

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 58 765 11 11  
F +41 58 765 11 22  
[www.empa.ch](http://www.empa.ch)



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

## **Integration sonAIR in sonBASE Phase 2 – Einbindung von Kleinluftfahrzeugen in sonAIR und Integration der SANC-DB**

**Berichts-Nr.:** **5214010391**

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU, Kornel Köstli

Anzahl Seiten: 46

Beilagen: -

Verfasser: O. Schwab  
C. Zellmann

---

Dübendorf, 01. Februar 2017

Der Verfasser:

*O. Schwab*

O. Schwab

Abteilung Akustik / Lärmminderung

Der Abteilungsleiter:

*K. Eggenschwiler*

K. Eggenschwiler

## Zusammenfassung

Mit Phase 2 zur Integration von sonAIR in sonBASE wurden essentielle Funktionalitäten für die Berechnung von Kleinluftfahrzeugen erstellt und eine Methodik entwickelt, mit der beliebige Flugzeugtypen aus der SANC-DB in die Emissionsdatenbank von sonAIR importiert werden können.

Erstes umfasst das Einlesen und Erzeugen von Flugspuren und Streuspuren sowie Flugprofilen und Streuprofilen mithilfe von unterschiedlichen Schnittstellen und Funktionalitäten. Spuren können eingelesen oder mithilfe von Segmentdefinitionen erzeugt werden. Auch Profile können eingelesen oder aus Flugleistungsdaten der SANC-DB generiert werden. Vorgaben aus dem Leitfaden für Fluglärmberchnungen zu Streuspuren oder das Beschleunigungsverhalten auf der Piste wurden als Standard implementiert, aber der Benutzer hat immer die Möglichkeit eigene Definitionen einzugeben.

Zur Erzeugung einer Trajektorie werden Spuren und Profile, zu denen auch Leistungsdaten gehören, direkt aus der GIS-Umgebung miteinander gefaltet und geglättet. Bei Höhenbeschränkungen der Trajektorie durch Voltenhöhen oder Luftraumgrenzen können die Höhenprofile mit einer grafischen Benutzereingabe angepasst werden.

Letzteres ergänzt sonAIR um die Möglichkeit Flugzeugtypen aus der SANC-DB simulieren zu können. Durch die Anbindung der SANC-DB an die Emissionsdatenbank wird grundsätzlich die Möglichkeit geschaffen, beliebige Kleinluftfahrzeuge, Helikopter, Grossflugzeuge und Militärjets zu importieren und zu verwenden. Da die SANC-DB unabhängig von einem Berechnungsmodell ist und nur akustisch massgebende Kenndaten enthält, können die so erzeugten Emissionsmodelle allerdings nicht die Genauigkeit der aus echten Messdaten erstellten Emissionsmodelle erreichen.

In Hinsicht auf eine zukünftige SANC-TE Berechnung wurde der komplette Quellendatensatz der SANC-TE V2.0 mit der entwickelten Methodik in sonAIR implementiert. Im Vergleich zu den Kenndaten der SANC-DB werden mit den Simulationen in sonAIR sehr gute Resultate erzielt. Lediglich für Flugzeugtypen mit stark asymmetrischen Richtwirkungen – dies betrifft keine Daten mit Herkunft BAZL – kommt es zu Abweichungen in der Richtwirkung und zu Pegeldifferenzen bei  $L_{AE}$  und  $L_{Amax}$  von bis zu 1 dB.

Ein weiterer Vergleich mit FLULA2 zeigte auf, dass die Pegeldifferenzen der so implementierten Flugzeugtypen mit zunehmender Überflughöhe tendenziell grösser werden. Für Typen mit Herkunft BAZL stammen die Abweichungen wahrscheinlich aus den methodischen Unterschieden zwischen dem von der Ausbreitung unabhängigen Emissionsmodell in sonAIR und dem Immissionsmodell in FLULA2. Für Typen mit Herkunft Empa und damit FLULA2, ist meist die Reproduktion der Richtwirkung Ursache für Differenzen zwischen den Modellen. In Zukunft könnte die hier dokumentierte Methodik zur Erstellung neuer Emissionsmodelle in sonAIR dahingehende erweitert werden, diese direkt aus FLULA2 mithilfe von Kenndaten mehrerer Überflughöhen zu optimieren.

Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass die Pegelunterschiede in der gleichen Größenordnung zur Unsicherheit der Datengrundlage sind und daher verwendet werden können. Eine Simulation und ein Vergleich der Kenndaten sollte jedoch für jeden neu zu erstellenden Typ durchgeführt werden.

## Inhalt

Zusammenfassung .....	2
1. Einleitung .....	4
2. Konzept zur Flugbahnerzeugung.....	5
2.1. Einlesen / Erzeugung der Flugspuren.....	5
2.2. Einlesen / Erzeugen der Flugprofile .....	6
2.3. Einlesen / Erzeugen der Flugprofile mittels SANC-DB Standard-Profilen .....	6
2.4. Faltung der Spuren und Profile zu Flugbahnen .....	10
3. Emissionsmodelle aus der SANC-DB .....	13
3.1. SANC-DB.....	13
3.2. Methodik.....	14
3.3. Erstellte Typen .....	19
3.4. Vergleich mit FLULA2.....	20
4. Verzeichnisse.....	24
4.1. Literatur.....	24
4.2. Abbildungsverzeichnis.....	25
4.3. Tabellenverzeichnis.....	26
5. Anhang.....	27
5.1. Pfade und Skripte .....	27
5.2. Format Flugspuren.....	28
5.3. Format Flugprofile.....	28
5.4. Format Spurwahlliste.....	29
5.5. Parametersetzung Optimierung .....	31
5.6. Vergleiche der Kenndaten mit SANC-DB.....	32
5.7. Vergleiche der Kenndaten mit FLULA2.....	34

## 1. Einleitung

Die Empa, Abteilung Akustik/Lärmminderung wurde vom Bundesamt für Umwelt beauftragt, in Zusammenarbeit mit der Firma n-Sphere das kürzlich durch die Empa entwickelte Fluglärmmodell sonAIR in einer GIS-Umgebung zu implementieren und damit einem breiteren Nutzerkreis zugänglich zu machen. In Projektphase I wurde das sonAIR-Modell für Grossflugzeuge in der GIS-Umgebung integriert. In Phase II wurde der Anwendungsbereich des Modells ausgeweitet, so dass neben zivilen Grossflugzeugen auch Kleinluftfahrzeuge abgebildet werden können. Zusätzlich wurde eine Integration der SANC-DB vorgenommen.

Der vorliegende Bericht beinhaltet das Konzept und die Integration zur Umsetzung der Funktionalität um Kleinflugzeuge und Prognoseszenarien ohne Radardaten in sonAIR berechnen zu können. Zusätzlich wird die Anbindung der SANC-DB in sonAIR dokumentiert.

Als Basis für die Umsetzung wird die Funktionalität des an der Empa entwickelten und bewährten Fluglärmberechnungsprogramms FLULA2 (aktuell in der Version 004) bezüglich Kleinluftfahrzeugen reproduziert. Diese wird anschliessend mit neuen Eigenschaften ergänzt, um die Vorteile einer interaktiven GIS-Umgebung auszunützen. Im Gegensatz zu der regulären Berechnung von Grossflugzeugen, für welche Radardaten benutzt werden können, muss für Kleinluftfahrzeuge und Helikopter, sowie für Prognosen von Grossflugzeugen die Möglichkeit geschaffen werden, idealisierte Spuren (aufgrund von SIDs oder Routen) und Profile zu erstellen oder einlesen zu können. Um die in Realität vorhandene Streuung der Flugtrajektorien abbilden zu können, wird zusätzlich die Funktionalität geschaffen um Streuspuren und –profile zu erstellen. Durch Anbindung der SANC-DB können idealisierte An- und Abflugprofile direkt aus der SANC-DB abgeleitet werden. Die Flugbahnen ergeben sich durch die Verbindung von Flugspuren und –profilen über die sogenannte „Faltung“. Teil des Faltungsprozesses ist eine Methodik zur Glättung der Flugbahnen, welche über verschiedene Parameter gesteuert werden kann, sowie eine Reihe von Prüfungen zur Zulässigkeit der Geometrien. So muss die Bahn innerhalb einer gewissen Toleranz auf der Piste beginnen und das Gelände darf nicht durchstossen werden. Zusätzlich können Höhenbegrenzungen gemäss Luftfahrtkarten direkt in der GIS-Umgebung definiert und angewendet werden.

Die Emissionsdatenbank von sonAIR soll um Flugzeugtypen aus der SANC-DB erweitert werden können. Da die SANC-DB nur Kenndaten eines Pegel-Zeit-Verlaufs bei geradlinigem Überflug von 304.8 m Höhe liefert, wurde eine Methodik entwickelt, um die Emissionsdatenbank von sonAIR mit SANC-DB Typen ergänzen zu können. Als erster Datensatz werden dabei die Quellenmodelle der SANC-TE erstellt, da diese für eine zukünftige SANC-TE Berechnung benötigt werden. Um die Methodik zu testen werden die neu erstellten Modelle mit der SANC-DB als auch mit FLULA2 verglichen.

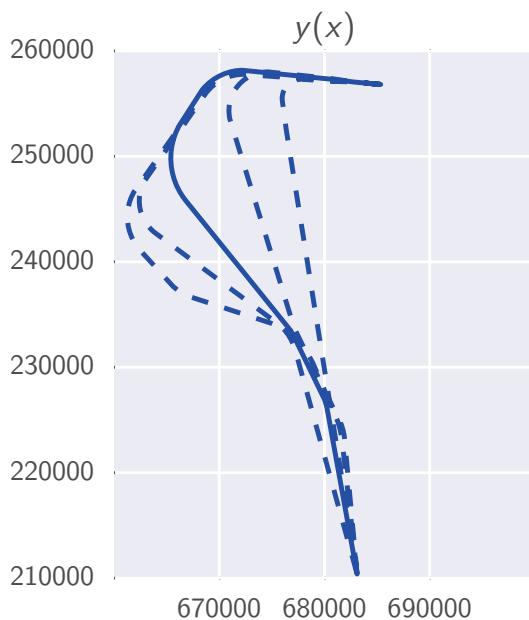
## 2. Konzept zur Flugbahnerzeugung

### 2.1. Einlesen / Erzeugung der Flugspuren

Die Flugspuren, d.h. die Projektion der Flugbahn ( $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ ) auf die Horizontalebene ( $x(t)$ ,  $y(t)$ ), können aus externer Quelle eingelesen werden, entweder als Shape-File oder in einer oder mehreren Text-Dateien, oder in der GIS-Umgebung direkt definiert werden.

Eine Flugspur beinhaltet die  $x$  und  $y$  Koordinaten der abzubildenden Routen oder SIDs. Die Formatdefinition zum Einlesen als Text-Files ist in Anhang 5.2 aufgezeigt. Analog zur Spur-Definition in INM [2] können die Flugspuren auch mittels Flugsegmentangabe in der GIS-Umgebung definiert werden. Die Segmente werden dabei über Distanzen und Radien ab Startpunkten definiert.

Da in Realität eine Streuung der Flugspuren um die SIDs zu beobachten ist, können eine Reihe von Streuspuren um die definierte Mittelspur gelegt werden. Äquivalent zu Doc 29 werden die Streuspuren mittels spezifizierter Standardabweichung in Funktion der abgerollten horizontalen Distanz definiert. Es kann sowohl die genaue Definition gemäss Doc 29 Vol. 2 verwendet werden (Details siehe [4]) oder eine eigene Anzahl Streuspuren mit eigener Bewegungsverteilung erstellt werden. Extern erstellte Streuspuren können in einer oder mehreren Text-Dateien importiert werden (Definition in Anhang 5.2). Dabei muss eine geeignete Bezeichnung eingeführt werden, um die Steuspuren einer Route zuzuordnen und die Bewegungen richtig verteilen zu können (siehe Abschnitt 2.4). Bei 3 Streu routen würde man beispielsweise die Mittelspur mit dem Buchstaben M bezeichnen, und den Streuspuren links und rechts die Bezeichnungen L und R zuweisen. Ebenfalls können die Streuspuren als Shape-Dateien eingelesen werden. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine extern eingelesene Mittelspur mit vier Streuspuren.

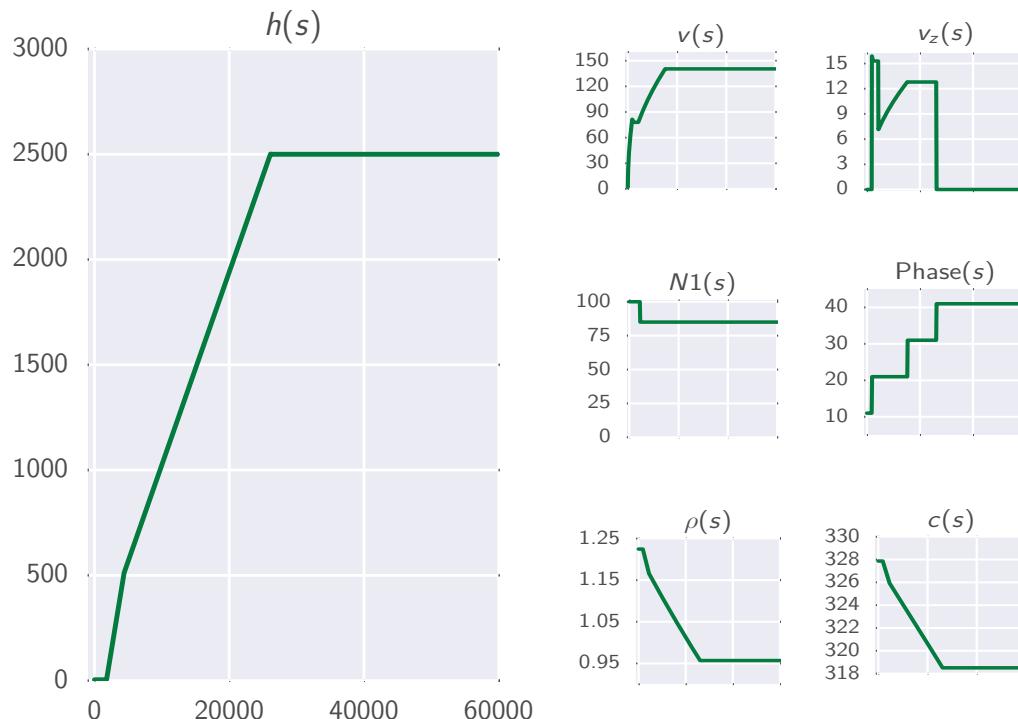


**Abbildung 1:** Beispiel einer extern erstellten Spur mit einer Mittelspur und vier Streuspuren.

Bei der Erstellung der Streuspuren ist zu beachten, dass zu enge Kurvenradien bei der Mittelspur dazu führen können, dass die inneren Streuspuren mit der vorgegeben Streuung nicht mehr erreicht werden können (insbesondere wenn eine Vielzahl an Streuspuren gewünscht ist). In dem Fall muss entweder die Mittelspur oder die Anzahl und Streuung der gewünschten Streuspuren angepasst werden.

## 2.2. Einlesen / Erzeugen der Flugprofile

Flugprofile, d.h. der Höhenverlauf der Flugzeuge über die abgerollte Distanz, komplementiert mit zusätzlichen Parametern, welche von den sonAIR Emissionsmodellen benötigt werden (Geschwindigkeit, Dichte, Schallgeschwindigkeit, Drehzahl, Klappenstellung, Fahrwerkstellung, Störklappenstellung – abhängig vom jeweiligen Emissionsmodell), können aus einer oder mehreren Text-Dateien eingelesen werden. Das Format ist in Anhang 5.3 definiert. Abbildung 2 illustriert mögliche Parameter-Profile, welche abgespeichert werden können.



**Abbildung 2:** Flugprofile mit Höhen-, Geschwindigkeits-, Flugphasen, Dichte-, Schallgeschwindigkeits- und Drehzahlverlauf

In der Praxis kann es schwierig sein, geeignete Profile von Kleinluftfahrzeugen heranzuziehen. Für solche Fälle ist es angebracht, Standardprofile aus der SANC-DB zu erstellen. Das Verfahren ist in Abschnitt 2.3 beschrieben. Nach der Profil-Erzeugung mittels SANC-DB können diese über das normale Import-Tool (s.o.) als Text-File eingelesen werden.

Äquivalent zur Flugspur-Erzeugung können Streuprofile erzeugt werden, um nicht nur eine horizontale, sondern auch eine vertikale Streuung abbilden zu können. Es können beliebig viele Streuprofile erzeugt werden; für jedes Streuprofil muss die Streuung um die Mittelstütze sowie die Bewegungsverteilung festgelegt werden.

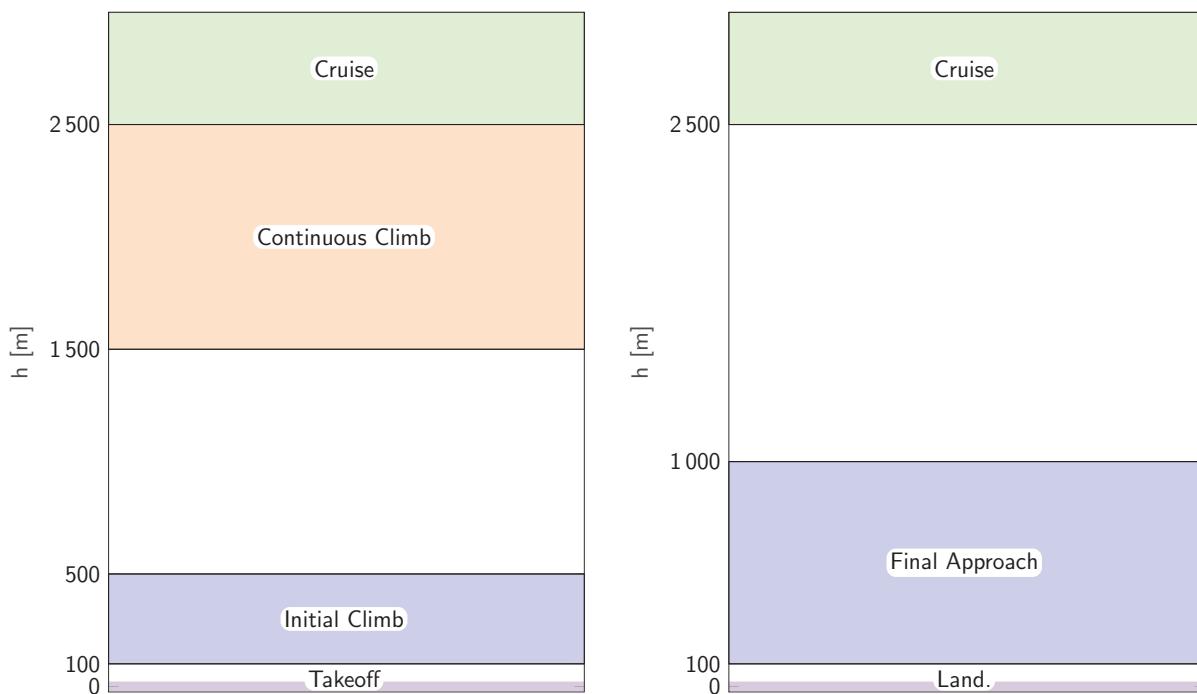
## 2.3. Einlesen / Erzeugen der Flugprofile mittels SANC-DB Standard-Profilen

Aus der SANC-DB können direkt Standard-Profile erstellt werden. Abbildung 3 zeigt die Struktur der Einträge in der SANC-DB. Die Flugbahnabschnitte der Starts und Landungen sind entsprechend Abbildung 4 kombiniert. Bei den Landungen sind die *Initial Approach* Zellen noch nicht in der Datenbank vorhanden. Deshalb wird der *Final Approach* Bereich ausgeweitet (gemäß SANC-DB Dokumentation erstreckt der *Final Approach* Bereich sich von 100 bis 500 m, der *Initial Approach* Bereich von 500 bis 1000 m).

#	2124	100	BAZL	D0418R	DR40	P1.3	P1	Robin DR 400/180R
	2124	200		1000	1.2	NULL	NULL	Lycoming O-360-A3A
	2124	110	109	2.2	3	67.7	74.7	90 0.00 500.0 47.2 100 Takeoff standard power
	2124	210	642	666	726	890	840	759 889 802 789 789 812 800 762 700 652 624 606 582 566 536 492 416 292 141
	2124	120	109	2.2	3	67.7	74.7	90 0.00 4.5 47.2 100 Initial climb standard power
	2124	220	642	666	726	890	840	759 889 802 789 789 812 800 762 700 652 624 606 582 566 536 492 416 292 141
	2124	130	109	2.2	3	63.7	70.7	90 0.00 3.6 51.9 85 Continuous climb standard power
	2124	230	642	666	726	890	840	759 889 802 789 789 812 800 762 700 652 624 606 582 566 536 492 416 292 141
	2124	140	109	2.2	3	59.7	66.7	90 0.00 0.0 61.4 65 Cruise
	2124	240	642	666	726	890	840	759 889 802 789 789 812 800 762 700 652 624 606 582 566 536 492 416 292 141
	2124	160	215	2.7	3	52.7	59.7	90 0.00 -3.2 51.9 45 Final approach
	2124	260	825	975	825	786	905	796 846 755 746 726 716 727 708 700 682 665 658 649 610 579 513 458 359 177
	2124	170	215	2.7	3	46.7	53.7	90 0.00 400.0 42.5 30 Landing
	2124	270	825	975	825	786	905	796 846 755 746 726 716 727 708 700 682 665 658 649 610 579 513 458 359 177

- Allgemeine Infos
  - Flugphase
  - Distanz auf Piste (0 bis Abhebepunkt / Aufsetzpunkt bis 0)
  - Steig-/Sinkgeschwindigkeit (konstant)
  - Geschwindigkeit (konstant ausser für 10/70)
  - Leistungssetzung

**Abbildung 3:** Struktur eines Eintrags der SANC-DB, mit angezeichneten relevanten Parametern für die Profilerzeugung.



**Abbildung 4:** Flugphasen gemäss Höheneinteilung nach SANC-DB [12].

Die Übergänge zwischen den Phasen sind nicht in der SANC-DB enthalten, können aber ebenfalls erstellt werden um Profile ohne Geschwindigkeitssprünge zu generieren (Sprünge in der Steig-/Sinkgeschwindigkeit werden allerdings hingenommen). Hierfür wurden Vergleiche mit Radardaten gemacht, mit der Schlussfolgerung, dass die Zwischenstücke zwar sinnvoll sind (im Gegensatz zu Geschwindigkeitssprüngen), einfache An-

nahmen aber ausreichen. So wurde auch der Vorschlag von E. Lobsiger übernommen alle Segmente mittels der vereinfachten Formeln (1) bis (11) zu beschreiben<sup>1</sup>.

$$\text{Bahnwinkel: } \gamma = \arctan \left( \frac{v_z}{\sqrt{v^2 - v z^2}} \right) \quad (1)$$

$$\text{Höhendifferenz: } h_o - h_u = (s_o - s_u) \cdot \tan \gamma \quad (2)$$

$$\text{Segmentlänge: } L = \sqrt{(s_o - s_u)^2 + (h_o - h_u)^2} \quad (3)$$

$$\text{Beschleunigung: } a = \frac{v_o^2 - v_u^2}{2 \cdot L} \quad (4)$$

$$\text{Zeitdifferenz: } \Delta t = \frac{2 \cdot L}{v_u + v_o} \quad (5)$$

$$\text{Geschwindigkeit total: } v(t) = v_u + a \cdot (t - t_u) \quad (6)$$

$$\text{Geschwindigkeit xy: } v_g(t) = v(t) \cdot \cos \gamma \quad (7)$$

$$\text{Geschwindigkeit z: } v_z(t) = v(t) \cdot \sin \gamma \quad (8)$$

$$\text{Distanz total: } l(t) = v_u \cdot (t - t_u) + \frac{a}{2} \cdot (t - t_u)^2 \quad (9)$$

$$\text{Distanz xy: } s(t) = s_u + l(t) \cdot \cos \gamma \quad (10)$$

$$\text{Distanz z: } h(t) = h_u + l(t) \cdot \sin \gamma \quad (11)$$

Für die Übergangssegmente werden Flugphasen aus den umgebenden Segmenten zugeordnet (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). Für die eingefügten Zwischensegmente wird der Bahnwinkel konstant gehalten (und auf den Wert eines angrenzenden Segments gesetzt) und gleichmäßig über das Segment beschleunigt (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). Zwischen *Continuous Climb* und *Cruise* tritt ein Geschwindigkeitssprung auf.

Segmentbezeichnung	Höhenbereich	Zuordnung der Flugphase	Anleitung für Profilerzeugung
Takeoff	0 m	Takeoff	Bahnwinkel: $\gamma=0$ Beschleunigung von $s=0$ , $v=0$ auf $s=s_{TO}$ , $v=v_{TO}$
Übergang Takeoff – Initial Climb	0–100 m	Initial Climb	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{IC}$ Beschleunigung von $v=v_{TO}$ auf $v=v_{IC}$
Initial Climb	100–500 m	Initial Climb	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{IC}$ Konstant mit $v=v_{IC}$
Übergang Initial Climb – Continuous Climb	500–1500 m	Continuous Climb	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{CC}$ Beschleunigung von $v=v_{IC}$ auf $v=v_{CC}$
Continuous Climb / Pseudo-Continuous Climb	1500–2500 m	Continuous Climb / Initial Climb	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{CC}$ Konstant mit $v=v_{CC}$
Cruise / Pseudo-Cruise	2500 m	Cruise / Continuous Climb	Bahnwinkel: $\gamma=0$ Konstant mit $v=v_C$

**Tabelle 1:** Zuordnung der Flugphasen für Starts und Anleitung für Profilerzeugung

<sup>1</sup> Email von E. Lobsiger, "Re: Umsetzung SANC-DB in Fluglärmberchnungen", 30.12.2015.

Segmentbezeichnung	Höhenbereich	Zuordnung der Flugphase	Anleitung für Profilerzeugung
Landing	0 m	Landing	Bahnwinkel: $\gamma=0$ Beschleunigung von $s=0, v=0$ auf $s=s_L, v=v_L$
Übergang Landing – Final Approach	0–100 m	Final Approach	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{FA}$ Beschleunigung von $v=v_L$ auf $v=v_{FA}$
Final Approach	100–1000 m	Final Approach	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{FA}$ Konstant mit $v=v_{FA}$
Übergang Final Approach – Cruise	1000–2500 m	Final Approach	Bahnwinkel: $\gamma=\gamma_{FA}$ Beschleunigung von $v=v_{FA}$ auf $v=v_C$
Cruise / Pseudo-Cruise	2500 m	Cruise / Continuous Climb	Bahnwinkel: $\gamma=0$ Konstant mit $v=v_C$

Tabelle 2: Zuordnung der Flugphasen für Landungen und Anleitung für Profilerzeugung

Für verschiedene Flugzeuge ist kein *Cruise* Segment in der Datenbank angegeben. In diesem Fall wird aus dem *Continuous Climb* Abschnitt die Geschwindigkeit übernommen und zu einem *Pseudo-Cruise* Segment verbunden. Bei anderen Flugzeugen ist kein *Continuous Climb* Zustand angegeben. In dem Fall wird aus dem *Cruise* Abschnitt die Geschwindigkeit übernommen, sowie alle anderen Leistungsdaten aus dem *Initial Climb* Segment (*Pseudo-Continuous Climb*).

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Erzeugung eines Startprofils mittels Zusammenfügung von Segmenten und Zwischensegmenten.

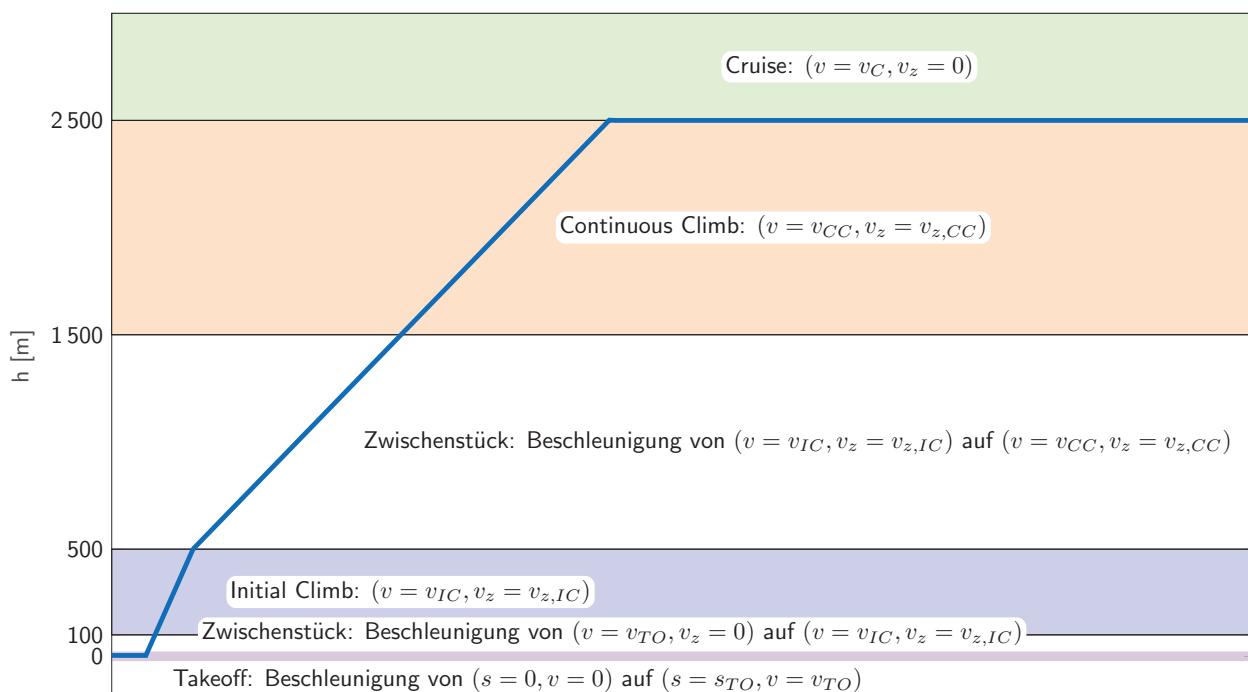


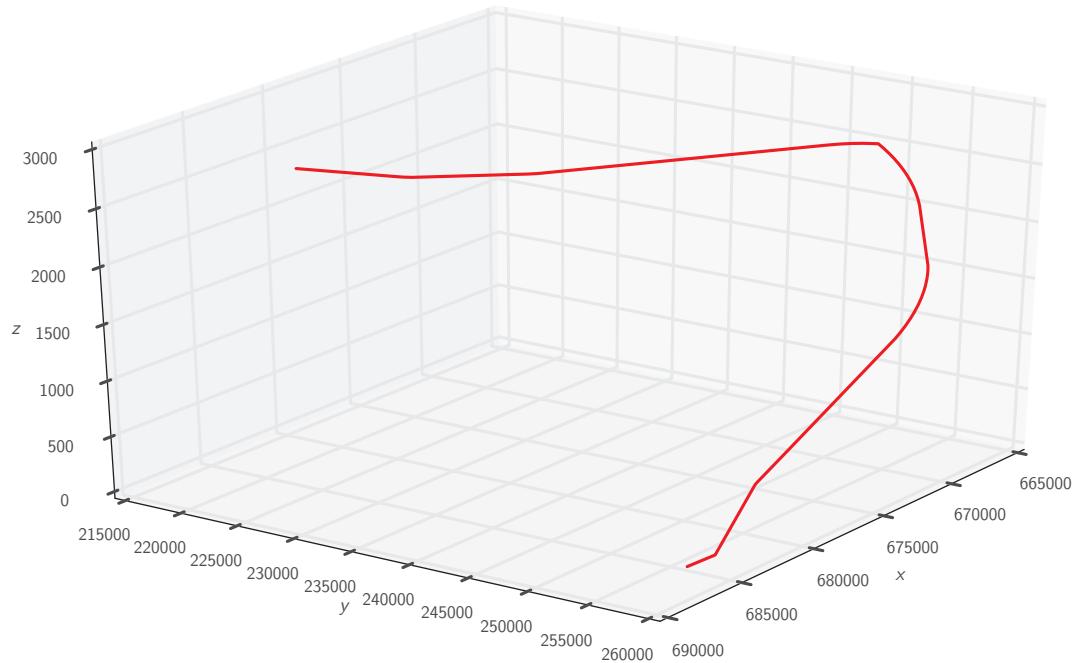
Abbildung 5: Profilerzeugung basierend auf SANC-DB Flugphasen, visualisiert mit einem Beispielsprofil.

Zusätzlich zu den Profilen (Höhen- und Geschwindigkeitsverlauf) wird zu jedem Zeitpunkt die Flugphase und die Leistungssetzung abgespeichert. Die akustischen Daten müssen entsprechend der Flugphase gewählt werden. Die Zwischenstücke verweisen auf die Flugphase, aus dem die Leistungsdaten zugeordnet wurden (s.o.). Mehr Details zu der SANC-DB befinden sich in [12].

## 2.4. Faltung der Spuren und Profile zu Flugbahnen

Wenn Flugspuren und Flugprofile definiert sind, müssen diese zu Flugbahnen kombiniert werden. Diese so genannte „Faltung“ verknüpft die Spuren und Profile über die abgerollte Distanz (Abbildung 6).

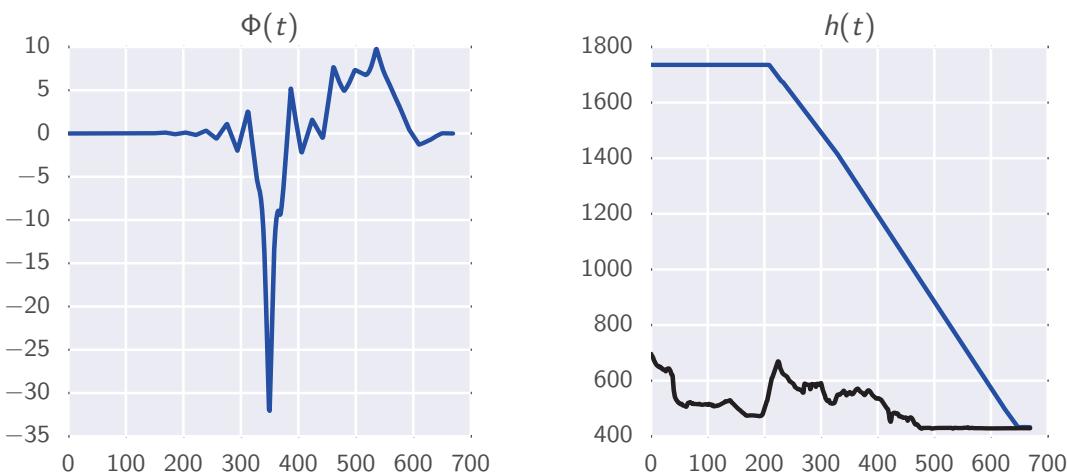
Die Zuordnung der Spuren zu Profilen erfolgt über eine „Spurwahlliste“, in welcher zusätzliche Einstellungen für die Faltung geregelt werden können (siehe unten). Eine Beispiel-Spurwahlliste ist in Anhang 5.4 gegeben. Es muss jeweils die Mittelstütze dem Mittelprofil zugeordnet werden. Alle Streu-Spuren und Streuprofile werden automatisch auch verknüpft ( $m$  Streuspuren  $\times$   $n$  Streuprofile =  $m \times n$  Flugbahnen pro Typ und Route).



**Abbildung 6:** Aus der Flugspur und dem Flugprofil entsteht durch Faltung die Flugbahn.

Bei der Erstellung der Flugbahnen wird eine Glättung vorgenommen, da die Spuren und Profile grob digitalisiert sein können und Spitzen in den Kurven geglättet werden müssen. Die Glättung erfolgt mittels Least-Squares B-Spline. Über die Spurwahlliste kann die Anzahl Fix- und Kontrollpunkte sowie der Grad (3. oder 5. Ordnung) des B-Spline angepasst werden, um den Glättungseffekt je nach Situation variieren zu können.

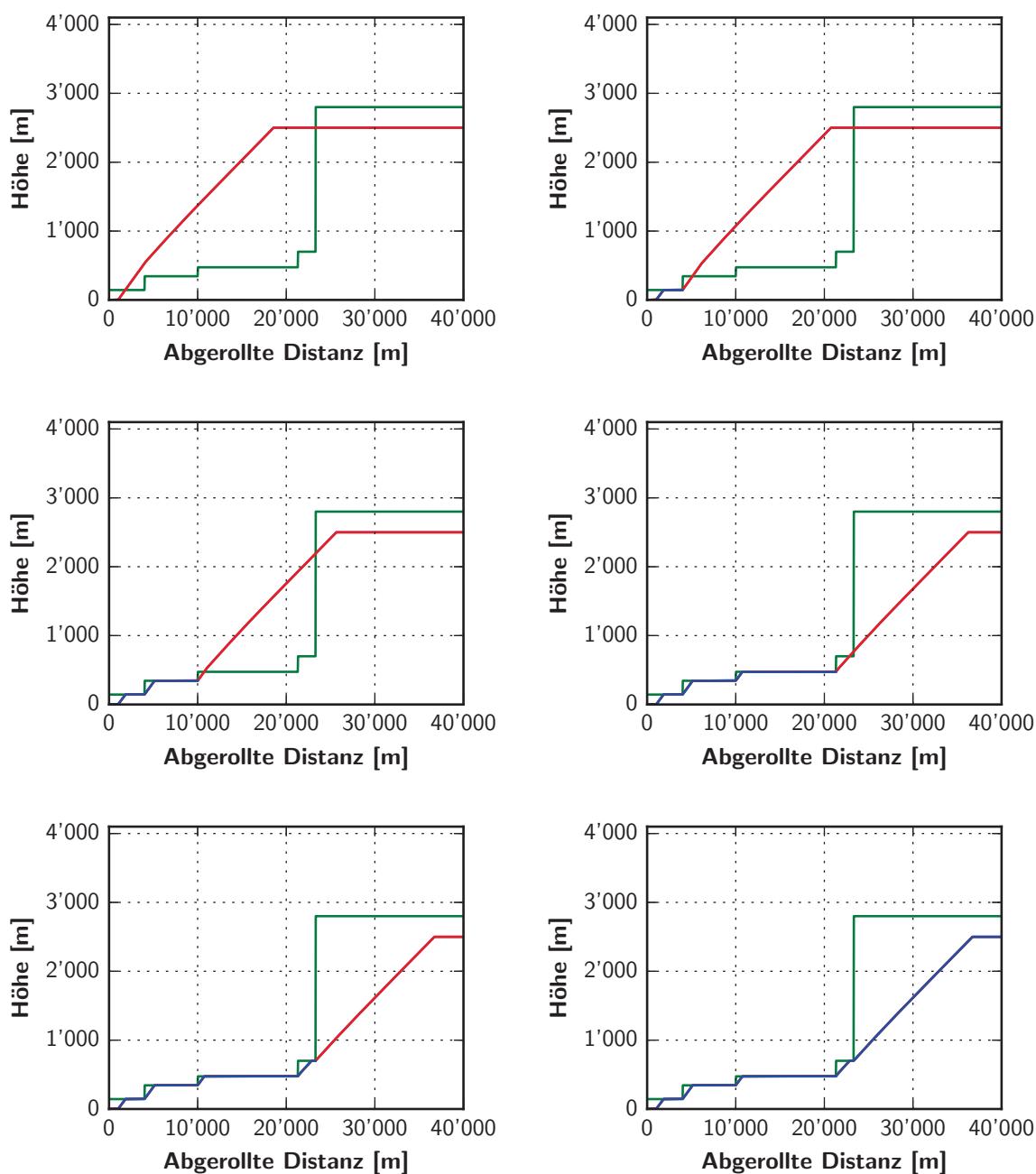
Eine Reihe von Kontrollen wird ausgeführt um zu prüfen, ob die erstellten Flugbahnen zulässig sind. So muss eine Mindesthöhe über Grund eingehalten werden und es dürfen keine unrealistischen Querneigungswinkelverläufe auftreten (siehe Abbildung 7). Ebenfalls ist zu prüfen ob die Spur auf der Piste realistisch ist (z.B. ob die Piste eine ausreichende Startlänge hat).



**Abbildung 7:** Bei der Faltung wird u.a. der Querneigungswinkel sowie die Distanz zum Gelände geprüft.

Der Leitfaden Fluglärm [1] schreibt konstante Beschleunigung/Entschleunigung auf der Piste vor. Um dieser Anforderung zu genügen, kann der Geschwindigkeitsverlauf auf der Piste geändert werden (über die Spurwahlliste), sodass der ursprüngliche Verlauf mit einem konstant beschleunigten Geschwindigkeitsverlauf von 0 m/s bis zur Abhebegeschwindigkeit ersetzt wird (bei Landungen ein konstant entschleunigter Geschwindigkeitsverlauf von der Aufsetzgeschwindigkeit bis 0 m/s). Für Spezialberechnungen kann jedoch auch der ursprünglich im Profil enthaltene Geschwindigkeitsverlauf auf der Piste weiterverwendet werden.

Die erstellten Flugbahnen können schlussendlich noch mittels in der GIS-Umgebung definierten Höhenbegrenzungen gemäss Luftfahrtkarten verschnitten werden und so umgewandelt werden, dass die Flugbahn die Höhenbegrenzungen berücksichtigt. So kann auch der Betrieb an einem Flugplatz, z.B. eine gegebene Flughöhe für Volten, mittels Höhenbeschränkung abgebildet werden. Das Vorgehen um die Höhenbegrenzungen einzuführen ist in Abbildung 8 skizziert. Das anfängliche Flugprofil wird mit der örtlich geltenden Begrenzung (zugeordnet über  $(x,y)$  und abgerollter Distanz) verschnitten und es werden horizontale *Cruise Segmente* eingefügt.



**Abbildung 8:** Das Flugprofil wird über die abgerollte Distanz mit den Höhenbeschränkungen verschnitten und horizontale Segmente werden eingefügt um die Begrenzungen einzuhalten (grün: Höhenbeschränkung; rot: initial erstelltes Profil; blau: mit Höhenbeschränkung verschnittenes Profil).

### 3. Emissionsmodelle aus der SANC-DB

Ziel dieses Kapitels ist die Dokumentation der Anbindung der SANC-DB an sonAIR, mit welcher neue Emissionsmodelle auf Basis der Datensätze der SANC-DB erstellt werden können. Mit dieser Funktionalität können zukünftig fehlende Typen, z.B. Kleinluftfahrzeuge oder Helikopter, in die Emissionsdatenbank von sonAIR aufgenommen werden. Die ersten 13 Flugzeugtypen, die im vorliegenden Projekt erstellt wurden, entsprechen den in SANC-TE [13] vorgeschriebenen Quellendaten. Somit wurde die Grundlage geschaffen, mit sonAIR eine SANC-TE konforme Testberechnung auf der aktuellen Basis der SANC-DB durchzuführen.

#### 3.1. SANC-DB

Die SANC-DB ist eine standardisierte Datenbank, die die massgebenden akustischen Quellendaten für Fluglärmberchnungen in der Schweiz enthält [12]. Die Quellenbeschreibung ist praxisorientiert und unabhängig von einem Berechnungsmodell. Sie basiert auf dem zeitlichen Pegelverlauf eines geradlinigen Überflugs bei 304.8 m. Dieser Pegelverlauf wird mithilfe der in Abbildung 9 aufgelisteten Kennzahlen beschrieben, die für unterschiedliche Flugphasen (s. Tabelle 3) in der SANC-DB hinterlegt sind.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Einträge der SANC-DB durch verschiedene Flugzeugtypen und Herkunftsarten. Datensätze mit Herkunftsart BAZL umfassen Kleinluftfahrzeuge und Helikopter und basieren auf Zertifizierungsdaten. Es gibt daher für jeden Flugzeugtyp eine grosse Anzahl an Subtypen, die sich anhand des Maximalpegels unterscheiden. Die Richtwirkung als auch die Normspektren sind für alle Kleinluftfahrzeuge wie auch Helikopter fest definiert. Die Richtwirkung ist symmetrisch mit maximalem Emissionswinkel bei 90°. Für Kleinluftfahrzeuge ist die Differenz zwischen  $L_{AE}$  und  $L_{max}$  auf 7 dB, für Helikopter auf 8 dB festgelegt. Die Spektren wurden aus Spektralklassen des INM6.0 entnommen. Für jede Flugphase, getrennt nach Kleinluftfahrtzeug und Helikopter, wird immer dieselbe Spektralklasse zur Definition der Ausbreitungsdämpfung angegeben.

Die Spektralklassen des INM6.0 wurden für eine Standardatmosphäre nach ISO9613 [14, 15] umgerechnet und für eine Ausbreitungsdistanz von 304.8 m abgelegt. Die Spektren sind unbewertet und wurden bei 1 kHz auf 70 dB normiert. Die spektralen Pegelwerte in Abbildung 9 sind zudem mit dem Faktor 10 zu dividieren.

#	2124	100	BAZL	D0418R	DR40	P1.3	P1	Robin DR 400/180R
2124	200	1000	1.2	NULL	NULL	NULL	Lycoming	O-360-A3A
2124	110	109	2.2	3	67.7	74.7	90	0.00
2124	210	642	666	726	890	840	759	889
2124	120	109	2.2	3	67.7	74.7	90	0.00
2124	220	642	666	726	890	840	759	889
2124	130	109	2.2	3	63.7	70.7	90	0.00
2124	230	642	666	726	890	840	759	889
2124	140	109	2.2	3	59.7	66.7	90	0.00
2124	240	642	666	726	890	840	759	889
2124	160	215	2.7	3	52.7	59.7	90	0.00
2124	260	825	975	825	786	905	796	846
2124	170	215	2.7	3	46.7	53.7	90	0.00
2124	270	825	975	825	786	905	796	846

- Allgemeine Infos
- Flugphase
- Maximalpegel  $L_{\text{max}}$
- Ereignispegel  $L_{\text{AE}}$
- Emissionswinkel  $\theta$
- Asymmetrieparameter  $\eta$
- Normiertes Spektrum

Abbildung 9: Beispielhafter SANC-DB Eintrag für den ICAO-Typ DR40 mit Herkunft BAZL

Tabelle 3: Flugphasen der SANC-DB

OP	Bezeichnung
10	Takeoff standard power
11	Takeoff flex power
12	Takeoff full power
19	Takeoff with afterburner
20	Initial climb standard power
21	Initial climb flex power
22	Initial climb full power
29	Initial climb with afterburner
30	Cont. climb standard power
31	Cont. climb flex power
32	Cont. climb full power
40	Cruise
60	Final approach
70	Landing

Grossflugzeuge, militärische Jets und weitere Helikopter stammen aus dem Fluglärmprogramm FLULA2 und sind von der Herkunftsart Empa. Die Kennzahlen für die SANC-DB wurden mit einem geradlinigem Überflug zu Referenzbedingungen (s. [12]) berechnet. Da FLULA2 keine spektrale Information enthält wurden synthetische Normspektren erstellt, welche das Ausbreitungsverhalten der Quelle auch für Distanzen zwischen 100 m und 6400 m gut reproduzieren. Je nach individuellem Flugzeugtyp können die Richtwirkungen mit der Herkunft Empa stark unsymmetrisches Verhalten aufweisen und individuelle Normspektren besitzen.

### 3.2. Methodik

Das sonAIR Emissionsmodell ist eine lineare Regression mit multiplen Parametern, die je nach Datengrundlage und Flugzeugtyp angepasst werden können (s. [8, 11]). Generell enthält jedes Modell jedoch mindestens

eine 2D Richtwirkung pro Terzband, die entweder mit Flugparametern [8] oder über Flugphasen [11] skaliert. Das Modell wird 24 mal für Terzen im Bereich von 25 Hz bis 5 kHz erstellt. Für das Dienstleistungs-Simulationstool (DS-Tool) werden anschliessend Emissionsspektren für alle Kombinationen der Modellparameter innerhalb eines definierten Wertebereichs berechnet und in der Emissionsdatenbank abgelegt.

Da die SANC-DB nur Kennzahlen des zeitlichen Pegelverlaufs und ein Ausbreitungsspektrum pro Flugphase liefert, ist es nicht zielführend bzw. möglich das Regressionsmodell anhand dieser Grundlage zu kalibrieren. Die Emissionsdatenbank des DS-Tools bietet hingegen eine allgemeine Schnittstelle, die es direkt ermöglicht aus der SANC-DB generierte Emissionsspektren mit Richtwirkungskorrektur abzulegen. Diese Methodik wird im Folgenden beschrieben.

Startpunkt für die Generierung der Emissionsmodelle sind das Normspektrum und der  $L_{A,max}$  aus der SANC-DB. In Abbildung 10 ist das Normspektrum der A320 (Herkunft Empa, FLULA2) beispielhaft dargestellt (A). Mit dem Ziel ein Immissionsspektrum mit dem korrekten  $L_{A,max}$  zu bestimmen, wird das Normspektrum A bewertet (B) und sein Summenpegel  $L_{A,norm}$  berechnet. Anhand der Pegeldifferenz

$$\Delta L_{A,max} = L_{A,norm} - L_{A,max},$$

kann somit das Normspektrum zu einem Immissionsspektrum mit dem Summenpegel  $L_{A,max}$  korrigiert werden (C).

$$L_p(f) = L_{norm}(f) - \Delta L_{A,max}$$

Das Emissionsspektrum  $L_{em}$  wird nun nach ISO9613-2 [15] und der ISA Standardatmosphäre ( $T=15^\circ\text{C}$ ,  $p=1013.2 \text{ hPa}$ , rel.H.=70%) von  $d = 304.8 \text{ m}$  auf  $d_0 = 1 \text{ m}$  zurückgerechnet. Das Emissionsspektrum ist in Abbildung 10 mit (D) gekennzeichnet.

$$L_{em}(f) = L_p(f) + A_{div} + A_{atm}(f) + A_{ground}(f)$$

Die Normspektren der SANC-DB sind in Terzbändern von 50 Hz bis 10 kHz definiert. Nach ISO9613-1 [14] werden die Mittenfrequenzen der Terzbänder mit folgender Formel berechnet. Der entsprechende Index k wird für die Berechnung des mittleren Bodeneffekts verwendet, um die Abklingrate über 316 Hz ( $k = -5$ ) pro Terz mathematisch zu beschreiben.

$$f = 1000 \cdot 10^{0.1 k}; k = -13 \dots 10$$

Im Detail lassen sich die Ausbreitungsdämpfungen basierend auf Terzbänder wie folgt berechnen:

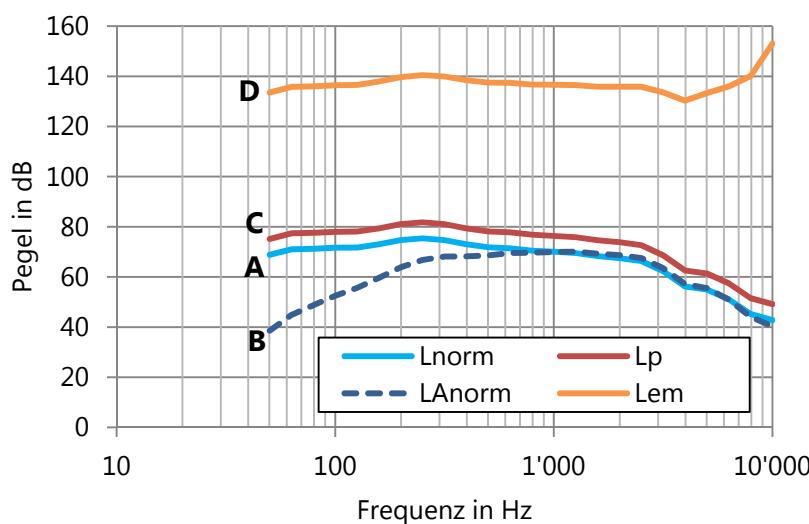
Geometrisch Verdünnung:  $A_{div} = 20 \log_{10} d/d_0$  nach [15]

Luftdämpfung:  $A_{atm}(f) = \alpha_f d (1.0053255 - 0.00122622 \alpha_f d)^{1.6}$  nach [3]

Mittlerer Bodeneffekt:  $A_{ground}(f) = \begin{cases} -2.3 & \text{für } k \leq -5 \\ -(2.3 - 7/60 \cdot (k+5)) & \text{für } k > -5 \end{cases}$  nach [9]

Um die Kenndaten der SANC-DB zu reproduzieren ist es wichtig, dass die Ausbreitungsberechnung gleichermaßen wie bei der Rückrechnung erfolgt. Die Ausbreitungsberechnung im DS-Tool folgt einem Hybridsatz, bei dem unter einem wählbaren Sichtwinkelkriterium die Dämpfungen mit dem präzisen Ausbreitungsmodell sonX [10] und darüber als Direktschall ohne Interaktion mit dem Untergrund (Hindernisse / Bodenreflexionen) berechnet werden. Die vereinfachte Direktschallberechnung erfolgt nach exakt den gleichen Dämpfungstermen wie oben beschrieben. Das sonX Modell hingegen verwendet eine detaillierte Methode zur Berechnung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und der Bewuchsdämpfung. Im Modus BASIC wer-

den die geometrische Verdünnung und die Luftdämpfung gleichermaßen berechnet. Der Modus METEO wird im Normalfall für sonAIR nicht verwendet.

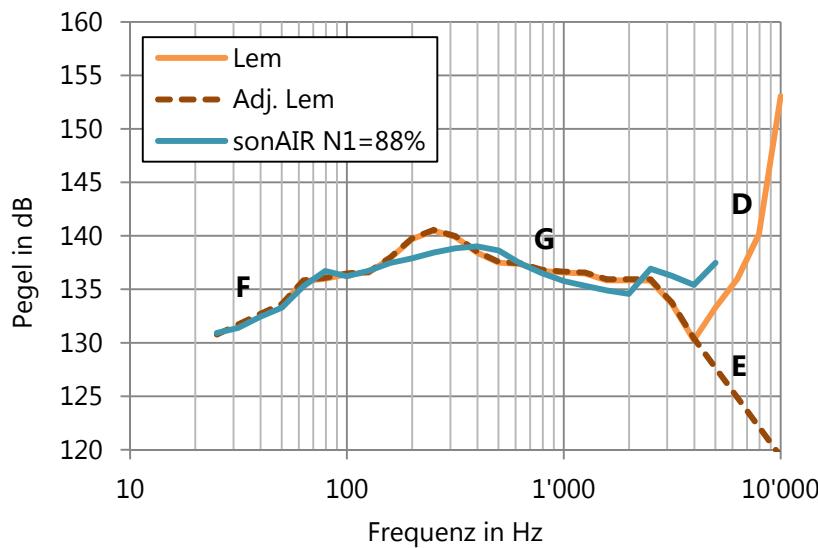


**Abbildung 10:** Normspektren und einzelne Berechnungsschritte A-D (s. Text) am Beispiel der A320 mit reduzierter Startleistung (OP=11) und einem  $L_{A,max}=86$  dB.

Der Bodeneffekt  $A_{ground}(f)$  entspricht dabei dem mittleren Bodeneffekt für Grasland [9] aus der Direktschallberechnung des DS-Tools. Alle Flugzeugtypen mit Herkunft Empa enthalten indirekt einen Bodeneffekt aus der Messung, dies dürfte auch für die Zertifizierungsdaten des BAZL gelten. Die Bodeneffektkorrektur ist dabei unabhängig von der Empfängerhöhe, Flughöhe und dem seitlichen Versatz wie in [9] gezeigt wurde. Systematische Unterschiede zeigen sich höchstens beim Strömungswiderstand.

Das zurückgerechnete Emissionsspektrum im Beispiel zeigt ab 4 kHz eine deutliche Überschätzung der Emission, verdeutlicht in Abbildung 11 (D). Da dies nur bei Typen der Herkunftsart Empa der Fall ist, wird vermutet dass die hier zugrundeliegenden Spektren ab 4 kHz zu hoch geschätzt wurden. Dies spielt jedoch aufgrund der hohen Luftdämpfung beim Vergleich im  $L_{AE}$  keine Rolle. Im Emissionsspektrum ist der Verlauf jedoch unschön und wurde daher mit der mittleren Steigung zwischen 2.5 kHz und 4 kHz korrigiert (E).

Indessen ist das sonAIR Modell, wie eingangs beschrieben, von 25 Hz bis 5 kHz definiert. Daher werden Terzen oberhalb von 5 kHz nur für die Dopplerverschiebung weiter verwendet. Die fehlenden drei Terzbänder unterhalb von 50 Hz wurden mit der mittleren Steigung des Emissionsspektrums zwischen 50 und 100 Hz extrapoliert (F). Im Vergleich mit einem Spektrum aus sonAIR mit niedriger Startleistung (N1=88%) zum Zeitpunkt des Maximalpegels (G) zeigt, dass das zurückgerechnete synthetische Spektrum recht ähnlich ist. Die Extrapolation des aus der SANC-DB abgeleiteten Emissionsspektrum stimmt für tiefe Frequenzen sehr gut (F), während es für hohe Terzen unterschätzt (E). Hier wird es jedoch nur bis 5 kHz verwendet.



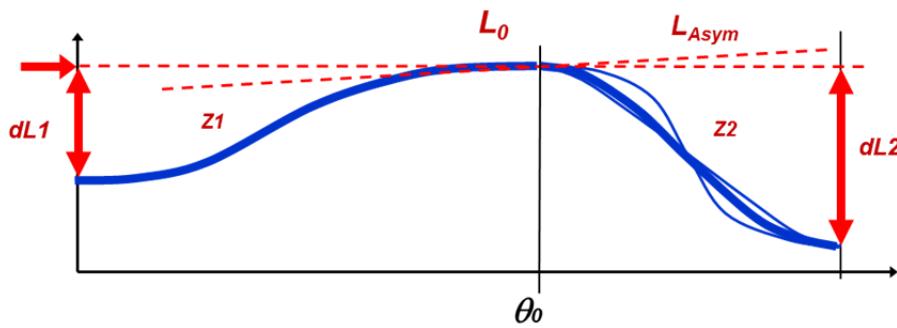
**Abbildung 11:** Emissionsspektrum und korrigiertes Emissionsspektrum am Beispiel der A320 mit reduzierter Startleistung (OP=11) und einem  $L_{A,max}=86$  dB. Zum Vergleich wurde ein Maximalpegel-spektrum mit niedriger Startleistung aus sonAIR eingezeichnet.

Für Kleinluftfahrzeuge und Heli mit Herkunft BAZL, also mit symmetrischer Richtwirkung und einem maximalen Emissionswinkel von  $90^\circ$  würde eine Simulation mit diesem Spektrum bereits den korrekten  $L_{Amax}$  ergeben. Der  $L_{AE}$  wäre jedoch noch nicht korrekt, da die Gesamtenergie noch von der Richtwirkung abhängt. Aus diesem Grund wird das Emissionsspektrum noch um eine generische Richtwirkungsfunktion  $L_{dir}(\theta)$  erweitert die es ermöglicht, sowohl den  $L_{Amax}$  als auch den  $L_{AE}$  korrekt wiederzugeben. Um die Optimierung nicht unnötig komplex zu gestalten und ein konstantes Emissionsspektrum über  $\theta$  zu erhalten wird die Richtwirkungsfunktion für jede Terz mit den gleichen Modell-Parametern angewandt.

$$L_{dir}(\theta) = L_0 + L_i \left\{ 1 - \left[ 0.5 \left( \cos \left( \frac{\theta - \theta_0}{\theta_0} \cdot \pi \right) + 1 \right) \right]^{z_i} \right\} + L_{Asym} \cdot \frac{\theta_0 - \theta}{180^\circ},$$

mit  $i = 1$  für  $\theta \leq \theta_0$  und  $i = 2$  für  $\theta \geq \theta_0$

$L_0$	Referenzpegel
$\theta_0$	Emissionswinkel zum Referenzpegel ( $L(\theta_0) = L_0$ )
$L_i$	Pegelkorrektur vor bzw. nach Referenzpegel: $L_1(\theta \leq \theta_0)$ bzw. $L_2(\theta \geq \theta_0)$
$z_i$	Exponent zur Formung der Pegelkorrektur $L_i$ vor bzw. nach $\theta_0$
$L_{Asym}$	Lineare Asymmetrie



**Abbildung 12:** Die generische Richtwirkungsfunktion und seine Parameter

Das generische Modell wurde bereits in [6] entwickelt und beschreibt eine Änderung des Pegels über den longitudinalen Winkel  $\theta$ . Abbildung 12 zeigt den Funktionsverlauf in Abhängigkeit der hervorgehobenen Modell-Parameter auf.

Aufgrund der festgesetzten Pegeldifferenz von  $dL = L_{AE} - L_{Amax} = 7$  dB für Kleinluftfahrzeuge (Klasse K) können Standardparameter aus [6] für die Richtwirkung verwendet werden (s. Tabelle 4). Für andere Flugzeugtypen mit Herkunft Empa müssen die generischen Richtwirkungsmodelle individuell optimiert werden, sodass alle Kennzahlen aus der SANC-DB möglichst gut übereinstimmen. Dies wurde mit dem Optimierungsalgorithmus `patternsearch` in Matlab erreicht. Als Zielfunktion  $d$  wird jede Kennzahl (Definitionen s. [12]) individuell gewichtet, um ein möglichst optimales Ergebnis zu erzielen.

$$d = 5 \left| \frac{dL}{dL_0} - 1 \right| + 3 \left| \frac{L_{AE}}{L_{AE,0}} - 1 \right| + 3 \left| \frac{L_{A,max}}{L_{A,max,0}} - 1 \right| + 2 \left| \frac{\theta}{\theta_0} - 1 \right| + 3 \left| \frac{\eta + 1}{\eta_0 + 1} - 1 \right|$$

Der Vorteil von `patternsearch` ist, dass die Optimierung mit den in Tabelle 4 verwendeten Startwerten immer zum gleichen Ergebnis kommt. Ein Optimierungsalgorithmus wie `particleswarm` mit einer zufälligen Anfangspopulation führt zu keiner konsistenten Lösung und ist daher ungeeignet. Für Helikopter mit  $dL=8$  dB waren keine Standardwerte vorhanden, daher werden diese auch mit Herkunft BAZL optimiert. Im Gegensatz zu Grossflugzeugen (G) und Militärjets (M) ist die Richtwirkung bei Helikoptern (H) jedoch zwingend symmetrisch, siehe zugelassener Parameterbereich pro Typ im Anhang 5.5.

Unabhängig davon, ob aus den Herkunftsdaten indirekt ein Dopplereffekt enthalten ist oder nicht, sollte dieser beim Ablegen in die Emissionsdatenbank herausgerechnet werden, da er bei der Simulation auf die Emissionsspektren angewendet wird. Für den Herkunftsyp Empa ist der Dopplereffekt z.B. auch indirekt in den Kennzahlen enthalten, da der Dopplereffekt bei der Modellerstellung von FLULA2 nicht entfernt wurde. Die Amplitudenverstärkung durch die Flight Effects (FE) einer bewegten Quelle werden mittels  $\Delta L_{FE}$  korrigiert. Anschliessend wird die Frequenzverschiebung aufgrund des Dopplereffekts auf die Emissionsspektren angewandt. Hierbei wird angenommen, dass die Energie pro Terzband gleichmäßig verteilt ist.

$$\Delta L_{FE} = 40 \log_{10} \frac{1}{1 - Ma_k \cos(\theta_k)}$$

**Tabelle 4:** Standardwerte bzw. Startwerte für verschiedene Flugzeugklassen

<b>Klasse</b>	<b>Standard</b>		<b>Startwerte</b>	
	<b>K</b>	<b>H</b>	<b>G</b>	<b>M</b>
<b>L0</b>	0	0	0.5	0.5
<b>L1</b>	-9	-9	-5	-5
<b>L2</b>	-9	-9	-10	-15
<b>z1</b>	1	1	1	1
<b>z2</b>	1	1	1	1
<b>LAsym</b>	0	0	0	0
$\theta_0$	90	90	90	130

Die Ergebnisse der Optimierung werden als binäre Datei (.mat) abgelegt und können somit nachvollzogen werden und auch direkt in Matlab für Vergleiche mit FLULA2 simuliert werden (s. Kapitel 3.4). Die Abweichungen zur SANC-DB sind bereits für jede Flugphase hinterlegt. Für das DS-Tool wird eine Lookup-Tabelle erzeugt mit der die Emissionsdatenbank direkt erweitert werden kann. Die Lookup-Tabelle enthält alle vorhandenen Flugzustände (aus Tabelle 3) als individuellen Index pro Flugzeugtyp und Emissionsspektren für den Polarwinkel  $\theta$  in  $10^\circ$  Schritten. Eine Zuordnungstabelle für den Flugzustand und Winkel wird für jeden Flugzeugtyp individuell exportiert und abgelegt. Diese müssen beim Import in die Geodatenbank zwingend verwendet werden.

### 3.3. Erstellte Typen

In Hinblick auf eine zukünftige SANC-TE Berechnung mit sonAIR wurden Emissionsmodelle aller Flugzeugtypen des Quellendatensatzes aus SANC-TE erstellt (Tabelle 5). Sie basieren auf dem SANC-TE Datensatz V2.0 vom 09.04.2014 [13]. Prinzipiell könnten mit der in diesem Bericht vorgestellten Methode auch weitere ausgesuchte Flugzeugtypen aus der aktuellen SANC-DB als Emissionsmodell in sonAIR importiert werden. Eine Übersicht der verwendeten Pfade und Skripte ist im Anhang 5.1 gegeben.

Für die Bezeichnung in sonAIR wurde konsistent die ICAO-Bezeichnung verwendet. Bei Typen der Herkunft Empa stammen die SANC-DB Kenndaten ursprünglich aus FLULA2, der entsprechende RC-Typ ist angegeben.

Die durch die Optimierung erhaltenen Kenndaten für 304.8 m sind im Anhang 5.6 dokumentiert und mit den Zielwerten der SANC-DB verglichen. Diese müssen unbedingt überprüft werden bevor sie in sonAIR importiert und verwendet werden. Die meisten Flugzeugtypen des SANC-TE Quellendatensatzes weisen sehr kleine Abweichungen von den Kenndaten auf, auch gekennzeichnet durch ein niedrigen Wert  $d$  der Zielfunktion. Abweichungen von  $\theta$  bis zu  $10^\circ$  können dabei vernachlässigt werden, am wichtigsten ist die Übereinstimmung des  $L_{AE}$  und  $L_{Amax}$ . Diese weichen signifikant beim Start des C550 (+1 dB) und bei der Landung des F18 (-0.6 dB) ab. Ebenso auffällig ist eine Abweichung des Asymmetrieparameters  $\eta$  (-0.5) bei Starts der F18 und der B763. Bei diesen Flugzeugtypen schafft es die Optimierung nicht, die generische Richtwirkung für alle Kenndaten zu optimieren. Die Diskussion dieser Abweichungen wird in Kapitel 3.4 fortgeführt.

**Tabelle 5:** SANC-TE Quellendatensatz

sonAIR SANC-ID	SANC-ID	Herkunft	FLULA2	Klasse	Bezeichnung
A320	20005	Empa	A320	G	Airbus A320
AT43	20015	Empa	AT42	G	ATR42 (all series)
B744	20025	Empa	B7474	G	Boeing 747-400
B763	20029	Empa	B7673	G	Boeing 767-300
C172	1254	BAZL	C172	K	Cessna Aircraft Company 172 R
C340	340	BAZL	C340	K	Cessna Aircraft Company 340
C550	20043	Empa	C550	G	Cessna 550 Citation II
F18	20056	Empa	F18	M	McDonnel Douglas F/A-18 Hornet
F70	20060	Empa	FK70	G	Fokker 70
MCR1	1617	BAZL	MC01	K	Experimental Dyn-Aero MCR-01 Club
MD81	20069	Empa	MD80	G	McDonnell Douglas MD-80/81/82
A109	20001	Empa	A109K	H	Agusta A109K2
R44	10052	BAZL	R44	H	Robinson Helicopter Co. R 44

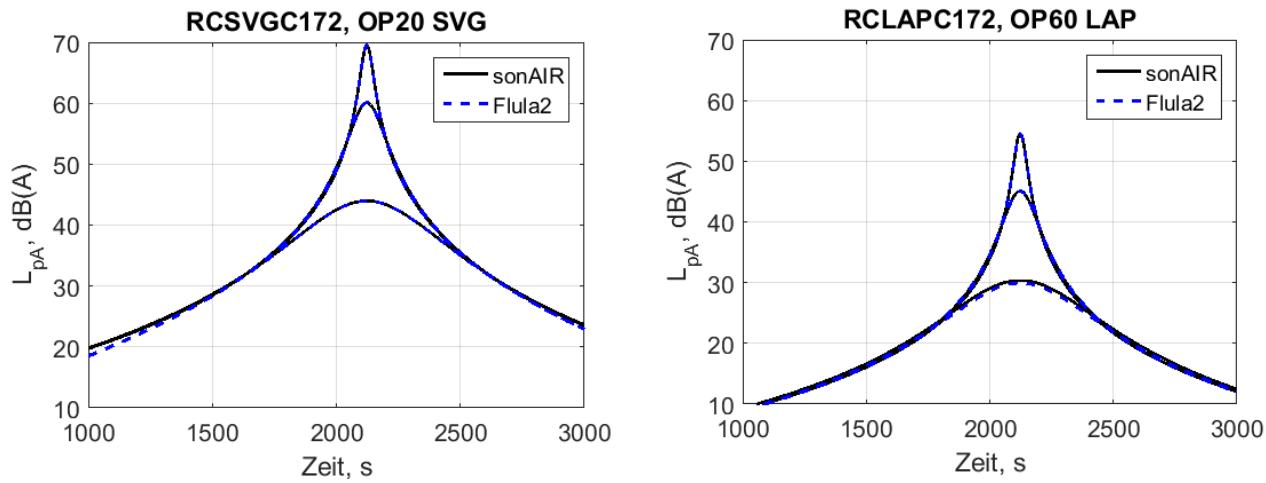
### 3.4. Vergleich mit FLULA2

Für einen Vergleich über weitere Distanzen von 800 m und 3200 m wurden alle entsprechenden FLULA2-Typen nach Tabelle 5 verwendet. Flugzeugtypen mit der Herkunft BAZL wurden dabei in FLULA2 auch über eine Optimierung der generischen Richtwirkung und einen Polynomfit die Hik-Koeffizienten bestimmt [5, 7]. Die Kenndaten der anderen Typen stammen ursprünglich aus FLULA2.

Ziel des Vergleichs ist eine Überprüfung der Kenndaten bei grösseren Distanzen, da die Optimierung ausschliesslich auf eine Überflughöhe von 304.8 m durchgeführt wurde und die Abweichungen mit zunehmender Überflughöhe zunehmen könnten. Hierfür werden direkt die Optimierungsresultate verwendet und mit der oben beschriebenen Ausbreitung simuliert. Daher kommt es bei diesen Vergleichen zu keinen Differenzen aufgrund der diskret abgelegten Emissionsspektren je 10° Polarwinkel. Weitere Einstellungen der Simulation:

- Die Laufzeit wird konsistent zur Vergleichsberechnung mit dem FLULA2-Modell vernachlässigt.
- Schallausbreitung wie in Kapitel 3.2. Die Luftdämpfungskorrektur für Breitbandquellen wird in FLULA2 nicht verwendet, ihr Einfluss ist für A-bewertete Pegel bis 3200 m aber vernachlässigbar.
- Der mittlere Bodeneffekt wird wie im Direktschallmodus des DS-Tools addiert.
- Der Dopplereffekt wird wie für die Lookup-Tabelle entfernt und anschliessend wieder hinzugefügt. Dies führt zu einer Glättung der Spektren durch die Mittelung konstanter Energien aus jeweils zwei aneinander liegenden Terzen. Die Anwendung der Dopplerverschiebung ist nicht reversibel.

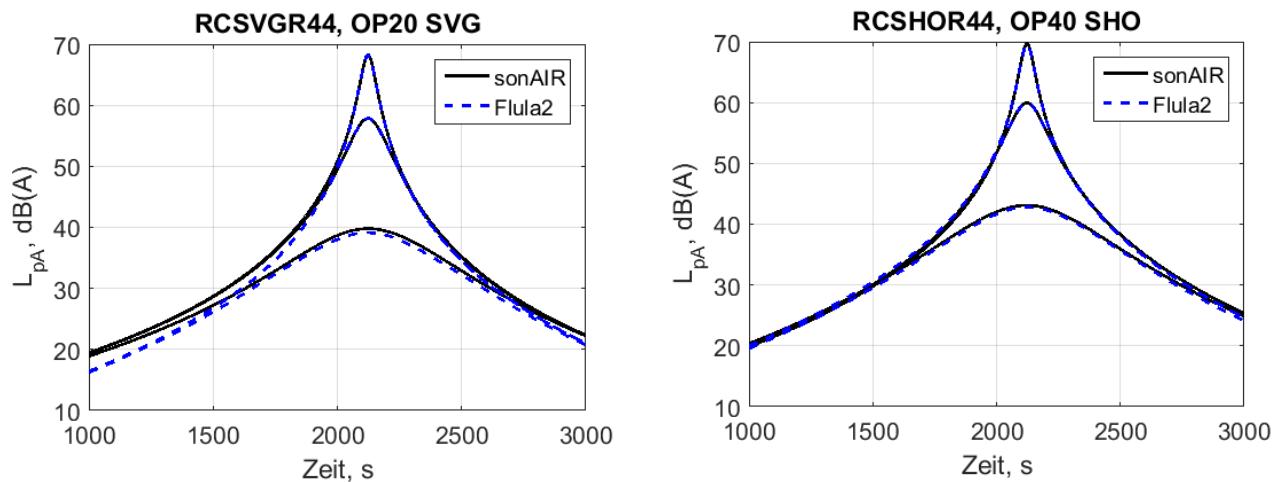
Für Kleinluftfahrzeuge mit Herkunft BAZL wurden Standardwerte anstatt einer Optimierung verwendet. Diese Typen wurden jedoch sehr ähnlich in FLULA2 umgesetzt. Die Vergleiche zeigen daher über alle Distanzen gute Resultate, wie am Beispiel der C172 in Abbildung 13 zu sehen. Die Kenndaten werden für Starts für alle Distanzen sehr gut reproduziert (Anhang 5.7, Tabelle 13). Für Landungen stimmen die Kennzahlen bei 800 m noch sehr gut, aber bei 3200 m kommt es zu Abweichungen vom  $L_{AE}$  und  $L_{Amax}$  von rund 0.4 dB.



**Abbildung 13:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m für Kleinluftfahrzeuge am Beispiel der C172.

Ebenso zeigen Helikopter mit Herkunft BAZL im Vergleich zur Implementation in FLULA2 sehr ähnliche Kenndaten über alle Distanzen (Abbildung 14). Wie bei der C172 sind die Kenndaten bei 800 m noch etwa gleich,  $L_{AE}$  und  $L_{Amax}$  weichen jedoch bei 3200 m um ca. 0.7 dB (Start), 0.35 dB (Überflug) und 0.2 dB (Landung) ab (Anhang 5.7, Tabelle 20). Der A109, ein Helikopter mit Herkunft Empa und damit asymmetrischer Richtwirkung, zeigt für Start und Landung sogar über alle Distanzen gleiche Kenndaten. Lediglich beim Überflug, der eine grosse Asymmetrie im Pegel-Zeit-Verlauf aufweist, kommt es zu Abweichungen bei den Pegeln und dem Asymmetrieparameter vor allem für 800 m und 3200 m (Anhang 5.7, Tabelle 8).

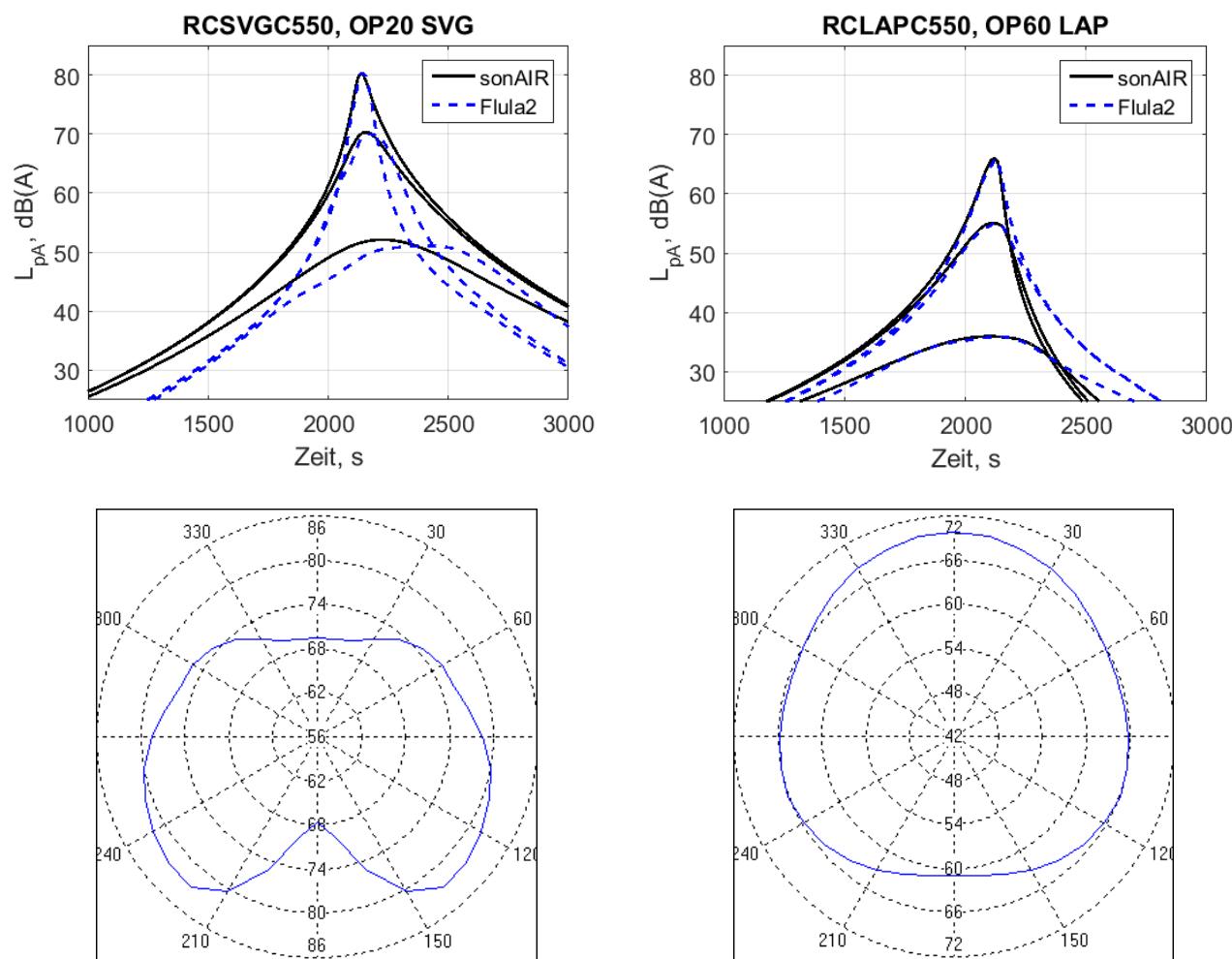
Die Unterschiede zwischen FLULA2 und sonAIR, trotz ähnlicher Implementation von Typen aus der SANC-DB mit Herkunft BAZL, werden in den unterschiedlichen Ansätzen zwischen Immissionsmodell und Emissionsmodell vermutet. So beschreibt das FLULA2-Modell eine A-bewertete Richtcharakteristik während in sonAIR effektiv ein Emissionssektor hinterlegt wird und auf jede Terz die gleiche Richtwirkung angewandt wird.



**Abbildung 14:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m für Helikopter mit Herkunft BAZL am Beispiel der R44.

Bereits im Vergleich der Optimierungsresultate mit der SANC-DB kam es bei der C550, F18 und B763 zu Abweichungen bei der Asymmetrie bzw. Pegeldifferenzen für bestimmte Flugphasen. Zwei dieser Flugzeugtypen werden daher genauer analysiert. Bei der C550 treten die Abweichungen vor allem beim Start auf, die Kenndaten für die Landungen sind für alle Distanzen nahezu gleich. Beim Start weichen die Pegel-Zeit-Verläufe wie in Abbildung 15 aufgezeigt deutlich von den Verläufen aus FLULA2 ab. Die Optimierung erreicht den korrekten Maximalpegel bei 304.8 m, aber überschätzt den Ereignispegel um 1 dB. Für eine Höhe von 3200 m wird der Ereignispegel noch um 0.7 dB überschätzt, der Maximalpegel um 1 dB und auch die Asymmetrie bzw. der maximale Abstrahlwinkel weichen deutlich von der Simulation mit FLULA2 ab (Anhang 5.7, Tabelle 15).

Als Ursache für diese Unterschiede wird die besondere Form der Richtwirkung beim Start vermutet. Während die Richtcharakteristik der Landung in Abbildung 15 anhand des generischen Richtwirkungsansatzes gut reproduziert werden kann, scheint die komplizierte Form beim Start nicht ausreichend abgebildet zu werden.

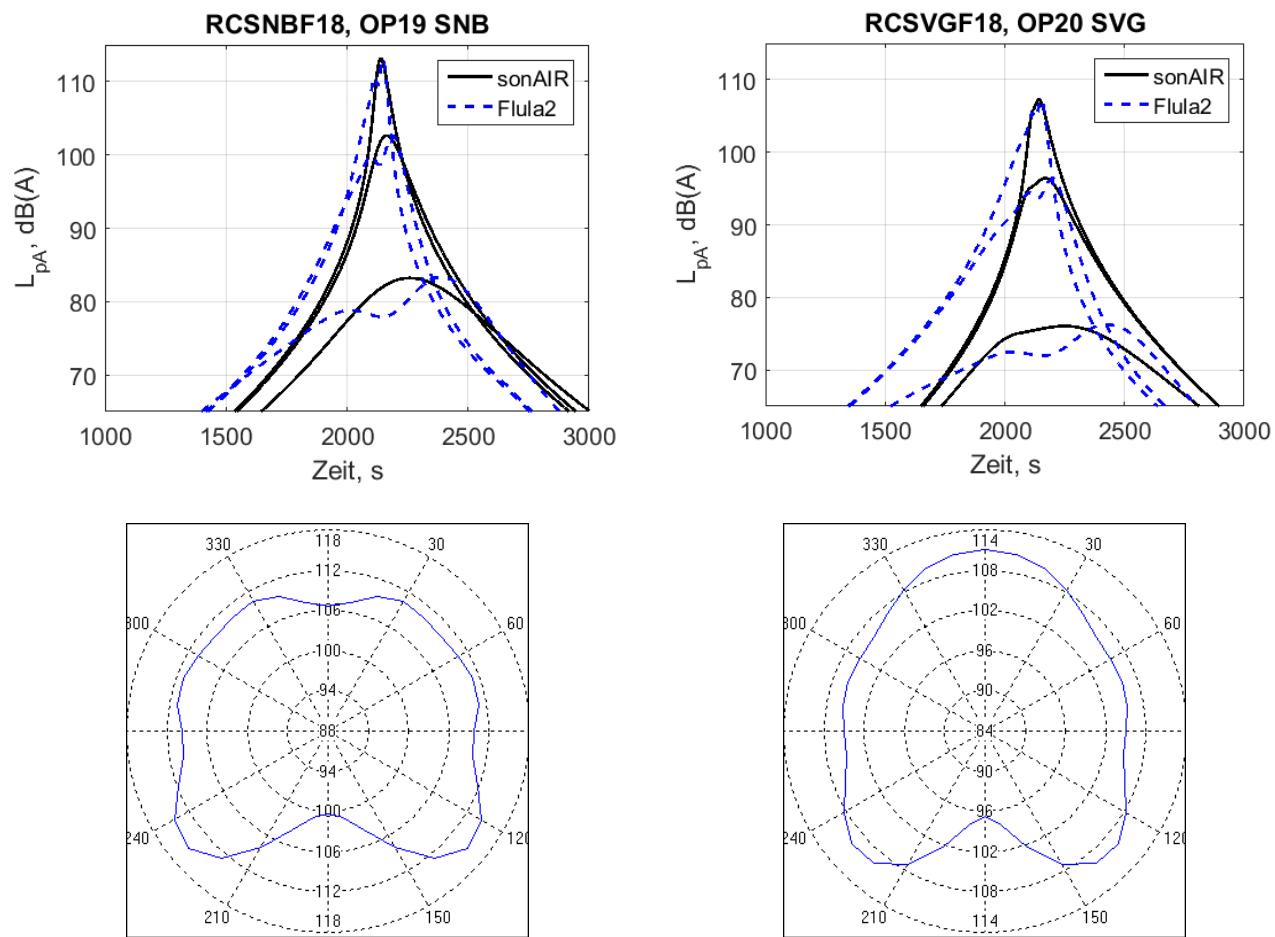


**Abbildung 15:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m der C550 und die dazugehörigen Richtwirkungsformen.

Dieser Verdacht erhärtet sich bei Betrachtung der F18, bei der die Richtwirkung im Bereich von 90° zusätzlich einschnürt (bei Start mit Nachbrenner bzw. normaler Startleistung, Abbildung 17). Die Formen der Pegel-Zeit Verläufe weichen deutlich von FLULA2 ab. Der Ansatz der generische Richtwirkung vermag die ursprüngliche Richtwirkung nicht mehr wiederzugeben.

Die Abweichungen des  $L_{AE}$  und  $L_{Amax}$  sind beim Start für alle Überflughöhen gering mit maximal –0.21 dB (Anhang 5.7, Tabelle 15). Der Asymmetrieparameter weicht jedoch stark von FLULA2 ab. Bei der Landung kommt es bereits bei 304.8 m zu einer Unterschätzung der Pegel um 0.3 dB. Bei 3200 m stimmt der  $L_{AE}$  überein aber der Maximalpegel wird um 0.45 dB überschätzt. Aufgrund des gewählten Richtwirkungsansatzes können diese Abweichungen nicht verhindert werden.

Im Anhang 5.7 sind alle SANC-TE Flugzeugtypen aus Tabelle 5 in Form von Pegel-Zeit-Verläufen und Differenzen der Kenndaten dokumentiert. Es werden jeweils alle Flugphasen gezeigt, die nicht redundant bezüglich der Optimierung sind. So gibt es viele Flugzustände wie z.B. 1x (Takeoff) und 2x (Initial climb), die sich bezüglich der Pegel-Zeit-Verläufe nur um einen Pegelzuschlag unterscheiden, aber die Optimierung als auch die Differenzen in den Kenndaten identisch sind.



**Abbildung 16:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m der F18 und die dazugehörigen Richtwirkungsformen.

## 4. Verzeichnisse

### 4.1. Literatur

- [1] BAFU, 2016. *Leitfaden zur Fluglärmernennung. Vorgaben für die Lärmermittlung.* Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), Bern, Switzerland, [www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien/publikationen/leitfaden-fluglaerm.html](http://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien/publikationen/leitfaden-fluglaerm.html).
- [2] Boeker, E.R., E. Dinges, B. He, G. Fleming, C.J. Roof, P.J. Gerbi, A.S. Rapoza, and J. Hemann, 2008. *Integrated Noise Model (INM), Version 7.0, Technical Manual. Report No. FAA-AEE-08-01.* Federal Aviation Administration (FAA), U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- [3] Defrance, J., E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plovsing, G. Watts, H. Jonasson, Z. Xuetao, E. Premat, I. Schmich, F. Aballea, M. Baulac, and F. De Roo, 2007. *Outdoor sound propagation reference model developed in the European harmonoise project.* Acta Acustica united with Acustica **93**, 213-227.
- [4] ECAC, 2005. *DOC.29: Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, Volume 2: Technical Guide. 3rd ed.* European Civil Aviation Conference (ECAC), Neuilly-sur-Seine, France.
- [5] Empa, 2011. *Neue FLULA2-Quellendaten für Kleinflugzeuge, Erstellung des Datensatzes RC2011\_01; interner Bericht.* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [6] Empa, 2012. *SDT Source Data Testenvironment V2.0; Programmbeschreibung.* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [7] Empa, 2012. *Modifizierte Quellendaten für Kleinflugzeuge, Erstellung des Datensatzes RC2012\_01; interner Bericht.* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] 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.
- [9] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Umsetzungen der Einzelflugsimulation.* Bericht Nr. 5211.00687.100.15. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf, Switzerland.
- [10] 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.
- [11] Empa, 2017. *Dokumentation Grenchen (Arbeitstitel).* Bericht Nr. 5214.013042. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [12] Empa and L. Consulting, 2012. *SANC-DB, Swiss Aircraft Noise Calculation Database, Technische Dokumentation.* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [13] Empa and L. Consulting, 2014. *SANC-TE, Swiss Aircraft Noise Test Environment, Technische Dokumentation.* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [14] ISO, 1993. *ISO 9613-1. Acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere.* International Organisation for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- [15] ISO, 1996. *ISO 9613-2. Acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: general method of calculation.* International Organisation for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

## 4.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel einer extern erstellten Spur mit einer Mittelspur und vier Streuspuren.....	5
Abbildung 2:	Flugprofile mit Höhen-, Geschwindigkeits-, Flugphasen, Dichte-, Schallgeschwindigkeits- und Drehzahlverlauf.....	6
Abbildung 3:	Struktur eines Eintrags der SANC-DB, mit angezeichneten relevanten Parametern für die Profilerzeugung.....	7
Abbildung 4:	Flugphasen gemäss Höheneinteilung nach SANC-DB [12].....	7
Abbildung 5:	Profil erzeugung basierend auf SANC-DB Flugphasen, visualisiert mit einem Beispielsprofil.	9
Abbildung 6:	Aus der Flugspur und dem Flugprofil entsteht durch Faltung die Flugbahn.....	10
Abbildung 7:	Bei der Faltung wird u.a. der Querneigungswinkel sowie die Distanz zum Gelände geprüft.	11
Abbildung 8:	Das Flugprofil wird über die abgerollte Distanz mit den Höhenbeschränkungen verschnitten und horizontale Segmente werden eingefügt um die Begrenzungen einzuhalten (grün: Höhenbeschränkung; rot: initial erstelltes Profil; blau: mit Höhenbeschränkung verschnittenes Profil).	12
Abbildung 9:	Beispielhafter SANC-DB Eintrag für den ICAO-Typ DR40 mit Herkunft BAZL.....	14
Abbildung 10:	Normspektren und einzelne Berechnungsschritte A-D (s. Text) am Beispiel der A320 mit reduzierter Startleistung ( $OP=11$ ) und einem $L_{A,max}=86$ dB.....	16
Abbildung 11:	Emissionsspektrum und korrigiertes Emissionsspektrum am Beispiel der A320 mit reduzierter Startleistung ( $OP=11$ ) und einem $L_{A,max}=86$ dB. Zum Vergleich wurde ein Maximalpegelspektrum mit niedriger Startleistung aus sonAIR eingezeichnet.....	17
Abbildung 12:	Die generische Richtwirkungsfunktion und seine Parameter.....	18
Abbildung 13:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m für Kleinluftfahrzeuge am Beispiel der C172.	21
Abbildung 14:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m für Heli mit Herkunft BAZL am Beispiel der R44.	21
Abbildung 15:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m der C550 und die dazugehörigen Richtwirkungsformen.	22
Abbildung 16:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m der F18 und die dazugehörigen Richtwirkungsformen.	23
Abbildung 17:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell A109 und FLULA2 RC-Typ A109K.	34
Abbildung 18:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell A320 und FLULA2 RC-Typ A320.	35
Abbildung 19:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell AT43 und FLULA2 RC-Typ AT42.	36
Abbildung 20:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell B744 und FLULA2 RC-Typ B7474.	37
Abbildung 21:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell B763 und FLULA2 RC-Typ B7673.	38
Abbildung 22:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell C172 und FLULA2 RC-Typ C172.	39
Abbildung 23:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell C340 und FLULA2 RC-Typ C340.	40
Abbildung 24:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell C550 und FLULA2 RC-Typ C550.	41

Abbildung 25:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell F18 und FLULA2 RC-Typ F18.....	42
Abbildung 26:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell F70 und FLULA2 RC-Typ FK70.....	43
Abbildung 27:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell MCR1 und FLULA2 RC-Typ MC01.....	44
Abbildung 28:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell MD81 und FLULA2 RC-Typ MD80. ....	45
Abbildung 29:	Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell R44 und FLULA2 RC-Typ R44.....	46

#### 4.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zuordnung der Flugphasen für Starts .....	8
Tabelle 2:	Zuordnung der Flugphasen für Landungen.....	9
Tabelle 3:	Flugphasen der SANC-DB .....	14
Tabelle 4:	Standardwerte bzw. Startwerte für verschiedene Flugzeugklassen.....	19
Tabelle 5:	SANC-TE Quellendatensatz .....	20
Tabelle 6:	Wertebereiche der Richtwirkungsparameter für verschiedene Flugzeugklassen.....	31
Tabelle 7:	Abweichungen der Kenndaten bei 304.8 m zwischen neu erstellten Emissionsmodellen in sonAIR mit der SANC-DB (Differenzen: sonAIR – SANC-DB). Grössere Abweichungen (ausser dθ) sind rot markiert. ....	32
Tabelle 8:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für den A109.....	34
Tabelle 9:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die A320 .....	35
Tabelle 10:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die AT43 .....	36
Tabelle 11:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die B744.....	37
Tabelle 12:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die B763.....	38
Tabelle 13:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die C172 .....	39
Tabelle 14:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die C340 .....	40
Tabelle 15:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die C550 .....	41
Tabelle 16:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die F18.....	42
Tabelle 17:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die F70.....	43
Tabelle 18:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die MCR1 .....	44
Tabelle 19:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die MD81 .....	45
Tabelle 20:	Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für den R44.....	46

## 5. Anhang

### 5.1. Pfade und Skripte

#### 5.1.1. Profilerzeugung

Hauptverzeichnis der Matlab-Skripte:

K:\sonAIR\Modul G - sonAIR@sonBASE\SAND\_einlesen\

*sancdb\_lesen.m* → Typen in mat files abspeichern

*sand\_profil\_bauen\_V2\_loop\_lobsiger.m* → Hauptdatei zur Profilerzeugung

#### 5.1.2. Emissionsmodell

Hauptverzeichnis der Matlab-Skripte:

K:\sonAIR\Modul B - Quellenvermessung\Auswertung\Matlab\SANC-DB\

*SancDB\_to.sonAIR.m* → Emissionsmodelle aus SANC-DB erstellen (Optimierung)

*SancDB\_Flula2\_Vergleich.m* → Vergleich mit FLULA2 mit mehreren Überflughöhen

#### SANC-DB-Datenbank im Matlab-Format:

Für die Emissionsmodelle des SANC-TE Datensatz wurde der originale SANC-TE V2.0 Quellendatensatz verwendet. Das originale ASCII-File und die binären Matlab-Dateien aus *sancdb\_lesen.m* liegen unter:

K:\sonAIR\Modul B - Quellenvermessung\Auswertung\Matlab\SANC-DB\SANC-TE\_SOURCEDATA\

Weitere Emissionsmodelle könnten aus der aktuellen SANC-DB erstellt werden:

K:\sonAIR\Modul B - Quellenvermessung\Auswertung\Matlab\SANC-DB\SANCDB\_2016\

Der Ordner enthält zum Berichtszeitpunkt die eingelesene SANC-DB „SANC\_DB\_20150806.txt“ vom 06.08.2015. Diese müsste allenfalls mit der neusten Version anhand des Skripts *sancdb\_lesen.m* überschrieben werden.

## 5.2. Format Flugspuren

```
-----  
<Irgendwelche Metadaten>  
-----  
  
Alle Texte ausserhalb BEGIN_TRACK ... END_TRACK werden immer als Kommentar  
betrachtet!  
Tabellen und Parameter werden immer via Tabulator separiert...  
  
BEGIN_TRACK  
  
// Beispiels-Kommentar innerhalb einer Track-Definition  
  
SID: <Eindeutiger Identifikator. z.B. S28SO1M>  
Procedure: <S / L>  
Offset: <A / B / ... / Z> // Ein leerer String wird nicht akzeptiert.  
Offsetweight:<0.1 / 1> // Relative Gewichtung dieser Streuspur. Nicht  
prozentual. Parameter optional und kann weggelassen werden (der Wert muss  
später allerdings gesetzt werden)  
Description: <...> // Optional  
Route:<I34_001 / ...> // Parameter optional  
Runway: <F28 / ... > // Parameter notwendig für die Validierung der  
Faltung  
Airport: <Zürich / ... > // Parameter optional und kann weggelassen  
werden. Ergibt sich ansonsten aus der Piste  
  
// Tabelle: Wie bisher...  
x      y  
685375.0    256810.0  
682838.0    257043.0  
679137.7    257178.7  
678995.6    257189.1  
  
END_TRACK  
  
BEGIN_TRACK  
// Nächste Spur  
// .....  
END_TRACK
```

## 5.3. Format Flugprofile

```
-----  
<Irgendwelche Metadaten>  
-----  
  
Alle Texte ausserhalb BEGIN_PROFILE ... END_PROFILE werden immer als Kommentar  
betrachtet!  
Tabellen und Parameter werden immer via Tabulator separiert...  
  
BEGIN_PROFILE
```

```
// Texte innerhalb BEGIN_PROFILE ... END_PROFILE werden als Kommentar behan-
delt, sofern sie HINTER doppelten Schrägzeichen beginnen
ProfileID: <Eindeutiger Profil-Identifikator. z.B. MD11_SlowTakeoff>
Procedure: <S / L>
Offset: <A / B / ... / Z> // Auch wenn beinah alle Profile keine
Offsets verwenden: Ein leerer String wird nicht akzeptiert.
Offsetweight:<0.1 / 1> // Relative Gewichtung dieses Offset-Profil. Pa-
rameter optional und kann weggelassen werden (der Wert muss später aller-
dings gesetzt werden)
AircraftType:<MD11 / ...> // Parameter optional. Allerdings können beim
angegebenen Flugzeug-Typ in der DB weitere Infos z.B. maximaler Bank-Angle
gespeichert worden sein.
Description: <...> // Optional
Route:<I34_001 / ...> // Parameter optional und kann weggelassen werden.
Falls angegeben: Profil kann nur mit der angegebenen Route kombiniert werden
Runway: <F28 / ... > // Parameter optional und kann weggelassen wer-
den. Falls angegeben: Profil kann nur mit der angegebenen Piste kombiniert
werden
Airport: < Zürich / ... > // Parameter optional und kann weggelassen
werden. Falls angegeben: Profil kann nur mit dem angegebenen Flughafen kom-
biniert werden

// Tabelle: Wie bisher...
disxy z v rho c n1 flaps gears sb phase
0 4 41.1 1.15 340.3 95 4 1 0
200 4 56.5 1.15 340.3 95 4 1 0
400 4 61.9 1.15 340.3 95 4 1 0
600 4 65.4 1.15 340.3 90 4 1 1
800 4 67.7 1.15 340.3 90 4 1 1

END_PROFILE

BEGIN_PROFILE
// Nächstes Profil
// ....
END_PROFILE
```

## 5.4. Format Spurwahlliste

```
// -----
// Zeit-Intervall pro Flugbahn-Punkt.
// In Sekunden.
// -----
TimeInterval:1

// -----
// Konstante Beschleunigung auf der Piste
// Ja = 1 / Nein = 0
// -----
ConstantAccelerationOnRunway: 1

///////////////////////////////
// BSpline - Least Squares - Parameter //
/////////////////////////////
```

```
// -----
// Anzahl Grade des B-Spline-Polynoms
// -----
BSpline_Degree:      3

// -----
// Distanz zwischen zwei folgenden Sample Points.
// Doppelte Distanz gibt ungefähr doppelte Geschwindigkeit
// In Metern.
// -----
BSpline_SamplePointDistance:    300

// -----
// Distanz zwischen zwei folgenden Control Points.
// Doppelte Distanz gibt ungefähr doppelte Geschwindigkeit
// Achtung: Ein Trade-Off ist hier notwendig!
// Eine grosse Distanz sieht 'smooth' aus, kann aber zu grossen Abweichungen
// zwischen BSpline und Flugspur führen
// Eine kleine Distanz hingegen führt dazu, dass das BSpline überoptimiert
// wird: Das berechnete BSpline macht dann viele kleine & unnötige Kurven. Das
// ist besonders ärgerlich für den BankAngle!
// In Metern.
// -----
BSpline_ControlPointDistance:   1200

///////////////////////////////
// Validations - Parameter //
///////////////////////////////

// -----
// Solange das Flugzeug maximal diese relative Höhe aufweist, liegt Boden-
// kontakt vor.
// In Metern.
// -----
Validation_ZRelMaxWhileOnRunway: 5

// -----
// Sofern beim Runway keine Breite angegeben ist: Wenn das Flugzeug auf dem
// Runway weiter als diese Distanz vom Runway entfernt ist, schlag Alarm
// In Metern.
// -----
Validation_DefaultRunwayWidth:   40

// -----
// Schlägt Alarm, wenn das Flugzeug plötzlich zu nah über dem Terrain fliegt
// Da jedes Flugzeug nach dem Abheben nah über dem Boden ist: Das Kriterium
// gilt erst, wenn nach dem Abhebepunkt bereits der doppelte Höhenunterschied
// registriert wurde
// In Metern.
// -----
Validation_ZRelMinWhileFlying:   50

// -----
// Schlägt Alarm, wenn beim Abhebepunkt das Flugzeug nicht tangential genug
// ist zum Runway
// In Grad (°)
// -----
```

```
Validation_MaxAllowedAngleToRunwayAtShrinkPoint:      2

// -----
// Schlag Alarm, wenn das via BSpline kreierte Polyline eine ganz andere
Länge aufweist als das originale Flugspur-Polyline
// Angegeben als prozentualer Längenunterschied (%)
// -----
Validation_MaxPercentualLengthDifference:      5

// -----
// Schlag Alarm, wenn ein Punkt des via BSpline kreierte Polyline mehr als
die angegebene Distanz vom originalen Flugspur-Polyline entfernt ist
// In Metern
// -----
Validation_MaxPolylineDistance:    200

// -----
// ----- FALTUNGEN -----
// -----
SID    ProfileID
S16_7061E    F16
S16_7061E    F28
END
```

## 5.5. Parametersetzung Optimierung

Tabelle 6: Wertebereiche der Richtwirkungsparameter für verschiedene Flugzeugklassen

Klasse	Standard				Startwerte			
	K	H	G	M	K	H	G	M
<b>L0</b>	-	-2 ... 2	-2 ... 2	-2 ... 2				
<b>L1</b>	-	-10 ... 10	-15 ... 10	-20 ... 20				
<b>L2</b>	-	-15 ... 0	-15 ... 10	-20 ... 20				
<b>z1</b>	-	0.6 ... 1.4	0.6 ... 1.4	0.4 ... 1.6				
<b>z2</b>	-	0.6 ... 1.4	0.6 ... 1.4	0.4 ... 1.6				
<b>LAsym</b>	-	0	-2 ... 2	-4 ... 4				
<b>θ₀</b>	-	90	50 ... 150	50 ... 150				

## 5.6. Vergleiche der Kenndaten mit SANC-DB

**Tabelle 7:** Abweichungen der Kenndaten bei 304.8 m zwischen neu erstellten Emissionsmodellen in sonAIR mit der SANC-DB (Differenzen: sonAIR – SANC-DB). Grössere Abweichungen (ausser  $d\theta$ ) sind rot markiert.

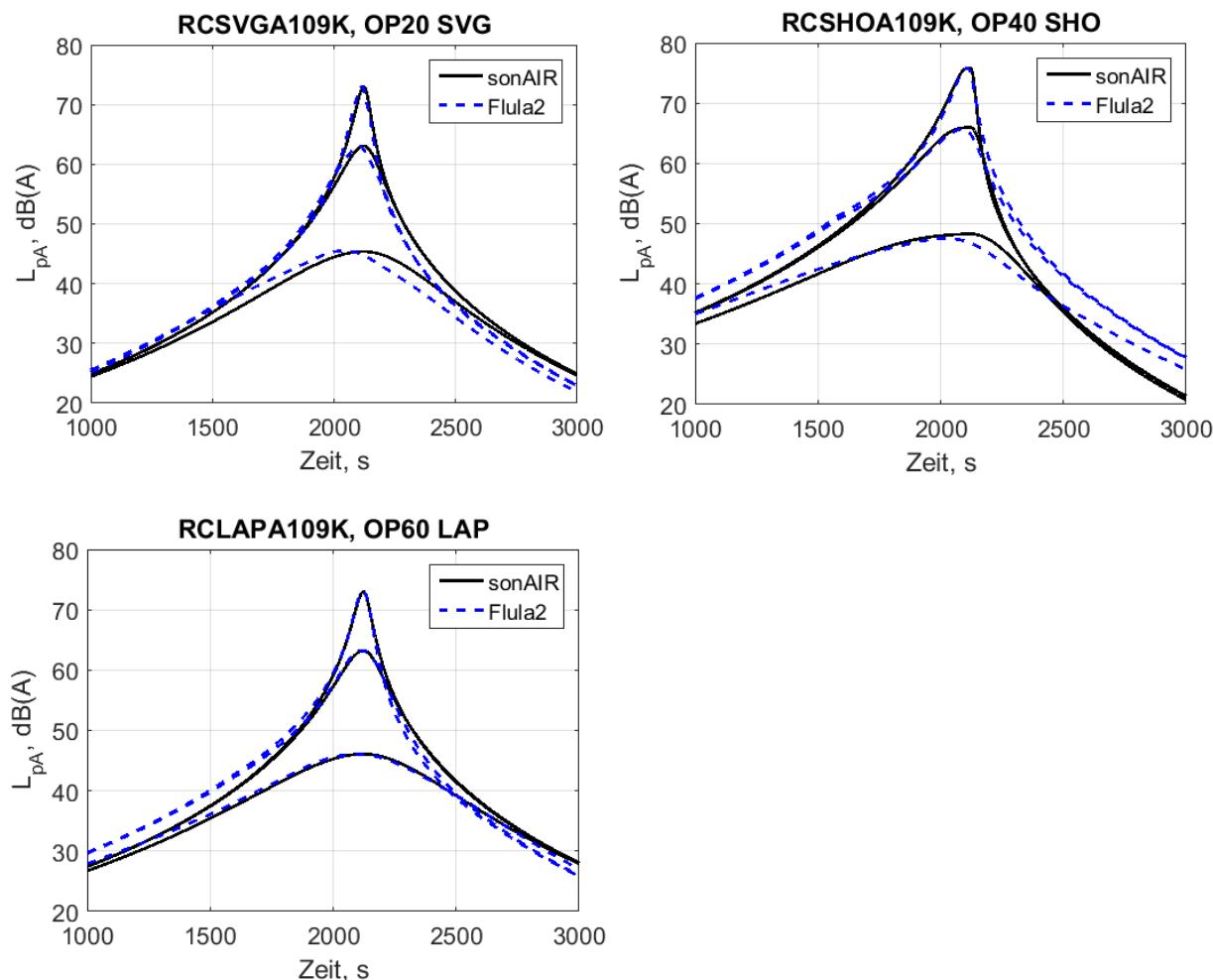
Type	OP	$dL_{AE}$	$dL_{Amax}$	$d\eta$	$d\theta$	$d$
A109	10	-0.03	0.00	0.00	13.00	0.36
A109	20	-0.03	0.00	0.00	13.00	0.36
A109	40	0.28	-0.05	0.02	0.95	0.25
A109	60	-0.02	0.00	0.00	4.00	0.11
A109	70	-0.02	0.00	0.00	4.00	0.11
A320	11	-0.02	0.00	-0.10	-9.55	0.42
A320	12	-0.09	0.00	0.00	-8.00	0.22
A320	21	-0.02	0.00	-0.10	-9.55	0.42
A320	22	-0.09	0.00	0.00	-8.00	0.22
A320	31	-0.02	0.00	-0.10	-9.55	0.42
A320	32	-0.09	0.00	0.00	-8.00	0.22
A320	60	-0.03	0.00	0.00	-6.45	0.15
A320	70	-0.03	0.00	0.00	-6.45	0.15
AT43	10	0.03	0.01	-0.09	2.45	0.31
AT43	20	0.03	0.01	-0.09	2.45	0.31
AT43	30	0.03	0.01	-0.09	2.45	0.31
AT43	60	-0.01	0.00	-0.20	-4.55	0.56
AT43	70	-0.01	0.00	-0.20	-4.55	0.56
B744	11	-0.01	0.00	-0.10	-9.55	0.42
B744	12	-0.02	0.00	-0.07	-7.00	0.32
B744	21	-0.01	0.00	-0.10	-9.55	0.42
B744	22	-0.02	0.00	-0.07	-7.00	0.32
B744	31	-0.01	0.00	-0.10	-9.55	0.42
B744	32	-0.02	0.00	-0.07	-7.00	0.32
B744	60	-0.01	0.00	0.00	-7.00	0.15
B744	70	-0.01	0.00	0.00	-7.00	0.15
B763	11	-0.01	-0.01	-0.49	-4.80	1.12
B763	12	-0.02	0.00	-0.04	-11.00	0.33
B763	21	-0.01	-0.01	-0.49	-4.80	1.12
B763	22	-0.02	0.00	-0.04	-11.00	0.33
B763	31	-0.01	-0.01	-0.49	-4.80	1.12
B763	32	-0.02	0.00	-0.04	-11.00	0.33
B763	60	-0.27	0.00	0.00	-13.45	0.39
B763	70	-0.27	0.00	0.00	-13.45	0.39
C172	10	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C172	20	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C172	30	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C172	40	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C172	60	0.04	0.00	-0.04	-1.55	0.18
C172	70	0.04	0.00	-0.04	-1.55	0.18

Type	OP	$dL_{AE}$	$dL_{Amax}$	$d\eta$	$d\theta$	$d$
C340	10	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C340	20	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C340	30	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C340	40	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
C340	60	0.04	0.00	-0.04	-1.55	0.18
C340	70	0.04	0.00	-0.04	-1.55	0.18
C550	10	1.02	-0.05	-0.02	-1.29	0.80
C550	20	1.02	-0.05	-0.02	-1.29	0.80
C550	30	1.02	-0.05	-0.02	-1.29	0.80
C550	60	-0.02	-0.01	0.02	-11.63	0.30
C550	70	-0.02	-0.01	0.02	-11.63	0.30
F18	10	-0.04	-0.05	-0.53	-10.84	1.29
F18	19	-0.04	-0.05	-0.55	-10.63	1.39
F18	20	-0.04	-0.05	-0.53	-10.84	1.29
F18	30	-0.04	-0.05	-0.53	-10.84	1.29
F18	60	-0.24	-0.25	-0.02	-7.34	0.25
F18	70	-0.24	-0.25	-0.02	-7.34	0.25
F70	10	-0.03	-0.01	0.00	-21.55	0.41
F70	20	-0.03	-0.01	0.00	-21.55	0.41
F70	30	-0.03	-0.01	0.00	-21.55	0.41
F70	60	-0.02	-0.01	0.00	-8.09	0.18
F70	70	-0.02	-0.01	0.00	-8.09	0.18
MCR1	10	0.07	0.00	0.00	0.00	0.05
MCR1	20	0.07	0.00	0.00	0.00	0.05
MCR1	30	0.07	0.00	0.00	0.00	0.05
MCR1	40	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
MCR1	60	0.04	0.00	-0.04	-1.55	0.18
MCR1	70	0.04	0.00	-0.04	-1.55	0.18
MD81	11	-0.04	-0.01	0.00	-16.45	0.33
MD81	12	-0.04	0.00	0.00	-16.00	0.33
MD81	21	-0.04	-0.01	0.00	-16.45	0.33
MD81	22	-0.04	0.00	0.00	-16.00	0.33
MD81	31	-0.04	-0.01	0.00	-16.45	0.33
MD81	32	-0.04	0.00	0.00	-16.00	0.33
MD81	60	-0.02	0.00	0.00	-19.00	0.36
MD81	70	-0.02	0.00	0.00	-19.00	0.36
R44	10	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
R44	20	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
R44	40	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
R44	60	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
R44	70	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.02

## 5.7. Vergleiche der Kenndaten mit FLULA2

Es werden nur Vergleiche für ausgewählte Flugphasen gezeigt. Alle anderen Flugphasen sind redundant in den Abweichungen bzgl. der Optimierung und haben höchstens absolut einen anderen Pegel (10=20=30, 60=70 etc.). Die Differenzen der Kennzahlen aus den Simulationen werden über sonAIR – FLULA2 berechnet.

### 5.7.1. A109

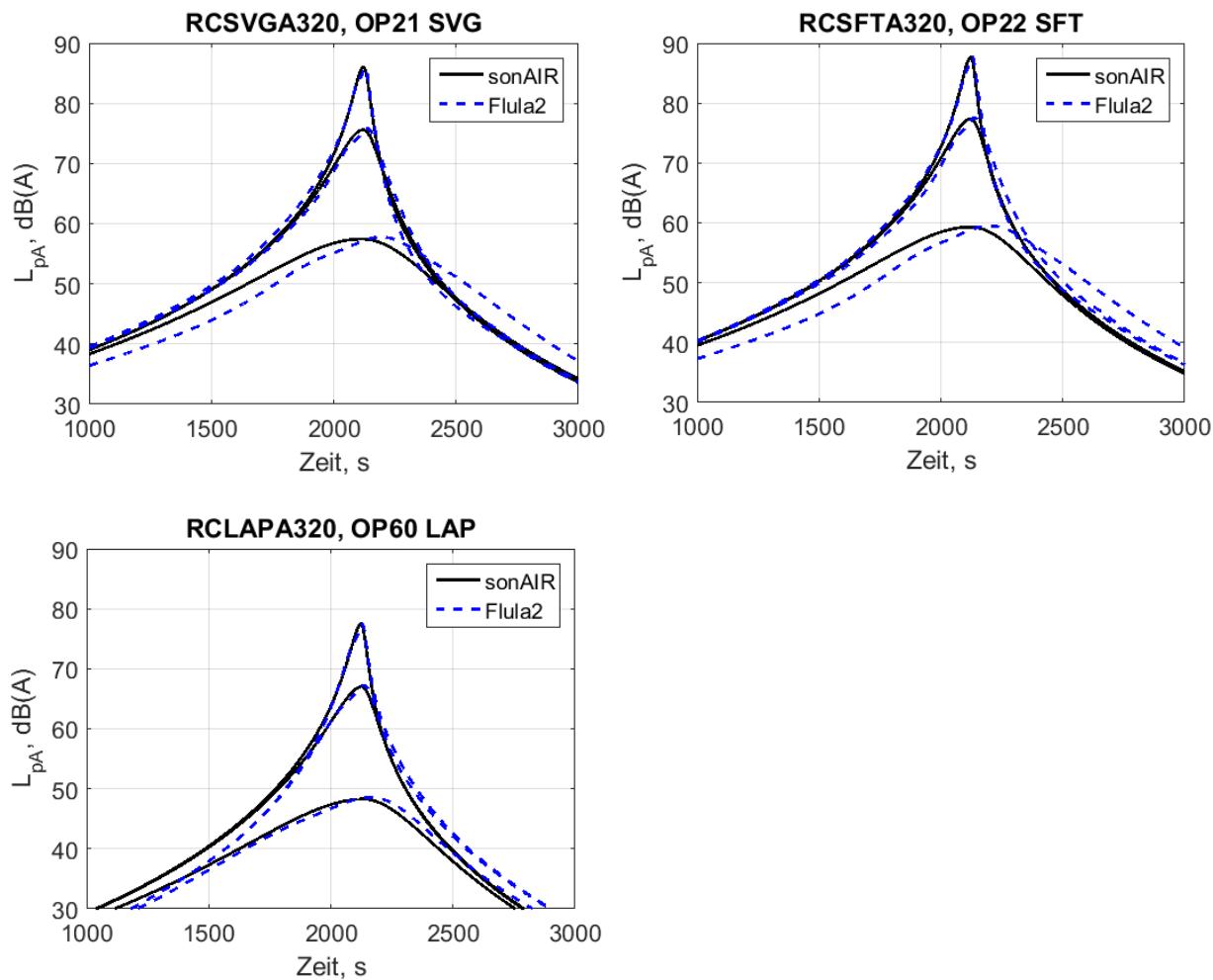


**Abbildung 17:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell A109 und FLULA2 RC-Typ A109K.

**Tabelle 8:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für den A109

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	0.01	-0.04	-0.01	12.19	0.37
800	20	0.04	-0.02	0.01	12.75	0.38
3200	20	0.15	-0.15	0.00	11.91	0.41
304.8	40	0.26	-0.04	0.02	0.00	0.21
800	40	0.24	0.27	0.26	19.80	1.17
3200	40	0.48	0.74	0.18	14.97	0.96
304.8	60	-0.06	-0.03	-0.01	3.09	0.12
800	60	-0.10	0.01	0.01	4.70	0.20
3200	60	-0.10	0.04	0.03	3.97	0.22

### 5.7.2. A320

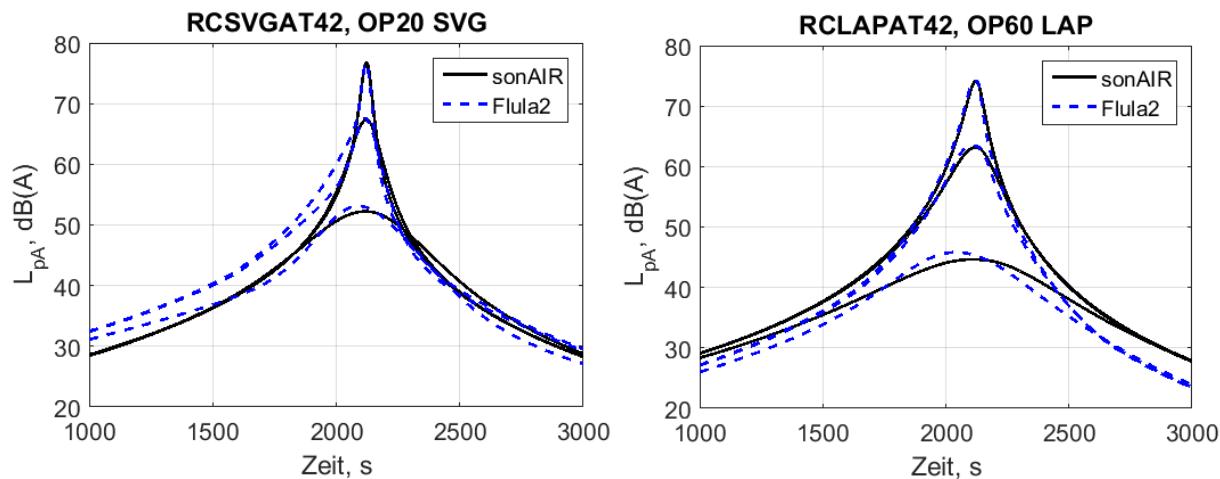


**Abbildung 18:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell A320 und FLULA2 RC-Typ A320.

**Tabelle 9:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die A320

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	21	0.01	0.04	-0.09	-9.24	0.42
800	21	0.04	-0.21	-0.03	-9.96	0.40
3200	21	0.02	-0.34	0.08	-11.38	0.58
304.8	22	-0.05	-0.01	0.02	-7.69	0.22
800	22	-0.05	-0.18	0.06	-8.77	0.39
3200	22	-0.08	-0.20	0.16	-11.20	0.70
304.8	60	-0.02	0.04	0.00	-6.14	0.17
800	60	-0.05	-0.18	0.01	-5.87	0.22
3200	60	-0.09	-0.29	0.03	-4.85	0.27

### 5.7.3. AT43



**Abbildung 19:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell AT43 und FLULA2 RC-Typ AT42.

**Tabelle 10:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die AT43

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	0.07	0.02	-0.07	3.08	0.30
800	20	0.09	-0.27	-0.01	3.53	0.32
3200	20	0.05	-0.89	0.05	4.11	0.61
304.8	60	-0.03	-0.03	-0.20	-4.64	0.55
800	60	0.02	-0.26	-0.05	4.10	0.35
3200	60	0.05	-1.18	0.07	9.85	0.90

### 5.7.1. B744

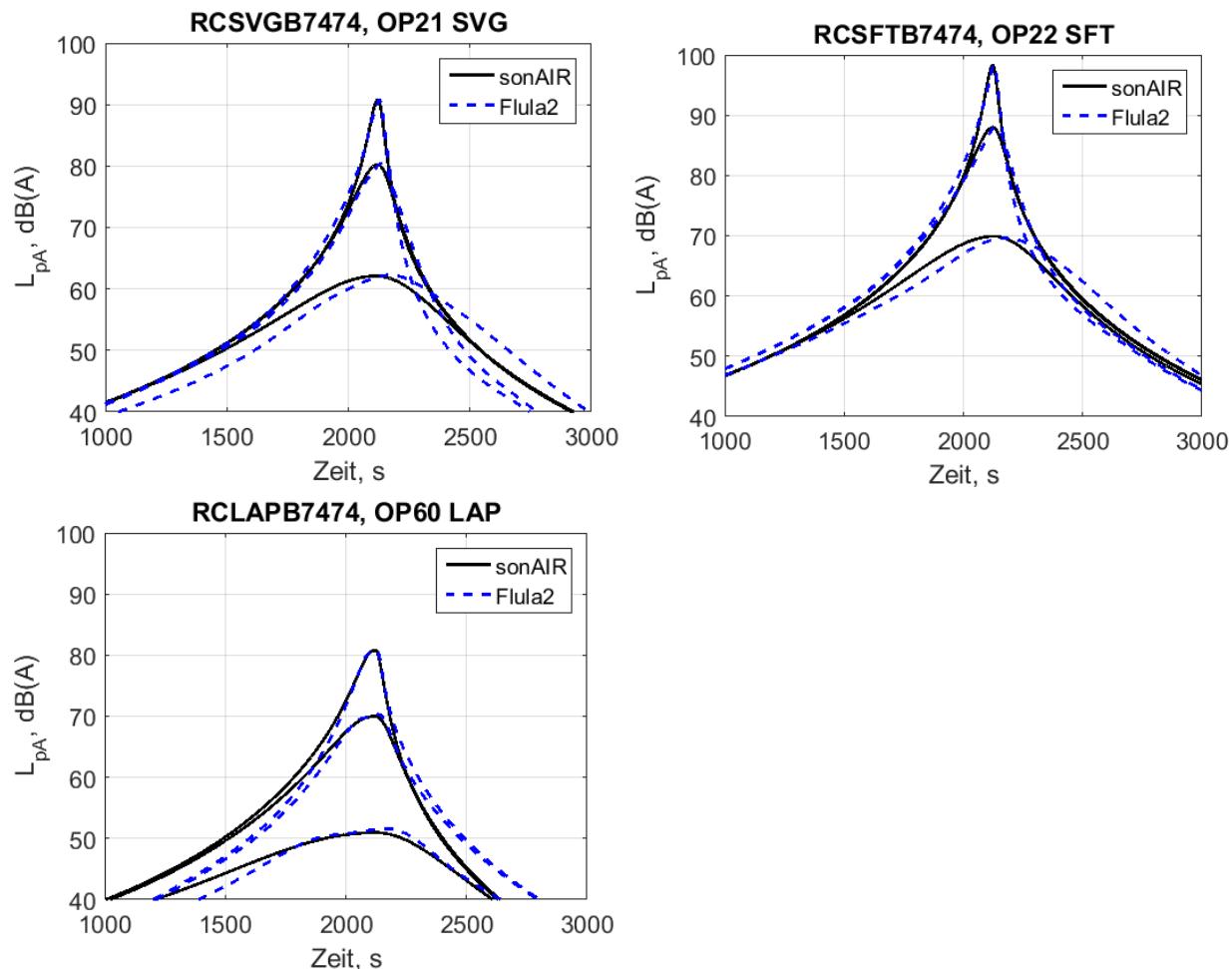
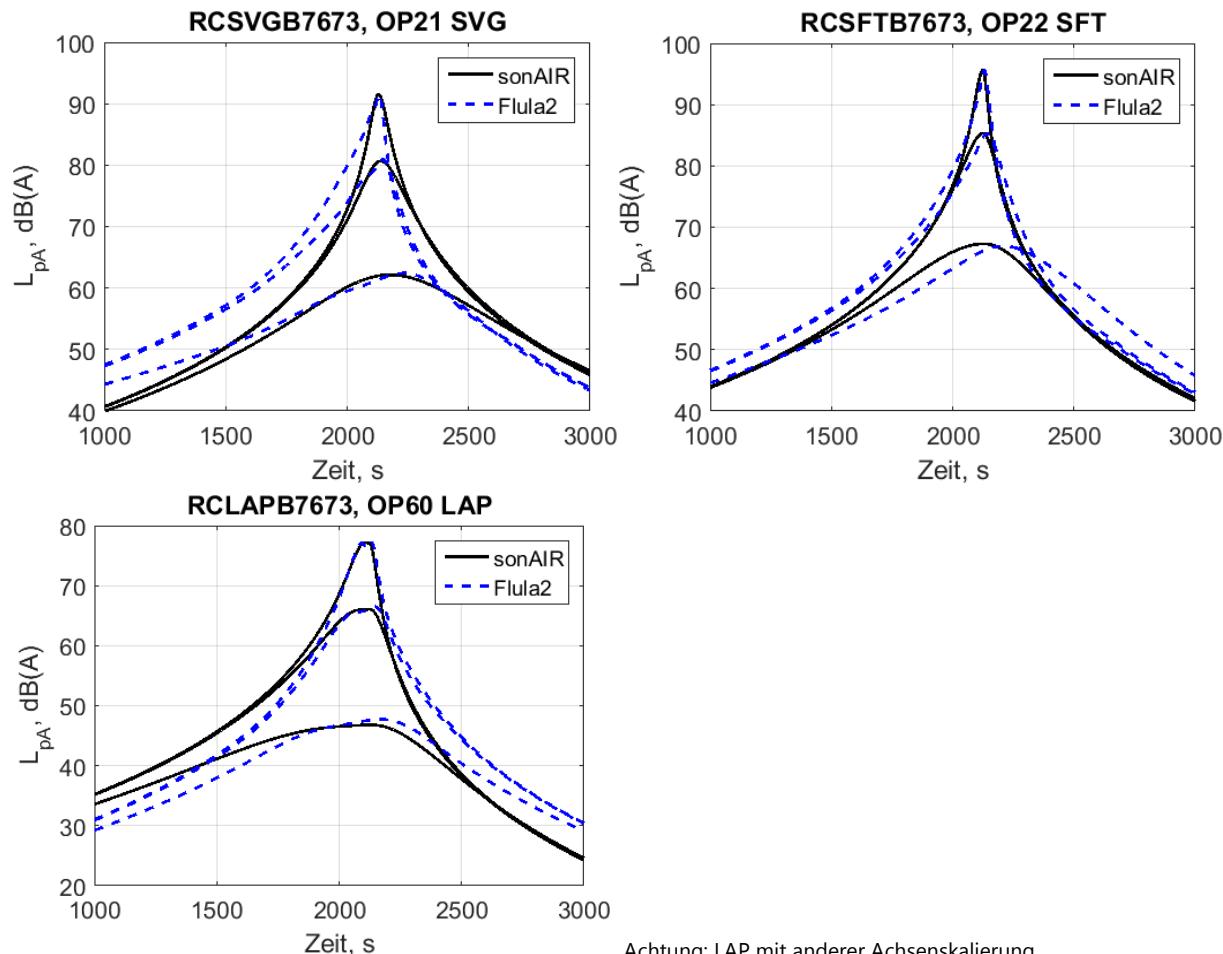


Abbildung 20: Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell B744 und FLULA2 RC-Typ B7474.

Tabelle 11: Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die B744

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	21	-0.01	0.05	-0.09	-9.24	0.44
800	21	0.02	-0.14	-0.03	-8.81	0.32
3200	21	0.03	-0.16	0.09	-8.51	0.49
304.8	22	0.01	0.03	-0.08	-7.69	0.35
800	22	0.03	0.04	0.01	-6.45	0.17
3200	22	0.05	0.34	0.12	-7.18	0.58
304.8	60	-0.01	0.04	0.01	-6.16	0.17
800	60	0.02	-0.32	0.04	-5.29	0.33
3200	60	-0.07	-0.65	0.00	-5.73	0.33

### 5.7.2. B763



Achtung: LAP mit anderer Achsenkalierung

**Abbildung 21:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell B763 und FLULA2 RC-Typ B7673.

**Tabelle 12:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die B763

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	21	0.03	-0.04	-0.49	-4.46	1.15
800	21	0.09	-0.24	-0.35	-3.97	1.03
3200	21	0.07	-0.28	-0.23	-7.89	0.84
304.8	22	-0.05	0.03	-0.03	-10.70	0.33
800	22	-0.02	0.05	0.03	-10.47	0.33
3200	22	0.00	0.39	0.12	-11.88	0.72
304.8	60	-0.24	-0.01	0.01	-13.56	0.39
800	60	-0.13	-0.45	0.09	-10.45	0.54
3200	60	-0.11	-0.90	0.15	-5.86	0.77

### 5.7.3. C172

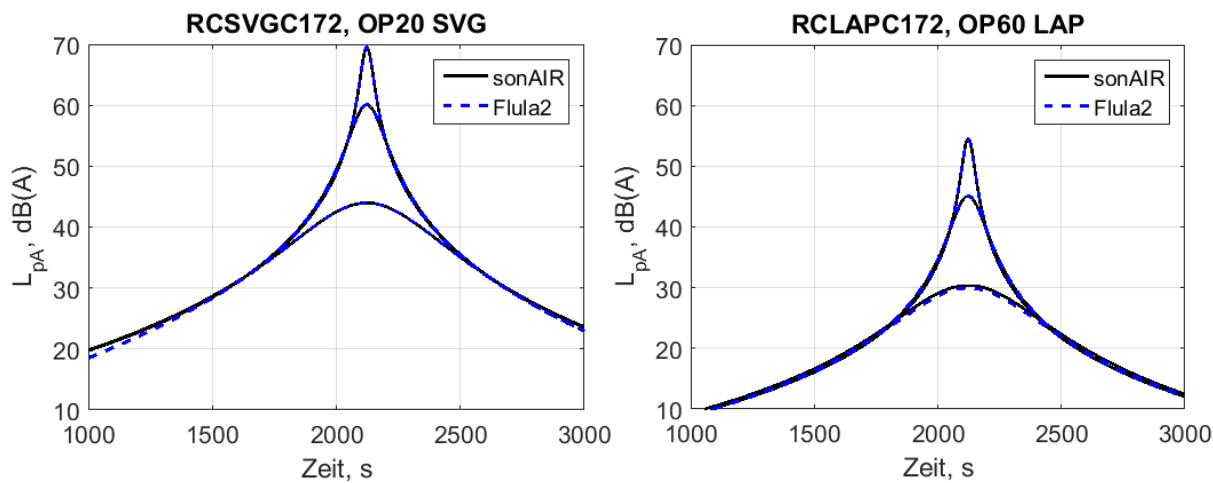
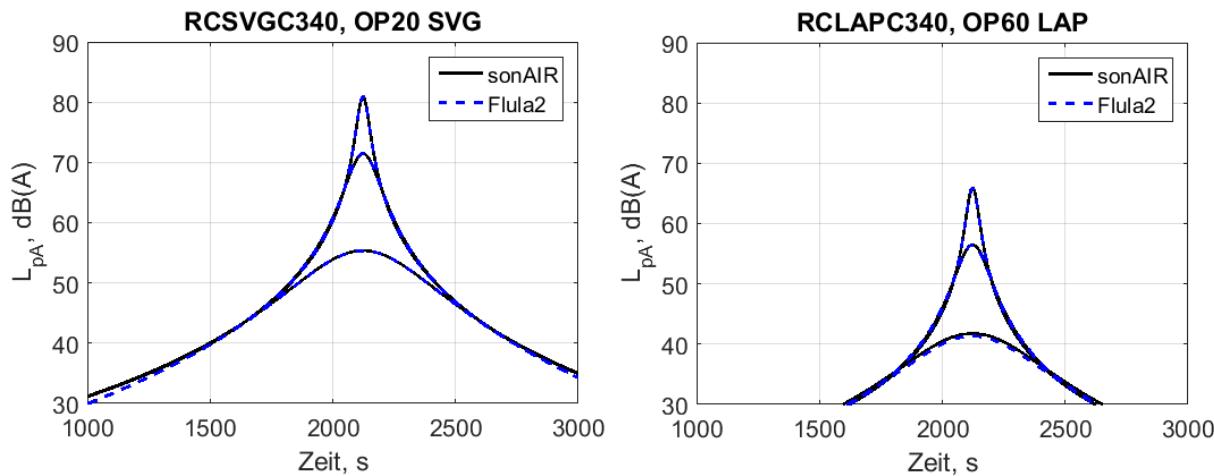


Abbildung 22: Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell C172 und FLULA2 RC-Typ C172.

Tabelle 13: Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die C172

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	-0.04	-0.03	0.00	0.00	0.01
800	20	-0.05	-0.05	0.00	0.00	0.01
3200	20	0.07	0.06	0.00	0.00	0.01
304.8	60	0.05	0.07	-0.04	-1.55	0.17
800	60	0.03	0.00	-0.03	-1.18	0.14
3200	60	0.45	0.40	-0.02	-0.74	0.16

### 5.7.1. C340



**Abbildung 23:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell C340 und FLULA2 RC-Typ C340.

**Tabelle 14:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die C340

Höhe	OP	dLAE	dLAMax	dEta	dTheta	d
304.8	20	-0.04	-0.03	0.00	0.00	0.01
800	20	-0.05	-0.05	0.00	0.00	0.01
3200	20	0.07	0.06	0.00	0.00	0.01
304.8	60	0.05	0.07	-0.04	-1.55	0.17
800	60	0.03	0.00	-0.03	-1.18	0.13
3200	60	0.45	0.40	-0.02	-0.74	0.14

### 5.7.2. C550

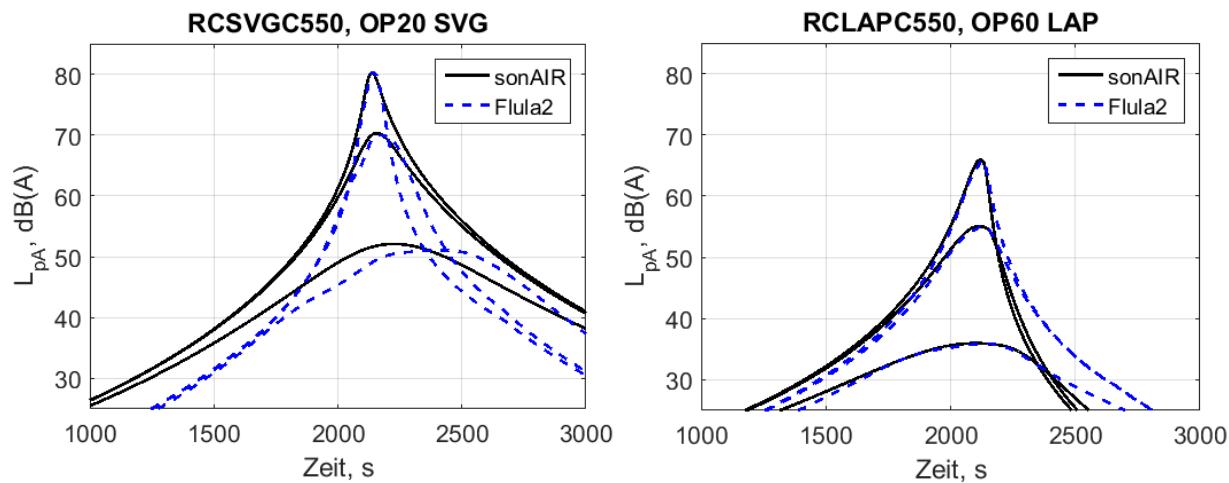
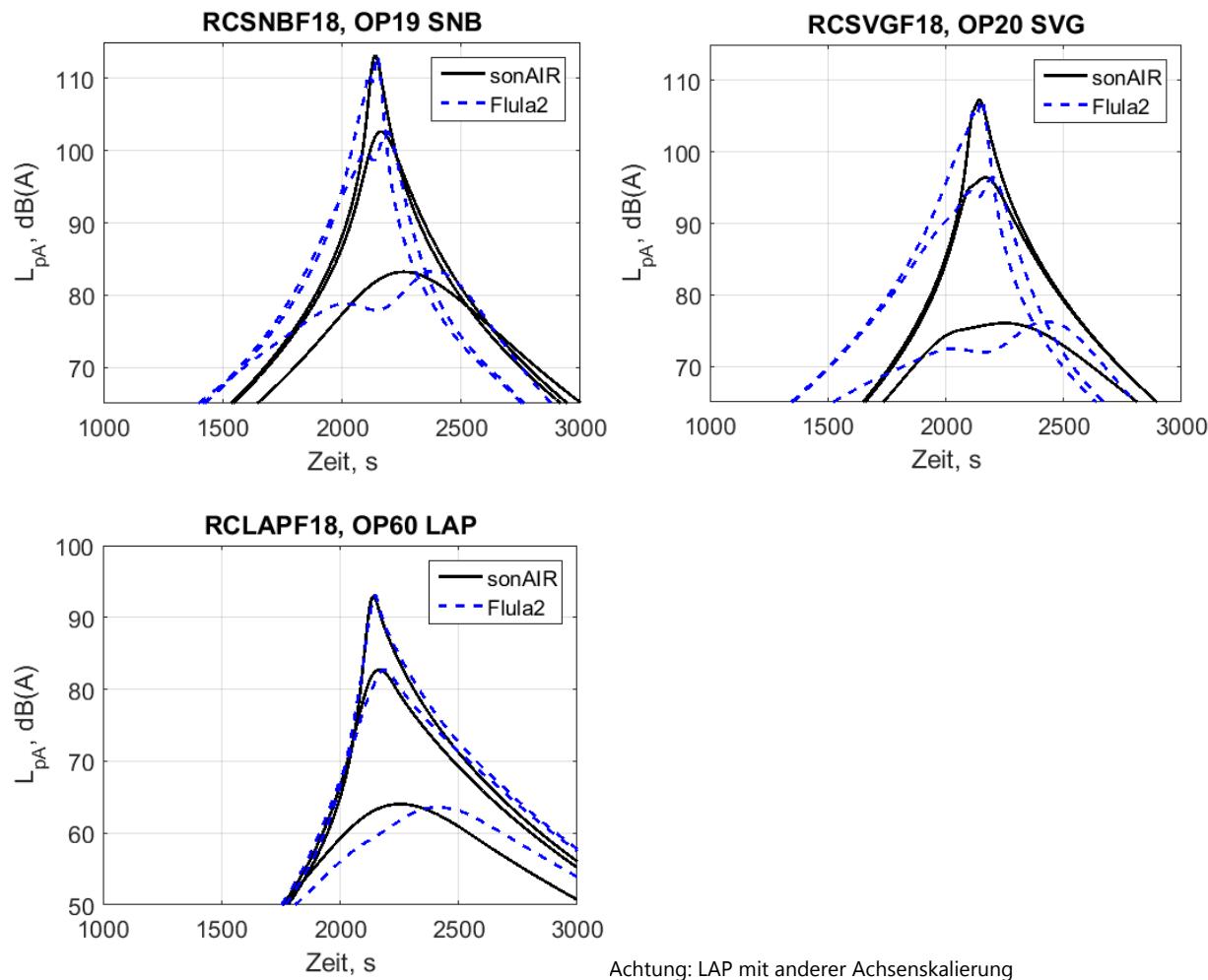


Abbildung 24: Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell C550 und FLULA2 RC-Typ C550.

Tabelle 15: Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die C550

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	1.05	-0.06	-0.02	-1.34	0.83
800	20	0.84	0.36	0.01	-5.56	0.38
3200	20	0.67	1.05	-0.22	-22.44	1.13
304.8	60	0.00	0.02	0.04	-10.80	0.32
800	60	0.00	0.02	0.01	-8.82	0.23
3200	60	0.03	0.04	-0.02	-5.45	0.18

### 5.7.3. F18

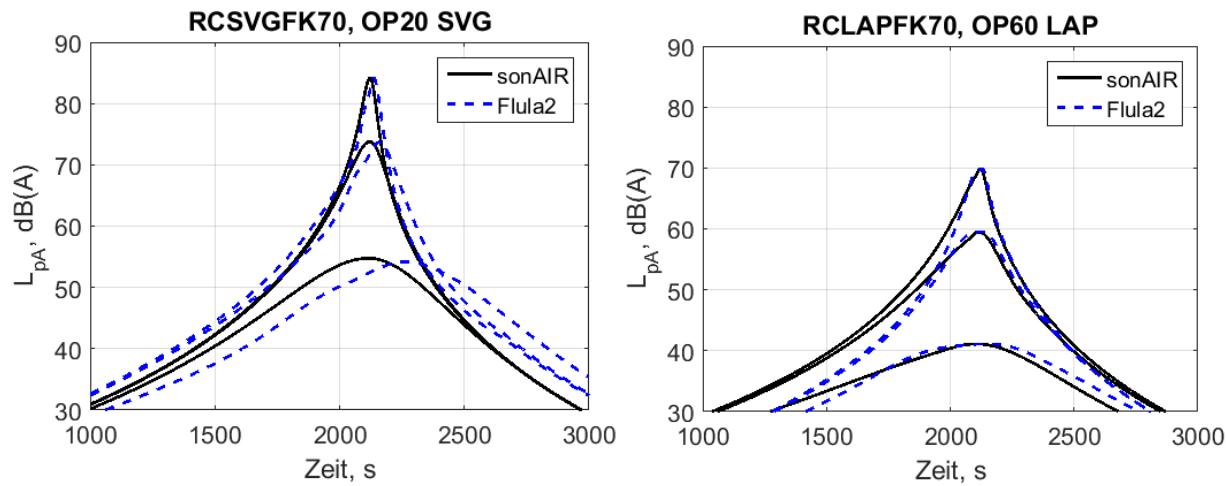


**Abbildung 25:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell F18 und FLULA2 RC-Typ F18.

**Tabelle 16:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die F18

Höhe	OP	dLAE	dLAMax	dEta	dTheta	d
304.8	19	-0.05	-0.05	-0.55	-10.66	1.38
800	19	-0.03	0.03	-0.47	-10.90	1.25
3200	19	0.03	-0.13	-0.33	-14.90	1.09
304.8	20	-0.08	-0.03	-0.52	-10.90	1.29
800	20	-0.03	0.05	-0.42	-12.81	1.13
3200	20	0.18	-0.21	-0.27	-19.84	1.05
304.8	60	-0.28	-0.26	-0.02	-7.19	0.26
800	60	-0.25	0.01	0.01	-9.58	0.29
3200	60	0.09	0.45	-0.06	-18.04	0.60

### 5.7.1. F70

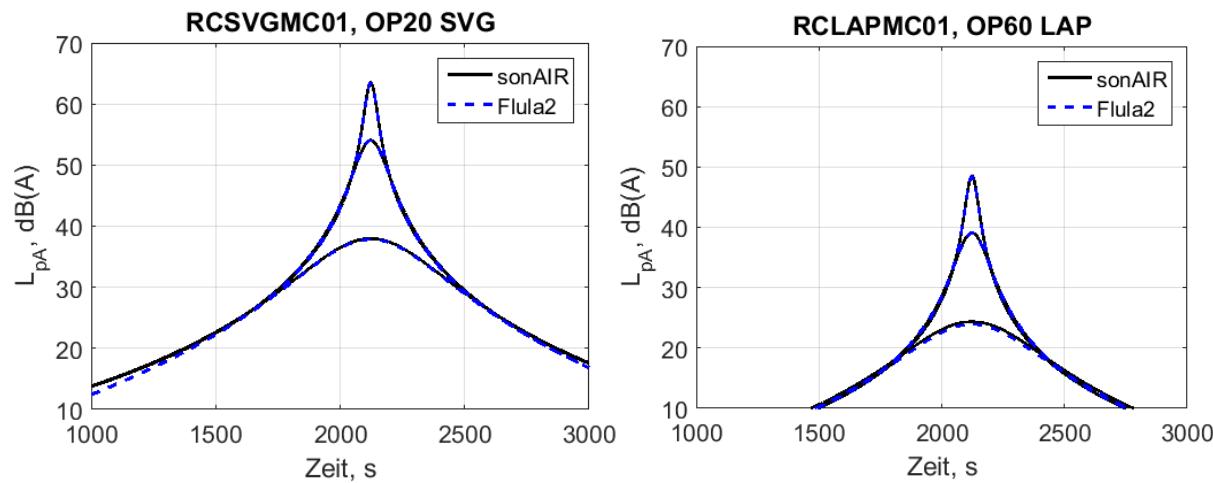


**Abbildung 26:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell F70 und FLULA2 RC-Typ FK70.

**Tabelle 17:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die F70

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	-0.08	-0.01	-0.01	-22.25	0.49
800	20	-0.06	0.10	0.05	-20.39	0.58
3200	20	0.06	0.59	0.06	-20.82	0.75
304.8	60	0.01	0.04	0.01	-7.72	0.21
800	60	-0.16	-0.03	0.02	-5.30	0.22
3200	60	-0.31	-0.03	-0.01	-6.62	0.25

### 5.7.1. MCR1

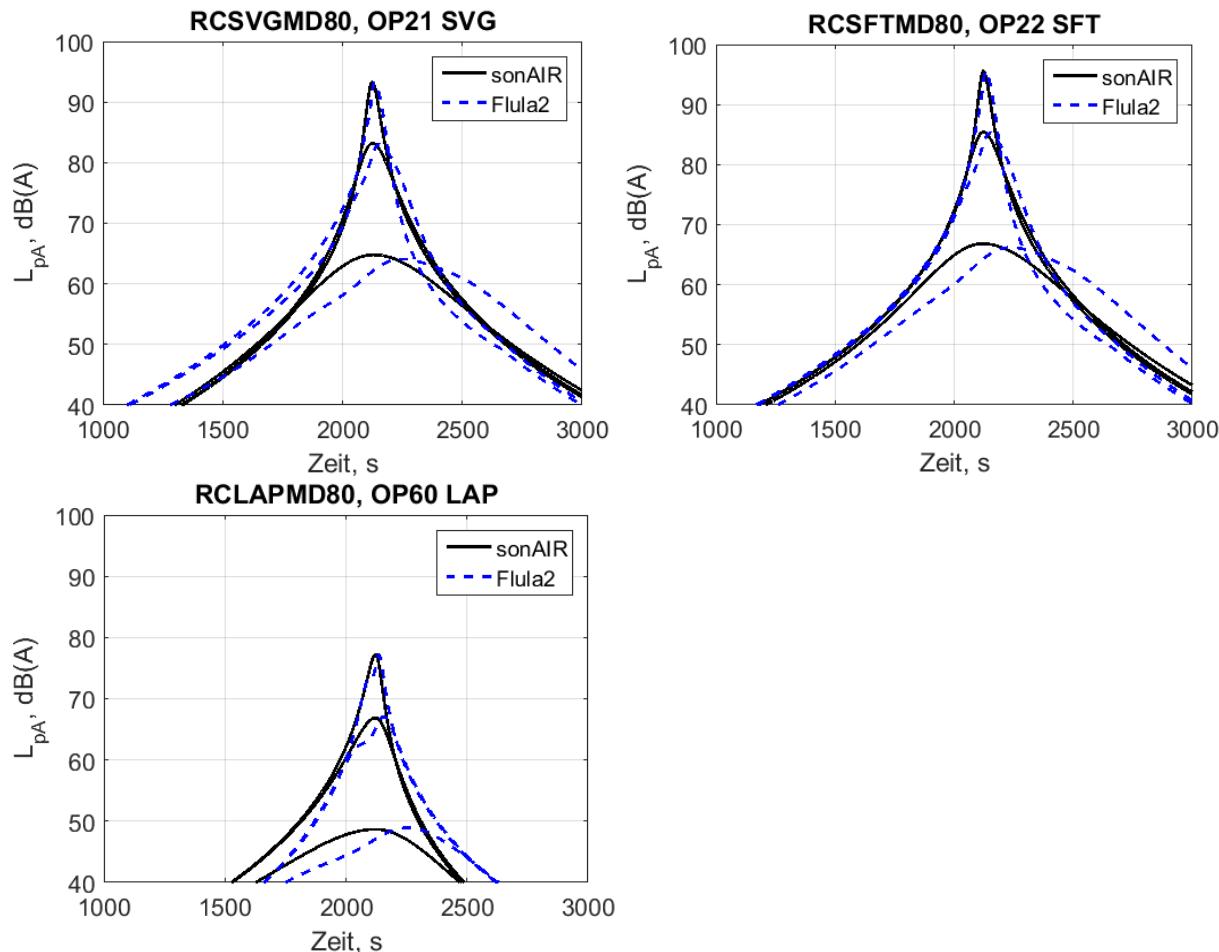


**Abbildung 27:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell MCR1 und FLULA2 RC-Typ MC01.

**Tabelle 18:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die MCR1

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	0.06	0.07	0.00	0.00	0.01
800	20	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01
3200	20	0.17	0.16	0.00	0.00	0.03
304.8	60	0.05	0.07	-0.04	-1.55	0.17
800	60	0.03	0.00	-0.03	-1.18	0.14
3200	60	0.45	0.40	-0.02	-0.74	0.18

### 5.7.1. MD81

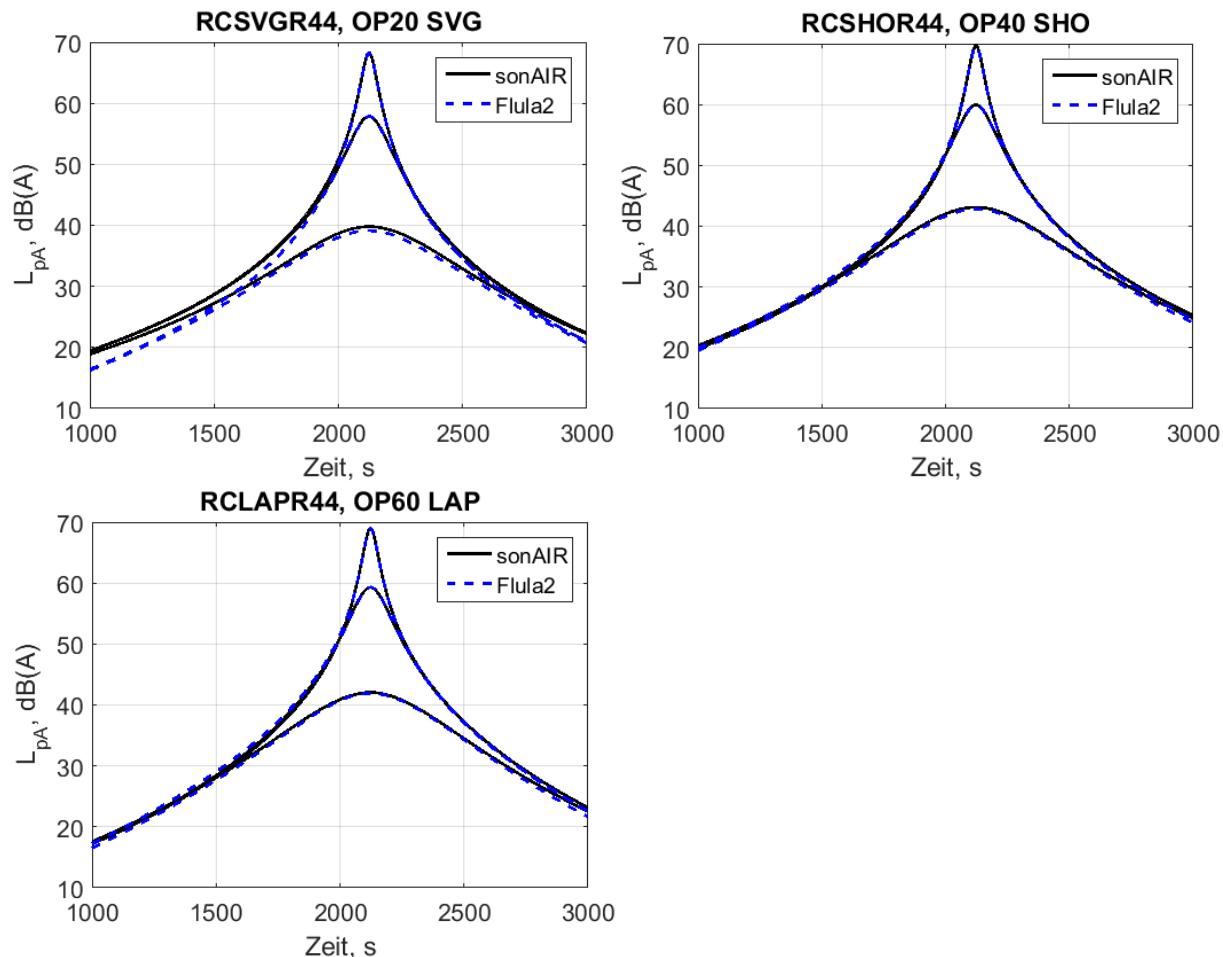


**Abbildung 28:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell MD81 und FLULA2 RC-Typ MD80.

**Tabelle 19:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für die MD81

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	21	-0.03	0.02	0.00	-16.41	0.34
800	21	0.06	0.19	0.02	-16.51	0.45
3200	21	0.25	0.70	0.07	-16.94	0.73
304.8	22	-0.01	0.03	-0.01	-16.54	0.38
800	22	0.06	0.19	0.02	-16.07	0.44
3200	22	0.23	0.62	0.05	-17.04	0.64
304.8	60	0.01	0.05	0.00	-19.34	0.39
800	60	0.01	-0.17	0.05	-18.75	0.56
3200	60	0.02	-0.25	0.09	-18.88	0.68

### 5.7.2. R44



**Abbildung 29:** Vergleiche simulierter Pegel-Zeit-Verläufe mit Überflughöhen von 304.8 m, 800 m, 3200 m zwischen dem sonAIR Emissionsmodell R44 und FLULA2 RC-Typ R44.

**Tabelle 20:** Vergleich der Kennzahlen über mehrere Überflughöhen für den R44

Höhe	OP	dLAE	dLAmax	dEta	dTheta	d
304.8	20	0.08	0.12	0.00	0.00	0.03
800	20	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02
3200	20	0.72	0.65	0.00	0.00	0.12
304.8	40	0.05	0.10	0.00	0.00	0.04
800	40	0.03	0.05	0.00	0.00	0.02
3200	40	0.35	0.35	0.00	0.00	0.06
304.8	60	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
800	60	0.01	-0.02	0.00	0.00	0.02
3200	60	0.21	0.16	0.00	0.00	0.05