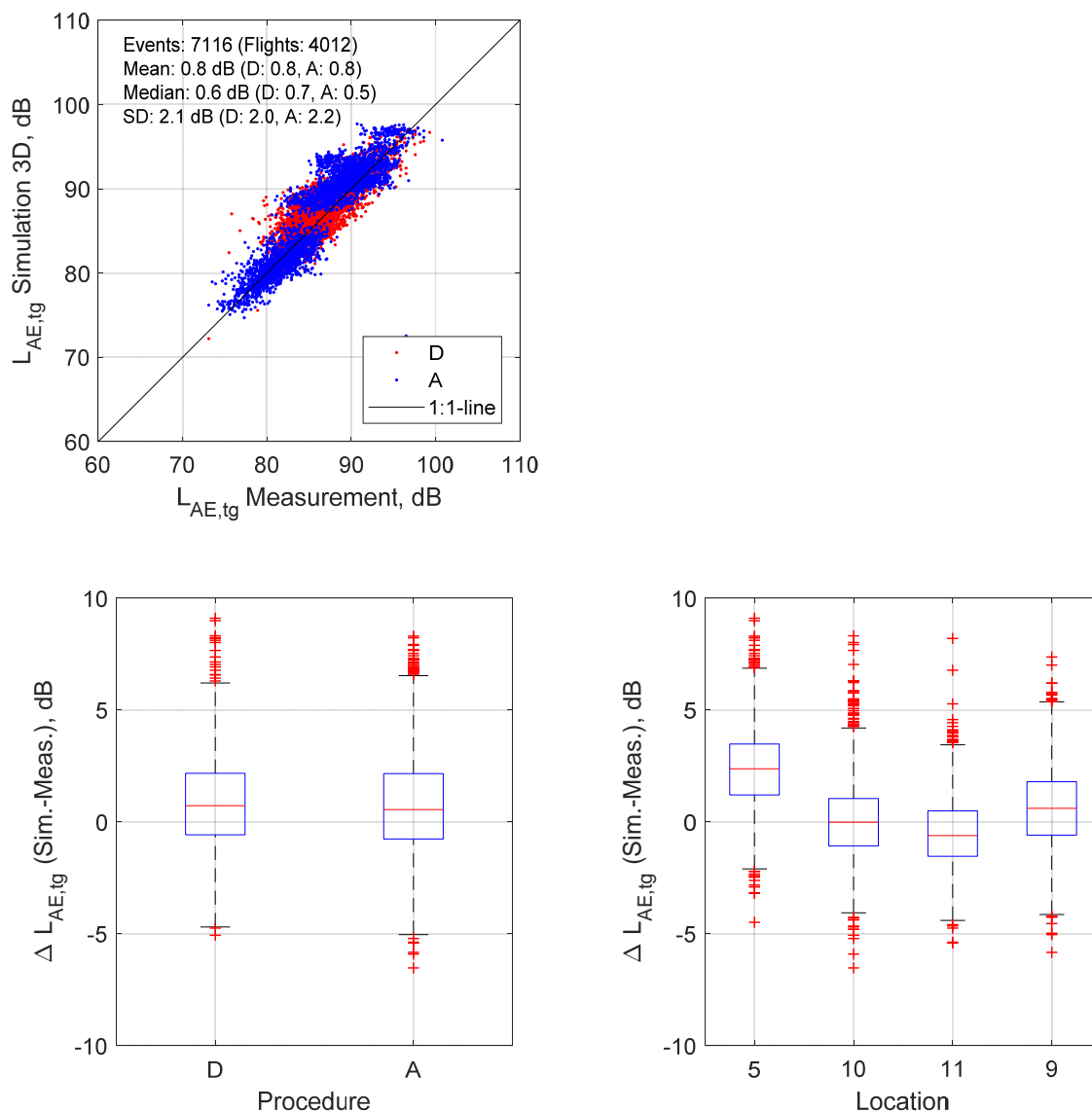
Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
BASIC-METEO	$\Delta L_{AE,tg}$	11.6	-6.9	0.1	0.7	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	6.6	-1.4	0.1	0.5	< 0.01

#### 6.5.4. Vergleich Simulation (3Dred, METEO) vs. Messungen für den Flughafen Genf

Abbildung 38 zeigt den Vergleich der Simulation der nicht-FDR Typen (3Dred-Modelle) im METEO-Modus mit den Messungen für den  $L_{AE,tg}$ . Im Mittel wurden die Messungen leicht überschätzt mit einem  $\Delta L_{AE,tg}$  von 0.8 dB bei einer Standardabweichung von 2.1 dB. Starts und Landungen wurden im Mittel ähnlich stark überschätzt, bei der Standardabweichung weisen die Landungen mit  $\pm 2.2$  dB eine leicht höhere Streuung auf als die Starts mit  $\pm 2.0$  dB.

Nach Messpunkt analysiert zeigt sich, dass die Messungen am Messpunkt 5 stark überschätzt wurden, während die anderen Messpunkte im Mittel besser reproduziert werden konnten. Dies entspricht der Beobachtung, welche bereits bei den Typen mit FDR-Daten gemacht wurde (siehe Kapitel 6.5.4). Wird der Messpunkt 5 aus der Analyse ausgeschlossen, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation mit einem  $\Delta L_{AE,tg}$  von  $0.2 \pm 1.9$  dB.

Der Maximalpegel  $L_{AS,max}$  (nicht abgebildet) zeigt ein ähnliches Verhalten, mit  $\Delta L_{AS,max} = 0.7 \pm 2.5$  dB. Hier wurden die Starts mit  $\Delta L_{AS,max} = 0.5 \pm 2.3$  dB etwas besser reproduziert als die Landungen mit  $\Delta L_{AS,max} = 0.8 \pm 2.7$  dB. Die Überschätzung ist wiederum hauptsächlich auf den Messpunkt 5 zurück zu führen, wird dieser aus der Analyse ausgeschlossen ergibt sich insgesamt einen  $\Delta L_{AS,max}$  von  $0.0 \pm 2.2$  dB.

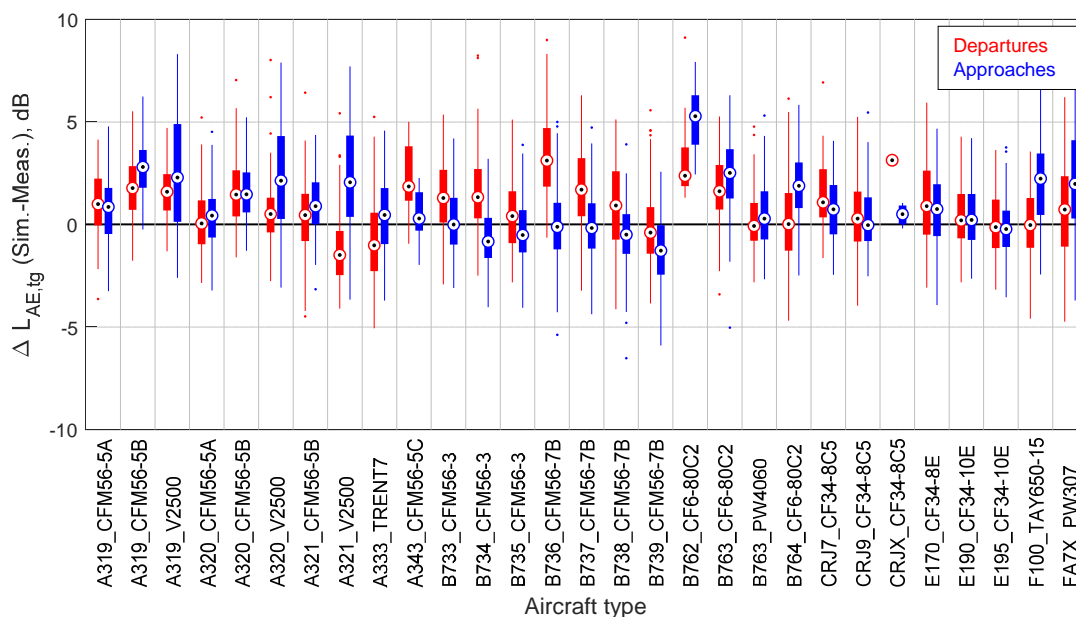


**Abbildung 38: Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen des Flughafens Genf für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot links) und Messpunkt (Boxplot rechts unten).**

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse aufgeteilt nach Flugzeug- und Triebwerktyp sowie Prozedur. Wie bereits in Kapitel 6.5.1 beobachtet, fällt die B762 mit CF6-80C2-Triebwerk durch eine überdurchschnittlich starke Überschätzung auf. Es gelten die gleichen Gründe wie bei den Ergebnissen für den Flughafen Zürich. Namentlich konnten auch in Genf nur 19 Messereignisse im gesamten Jahr 2016 verglichen werden (siehe Tabelle 29 in Anhang 11.3.3). Für die CRJX\_CF34-8C5 waren sogar nur 3 Flüge vorhanden, daher sind die Resultate für diesen Typ nur beschränkt aussagekräftig.

Bei der B737-Familie (CFM56-7B) kann zumindest für Starts wieder ein systematischer Trend im Mittelwert entdeckt werden. Jedoch werden B736 und B737 hier überschätzt während B738 und B739 recht gut mit den Messungen übereinstimmen. Bei den ursprünglich auf Swiss-Typen basierenden Emissionsmodellen gibt es in Genf grössere Abweichungen im Vergleich zur Berechnung mit FDR-Daten. Vor allem die A320-Familie (CFM56-5B) wird durchweg überschätzt während Starts der A333

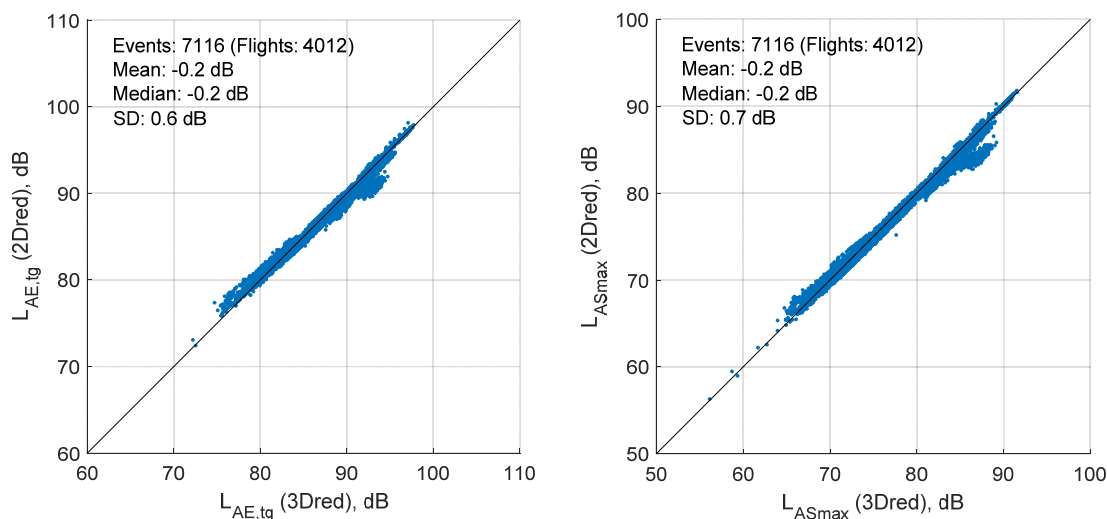
unterschätzt werden. Die numerischen Validierungsergebnisse pro Flugzeug-Triebwerk-Kombination und Prozedur können im Detail der Tabelle 31 in Anhang 11.4 entnommen werden.



**Abbildung 39: Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen des Flughafens Genf für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Typ und Triebwerk.**

### 6.5.5. Vergleich 3Dred vs. 2Dred für den Flughafen Genf

Abbildung 40 vergleicht die Simulationsergebnisse unter Verwendung der 3Dred- und 2D-Emissionsmodelle für den  $L_{AE,t10}$  und den  $L_{AS,max}$  (siehe auch Tabelle 28). Die Unterschiede zwischen den 3Dred- und den 2Dred-Modellen sind sowohl für den  $L_{AE,t10}$  als auch für den  $L_{AS,max}$  relativ klein.



**Abbildung 40: Vergleich 3Dred vs. 2Dred  $L_{AE,t10}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) im Nahbereich des Flughafens Genf für nicht-FDR Typen.**

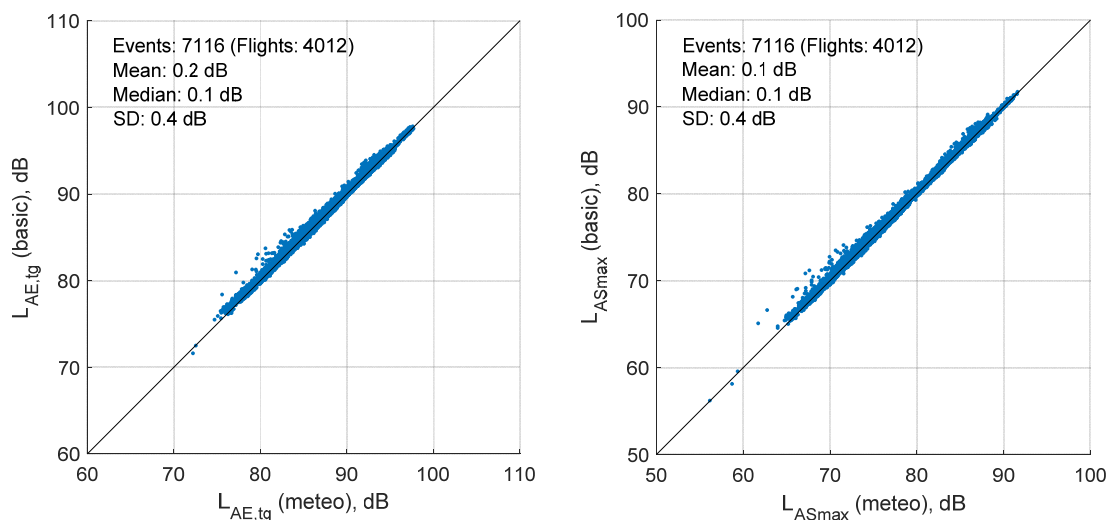


**Tabelle 23:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für den Vergleich 2Dred–3Dred, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
2Dred–3Dred	$\Delta L_{AE,tg}$	2.7	-3.3	-0.2	0.6	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	2.2	-3.9	-0.2	0.7	< 0.01

### 6.5.6. Vergleich BASIC vs. METEO für den Flughafen Genf

Abbildung 41 zeigt den Vergleich der Simulationen mit dem 3Dred-Modell im METEO- und im BASIC-Modus. Die Unterschiede zwischen den zwei Modi sind relativ klein (siehe Tabelle 22). Dies ist dadurch zu erklären, dass sich sämtliche Messstationen direkt unterhalb der Trajektorien und relativ nahe am Flughafen befinden, sodass die Quellen-Empfänger-Abstände eher klein sind. Dadurch wird der Einfluss verschiedener Wetterlagen minimiert. Die Streuung ist über den gesamten Pegelbereich ungefähr gleich und insgesamt sehr klein.



**Abbildung 41:** Vergleich der Simulationen mit dem 3Dred-Modell im METEO-Modus vs. BASIC-Modus für den  $L_{AE,tg}$  (links) und den  $L_{AS,max}$  (rechts) im Nahbereich des Flughafen Genf für nicht-FDR Typen.

**Tabelle 22:** Statistik der Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche BASIC-METEO, und p-Wert um festzustellen, ob der Mittelwert signifikant von Null abweicht (one-sample t-test).

Vergleich	Differenzen (dB)	max.	min.	Mittelwert	SD	p
BASIC-METEO	$\Delta L_{AE,tg}$	3.8	-0.8	0.2	0.4	< 0.01
	$\Delta L_{AS,max}$	3.9	-0.7	0.1	0.4	< 0.01

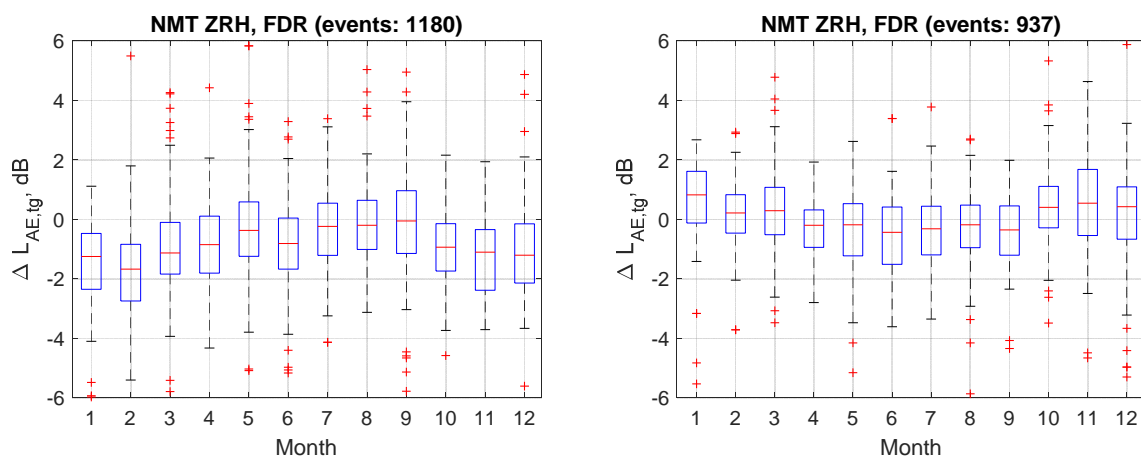
## 6.6. Abhängigkeiten der Differenzen

Die NMT Datensätze, welche Daten für alle Emissionsmodelle über ein gesamtes Jahr beinhalten, wurden zusätzlich zu den oben gezeigten Ergebnissen weiter analysiert. Trägt man die Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation minus Messung) über verschiedene atmosphärische, geometrische als auch Flugparameter auf, können Abhängigkeiten gefunden werden, die durch die Simulation (Aus-

breitung oder Emission) nicht korrekt abgebildet werden können. Die weitere Analyse wurde unter anderem durchgeführt, um der systematischen Unterschätzung der Starts als auch des Maximalpegels auf die Spur zu kommen.

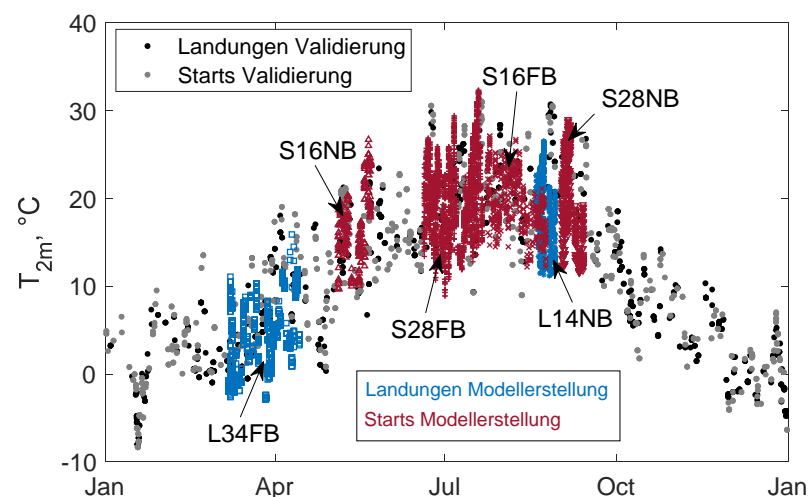
### 6.6.1. Atmosphärische Parameter

Betrachtet man den Monatsgang des  $\Delta L_{AE,tg}$  in Abbildung 42, besteht eine klare Abhängigkeit der Resultate zum Jahresverlauf (Typen mit FDR Daten am Flughafen Zürich). Die Starts werden in den kühlen Wintermonaten und bis in den Juni deutlich unterschätzt, während die Pegel zwischen Juli und September gut mit den Messdaten übereinstimmen. Insgesamt resultiert hierdurch die in Kapitel 6.4.1 dokumentierte Unterschätzung von 0.7 dB. Bei Landungen ist ein umgekehrter Trend zu beobachten, die Monate Dezember bis März werden überschätzt und die Monate April bis September leicht unterschätzt. Da die Mittelwerte um 0 dB schwanken, ergab sich im Durchschnitt nur eine Abweichung von -0.1 dB.



**Abbildung 42:** Jahresgang der Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation-Messung) aus den NMT-Daten der Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich für Starts (links) und Landungen (rechts).

Für Starts lässt sich nun anhand des Temperaturverlaufs am Flughafen Zürich einfach zeigen, weshalb sich der Jahresgang in den Ergebnissen niederschlägt. Abbildung 43 zeigt die Umgebungstemperatur auf Flugplatzhöhe für alle validierten Messungen und Messpunkte des Jahres 2016 auf. Während in den Sommermonaten Juli bis September typischerweise hohe Temperaturen (zwischen 10 und 32°C) gemessen wurden, liegen die Werte in den Wintermonaten (zwischen -8 und 10°C) systematisch tiefer. Der Jahresgang der Umgebungstemperatur korreliert stark mit dem Jahresgang der Pegeldifferenzen in Abbildung 42 links. Da der Triebwerkslärm die dominante Schallquelle bei Starts ist, kann vermutet werden, dass im Emissionsmodell für den Antrieb ein atmosphärischer Parameter fehlt. Für Landungen (Abbildung 42 rechts) zeigt sich jedoch ein umgekehrter Trend. Hier stellt sich die Frage, ob der Effekt des atmosphärischen Parameters im Umströmungsmodell zu einer Überkompensation führte.



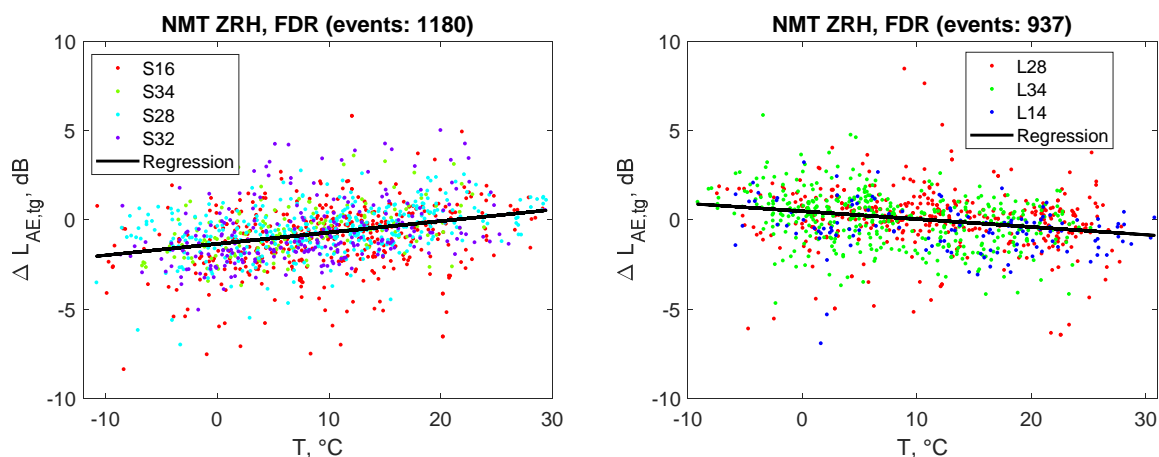
**Abbildung 43:** Jahresgang der Umgebungstemperatur auf Flugplatzhöhe aus den NMT-Daten der Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich (Starts und Landungen) im Vergleich zur Temperaturverteilung aus den Messungen im Jahr 2013 und 2014, welche für die Modellerstellung und Verifizierung verwendet wurden. Die unterschiedlichen Messkampagnen sind nach Pistenrichtung und Nahbereich (NB) bzw. Fernbereich (FB) unterschieden.

In Abbildung 43 wurden die Temperaturen der Validierungsmessungen und die Temperaturen der Messungen aus den Jahren 2013 und 2014 überlagert, die zur Modellerstellung und zur Verifizierung der Emissionsmodelle verwendet wurden [4, 6]. Es wird deutlich, dass die Emissionsmodelle hauptsächlich auf Basis von Messungen startender Flugzeuge in den Sommermonaten erstellt wurden, also bei hohen Umgebungstemperaturen (bzw. niedriger Luftdichte). Der bei der Validierung beobachtete Jahresgang der Pegeldifferenzen legen die Schlussfolgerung nahe, dass der Einfluss der Atmosphäre daher zu einer Unterschätzung in den Wintermonaten führt, während die Sommermonate im Mittel gut übereinstimmen.

Die Koeffizienten des Umströmungsmodells basieren vorwiegend auf der Vermessung von Anflügen im Fernbereich (L34FB in Abbildung 43). Bei dieser Messkampagne herrschten Temperaturen zwischen  $-3^{\circ}\text{C}$  und  $12^{\circ}\text{C}$ , Landungen im Nahbereich wurden dagegen bei Temperaturen zwischen 11 und  $26^{\circ}\text{C}$  vermessen. Bei Landungen im Nahbereich (in welchem sich auch die meisten der Validierungsmesspunkte befinden) trägt allerdings auch der Triebwerkslärm seinen Anteil bei, da die Triebwerke in der Endkonfiguration normalerweise nicht mehr im Leerlauf betrieben werden. Der umgekehrte Jahresgang der Temperaturen lässt sich damit nicht erklären. Jedoch ist im Emissionsmodell für den Umströmungslärm mit der logarithmierten Luftdichte bereits ein atmosphärischer Parameter enthalten. Es wird vermutet, dass der Einfluss dieses Parameters den realen Einfluss überschätzt, da im Jahresgang bei niedrigen Temperaturen und damit hohen Luftdichten die Schallemission zu hoch simuliert wird. Versuchsweise könnte das Umströmungsmodell um die Luftdichte reduziert werden, um zu prüfen ob der Vergleich zwischen Simulation und Messung ohne diesen Modellparameter keinen Jahresgang mehr aufzeigt.

In Abbildung 44 ist der Einfluss der Umgebungstemperatur an der Quelle zum Zeitpunkt der kürzesten Distanz zum Messpunkt gegenüber der Pegeldifferenz  $\Delta L_{\text{AE,tg}}$  aufgetragen. Bei Starts stimmen

die Pegel für hohe Temperaturen gut überein, mit abnehmender Temperatur werden die gemessenen Pegel aber zunehmend unterschätzt. Bei Landungen liegt die Regression bei etwa 11°C bei 0 dB und überschätzt die Pegel bei tieferen Temperaturen und unterschätzt sie bei höheren Temperaturen. Anhand einer robusten Regression wurde eine lineare Abhängigkeit zum  $\Delta L_{AE,tg}$  bestimmt. Für Starts ergibt die Regression eine Steigung von 2.5 dB über den gesamten Temperaturbereich aus Abbildung 44, für Landungen -1.7 dB. Die Schallemission des Triebwerks scheint sich auf dieser Basis bei Starts daher um etwa +0.6 dB pro 10°C Temperaturzunahme zu erhöhen. Im Anhang 11.7 sind die gleichen Abbildungen über die Luftdichte an der Quelle dargestellt, wobei dort die Steigung bei Starts weniger stark ausgeprägt ist.

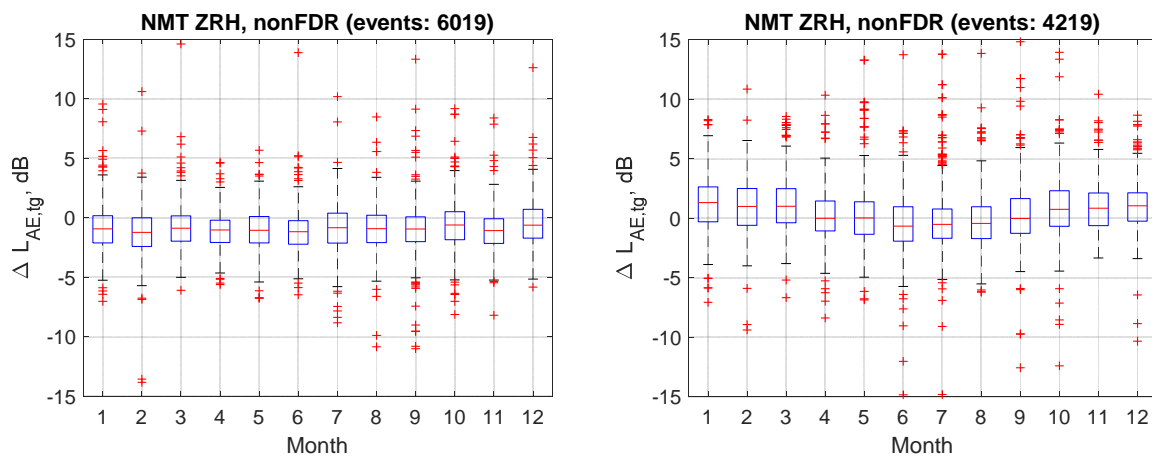


**Abbildung 44:** Einfluss der Temperatur  $T$  auf die Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation-Messung) der NMT-Daten der Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich für Starts (links) und Landungen (rechts). Die Temperatur bezieht sich auf die Umgebungstemperatur aus FDR-Daten zum Zeitpunkt des kürzesten Abstands des jeweiligen Messpunkts.

Abbildung 45 zeigt den Jahresgang der Pegeldifferenzen für die Typen ohne FDR-Daten. Während bei den Landungen ein ähnlicher Trend wie bei den Typen mit FDR-Daten zu beobachten ist, findet man bei Starts wider erwartend keinen Einfluss atmosphärischer Grössen. Allerdings werden die Starts systematisch in jedem Monat unterschätzt. Bei Landungen ist der Trend über die Temperatur mit -3.7 dB über den gesamten Wertebereich von Abbildung 45 hingegen deutlich höher als bei Typen mit FDR-Daten.

Bei Typen ohne FDR-Daten muss der Parameter  $N1$  geschätzt werden. Die Schätzung für die meisten der unten gezeigten Typen basiert dabei auf den  $N1$ -Daten aus der Vermessung von 2013 und 2014, d.h. auch hier waren als Eingangsparameter nur Starts aus den Sommermonaten verfügbar. Trägt man jedoch  $N1$  gegenüber den Jahresgang auf, so hängt auch der Parameter  $N1$  von Atmosphäre ab: Bei höheren Temperaturen und niedriger Luftdichte benötigt das Triebwerk für den gleichen Schub höhere Drehzahlen um den gleichen Massenstrom erzeugen zu können. Zudem wird bei niedriger Dichte mehr Auftrieb benötigt. Aus diesem Grund wird bei der Parameterschätzung das  $N1$  überschätzt, und zwar sowohl bei Typen mit Berücksichtigung von Flex Schub als auch bei Typen mit einem medianen  $N1$ . Es wird angenommen, dass durch diese Überschätzung des  $N1$  im Winter der Einfluss der Temperatur auf die Emission kompensiert wird, weshalb beim Vergleich der

Simulation mit den Messungen bei Typen ohne FDR-Daten (Abbildung 45 links) im Gegensatz zu den Typen mit FDR-Daten kein Jahresgang erkennbar ist.



**Abbildung 45:** Jahresgang der Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation-Messung) aus den NMT-Daten der Typen ohne FDR-Daten am Flughafen Zürich für Starts (links) und Landungen (rechts).

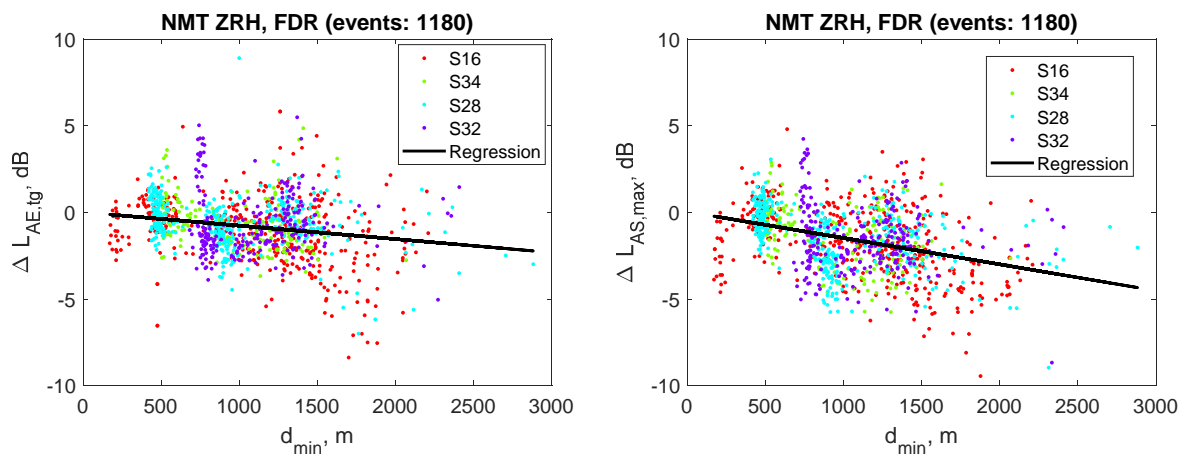
Einzig die Parameterschätzung für Typen mit FDR-Daten berücksichtigt den Einfluss der Temperatur korrekt, da diese Modelle auf den FDR Daten der vorliegenden Untersuchung (Daten über das gesamte Jahr 2016 in Zürich und Genf) basieren. Diese Parameterschätzung wurde auf Basis von Flügen anderer Airlines mit den gleichen Flugzeugtypen ebenfalls im Rahmen der Typen ohne FDR-Daten validiert. In Abbildung 58 im Anhang 11.7 wurden diese Typen isoliert betrachtet. Dabei ist bei korrekter  $N1$ -Schätzung bei den Starts wiederum ein ähnlicher Jahresgang zu beobachten wie bei den Ergebnissen der Typen mit FDR-Daten.

### 6.6.2. Geometrische Parameter

In Abbildung 46 wird die Pegeldifferenz aller Starts über die minimale Distanz zum Messpunkt aufgetragen. Für  $\Delta L_{AE,tg}$  ergibt sich über die robuste Regression eine Steigung von -1.7 dB über einen Distanzbereich von 170 bis 2400 m. Bei Typen ohne FDR-Daten beträgt die Steigung -1.0 dB. Dieser Trend kann, muss aber nicht mit dem vorher gezeigten Einfluss der Atmosphäre zusammenhängen. Allerdings ändern sich mit zunehmender Distanz meist auch die Flughöhe und damit die umgebende Atmosphäre. Unterstützt wird diese Vermutung dadurch, dass die Landungen, die bei den Validierungsmessungen in geringen Höhen aufgezeichnet wurden, einen solchen Trend über die minimale Distanz nicht aufzeigen.

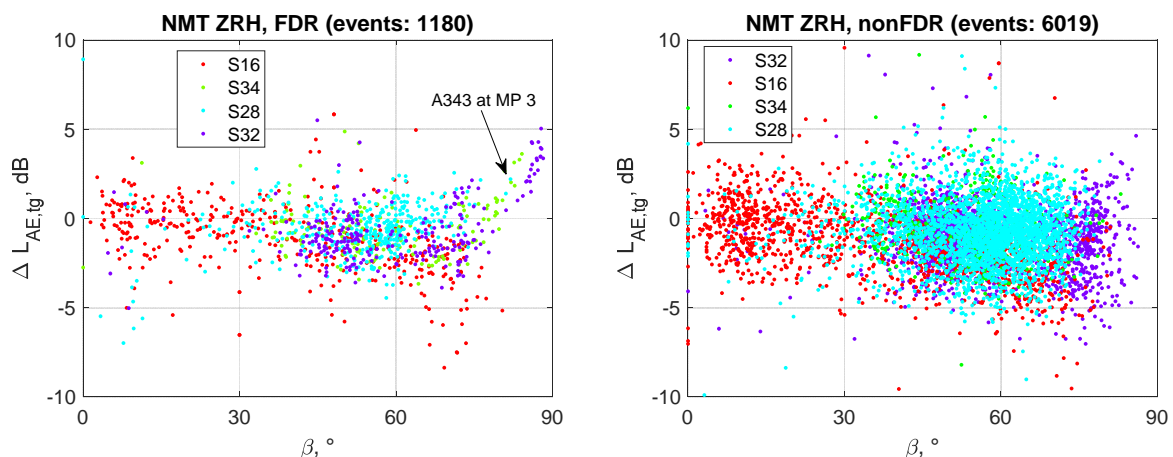
Die Pegeldifferenz des Maximalpegels  $\Delta L_{AS,max}$  zeigt gegenüber dem  $\Delta L_{AE,tg}$  einen deutlich stärkeren Trend von -3.4 dB über die minimale Distanz auf. Dieser stärkere Trend könnte durch Turbulenzen in der Atmosphäre verursacht werden, die mit grösseren Distanzen einen zunehmenden Einfluss auf die Varianz des gemessenen Pegels haben. Der Maximalpegel reagiert hier besonders sensitiv, da Turbulenz zu kurzfristigen Pegelschwankungen von bis zu 6 dB führen kann. Kommt es zu einer turbulenzinduzierten Pegelerhöhung beim Maximalpegel, so wird dieser durch die Simulation un-

terschätzt. Diese Erklärung kann auch für den Einfluss auf den  $\Delta L_{AE,tg}$  gelten, allerdings wirken sich solche Pegelschwankungen hier nur abgeschwächt aus.



**Abbildung 46:** Einfluss der minimalen Distanz zum Messpunkt  $d_{min}$  auf die Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (links) und auf den  $\Delta L_{AS,max}$ . Abgebildet sind ausschliesslich Starts der NMT-Daten mit FDR-Daten am Flughafen Zürich.

Abbildung 47 zeigt den  $\Delta L_{AE,tg}$  über den Einfallswinkel  $\beta$  zum Mikrofon auf, wobei  $0^\circ$  einem senkrechten Einfall auf das nach oben gerichtete Mikrofon entspricht. Beim Datensatz der Typen mit FDR-Daten fällt eine starke Überschätzung der Pegel bei  $\beta > 80^\circ$  auf. Eine solche Messgeometrie findet man allerdings nur bei der flach startenden A343, welche an Messpunkt 3 eine solche Überschätzung aufzeigt. Der Effekt ist entweder der Richtwirkung der A343 geschuldet oder aber meteorologischen Effekten, welche bei State-of-the-Art Fluglärmprogrammen als Lateral Attenuation zusammengefasst werden. Im Widerspruch hierzu konnte ein solcher Trend bei Typen ohne FDR-Daten mit Messungen bis  $\beta = 86^\circ$  jedoch nicht gefunden werden.

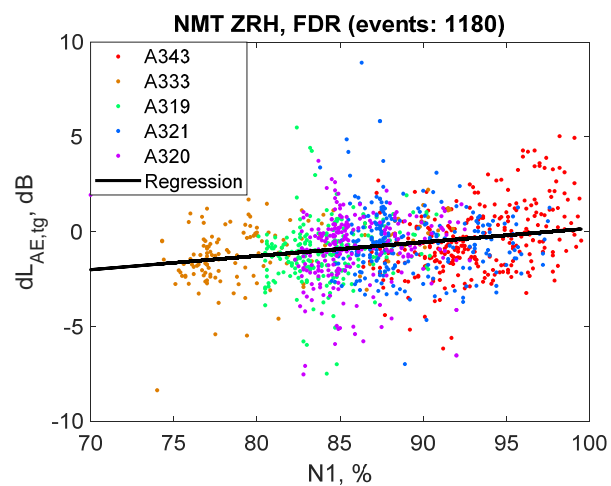


**Abbildung 47:** Vergleich des Einflusses des Einfallswinkels  $\beta$  auf die Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation-Messung) aller Starts für Typen mit FDR-Daten (links) und für Typen ohne FDR-Daten (rechts). Ein Winkel von  $0^\circ$  entspricht senkrechtem Einfall auf das in Richtung Himmel ausgerichtete Mikrofon, ein Winkel von  $90^\circ$  seitlichem Einfall.

### 6.6.3. Flugparameter

Abbildung 48 zeigt die einzige relevante Abhängigkeit der Pegeldifferenz zum Modellparameter  $N1$  auf. Über alle Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich hinweg wird der Pegel zu niedrigen  $N1$  im Mittel um bis zu 1.7 dB unterschätzt (Regression bei 75%  $N1$ ). Dieser Trend kann täuschen, da jeder Typ einen individuellen  $N1$ -Bereich verwendet (siehe farbliche Gruppierung in Abbildung 48). Dennoch zeigen auch einzelne Typen in ihren individuellen  $N1$ -Bereichen eine klare Abhängigkeit zu  $N1$  auf.

Auch dieser Trend muss nicht zwingend ein Einfluss des Parameters  $N1$  sein, sondern könnte auch wieder durch den fehlenden atmosphärischen Parameter induziert sein. Schliesslich hängt die Regelung des reduzierten Startschubs auch von der Aussentemperatur ab, wobei der Cutback zu niedrigen  $N1$ -Werten immer bei 1500 ft erfolgt. Des Weiteren ist dieser Trend wiederum nur bei Typen mit FDR-Daten zu beobachten.



**Abbildung 48:** Einfluss der Drehzahl  $N1$  (bei minimaler Distanz zum Messpunkt) auf die Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$ . Abgebildet sind ausschliesslich Starts der NMT-Daten mit Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich.

## 7. Diskussion

Im vorliegenden Bericht wurden in den Kapiteln 5 bis 5 sehr unterschiedliche Validierungsdatensätze vorgestellt, für welche verschiedene Flugzeugtypen und Modellvarianten auf Basis heterogener Datengrundlagen verwendet wurden. Die simulierten Ereignispegel wichen im Mittel über alle Flugzeugtypen nie mehr als 1 dB vom gemessenen Ereignispegel  $L_{AE}$  ab und die Standardabweichungen reichten von 1.1 bis 2.6 dB. In Anbetracht der Messunsicherheit, die in der Regel bei in einer vergleichbaren Grössenordnung liegt, sowie der Unsicherheiten der Modellierung, der Emissionsmodelle und der Ausbreitungsberechnung, sind die Validierungsergebnisse sehr zufriedenstellend.

Weiter ist zu beachten, dass alle Datensätze spezifische Limitierungen und Einschränkungen aufwiesen:

- Parchim: Am Messtag herrschten keine optimalen Messbedingungen: Durch die hohen Windgeschwindigkeiten gibt es einen starken Einfluss der Turbulenz auf die Messungen. Da der Inputdatensatz idealisiert wurde, konnte kein reales Gelände und keine reale Bodenbedeckung modelliert werden. Bei einigen Messungen waren jedoch deutliche Ausbreitungs- und Meteeffekte sichtbar, die so in der Simulation nicht nachgebildet werden konnten. Zusätzlich konnte der Vergleich nur mit der Modellvariante 3Dred ohne Berücksichtigung der Konfiguration durchgeführt werden, da zu der vermessenen Flugzeug-Triebwerk-Kombination kein 3D Emissionsmodell verfügbar war.
- Schiphol: Der Messaufbau war ungewöhnlich und brachte eine zusätzliche Unsicherheit bei der Berechnung des Bodeneffekts mit sich. Der Datensatz war eingeschränkt auf ausschliesslich einen Messpunkt während des Final Approachs, der zudem sehr nah an der Quelle war.
- NMT Zürich und Genf: Da die Messungen automatisch aufgezeichnet wurden, ist die Messdatenkontrolle gering bzw. obliegt den Flughäfen. Es waren ausserdem keine Pegel-Zeit-Verläufe zur Kontrolle und zur Analyse möglicher Ursachen verfügbar, der Vergleich basiert nur auf Einzahlwerten. Bei der Modellierung waren die auf Hausdächern installierten Messpunkte die grösste Herausforderung. Speziell in Genf stellte sich Messpunkt 5 als klarer Ausreisser dar, welcher grossen Einfluss auf den Mittelwert der Resultate hatte, da in Genf nur vier Messpunkte vorhanden waren.

Die Validierung mittels NMT-Daten stellte einen besonders strengen Vergleich dar, da hier die berücksichtigten Flüge nicht zufällig, sondern bewusst für jede Route gleichmässig über den gesamten Wertebereich des Abfluggewichts, der Temperatur und der relativen Feuchte ausgewählt wurden. Da für alle Flugzeugtypen ungefähr die gleiche Anzahl Flüge ausgewählt wurde, gehen auch alle Flugzeugtypen gleichwertig in den gemeinsamen Mittelwert und die gemeinsame Standardabweichung ein. Dies entspricht nicht der realen Verteilung pro Typ und des realen Flottenmix, welche die Jahresbelastung eines Flughafens ausmachen. Eine Gewichtung der Ergebnisse nach Bewegungen würde dementsprechend auch zu einem anderen Ergebnis führen.

Im Vergleich zwischen BASIC und METEO-Modus konnte über alle Validierungsdatensätze hinweg kein grosser Unterschied auf den A-bewerteten Ereignispegel festgestellt werden. Spektral führte der METEO-Modus jedoch bei hohen Frequenzen zu besseren Ergebnissen, welche jedoch nur zu ei-



nem geringen Anteil den Ereignispegel beeinflussen. Dieses Resultat unterstützt die These, dass für die Ausbreitungsberechnung von Jahresbelastungen die Annahme einer homogenen Atmosphäre und die Vernachlässigung von Wind und Temperaturgradienten (BASIC-Modus) im Allgemeinen die Berechnungsergebnisse nicht verschlechtern. Dies gilt für die im Bericht verglichenen Messgeometrien, räumlich und zeitlich gemittelten atmosphärischen Profilen. Für andere Situationen (Windgeschwindigkeiten am Boden über 5 m/s) und Messpunkte mit streifendem Schalleinfall mag dies nicht mehr stimmen und wurde in diesem Bericht nicht untersucht.

Bei näherer Betrachtung der Validierungsergebnisse fanden sich Einflüsse verschiedener Parameter wieder, die nicht erwartet wurden. Bei den NMT Daten in Zürich fiel beispielsweise eine systematische Unterschätzung von Starts auf, welche durch die hohen Schallemissionen in Bezug auf einen Jahresbetrieb besonders wichtig sind. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Vermessung der Starts im Sommer 2013 und 2014 die Emissionen des Antriebsmodells im Vergleich zu den Validierungsdaten im Winter deutlich unterschätzt wurden. Es sollte ein Versuch unternommen werden, einen atmosphärischen Parameter im Antriebsmodell aufzunehmen, da das Modell sonst nicht uneingeschränkt auf andere Flughäfen übertragbar ist. Den grössten Einfluss auf die Pegeldifferenzen des  $L_{AE}$  zeigte hierbei die Umgebungstemperatur bei der Schallquelle. Allerdings ist es fraglich, ob der eingeschränkte Wertebereich der vorhandenen Messdaten für eine zuverlässige Bestimmung des Koeffizienten dieses Parameters ausreicht.

Weiterhin wurde mit zunehmender Distanz der Schallquelle eine verstärkte Unterschätzung der Ereignispegel bei Starts festgestellt. Hier sollte geklärt werden, ob es eine Korrelation zum noch fehlenden atmosphärischen Einfluss gibt und inwieweit die Turbulenz der Atmosphäre die Pegel bei grösseren Distanzen erhöht. Der Einfluss der Turbulenz bei Starts mit zunehmender Distanz zur Schallquelle wurde bei der Betrachtung des Maximalpegels deutlich, da dieser besonders sensitiv auf Pegelschwankungen reagiert.

Auch die unterschiedliche Datengrundlage zwischen Typen mit und ohne FDR-Daten zeigten Limitierungen in der Simulationskette und der Übertragbarkeit der Modelle auf. Während die auf FDR-Daten basierende Parameterschätzung von  $N1$  vergleichbare Ergebnisse lieferte wie bei der direkten Anwendung der FDR-Daten, ist die Parameterschätzung für Typen ohne FDR-Daten mit grösseren Unsicherheiten verbunden. Sie basiert vorwiegend auf Flugparametern aus Sommermonaten, so dass auch die Parameterschätzung im Winter systematisch zu hohe  $N1$ -Werte liefert.

Während dieser Effekt am Flughafen Zürich den fehlenden Einfluss der Atmosphäre auf die Emissionen kompensierte, ist die Parameterschätzung für diese Flugzeugtypen nicht ohne weiteres auf andere Flughäfen und Jahreszeiten übertragbar. Diese Kompensation wird beim Hinzufügen eines atmosphärischen Parameters zum Antriebsmodell zu einem Jahresgang der Pegeldifferenzen zwischen Simulation und Messung führen, solange die Parameterschätzung nicht ebenfalls angepasst wird. Da auch für Landungen eine Abhängigkeit des  $N1$  vom Jahresgang der Temperatur gefunden wurden, müsste streng genommen auch die Parameterschätzung des  $N1$  für Landungen um einen atmosphärischen Parameter erweitert werden.

## 8. Fazit

Mit diesem Bericht wurden die sonAIR Emissionsmodelle der Version V1.1-0013 mit dem Ausbreitungsmodell sonX der Version V2.8.8 mit fünf verschiedenen Datensätzen validiert. Unter Berücksichtigung der bestehenden Messunsicherheit und im Vergleich zur Genauigkeit bei der Berechnung anderer Lärmarten sind die Ergebnisse für den Ereignispegel insgesamt sehr zufriedenstellend (Tabelle 23 und Tabelle 24). Der Maximalpegel hingegen wird im Vergleich zur Messung im Mittel um etwa 1 dB unterschätzt. Als Ursache wird der Einfluss der Turbulenz vermutet, der mit zunehmender Distanz zwischen Quelle und Messpunkt die gemessenen Pegel systematisch erhöht. Die Standardabweichung des Maximalpegels ist dabei leicht höher, aber auf ähnlich gutem Niveau wie die Standardabweichungen des Ereignispegels.

Es hat sich gezeigt, dass die Validierung von Typen mit FDR-Daten im Vergleich zu Typen ohne FDR-Daten im Mittel etwas besser übereinstimmen bei einer um etwa 0.5 dB geringeren Standardabweichung. Die grössere Varianz bei Typen ohne FDR Daten lässt sich einerseits anhand der schlechteren Datengrundlage bei Erstellung der Emissionsmodelle als auch durch eine zusätzliche Unsicherheit bei der Schätzung des Parameters  $N1$  erklären. Abweichungen des Mittelwerts um wenige Zehntel Dezibel liegen zudem innerhalb der Messunsicherheit, weshalb Mittelwert und Varianz der Resultate immer gemeinsam betrachtet werden müssen.

Trotz der bereits guten Ergebnisse wurden bei genauerer Betrachtung der Abhängigkeiten der Pegeldifferenzen zu bekannten Einflussgrössen Ansätze für weiterführende Modellverbesserungen gefunden. Es konnte gezeigt werden, dass das Fehlen eines atmosphärischen Parameters im Antriebsmodell zu einer Jahresgangabhängigkeit der NMT-Daten in Zürich führte. Da die Emissionsmodelle vorwiegend auf Messungen aus dem Sommer beruhen, werden die Emissionen von Starts im Winter unterschätzt. Dies würde die generelle Unterschätzung von Starts im NMT-Datensatz am Flughafen Zürich erklären. Bei Typen ohne FDR-Daten zeigte sich zudem auch, dass die Parameterschätzung den Einfluss des Temperaturverlaufs nicht vollständig berücksichtigt, was zu einer grösseren Unsicherheit der Ergebnisse führt. Beim Maximalpegel wurde eine Abhängigkeit der Differenzen zur Distanz zwischen Empfänger und Quelle aufgezeigt. Dies sind wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung von sonAIR, die allerdings zusätzlicher Abklärungen bedarf (s. Kapitel 9). Zudem soll mit diesem Bericht die bereits publizierte Version der Emissionsmodelle validiert werden.

Ein Vergleich der Modellvarianten 3D und 3Dred, die sich in der Berücksichtigung der Konfiguration des Flugzeugs unterscheiden, zeigte kaum einen Unterschied. Ein Grund hierfür ist, dass bei fast allen NMT-Messpunkten für Landungen in Zürich und Genf die Flugzeuge schon im Endanflug sind und sich deren Konfiguration nicht mehr ändert. Der Einfluss der Konfiguration wird bei der punktuellen Messung von Landungen deutlich, bei der die Standardabweichung bei den 3Dred-Modellen von 1.3 auf 2.1 dB stieg (Tabelle 23).

Im Vergleich zwischen BASIC und METEO-Modus konnte auf Basis des A-bewerteten Ereignispegels kein grosser Unterschied festgestellt werden. Für die Ausbreitungsberechnung für Jahresbelastungen kann daher für Situationen mit Windgeschwindigkeiten unter 5 m/s eine homogene Atmosphäre unter Vernachlässigung von Wind und Temperaturgradienten (BASIC-Modus) verwendet werden.

**Tabelle 23:** Übersicht der Validierungsergebnisse aller Datensätze, die Typen mit FDR-Daten vergleichen. Die Tabelle umfasst die Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3D-Messung, 3Dred-Messung und 2Dred-Messung, jeweils mit der Ausbreitungsberechnung im BASIC- als auch METEO-Modus.

Modell	Diff. [dB]	Punktuell		NMT ZRH		NMT GVA	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
3D, METEO	$\Delta L_{AE,t10}$	0.4	1.3	-0.4	1.9	0.5	1.7
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.1	1.5	-1.0	2.1	0.3	1.9
3D, BASIC	$\Delta L_{AE,t10}$	0.2	1.3	-0.3	2.1	0.6	1.7
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.2	1.5	-0.9	2.2	0.4	1.9
3Dred, METEO	$\Delta L_{AE,t10}$	0.3	2.1	-0.3	2.1	0.6	1.7
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.2	2.0	-0.9	2.1	0.4	1.9
3Dred, BASIC	$\Delta L_{AE,t10}$	0.2	2.0	-0.2	2.3	0.7	1.7
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.3	2.0	-0.8	2.2	0.5	1.9
2Dred, METEO	$\Delta L_{AE,t10}$	0.2	2.1	-0.3	2.4	0.5	1.8
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.3	2.0	-0.9	2.3	0.3	2.1
2Dred, BASIC	$\Delta L_{AE,t10}$	0.1	2.0	-0.1	2.4	0.6	1.8
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.4	2.0	-0.8	2.4	0.4	2.1

**Tabelle 24:** Übersicht der Validierungsergebnisse aller Datensätze, die Typen ohne FDR-Daten vergleichen. Die Tabelle umfasst die Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3Dred-Messung und 2Dred-Messung, jeweils mit der Ausbreitungsberechnung im BASIC- als auch METEO-Modus.

Modell	Diff. [dB]	Schiphol		NMT ZRH		NMT GVA		Parchim	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
3Dred, METEO	$\Delta L_{AE,t10}$	-0.5	1.1	-0.4	2.6	0.8	2.1	0.8	2.1
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.8	1.2	-1.1	2.6	0.7	2.5	-0.7	2.1
3Dred, BASIC	$\Delta L_{AE,t10}$	-0.5	1.1	-0.3	2.6	1.0	2.2	0.6	2.0
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.8	1.2	-1.0	2.7	0.8	2.5	-0.9	2.1
2Dred, METEO	$\Delta L_{AE,t10}$	-0.6	1.0	-0.2	2.5	0.6	2.1	0.8	2.2
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.8	1.0	-1.0	2.6	0.4	2.5	-0.8	2.2
2Dred, BASIC	$\Delta L_{AE,t10}$	-0.6	1.0	-0.1	2.6	0.8	2.1	0.6	2.1
	$\Delta L_{AS,max}$	-0.8	1.0	-0.9	2.7	0.6	2.5	-0.9	2.2

## 9. Ausblick

In Bezug auf die Verwendung von sonAIR für gesetzesrelevante Berechnungen gibt es noch einige Fragen zu beantworten. Obwohl der Ereignispegel im Mittel gut übereinstimmte, kann eine systematische Unterschätzung der energiereichen Starts zu einer Unterschätzung der Jahresbelastung führen. Als Ursache wurde der eingeschränkte Wertebereich der Messdaten von der Modellerstellung oder ein fehlender atmosphärischer Parameter im Modell identifiziert. An Flughäfen in besonders kalten oder warmen klimatischen Regionen besteht daher die Gefahr einer Unter- oder Überschätzung der Ereignispegel. Für die Übertragbarkeit sollten die Emissionsmodelle daher nochmals überarbeitet oder auf Basis von weiteren Messdaten erstellt werden.

Der Maximalpegel wurde ebenfalls systematisch unterschätzt, wobei eine Abhängigkeit über die Distanz auf eine nötige Korrektur bzgl. des Einflusses der Turbulenz hinweist. Als Ergänzung zum vorliegenden Bericht sollten daher Messungen mit speziellen Wettersituation und Starkwindsituation durchgeführt und analysiert werden, um meteorologische Effekte in Einzelsituationen validieren zu können. Solche Messungen sollten im Zusammenhang mit der Fragestellung zur „Lateral Attenuation“ durchgeführt werden, die in allen bisherigen Fluglärmmodellen als empirische Zusatzdämpfung für flache Schalleinfallswinkel implementiert ist. Bei den vorliegenden Messungen konnte allerdings lediglich an einem Messpunkt und nur für einen Flugzeugtyp ein möglicher Hinweis für eine solche Dämpfung gefunden werden.

Im Anschluss an die Einführung der vorgeschlagenen Änderungen sollte der in diesem Bericht beschriebene Validierungsprozess wiederholt werden. Ausserdem sollte die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das DL-Tool erneut überprüft werden (vgl. [4]), da es sowohl auf Seiten des DL-Tools, des WS-Tools und der Emissionsmodelle einige Änderungen seit dem letzten Vergleich gab.

Im Rahmen eines parallelen Projektes der Quellvermessung neuer Flugzeugtypen der Swiss werden Emissionsmodelle für die B777, der BCS1 und BCS3 erstellt. Auch diese Emissionsmodelle sollten mit den in diesem Bericht bereits aufbereiteten, unabhängigen Daten validiert werden.

## 10. Abkürzungen, Datengrundlagen, Literatur

### 10.1. Abkürzungen

3D	Das bestverfügbare Modell mit Einfluss der Konfiguration und dreidimensionaler Richtwirkung
3Dred	Reduziertes Modell, mit dreidimensionaler Richtwirkung aber ohne Einfluss der Konfiguration
2Dred	Reduziertes Modell ohne Einfluss der Konfiguration, mit zweidimensionale Richtwirkung
ATOM	Von der Airline angegebenes Abfluggewicht (Actual Takeoff Mass)
BASIC	BASIC-Modul der Ausbreitungsberechnung in sonX, berücksichtigt keine Krümmung der Schallstrahlen
DL-Tool	Dienstleistungs-Tool für Einzelflugsimulationen mit sonAIR in ArcGIS
FDR	Aufgezeichnete Flugparameter (Flight Data Records)
METEO	METEO-Modus der Ausbreitungsberechnung in sonX, berücksichtigt den Einfluss von vertikalen meteorologischen Profilen für eine verfeinerte Berechnung der Hinderniswirkung und Schattenzonen durch Krümmung der Schallstrahlen
$L_{AE}$	Ereignispegel: Gesamtenergieinhalt eines Ereignisses normiert auf eine Sekunde, ausgedrückt als Pegelgrösse
$L_{AS,max}$	A-bewerteter Maximalpegel (Integration mit der Zeitkonstante Slow von 1 s)
WS-Tool	Wissenschaftliches Tool für Einzelflugsimulationen mit sonAIR in Matlab

### 10.2. Datengrundlagen

- [A] TU Delft, 2017: Messdaten für Schiphol, Audiosignale, Bewegungsliste inkl. Flugparameter und Wetterdaten des KNMI. Per FTP von R. Merino-Martinez am 21.03.2017.
- [B] DLR Göttingen, 2017: Relative Messpunktkoordinaten, anonymisierte Flugbahnen und vertikale Wetterdaten. Per FTP von U. Isermann am 28.06.2017.
- [C] Swiss International Air Lines, 2017. Detaillierte Flugdaten (FDR) für ausgewählte Flüge am Flughafen Zürich aus dem Jahr 2016 (gesamte Swiss Flotte ohne C-Series). Per Email von J. Speck am 24.07. und 25.07.2017 und Nachlieferungen vom 25.09.2017, 28.09.2017 und 09.01.2018.
- [D] Flughafen Zürich AG, 2017. Flugpläne und Bewegungslisten mit Durchstosszeiten aus der Analyse von Flugbahnen mit definierten Ebenen für den Zeitraum 26.09. bis 27.10.2017. Per Email von E. Hug am 21.11.2017.
- [E] Swiss International Air Lines, 2018. Detaillierte Flugdaten (FDR) für ausgewählte Flüge am Flughafen Genf aus dem Jahr 2016 (gesamte Swiss Flotte ohne C-Series). Per Email von J. Speck am 09.01.2018.
- [F] Swiss International Air Lines, 2018. Detaillierte Flugdaten (FDR) für Anflüge auf Piste 28 und 34 im Zeitraum vom 26.09.2017 bis 26.10.2017. Per Email von J. Speck am 01.02.2018.

- [G] Flughafen Genf, 2018. Einzelereignisse der Swiss-Flotte der Noise-Monitoring-Terminals des Flughafens Genf für das gesamte Jahr 2016. Per FTP von M. Quentin am 01.02.2018.
- [H] Flughafen Zürich AG, 2018. Einzelereignisse der Noise-Monitoring-Terminals des Flughafens Zürich für das gesamte Jahr 2016, inklusive Ereignispegelspektren. Per Email von E. Hug am 15.03.2018.
- [I] Flughafen Genf, 2018. Einzelereignisse aller Flugbewegungen der Noise-Monitoring-Terminals des Flughafens Genf für das gesamte Jahr 2016. Per FTP von M. Quentin am 13.06.2018.

### 10.3. Literatur

- [1] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Zusammenfassung und Ausblick*. Bericht Nr. 5211.00687.100.11. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [2] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Entwicklung Emissionsmodell und Aufbau Emissionsdatenbank*. Bericht Nr. 5211.00687.100.12. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [3] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Umsetzungen der Einzelflugsimulation*. Bericht Nr. 5211.00687.100.15. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [4] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Validierung (Verifizierung)*. Bericht Nr. 5211.00687.100.16. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [5] Empa, 2016. *Dokumentation des sonX Ausbreitungsmodells. Programmversion: sonRAIL V5.0.0 bzw. sonARMS V4.0.0 bzw. sonAIR V2.2.0 (vom 12. September 2016)*. Bericht Nr. 5211.00687.100.14. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, 146, Dübendorf.
- [6] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Quellenvermessung und Auswertung*. Bericht Nr. 5211.00687.100.13 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [7] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2016*. Bericht Nr. 5214.014942. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] Empa, 2017. *Exposition au bruit des aéronefs, Aéroport International de Genève (AIG): Notice technique 2016*. Bericht Nr. 5214.014943. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2018. *Validierung sonAIR, Teil 1: Maximalpegelkorrektur*. Bericht Nr. 5211.01324.100.01 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [10] Empa, 2018. *Validierung sonAIR, Teil 2: Quellenseparation sonAIR im Nahbereich am Beispiel des A340-300*. Bericht Nr. 5211.01324.100.01 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [11] Empa, 2018. *Validierung sonAIR, Teil 3: Einfluss Waldreflexionen und Anpassungen Primärflächen*. Bericht Nr. 5211.01324.100.01 - 3. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.

- [12] Empa, 2018. *Abschätzung von Flugparametern auf der Basis von Radardaten*. Bericht Nr. 5211.01322.100.00. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [13] Neise, W., 2007. *Zusammenfassender Schlussbericht: Lärmoptimierte An- und Abflugverfahren (LAnAb)*. Forschungsverbund Leiser Verkehr, 151.
- [14] Simons, D.G., M. Snellen, B. van Midden, M. Arntzen, and D.H.T. Bergmans, 2015. *Assessment of Noise Level Variations of Aircraft Flyovers Using Acoustic Arrays*. Journal of Aircraft **52**, 1625-1633.
- [15] van der Goot, R., J. Hendriks, K. Scheper, G. Hermans, W. van der Wal, and D.G. Simons, 2012. *A low cost, high resolution acoustic camera with a flexible microphone configuration*, in Berlin Beamforming Conference: Berlin.
- [16] Zellmann, C., 2018. *Development of an Aircraft Noise Emission Model Accounting for Flight Parameters*. Doctoral thesis. Institute of Fluid Dynamics and Technical Acoustics. Technische Universität Berlin, 168, Berlin.
- [17] Zellmann, C., D. Jäger, and F. Schlatter, 2018. *Model Adjustment and Validation to Account for the Airflow Deflector Retrofit of the A320 Family*. in *Proceedings of Euronoise 2018*. Crete: European Acoustics Association.
- [18] Zellmann, C., B. Schäffer, J.M. Wunderli, U. Isermann, and C.O. Paschereit, 2017. *Aircraft Noise Emission Model Accounting for Aircraft Flight Parameters*. Journal of Aircraft **55**, 682-695.

## 11. Anhang

### 11.1. FDR-Datenstruktur

No.	Name (Units)	Matlab
1	Flight Record	fdr_id
2	Flight Date (Exact) (UTC)	date
3	Fleet	type
4	Tail Number	imm
5	P861: GMT (hrs)	utc
6	P861: Offset from BRP	counter
7	P861: Latitude (degrees)	lat
8	P861: Longitude (degrees)	lon
9	P861: Air Temperature (outside) (deg C)	oat
10	P861: Air density (kg/m <sup>3</sup> )	rho
11	P861: Air Pressure (hPa (mbar))	p
12	P861: Headwind (knots)	hdwind
13	P861: Crosswind (knots)	crwind
14	P861: Vertical Wind (ft/min)	vwind
15	P861: Corrected MSL Altitude (ft)	h_msl
16	P861: Barometric Altitude (ft)	h_baro
17	P861: Geometric Altitude (ft)	h_geom
18	P861: Groundspeed (knots)	gs
19	P861: Airspeed (calibrated) (knots)	cas
20	P861: True Airspeed TAS (knots)	tas
21	P861: Vertical Speed (ft/min)	vs
22	P861: Pitch Attitude (deg)	theta
23	P861: Angle of Attack (deg)	alpha
24	P861: Roll Attitude (deg)	phi
25	P861: Heading (true) (deg)	psi
26	P861: Track Angle (true) (deg)	track
27	P861: Drift Angle (deg)	drift
28	P861: Sideslip Angle (deg)	beta
29	P861: N1 Average (%)	n1
30	P861: N2 Average (%)	n2
31	P861: EPR Average	epr
32	P861: Thrust Reversers Deployed (0 = deployed)	reverser
33	P861: Flap / Slat Handle Position	flaps
34	P861: Flaps Position (deg+=TED)	flapsdeg
35	P861: Speed Brakes Deployed (1 = Deployed)	speedbrake
36	P861: Speed Brake Position (degrees)	sbdeg
37	P861: Gross Weight (kg)	mass
38	P861: Landing Gear Position (0 = up, 1 = in transit, 2 = down)	gearst
39	P861: Acceleration Longitudinal (g's)	accx
40	P861: Acceleration Lateral (g's)	accy
41	P861: Acceleration Normal (g's)	accz



## 11.2. Zuweisung der AV-Bodenbedeckungsdaten zu sonX-Kategorien

Amtliche Vermessung Kanton Zürich		sonX	
ART	ART_TXT	Nr.	Bezeichnung
0	Gebaeude.Verwaltung	0	AV_Geb
1	Gebaeude.Wohngebaeude	0	AV_Geb
2	Gebaeude.Land_Forstwirtschaft_Gaertnerei	0	AV_Geb
3	Gebaeude.Verkehr	0	AV_Geb
4	Gebaeude.Handel	0	AV_Geb
5	Gebaeude.Industrie_Gewerbe	0	AV_Geb
6	Gebaeude.Gastgewerbe	0	AV_Geb
7	Gebaeude.Nebengebäude	0	AV_Geb
8	befestigt.Strasse_Weg.Strasse	1	AV_Strasse
9	befestigt.Strasse_Weg.Velo_Fussweg	2	AV_Trottoir
10	befestigt.Strasse_Weg.Landwirtschaftsstrasse	25	AV_Uebrige
11	befestigt.Strasse_Weg.Waldstrasse	25	AV_Uebrige
12	befestigt.Trottoir	2	AV_Trottoir
13	befestigt.Verkehrinsel	3	AV_V-Insel
14	befestigt.Bahn	4	AV_Bahn
15	befestigt.Flugplatz	5	AV_Flugplatz
16	befestigt.Wasserbecken	6	AV_Wasser
17	befestigt.uebrige_befestigte.Parkplatz	7	AV_Befestigte
18	befestigt.uebrige_befestigte.Hausumschwung	7	AV_Befestigte
19	befestigt.uebrige_befestigte.Sportanlage	7	AV_Befestigte
20	befestigt.uebrige_befestigte.andere_befestigte	7	AV_Befestigte
21	humusier.Acker_Wiese_Weide	8	AV_Wiese
22	humusiert.Intensivkultur.Reben	9	AV_Reben
23	humusiert.Intensivkultur.uebrige_Intensivkultur	10	AV_Intensivk
24	humusiert.Gartenanlage.Gartenanlage_Hausumschwung	11	AV_Garten
25	humusier.Gartenanlage.Parkanlage	11	AV_Garten
26	humusiert.Gartenanlage.Sportanlage	11	AV_Garten
27	humusiert.Gartenanlage.Friedhof	11	AV_Garten
28	humusiert.Hoch_Flachmoor	12	AV_Moor
29	humusiert.uebrige_humusierte.Verkehrsteilerflaeche	13	AV_Humus
31	humusiert.uebrige_humusierte.andere_humusierte	13	AV_Humus
32	Gewaesser.stehendes	14	AV_See
33	Gewaesser.fliessendes	15	AV_Fluss
34	Gewaesser.Schilfguertel	16	AV_Schilf
35	bestockt.geschlossener_Wald	17	AV_Wald
38	bestockt.uebrige_bestockte	20	AV_Bestockt
39	vegetationslos.Fels	21	AV_Fels
41	vegetationslos.Geroell_Sand	23	AV_Geroell
42	vegetationslos.Abbau_Deponie.Abbau	24	AV_Deponie
43	vegetationslos.Abbau_Deponie.Deponie	24	AV_Deponie

## 11.3. Anzahl simulierte Flüge pro Typ-Triebwerk-Kombination

### 11.3.1. Empa Messungen in grossen Abständen zum Flughafen Zürich

**Tabelle 25:** Anzahl simulierter Flüge pro Typ und Piste für Vergleich mit den punktuellen Messungen im Fernbereich.

		Anzahl Flüge				
Flugzeugtyp		A319	A320	A321	A333	A343
Triebwerk		CFM56-5B	CFM56-5B	CFM56-5B	Trent7	CFM56-5C
Route	L28	60	99	100	0	4
	L34	6	23	13	73	16
Total		66	122	113	73	20
						394

### 11.3.2. Noise Monitoring Daten der Flughäfen Zürich und Genf – Typen mit FDR-Daten

**Tabelle 26:** Anzahl simulierter Flüge pro Typ und Piste für den Vergleich mit den NMT-Messungen des Flughafen Zürich.

		Anzahl Flüge				
Flugzeugtyp		A319	A320	A321	A333	A343
Triebwerk		CFM56-5B	CFM56-5B	CFM56-5B	Trent7	CFM56-5C
Route	L14	17	26	28	28	29
	L28	30	28	29	26	27
	L34	28	30	30	24	30
	S16	14	29	26	27	26
	S28	29	26	27	29	26
	S32	29	14	12	27	25
	S34	10	13	15	0	29
	Total	157	166	167	161	192
						843

**Tabelle 27:** Anzahl simulierter Flüge N pro Typ und Piste für den Vergleich mit den NMT-Messungen des Flughafen Genf.

		Anzahl Flüge				
Flugzeugtyp		A319	A320	A321	A333	A343
Triebwerk		CFM56-5B	CFM56-5B	CFM56-5B	Trent7	CFM56-5C
Route	L05	22	29	30	29	1
	L23	22	27	28	29	0
	S05	18	27	30	30	3
	S23	24	25	26	28	1
Total		86	108	114	116	5
						429

### 11.3.3. Noise Monitoring Daten der Flughäfen Zürich und Genf – Typen ohne FDR-Daten

**Tabelle 28:** Anzahl simulierter Flüge pro Typ und Piste ohne FDR-Daten für den Vergleich mit den NMT-Messungen des Flughafens Zürich.

Typ	Triebwerk	Anzahl Flüge								Total
		L14	L28	L34	S10	S16	S28	S32	S34	
<b>A319</b>	CFM56-5A	40	0	0	0	0	30	18	0	<b>88</b>
	CFM56-5B	39	40	40	0	39	40	40	39	<b>277</b>
	V2500	39	38	39	0	0	39	39	0	<b>194</b>
<b>A320</b>	CFM56-5A	39	40	0	0	0	40	39	0	<b>158</b>
	CFM56-5B	40	40	39	0	40	40	40	40	<b>279</b>
	V2500	40	39	38	0	0	39	40	0	<b>196</b>
<b>A321</b>	CFM56-5B	39	40	20	0	20	40	39	20	<b>218</b>
	V2500	39	40	19	0	10	40	36	0	<b>184</b>
<b>A333</b>	TRENT7	40	0	20	0	36	27	26	0	<b>149</b>
<b>A343</b>	CFM56-5C	47	11	7	0	16	33	9	12	<b>135</b>
<b>A388</b>	GP7270	40	40	0	0	18	0	37	0	<b>135</b>
	TRENT9	39	0	40	0	20	0	0	0	<b>99</b>
<b>B733</b>	CFM56-3	40	0	0	0	19	20	39	0	<b>118</b>
<b>B734</b>	CFM56-3	30	3	0	0	16	15	7	0	<b>71</b>
<b>B735</b>	CFM56-3	105	7	0	1	12	93	5	0	<b>223</b>
<b>B736</b>	CFM56-7B	38	0	0	0	0	40	0	0	<b>78</b>
<b>B737</b>	CFM56-7B	39	40	0	0	0	39	28	0	<b>146</b>
<b>B738</b>	CFM56-7B	40	39	0	0	18	40	38	0	<b>175</b>
<b>B739</b>	CFM56-7B	39	0	0	0	10	37	27	0	<b>113</b>
<b>B762</b>	CF6-80C2	4	0	0	0	0	2	1	0	<b>7</b>
<b>B763</b>	CF6-80C2	39	0	39	0	39	39	0	0	<b>156</b>
	PW4060	38	0	0	0	39	39	0	0	<b>116</b>
<b>B764</b>	CF6-80C2	38	0	40	0	39	0	0	0	<b>117</b>
<b>CRJ7</b>	CF34-BC5	72	15	11	0	0	94	27	0	<b>219</b>
<b>CRJ9</b>	CF34-BC5	39	40	19	0	0	20	40	0	<b>158</b>
<b>CRJX</b>	CF34-BC5	33	2	0	0	1	32	1	0	<b>69</b>
<b>E170</b>	CF34-8E	40	34	0	0	0	39	19	0	<b>132</b>
<b>E190</b>	CF34-10E	39	40	39	0	19	40	39	30	<b>246</b>
<b>F100</b>	TAY650-15	40	40	38	0	20	40	40	38	<b>256</b>
<b>FA7X</b>	PW307	39	20	0	0	0	40	19	0	<b>118</b>
<b>Total</b>		<b>1233</b>	<b>608</b>	<b>448</b>	<b>1</b>	<b>431</b>	<b>1037</b>	<b>693</b>	<b>179</b>	<b>4630</b>

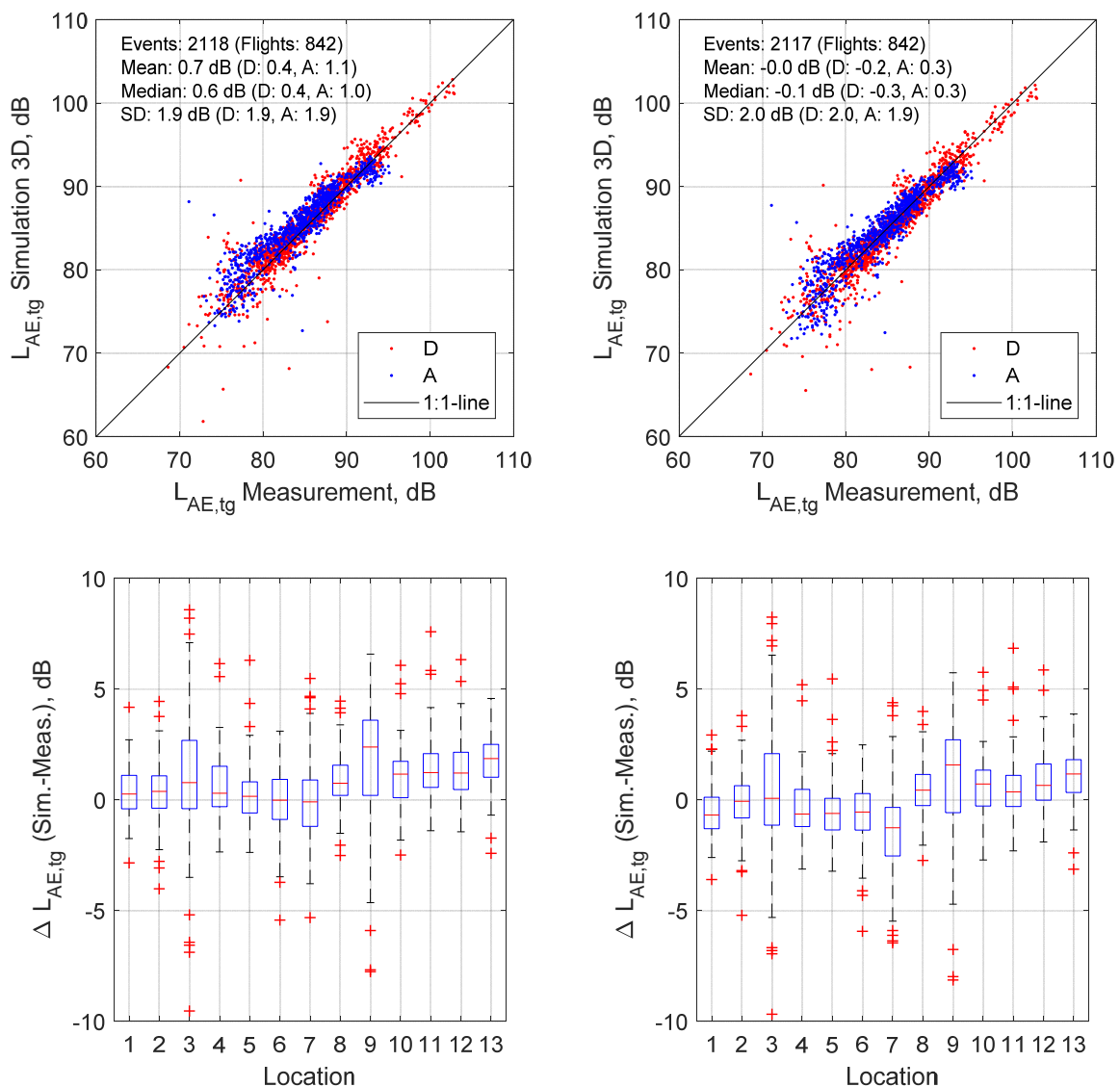
**Tabelle 29: Anzahl simulierter Flüge pro Typ und Piste ohne FDR-Daten für den Vergleich mit den NMT-Messungen des Flughafens Genf.**

Typ	Triebwerk	Anzahl Flüge				Total
		L05	L23	S05	S23	
<b>A319</b>	CFM56-5A	40	40	35	34	<b>149</b>
	CFM56-5B	40	39	37	39	<b>155</b>
	V2500	38	39	39	40	<b>156</b>
<b>A320</b>	CFM56-5A	38	39	36	36	<b>149</b>
	CFM56-5B	40	38	39	40	<b>157</b>
	V2500	40	39	39	38	<b>156</b>
<b>A321</b>	CFM56-5B	39	40	37	39	<b>155</b>
	V2500	39	40	36	36	<b>151</b>
<b>A333</b>	TRENT7	40	40	40	36	<b>156</b>
<b>A343</b>	CFM56-5C	2	6	1	4	<b>13</b>
<b>B733</b>	CFM56-3	39	38	32	38	<b>147</b>
<b>B734</b>	CFM56-3	32	82	42	72	<b>228</b>
<b>B735</b>	CFM56-3	23	30	20	25	<b>98</b>
<b>B736</b>	CFM56-7B	53	74	56	60	<b>243</b>
<b>B737</b>	CFM56-7B	40	40	37	38	<b>155</b>
<b>B738</b>	CFM56-7B	40	38	36	38	<b>152</b>
<b>B739</b>	CFM56-7B	31	65	33	56	<b>185</b>
<b>B762</b>	CF6-80C2	5	6	3	5	<b>19</b>
<b>B763</b>	CF6-80C2	16	35	16	35	<b>102</b>
	PW4060	38	39	31	36	<b>144</b>
<b>B764</b>	CF6-80C2	32	41	27	30	<b>130</b>
<b>CRJ7</b>	CF34-8C5	19	24	18	20	<b>81</b>
<b>CRJ9</b>	CF34-8C5	39	40	36	40	<b>155</b>
<b>CRJX</b>	CF34-8C5	0	2	0	1	<b>3</b>
<b>E170</b>	CF34-8E	38	40	37	40	<b>155</b>
<b>E190</b>	CF34-10E	40	39	39	37	<b>155</b>
<b>E195</b>	CF34-10E	39	40	39	39	<b>157</b>
<b>F100</b>	TAY650-15	39	40	37	40	<b>156</b>
<b>FA7X</b>	PW307	40	39	33	38	<b>150</b>
<b>Total</b>		<b>959</b>	<b>1112</b>	<b>911</b>	<b>1030</b>	<b>4012</b>

## 11.4. NMT Zürich: Ergebnisse bei Verwendung der Standard-Inputdaten

In Kapitel 6.3.4 wird der Prozess beschrieben, mit welchem die geografischen Inputdaten angepasst wurden, um die Realität der Messungen besser abbilden zu können. Dabei wurden eine erhöhte DTM-Auflösung sowie ein vektorieller Gebäudedatensatz verwendet, was die Rechenzeit stark erhöhte. Um zu quantifizieren, wie gross die Verbesserung der Simulation mit diesen angepassten Input-Daten ausfällt, wurde die Simulation für die NMT-Messungen von Typen mit FDR-Daten in Zürich wiederholt, wobei diesmal ein DTM mit 25 Metern Auflösung verwendet und keine Gebäude berücksichtigt wurden. Dies bedeutet auch, dass sich bei der Berechnung der Dämpfungen nun nur Bodenreflexionen am Grund unterhalb der in der Luft schwebenden Mikrofone berücksichtigt wer-

den (Mikrofonhöhe bleibt auf Gebäudehöhe plus Masthöhe). Die Berechnung wurde zweimal durchgeführt, einmal mit Primärflächen aus dem Vector25-Datensatz und einmal mit detaillierteren Primärflächen aus der amtlichen Vermessung. Letzterer würde auch für zukünftige Jahresbelastungsberechnungen am ehesten in Frage kommen.



**Abbildung 49: NMT Zürich: Vergleich der Simulation (3D-Modell, Verwendung eines 25m DTM und ohne Berücksichtigung von Gebäuden) mit Messungen für den  $L_{AE,tg}$  unter Verwendung der Vector25-Primärflächen (links) bzw. der AV-Primärflächen (rechts).**

Abbildung 50 zeigt den Vergleich der Simulation mit den Messungen unter Verwendung der Standard-Inputs. Bei Verwendung der Vector25-Primärflächen (Abbildung 50 links) zeigt sich gegenüber den in Kapitel 6.4.1 aufgeführten Ergebnissen eine verstärkte Überschätzung der Messwerte ( $\Delta L_{AE,tg} = 0.7 \pm 1.9$  dB). Dies kann hauptsächlich dadurch erklärt werden, dass gemäss Vector25 sämtliche Messpunkte in Gebieten der Kategorie *Z\_Siedl* liegen, welche in sonX als schallhart definiert sind. Tatsächlich beinhalten diese Gebiete jedoch auch viele Flächen mit reduzierten Reflexionseigenschaften (Gärten, Wiesen, Kiesplätze etc.), sodass die Rückstreuung in Realität kleiner ist als simuliert. Bei Verwendung der AV-Primärflächen (Resultate in Abbildung 50 rechts) werden diese klein-

räumigen Unterschiede in der Oberflächenbedeckung besser abgebildet, was im Mittel zu einer Reduktion der simulierten Pegel und damit zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung führt ( $\Delta L_{AE,tg} = 0.0 \pm 2.0$  dB).

Die Verwendung der weiter verbesserten Inputdaten (siehe Kapitel 6.4.1) bringt nur eine marginale Verbesserung der Gesamtstreuung (Standardabweichung von 1.9 dB). Die grössten Unterschiede zeigen sich bei niedrigen Pegeln: hier treten vermehrt Ereignisse mit flachem Schalleinfallswinkel auf, welche teilweise von Gebäuden abgeschirmt werden. Durch das Fehlen von Gebäuden in der Simulation kann dieser Umstand nicht abgebildet werden, was zu einer stärkeren Überschätzung der Messungen führt. Durch den Miteinbezug eines Gebäudedatensatzes können diese Überschätzungen korrigiert werden. Da der Anteil solcher Ereignisse mit flachem Schalleinfallswinkel an der Gesamtmenge der Ereignisse jedoch verhältnismässig klein ist, verbessert sich das Gesamtergebnis dadurch nur unwesentlich. Daraus lässt sich schliessen, dass die Gesamtverbesserung der Simulation durch die Verwendung eines Gebäudedatensatzes bei einer Jahresbelastungsberechnung o.ä. den dadurch erhöhten Rechenaufwand nicht rechtfertigt.

## 11.5. Validationsergebnisse für nicht-FDR Typen

**Tabelle 30:** Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3Dred– und 2Dred–Messung (METEO-Modus) für alle Typen ohne FDR-Daten inkl. Anzahl simulierter Ereignisse N im Nahbereich des Flughafen Zürich, aufgeteilt nach Starts und Landungen.

Emissionsmodell	Proc.	N	3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
A319_CFM56-5A	L	42	-1.4 ( $\pm 1.8$ )	-2.0 ( $\pm 1.4$ )	-1.5 ( $\pm 1.5$ )	-2.1 ( $\pm 1.3$ )
	S	137	-0.5 ( $\pm 1.7$ )	-1.3 ( $\pm 1.9$ )	-0.6 ( $\pm 1.5$ )	-1.6 ( $\pm 1.9$ )
A319_CFM56-5B	L	263	1.8 ( $\pm 1.7$ )	1.8 ( $\pm 2.0$ )	1.9 ( $\pm 2.1$ )	1.9 ( $\pm 2.6$ )
	S	441	0.2 ( $\pm 2.3$ )	-0.4 ( $\pm 2.2$ )	-0.2 ( $\pm 2.3$ )	-0.9 ( $\pm 2.2$ )
A319_V2500	L	244	1.5 ( $\pm 1.9$ )	1.4 ( $\pm 2.0$ )	1.3 ( $\pm 2.2$ )	0.9 ( $\pm 2.1$ )
	S	226	-0.4 ( $\pm 1.7$ )	-1.0 ( $\pm 1.8$ )	-0.6 ( $\pm 1.4$ )	-1.3 ( $\pm 1.7$ )
A320_CFM56-5A	L	144	-0.9 ( $\pm 1.5$ )	-1.0 ( $\pm 1.6$ )	-0.8 ( $\pm 1.8$ )	-1.1 ( $\pm 1.9$ )
	S	219	-0.8 ( $\pm 1.3$ )	-1.7 ( $\pm 1.6$ )	-0.9 ( $\pm 1.4$ )	-2.0 ( $\pm 1.7$ )
A320_CFM56-5B	L	272	0.6 ( $\pm 1.7$ )	0.4 ( $\pm 1.9$ )	0.8 ( $\pm 2.1$ )	0.5 ( $\pm 2.4$ )
	S	481	-0.2 ( $\pm 2.0$ )	-0.9 ( $\pm 2.0$ )	-0.6 ( $\pm 2.0$ )	-1.3 ( $\pm 2.0$ )
A320_V2500	L	248	0.7 ( $\pm 1.9$ )	0.6 ( $\pm 1.8$ )	0.7 ( $\pm 1.8$ )	0.3 ( $\pm 1.8$ )
	S	226	-1.1 ( $\pm 1.8$ )	-1.8 ( $\pm 2.0$ )	-1.2 ( $\pm 1.6$ )	-2.0 ( $\pm 1.9$ )
A321_CFM56-5B	L	206	0.5 ( $\pm 1.8$ )	0.5 ( $\pm 1.9$ )	0.7 ( $\pm 2.1$ )	0.5 ( $\pm 2.3$ )
	S	346	-0.8 ( $\pm 2.5$ )	-1.8 ( $\pm 2.4$ )	-0.9 ( $\pm 2.4$ )	-2.0 ( $\pm 2.4$ )
A321_V2500	L	204	0.9 ( $\pm 2.5$ )	0.8 ( $\pm 2.5$ )	1.1 ( $\pm 2.5$ )	0.6 ( $\pm 2.5$ )
	S	252	-3.7 ( $\pm 1.8$ )	-4.2 ( $\pm 1.9$ )	-3.7 ( $\pm 1.7$ )	-4.3 ( $\pm 1.8$ )
A333_TRENT7	L	87	-0.4 ( $\pm 1.9$ )	-1.0 ( $\pm 2.0$ )	-0.3 ( $\pm 2.0$ )	-0.9 ( $\pm 1.9$ )
	S	210	-0.9 ( $\pm 3.8$ )	-1.5 ( $\pm 3.5$ )	-0.5 ( $\pm 4.4$ )	-1.3 ( $\pm 4.2$ )
A343_CFM56-5C	L	103	0.6 ( $\pm 1.9$ )	0.2 ( $\pm 2.3$ )	1.1 ( $\pm 2.1$ )	0.5 ( $\pm 2.5$ )
	S	211	0.5 ( $\pm 2.5$ )	-0.3 ( $\pm 2.4$ )	0.9 ( $\pm 2.8$ )	0.0 ( $\pm 2.6$ )
A388_GP7270	L	193	4.2 ( $\pm 3.2$ )	4.6 ( $\pm 3.5$ )	3.4 ( $\pm 2.9$ )	3.5 ( $\pm 3.1$ )
	S	165	-1.0 ( $\pm 2.1$ )	-2.0 ( $\pm 2.0$ )	-0.6 ( $\pm 2.1$ )	-1.8 ( $\pm 2.1$ )
A388_TRENT9	L	123	-0.7 ( $\pm 1.9$ )	-1.7 ( $\pm 2.3$ )	-0.6 ( $\pm 2.3$ )	-1.5 ( $\pm 2.6$ )
	S	60	0.2 ( $\pm 2.6$ )	-0.3 ( $\pm 2.2$ )	0.0 ( $\pm 2.7$ )	-0.5 ( $\pm 2.3$ )
B733_CFM56-3	L	40	-1.6 ( $\pm 0.7$ )	-2.1 ( $\pm 0.8$ )	-2.0 ( $\pm 0.7$ )	-2.5 ( $\pm 0.8$ )
	S	187	-0.5 ( $\pm 2.1$ )	-1.7 ( $\pm 2.0$ )	-0.3 ( $\pm 2.2$ )	-1.7 ( $\pm 2.1$ )
B734_CFM56-3	L	42	-1.6 ( $\pm 1.7$ )	-2.1 ( $\pm 2.0$ )	-1.6 ( $\pm 2.3$ )	-2.2 ( $\pm 2.5$ )
	S	86	-1.8 ( $\pm 2.2$ )	-2.8 ( $\pm 2.3$ )	-1.6 ( $\pm 2.4$ )	-2.8 ( $\pm 2.4$ )
B735_CFM56-3	L	125	-1.3 ( $\pm 1.2$ )	-1.9 ( $\pm 1.4$ )	-1.6 ( $\pm 1.4$ )	-2.2 ( $\pm 1.6$ )
	S	281	-0.8 ( $\pm 1.6$ )	-2.0 ( $\pm 1.7$ )	-0.6 ( $\pm 1.8$ )	-2.0 ( $\pm 1.8$ )
B736_CFM56-7B	L	39	-1.9 ( $\pm 4.0$ )	-2.3 ( $\pm 3.4$ )	-2.0 ( $\pm 3.6$ )	-2.5 ( $\pm 3.2$ )
	S	114	0.1 ( $\pm 1.4$ )	-0.5 ( $\pm 1.5$ )	0.8 ( $\pm 1.6$ )	-0.1 ( $\pm 1.4$ )
B737_CFM56-7B	L	158	-0.8 ( $\pm 2.1$ )	-0.8 ( $\pm 1.8$ )	-0.4 ( $\pm 1.9$ )	-0.6 ( $\pm 2.1$ )
	S	172	-1.1 ( $\pm 2.1$ )	-2.1 ( $\pm 1.9$ )	-0.1 ( $\pm 1.9$ )	-1.3 ( $\pm 1.8$ )
B738_CFM56-7B	L	148	-1.3 ( $\pm 2.4$ )	-1.5 ( $\pm 2.5$ )	-1.1 ( $\pm 2.5$ )	-1.4 ( $\pm 2.7$ )
	S	231	-1.7 ( $\pm 2.2$ )	-2.8 ( $\pm 2.1$ )	-0.6 ( $\pm 2.3$ )	-1.8 ( $\pm 2.1$ )
B739_CFM56-7B	L	39	-2.3 ( $\pm 1.2$ )	-2.8 ( $\pm 1.2$ )	-2.4 ( $\pm 1.2$ )	-3.0 ( $\pm 1.2$ )
	S	128	-3.2 ( $\pm 2.0$ )	-4.5 ( $\pm 2.0$ )	-1.9 ( $\pm 2.1$ )	-3.4 ( $\pm 2.1$ )
B762_CF6-80C2	L	4	4.3 ( $\pm 0.9$ )	4.2 ( $\pm 1.3$ )	4.2 ( $\pm 0.8$ )	4.1 ( $\pm 1.2$ )
	S	3	0.7 ( $\pm 5.4$ )	0.8 ( $\pm 3.3$ )	2.2 ( $\pm 4.8$ )	2.0 ( $\pm 2.4$ )
B763_CF6-80C2	L	185	2.2 ( $\pm 2.3$ )	1.5 ( $\pm 1.8$ )	2.0 ( $\pm 2.0$ )	1.2 ( $\pm 1.7$ )
	S	215	-0.9 ( $\pm 2.7$ )	-2.0 ( $\pm 2.5$ )	0.0 ( $\pm 3.1$ )	-1.2 ( $\pm 2.7$ )
B763_PW4060	L	41	-1.4 ( $\pm 2.1$ )	-2.1 ( $\pm 1.6$ )	-1.5 ( $\pm 2.2$ )	-2.2 ( $\pm 1.6$ )
	S	182	-0.9 ( $\pm 2.8$ )	-1.8 ( $\pm 2.8$ )	-1.5 ( $\pm 2.7$ )	-2.5 ( $\pm 2.8$ )
B764_CF6-80C2	L	128	2.7 ( $\pm 2.8$ )	1.8 ( $\pm 2.5$ )	2.3 ( $\pm 2.5$ )	1.4 ( $\pm 2.2$ )
	S	171	-1.3 ( $\pm 2.4$ )	-2.3 ( $\pm 2.2$ )	-0.7 ( $\pm 3.1$ )	-1.8 ( $\pm 2.7$ )
CRJ7_CF34-8C5	L	127	-0.8 ( $\pm 1.3$ )	-1.1 ( $\pm 1.2$ )	-0.9 ( $\pm 1.3$ )	-1.2 ( $\pm 1.3$ )
	S	304	-0.4 ( $\pm 2.0$ )	-1.9 ( $\pm 1.9$ )	0.3 ( $\pm 1.9$ )	-1.4 ( $\pm 1.9$ )
CRJ9_CF34-8C5	L	190	-1.1 ( $\pm 1.7$ )	-1.3 ( $\pm 1.7$ )	-1.2 ( $\pm 1.7$ )	-1.4 ( $\pm 1.8$ )
	S	138	-0.3 ( $\pm 1.7$ )	-2.0 ( $\pm 1.5$ )	0.4 ( $\pm 1.8$ )	-1.5 ( $\pm 1.6$ )

**Tabelle 30 (Forts.)**

Emissionsmodell	Proc.	N	3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
CRJX_CF34-8C5	L	37	-2.2 ( $\pm 1.0$ )	-2.6 ( $\pm 1.3$ )	-2.2 ( $\pm 1.1$ )	-2.6 ( $\pm 1.3$ )
	S	68	-1.1 ( $\pm 1.4$ )	-2.3 ( $\pm 1.9$ )	-0.4 ( $\pm 1.3$ )	-2.0 ( $\pm 1.9$ )
E170_CF34-8E	L	75	-0.3 ( $\pm 2.8$ )	-0.5 ( $\pm 2.4$ )	0.3 ( $\pm 2.9$ )	0.0 ( $\pm 2.7$ )
	S	90	-0.6 ( $\pm 2.5$ )	-1.8 ( $\pm 2.0$ )	-0.8 ( $\pm 2.3$ )	-2.2 ( $\pm 2.0$ )
E190_CF34-10E	L	259	-0.5 ( $\pm 1.7$ )	-1.0 ( $\pm 1.9$ )	-0.6 ( $\pm 1.7$ )	-1.1 ( $\pm 2.3$ )
	S	377	-1.5 ( $\pm 2.0$ )	-2.3 ( $\pm 1.7$ )	-1.3 ( $\pm 1.9$ )	-2.2 ( $\pm 1.8$ )
F100_TAY650-15	L	209	-0.4 ( $\pm 3.4$ )	-0.6 ( $\pm 2.7$ )	-0.2 ( $\pm 2.9$ )	-0.4 ( $\pm 2.6$ )
	S	383	-2.3 ( $\pm 2.3$ )	-3.2 ( $\pm 2.3$ )	-0.3 ( $\pm 2.2$ )	-1.4 ( $\pm 2.2$ )
FA7X_PW307	L	86	-0.2 ( $\pm 2.9$ )	-0.3 ( $\pm 2.3$ )	0.4 ( $\pm 2.1$ )	-0.1 ( $\pm 2.2$ )
	S	142	-0.6 ( $\pm 3.5$ )	-1.4 ( $\pm 2.9$ )	0.6 ( $\pm 3.2$ )	-0.5 ( $\pm 2.7$ )
<b>Alle nicht-FDR Typen</b>	L	4061	0.3 ( $\pm 2.6$ )	0.1 ( $\pm 2.7$ )	0.3 ( $\pm 2.6$ )	0.0 ( $\pm 2.7$ )
	S	6246	-0.9 ( $\pm 2.4$ )	-1.9 ( $\pm 2.3$ )	-0.6 ( $\pm 2.4$ )	-1.7 ( $\pm 2.4$ )

**Tabelle 31:** Pegeldifferenzen  $\Delta L_{AE,t10}$  und  $\Delta L_{AS,max}$  für die Vergleiche 3Dred– und 2Dred–Messung (METEO-Modus) für alle Typen ohne FDR-Daten inkl. Anzahl simulierter Ereignisse N im Nahbereich des Flughafen Genf, aufgeteilt nach Starts und Landungen.

Emissionsmodell	Proc.	N	3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
A319_CFM56-5A	L	139	0.8 ( $\pm 1.6$ )	0.8 ( $\pm 1.8$ )	0.6 ( $\pm 1.6$ )	0.6 ( $\pm 1.9$ )
	S	123	1.1 ( $\pm 1.5$ )	0.5 ( $\pm 1.8$ )	0.8 ( $\pm 1.6$ )	0.2 ( $\pm 2.0$ )
A319_CFM56-5B	L	139	2.8 ( $\pm 1.3$ )	3.0 ( $\pm 2.2$ )	2.8 ( $\pm 1.4$ )	3.0 ( $\pm 2.3$ )
	S	134	1.8 ( $\pm 1.6$ )	1.6 ( $\pm 1.8$ )	1.7 ( $\pm 1.8$ )	1.4 ( $\pm 2.1$ )
A319_V2500	L	138	2.6 ( $\pm 2.8$ )	3.0 ( $\pm 3.2$ )	1.8 ( $\pm 1.6$ )	1.9 ( $\pm 2.0$ )
	S	140	1.6 ( $\pm 1.3$ )	1.0 ( $\pm 1.5$ )	1.3 ( $\pm 1.5$ )	0.7 ( $\pm 1.8$ )
A320_CFM56-5A	L	136	0.4 ( $\pm 1.5$ )	0.2 ( $\pm 2.1$ )	0.1 ( $\pm 1.5$ )	-0.1 ( $\pm 2.2$ )
	S	121	0.1 ( $\pm 1.6$ )	-0.3 ( $\pm 1.9$ )	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.6 ( $\pm 2.1$ )
A320_CFM56-5B	L	135	1.6 ( $\pm 1.3$ )	1.7 ( $\pm 1.6$ )	1.5 ( $\pm 1.4$ )	1.6 ( $\pm 1.7$ )
	S	140	1.5 ( $\pm 1.6$ )	1.2 ( $\pm 1.9$ )	1.3 ( $\pm 1.8$ )	1.0 ( $\pm 2.2$ )
A320_V2500	L	145	2.4 ( $\pm 2.6$ )	2.9 ( $\pm 2.8$ )	1.7 ( $\pm 1.5$ )	1.8 ( $\pm 1.8$ )
	S	133	0.6 ( $\pm 1.5$ )	0.1 ( $\pm 1.7$ )	0.3 ( $\pm 1.7$ )	-0.2 ( $\pm 1.9$ )
A321_CFM56-5B	L	143	1.0 ( $\pm 1.5$ )	1.3 ( $\pm 1.6$ )	1.0 ( $\pm 1.5$ )	1.2 ( $\pm 1.7$ )
	S	137	0.3 ( $\pm 1.6$ )	0.1 ( $\pm 1.9$ )	0.2 ( $\pm 1.9$ )	-0.1 ( $\pm 2.2$ )
A321_V2500	L	136	2.4 ( $\pm 2.7$ )	2.9 ( $\pm 3.0$ )	1.7 ( $\pm 1.7$ )	1.8 ( $\pm 2.0$ )
	S	128	-1.3 ( $\pm 1.7$ )	-1.7 ( $\pm 1.9$ )	-1.6 ( $\pm 1.8$ )	-2.0 ( $\pm 2.0$ )
A333_TRENT7	L	139	0.4 ( $\pm 1.8$ )	0.6 ( $\pm 2.2$ )	0.3 ( $\pm 1.6$ )	0.4 ( $\pm 2.0$ )
	S	141	-0.8 ( $\pm 2.0$ )	-1.0 ( $\pm 2.5$ )	-1.0 ( $\pm 2.4$ )	-1.2 ( $\pm 2.9$ )
A343_CFM56-5C	L	18	0.4 ( $\pm 1.3$ )	0.5 ( $\pm 1.1$ )	0.5 ( $\pm 1.2$ )	0.6 ( $\pm 1.2$ )
	S	7	2.2 ( $\pm 2.0$ )	3.1 ( $\pm 2.4$ )	2.0 ( $\pm 2.0$ )	2.8 ( $\pm 2.5$ )
B733_CFM56-3	L	130	0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.4 ( $\pm 1.9$ )	0.0 ( $\pm 1.9$ )	-0.6 ( $\pm 1.9$ )
	S	123	1.4 ( $\pm 1.7$ )	1.0 ( $\pm 1.8$ )	1.0 ( $\pm 1.8$ )	0.6 ( $\pm 1.9$ )
B734_CFM56-3	L	247	-0.6 ( $\pm 1.4$ )	-1.3 ( $\pm 2.5$ )	-0.8 ( $\pm 1.5$ )	-1.5 ( $\pm 2.6$ )
	S	181	1.5 ( $\pm 1.8$ )	0.9 ( $\pm 1.8$ )	1.3 ( $\pm 2.0$ )	0.7 ( $\pm 2.0$ )
B735_CFM56-3	L	104	-0.3 ( $\pm 1.6$ )	-0.8 ( $\pm 1.9$ )	-0.5 ( $\pm 1.6$ )	-1.1 ( $\pm 1.9$ )
	S	82	0.4 ( $\pm 1.7$ )	-0.3 ( $\pm 1.9$ )	0.1 ( $\pm 1.9$ )	-0.6 ( $\pm 2.2$ )
B736_CFM56-7B	L	238	0.0 ( $\pm 1.8$ )	-0.2 ( $\pm 2.2$ )	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.4 ( $\pm 2.2$ )
	S	192	3.3 ( $\pm 1.9$ )	3.1 ( $\pm 2.2$ )	3.1 ( $\pm 2.0$ )	3.0 ( $\pm 2.2$ )
B737_CFM56-7B	L	137	0.0 ( $\pm 1.8$ )	0.1 ( $\pm 2.1$ )	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.1 ( $\pm 2.1$ )
	S	133	1.7 ( $\pm 2.0$ )	1.5 ( $\pm 2.3$ )	1.6 ( $\pm 2.0$ )	1.4 ( $\pm 2.3$ )
B738_CFM56-7B	L	135	-0.6 ( $\pm 1.6$ )	-0.6 ( $\pm 1.9$ )	-0.7 ( $\pm 1.6$ )	-0.7 ( $\pm 1.9$ )
	S	130	0.9 ( $\pm 2.1$ )	0.7 ( $\pm 2.5$ )	0.7 ( $\pm 2.2$ )	0.5 ( $\pm 2.6$ )
B739_CFM56-7B	L	200	-1.5 ( $\pm 2.3$ )	-1.5 ( $\pm 3.6$ )	-1.6 ( $\pm 2.4$ )	-1.7 ( $\pm 3.7$ )
	S	142	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.4 ( $\pm 2.1$ )	-0.3 ( $\pm 1.9$ )	-0.5 ( $\pm 2.2$ )

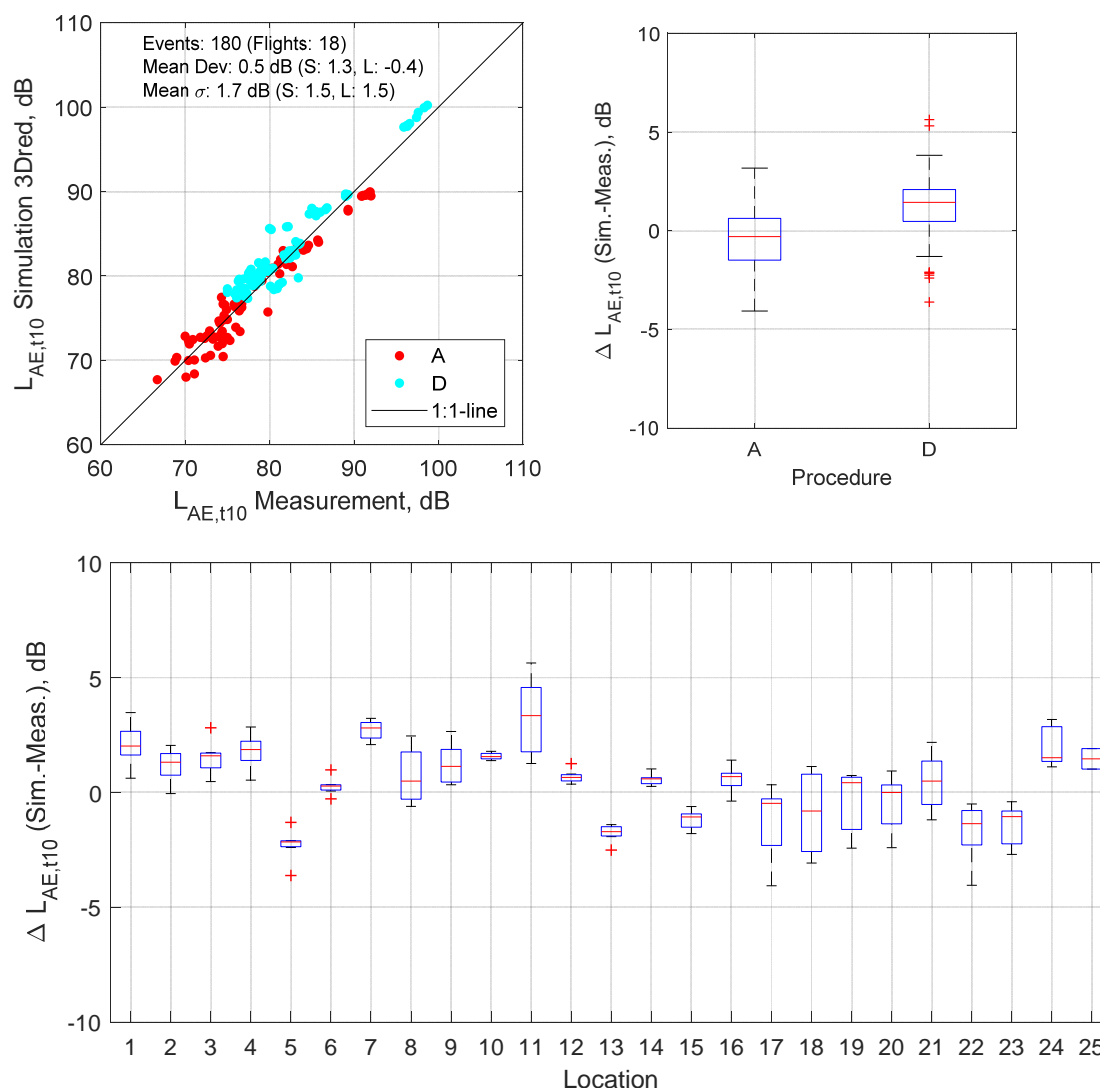


**Tabelle 31 (Forts.)**

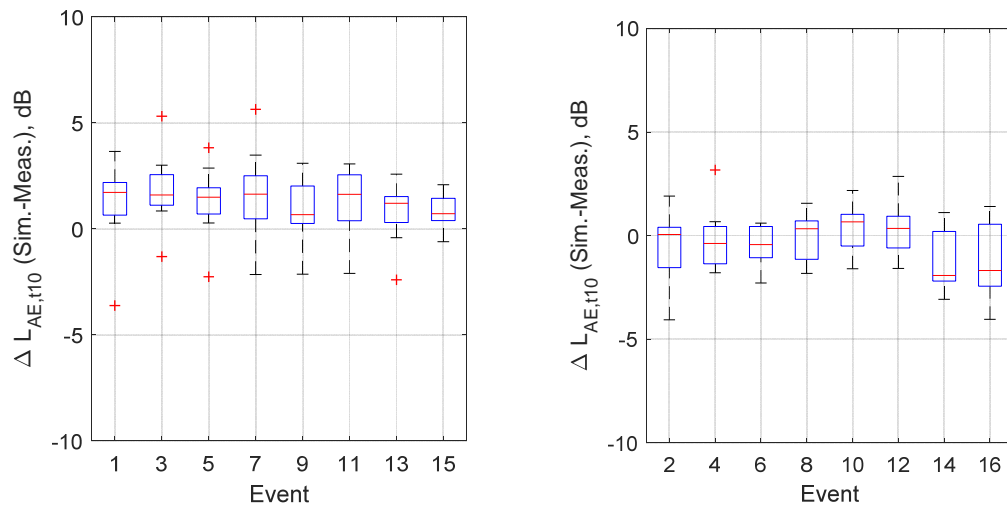
Typ	Proc.	N	3Dred		2Dred	
			$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]	$\Delta L_{AE,t10}$ [dB]	$\Delta L_{AS,max}$ [dB]
B762_CF6-80C2	L	19	5.1 ( $\pm 1.7$ )	5.9 ( $\pm 1.9$ )	4.9 ( $\pm 1.5$ )	5.7 ( $\pm 1.8$ )
	S	13	3.2 ( $\pm 2.2$ )	3.4 ( $\pm 2.6$ )	3.3 ( $\pm 2.2$ )	3.4 ( $\pm 2.7$ )
B763_CF6-80C2	L	96	2.4 ( $\pm 1.9$ )	2.9 ( $\pm 2.2$ )	2.2 ( $\pm 1.8$ )	2.8 ( $\pm 2.1$ )
	S	69	1.7 ( $\pm 1.6$ )	1.8 ( $\pm 1.9$ )	1.7 ( $\pm 1.7$ )	1.9 ( $\pm 2.0$ )
B763_PW4060	L	140	0.4 ( $\pm 1.6$ )	0.5 ( $\pm 1.8$ )	0.0 ( $\pm 1.5$ )	0.2 ( $\pm 1.7$ )
	S	115	0.1 ( $\pm 1.5$ )	0.1 ( $\pm 1.8$ )	0.1 ( $\pm 1.7$ )	0.1 ( $\pm 2.0$ )
B764_CF6-80C2	L	143	1.9 ( $\pm 1.7$ )	2.6 ( $\pm 2$ )	1.7 ( $\pm 1.6$ )	2.4 ( $\pm 1.9$ )
	S	101	0.2 ( $\pm 2.1$ )	0.2 ( $\pm 2.3$ )	0.3 ( $\pm 2.2$ )	0.2 ( $\pm 2.4$ )
CRJ7_CF34-8C5	L	79	0.8 ( $\pm 1.7$ )	1 ( $\pm 2$ )	0.6 ( $\pm 1.6$ )	0.7 ( $\pm 2$ )
	S	59	1.4 ( $\pm 1.7$ )	1.2 ( $\pm 1.9$ )	1.2 ( $\pm 1.7$ )	0.9 ( $\pm 1.9$ )
CRJ9_CF34-8C5	L	146	0.4 ( $\pm 1.7$ )	0.7 ( $\pm 2$ )	0.1 ( $\pm 1.6$ )	0.4 ( $\pm 2.0$ )
	S	132	0.5 ( $\pm 1.8$ )	0.4 ( $\pm 2.1$ )	0.3 ( $\pm 1.8$ )	0.1 ( $\pm 2.1$ )
CRJX_CF34-8C5	L	4	0.5 ( $\pm 0.6$ )	0.4 ( $\pm 0.9$ )	0.4 ( $\pm 0.6$ )	0.3 ( $\pm 1.3$ )
	S	1	3.1 ( $\pm 0$ )	3 ( $\pm 0$ )	3.0 ( $\pm 0.0$ )	2.7 ( $\pm 0.0$ )
E170_CF34-8E	L	141	0.7 ( $\pm 1.9$ )	0.9 ( $\pm 2.1$ )	0.4 ( $\pm 1.9$ )	0.6 ( $\pm 2.1$ )
	S	137	1.1 ( $\pm 1.9$ )	0.6 ( $\pm 2.4$ )	1.1 ( $\pm 2.1$ )	0.6 ( $\pm 2.6$ )
E190_CF34-10E	L	140	0.4 ( $\pm 1.6$ )	0 ( $\pm 1.7$ )	0.3 ( $\pm 1.6$ )	-0.1 ( $\pm 1.7$ )
	S	137	0.4 ( $\pm 1.6$ )	0.2 ( $\pm 1.7$ )	0.3 ( $\pm 1.8$ )	0.1 ( $\pm 1.9$ )
E195_CF34-10E	L	141	-0.1 ( $\pm 1.5$ )	-0.4 ( $\pm 1.6$ )	-0.2 ( $\pm 1.5$ )	-0.5 ( $\pm 1.6$ )
	S	141	0.1 ( $\pm 1.6$ )	-0.2 ( $\pm 1.8$ )	-0.2 ( $\pm 1.7$ )	-0.5 ( $\pm 1.9$ )
F100_TAY650-15	L	142	2.1 ( $\pm 2.2$ )	2.2 ( $\pm 2.4$ )	2.0 ( $\pm 2.1$ )	2.2 ( $\pm 2.4$ )
	S	129	0 ( $\pm 1.6$ )	-0.2 ( $\pm 2$ )	0.1 ( $\pm 1.5$ )	-0.2 ( $\pm 1.9$ )
FA7X_PW307	L	134	2.1 ( $\pm 2.5$ )	1.8 ( $\pm 3.2$ )	1.8 ( $\pm 1.8$ )	1.4 ( $\pm 2.6$ )
	S	111	0.8 ( $\pm 2.4$ )	0.2 ( $\pm 2.7$ )	0.9 ( $\pm 2.4$ )	0.3 ( $\pm 2.7$ )
A319_CFM56-5A	L	139	5.1 ( $\pm 1.7$ )	5.9 ( $\pm 1.9$ )	4.9 ( $\pm 1.5$ )	5.7 ( $\pm 1.8$ )
	S	123	3.2 ( $\pm 2.2$ )	3.4 ( $\pm 2.6$ )	3.3 ( $\pm 2.2$ )	3.4 ( $\pm 2.7$ )
<b>Alle nicht-FDR Typen</b>	L	3784	0.8 ( $\pm 2.2$ )	0.8 ( $\pm 2.7$ )	0.5 ( $\pm 2.0$ )	0.5 ( $\pm 2.6$ )
	S	3332	0.8 ( $\pm 2$ )	0.5 ( $\pm 2.3$ )	0.7 ( $\pm 2.1$ )	0.3 ( $\pm 2.4$ )

## 11.6. Ergänzung zur Messkampagne in Parchim

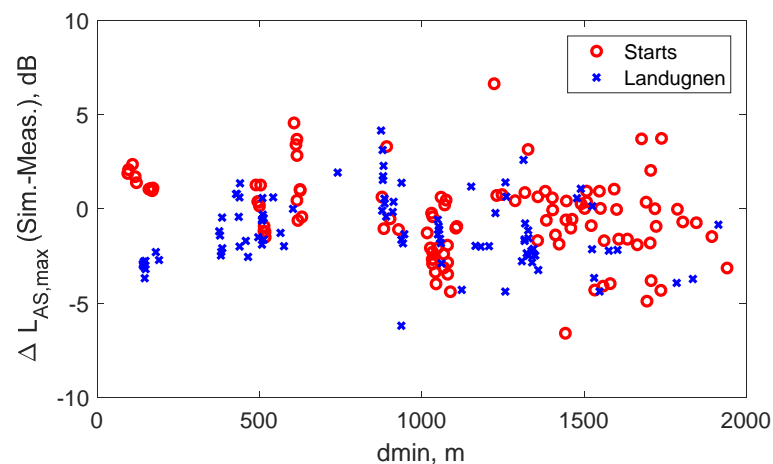
Die folgende Auswertung betrachtet nur den ersten Messtag der Messungen in Parchim. Ohne die extremen Ausreisser (Flug 17 und 18) sinkt der Mittelwert von 0.8 dB auf 0.5 dB bei einer kleineren Standardabweichung von 1.7 dB anstatt 2.1 dB. Die grossen Abweichungen der Flüge 17 und 18 sind entweder auf eine extreme Wittersituation zurückzuführen, die mit dem Ausbreitungsmodell nicht abgebildet werden konnte, oder sogar auf einen messtechnischen Fehler (z.B. Verstärkung der Mikrofonsignale geändert).



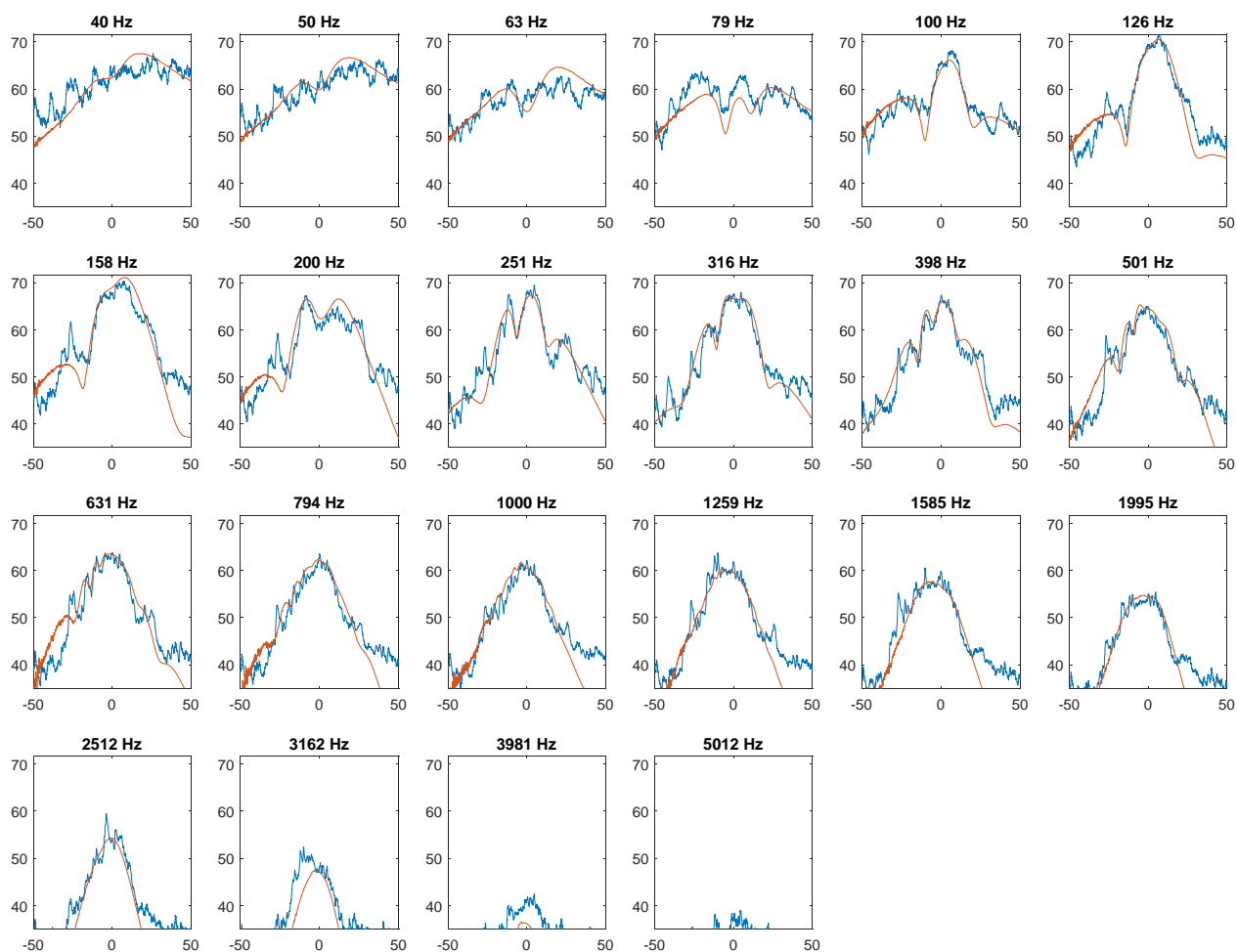
**Abbildung 50:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen am Flugplatz Parchim für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Prozedur (oben) und Messpunkt (unten). Flüge 17 und 18 von Tag 2 wurden aus der Auswertung entfernt. Da Flug 17 als auch 18 ähnliche Prozeduren einiger Flüge vom ersten Messtag sind, stammt die Abweichung von ca. 4 dB mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vom Emissionsmodell. Es ist wahrscheinlicher, dass die Ausbreitungsbedingungen am Morgen des 2. Messtages nicht abgebildet werden konnten. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.



**Abbildung 51:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen am Flugplatz Parchim für den  $L_{AE,t10}$ , gruppiert nach Ereignisnummer (siehe Tabelle 9) für Abflüge (links) und Anflüge (rechts). Flüge 17 und 18 von Tag 2 wurden aus der Auswertung entfernt. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

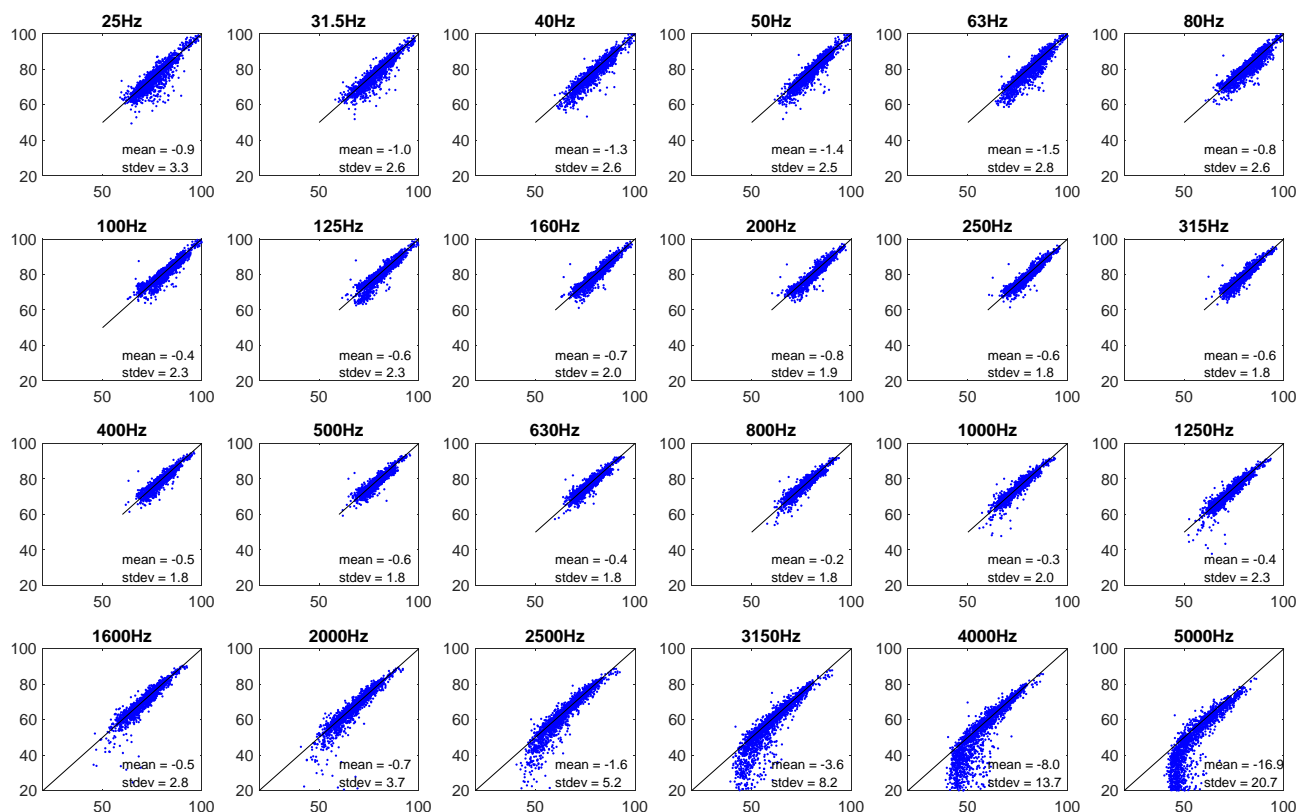


**Abbildung 52:** Einfluss der minimalen Distanz zum Messpunkt  $d_{min}$  auf die Pegeldifferenz  $dL_{AS,max}$  (alle Messpunkte enthalten). Es ist im Gegensatz zu den NMT-Daten in Zürich kein Trend zu erkennen. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

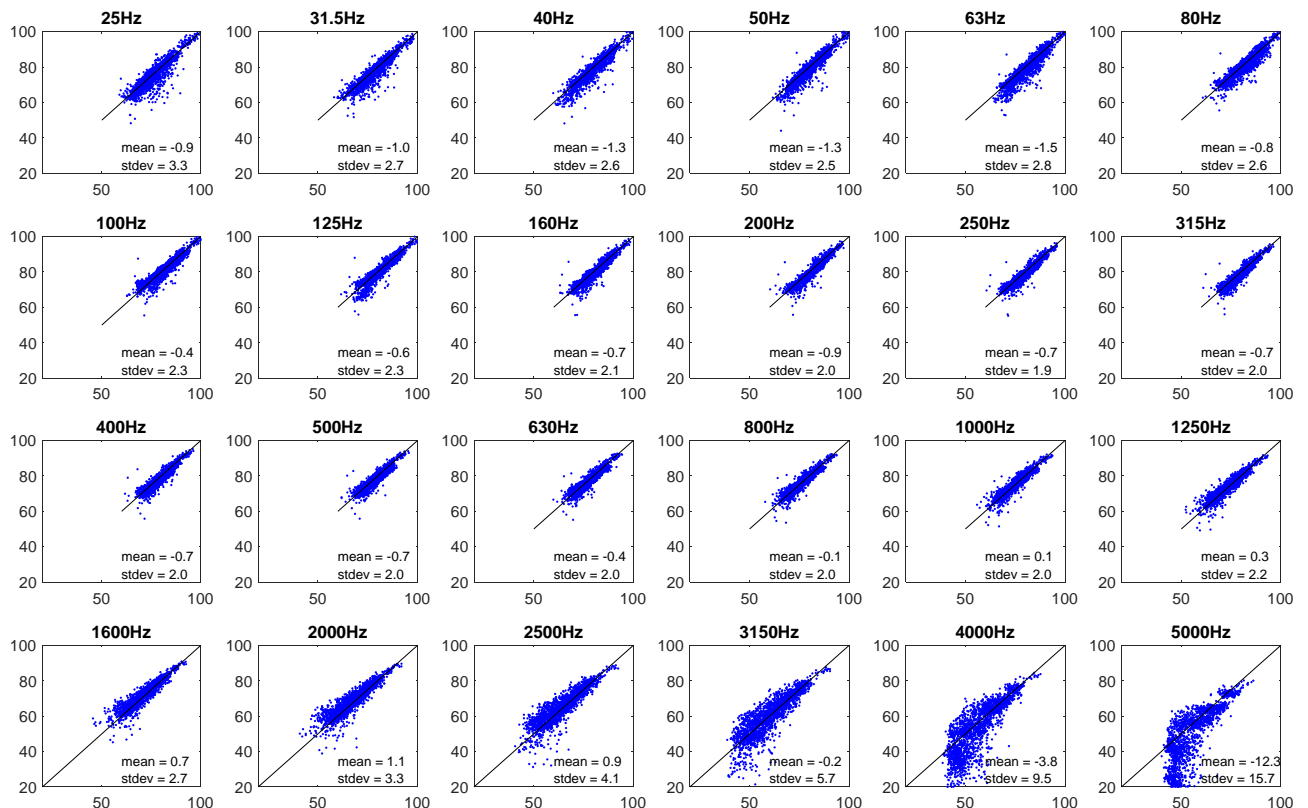


**Abbildung 53:** Beispiel einer sehr guten Übereinstimmung der simulierten Terzbandverläufe (r05, Messpunkt 6, siehe auch Abbildung 19) im Vergleich zur Messung. Vor allem der Bodeneffekt zeigt sehr gute Übereinstimmung bei den Terzen von 100 Hz bis 501 Hz. Die Y-Achse entspricht dem Schalldruckpegel des jeweiligen Terzbands in dB, die X-Achse der relativen Zeit um den Zeitpunkt des Maximalpegels. Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen.

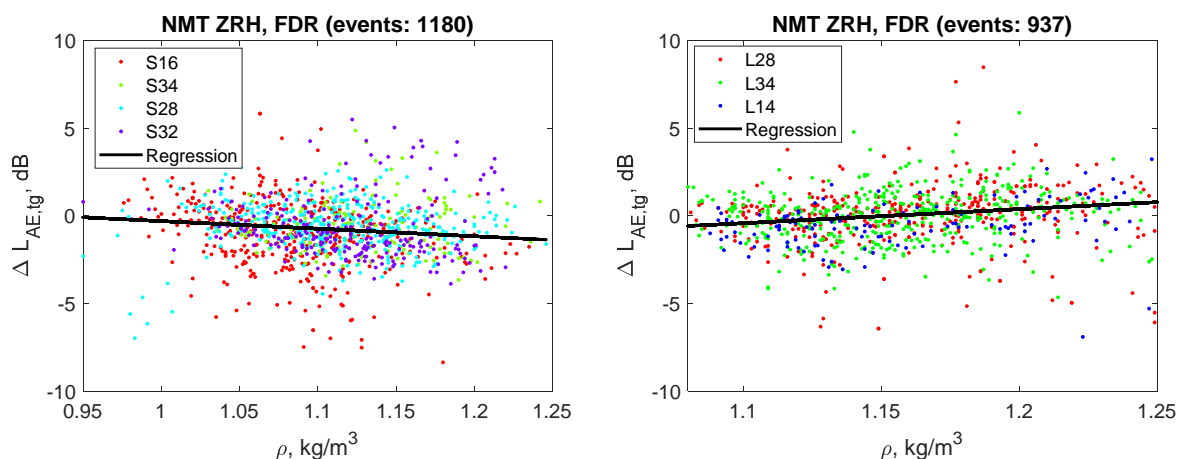
## 11.7. Ergänzungen zu den NMT-Ergebnissen in Zürich



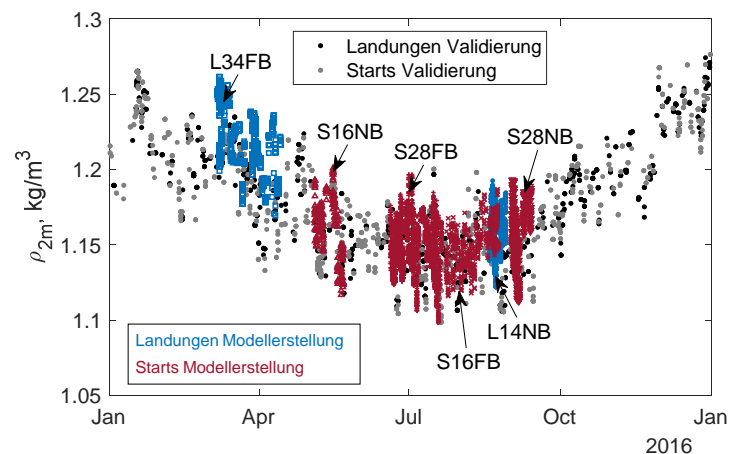
**Abbildung 54:** Gesamthaftes Ereignispegelspektrum für alle 2068 Ereignisse der Typen mit FDR-Daten in Zürich, Berechnung im METEO-Modus. Die Y-Achse entspricht dem simulierten Ereignispegelanteils des jeweiligen Terzbands in dB, die X-Achse dem gemessenen Ereignispegelanteils des gesamten Ereignisses.



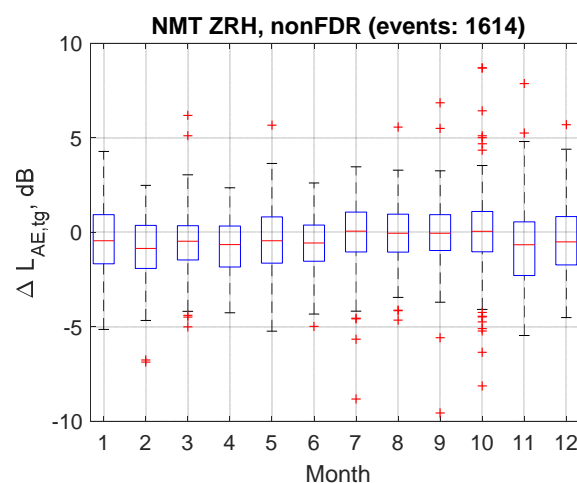
**Abbildung 55:** Gesamthaftes Ereignispegelspektrum für alle 2068 Ereignisse der Typen mit FDR-Daten in Zürich, Berechnung im BASIC-Modus. Die Y-Achse entspricht dem simulierten Ereignispegelanteils des jeweiligen Terzbands in dB, die X-Achse dem gemessenen Ereignispegelanteils des gesamten Ereignisses.



**Abbildung 56:** Einfluss der Dichte  $\rho$  auf die Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation-Messung) der NMT-Daten der Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich für Starts (links) und Landungen (rechts). Die Dichte bezieht sich auf die Umgebungsdichte aus FDR-Daten zum Zeitpunkt des kürzesten Abstands des jeweiligen Messpunkts. Bei Starts weist die robuste Regression eine Steigung von -1.3 dB über den gesamten Wertebereich und bei Landungen über einen kleineren Wertebereich von +1.3 dB auf.



**Abbildung 57:** Jahresgang der Luftdichte auf Flugplatzhöhe aus den NMT-Daten der Typen mit FDR-Daten am Flughafen Zürich (Starts und Landungen) im Vergleich zur Dichteverteilung aus den Messungen im Jahr 2013 und 2014, welche für die Modellerstellung und Verifizierung verwendet wurden. Die unterschiedlichen Messkampagnen sind anhand der Symbole nach Pistenrichtung und Nahbereich (NB) bzw. Fernbereich (FB) unterschieden.

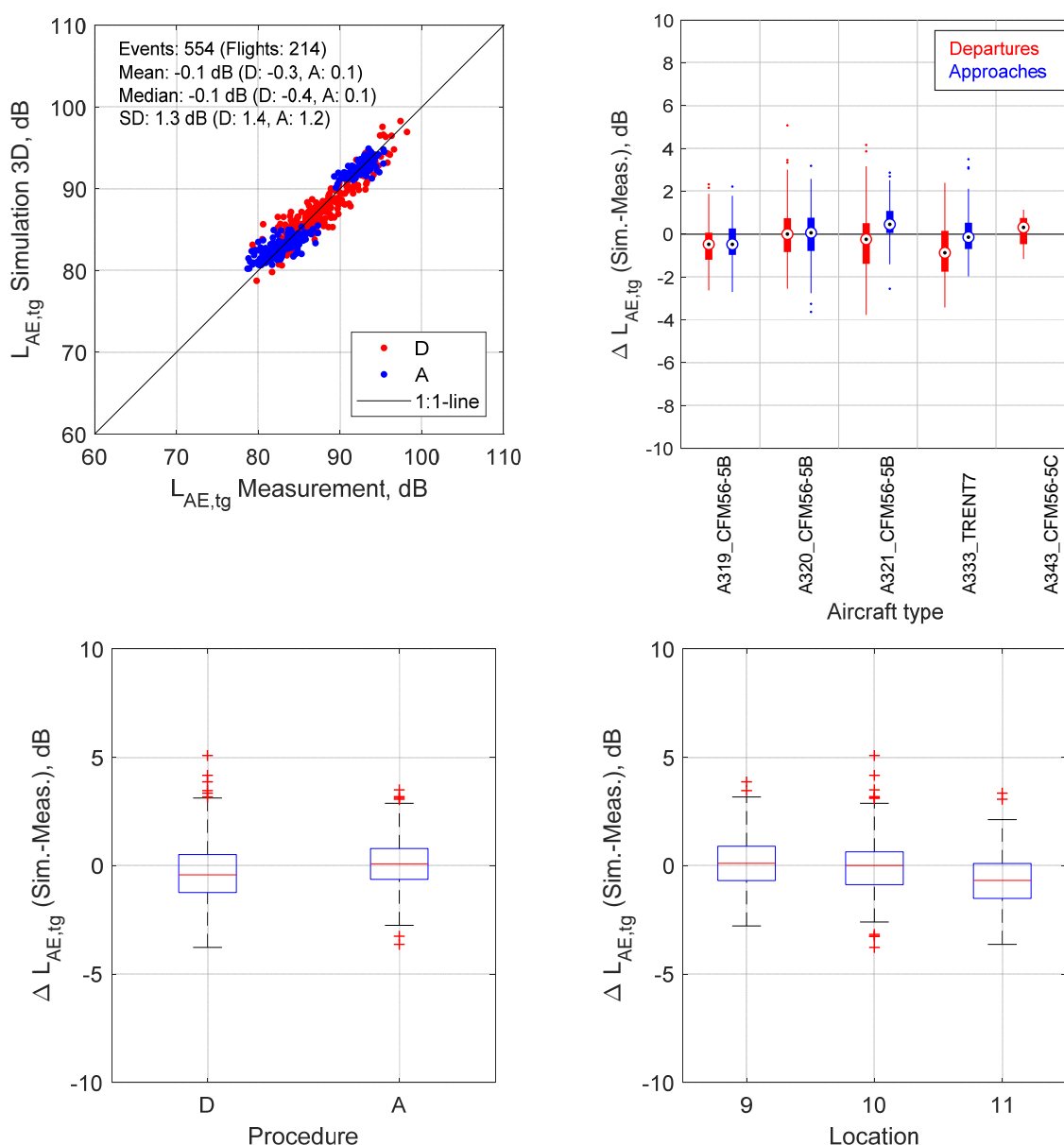


**Abbildung 58:** Jahresgang der Pegeldifferenz  $\Delta L_{AE,tg}$  (Simulation-Messung) aus den NMT-Daten der Typen ohne FDR-Daten am Flughafen Zürich für Starts, allerdings ausschliesslich Flugzeugtypen deren Parameterschätzung auf FDR-Daten basiert.

## 11.8. Ergänzungen zu den NMT-Ergebnissen in Genf

Im Folgenden werden die Ergebnisse ohne Messpunkt 5 dargestellt. Dieser Messpunkt weicht im Vergleich zu den anderen Messpunkten deutlich von den simulierten Pegeln ab. Es wird vermutet, dass der dichte Bewuchs um die Messstelle oder das Wellblechdach, auf welchem das Mikrofon installiert ist, zu einer Schalldruckreduktion führen, die in der Ausbreitung nicht berücksichtigt werden kann. Ein Messvergleich an diesem Standort würde Aufschluss bringen.

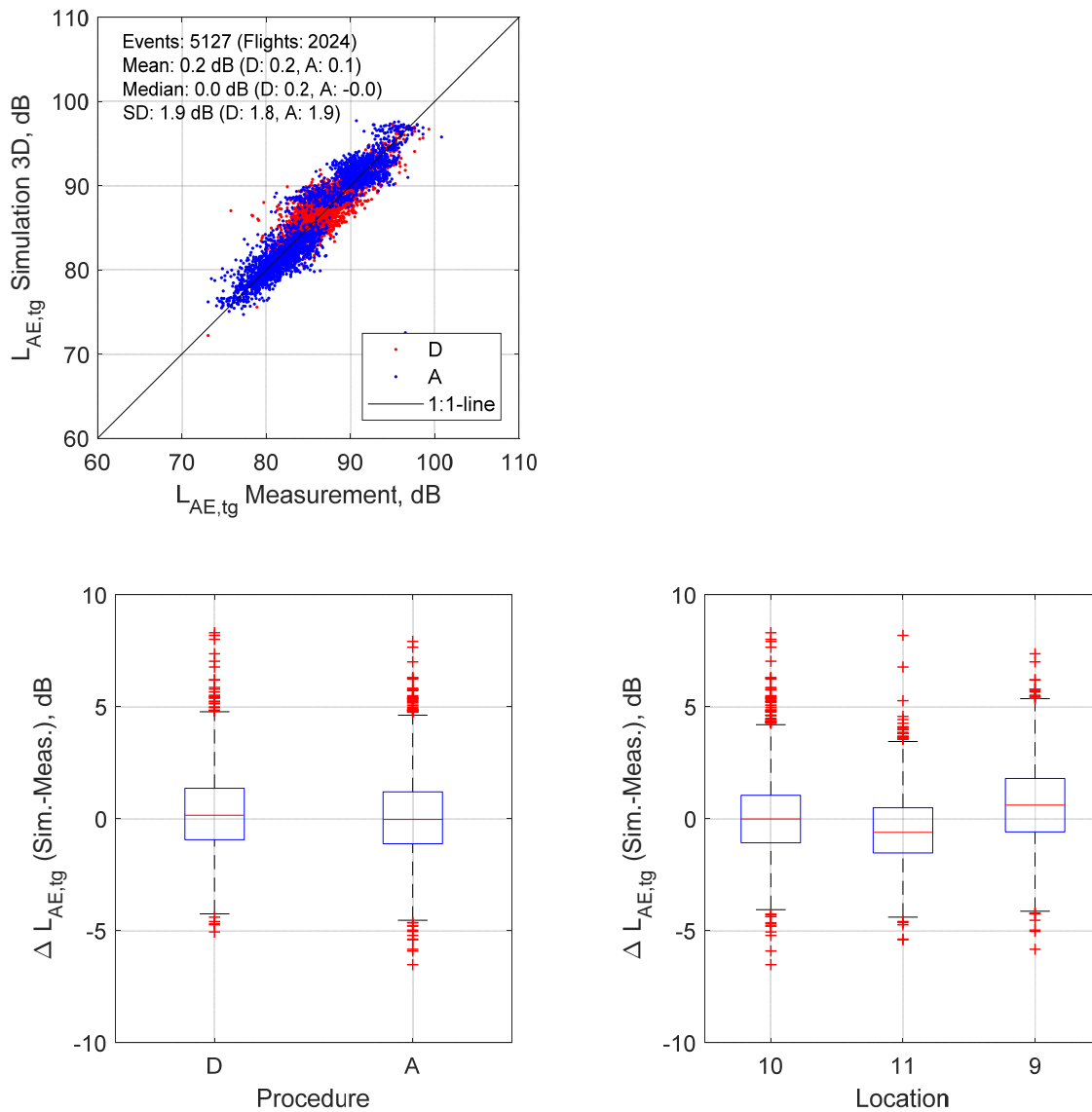
### 11.8.1. Vergleich für Typen mit FDR-Daten



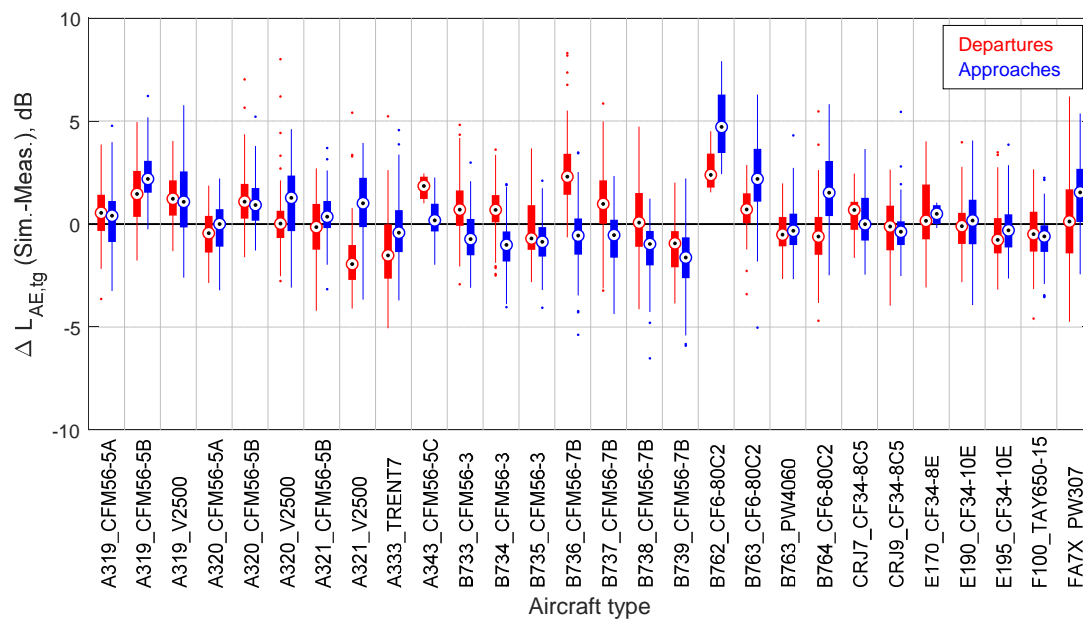
**Abbildung 59:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen ohne Messpunkt 5 für Typen mit FDR-Daten des Flughafens Genf für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Prozedur (links oben und unten), Flugzeugtyp (rechts oben) und Messpunkt (rechts unten).



### 11.8.2. Vergleich für Typen ohne FDR-Daten



**Abbildung 60:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen ohne Messpunkt 5 für Typen ohne FDR-Daten des Flughafens Genf für den  $L_{AE,tg}$  gruppiert nach Prozedur (Scatter- und Boxplot links) und Messpunkt (Boxplot rechts unten).



**Abbildung 61:** Vergleich der Simulationen mit den Messungen der NMT-Stationen ohne Messpunkt 5 für Typen ohne FDR-Daten des Flughafen Genf für den  $L_{AE,tg}$ , gruppiert nach Typ und Triebwerk.

## 11.9. Verzeichnisse und Skripte in Matlab

Hauptverzeichnis Aufbereitung und Auswertung: K:\sonAIR\BV86-Anträge2016\Matlab\

Hauptverzeichnis Simulationstool: K:\sonAIR\Modul E - Validierung\Wissenschaftliches Simulationstool V8\

### Kapitel 3: TU Delft Messungen

Subverzeichnis: \Schiphol\

- **Aufbereitung der Messdaten**
  - Trajektorien.m
- **Simulation**
  - F\_TUDelft\_Bodenmic\_Simulation\_3Dred.m
- **Auswertung**
  - Schiphol\_Analysis.m

### Kapitel 3.5: Untersuchung 5 kHz-Begrenzung

Subverzeichnis: \Auswertung\

- Grenzdistanz5khz\_Messungen.m
- Grenzdistanz5khz\_Messungen\_Auswertung.m
- Grenzdistanz5khz\_Messungen\_Flugpfade.m
- Grenzdistanz5khz\_Messungen\_Flugpfade\_alltypes.m

### Kapitel 4: Empa Messungen in grossen Abständen

Subverzeichnis: \Punktuell\

- **Aufbereitung der Messdaten**
  - Subverzeichnis \Aufbereiten\_Soundfiles\:
    - A1\_EreignisAufbereiten.m → Ausschneiden der Ereignisse aus Messsignal, Erzeugung Bewegungsliste
    - A2\_EreignisBereinigung.m → Bereinigung der Ereignisse gem. automatischer Bereinigungs-routine, Ergänzung der Bewegungsliste mit akustischen Kennwerten
  - Subverzeichnis \Punktuell\:
    - Trajektorien\_Punktuell
- **Simulation**
  - F\_ZRH17\_Simulation\_3D\_L.m
- **Auswertung**
  - Punktuell\_Analysis\_ZRH.m
  - Punktuell\_Analysis\_ZRH\_Simulationsmodi.m

### Kapitel 5: DLR Messkampagne in Parchim

Subverzeichnis: \Parchim\

- **Aufbereitung der Messdaten**
  - Trajektorien\_Meteoprofile\_Parchim.m
- **Simulation**
  - F\_Parchim\_Simulation\_neu.m
- **Auswertung**
  - (erfolgte beim DLR mit Skript- und Abbildungsvorlagen der Empa)
  - Parchim\_Analysis.m
  - Simulationsmodi\_Parchim.m
  - Vergleiche\_PegelZeitVerlauf.m

## Kapitel 6: Noise Monitoring Daten

Subverzeichnis: \NMT\

- **Aufbereitung der Messdaten**
  - Aufbereitung\_Laermereignisse\_Meteo\_ZRH.m
  - Aufbereitung\_Laermereignisse\_Meteo\_GVA.m
  - Randomisiere\_Ereignisse\_aus\_NMT\_ZRH.m
  - Randomisiere\_Ereignisse\_aus\_NMT\_ZRH\_nichtFDR.m
  - Randomisiere\_Ereignisse\_aus\_NMT\_GVA.m
  - Randomisiere\_Ereignisse\_aus\_NMT\_GVA\_nichtFDR.m
  - Erzeugung\_Bewegungsliste\_ZRH16.m
  - Erzeugung\_Bewegungsliste\_ZRH16\_nonFDR.m
  - Erzeugung\_Bewegungsliste\_GVA16.m
  - Erzeugung\_Bewegungsliste\_GVA16\_nonFDR.m
  - Extract\_path.m
  - Trajektorien\_ZRH.m
  - Trajektorien\_GVA.m
- **Simulation**
  - F\_ZRH16\_Simulation\_3D.m
  - F\_ZRH16\_Simulation\_3Dred\_nonFDR.m
  - F\_GVA16\_Simulation\_3D.m
  - F\_GVA16\_Simulation\_3Dred\_nonFDR.m
- **Auswertung**
  - NMT\_Analysis\_ZRH.m
  - NMT\_Analysis\_ZRH\_MeteoEinfluss.m
  - NMT\_Analysis\_ZRH\_Simulationsmodi.m
  - NMT\_Analysis\_ZRH\_nonFDR.m
  - NMT\_Analysis\_ZRH\_nonFDR\_MeteoEinfluss.m
  - NMT\_Analysis\_ZRH\_nonFDR\_Simulationsmodi.m
  - NMT\_Analysis\_GVA.m
  - NMT\_Analysis\_GVA\_nonFDR.m
  - NMT\_Analysis\_GVA\_nonFDR\_Simulationsmodi.m