

Expertengremium aktiver Schallschutz

---

# Untersuchung Startverfahren

Endbericht



# Inhalt

|  |    |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis  | 4  |
| Tabellenverzeichnis  | 6  |
| Abkürzungsverzeichnis  | 7  |
| 1 Zusammenfassung  | 9  |
| 2 Hintergrund & Zielstellung   | 14 |
| 3 Methodisches Vorgehen  | 15 |
| 3.1 Berücksichtigte Startverfahren   | 15 |
| 3.2 Berechnung der Lärmeffekte von Startverfahren auf Grundlage von Fixpunktprofilen mittels AzB | 20 |
| 3.3 Berechnungsmethoden  | 24 |
| 3.4 Limitierungen des Gesamtvorhabens  | 31 |
| 4 Ergebnisse der „Untersuchung Startverfahren“   | 33 |
| 4.1 Auswertung der Einzelflugkonturen (Footprints)   | 33 |
| 4.1.1 Deskriptive Auswertung der SEL-Footprints  | 33 |
| 4.1.2 Deskriptive Auswertung der LMax-Footprints   | 37 |
| 4.2 Szenariobetrachtung 2019: nur die sechs Luftfahrzeugmuster mit veränderten Startprofilen     | 39 |
| 4.2.1 Auswertung der Berechnungsergebnisse auf Basis der Dauerschallpegel                        | 39 |
| 4.2.2 Auswertung der Dauerschallpegelkonturen  | 44 |
| 4.2.2.1 Tag  | 44 |
| 4.2.2.2 Nacht  | 46 |
| 4.3 Szenariobetrachtung 2019: Differenzansatz für ein Gesamtverkehrsszenario                     | 48 |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.4      | Szenariobetrachtung 2019: Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Flugzeugmuster  | 50        |
| 4.4.1    | Auswertung der Differenzen zwischen den Startverfahren  | 50        |
| 4.4.1.1  | Tag   | 51        |
| 4.4.1.2  | Nacht   | 52        |
| 4.4.2    | Auswertung der Gebietskonturen  | 54        |
| 4.4.2.1  | Tag   | 54        |
| 4.4.2.2  | Nacht   | 55        |
| 4.4.3    | Auswertung der Indexpunkte  | 56        |
| 4.4.3.1  | Tag   | 56        |
| 4.4.3.2  | Nacht   | 58        |
| <b>5</b> | <b>Fazit</b>  | <b>59</b> |
| <b>6</b> | <b>Anhang</b>   | <b>62</b> |
| 6.1      | Anhang A: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) einzelner Flugzeugmuster  | 62        |
| 6.2      | Anhang B: Flächen und maximale Konturausdehnung der Lmax-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) einzelner Flugzeugmuster | 66        |

## Abbildungsverzeichnis

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Berücksichtigte Startverfahren  | 16 |
| Abbildung 2: Höhenverläufe der Startverfahren A320-211 mit Geschwindigkeitsbegrenzung und niedrigem Startgewicht   | 17 |
| Abbildung 3: Höhenverläufe der Startverfahren B737-800 mit Geschwindigkeitsbegrenzung und niedrigem Startgewicht   | 18 |
| Abbildung 4: Auswirkung der Flughöhe auf die Schallausbreitung   | 19 |
| Abbildung 5: Beispielhaftes Startprofil  | 23 |
| Abbildung 6: LAmox-Footprint des A320-211 NADP1 (rot) vs. NADP2-15 (blau) – 95% MTOM, 220 kn   | 25 |
| Abbildung 7: SEL-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400- und A320-211-Abflugs von Startbahn 18W (hohe Auslastung)    | 34 |
| Abbildung 8: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400-Abflugs            | 35 |
| Abbildung 9: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines A320-211-Abflugs            | 36 |
| Abbildung 10: LAmox-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400- und A320-211-Abflugs von Startbahn 18W (hohe Auslastung) | 37 |
| Abbildung 11: Flächen und maximale Konturausdehnung der LAmox-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400-Abflugs         | 38 |
| Abbildung 12: Flächen und maximale Konturausdehnung der LAmox-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines A320-211-Abflugs         | 39 |
| Abbildung 13: Übersicht Flächeninhalte in km <sup>2</sup> bei 220 kn Geschwindigkeitsbegrenzung, Tag & Nacht   | 41 |
| Abbildung 14: Veränderung der Flächeninhalte in Prozent NADP1 vs. NADP2 nach Pegelbereichen  | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 15: Übersicht betroffene Personen bei 220kn Geschwindigkeitsbegrenzung, Tag & Nacht                                      | 44 |
| Abbildung 16: Pegelkonturen der Startverfahren am Tag, niedrige Auslastung   | 45 |
| Abbildung 17: Pegelkonturen der Startverfahren am Tag, hohe Auslastung   | 46 |
| Abbildung 18: Pegelkonturen der Startverfahren in der Nacht, geringe Auslastung  | 47 |
| Abbildung 19: Pegelkonturen der Startverfahren in der Nacht, hohe Auslastung   | 48 |
| Abbildung 20: Differenzkarte Tag Szenario Steilstart (NADP1) im Vergleich zu NADP2-15  | 49 |
| Abbildung 21: Differenzkarte Tag Szenario Flachstart (NADP2-10) im Vergleich zu NADP2-15   | 50 |
| Abbildung 22: Delta-Karte NADP1 minus NADP2-10, Tag (Dauerschallpegel)   | 51 |
| Abbildung 23: Delta-Karte NADP1 minus NADP2-10, Nacht (Aufwachreaktionen)  | 53 |
| Abbildung 24: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – Kontur Tagindexgebiet 2 | 54 |
| Abbildung 25: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – Kontur Nachtindexgebiet | 55 |
| Abbildung 26: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – Indexpunkte Tag         | 57 |
| Abbildung 27: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – FNI 2.0                 | 58 |

## Tabellenverzeichnis

---

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht über genutzte Berechnungsmethoden und deren Ergebnisse  | 11 |
| Tabelle 2: Überblick über genutzte Berechnungsmethoden   | 30 |
| Tabelle 3: Unterschiede zwischen den Startverfahren in km <sup>2</sup> und Prozent   | 40 |
| Tabelle 4: Unterschiede zwischen den Startverfahren in Personenzahlen und Prozent  | 43 |
| Tabelle 5: Gesamtergebnis  | 60 |
| Tabelle 6: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn)                           | 64 |
| Tabelle 7: Flächen und maximale Konturausdehnung der Lmax-Footprints mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) einzelner Flugzeugmuster | 68 |

## Abkürzungsverzeichnis

---

| Abkürzung | Erläuterung   |
|-----------|---|
| AGL       | Above ground level  |
| ANP       | Actual Navigation Performance   |
| AWR       | Aufwachreaktion(en)   |
| AzB       | Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen  |
| AzD       | Anleitung zum Datenerfassungssystem   |
| BMDV      | Bundesministerium für Digitales und Verkehr   |
| BRP       | Breaks release point  |
| CAS       | Calibrated Airspeed   |
| dB        | Dezibel   |
| dB(A)     | Maßeinheit des Schalldruckpegels nach der international genormten Frequenzbewertungskurve A |
| DES       | Datenerfassungssystem   |
| Doc.      | Dokument  |
| ECAC      | European Civil Aviation Conference  |
| EEG       | Elektroenzephalogramm   |
| ExpASS    | Expertengremium Aktiver Schallschutz (des FFR)  |
| FFI       | Frankfurter Fluglärmindex   |
| FFR       | Forum Flughafen und Region  |
| FNI       | Frankfurter Nachtindex  |
| ft        | Fuß (Längenmaß)   |
| FZG       | Flugzeuggruppe  |
| GfL       | Gesellschaft für Luftverkehrsforschung  |
| HA        | Highly Annoyed/ Hochbelästigte  |
| ICAO      | International Civil Aviation Organisation   |

| Abkürzung                 | Erläuterung   |
|---------------------------|---|
| km                        | Kilometer   |
| kn                        | Knoten  |
| LAeq                      | Äquivalenter Dauerschallpegel   |
| LAeq, Tag                 | Äquivalenter Dauerschallpegel am Tag  |
| LAeqN43                   | Gebiet in dem der äquivalente Dauerschallpegel in der Nacht $\geq 43$ dB(A) ist |
| LAeqT48                   | Gebiet in dem der äquivalente Dauerschallpegel am Tag $\geq 48$ dB(A) ist       |
| LAm <sub>ax</sub>         | Maximalpegel  |
| LAm <sub>ax</sub> , Nacht | Maximalpegel in der Nacht   |
| m                         | Meter   |
| MTOM                      | Maximum Take-off Mass   |
| MTOW                      | Maximum Takeoff Weight  |
| NADP                      | Noise abatement departure procedure   |
| NADP 1-Verfahren          | sogenanntes „Steilstart“-Verfahren  |
| NADP 2-Verfahren          | sogenanntes „Flachstart“-Verfahren  |
| NADP <sub>1</sub>         | Schubrücknahme in 1500ft AGL, Beschleunigung in 3000ft AGL                      |
| NADP <sub>2-10</sub>      | Schubrücknahme in 1000ft AGL, Beschleunigung in 1000ft AGL                      |
| NADP <sub>2-15</sub>      | Schubrücknahme in 1500ft AGL, Beschleunigung in 1500ft AGL                      |
| NAT                       | Number Above Threshold  |
| NPD                       | Noise-Power-Distance  |
| PANS                      | Procedures for Air Navigation Services  |
| qkm                       | Quadratkilometer  |
| SEL                       | Sound Exposure Level  |
| UNH                       | Umwelt- und Nachbarschaftshaus  |
| vM                        | verkehrsreichste Monate   |



## 1 Zusammenfassung

Dieser Bericht untersucht die Auswirkungen verschiedener Startverfahren auf die Lärmbelastung am Flughafen Frankfurt. Konkret geht es darum, die „Flachstartverfahren“ in ihren Auswirkungen mit „Steilstartverfahren“ zu vergleichen.

## Hintergrund und Zielstellung

Die ICAO (International Civil Aviation Organisation) beschreibt je nach der Besiedlungsstruktur im Umfeld eines Flughafens zwei lärmindernde Startverfahren (Noise abatement departure procedure – NADP). Laut ICAO dient das NADP 1-Verfahren („Steilstart“) der Lärmreduzierung in unmittelbarer Nähe des Startbahnendes. Das NADP 2-Verfahren („Flachstart“) mindert die Lärmbelastung in vom Startbahnende weiter entfernten Gebieten.

Um der Frage nachzugehen, welches Startverfahren die größere Entlastung für den Flughafen Frankfurt insgesamt bringt, hat das Forum Flughafen und Region (FFR) eine entsprechende Studie in das Maßnahmenprogramm aktiver Schallschutz (2018) aufgenommen. Ziel der „Untersuchung Startverfahren“ war es, gemäß Maßnahmenprogramm aktiver Schallschutz, herauszufinden, welches das für den Standort insgesamt lärmgünstigere Verfahren ist. Da eine flächendeckende Beurteilung auf Basis einzelner Messstationen nicht möglich ist, wurde die Beurteilung mittels Berechnungen vorgenommen.

## Methodisches Vorgehen

Die Lärmberechnungen erfolgten in Anlehnung an die üblichen Lärmberechnungen gemäß FFI 2.0. Die Untersuchung des FFR bezieht folgende drei ICAO Konforme Startverfahren mit folgenden Merkmalen ein:

- **NADP1** – Schubrücknahme in 1500ft AGL, Beschleunigung in 3000ft AGL
- **NADP2-10** – Schubrücknahme in 1000ft AGL, Beschleunigung in 1000ft AGL
- **NADP2-15** – Schubrücknahme in 1500ft AGL, Beschleunigung in 1500ft AGL

Für die Berechnungen wurden sechs repräsentative Flugzeugmuster ausgewählt, die den Großteil der Lärmbelastung am Flughafen Frankfurt im Jahr 2019 abdecken: Für jedes dieser Muster wurden 12 Fixpunktprofile entwickelt, die die unterschiedlichen Startverfahren, Auslastungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen abbilden. Insgesamt ergaben sich daraus 72 AzB-kompatible Startprofile.

- **A320-211**: 95%/85% MTOW, mit/ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, NADP1/NADP2-10/NADP2-15
- **A380-841**: 100%/75% MTOW, mit/ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, NADP1/NADP2-10/NADP2-15
- **B737-800**: 95%/85% MTOW, mit/ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, NADP1/NADP2-10/NADP2-15
- **B747-400**: 100%/75% MTOW, mit/ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, NADP1/NADP2-10/NADP2-15
- **B747-8**: 100%/75% MTOW, mit/ohne Geschwindigkeitsbegrenzung, NADP1/NADP2-10/NADP2-15

Die Berechnungen wurden nach den Kriterien der „Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen“ (AzB) durchgeführt. Die Fixpunktprofile, die auf den ECAC Doc. 029-Richtlinien basieren, wurden in das AzB-Format übertragen, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten des FFR zu gewährleisten. Die Erstellung der Fixpunktprofile wurde unter Berücksichtigung eines generischen Geradeausflugs ohne Topografie durchgeführt, um die Effekte der Startverfahren isoliert zu betrachten.

Basierend auf den ermittelten Fixpunktprofilen führte das Umwelt- und Nachbarschaftshaus (UNH) Berechnungen von Konturen als Footprint (Lärmprofil eines einzelnen Abflugs) und Verkehrsszenarien für den Flughafen Frankfurt durch. Die Untersuchung berücksichtigt eine Geschwindigkeitsbegrenzung, da 220kn auf nahezu sämtlichen Abflugstrecken am Standort Frankfurt vorgegeben sind.

Folgende Szenarios wurden für die Berechnungen genutzt:

- Ein Szenario erfolgte auf Grundlage des DES 2019, wobei sämtliche Flugzeugmuster, für die keine spezifischen Startprofile erstellt wurden, aus dem DES entfernt wurden. Berücksichtigt wurden hier also nur die sechs ausgewählten Flugzeugmuster.
- Ein weiteres Szenario wurde auf Grundlage einer normalen AzB-Berechnung für 2019 gebildet. Auf dieses wurde dann die Differenz zwischen den Startverfahren, berechnet mit Hilfe der erzeugten Startprofile, addiert.
- In einem dritten Szenario wurden, erneut auf Grundlage des DES 2019, die vorhandenen angepassten Startprofile auf andere Flugzeugmuster im DES übertragen.

Das Vorgehen entspricht gemäß der Einschätzung des ExpASS dem bestmöglichen, mit begrenzten Ressourcen leistbaren. Auch eine Bearbeitung des Untersuchungsgegenstands etwa direkt mittels ECAC Doc. 029 hätte keine weiteren Erkenntnisse gebracht: Auch hier hätten zusätzliche Startprofile erstellt werden müssen; die Berechnungen wären nicht vergleichbar zu anderen Arbeiten des FFR.

Dennoch unterliegt das Vorgehen einigen Einschränkungen, die ausführlich dargelegt wurden. Zusammengefasst handelt es sich um folgende:

- Begrenzte Zahl und Ausgestaltung berücksichtigter Startverfahren;
- Begrenzte Auswahl an Flugzeugmustern;
- Notwendige Setzungen zur Generierung der Startprofile;
- Nicht-Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren, wie Kurvenflug, Höhenvorgaben etc.;
- Unbekannte Situation im realen Betrieb;
- Unsicherheiten durch die Übertragung der ECAC Doc. 029 Fixpunktprofile in AzB-geeignete Profile.

## Ergebnisse & Fazit

In der Gesamtschau bringt das NADP<sub>1</sub>-Verfahren keine substanziellen Vorteile. Vielmehr zeigen die – in dem vereinfachten Rahmen der Studie – durchgeführten Berechnungen, dass die untersuchten Flachstartverfahren im Vergleich zu dem untersuchten Steilstartverfahren für den Standort Frankfurt, mit seiner Besiedlungsstruktur, grundsätzlich etwas lärmgünstiger sind. Es gibt zwar einzelne Gebiete, insbesondere direkt

unterhalb des Flugpfades im Nahbereich des Flughafens, in denen das „Steilstartverfahren“ (Startverfahren mit Schubrücknahme bei 1500ft, nachfolgender Steigflug bis 3000ft und anschließender Beschleunigung – NADP<sub>1</sub>) besser abschneidet, in der Gesamtsumme werden diese aber durch die positiven Effekte von NADP<sub>2</sub> (also dem Flachstart) in vom Startbahnende weiter entfernten Gebieten und seitlich vom Flugpfad überwogen. Beim Blick auf die Verteilung der Besiedlungsgebiete, erscheint dieses Ergebnis logisch: Die am stärksten besiedelten Gebiete liegen jeweils seitlich des Flugpfads, während Entlastungen durch das Steilstartverfahren im Nahbereich eher direkt darunter erfolgen.

Da die Sensitivitätsanalysen keine wesentlichen Einflüsse der darin betrachteten Faktoren auf die Startverfahren aufzeigen konnten, wären auch bei Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren (Kurvenflug, Berücksichtigung weiterer Flugzeugmuster etc.) keine wesentlich anderen Ergebnisse zu erwarten. Die Ergebnisse unterscheiden sich auch nicht zwischen Tag und Nacht.

Um diese Berechnungen durchführen zu können musste auf stark vereinfachte Modelle zurückgegriffen werden. Diese Vereinfachungen waren notwendig, um die Berechnungen durchführen und mit nicht verfügbaren Daten umgehen zu können. Dies hat zur Folge, dass eine Übertragbarkeit auf die Realität nicht automatisch als gegeben angenommen werden kann.

Mit dem vorliegenden Bericht ist die Maßnahme „Untersuchung Startverfahren“, wie sie im Bericht zum Maßnahmenprogramm aktiver Schallschutz beschrieben ist, abgeschlossen.

*Tabelle 1: Übersicht über genutzte Berechnungsmethoden und deren Ergebnisse*

|                                   | <i>Deskriptive Auswertung von Footprints</i>                    | <i>Szenario 2019: Nur 6 Flugzeugmuster</i>   | <i>Szenario 2019: Differenzansatz</i> | <i>Szenario 2019: Umlagen der Profile</i> |
|-----------------------------------|---|--|---------------------------------------|---|
| <i>Betrachtete Startverfahren</i> | NADP <sub>1</sub> , NADP <sub>2-10</sub> , NADP <sub>2-15</sub> |  |                                       |   |
| <i>Betrachtete Flugzeugmuster</i> | A320-211, A380-841, B737-800, B747-400, B747-8, B777-300ER      |  |                                       |   |
| <i>Datengrundlage</i>             | Individuelle Startprofile                                       | DES 2019                                     | DES 2019                              | DES 2019                                  |
| <i>Berechnete Pegel</i>           | SEL- & LAmax-Pegel  | Dauerschallpegel nach AzB                    | Dauerschallpegeldifferenz nach AzB    | Dauerschall- & Maximalpegel nach AzB      |
| <i>Verkehrsmenge</i>              | Einzelner Abflug  | Alle Bewegungen der 6 Muster in den 6vM 2019 | 100% 6vM 2019                         | 100% 6vM 2019                             |

|   | <i>Deskriptive Auswertung von Footprints</i>  | <i>Szenario 2019: Nur 6 Flugzeugmuster</i>  | <i>Szenario 2019: Differenzansatz</i>   | <i>Szenario 2019: Umlagen der Profile</i>  |
|---|---|---|---|--|
| <i>Startgewicht</i>                                     | Hoch & niedrig  | Hoch & niedrig  | Hohe Auslastung   | Mix (hohe Auslastung, wenn Muster nach AzD nicht in a) bzw. b) unterschieden werden (A320, B737, B777))  |
| <i>Geschwindigkeitsbegrenzung</i>                       | 220 kn & ohne   | 220 kn & ohne   | 220 kn  | 220 kn   |
| <i>Bezugspunkt der Ergebnisse</i>                       | Generischer Geradeflug  | Berechnung neuer Konturen nur für die 6 Muster  | Unveränderte AzB-Berechnung 2019 (inkl. Addition der Pegeldifferenzen der Startverfahren)   | Berechnung neuer Konturen mit veränderten Startprofilen  |
| <i>Ergebnis</i>   | NADP <sub>2-10</sub> mit geringster Flächengröße, seitlich des Flugpfads deutliche Reduktion bei NADP <sub>2-10</sub> | 3-6% Flächenreduktion bei NADP <sub>2-10</sub><br>5-10% geringere Betroffene bei NADP <sub>2-10</sub> (tags) bzw. bis zu 25% (nachts) | Bis zu 1,2 dB(A) Reduktion in besiedeltem Gebiet im Nahbereich durch NADP <sub>2-10</sub> , marginale Mehrbelastung lediglich über unbesiedelten Gebieten | Reduktion der Indexpunkte um überwiegend 5% durch NADP <sub>2-10</sub> (je nach Gebiet 3% bis 18% Reduktion), Reduktion AWR um 0,2 IP in besiedelten Gebiet durch NADP <sub>2-10</sub> |
| <i>Vorteilhaftestes Startverfahren für den Standort</i> | NADP <sub>2-10</sub>  | NADP <sub>2-10</sub>  | NADP <sub>2-10</sub>  | NADP <sub>2-10</sub>   |
| <i>Vorteile</i>   | Geringste Unsicherheiten bei Vergleich der Verfahren untereinander anhand eines einzelnen Flugzeugmusters             | Keine Vermischung mit AzB-Profilen;<br>Nur Flugzeugmuster mit bekannten veränderten Profilen betrachtet                               | Abbildung von 100% der Verkehrsmenge; Realistische Gebietsgröße durch unveränderte Berechnungsgrundlage   | Abbildung von 100% der Verkehrsmenge; nur etwa 16% der Bewegungen mit AzB-Standard-Startverfahren enthalten  |

|                  | <i>Deskriptive Auswertung von Footprints</i> | <i>Szenario 2019: Nur 6 Flugzeugmuster</i>   | <i>Szenario 2019: Differenzansatz</i>   | <i>Szenario 2019: Umlagen der Profile</i>  |
|------------------|--|--|---|--|
| <i>Nachteile</i> | Keine Szenario-Betrachtung                   | Gebiete durch geringere Verkehrsmenge kleiner; Übertragung von ECAC Doc. 029 Profilen in AzB | Gebiete mit 100% des Verkehrs berechnet, die sich ergebenden Differenz zwischen den Startverfahren aber nur anhand von 6 Mustern, die ca. 70% der Lärmimmissionen 2019 ausmachen; | Übertragung der o.g. Startprofile auf andere AzB-Flugzeuggruppen und Bewegungen; Übertragung von ECAC Doc. 029 Profilen in AzB<br>Kombination von GfL- und AzB-Profilen (s.o.) |

## 2 Hintergrund & Zielstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der „Untersuchung Startverfahren“ durch das Forum Flughafen und Region (FFR) dargelegt. Die „Untersuchung Startverfahren“ ist Teil des 2018 veröffentlichten Maßnahmenprogramms aktiver Schallschutz. Die Ziele wurden darin wie folgt formuliert<sup>1</sup>: „Das Projekt „Untersuchung Startverfahren“ berechnet die Lärmwirkungen der Startverfahren für die wichtigsten Abflugstrecken und Flugzeugtypen am Flughafen Frankfurt. Sobald die Ergebnisse vorliegen, wird das Expertengremium darüber beraten, ob es für den Standort Frankfurt eines der untersuchten Startverfahren empfehlen kann, das sich über alle untersuchten Abflugstrecken hinweg als das bezüglich seiner Lärmwirkungen günstigere für den Standort Frankfurt erwiesen hat.“

Berücksichtigt wurden drei Startverfahren, die laut ICAO die Kriterien von NADP<sub>1</sub> bzw. NADP<sub>2</sub> erfüllen, und sich im Wesentlichen darin unterscheiden, ob sie die Energie nach der Schubrücknahme vom Startschub in erster Linie in Höhengewinn (NADP<sub>1</sub>, sog. „Steilstartverfahren“) oder auch zum Aufbau von Geschwindigkeit (NADP<sub>2</sub>, sog. „Flachstartverfahren“) umsetzen. Eine detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Verfahren erfolgt weiter unten.

Wie bereits der Zielsetzung aus dem Maßnahmenprogramm zu entnehmen ist, geht es bei den Auswertungen darum **das für den Standort insgesamt** lärmgünstigere Verfahren zu identifizieren. Dies kann auch bedeuten, dass es auf einzelnen Abflugstrecken oder für einzelne Kommunen hierdurch zu Verschlechterungen kommen kann – sofern diese durch Verbesserungen an anderer Stelle kompensiert werden. Zur Bewertung werden die üblichen Kriterien des FFR angelegt.

Welcher Verfahrenstyp (NADP<sub>1</sub> vs. NADP<sub>2</sub>) hinsichtlich der Lärmwirkung besser oder schlechter ist, hängt im Wesentlichen von der jeweils verfolgten Zielstellung, der Besiedlungsstruktur sowie dem Flottenmix, der Abflugmasse und ggf. von der Startbahn ab, und ist somit standortabhängig: So führt NADP<sub>1</sub> eher zu geringeren Maximalpegeln, während die SEL-Pegel<sup>2</sup> – aufgrund längerer Einwirkdauer (Überflugzeiten) – höher werden. Hinzu kommt bei NADP<sub>1</sub> eine größere Streuung des Lärms seitlich der Flugroute, aufgrund der größeren Flughöhe. Entscheidend für die Wirkung der unterschiedlichen Verfahren ist somit die Lage der betrachteten Abflugroute(n) in Abhängigkeit zur umliegenden Besiedlung.<sup>3</sup>

Vorgeschrieben werden kann das Startverfahren von Akteuren des FFR für den Standort Frankfurt nicht. Es ist lediglich möglich, Empfehlungen auszusprechen. In Deutschland kann darüber hinaus das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) Empfehlungen zur Art des zu nutzenden Startverfahrens aussprechen. Zum aktuellen Zeitpunkt existiert eine solche Empfehlung durch das BMDV aber nicht.

---

<sup>1</sup> [https://www.umwelthaus.org/download/?file=bericht\\_2\\_massnahmenprogramm\\_aktiver\\_schallschutz.pdf](https://www.umwelthaus.org/download/?file=bericht_2_massnahmenprogramm_aktiver_schallschutz.pdf)

<sup>2</sup> Sound Exposure Level: Die Energie des gesamten Schallereignisses wird auf eine Sekunde gemittelt.

<sup>3</sup> Gesellschaft für Luftverkehrsforschung (2022). Untersuchung des Startverfahrens am Flughafen Frankfurt. Seiten 13 ff.

## 3 Methodisches Vorgehen

### 3.1 Berücksichtigte Startverfahren

Die ICAO-Leitlinien<sup>4</sup> benennen zwei Verfahrensarten, die von den Airlines grundsätzlich festzulegen und für Starts zu nutzen sind: NADP<sub>1</sub> und NADP<sub>2</sub>. Die Unterschiede zwischen den Startverfahren ergeben sich aus zwei zentralen Faktoren: dem Zeitpunkt der Schubrücknahme (dem sog. „Cutback“) von Start- auf Steigschub sowie dem Zeitpunkt des Geschwindigkeitsaufbaus. Beides führt zu einer geringeren Steigrate. Die beiden Verfahren (NADP<sub>1</sub> und NADP<sub>2</sub>) sind allerdings lediglich beispielhaft beschrieben, die genaue Ausgestaltung dieser Verfahren überlässt ICAO den Fluglinien – mit einer wesentlichen Ausnahme: Eine Schubrücknahme unterhalb von 800 Fuß ist nicht zulässig. Die beispielhaften Beschreibungen in den ICAO-Dokumenten gehen daher seit 2013 von einem Cutback bei 800 ft aus.

Für die Untersuchung durch das FFR wurden insgesamt drei Startverfahren festgelegt, die in den Auswertungen berücksichtigt wurden (siehe hierzu auch Abbildung 1):

- NADP<sub>1</sub>: Schubrücknahme („Cutback“) vom Startschub in 1.500 ft Höhe, Aufnahme der Beschleunigung in 3.000 ft Höhe;
- NADP<sub>2-15</sub>: Schubrücknahme („Cutback“) vom Startschub in 1.500 ft Höhe bei gleichzeitiger Aufnahme der Beschleunigung ebenfalls in 1.500 ft;
- NADP<sub>2-10</sub>: Schubrücknahme („Cutback“) vom Startschub in 1.000 ft Höhe bei gleichzeitiger Aufnahme der Beschleunigung ebenfalls in 1.000 ft.

Die Festlegung der Höhen für Schubrücknahme und Aufnahme der Beschleunigung erfolgte auf Basis dessen, was zum Zeitpunkt der Festlegung am Standort Frankfurt nach Wissen aller Beteiligten durch Airlines tatsächlich vorgegeben wurde. Da weder ein Steilstartverfahren mit einer Schubrücknahme bereits in 1.000 ft Höhe bekannt war, noch eine Vorgabe für Schubrücknahme bereits in 800 ft, wurden diese auch nicht berücksichtigt.

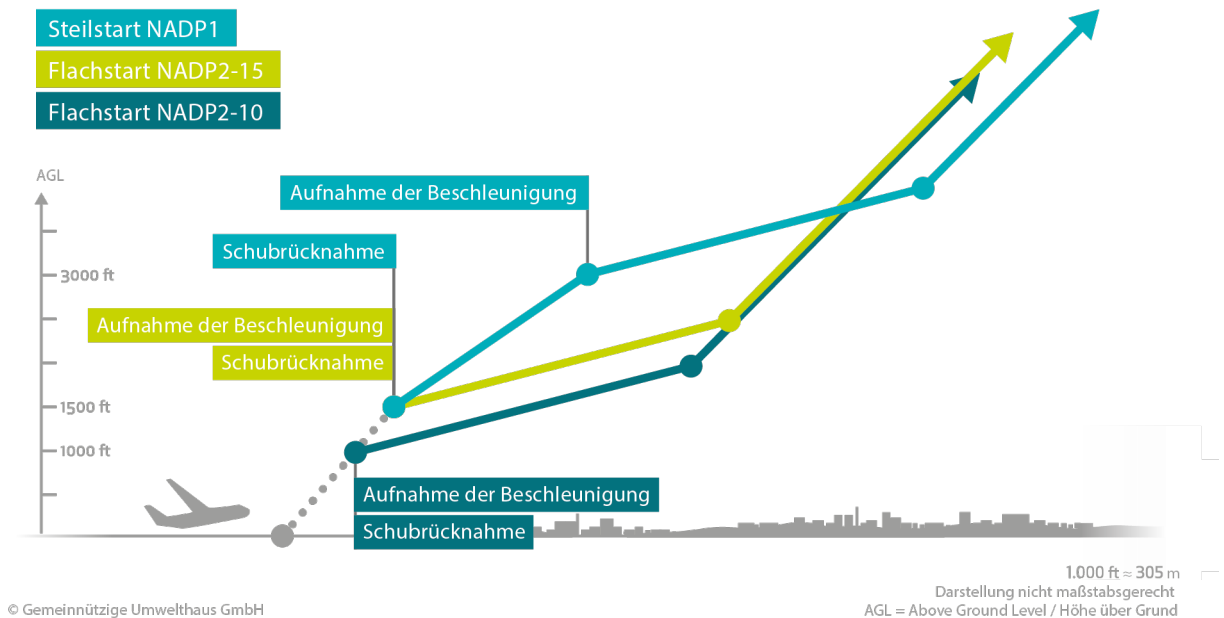
Alle Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich auf die drei genannten Startverfahren.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> ICAO Doc 8168, Vol. I (2018). Procedures for Air Navigation Services (PANS) – Aircraft Operations – Volume I Flight Procedures.

<sup>5</sup> Fast alle Berechnung wurde zweimal durchgeführt: einmal mit Startprofilen mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 220 kn, einmal ohne. Die Ergebnisse weisen dieselben Tendenzen auf, welches Startverfahren vorzugswürdig ist. Unabhängig davon, ob die Berechnungen mit oder ohne Geschwindigkeitsbegrenzung zugrunde gelegt werden, bleiben die Schlüsse somit gleich. Da am Standort Frankfurt Geschwindigkeitsbegrenzungen auf fast allen Abflugstrecken vorliegen, werden im Folgenden nur die Berechnungen mit einer solchen Begrenzung dargestellt.

Abbildung 1: Berücksichtigte Startverfahren



Konkret unterscheiden sich die verschiedenen Startverfahren im Bereich nach der Schubrücknahme (Cutback-Punkt) im Verlauf der Flughöhen und Geschwindigkeiten: Bei gleichem Cutback-Punkt (NADP<sub>1</sub> vs. NADP<sub>2-15</sub>) führt NADP<sub>2</sub> durch den Beginn des Beschleunigungssegments zu einer geringeren Flughöhe als NADP<sub>1</sub>, da die vorhandene Energie zunächst zum Geschwindigkeitsaufbau genutzt wird. Steiler startende Flugzeuge (NADP<sub>1</sub>) nutzen bei unveränderter Geschwindigkeit die ausgefahrenen Klappen hingegen länger, um weiter bis auf 3000ft zu steigen, wo sich dann das Beschleunigungssegment anschließt. Im Laufe des Beschleunigungssegments werden dann die Klappen eingefahren, wenn eine ausreichend hohe Geschwindigkeit erreicht ist. Dies geschieht beim NADP<sub>1</sub>-Verfahren zu einem späteren Zeitpunkt eines Abflugs als beim NADP<sub>2</sub>-Verfahren, wo die nötige Geschwindigkeit früher erreicht wird.

Flugzeuge, die das Flachstartverfahren nutzen bleiben somit im Flugsegment unmittelbar nach der Schubrücknahme niedriger, fliegen aber mit höherer Geschwindigkeit. Nach Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit – in Frankfurt meist die auf fast allen Routen existierende Geschwindigkeitsbegrenzung von 220 kn – wird bei allen Startverfahren die überschüssige Energie nur zum Steigen verwendet. Da Flugzeuge im NADP<sub>2</sub>-Verfahren früher eine bessere aerodynamische Konfiguration erreichen (Fahrwerk und Klappen eingefahren, somit geringerer Luftwiderstand), können sie, nach dem Geschwindigkeitsaufbau im Beschleunigungssegment, früher wieder steigen und so die Flughöhen der NADP<sub>1</sub>-Verfahren im weiteren Verlauf sogar übertreffen. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, gibt es einen „Schnittpunkt“ der Verfahren, ab dem der sog. „Flachstart“ dann größere Flughöhen aufweist als Steilstart.

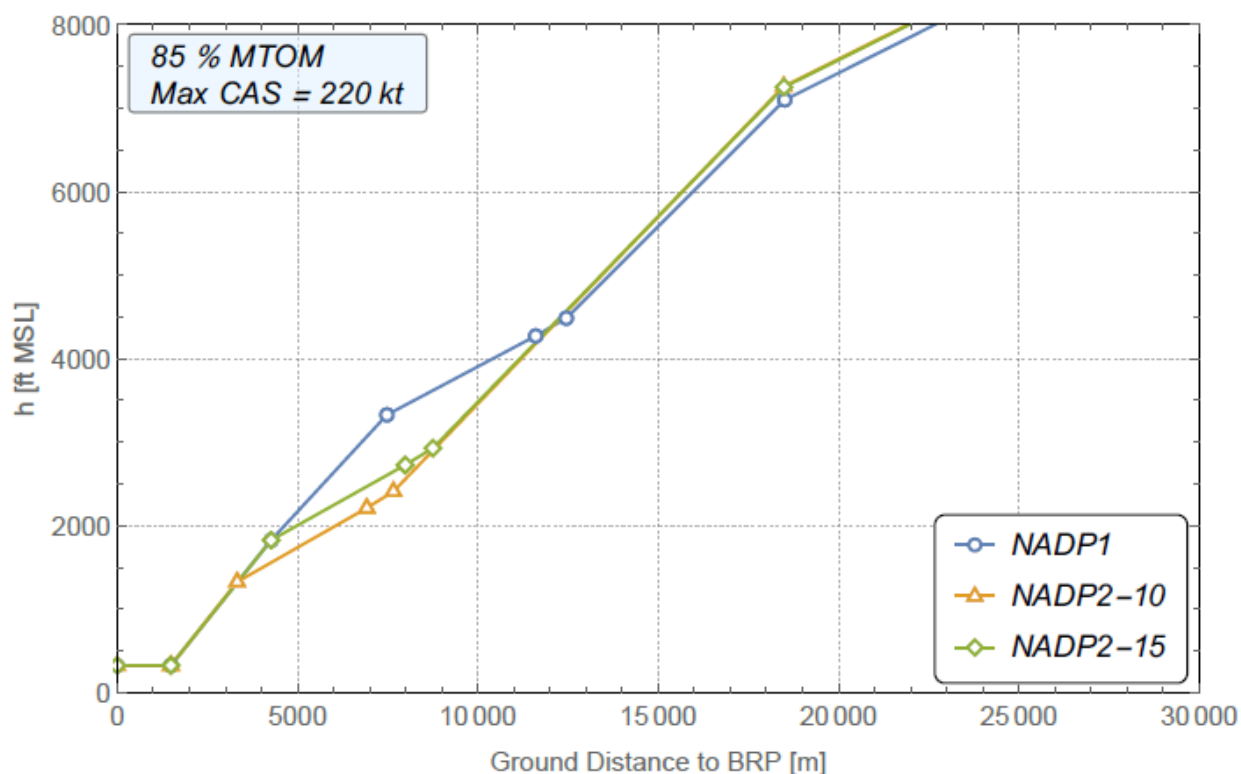
Wird zusätzlich der Punkt der Schubrücknahme verändert (z.B. NADP<sub>2-15</sub> vs. NADP<sub>2-10</sub>) ergeben sich daraus ebenfalls unmittelbar Veränderungen der Flughöhe: unabhängig vom Verfahren sind die Flughöhen umso niedriger, je früher die Schubrücknahme erfolgt.



In welcher Entfernung vom Flugplatz die verschiedenen Punkte genau erreicht werden ist abhängig vom einzelnen Flugzeug: Je nach Typ steigen Flugzeuge schneller oder langsamer und erreichen die 1.000 ft/ 1.500 ft/ 3.000 ft früher oder später bzw. in geringerer oder größerer Distanz zum Abhebeplatz. Aber auch für ein einzelnes Luftfahrzeugmuster ergeben sich je nach Flug Unterschiede, da Beladung, Temperatur, Wind etc. immer unterschiedlich sind. In der Realität, existiert somit nicht genau ein Schnittpunkt, wie in der Grafik oben impliziert. Stattdessen gibt es eher eine Art „Entfernungsfenster“ in dem die jeweiligen Änderungen stattfinden.

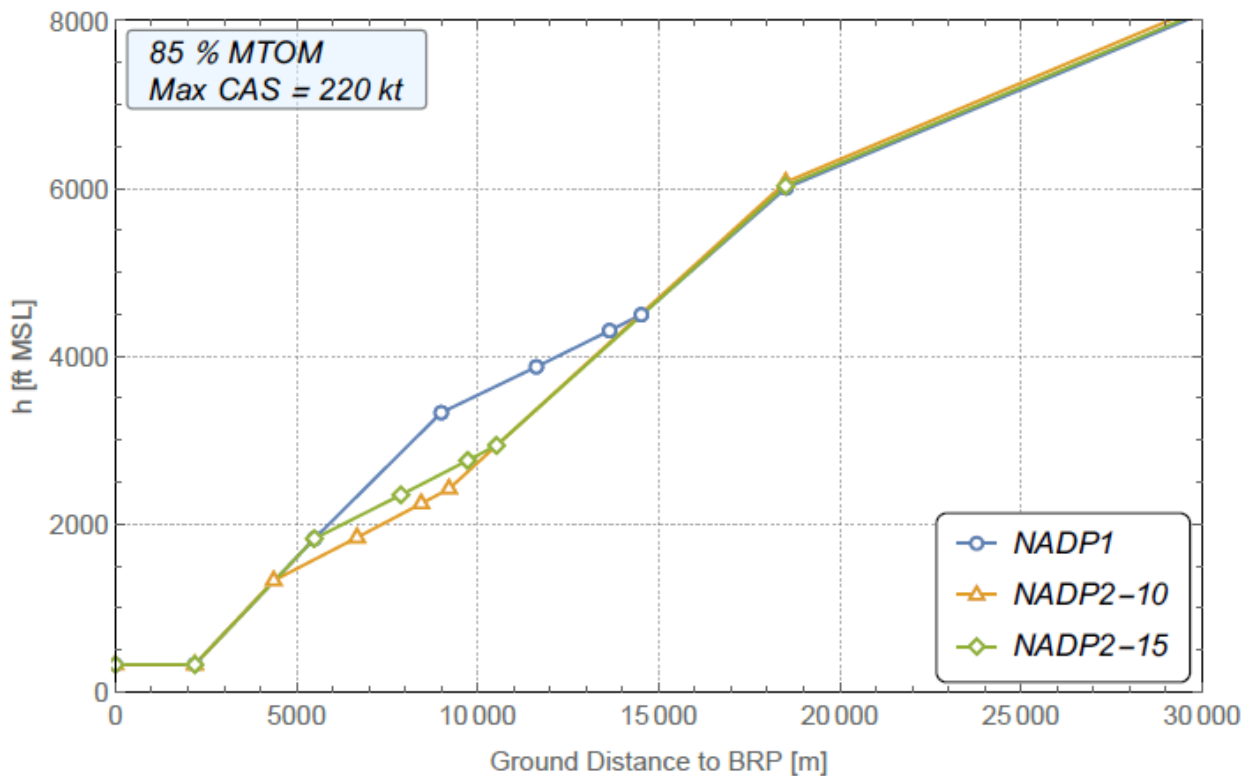
Um eine Einordnung zu erhalten, wie groß die Höhenunterscheide sind, sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 die Höhenverläufe für zwei Flugzeugmuster dargestellt. Auch dort ist erkennbar, dass NADP1 von ca. 4 Kilometer bis in 12-14 Kilometer Entfernung zunächst höhere Flugverläufe aufweist (bis zu etwa 500 ft). Ab 14 Kilometern Entfernung sind die Höhenunterschiede bereits wieder ausgeglichen. Danach kommt es dann zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Höhenvorteilen des Flachstarts. Die genauen Verläufe und Differenzen unterscheiden sich je nach Flugzeugmuster.

Abbildung 2: Höhenverläufe der Startverfahren A320-211 mit Geschwindigkeitsbegrenzung und niedrigem Startgewicht



Quelle: Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH (2020). Profildigramme\_Altiude\_2.0\_ct181219, Seite 3.

Abbildung 3: Höhenverläufe der Startverfahren B737-800 mit Geschwindigkeitsbegrenzung und niedrigem Startgewicht



Quelle: Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH (2020). Profildigramme\_Altiude\_2.o\_ct181219, Seite 1.

Auf die Darstellung der Geschwindigkeitsverläufe wird zur Vereinfachung verzichtet. In Bezug auf den Dauerschallpegel führen höhere Geschwindigkeiten zu geringeren Pegelwerten, da sich die Überflugzeit verringert.

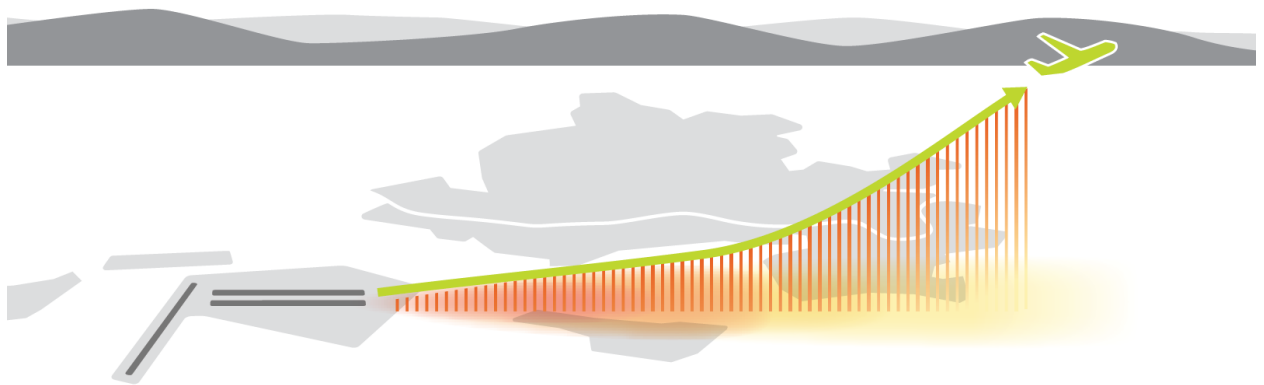
Entscheidend für die Lärmbelastung durch die unterschiedlichen Startverfahren ist neben der reinen Flughöhe sowie der Geschwindigkeit auch die Charakteristik der Schallausbreitung, da die konkreten Effekte ebenfalls höhenabhängig sind. Abbildung 4 zeigt zwei Flugzeuge in unterschiedlichen Flughöhen: der Steilstart, in der Phase mit der größeren Flughöhe nach der Schubrücknahme, links und der Flachstart, in der Phase mit geringeren Flughöhen nach der Schubrücknahme, rechts. In der Abbildung ist dargestellt wie sich, ausgehend von der Flughöhe, der Schall ausbreitet. Deutlich werden dabei zwei Aspekte, die für die Interpretation der folgenden Ergebnisse von entscheidender Bedeutung sind:

- Erstens führt eine geringere Flughöhe zu höheren Schallpegeln direkt unterhalb des Flugwegs. Ersichtlich wird das an den kräftigeren Rottönen bei NADP2.
- Zweitens ist ersichtlich, dass der Kegel, in dem sich der Schall insgesamt ausbreitet, bei niedrigerer Flughöhe (NADP2) wiederum schmaler ist. Das insgesamt betroffene Gebiet ist somit bei größerer Flughöhe größer, da seitlich mehr Gebiete noch mit relevanten Pegelwerten belastet werden – die Pegelwerte selbst sind dabei im Schnitt aber geringer, daher die weniger kräftigen Farben in einem größeren Gebiet bei NADP1.

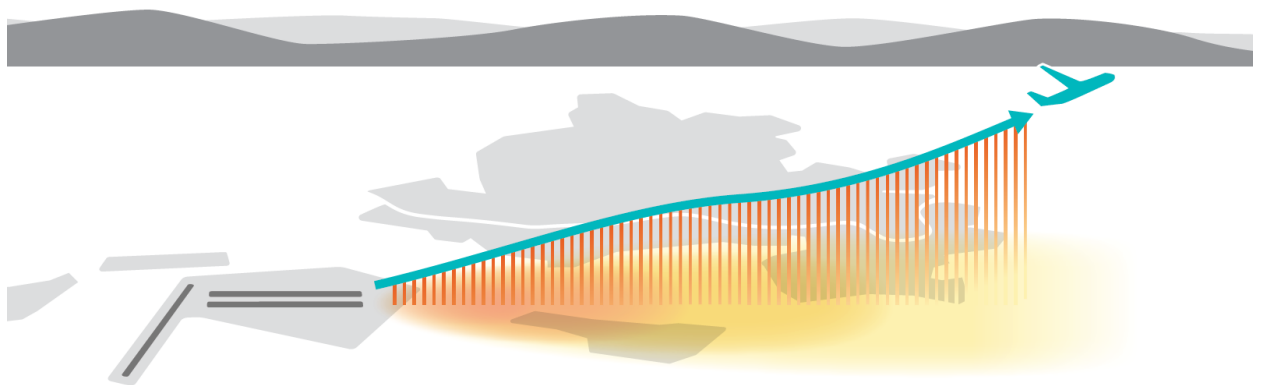
Welcher dieser beiden Aspekte von Vorteil ist, hängt wesentlich von der Siedlungsstruktur rund um einen Flughafenstandort ab: Je mehr Besiedlung sich direkt unterhalb des Flugpfads und in Nähe zum Startbahnende liegt, desto stärker überwiegen die Vorteile des Steilstartverfahrens; je mehr Besiedlung sich seitlich des Flugpfads und etwas weiter entfernt vom Startbahnende befindet, desto stärker überwiegen die Vorteile des Flachstartverfahrens. In den meisten Fällen wird ein Mix aus beidem (Besiedlung seitlich und unterhalb des Flugpfads) vorliegen. Die genaue Bewertung kann daher nur auf Basis einer Lärmberechnung im gesamten relevanten Gebiet unter Berücksichtigung der Besiedlung erfolgen.

Abbildung 4: Auswirkung der Flughöhe auf die Schallausbreitung

#### Flachstart NADP2-15



#### Steilstart NADP1



### 3.2 Berechnung der Lärmeffekte von Startverfahren auf Grundlage von Fixpunktprofilen mittels AzB

Die Bewertung der Lärmwirkung der verschiedenen Startverfahren sollte angelehnt an die Kriterien des FFR und somit angelehnt an den FFI 2.0<sup>6</sup> erfolgen. Demzufolge war von Anfang an eine Berechnung mittels „Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen“ (AzB) von 2008 vorgesehen<sup>7</sup>. Dass es sich bei dem Vorgehen um eine Berechnung handelt, und nicht die Auswertung von Messdaten, wurde auch bereits im Maßnahmenprogramm Aktiver Schallschutz so dargelegt. Berechnungen haben insbesondere den Vorteil, dass sich die Effekte der Startverfahren isoliert betrachten lassen – während im realen Betrieb immer auch weitere Einflussfaktoren (Wetter, Pilotenverhalten, Startgewicht etc.) Auswirkungen auf die gemessenen Werte haben. Am Beispiel des Effekts des Startgewichts ist auch zu sehen, wie groß dieser Einfluss anderer Faktoren tatsächlich sein kann: Die Berechnungen unter Berücksichtigung eines hohen im Vergleich mit einem niedrigen Startgewicht, zeigen einen deutlich größeren Einfluss der Masse als des genutzten Startverfahrens (siehe hierzu im Folgenden die Ergebnisse in Kapitel 4.2). Es kommt hinzu, dass für einen sinnvollen Messvergleich eine Vielzahl an Messpunkten benötigt würde, die in der Fläche um den Frankfurter Flughafen so nicht vorhanden ist. Eine Berechnung der Auswirkungen erscheint vor diesem Hintergrund die am besten geeignete Bewertung zu ermöglichen.

Die AzB selbst sieht, in ihrer aktuellen Fassung, allerdings keine Veränderung der Startverfahren vor, sondern geht für alle Flugzeugmuster von einem kontinuierlichen Steigflug aus. Eine einfache Unterscheidung von NADP<sub>1</sub> und NADP<sub>2</sub> ist durch die AzB insofern nicht möglich.

Um die Auswirkungen dennoch mittels AzB berechnen zu können, wurde ein Auftrag zur Erstellung von Fixpunktprofilen für die unterschiedlichen Startverfahren an die Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH vergeben. Auftrag gemäß Leistungsbeschreibung war es, „neue prozedurale Profile nach ECAC Doc.29<sup>8</sup>, einer europaweit vereinheitlichten Berechnungsmethode für Fluglärm, zu definieren. Aus diesen sind dann [...] entsprechende Fixpunktprofile für Geradeausflüge zu berechnen. Die so berechneten Profile sind dann in das in der AzB spezifizierte Format umzuwandeln. Dazu muss der im Doc.29 verwendete Parameter Triebwerksschub in den in der AzB verwendeten Zusatzpegel konvertiert werden. Das kann auf Basis der in der ANP vorliegenden Noise-Power-Distance (NPD) Daten geschehen.“ Die so generierten AzB-Profile wurden dem UNH zur Lärmberechnung übergeben und haben in den Berechnungen dann die entsprechenden originalen AzB-Startklassenprofile ersetzt.

Die weiteren Rahmenbedingungen für die Erstellung der Startprofile waren wie folgt vorgegeben:

---

<sup>6</sup> Hintergründe und Details zum FFI 2.0 finden sich hier: <https://www.umwelthaus.org/fluglaerm/basiswissen/was-ist-der-frankfurter-fluglaermindex-ffi-20/>

<sup>7</sup> Die AzB ist in Deutschland gemäß FluLärmG zur Berechnung von Lärmschutzbereichen zu nutzen. Bei der Entwicklung des FFI 2.0 hat das FFR versucht, wesentliche Grundlagen der gesetzlichen Regelungen zu übernehmen, um keine zu großen Abweichungen in den Berechnungen zu generieren. Details sind hier zu finden: <https://www.umwelthaus.org/fluglaerm/basiswissen/was-ist-der-frankfurter-fluglaermindex-ffi-20/>

<sup>8</sup> European Civil Aviation Conference (2016). *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports*. Neuilly-sur-Seine Cédex.

- Startbahnlänge 4000 m, kein Bahngradient,
- Abflug auf einer Strecke ohne Kurven,
- kein Wind,
- Start mit reduziertem Startschub (eine charakteristische reduzierte Schubsetzung soll [in Abstimmung zwischen Facharbeitsgruppe des Auftraggebers und Auftragnehmer] für jede Kombination aus Flugzeugtyp und Startgewicht zugeordnet werden),
- Schubrücknahme auf maximalen Steigschub,
- bei Beschleunigungssegmenten wird 50% der max. verfügbaren Beschleunigung angesetzt,
- Erstellung von Profilen mit und ohne Geschwindigkeitsbegrenzung von 220kn innerhalb der ersten 10 Nautischen-Meilen,
- es sind zwei Auslastungen pro Luftfahrzeugtyp zu untersuchen.

Um den Einfluss einiger der o.g. Parameter dennoch beurteilen zu können (z.B. Kurvenflug, zusätzliche Höhengvorgaben auf der Abflugroute etc.) wurden zusätzlich Sensitivitätsanalysen beauftragt.<sup>9</sup>

Um den Aufwand aufgrund der Vielzahl an Kombinationen (drei Startverfahren, zwei Auslastungen pro Typ, mit und ohne Geschwindigkeitsbegrenzung) zu begrenzen, wurden sechs Luftfahrzeugtypen ausgewählt, für die entsprechende Startprofile erstellt werden sollten. Die Auswahl erfolgte so, dass mit möglichst wenigen Typen ein möglichst großer Anteil der Lärmimmissionen am Standort Frankfurt abgebildet werden kann. Die Auswahl des genauen Subtyps einer Flugzeugklasse (z.B. A320-211 für die A320-Familie) erfolgte insbesondere danach, für welche genauen Typen zum damaligen Zeitpunkt Informationen in der ANP-Datenbank<sup>10</sup> (Aircraft Noise and Performance) vorlagen, da diese Daten notwendige Voraussetzung für die Erstellung der Startprofile sind. Die so ausgewählten Luftfahrzeugtypen waren:

- A320-211 (ANP-ID A320-211), 95%/85% MTOM
- A380-841 (ANP-ID A380-841), 100/75% MTOM
- B737-800 (ANP-ID 737800), 95%/85% MTOM
- B747-400 (ANP-ID 747400), 100/75% MTOM
- B747-8 (ANP-ID 7478), 100/75% MTOM
- B777-300ER (ANP-ID 7773ER), 100/75% MTOM

Neben den o.g. Rahmenbedingungen und den Eingangsdaten aus der ANP-Datenbank waren z.T. weitere Informationen durch die beteiligten Expertinnen und Experten zu identifizieren bzw. festzulegen – entweder, weil diese in den ANP-Daten nicht vorlagen oder die Datensätze unvollständig waren. Zu den notwendigen Eingangsparametern gehörten neben den Typen und der Abflugmassen z.B. auch die

---

<sup>9</sup> Gesellschaft für Luftverkehrsforschung (2022). Untersuchung des Startverfahrens am Flughafen Frankfurt. Seiten 52 ff.

<sup>10</sup> <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/policy-support-and-research/aircraft-noise-and-performance-anp-data/anp-legacy-data>.

Abfluggeschwindigkeiten („Takeoff Safety Speed  $V_2$ “) und die Klappenstellung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und Abflugmasse („Flap Schedule“). Die weiteren Details sind im Bericht von GfL nachzulesen.<sup>11</sup>

Sämtliche Startprofile für die ausgewählten Flugzeugmuster wurden in zwei Varianten erstellt: einmal mit Geschwindigkeitsbegrenzung von 220 Knoten und einmal ohne Geschwindigkeitsbegrenzung. Hintergrund ist, dass auf fast allen Abflugrouten am Standort Frankfurt Geschwindigkeitsbegrenzungen gelten. Die Flugsicherung nutzt diese Begrenzungen zur besseren operativen Abwicklung des Verkehrsflusses und zur Sicherstellung der zeitlichen Staffelung.

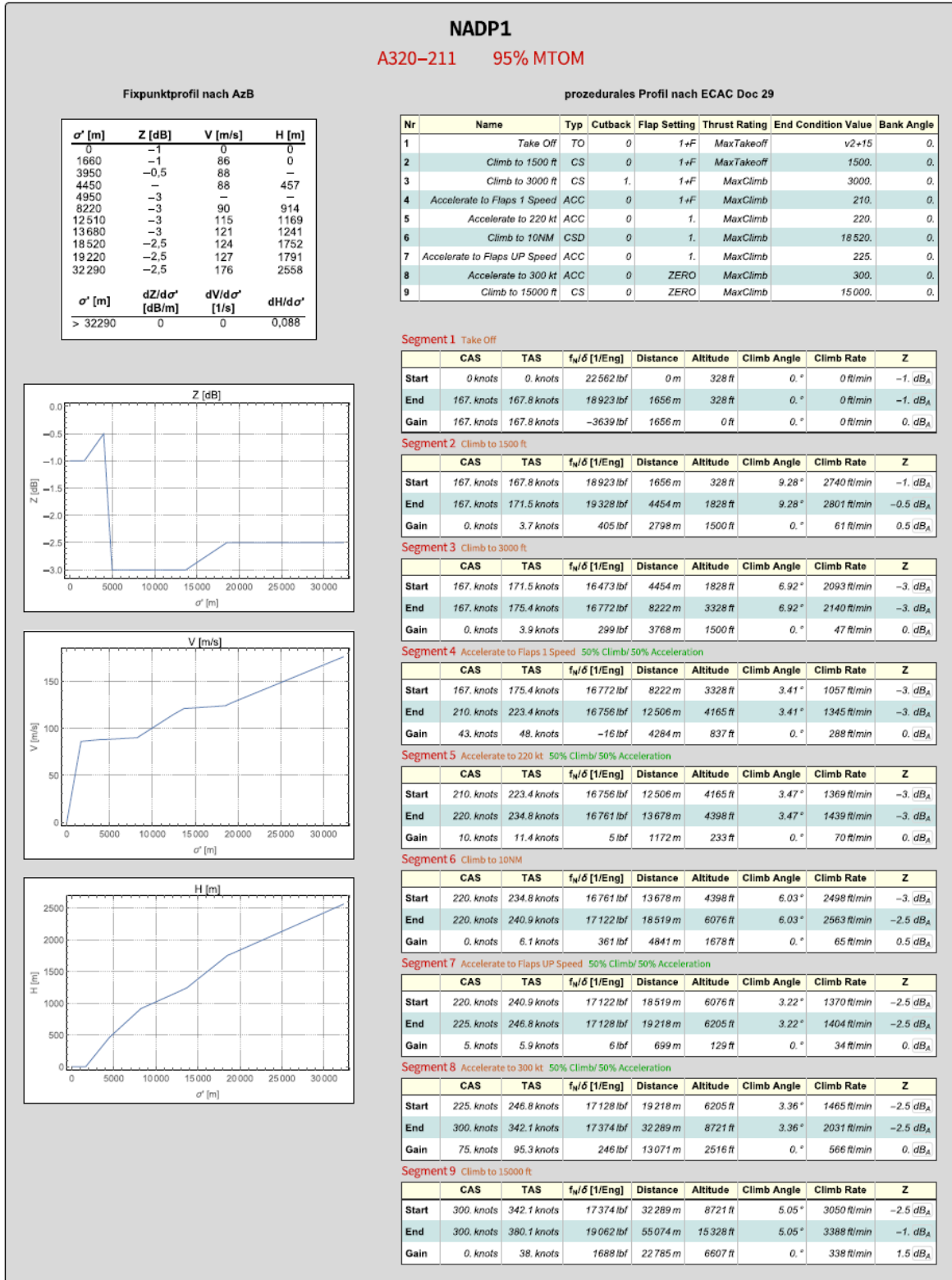
Insgesamt waren so 72 Fixpunktprofile zu erstellen, die dem FFR für die weiteren Berechnungen übergeben wurden. Nachfolgend ist in Abbildung 5 detailliert ein beispielhaftes prozedurales Profil nach ECAC Doc. 029 der A320-211 mit hoher Auslastung und Geschwindigkeitsbegrenzung für das NADP<sub>1</sub>-Verfahren sowie die daraus abgeleiteten Fixpunktprofile nach AzB dargestellt. Ausgehend von der Beschreibung einzelner Flugsegmente, stellen die Startprofile den Höhen-, Geschwindigkeits- und Zusatzpegelverlauf dar. Diese drei Faktoren sind entscheidend für die Lärmimmissionen am Boden.

Mit der geringeren Schallemission durch den geringeren Schub beim NADP<sub>2-10</sub>-Verfahren einerseits, geht im Vergleich zum NADP<sub>1</sub>-Verfahren andererseits eine niedrigere Flughöhe und höhere Fluggeschwindigkeit einher. Der Unterschied der Flughöhen zwischen den beiden Verfahren nimmt bis etwa 8 km vom Startanrollpunkt entfernt zu und anschließend wieder ab. Nach 14 km Flugstrecke unterscheiden sich die Flughöhen im hier gezeigten Beispiel schon nicht mehr. Unmittelbar unterhalb des Flugpfades bewirkt das NADP<sub>1</sub>-Verfahren dadurch bis zu einer Entfernung von 14 km trotz der höheren Schallemission eine geringere Lärmbelastung: Hier ist die Dämpfung des Schalls infolge des größeren Abstands zwischen Flugzeug und Immissionsort beim NADP<sub>1</sub>-Verfahren größer als die höhere Schallemission. Mit zunehmender seitlicher Entfernung zum Flugpfad verliert der Höhenunterschied an Bedeutung, weil der Abstand zwischen Flugzeug und Immissionsort maßgeblich durch den horizontalen Abstand bestimmt wird. Zudem ist seitlich des Flugpfades die Bodendämpfung beim NADP<sub>2-10</sub>-Verfahren größer. Die Effekte der Schalldämpfung auf dem Ausbreitungsweg und die unterschiedliche Schallemission der beiden Verfahren haben zur Folge, dass die Lärmkonturen seitlich des Flugpfades beim NADP<sub>2</sub>-Verfahren im Allgemeinen schmäler sind als beim NADP<sub>1</sub>-Verfahren (siehe Abbildung 6).

---

<sup>11</sup> Gesellschaft für Luftverkehrsforschung (2022). Untersuchung des Startverfahrens am Flughafen Frankfurt. Seiten 33 ff.

Abbildung 5: Beispielhaftes Startprofil



Quelle: Gesellschaft für Luftverkehrsforschung (2020). Profile\_max22okt\_2.1\_ct220120, Seite 25.

### 3.3 Berechnungsmethoden

Um die möglichen Lärmwirkungen der verschiedenen Startverfahren bestmöglich einschätzen zu können, und Limitierungen einzelner Berechnungsarten zu begegnen (siehe hierzu die weiteren Ausführungen und auch Kapitel 3.4), wurden insgesamt vier unterschiedliche Berechnungsmethoden angewandt. Alle vier werden im Folgenden kurz beschrieben, eine Übersicht findet sich in Tabelle 2. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Kapitel 4 dargelegt.

## Auswertung von Einzelflugkonturen (Footprints)

Die durch GfL erstellten Startprofile (siehe Kapitel 3.2) wurden zunächst genutzt, um sog. „Footprints“ zu berechnen – also Konturen mit Isolinien für verschiedene SEL-<sup>12</sup> und LAmax-<sup>13</sup>Pegelwerte für einen einzelnen geraden Abflug je Flugzeugmuster, Startverfahren etc. und ohne zugrunde gelegte Topografie. In den SEL-Wert eines Schallereignisses fließen sowohl der Pegelverlauf als auch die Dauer des Schallereignisses ein, so dass für eine umfassende Bewertung verschiedener Startverfahren, die sich in den Geschwindigkeits- und Steigprofilen unterscheiden, der SEL heranzuziehen ist. SEL-Pegel bilden die Basis zur Ermittlung eines Dauerschallpegels. LAmax-, also Maximalpegel erfassen nur den Zeitpunkt des höchsten Pegels am Immissionsort. Die unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten, die sich durch die verschiedenen Abläufe von Beschleunigungs- und Steigphase beim NADP<sub>1</sub>- und NADP<sub>2</sub>-Verfahren ergeben, bleiben bei dieser Kenngröße unberücksichtigt.

Die Auswertung der SEL- und LAmax-Pegel sollte in einem ersten Schritt Auskunft darüber geben, wie stark sich zwei Startverfahren für ein Flugzeugmuster unter gleichen Voraussetzungen in den Lärmwerten überhaupt voneinander unterscheiden. Insgesamt wurden auf diese Art und Weise 144 Footprints berechnet. Zwei beispielhafte Footprints, für NADP<sub>1</sub> und NADP<sub>2-15</sub> des A320-211, sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Pegelbänder sind in 5 dB-Schritten ab 50 dB(A) aufwärts abgebildet; die grünen Punkte entsprechen jeweils fünf Kilometer Entfernung. Entsprechende Footprints existieren für alle Kombinationen aus Luftfahrzeugmuster, Auslastung, Startverfahren, mit/ ohne Geschwindigkeitsbegrenzung auf 220 kn für SEL- und LAmax-Pegel.

Die berechneten Footprints eines generischen Geradeausflugs (also ohne Topografie) wurden dann hinsichtlich ihrer maximalen Konturausdehnung, bezogen auf den Bahnbezugspunkt in der Mitte der Bahn, sowie deren Flächeninhalten ausgewertet. Die Betrachtungen stellen auf die Fixpunktprofile mit hoher Auslastung und Geschwindigkeitsbegrenzung ab. Bei hoher Auslastung sind die Bereiche, in denen sich die Startverfahren unterscheiden, größer als bei niedriger Auslastung. Qualitativ ergeben sich bei geringer Auslastung jedoch die gleichen Effekte wie mit hoher Auslastung.

Limitierungen des Vorgehens:

- Keine Berücksichtigung der Topografie, aufgrund der generischen Betrachtung.
- Betrachtung nur von sechs Flugzeugmustern.

---

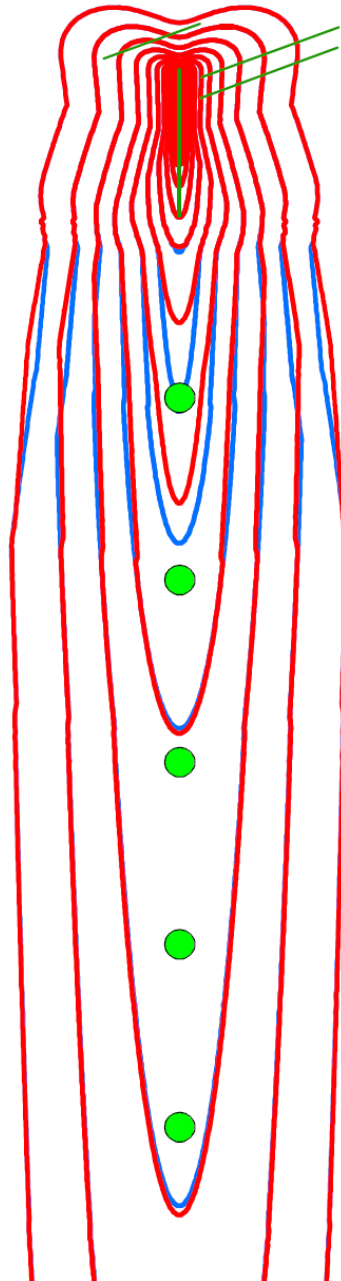
<sup>12</sup> Expositionspegel  $L_{p,A,E}$

<sup>13</sup> AS-bewertete maximale Schalldruckpegel  $L_{p,AS,max}$



- Betrachtet werden jeweils nur Einzelabflüge – Gesamteffekte im Sinne eines Szenarios können sich durch die Summierung der Effekte unterscheiden.

Abbildung 6: L<sub>Amax</sub>-Footprint des A<sub>320-211</sub> NADP<sub>1</sub> (rot) vs. NADP<sub>2-15</sub> (blau) – 95% MTOM, 220 kn



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (2020). 2020-03-10\_KG-Startverfahren\_Footprints-Lmax.

## Szenariobetrachtung 2019: Nur die sechs Luftfahrzeugmuster mit veränderten Startprofilen

Neben der Berechnung von Footprints für einzelne Abflüge je Startprofil und deren Vergleich untereinander, wurden Szenario-Berechnungen durchgeführt, um zu prüfen, ob die Ergebnisse auch in einer Betrachtung vieler An- und Abflüge zugleich ähnlich ausfallen. Ziel der Szenario-Berechnungen war es, die Lärmwirkungen im Falle einer ausschließlichen Nutzung eines der drei Startverfahren miteinander zu vergleichen.

Berechnet wurden für dieses Szenario, in welchem Gebiet um den Flughafen sich ein Dauerschallpegel von  $\geq 48$  dB(A) am Tag bzw.  $\geq 43$  dB(A) in der Nacht ergibt, da dies die größten auch im FFI 2.0 betrachteten Gebietsabgrenzungen sind. Unterhalb dieser Pegelwerte ist eine Auswertung für den Standort Frankfurt nicht mehr sinnvoll möglich. Diese Gebiete wurden hinsichtlich ihres Flächeninhalts sowie den darin lebenden Personen (georeferenzierte Bevölkerungsdaten für das Jahr 2019) ausgewertet.

Zusätzlich zu diesen Auswertungen wurden die Gebietskonturen für weitere Pegelbereiche (am Tag etwa  $\geq 50$  dB(A),  $\geq 55$  dB(A),  $\geq 60$  dB(A)) als Karten dargestellt und die Veränderung der Konturflächen in 5 dB-Schritten prozentual ausgewertet, um zu prüfen, ob sich in einzelnen Pegelbereichen andere Erkenntnisse ergeben.

Grundlage für diese Berechnung war das Datenerfassungssystem (DES) – also die Bewegungszahl, die Bahnbelegung und der Flottenmix – von 2019. Dann wurden alle Flugbewegungen, für die keine veränderten Startprofile durch GfL vorlagen, aus dem DES entfernt. Berechnet wurden die Lärmimmissionen also nur mit den Flugbewegungen der sechs o.g. Luftfahrzeugtypen in den sechs verkehrsreichsten Monaten von 2019 unter Anwendung jeweils eines der drei Startverfahren. Da die so erzeugten Gebiete sich in ihrer Größe deutlich von den üblichen Berechnungen unterscheiden, wurden in diesem Fall lediglich Flächeninhalte und Personenzahlen auf Basis der Dauerschallpegel ausgewertet. Limitierungen des Vorgehens:

- Berechnet wurden lediglich die Bewegungen von sechs Flugzeugmustern in den sechs verkehrsreichsten Monaten des Jahres 2019. Diese stellen gemeinsam zwar den überwiegenden Anteil an den Lärmimmissionen dar, dennoch sind die so berechneten Gebiete zwangsläufig kleiner als Berechnungen mit den übrigen Flugzeugmustern. Dies gilt es bei der Interpretation zu berücksichtigen.
- Insbesondere die Personenzahlen sind unter Vorbehalt zu betrachten, da eine kleinere Gebietsgröße folglich auch zu geringeren Betroffenzahlen führen kann.
- Hinsichtlich der ausgewerteten Flächeninhalte gilt grundsätzlich auch, dass diese kleiner sind als bei einer Gesamtberechnung aller Muster. Andererseits sind hier geringere Veränderungen zu erwarten, da die grundsätzliche Charakteristik – welches Verfahren zu kleineren Flächeninhalten führt – sich auch bei insgesamt größeren Konturen nicht ändern dürfte.
- Dargestellt sind auch Absolutwerte. Diese unterliegen den in Kapitel 3.4 genannten Vorbehalten. Deshalb sind die Differenzbetrachtungen an erster Stelle dargestellt. Die weiteren Ergebnisse als Grundlage der Differenzbetrachtung, folgen im Anschluss. Eine Vermischung der GfL-Startprofile mit AzB-Profilen erfolgte wiederum nicht, da alle Flugzeugmuster ohne neu generierte Startprofile aus der Berechnung entfernt wurden.

## Szenariobetrachtung 2019: Differenzansatz für ein Gesamtverkehrsszenario

Die Szenarioberechnungen im vorherigen Ansatz bilden, wie beschrieben, lediglich sechs Flugzeugmuster für die sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2019 ab. Dies führt unweigerlich zu kleineren Konturen, da mehr Flugbewegungen auch zu einer Lärmzunahme führen. Da sich mit der Konturgröße auch die betroffenen Besiedlungsgebiete verschieben oder erweitern können, sollte zusätzlich überprüft werden, ob die Ergebnisse auch bei Betrachtung eines Gesamtverkehrsszenarios 2019 stabil bleiben – was zu erwarten ist, wenn sich die grundlegende Charakteristik der Unterschiede zwischen den Verfahren nicht verändert (dass der Flächeninhalt der Flachstart-Konturen insgesamt geringer ist als der Flächeninhalt der Steilstart-Konturen).

Aus diesem Grund wurden zusätzliche Berechnungen durchgeführt, bei denen lediglich der Unterschied zwischen den Startverfahren (also die Differenz) mit den GfL-Profilen berechnet, und dann auf eine herkömmliche AzB-Berechnung für 2019 addiert wurde. Somit bildet eine unveränderte AzB-Berechnung die Basis der Ergebnisse, die dann realistische Gebietsgrößen auf Basis des Gesamtverkehrs ergibt. Zusätzlich hat dies den Vorteil, dass die Gebiete selbst ohne zusätzliche Eingriffe und Annahmen aus den erstellten Profilen errechnet wurden, und etwaige Fehler daraus sich somit auch nicht auf die Ergebnisse auswirken. Lediglich der Unterschied zwischen den Startverfahren, also das errechnete Delta, wurde mit Hilfe der GfL-Profile erzeugt und mit den Ergebnissen innerhalb der Gebiete für 2019 verrechnet.

Im Folgenden die einzelnen Rechenschritte dieser Berechnung zum besseren Verständnis noch einmal im Überblick:

- Zunächst erfolgen zusätzliche Lärmberechnungen für Tag und Nacht auf Basis der Daten von 2019 (Anzahl der Bewegungen aus den 6vM des Jahres 2019), also ohne Änderungen der nominellen AzB-Daten. Die Berechnungen umfassen, wie schon zuvor, die Betrachtungsgebiete mit  $Leq,Tag \geq 48$  dB(A) und  $Leq,Nacht \geq 43$  dB(A). Diese Berechnung dient als Ausgangsbasis und stellt sicher, dass 100% der Verkehrsmenge und Lärmbelastung berücksichtigt sind.
- Die entwickelten Fixpunktprofile von GfL für die sechs zu untersuchenden Muster werden in einem zweiten Schritt genutzt, um das Delta der Startverfahren zu berechnen. Eines der drei Startverfahren ist als Referenz festzulegen. Die Wahl fiel auf das NADP2-15-Verfahren, da dies bis in die 2010er Jahre das Standard-Abflugverfahren in Frankfurt war. Innerhalb des Betrachtungsgebiets werden die Deltas aus den Szenarios (NADP1 – NADP2-15) sowie (NADP2-10 – NADP2-15) ermittelt. Diese Deltas weisen die Gebiete aus, in denen das NADP1- bzw. NADP2-10-Verfahren gegenüber der Referenz Vor- oder Nachteile bietet.
- Die so berechneten Deltas zwischen den Startverfahren werden in einem letzten Schritt jeweils zu der Referenz (Ist-2019-Szenario) addiert bzw. subtrahiert. So entstehen zwei Ergebnisse, welche die Auswirkungen der Anwendung des NADP1- bzw. NADP2-10-Verfahrens abbilden.
- Die Ergebnisse wurden in Form von Delta-Karten dargestellt. Positive Differenzwerte in einem Gebiet bedeuten, dass das betrachtete Startverfahren lauter ist als die Referenz. In Gebieten mit negativen Deltawerten ist das betrachtete Startverfahren leiser.

- Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf Dauerschallpegel, da für jeden Immissionsort im Betrachtungsgebiet mit dem Dauerschallpegel durch einen eindeutigen Zahlenwert angegeben sind, mit denen eine Differenz gebildet werden kann. Letztlich ließen sich Ergebnisse, die auf den Maximalpegel abstellen würden, nicht darstellen. An jedem Punkt des Betrachtungsgebiets ergibt sich eine Verteilung von Maximalpegeln, welche die unterschiedlichen Flugzeugmuster erzeugen. Grundsätzlich ist es möglich zwei Maximalpegelverteilungen voneinander abzuziehen. Das Ergebnis wäre jedoch immer noch eine Verteilung, die sich in flächendeckenden Karten nicht abbilden lassen.

Limitierungen des Vorgehens:

- Die Differenz zwischen den Startverfahren wurde berechnet auf Basis von sechs Flugzeugmustern, welche dann auf ein Gesamtverkehrsszenario aller Flugzeugmuster angewandt wurde. Da die genauen Auswirkungen der Startverfahren auf die anderen Flugzeugmuster nicht bekannt sind (es liegen keine entsprechenden angepassten Startprofile vor), ist unklar, ob die Differenz bei Betrachtung aller Muster exakt dieselbe wäre. Die hier beschriebene Differenzmethode stellt eine Annäherung an ein Gesamtverkehrsszenario für alle Flugzeugmuster dar.

## Szenariobetrachtung 2019: Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Flugzeugmuster

Der zuvor dargestellte Differenzansatz nutzt, um realistische Gebietsgrößen zu betrachten, eine unveränderte AzB-Berechnung für die sechs verkehrsreichsten Monate von 2019 als Basis. Tatsächlich sind bei Veränderung der Startverfahren aber auch Auswirkungen auf die Gebietsgrößen und den Konturverlauf zu erwarten. Um auch diesen Aspekt mit einer zusätzlichen Berechnung abzusichern, wurden in einem weiteren Schritt Berechnungen angelehnt an den FFI 2.0 durchgeführt, indem die Startprofile der sechs o.g. Luftfahrzeugtypen auf entsprechende Flugzeuggruppen im DES von 2019 angewandt wurden. Die Anzahl der Flugbewegungen entspricht somit zu 100% der des DES von 2019. Die Startprofile für andere Flugzeugmuster wurden mit den durch GfL erzeugten Profilen entsprechend folgendem Schema ersetzt:

- Die GfL-Profile für die Muster A388, B744 und B748 wurden mit den jeweils zwei Auslastungsstufen von 75% bzw. 100% exakt auf die jeweilige Anzahl und AzD-Einteilung (a) und (b) angewandt;
- Die Muster A320 und B737 wurden jeweils mit einer Auslastung von 95% auf die entsprechende Anzahl der A320-Familie sowie der B737 gelegt;
- Die restlichen Bewegungen der AzB Flugzeuggruppe (FZG) 5.2 wurden anteilmäßig mit dem GfL-Profil der A320 bzw. B737 berücksichtigt;
- Das GfL-Profil der B777 wurde mit 100% Auslastung vollständig auf die FZG S6.1 angewandt.
- Die restlichen Bewegungen verbleiben in den entsprechenden AzB-Startklassen. Das entspricht in Summe etwa 16% der Bewegungen (Tag und Nacht in etwa gleich).

Es ist offensichtlich, dass auch diese Berechnungen keinem vollkommen realistischen Szenario folgen: Hierfür müssten für sämtliche Flugzeugmuster individuell angepasste Startprofile für alle Startverfahren vorliegen. Da dies aber nicht leistbar war, wurde – im Sinne einer zusätzlichen Überprüfung der Ergebnisse – mit der Übertragung der Profile auf andere Muster gearbeitet, um so die möglichen Auswirkungen auf die Gebietsgrößen abschätzen zu können.<sup>14</sup> Auch bei Berücksichtigung weiterer Flugzeugmuster ist kein grundlegend anderes Ergebnis zu erwarten.

Berechnet wurden auf diese Art und Weise alle im FFI 2.0 akustisch abgegrenzten Gebiete für den Tag und die Nacht.<sup>15</sup> Ausgewertet wurden dann die in den jeweiligen Gebieten lebenden Personenzahlen, sowie die Lärmwirkung (Hochbelästigte/ Highly Annoyed (HA) am Tag; Aufwachreaktionen (AWR) in der Nacht) und Indexpunkte. Um die Lärmwirkung zu ermitteln, werden die ausgewerteten Personenzahlen mit Dosis-Wirkungs-Beziehungen aus der Lärmwirkungsforschung verschnitten. Diese treffen eine Aussage darüber, bei welchen Pegelwerten, mit welcher Lärmwirkung zu rechnen ist. Für den Tag betrifft diese Aussage den prozentualen Anteil sog. „hochbelästigter“ Personen bei einem bestimmten Schallpegel. Grundlage für diese Bewertung sind die Dauerschallpegel am Tag (LAeq, Tag). Für die Nacht betrifft diese Aussage die sog., durch Fluglärm zusätzlich verursachten, Aufwachreaktionen. Grundlage für diese Bewertung sind die Maximalpegel in der Nacht (LAm<sub>ax</sub>, Nacht). Die Indexpunkte sind eine reine Umrechnung der Hochbelästigten bzw. der Aufwachreaktionen mit einem vorgegebenen Faktor, um die Ergebnisse praktisch handhabbar zu machen. Die Umrechnungsfaktoren sind jeweils angegeben. Dargestellt im Bericht sind ausschließlich die Indexpunkte.

Auch hier erfolgt die Darstellung der Differenzergebnisse vor den Absolutwerten (welche die Basis der Differenzauswertungen bilden), da diese als valider betrachtet werden.

Limitierungen des Vorgehens:

- Für die Berechnung wurden die vorhandenen Startprofile der sechs Muster auf fast alle im DES 2019 enthaltenen Flugzeugmuster übertragen. Die Übertragung der Startprofile spezifischer Muster auf andere, verursacht einen unbekanntem Fehler – weshalb auch Berechnungen ohne diese Übertragung durchgeführt wurden (siehe oben).
- Es werden AzB- und ECAC-Profil in einer Berechnung vermischt.
- Die dargestellten Auswertungen zeigen sowohl Differenzergebnisse als auch Absolutwerte. Hier gelten die in Kapitel 3.4 beschriebenen Einschränkungen.
- Obwohl die Ergebnisse, angelehnt an den FFI 2.0, z.T. in Indexpunkten und Aufwachreaktionen dargestellt sind, dürfen die Ergebnisse nicht mit anderen Indexberechnungen gemäß FFI 2.0 verglichen werden: Die Berechnungsdetails weichen stark von den üblichen Indexberechnungen ab und führen deshalb auch zu anderen Gebietskonturen. Beispiele für solche Abweichungen sind etwa: die Übertragung von

---

<sup>14</sup> Ähnliches tut im Übrigen auch die AzB in ihrer aktuellen Fassung selbst: wie bereits oben beschrieben, arbeitet die AzB mit Standardprofilen je Flugzeuggruppe. Auch in der AzB existiert somit nicht für jedes Muster ein eigenes Profil.

<sup>15</sup> Tag: LAeq >= 48 dB(A), >= 50 dB(A), >= 55 dB(A), >= 60 dB(A); Nacht: LAeq >= 43 dB(A), >= 45 dB(A) sowie LAeq >= 50 dB(A) & NAT 6x68 dB(A)

Startprofilen auf andere Flugzeugmuster (z.B. wurde die Flugzuggruppe S6.1 mit dem Startprofil der B777-300 ER berechnet); die Nutzung von Startprofilen mit hohem Startgewicht, wenn keine Informationen über die Auslastungseinteilung nach AzD im DES vorhanden sind; keine Abschläge nach der Lärmobergrenze; kein Abzug von passivem Schallschutz in der Nacht).

Es ist ersichtlich, dass eine Vielzahl limitierender Faktoren bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Die Kombination der verschiedenen Auswertungen wurde gewählt, um den jeweils spezifischen Limitierungen der anderen Methoden entgegenzuwirken. Wenn die Ergebnisse über alle Auswertungen hinweg eine einheitliche Tendenz aufweisen, ist trotz der oben beschriebenen Unsicherheiten somit von einem validen Ergebnis auszugehen. Zusätzlich sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass vergleichbare Untersuchungen zur Auswirkung von Startverfahren an anderen Luftfahrtstandorten zum Teil mit deutlich größeren Vereinfachungen einher gehen.

*Tabelle 2: Überblick über genutzte Berechnungsmethoden*

|                                   | <i>Deskriptive Auswertung von Footprints</i>               | <i>Szenario 2019: Nur 6 Flugzeugmuster</i>   | <i>Szenario 2019: Differenzansatz</i> | <i>Szenario 2019: Umlegen der Profile</i>   |
|-----------------------------------|--|--|---------------------------------------|---|
| <i>Betrachtete Startverfahren</i> | NADP1, NADP2-10, NADP2-15                                  |  |                                       |   |
| <i>Betrachtete Flugzeugmuster</i> | A320-211, A380-841, B737-800, B747-400, B747-8, B777-300ER |  |                                       |   |
| <i>Datengrundlage</i>             | Individuelle Startprofile                                  | DES 2019                                     | DES 2019                              | DES 2019  |
| <i>Berechnete Pegel</i>           | SEL- & LAmax-Pegel   | Dauerschallpegel nach AzB                    | Dauerschallpegel differenz nach AzB   | Dauerschall- & Maximalpegel nach AzB  |
| <i>Verkehrsmenge</i>              | Einzelner Abflug   | Alle Bewegungen der 6 Muster in den 6vM 2019 | 100% 6vM 2019                         | 100% 6vM 2019   |
| <i>Startgewicht</i>               | Hoch & niedrig   | Hoch & niedrig                               | Hohe Auslastung                       | Mix (hohe Auslastung, wenn Muster nach AzD nicht in a) bzw. b) unterschieden werden (A320, B737, B777)) |
| <i>Geschwindigkeitsbegrenzung</i> | 220 kn & ohne  | 220 kn & ohne                                | 220 kn                                | 220 kn  |

|                                   | <i>Deskriptive Auswertung von Footprints</i>  | <i>Szenario 2019: Nur 6 Flugzeugmuster</i>   | <i>Szenario 2019: Differenzansatz</i>   | <i>Szenario 2019: Umlegen der Profile</i>   |
|-----------------------------------|---|--|---|---|
| <i>Bezugspunkt der Ergebnisse</i> | Generischer Geradeausflug   | Berechnung neuer Konturen nur für die 6 Muster   | Unveränderte AzB-Berechnung 2019 (inkl. Addition der Pegeldifferenzen der Startverfahren)   | Berechnung neuer Konturen mit veränderten Startprofilen   |
| <i>Vorteile</i>                   | Geringste Unsicherheiten bei Vergleich der Verfahren untereinander anhand eines einzelnen Flugzeugmusters | Keine Vermischung mit AzB-Profilen; Nur Flugzeugmuster mit bekannten veränderten Profilen betrachtet | Abbildung von 100% der Verkehrsmenge; Realistische Gebietsgröße durch unveränderte Berechnungsgrundlage   | Abbildung von 100% der Verkehrsmenge; nur etwa 16% der Bewegungen mit AzB-Standard-Startverfahren enthalten   |
| <i>Nachteile</i>                  | Keine Szenario-Betrachtung  | Gebiete durch geringere Verkehrsmenge kleiner; Übertragung von ECAC Doc. 029 Profilen in AzB         | Gebiete mit 100% des Verkehrs berechnet, die sich ergebenden Differenz zwischen den Startverfahren aber nur anhand von 6 Mustern, die ca. 70% der Lärmimmissionen 2019 ausmachen; | Übertragung der o.g. Startprofile auf andere AzB-Flugzeuggruppen und Bewegungen; Übertragung von ECAC Doc. 029 Profilen in AzB Kombination von GfL- und AzB-Profilen (s.o.) |

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.4 Limitierungen des Gesamtvorhabens

Die Untersuchung unterliegt verschiedenen Limitierungen, welche die Unsicherheiten im Vergleich zu anderen Lärmberechnungen erhöhen. Die wichtigsten übergreifenden Aspekte werden im Folgenden kurz benannt und erläutert. Alle weiteren Aspekte, die spezifisch für bestimmte Berechnungsmethoden sind, werden zusätzlich in Kapitel 3.3 zusammengefasst.

- **Auswahl zu berücksichtigender Startverfahren:** Laut ICAO sind von allen Airlines NADP<sub>1</sub>- und NADP<sub>2</sub>-Startverfahren festzulegen. Die in den ICAO-Dokumenten dargestellten Verfahren dienen lediglich als Beispiele. Die genauen Parameter der von den Airlines vorgegebenen Startverfahren, können sich somit innerhalb der dort genannten Rahmenbedingungen unterscheiden. In den Untersuchungen kann aber nur eine begrenzte Anzahl an Varianten berücksichtigt werden. Die Wahl fiel auf die Beispiele der ICAO und eine, am Standort Frankfurt bekanntermaßen genutzte, Variante des NADP<sub>2</sub>-Verfahrens (siehe Kapitel 3.1).
- **Auswahl von sechs Flugzeugmustern:** Am Standort Frankfurt ist eine Vielzahl von Flugzeugmustern im Einsatz. Die nun berücksichtigten Flugzeugmuster wurden danach ausgewählt, dass sie zum Zeitpunkt der Entscheidung einen wesentlichen Beitrag zu den Lärmimmissionen am Standort lieferten. Insgesamt sind so 70% der Lärmimmissionen von 2019 abgebildet. Für die letzten 30% der Lärmimmissionen hätte eine Vielzahl zusätzlicher Profile generiert werden müssen, da am Standort Frankfurt mehr als hundert verschiedene Flugzeugtypen verkehren. Der genaue Typ (z.B. die Version 211 des A320) wurde dann nach der Datenverfügbarkeit ausgewählt. Auch eine Alternative, wie das ECAC Doc. 029, enthält nicht für alle Flugzeugmuster und Varianten von Startverfahren entsprechende Profile.
- **Setzungen zur Generierung der Startprofile:** Selbst nach Auswahl der genauen Flugzeugtypen, für die eine möglichst umfassende Datenbasis über die ANP-Datenbank verfügbar war, mussten noch Datenlücken geschlossen werden. Dies betraf z.B. Klappenstellungen und Geschwindigkeiten. Die vorhandenen Datenlücken wurden in Rücksprache mit den Expertinnen und Experten des ExpASS nach bestem Wissen geschlossen. Dennoch handelt es sich um Setzungen, die aber zur Umsetzung der Untersuchung nicht zu vermeiden waren.
- **Nicht-Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren bei der Profilerstellung, wie Kurvenflug, Höhenvorgaben etc.:** Um die Komplexität zu reduzieren, wurden die Startprofile wie oben dargestellt auf Basis pauschaler Vorgaben für gerade Abflugstrecken erstellt. In der Realität enthalten viele Abflugrouten Kurven, zusätzliche Höhenvorgaben etc. Diese alle zu berücksichtigen, hätte das Vorhaben noch aufwändiger gestaltet. Daher wurden diese lediglich über Sensitivitätsanalysen (s.u.) abgebildet. Der Schluss dieser Analysen lässt allerdings zu, dass die Ergebnisse auch bei Berücksichtigung weiterer Faktoren nicht anders ausfallen würden.
- **Unbekannte Situation im realen Betrieb:** Die hier durchgeführten Vergleiche beziehen sich jeweils auf eine Situation, die annimmt, dass ausschließlich eines der drei Startverfahren in allen Fällen zur Anwendung kommt. In der Realität nutzen einige der am Standort vertretene Airlines NADP<sub>1</sub>-Verfahren, andere nutzen NADP<sub>2</sub>-Verfahren. Die reale Situation im Betrieb besteht somit aus einer Anwendung verschiedener Startverfahren. Hinzu kommt, dass Airlines frei darin sind, die Details der Startverfahren für ihre Flugzeugmuster im o.g. Rahmen auszugestalten, so dass sich z.B. auch die Steil- oder Flachstartverfahren der Airlines voneinander unterscheiden können. Da die genutzten Verfahren nur zum Teil bekannt sind, ist es nicht möglich die reale Situation am Standort Frankfurt abzubilden und es wurden die drei ausgewählten Verfahren in „Reinform“ miteinander verglichen. Es ist vor diesem Hintergrund anzunehmen, dass die festgestellten Unterschiede im rechnerischen Vergleich anders ausfallen als in der Realität.



- **Übertragung der ECAC Doc. 029 Fixpunktprofile in AzB-geeignete Profile:** Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, mussten sog. Fixpunktprofile erstellt werden, um die originalen AzB-Startprofile in den Berechnungen zu ersetzen. Bei AzBo8-Berechnungen werden Flugzeugmuster, die hinsichtlich der Anzahl der Triebwerke und Abflugmasse vergleichbar sind und akustisch ähnliche Auswirkungen haben, in Gruppen zusammengefasst, um die Berechnung zu vereinfachen. Eine Gruppe hat in der AzB einen standardisierten Datensatz für den Start, der das Emissionsverhalten sowie das Geschwindigkeits- und Steigprofil repräsentativ für alle in der Gruppe zusammengefassten Flugzeugmuster beschreibt. Die in einer Gruppe zusammengefassten Flugzeugmuster haben in AzB-Berechnungen somit immer den gleichen Footprint. Die für die Untersuchung Startverfahren ausgewählten sechs Flugzeugmuster, für die Fixpunktprofile entwickelt wurden, erzeugen in einer AzB-Berechnung auf Basis des Verkehrs von 2019 knapp 70 Prozent der gesamten Fluglärmbelastung am Flughafen Frankfurt. Sie sind den vier AzB-Gruppe S5.2 (A320-211 und B737-800), S6.1 (B777-300 ER), S7 (B747-400 und B747-8) sowie S8 (A380-841) zugeordnet.
- Weder liegen in der AzB also individuelle Profile für einzelne Flugzeugmuster vor, noch beinhalten die Profile Annahmen für unterschiedliche Startverfahren. Diese wurden durch GfL für die ausgewählten Flugzeugmuster mit Hilfe von ECAC Doc. 029 erstellt. Die Umwandlung in das AzB-Format erfolgte, indem der Triebwerksschub in den von der AzB vorgesehenen sog. „Zusatzpegel“ konvertiert wurde. Die Umwandlung von nach ECAC Doc. 029 ermittelten Datensätzen in das AzB-Format (also die Ermittlung des notwendigen Zusatzpegels) ist mit zusätzlichen Unsicherheiten verbunden. Die Unsicherheiten der Ergebnisse sind vor diesem Hintergrund als deutlich höher zu erachten als bei den üblichen Lärmberechnungen.
- Dennoch können die entwickelten Fixpunktprofile, sofern nur diese zum Ansatz gebracht werden, für Fluglärmerechnungen von Szenarien genutzt werden, um insbesondere anhand von Differenzbetrachtungen die unterschiedlichen Auswirkungen der Startverfahren zu untersuchen. Bei den Absolutwerten eines einzelnen Szenarios müssen jedoch größere Abweichungen von den üblichen AzB-Berechnungen in Kauf genommen werden. Alle weiteren Kapitel und auch die aus dem Vorhaben zu ziehenden Schlüsse fokussieren vor diesem Hintergrund auf die Differenzbetrachtungen.

## 4 Ergebnisse der „Untersuchung Startverfahren“

Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden dargestellt. Die Erläuterung der Methoden und ihrer Limitierungen ist bereits in Kapitel 3.3 und 3.4 enthalten.

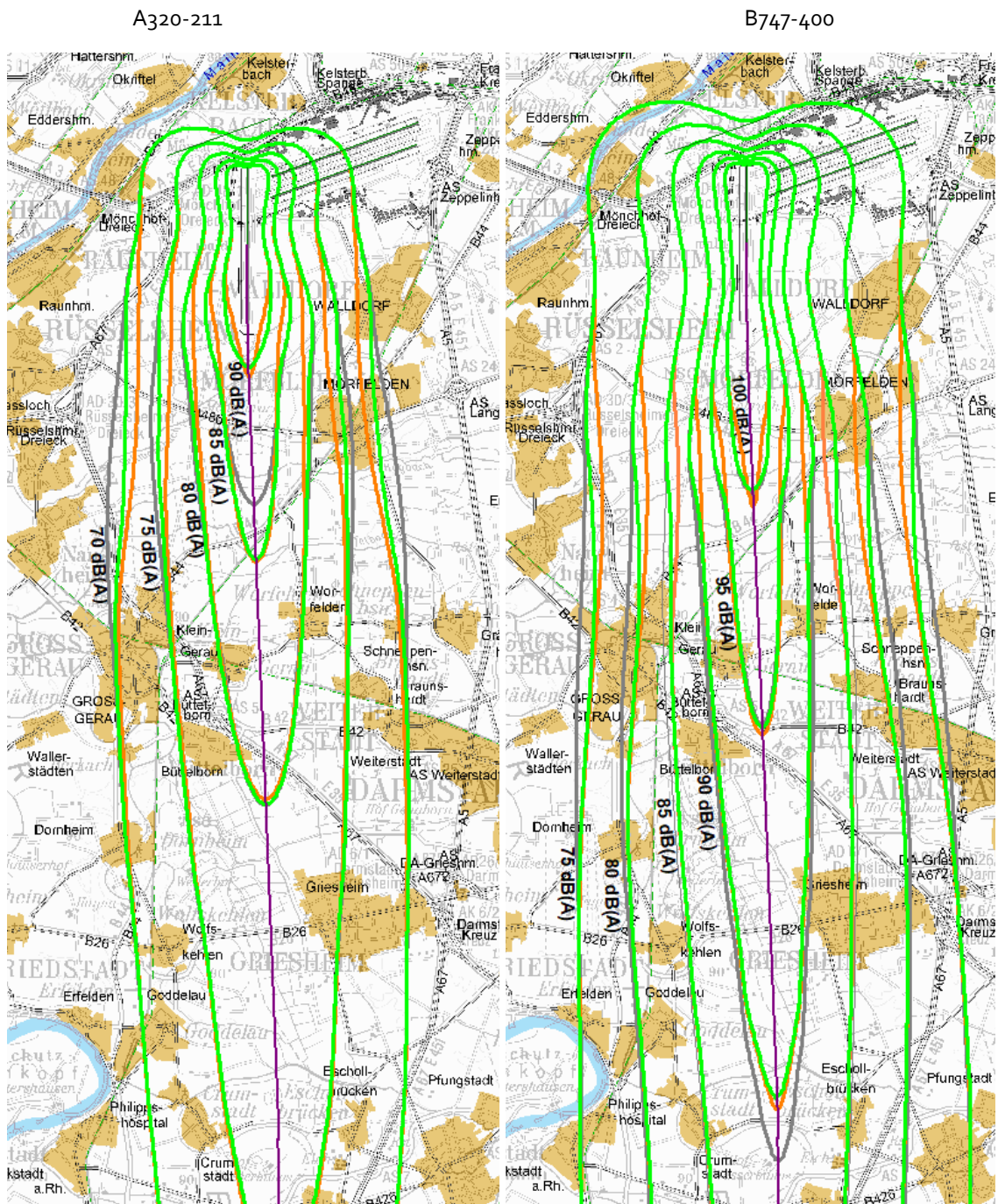
### 4.1 Auswertung der Einzelflugkonturen (Footprints)

#### 4.1.1 Deskriptive Auswertung der SEL-Footprints

In Abbildung 7 sind exemplarisch SEL-Footprints der B747-400 und A320-211, zur Veranschaulichung für einen Abflug von der Startbahn 18W mit der dortigen Besiedlungsstruktur inklusive Berücksichtigung der Topografie, dargestellt, die sich auf Basis der ermittelten Fixpunktprofile für die drei betrachteten NADP-Verfahren ergeben. Die Konturen sind in 5 dB Schritten dargestellt. Im Fall der B747-400 erstreckt sich der Pegelbereich von 75 dB bis 100 dB. Bei der A320-211 sind SEL-Pegel zwischen 70 bis 90 dB dargestellt.

Entscheidend ist die Bewertung der Differenzen der in den jeweiligen Footprints, nicht die absolute Höhe der Pegelwerte.

Abbildung 7: SEL-Footprints für die Startverfahren NADP<sub>1</sub> (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP<sub>2-15</sub> (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400- und A320-211-Abflugs von Startbahn 18W (hohe Auslastung)

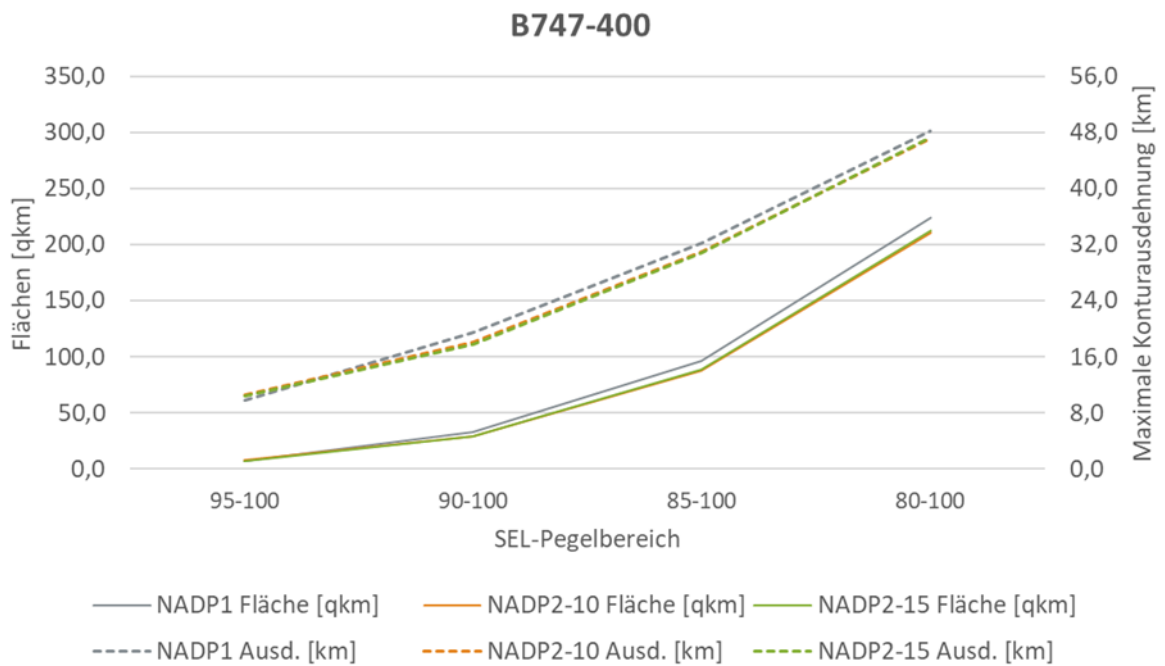


Quelle: Fraport AG

Bei beiden Flugzeugmustern ist im Bereich nach dem Abheben ( $\approx 5\text{-}10\text{ km}$  Entfernung vom Bahnbezugspunkt) zu erkennen, dass die NADP2-Konturen seitlich des Flugpfads deutlich leiser ausfallen als die NADP1-Konturen. Unmittelbar unter dem Flugpfad hingegen sind die Konturen der NADP2-Verfahren für die hohen Pegelbereiche länger als diejenigen des NADP1-Verfahrens. Bei SEL-Pegeln kleiner 95 dB für die B747-400 ( $\approx 13\text{ km}$  Entfernung vom Bahnbezugspunkt) bzw. kleiner 80 dB für die A320-211 ( $\approx 10\text{ km}$  Entfernung vom Bahnbezugspunkt) liefert das NADP1-Verfahren auch unterhalb der Flugbahn keinen Vorteil mehr.

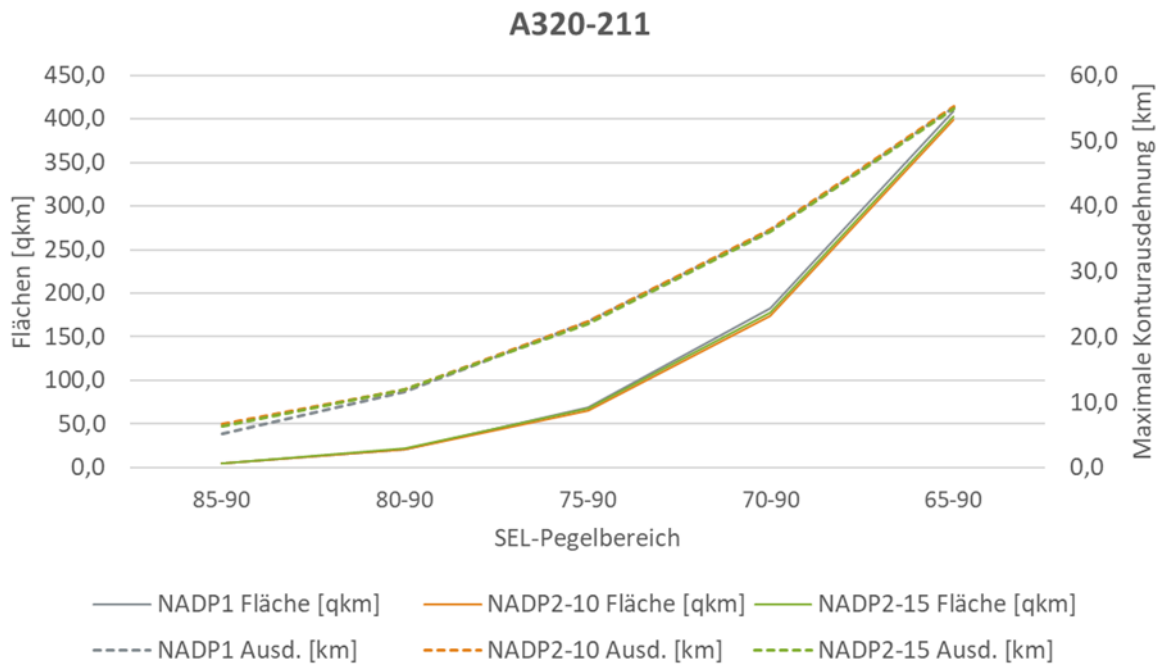
Für alle 6 Flugzeugmuster wurden die Footprints der jeweiligen Startverfahren im Hinblick auf deren Flächen und maximale Konturausdehnungen ermittelt.

Abbildung 8: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400-Abflugs



Quelle: Fraport AG

Abbildung 9: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints für die Startverfahren NADP<sub>1</sub> (grau), NADP<sub>2-10</sub> (orange) und NADP<sub>2-15</sub> (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines A320-211-Abflugs



Quelle: Fraport AG

Die gestrichelten Linien stellen die maximal Konturausdehnung unter dem Flugpfad dar, deren Werte an der rechten Achse abgelesen werden können. Im hohen Pegelbereich sind die maximalen Konturausdehnungen des NADP<sub>1</sub>-Verfahrens geringer als diejenigen der NADP<sub>2</sub>-Verfahren. Der Schnittpunkt dieser gestrichelten Linien stellt den Abstand vom Bahnbezugspunkt dar, an dem unter dem Flugpfad die Pegelwerte der betrachteten Startverfahren gleich sind. Mit zunehmendem Abstand zum Bahnbezugspunkt liefert das NADP<sub>1</sub>-Verfahren unter dem Flugpfad gleiche oder sogar höhere Pegelwerte als die NADP<sub>2</sub>-Verfahren, denn die Konturausdehnung ist gleich oder größer.

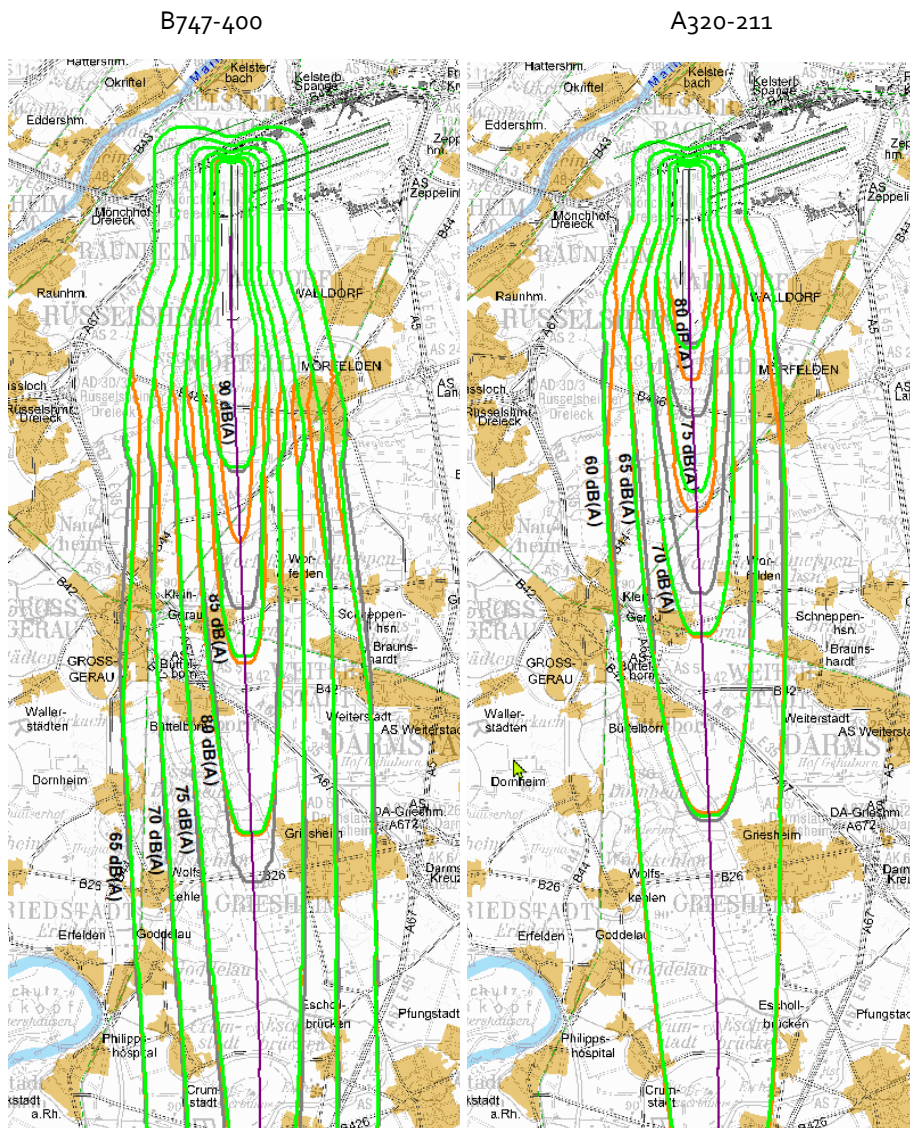
Die Flächen der SEL-Konturen in den Pegelbereichen sind als durchgezogene Linien dargestellt. Von einem Pegelbereich zum nächsten wird jeweils die Fläche des äußeren Konturenrings addiert, um die Gesamtfläche zu erhalten. Im hohen Pegelbereich unterscheiden sich die Flächen marginal. Die größere Konturausdehnung unter dem Flugpfad bei den NADP<sub>2</sub>-Verfahren im Vergleich zum NADP<sub>1</sub>-Verfahren wird von der schmalen Konturenbreite seitlich des Flugpfads kompensiert. Die Gesamtbilanz der SEL-Footprints Fläche fällt mit abnehmenden Pegelwerten und damit zunehmender Gebietsfläche um den Flughafen eindeutig zugunsten der NADP<sub>2</sub>-Verfahren aus. Dies gilt insbesondere für die relevant zur Lärmbelastung beitragenden schweren 4-strahligen Flugzeugmuster.

Die entsprechenden Darstellungen der SEL-Footprints für die übrigen vier Flugzeugmuster sind im Anhang A dargestellt.

#### 4.1.2 Deskriptive Auswertung der LMax-Footprints

In Abbildung 10 sind exemplarisch die LMax-Footprints der B747-400 und A320-211 für die drei betrachteten Varianten der Startverfahren, inklusive berücksichtigter Topografie bei einem Abflug von der Startbahn West (18), zur Veranschaulichung dargestellt. Die Konturen in 5 dB Schritten decken für die B747-400 den Pegelbereich von 65 dB bis 90 dB ab, während bei der A320-211 LMax-Pegel zwischen 60 bis 80 dB dargestellt sind. Auch hier sind zur Bewertung der Wirkungen die Differenzen zwischen den Verfahren entscheidend, nicht die absolute Höhe.

Abbildung 10: LMax-Footprints für die Startverfahren NADP<sub>1</sub> (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400- und A320-211-Abflugs von Startbahn 18W (hohe Auslastung)



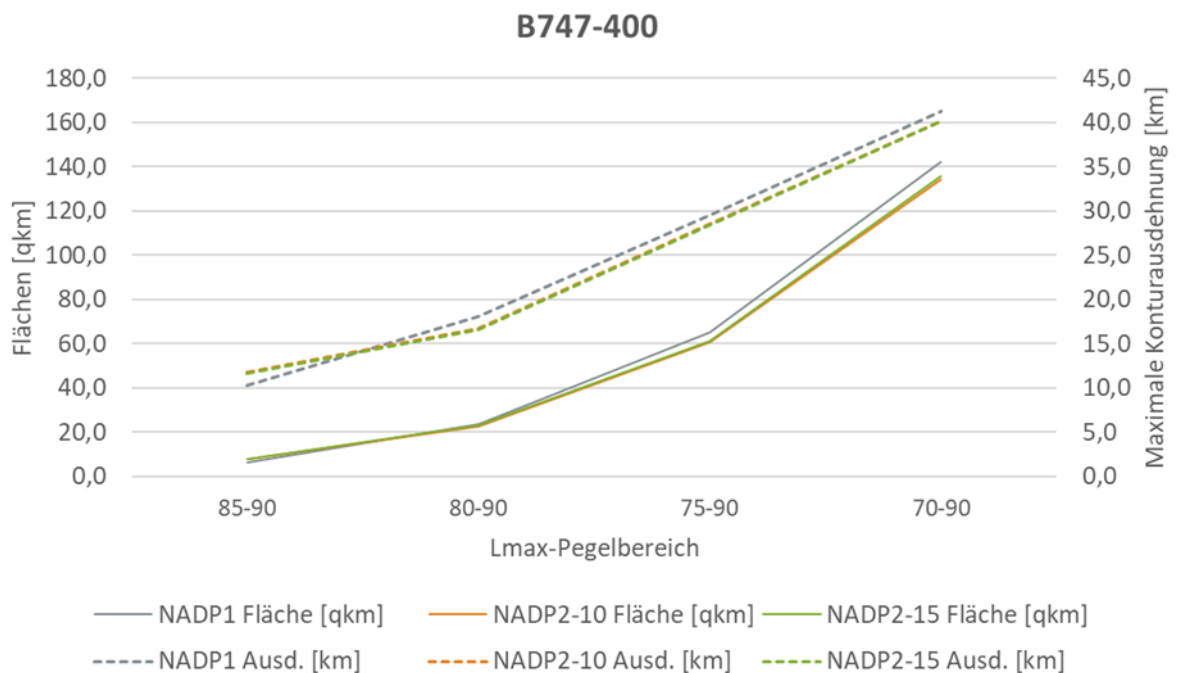
Quelle: Fraport AG

Grundsätzlich zeigt sich bei den L<sub>max</sub>-Footprints ein ähnliches Verhältnis zwischen den Startverfahren wie bei den SEL-Footprints. Seitlich des Flugpfads bewirkt das NADP<sub>1</sub>-Verfahren höhere Pegelwerte als das NADP<sub>2-10</sub>-Verfahren, insbesondere im Bereich der Schubrücknahme beim Cutback. Unmittelbar unter dem Flugpfad sind im Bereich bis ca. 15 km ab Bahnbezugspunkt die Lärmwerte des NADP<sub>1</sub>-Verfahrens geringer als bei den NADP<sub>2</sub>-Verfahren. Im weiteren Flugverlauf jenseits von 15 km erzeugt das NADP<sub>2</sub>-Verfahren auch unmittelbar unter dem Flugpfad geringere Maximalpegel als das NADP<sub>1</sub>-Verfahren. Da der Maximalpegel die Auswirkungen der unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten unberücksichtigt lässt, unterscheiden sich die Konturausdehnungen unter dem Flugpfad stärker als bei den SEL-Footprints, während die Unterschiede seitlich des Flugpfads weniger stark ausgeprägt sind.

Die nachfolgenden Abbildungen Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen für die L<sub>max</sub>-Footprints die maximale Konturausdehnung als gestrichelte Linien und die Flächen als durchgezogene Linien.

Bei der B747-400 fallen die Konturausdehnung für Maximalpegel über 80 dB(A) mit den NADP<sub>1</sub>-Verfahren geringer aus als mit den NADP<sub>2</sub>-Verfahren. Für die Konturfläche sind die Verfahren nahezu identisch. Pegelwerte in dieser Größenordnung treten nur bis etwa 15 km vom Bahnbezugspunkt und in einem Abstand von maximal 1 km seitlich des Flugpfads in Siedlungsgebieten auf. D.h. außerhalb dieser Gebiete liefert eine mit NADP<sub>1</sub>-Verfahren B747-400 höhere Maximalpegel als die NADP<sub>2</sub>-Verfahren.

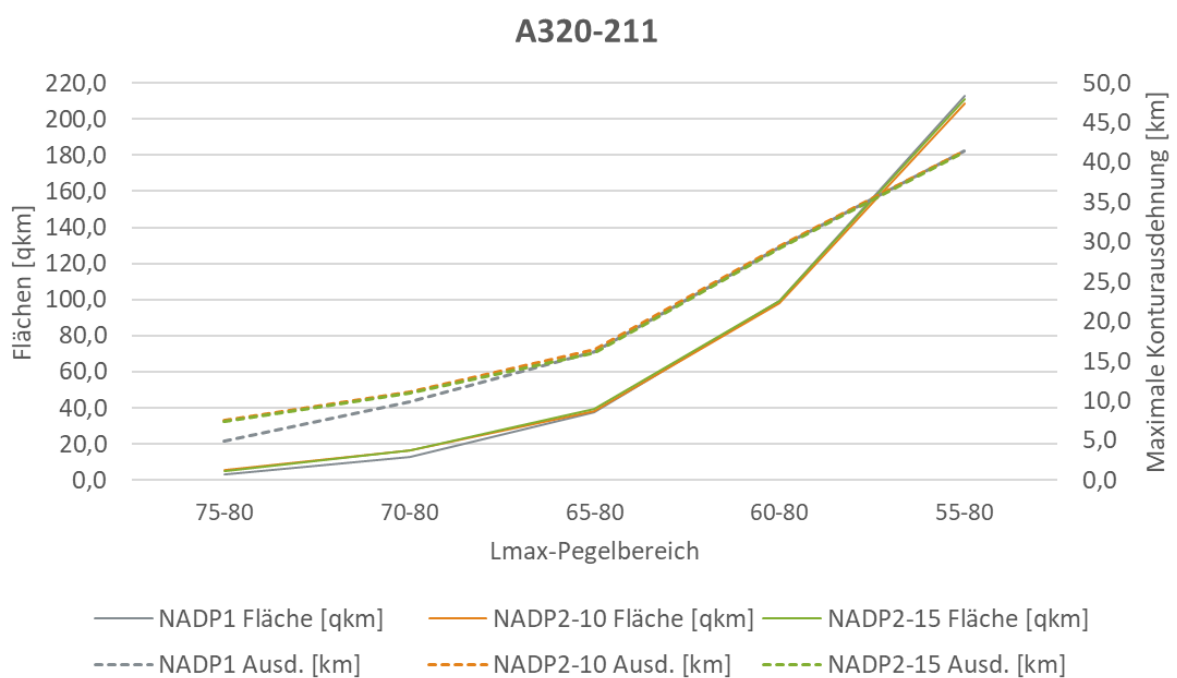
Abbildung 11: Flächen und maximale Konturausdehnung der L<sub>max</sub>-Footprints für die Startverfahren NADP<sub>1</sub> (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines B747-400-Abflugs



Quelle: Fraport AG

Bei der A320-211 ist die Konturausdehnung unter dem Flugweg bis ca. 16 km, also für Maximalpegel zwischen 65 dB – 80 dB für die NADP2 Verfahren größer als für das NADP1-Verfahren. Auch bezüglich der Konturfläche ergibt sich in diesem Pegelbereich ein Vorteil des NADP1 Verfahrens. Ab 16 km Flugweg bzw. bei Maximalpegeln unter 65 dB(A) haben die NADP2-Verfahren in Bezug auf die Konturausdehnung und -fläche einen kleinen Vorteil.

Abbildung 12: Flächen und maximale Konturausdehnung der L<sub>max</sub>-Footprints für die Startverfahren NADP<sub>1</sub> (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) eines A320-211-Abflugs



Quelle: Fraport AG

Für die übrigen vier Flugzeugmuster sind die Ergebnisse der Flächen und Konturausdehnung in Anhang B grafisch dargestellt.

## 4.2 Szenariobetrachtung 2019: nur die sechs Luftfahrzeugmuster mit veränderten Startprofilen

### 4.2.1 Auswertung der Berechnungsergebnisse auf Basis der Dauerschallpegel

#### 4.2.1.1 Auswertung der Flächeninhalte in km<sup>2</sup>

Ausgewertet wurde jeweils die größte vorhandene Kontur: Am Tag LA<sub>eq</sub> ≥ 48 dB(A) (unten benannt mit „LA<sub>eq</sub>T48“); in der Nacht LA<sub>eq</sub> ≥ 43 dB(A) (unten benannt mit „LA<sub>eq</sub>N43“). Sowohl am Tag als auch in der Nacht schneiden die NADP2-Verfahren hinsichtlich der betroffenen Flächeninhalte in allen Fällen insgesamt am besten ab (Abbildung 13). Zwischen NADP2-10 und NADP2-15 sind die Unterschiede geringer als zu NADP1. Bis auf einen Fall (≥ 43 dB(A) Kontur, Nacht, hohe Auslastung) schneidet aber das NADP2-10

Verfahren – also das „flachere“ Verfahren – jeweils besser ab als NADP<sub>2-15</sub>. Die Abnahmen von NADP<sub>1</sub> zu NADP<sub>2-10</sub> bzw. NADP<sub>2-15</sub> liegen zwischen 3,4% und 6,3% (siehe auch Tabelle 3).

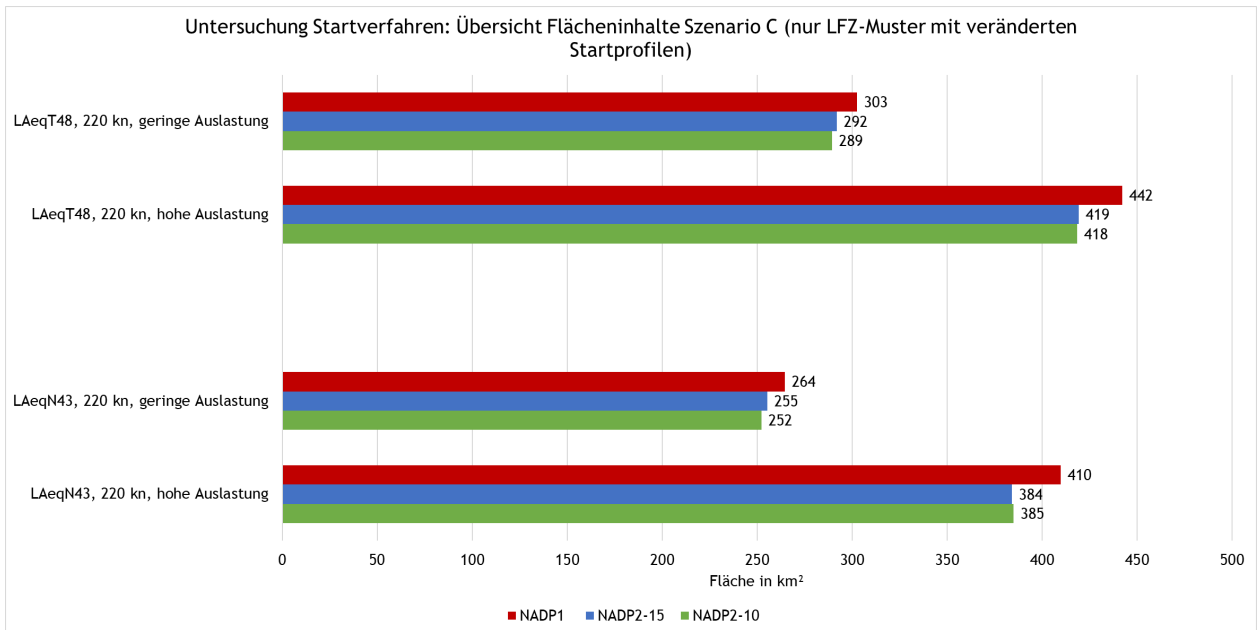
Tabelle 3: Unterschiede zwischen den Startverfahren in km<sup>2</sup> und Prozent

|  | Differenzen in % bezogen auf NADP <sub>1</sub> |                      |                      |  |  |
|--|--|----------------------|----------------------|--|--|
|  | NADP <sub>1</sub>                              | NADP <sub>2-15</sub> | NADP <sub>2-10</sub> | NADP <sub>2-15</sub> – NADP <sub>1</sub> | NADP <sub>2-10</sub> – NADP <sub>1</sub> |
| <i>LAeqT<sub>48</sub> – geringe Auslastung</i> | 303  | 292                  | 289                  | -3,6%                                    | -4,6%                                    |
| <i>LAeqT<sub>48</sub> – hohe Auslastung</i>    | 442  | 419                  | 418                  | -5,2%                                    | -5,4%                                    |
| <i>LAeqN<sub>43</sub> – geringe Auslastung</i> | 264  | 255                  | 252                  | -3,4%                                    | -4,5%                                    |
| <i>LAeqN<sub>43</sub> – hohe Auslastung</i>    | 410  | 384                  | 385                  | -6,3%                                    | -6,1%                                    |

Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 13: Übersicht Flächeninhalte in km<sup>2</sup> bei 220 kn Geschwindigkeitsbegrenzung, Tag & Nacht



Quelle: Eigene Darstellung

Zu beachten ist allerdings, dass die Gesamtdarstellung lediglich für die äußerste Kontur – also am Tag die  $\geq 48$  dB(A) und in der Nacht die  $\geq 43$  dB(A) – aussagekräftig ist. Die Veränderungen in den höheren Pegelbereichen, die in den oben dargestellten Karten ersichtlich wurden, lassen sich anhand dieser Gesamtdarstellung nicht nachvollziehen. Diese werden erst beim Blick in einzelne Pegelbänder ersichtlich (Abbildung 14):

In den für den Tag betrachteten Pegelbändern  $\geq 48$  dB(A) führt das NADP2-10-Verfahren im Falle der hohen Auslastung der Flugzeuge durchweg zu geringeren Flächen als das NADP1-Verfahren. Bei hohen Pegeln ( $\geq 75$ ) sind die Unterschiede gering ( $< 1\%$ ), in niedrigen Pegelbändern hingegen liegen die Unterschiede zwischen 1,3 und 7,7%, wobei der größte Wert im Pegelbereich 55-60 dB(A) erreicht wird. Die Berechnungen für die Nacht zeigen ähnliche Unterschiede in den Pegelbändern  $\geq 43$  dB(A).

Beim Vergleich des NADP2-15-Verfahrens mit dem NADP1-Verfahren bei hoher Auslastung zeigt auch das NADP2-15-Verfahren insgesamt Vorteile, wobei die Flächenunterschiede ähnlich wie beim Vergleich von NADP2-10 und NADP1 ausfallen. Es gibt wenige Pegelbereiche, in denen NADP1 besser abschneidet – allerdings um maximal 0,18%.

Für niedrige Auslastungen zeigen die Vergleiche zwischen den Verfahren ein ähnliches Muster, die Unterschiede fallen aber insgesamt geringer aus. Darüber hinaus zeigt sich die Besonderheit, dass am Tag im Dauerschallpegelbereich zwischen 60-70 dB(A) NADP2-10 hinsichtlich der Flächeninhalte geringfügig schlechter abschneidet als NADP1-15 (bis zu 0,7%). In der Nacht gibt es ähnliche Fälle: Im Bereich 55-65 dB(A) schneidet NADP2-10 bis zu 1,75% schlechter ab als NADP1. Über alle Pegelbänder hinweg, siehe die Darstellung oben, überwiegen aber auch hier die Vorteile von NADP2 hinsichtlich der betroffenen Flächen.

Insgesamt sollte bei der Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich unterschiedlicher Startverfahren aber auch beachtet werden, dass der durch die Auslastung verursachte Unterschied um ein Vielfaches größer ist als der durch die Verfahren selbst verursachte: So führt eine geringe, im Vergleich zu einer hohen Auslastung, bei Nutzung desselben Startverfahrens, zu einer 30-36%igen Verringerung des Flächeninhalts. Das ist das etwa Fünf- bis Zehnfache des Effekts der Veränderung durch das Startverfahren.

Abbildung 14: Veränderung der Flächeninhalte in Prozent NADP<sub>1</sub> vs. NADP<sub>2</sub> nach Pegelbereichen

| Tag, hohe Auslastung    |                    |                    | Nacht, hohe Auslastung  |                    |                    |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Flächendifferenz [%]    |                    |                    | Flächendifferenz [%]    |                    |                    |
| LAeq-Pegelbereich       | Δ NADP2-10 – NADP1 | Δ NADP2-15 – NADP1 | LAeq-Pegelbereich       | Δ NADP2-10 – NADP1 | Δ NADP2-15 – NADP1 |
| ≥ 48 dB(A) - < 50 dB(A) | -4,00%             | -3,75%             | ≥ 43 dB(A) - < 45 dB(A) | -4,93%             | -5,06%             |
| ≥ 50 dB(A) - < 55 dB(A) | -6,16%             | -6,83%             | ≥ 45 dB(A) - < 50 dB(A) | -7,05%             | -8,48%             |
| ≥ 55 dB(A) - < 60 dB(A) | -7,69%             | -6,44%             | ≥ 50 dB(A) - < 55 dB(A) | -7,62%             | -6,14%             |
| ≥ 60 dB(A) - < 65 dB(A) | -1,34%             | -0,99%             | ≥ 55 dB(A) - < 60 dB(A) | -0,63%             | -0,59%             |
| ≥ 65 dB(A) - < 70 dB(A) | -6,81%             | 0,18%              | ≥ 60 dB(A) - < 65 dB(A) | -7,13%             | -0,28%             |
| ≥ 70 dB(A) - < 75 dB(A) | -1,68%             | 0,03%              | ≥ 65 dB(A) - < 70 dB(A) | -1,70%             | 0,02%              |
| ≥ 75 dB(A) - < 80 dB(A) | -0,97%             | 0,00%              | ≥ 70 dB(A) - < 75 dB(A) | -0,69%             | 0,00%              |
| ≥ 80 dB(A) - < 85 dB(A) | -0,30%             | 0,00%              | ≥ 75 dB(A) - < 80 dB(A) | -0,19%             | 0,00%              |
| ≥ 85 dB(A) - < 90 dB(A) | -0,20%             | 0,00%              | ≥ 80 dB(A) - < 85 dB(A) | -0,11%             | 0,00%              |
| ≥ 90 dB(A) - < 95 dB(A) | -0,18%             | 0,00%              | ≥ 85 dB(A) - < 89 dB(A) | -0,26%             | 0,00%              |
| ≥ 95 dB(A) - < 97 dB(A) | -0,36%             | 0,00%              |                         |                    |                    |
| <b>Summe</b>            | <b>-5,39%</b>      | <b>-5,19%</b>      | <b>Summe</b>            | <b>-6,03%</b>      | <b>-6,23%</b>      |

| Tag, niedrige Auslastung |                    |                    | Nacht, niedrige Auslastung |                    |                    |
|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Flächendifferenz [%]     |                    |                    | Flächendifferenz [%]       |                    |                    |
| LAeq-Pegelbereich        | Δ NADP2-10 – NADP1 | Δ NADP2-15 – NADP1 | LAeq-Pegelbereich          | Δ NADP2-10 – NADP1 | Δ NADP2-15 – NADP1 |
| ≥ 48 dB(A) - < 50 dB(A)  | -2,99%             | -2,66%             | ≥ 43 dB(A) - < 45 dB(A)    | -4,67%             | -3,87%             |
| ≥ 50 dB(A) - < 55 dB(A)  | -5,86%             | -4,62%             | ≥ 45 dB(A) - < 50 dB(A)    | -4,90%             | -3,45%             |
| ≥ 55 dB(A) - < 60 dB(A)  | -5,74%             | -4,33%             | ≥ 50 dB(A) - < 55 dB(A)    | -6,83%             | -5,02%             |
| ≥ 60 dB(A) - < 65 dB(A)  | 0,37%              | -0,55%             | ≥ 55 dB(A) - < 60 dB(A)    | 0,96%              | 0,08%              |
| ≥ 65 dB(A) - < 70 dB(A)  | 0,69%              | -0,40%             | ≥ 60 dB(A) - < 65 dB(A)    | 1,75%              | -0,21%             |
| ≥ 70 dB(A) - < 75 dB(A)  | -0,36%             | -0,07%             | ≥ 65 dB(A) - < 70 dB(A)    | -0,43%             | -0,06%             |
| ≥ 75 dB(A) - < 80 dB(A)  | -0,08%             | -0,02%             | ≥ 70 dB(A) - < 75 dB(A)    | -0,11%             | -0,02%             |
| ≥ 80 dB(A) - < 85 dB(A)  | -0,03%             | -0,01%             | ≥ 75 dB(A) - < 80 dB(A)    | -0,02%             | -0,01%             |
| ≥ 85 dB(A) - < 90 dB(A)  | -0,05%             | 0,00%              | ≥ 80 dB(A) - < 85 dB(A)    | -0,02%             | 0,00%              |
| ≥ 90 dB(A) - < 95 dB(A)  | -0,06%             | 0,00%              | ≥ 85 dB(A) - < 87 dB(A)    | -0,07%             | 0,00%              |
| ≥ 95 dB(A) - < 96 dB(A)  | -0,14%             | 0,00%              |                            |                    |                    |
| <b>Summe</b>             | <b>-4,35%</b>      | <b>-3,56%</b>      | <b>Summe</b>               | <b>-4,58%</b>      | <b>-3,51%</b>      |

Quelle: Eigene Darstellung

#### 4.2.1.2 Auswertung der Personenzahlen

Neben den bereits beschriebenen Flächeninhalten, wurde auch ausgewertet, wie viele Personen innerhalb der berechneten Konturen leben und wie sich die Veränderungen der Konturen auf diese Zahlen auswirken.

Insgesamt zeigt sich auch hinsichtlich der betroffenen Personenzahlen das gleiche Bild (siehe Abbildung 15): Die NADP<sub>2</sub>-Verfahren schneiden in sämtlichen Berechnungen insgesamt besser ab als NADP<sub>1</sub>. Auch hier gilt: NADP<sub>2-10</sub> ist bis auf eine Ausnahme (Nacht ≥ 43 dB(A), hohe Auslastung) jeweils etwas besser als NADP<sub>2-15</sub>.

Die Abnahmen der NADP<sub>2</sub>-Verfahren gegenüber NADP<sub>1</sub> liegen zwischen 5% bis 10,8% und damit deutlich über den Veränderungen der Flächeninhalte (3-6%) (Tabelle 4). Auch bzgl. der Personenzahlen gilt aber,

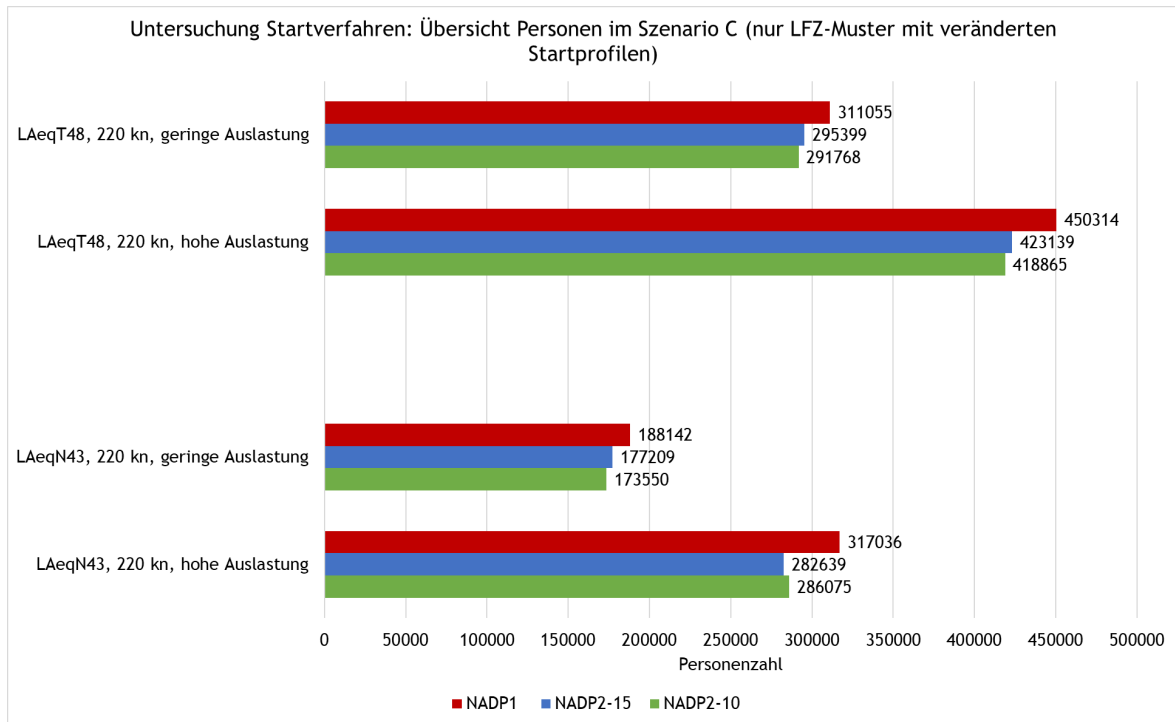
dass die Unterschiede aufgrund der Auslastung mit 30-41% deutlich größere Effekte verursachen als Veränderungen des Startverfahrens.

Tabelle 4: Unterschiede zwischen den Startverfahren in Personenzahlen und Prozent

|  | Differenzen in % bezogen auf NADP <sub>1</sub> |                      |                      |   |   |
|--|--|----------------------|----------------------|---|---|
|  | NADP <sub>1</sub>                              | NADP <sub>2-15</sub> | NADP <sub>2-10</sub> | NADP <sub>2-15</sub> –<br>NADP <sub>1</sub> | NADP <sub>2-10</sub> –<br>NADP <sub>1</sub> |
| <i>LAeqT<sub>48</sub> –<br/>geringe<br/>Auslastung</i> | 311055   | 295399               | 291768               | -5,0%                                       | -6,2%                                       |
| <i>LAeqT<sub>48</sub> –<br/>hohe Aus-<br/>lastung</i>  | 450314   | 423139               | 418865               | -6,0%                                       | -7,0%                                       |
| <i>LAeqN<sub>43</sub> –<br/>geringe<br/>Auslastung</i> | 188142   | 177209               | 173550               | -5,8%                                       | -7,8%                                       |
| <i>LAeqN<sub>43</sub> –<br/>hohe Aus-<br/>lastung</i>  | 317036   | 282639               | 286075               | -10,8%                                      | -9,8%                                       |

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 15: Übersicht betroffene Personen bei 220kn Geschwindigkeitsbegrenzung, Tag & Nacht



Quelle: Eigene Darstellung

## 4.2.2 Auswertung der Dauerschallpegelkonturen

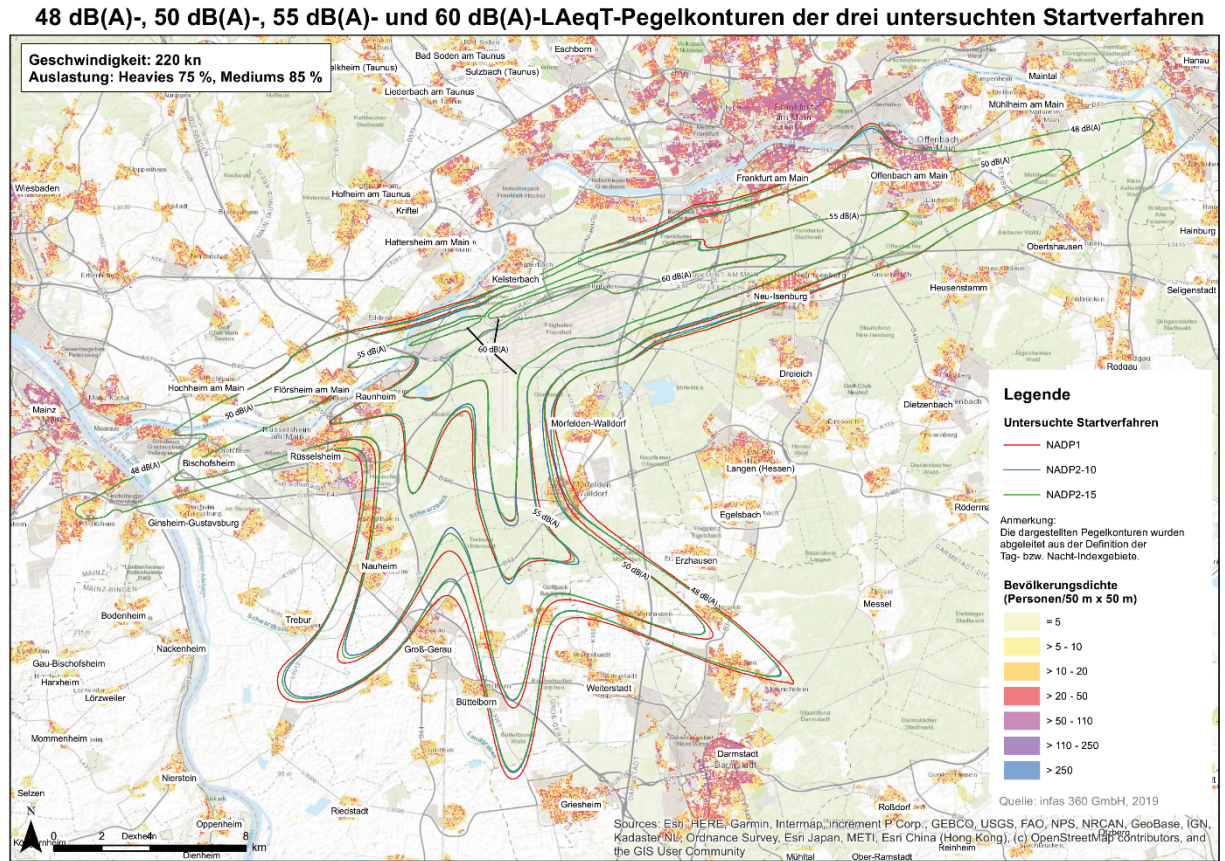
### 4.2.2.1 Tag

In Abbildung 16 sind die berechneten Dauerschallpegelkonturen am Tag für die Pegelbereiche  $\geq 48$ ,  $\geq 50$ ,  $\geq 55$  sowie  $\geq 60$  dB(A) bei niedriger Auslastung der Flugzeuge (geringeres Gewicht) zu sehen. Die Gebietsabgrenzungen sind in Anlehnung an den FFI 2.0 festgelegt worden. Wie oben beschrieben, sind in der Berechnung ausschließlich die sechs Flugzeugmuster enthalten, für die angepasste Startprofile vorliegen – die dargestellten Konturen weichen somit kleiner als Konturen für ein Gesamtverkehrsszenario.

Ersichtlich ist, dass bei den 48- und 50 dB(A)-Konturen in der Regel die Konturen bei Anwendung von NADP1-Verfahren weiter außen liegen und somit größer sind bzw. mehr Gebiete belastet als die der NADP2-Verfahren. Zu sehen ist das insbesondere in südlicher Ausprägung der 48- und 50 dB(A)-Konturen.

Bei den höher belasteten Gebieten, im Fall der 55 dB(A)-Kontur, entstehen zwei Bereiche, in denen die NADP1-Kontur kleiner ausfällt als die NADP2-Konturen. Diese liegen im unbesiedelten Gebiet der Konturspitzen entlang der Abflurouten nach Süden und Südosten. Ansonsten liegen die 55 dB(A) Konturen für NADP1 entweder außerhalb oder exakt auf den Konturen der NADP2-Verfahren. Auch Im Fall der 60 dB(A)-Kontur liegt die NADP2-Kontur teilweise außen. Alle Bereiche, in denen die NADP2-Konturen größer sind als die NADP1-Konturen sind aber unbesiedeltes Gebiet – hier gilt es aber zu beachten, dass sich die betroffenen Besiedlungsbereiche mit der Verkehrsmenge auch verschieben können (s.o.).

Abbildung 16: Pegelkonturen der Startverfahren am Tag, niedrige Auslastung

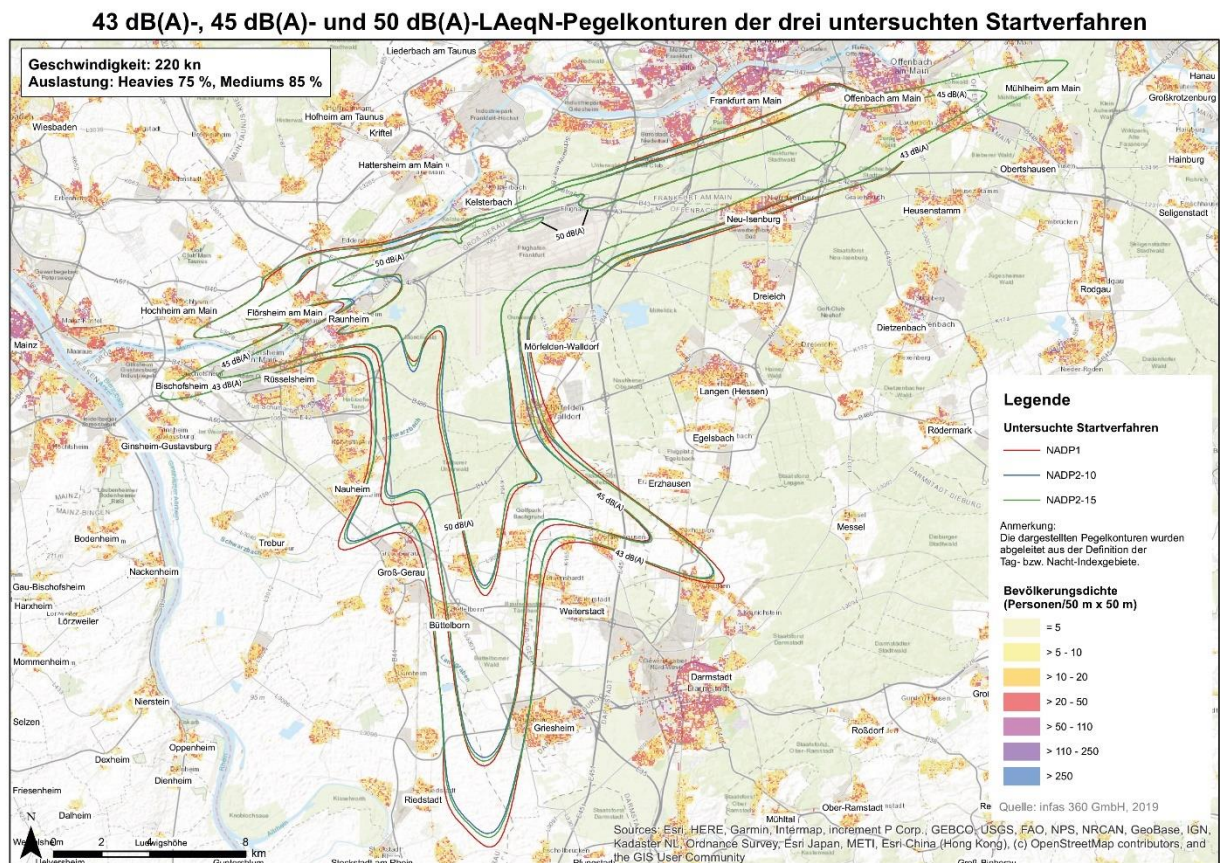


Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH



Trend auch in der Nacht an einzelnen Stellen in den höher betroffenen Pegelbereichen (hier:  $\geq 50$  dB(A)) ändert.

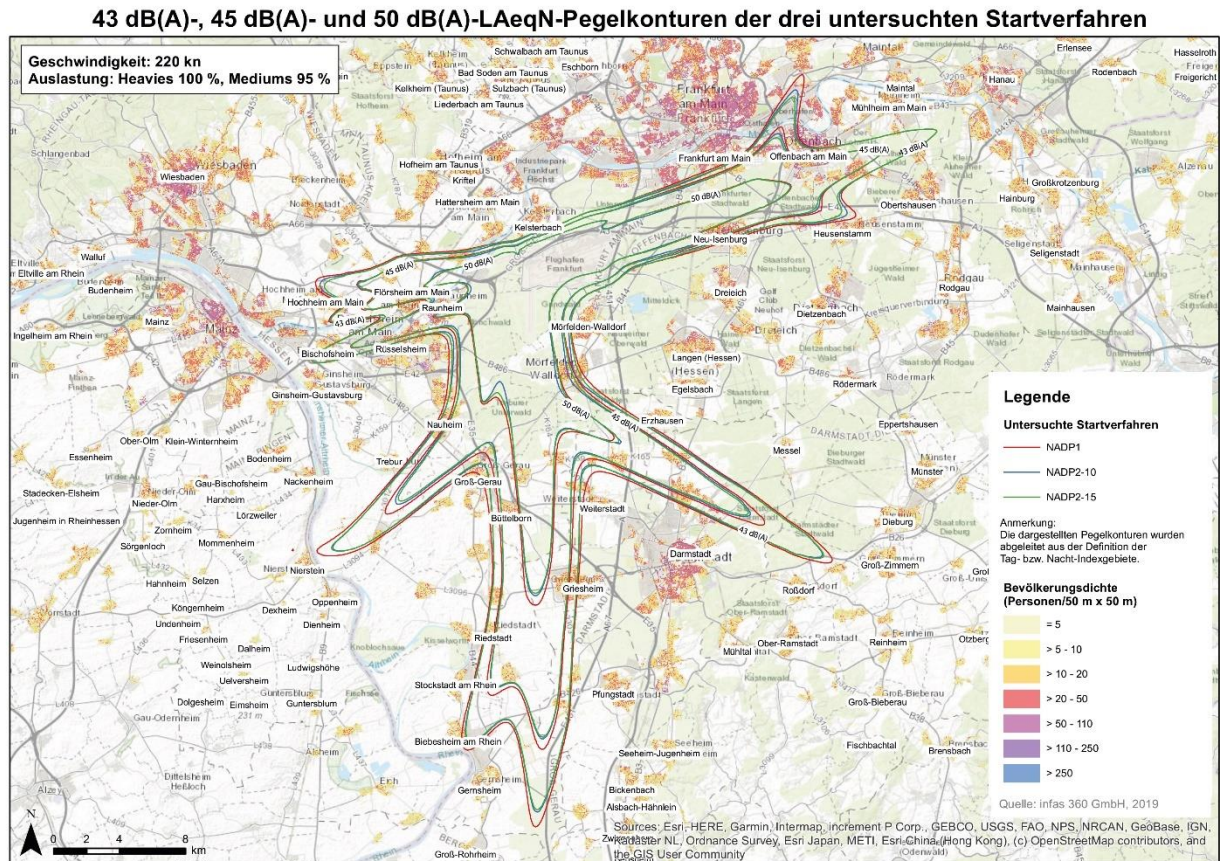
Abbildung 18: Pegelkonturen der Startverfahren in der Nacht, geringe Auslastung



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

Allerdings gibt es in der Nacht eine Ausnahme von diesem Muster: Im Bereich der Konturausprägung der Nordwestabflugstrecken liegen die Konturen der NADP<sub>1</sub>-Konturen z.T. bereits in der  $\geq 43$  dB(A)-Kontur weiter innen. Dieser Befund gilt allerdings nur bei geringer Auslastung der Luftfahrzeuge. Für das NADP<sub>1</sub>-Verfahren liegen die entsprechenden SEL-Werte bei niedriger Auslastung in der hier relevanten Entfernung unter denen der NADP<sub>2</sub>-Verfahren. Wie Abbildung 19 zeigt, liegen bei hoher Auslastung auch hier die NADP<sub>1</sub>-Konturen weiter außen.

Abbildung 19: Pegelkonturen der Startverfahren in der Nacht, hohe Auslastung



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

### 4.3 Szenariobetrachtung 2019: Differenzansatz für ein Gesamtverkehrsszenario

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse, die bereits in den vorangegangenen Kapiteln gewonnen wurden:

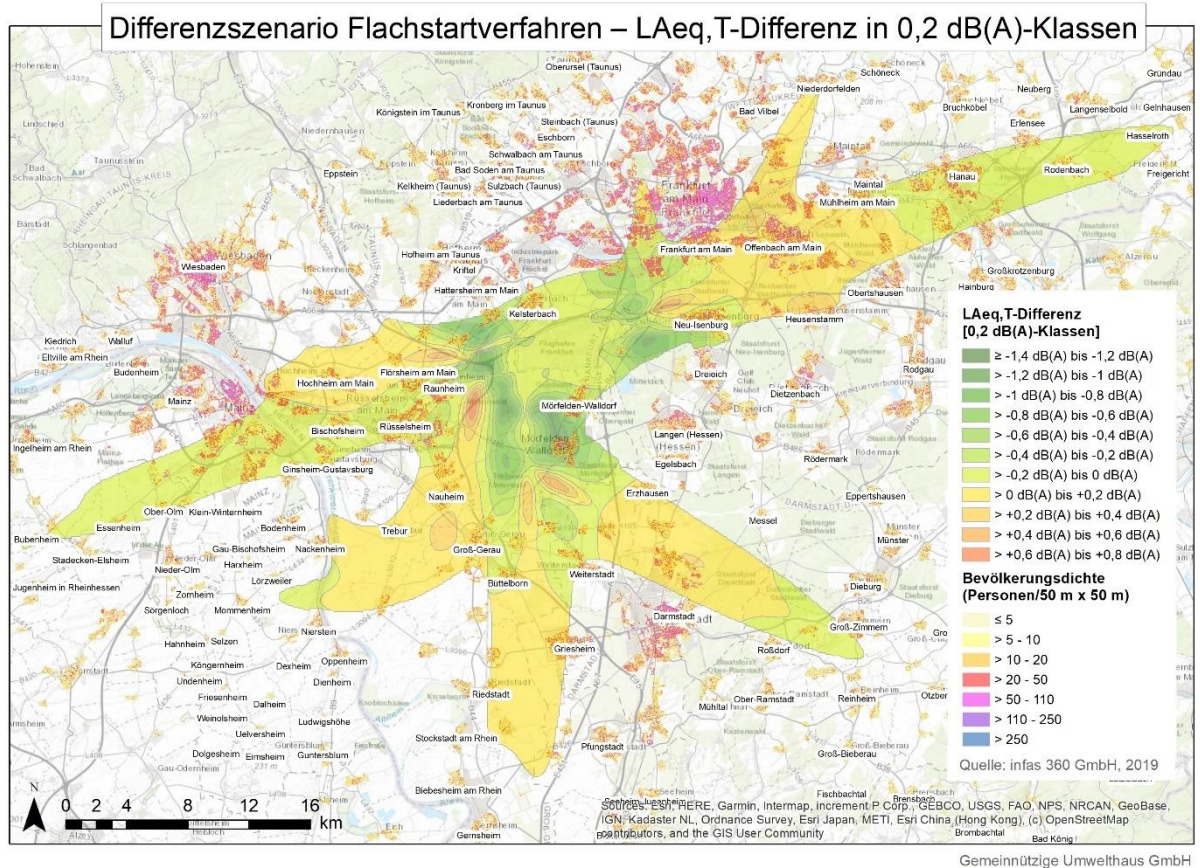
Abbildung 20, welche die Differenz für das Steilstartverfahren (NADP<sub>1</sub>) am Tag darstellt, zeigt in den Gebieten seitlich der Abflugrouten um bis zu 1 dB(A) höhere Pegelwerte. In Wohngebieten, die im Bereich des Cutbacks liegen, wie Mörfelden-Walldorf oder Neu-Isenburg werden die größten Pegelzunahmen erreicht. Unmittelbar unter den Abflugrouten bilden sich kleinere, i.d.R. unbesiedelte, Gebiete aus, in denen das Steilstartverfahren geringere Dauerschallpegel hervorruft; dieser Vorteil des Steilstartverfahrens unmittelbar unter den Abflugrouten endet spätestens nach 15 km Flugstrecke.

Demzufolge ist das Flachstartverfahren, NADP<sub>2-15</sub>, im direkten Vergleich vorzugswürdig.





Abbildung 21: Differenzkarte Tag Szenario Flachstart (NADP2-10) im Vergleich zu NADP2-15



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

Insgesamt lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass Flachstartverfahren für Frankfurt einen Vorteil gegenüber einem Steilstartverfahren bieten. In den besiedelten Gebieten in größerer Entfernung zum Flughafen sowie im Nahbereich seitlich der Flugpfade erzeugt die Anwendung des Steilstartverfahrens höhere Pegelwerte als die Flachstartverfahren. Gebiete unter den Flugpfaden, in denen das Steilstartverfahren Entlastungen hervorruft, sind größtenteils unbesiedelt.

#### 4.4 Szenariobetrachtung 2019: Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Flugzeugmuster

##### 4.4.1 Auswertung der Differenzen zwischen den Startverfahren

Wie in Kapitel 4.3 werden die Unterschiede zwischen den Startverfahren mit Differenzkarten dargestellt. Hierfür werden die Ergebnisse für ein Startverfahren vom Ergebnis für das andere Startverfahren rechnerisch subtrahiert – also etwa Steilstart (NADP1) minus Flachstart (NADP2-10). Das Ergebnis wird grafisch in einer Karte dargestellt. Negative Ergebnisse kennzeichnen in einem solchen Fall Gebiete, in denen das erstgenannte Verfahren besser abschneidet (im Beispiel oben: NADP1); positive Ergebnisse kennzeichnen Gebiete, in denen das letztgenannte Verfahren besser abschneidet (im Beispiel oben: NADP2-10). Am Tag bezieht sich die Auswertung auf Dauerschallpegel; in der Nacht auf Aufwachreaktionen, da sich auf Grundlage

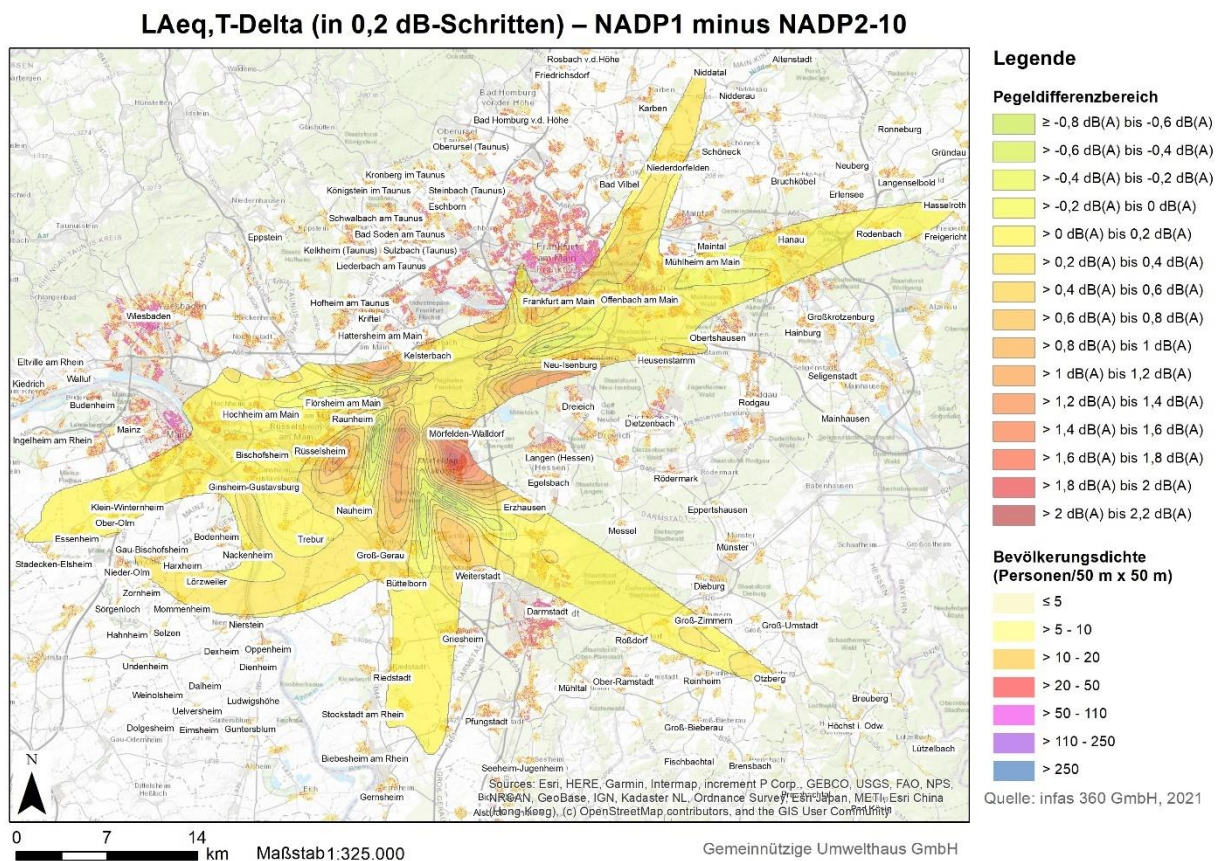
der Maximalpegelverteilungen keine Differenzen darstellen lassen (s.o.) – die Aufwachreaktionen, die auch im FFI 2.0 genutzt werden, basieren aber auf den Maximalpegelverteilungen.

Es existieren Delta-Karten für den Vergleich aller drei Startverfahren untereinander (NADP<sub>1</sub> minus NADP<sub>2-10</sub>; NADP<sub>1</sub> minus NADP<sub>2-15</sub>; NADP<sub>2-10</sub> minus NADP<sub>2-15</sub>). An dieser Stelle wird aber lediglich auf NADP<sub>1</sub> minus NADP<sub>2-10</sub> eingegangen, da die Unterschiede in diesem Vergleich am größten und deshalb auch am besten erkennbar sind.

#### 4.4.1.1 Tag

In Abbildung 22 ist in 0,2 dB-Schritten dargestellt, welche Veränderungen sich aus einem Vergleich zwischen NADP<sub>1</sub> und NADP<sub>2-10</sub> im Dauerschallpegel im Gebiet mit einem Dauerschallpegel  $\geq 48$  dB(A) am Tag ergeben. Ersichtlich ist schon an der Skala, dass es keine Veränderungen von mehr als 2,2 dB(A) gibt. Die Veränderungen in Gebieten, in denen Steilstart besser abschneidet, liegen bei bis zu 0,6 dB(A). Folglich werden die absolut betrachtet größeren Entlastungen in Bezug auf den Dauerschallpegel durch das Flachstartverfahren verursacht.

Abbildung 22: Delta-Karte NADP<sub>1</sub> minus NADP<sub>2-10</sub>, Tag (Dauerschallpegel)



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

Die Verteilung der Be- und Entlastung zeigt die folgende Charakteristik: Die ins hellgrün gehenden Gebiete mit negativen Werten, in denen Steilstart zu einer Abnahme der Dauerschallpegel führt, liegen im Wesentlichen direkt unterhalb des Flugpfads im Nahbereich des Flughafens, während in den Gebieten seitlich die rötlichen Gebiete liegen, in denen Flachstart zu einer Abnahme der Dauerschallpegel führt.

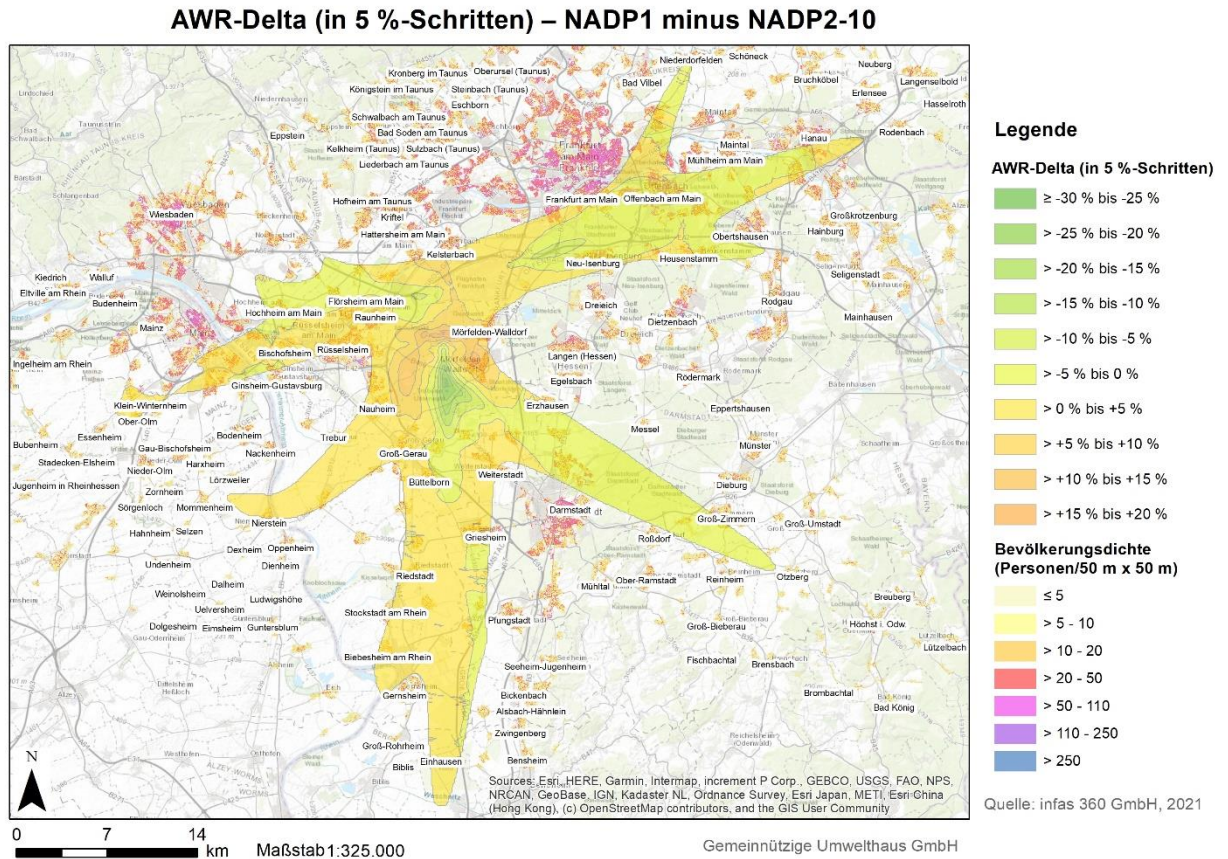
Eine Abweichung von diesem Muster stellen die Gebiete direkt unterhalb des Flugpfads in größerer Entfernung dar: Dort sind keine Entlastungen durch das Steilstartverfahren mehr zu erkennen, sondern vielmehr durch das Flachstartverfahren. Dies erscheint zunächst unlogisch, da es nicht zu dem o.g. Befund („Flachstart ist direkt unter dem Flugpfad lauter“) passt. Dass dies so ist, liegt darin begründet, dass das Flachstartverfahren an einem gewissen Punkt höher ist als das Steilstartverfahren (siehe hierfür auch Abbildung 1). Somit sind die Pegel dann auch direkt unterhalb des Flugpfads geringer. Der seitliche Effekt (der dann theoretisch höheren Pegel) schlägt aufgrund der großen Entfernung in diesen Gebieten nicht mehr zu Buche.

Betrachtet man, wie die besiedelten Gebiete in Frankfurt verteilt sind – überwiegend seitlich von den direkten Flugpfaden – wird auch deutlich, wieso im Gesamtergebnis (s.u.) Flachstartverfahren zu den besseren Ergebnissen führen: Die Gebiete, in denen die Vorteile des Steilstartverfahrens überwiegen, liegen überwiegend in nicht oder weniger dicht besiedelten Gebieten, so dass die Gesamtbilanz im Wesentlichen durch die seitlich befindlichen Siedlungsgebiete dominiert wird. Hier führen die Vorteile des Flachstarts dann zu den schmaleren Konturen, wenn – anders als in dieser Darstellung – einzelne Indexgebiete ausgewertet werden.

#### **4.4.1.2 Nacht**

Für die Nacht sind in Abbildung 23 die Differenzen zwischen  $NADP_1$  und  $NADP_{2-10}$  in Bezug auf die verursachten Aufwachreaktionen in Bezug auf das Gebiet mit einem Dauerschallpegel  $\geq 43$  dB(A) dargestellt. Diesen liegen, wie bereits oben beschrieben, Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen zu Grunde. Eine direkte Darstellung von Differenzkarten in Bezug auf Maximalpegel ist nicht möglich, weil hier die Häufigkeit nicht dargestellt werden könnte.

Abbildung 23: Delta-Karte NADP<sub>1</sub> minus NADP<sub>2-10</sub>, Nacht (Aufwachreaktionen)



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

Die Unterschiede sind in diesem Fall prozentual angegeben, die insgesamt bis zu maximal 30% betragen. Anders als am Tag sind die absolut größten Verbesserungen in der Nacht durch das Steilfahrtverfahren gegeben, während das Flachstartverfahren bis maximal 20% Verbesserung bringt. Allerdings liegen die prozentual höheren Vorteile des Steilstarts in unmittelbarer Nähe zum Flughafen und somit in unbesiedeltem Gebiet.

Die Charakteristik der Verteilung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren ist ähnlich der am Tag: Unterhalb des Flugpfads im Nahbereich des Flughafens überwiegen die Vorteile des Steilstarts, während das Flachstartverfahren in den Gebieten seitlich vom Flugpfad Vorteile hat. Allerdings sind die Gebiete, in denen der Steilstart unterhalb des Flugpfads Vorteile hat, breiter als für die Dauerschallpegel am Tag. Dennoch passen auch diese Ergebnisse zu den Ergebnissen der Indexgebiete (s.u.), und erklären, wieso die Konturen für das Flachstartverfahren schmaler sind.

## 4.4.2 Auswertung der Gebietskonturen

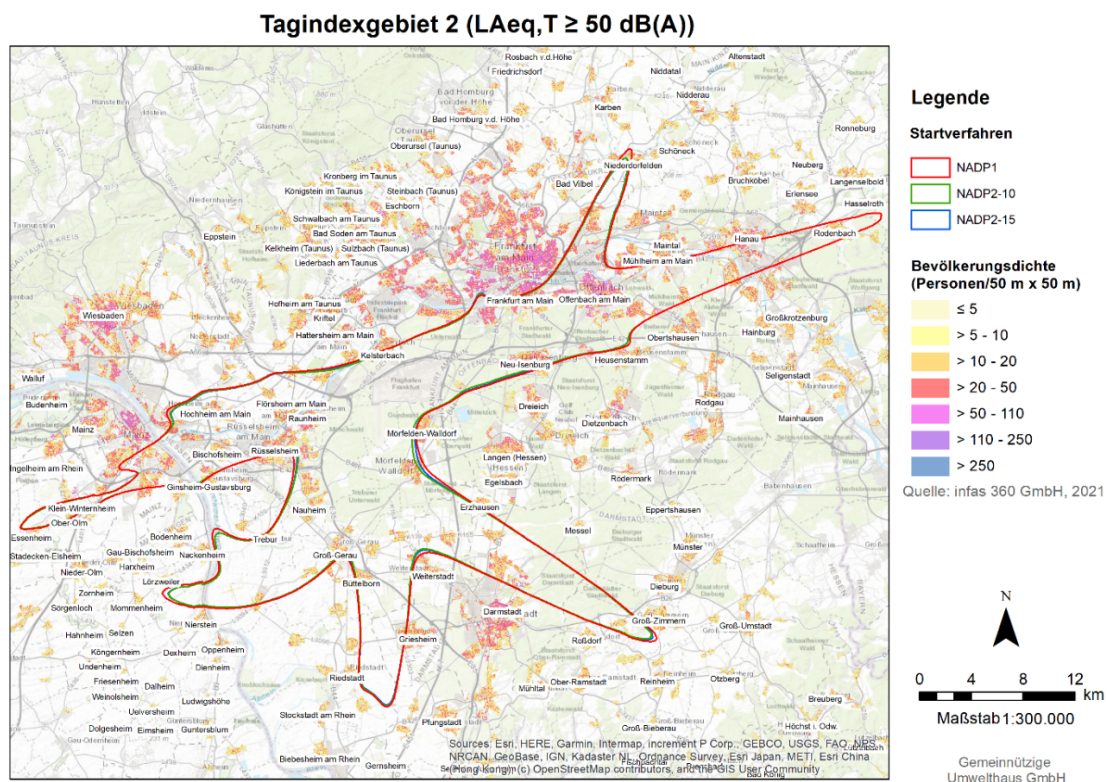
### 4.4.2.1 Tag

Da die Berechnungen mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Flugzeugmuster in Anlehnung an den FFI 2.0 erfolgten, liegen entsprechend mehrere Gebietskonturen für den Tag und die Nacht vor. Die Ergebnisse werden hier am Tag beispielhaft für das Gebiet mit einem Dauerschallpegel  $\geq 50$  dB(A) dargestellt.

In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass die Unterschiede insgesamt nicht allzu groß sind. Dort wo Unterschiede erkennbar sind, liegt aber auch hier das Gebiet für die Berechnung mit NADP<sub>1</sub> (Steilstart) an allen Stellen weiter außen. Dies gilt sowohl im Nahbereich des Flughafens (Mörfelden-Walldorf) als auch in größerer Entfernung (z.B. südöstlich von Darmstadt oder nordöstlich von Offenbach und Frankfurt). In den meisten Fällen gilt dies auch in den hier nicht dargestellten anderen Gebieten. Abweichungen hiervon – so dass NADP<sub>2</sub> die äußere Kontur erzeugt – gibt es lediglich im Gebiet mit einem Dauerschallpegel von  $\geq 60$  dB(A) (dort liegen die relevanten Bereiche aber erneut im unbesiedelten Gebiet) und wiederum bei den Nordwest-Abflugrouten im Gebiet mit einem Dauerschallpegel von  $\geq 55$  dB(A).

Veränderungen durch die Startverfahren innerhalb der Konturen sind in diesen Auswertungen nicht ersichtlich. Hierfür erfolgt in Kapitel 6 die Auswertung nach Indexpunkten.

Abbildung 24: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – Kontur Tagindexgebiet 2



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

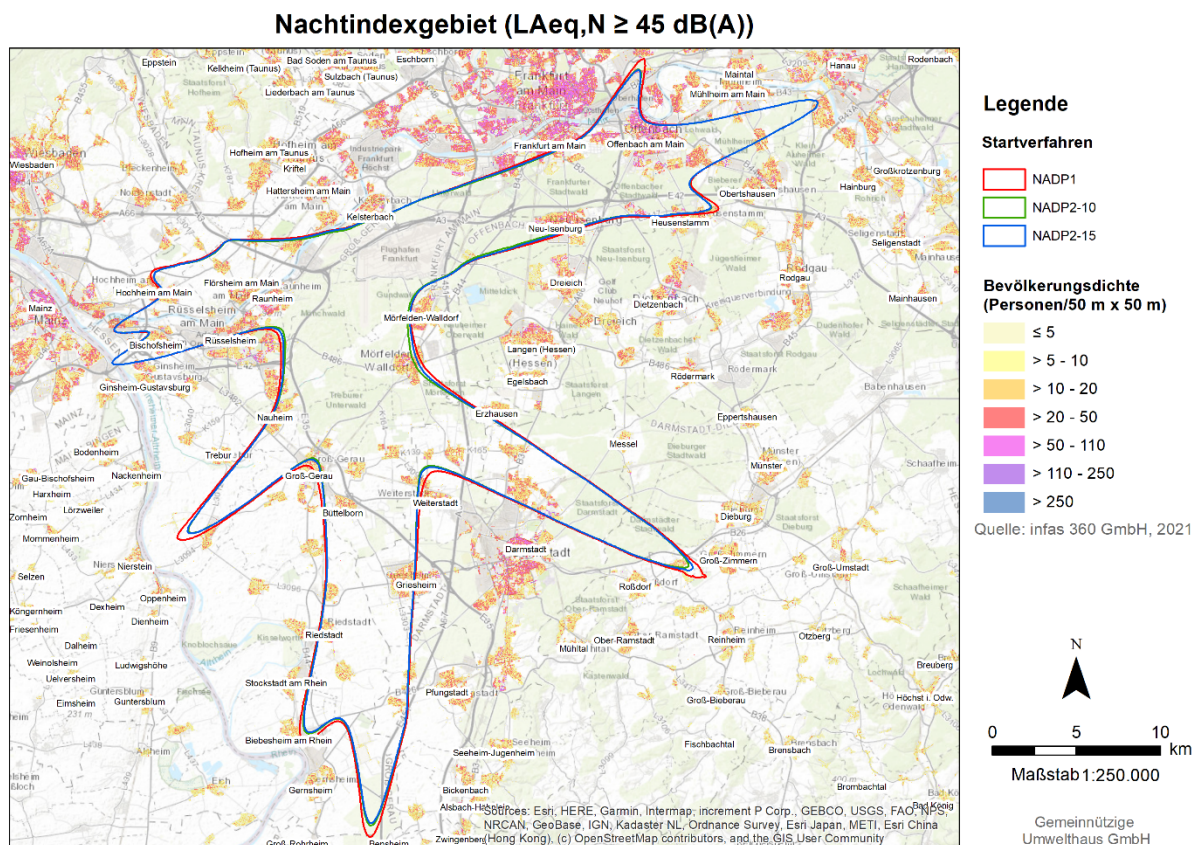
#### 4.4.2.2 Nacht

In Anlehnung an den FFI 2.0 liegen auch für die Nacht mehrere Gebietskonturen vor. Die Ergebnisse werden für die Nacht beispielhaft anhand des Gebiets mit einem Dauerschallpegel von  $\geq 48$  dB(A) Nachtindexgebiet dargestellt.

Auch in der Nacht ist das oben beschriebene Muster zu erkennen: An den Stellen, wo Unterschiede zu verzeichnen sind, liegt die NADP<sub>1</sub>-Kontur jeweils weiter außen und bildet somit die größte Kontur – wodurch insgesamt mehr Siedlungsbereiche betroffen sind als bei den Flachstartverfahren. Abweichungen hiervon im besiedelten Gebiet gibt es auch in der Nacht lediglich im Bereich der Nordwestabflugstrecken im Hochbetroffenengebiet.

Veränderungen durch die Startverfahren innerhalb der Konturen sind in diesen Auswertungen nicht ersichtlich. Hierfür erfolgt in Kapitel o die Auswertung nach Indexpunkten.

Abbildung 25: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – Kontur Nachtindexgebiet



Quelle: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH

### 4.4.3 Auswertung der Indexpunkte

#### 4.4.3.1 Tag

Im Gegensatz zur Betrachtung der Gebietskonturen in Form von Karten, enthalten die Auswertungen der Indexpunkte auch Aussagen über die Veränderungen innerhalb der Konturen: Nach Berechnung der Gebietsabgrenzung der Gebiete erfolgt die Auswertung der betroffenen Personen innerhalb dieser Gebiete und die Ermittlung der Lärmwirkung in Anlehnung an den FFI 2.0. Am Tag wird hierfür ausgewertet, wie viele der in dem Gebiet lebenden Personen als hochbelästigt („Highly Annoyed“) gelten. Ausschlaggebend hierfür ist der Dauerschallpegel, der im gesamten betrachteten Gebiet in 1 dB-Schritten berechnet wird.<sup>16</sup> Insofern werden auf diese Weise auch die Veränderungen der Dauerschallpegel innerhalb der betrachteten Gebiete berücksichtigt, und nicht nur die Veränderung der Gebietsgrenzen.

Wie Abbildung 26 zu entnehmen ist, liegen die Ergebnisse in sämtlichen betrachteten Gebieten für das Steilstartverfahren (NADP<sub>1</sub>) über denen der Flachstartverfahren (NADP<sub>2</sub>), wobei NADP<sub>2-10</sub> in allen Gebieten am besten abschneidet. Der Unterschied beträgt bis zu 6,6 Indexpunkte (L<sub>Aeq</sub> ≥ 48 dB(A)). Prozentual ausgedrückt, beträgt der Unterschied selbst im Gebiet L<sub>Aeq</sub> ≥ 60 dB(A) – trotz der in Indexpunkten deutlich geringeren Abnahme von 0,5 Indexpunkten – 18%.

Der Vergleich von NADP<sub>1</sub> und NADP<sub>2-15</sub> zeigt auch, dass der Unterschied nicht ausschließlich der veränderten Schubrücknahme zuzuordnen ist: selbst bei identischer Schubrücknahme in 1.500 ft Höhe, schneidet NADP<sub>2-15</sub> noch um bis zu 4,5 Indexpunkte besser ab.

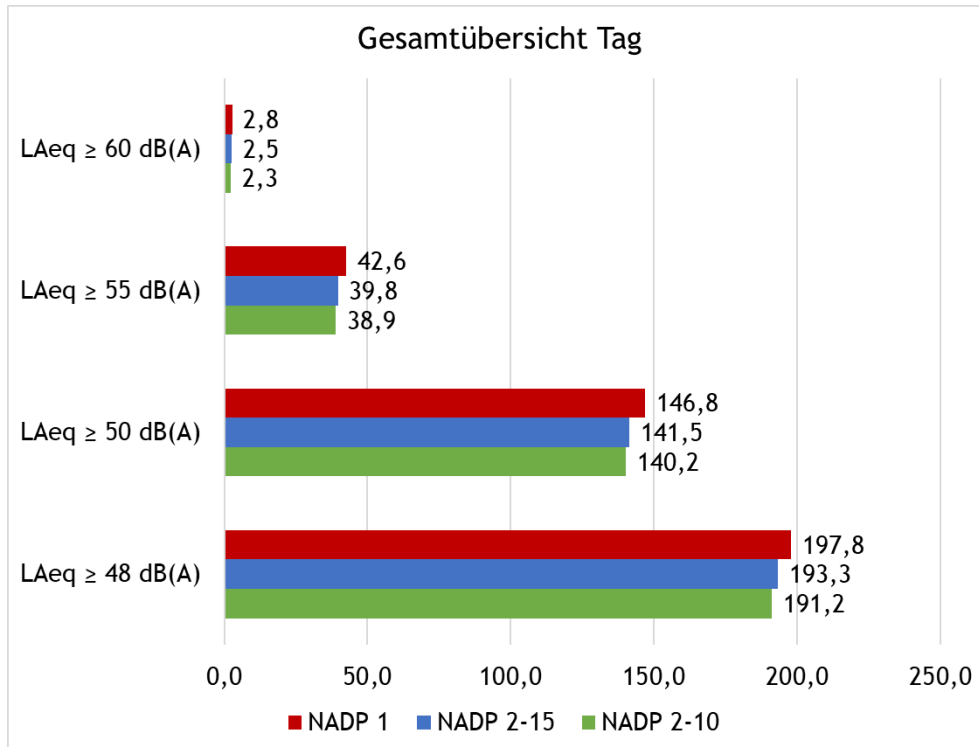
Die kommunalen Auswirkungen können aber zum größten Teil anhand der oben abgebildeten Karten nachvollzogen werden: Die größten Abnahmen durch NADP<sub>2</sub> über alle Gebiete hinweg finden in Frankfurt am Main, Mörfelden-Walldorf, Neu-Isenburg und Rüsselsheim statt.

---

<sup>16</sup> Weiterführende Informationen zum genauen Vorgehen sind den o.g. Quellen zum FFI 2.0 zu entnehmen.



Abbildung 26: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – Indexpunkte Tag



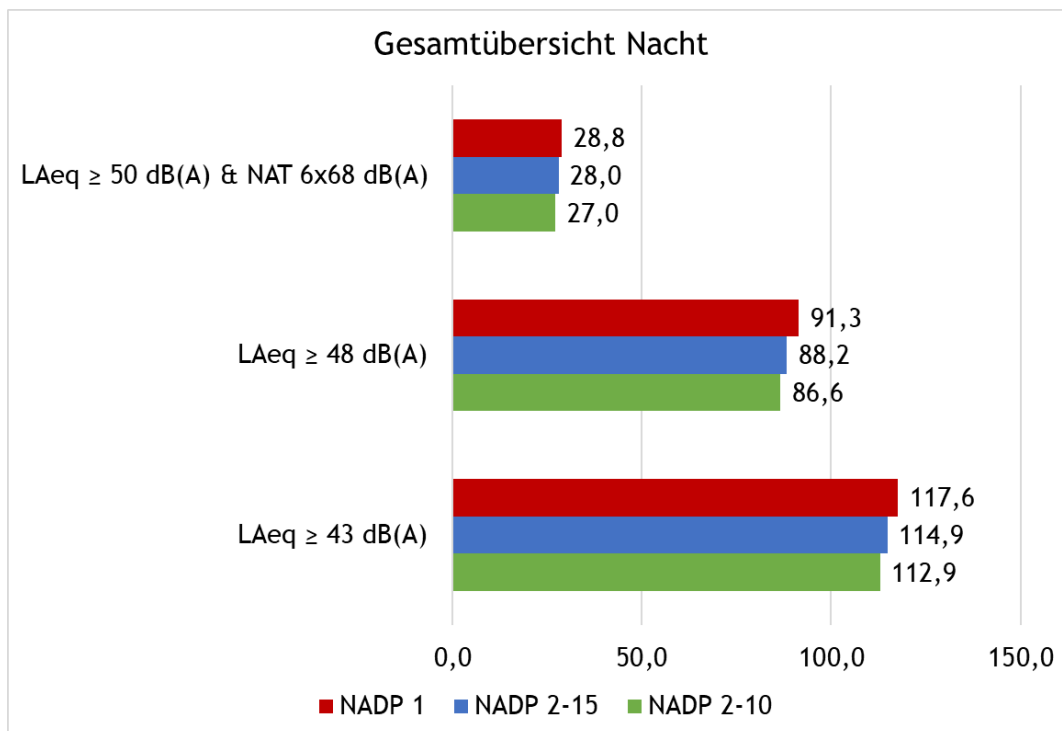
Quelle: Eigene Darstellung

#### 4.4.3.2 Nacht

Wie am Tag gilt auch in der Nacht, dass die Auswertung der Indexpunkte auch die Veränderungen innerhalb der Gebiete berücksichtigt. Im Gegensatz zum Tag wird die Lärmwirkung in der Nacht aber durch zusätzliche, durch Fluglärm verursachte und rechnerisch ermittelte, EEG-Aufwachreaktionen bestimmt. Anders als am Tag, wo die Lärmwirkung durch Dauerschallpegel hinreichend gut abgebildet werden kann, erfolgt die Ermittlung der Lärmwirkung in der Nacht auf Basis von Maximalpegeln. Die Auswertung der Lärmwirkung innerhalb der ermittelten Gebietsabgrenzungen erfolgt somit auf Basis der berechneten Maximalpegelhäufigkeitsverteilung.

Auch in diesen, auf Maximalpegeln basierenden, Ergebnissen schneidet NADP<sub>2-10</sub> immer am besten ab, gefolgt von NADP<sub>2-15</sub>. NADP<sub>1</sub>, also Steilstart, führt in allen Fällen zum schlechtesten Ergebnis. Der Unterschied beträgt bis zu 4,7 Indexpunkte (LAeq ≥ 43 dB(A)). Im Gebiet LAeq ≥ 60 dB(A) & NAT 6x68 dB(A) liegt der Unterschied zwischen NADP<sub>2-10</sub> und NADP<sub>1</sub> bei 6%.

Abbildung 27: Berechnung auf Basis DES 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Muster – FNI 2.0



Quelle: Eigene Darstellung

Auch für die Nacht erfolgen die größten Entlastungen in Frankfurt am Main, Mörfelden-Walldorf, Rüsselsheim, Neu-Isenburg und Groß-Gerau.

## 5 Fazit

Ziel der „Untersuchung Startverfahren“ war es, gemäß Maßnahmenprogramm aktiver Schallschutz, herauszufinden, welches das für den Standort Frankfurt insgesamt lärmgünstigere Verfahren ist. Angesichts der fehlenden Möglichkeit einer flächendeckenden Beurteilung auf Basis einzelner Messstationen wurde entschieden, diese Bewertung mithilfe von Berechnungen durchzuführen.

Um die Berechnungen in Anlehnung an die üblichen Lärmberechnungen gemäß FFI 2.0 durchzuführen, wurde zunächst die Erstellung von Startprofilen für drei Startverfahren und sechs Flugzeugtypen nach ECAC Doc. 029 beauftragt, die dann in das AzB-Format zu übertragen waren. Die abgebildeten Startverfahren waren: NADP<sub>1</sub>, NADP<sub>2-10</sub> (Schubrücknahme bei 1.000 ft) und NADP<sub>2-15</sub> (Schubrücknahme bei 1.500 ft). Außerdem sollten die Startprofile zwei unterschiedliche Auslastungen (hohes und niedriges Startgewicht) sowie eine Situation mit (220 kn) und ohne Geschwindigkeitsbegrenzung abbilden. Insgesamt wurden hierfür 72 unterschiedliche AzB-kompatible Startprofile erstellt auf deren Basis dann verschiedene Berechnungen durchgeführt wurden – sowohl für Einzelabflüge als auch für Verkehrsszenarien.

Vergleichend gegenübergestellt wurden die Ergebnisse der Verfahren NADP<sub>1</sub>, NADP<sub>2-10</sub> und NADP<sub>2-15</sub>. Dargestellt wurden die Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 220 kn, da eine solche Begrenzung auf fast allen Strecken am Standort Frankfurt existiert.

## Ergebnisse der Lärmberechnungen

In der Gesamtschau bringt das NADP<sub>1</sub>-Verfahren keine substanziellen Vorteile. Vielmehr zeigen die – in dem vereinfachten Rahmen der Studie – durchgeführten Berechnungen, dass die untersuchten Flachstartverfahren im Vergleich zu dem untersuchten Steilstartverfahren für den Standort Frankfurt, mit seiner Besiedlungsstruktur, grundsätzlich etwas lärmgünstiger sind. Um diese Berechnungen durchführen zu können musste auf stark vereinfachte Modelle zurückgegriffen werden. Diese Vereinfachungen waren notwendig, um die Berechnungen durchführen zu können und mit nicht verfügbaren Daten umgehen zu können. Dies hat zur Folge, dass eine Übertragbarkeit auf die Realität nicht automatisch als gegeben angenommen werden kann.

Im Gesamtergebnis lassen sich diese Berechnungen in der folgenden Tabelle zusammenfassen:

Tabelle 5: Gesamtergebnis

|   | <i>Deskriptive Auswertung von Footprints</i>  | <i>Szenario 2019: Nur 6 Flugzeugmuster</i>  | <i>Szenario 2019: Differenzansatz</i>  | <i>Szenario 2019: Umlegen der Profile</i>  |
|---|---|---|--|--|
| <i>Verkehrsmenge</i>                                    | Einzelner Abflug  | Alle Bewegungen der 6 Muster in den 6vM 2019  | 100% 6vM 2019  | 100% 6vM 2019  |
| <i>Bezugspunkt der Ergebnisse</i>                       | Generischer Geradeausflug   | Berechnung neuer Konturen nur für die 6 Muster  | Unveränderte AzB-Berechnung 2019 (inkl. Addition der Pegeldifferenzen der Startverfahren)  | Berechnung neuer Konturen mit veränderten Startprofilen  |
| <i>Ergebnis</i>   | NADP2-10 mit geringster Flächengröße, seitlich des Flugpfads deutliche Reduktion bei NADP2-10 | 3-6% Flächenreduktion bei NADP2-10<br>5-10% geringere Betroffene bei NADP2-10 (tags) bzw. bis zu 25% (nachts) | Bis zu 1,2 dB(A) Reduktion in besiedeltem Gebiet im Nahbereich durch NADP2-10, marginale Mehrbelastung lediglich über unbesiedelten Gebieten | Reduktion der Indexpunkte um überwiegend 5% durch NADP2-10 (je nach Gebiet 3% bis 18% Reduktion), Reduktion AWR um 0,2 IP in besiedelten Gebiet durch NADP2-10 |
| <i>Vorteilhaftestes Startverfahren für den Standort</i> | NADP2-10  | NADP2-10  | NADP2-10   | NADP2-10   |

Quelle: Eigene Darstellung

- Zur **deskriptiven Auswertung der Footprints** lässt sich als Ergebnis zusammenfassen, dass unter Berücksichtigung der Siedlungsstruktur um den Flughafen Frankfurt die Konturauswertungen sowohl für SEL als auch LAMax einen Vorteil des NADP2-Verfahrens zeigen, da die Flächeninhalte der NADP2-Footprints geringer sind als die der NADP1-Footprints. Das NADP2-Verfahren ist somit vorteilhafter als das NADP1-Verfahren, insbesondere hinsichtlich der relevanten Pegelbereiche, in denen höhere Betroffenzahlen zu erwarten wären.
- Zur **Szenariobetrachtung 2019, bei der nur die sechs Luftfahrzeugmuster** mit veränderten Startprofilen betrachtet wurden, ist im Ergebnis zusammenzufassen: Über alle Auswertungen hinweg zeigen sich hinsichtlich der Veränderungen der Dauerschallpegel jeweils die gleichen Ergebnisse: die NADP2-Verfahren, also Flachstart, schneiden im Vergleich mit dem NADP1-Verfahren, also Steilstart, jeweils besser ab, sowohl

hinsichtlich der betroffenen Fläche als auch hinsichtlich der betroffenen Personenzahlen mit einem Unterschied in der Größenordnung von ca. 5-10%. Deutlich wird in den Berechnungen auch, dass die Startmasse im direkten Vergleich mit den Startverfahren einen erheblich größeren Einfluss auf die Lärmbelastung hat.

- Zur **Szenariobetrachtung 2019 mittels eines Differenzansatzes für ein Gesamtverkehrsszenario** lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass das NADP<sub>2</sub>-Verfahren für Frankfurt einen Vorteil gegenüber einem NADP<sub>1</sub> Verfahren bietet. In den besiedelten Gebieten in größerer Entfernung zum Flughafen sowie im Nahbereich seitlich der Flugpfade erzeugt die Anwendung des NADP<sub>1</sub> Verfahrens höhere Pegelwerte (bis zu +1,2 dB(A)) als die NADP<sub>2</sub> Verfahren. Gebiete unter dem Flugpfaden, in denen das NADP<sub>1</sub> Verfahren geringe Entlastungen (max. -0,4 dB(A)) hervorruft, sind unbesiedelt. Das NADP<sub>2-10</sub> Verfahren mit einem früheren Cutback ist gegenüber dem NADP<sub>2-15</sub> Verfahren vorteilhafter.
- Abschließend ergibt die **Szenariobetrachtung 2019 mit Übertragung der veränderten Startprofile auf alle Flugzeugmuster** ebenfalls, dass das NADP<sub>2</sub>-Verfahren für Frankfurt einen Vorteil gegenüber einem NADP<sub>1</sub> Verfahren bietet. In allen Konturgebieten, sowohl am Tag als auch in der Nacht, bedingen die NADP<sub>2</sub> Verfahren eine Reduktion der Indexpunkte zwischen 3% bis 18%.

## Standortbedingte Faktoren und Übertragbarkeit

Aus der Untersuchung ergibt sich auch, dass die Ergebnisse für den Flughafen Frankfurt nicht ohne Weiteres auf andere Standorte übertragbar sind. Die spezifische Siedlungsstruktur um den Flughafen Frankfurt, die sich seit den 1970er Jahren entlang der Abflugstrecken entwickelt hat, führt dazu, dass die Lärmbelastung direkt unterhalb der Flugpfade weniger stark ins Gewicht fällt als die Effekte seitlich davon. Dies unterscheidet Frankfurt von anderen Flughafenstandorten, für die deshalb das NADP<sub>1</sub>-Verfahren besser sein kann, und muss bei der Bewertung der Startverfahren berücksichtigt werden.

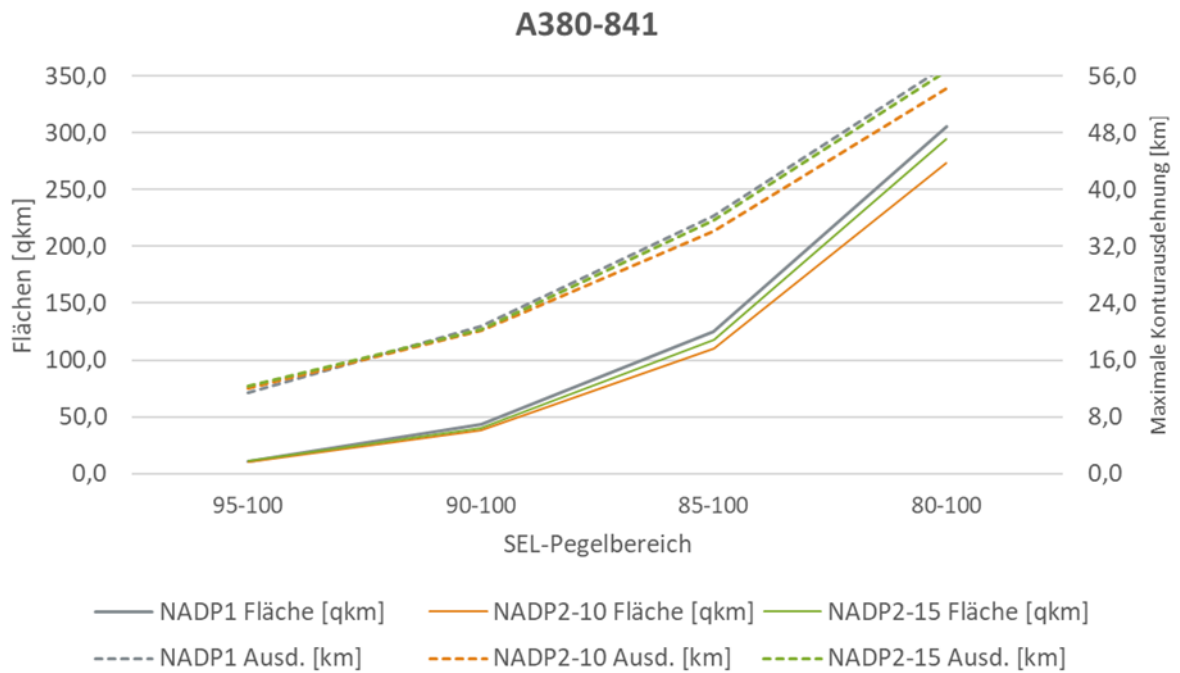
## Methodische Herausforderungen und Unsicherheiten

Die Berechnungen basieren auf den verfügbaren Daten und den bestmöglichen Annahmen. Es war nicht möglich, für alle Flugbewegungen passgenaue Profile zu erstellen, da die notwendigen Daten von Flugzeug- und Triebwerksherstellern teilweise nicht verfügbar waren und der Aufwand für die Vielzahl an Flugzeugmustern im Rahmen der Studie nicht leistbar gewesen wäre. Aber auch die Übertragung der Startprofile von ECAC in AzB konnte nur unter Anwendung von Setzungen durchgeführt werden. Dies führte zu Unsicherheiten in den Ergebnissen, die insbesondere die absoluten Lärmwerte betreffen. Daher wurde der Schwerpunkt auf die Differenzierung der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Verfahren gelegt, um relative Vor- und Nachteile der Verfahren zu ermitteln.

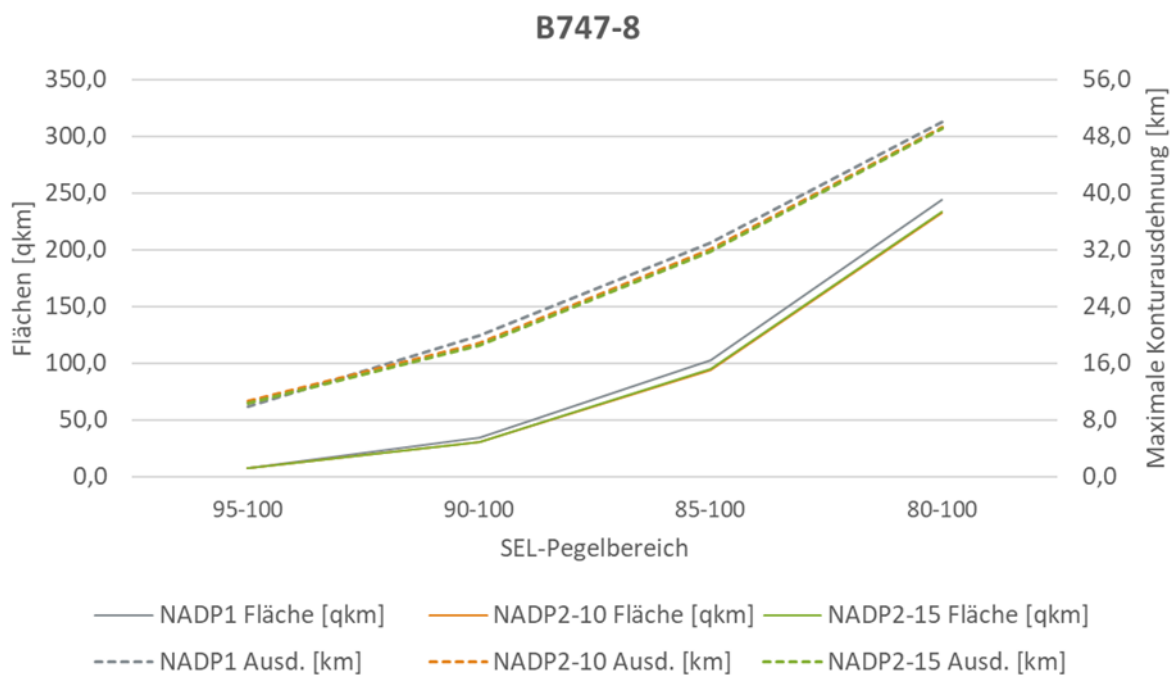
Bei der Interpretation der oben genannten Ergebnisse ist auch zu berücksichtigen, dass die aufgezeigten Unterschiede anders sein dürften als in der Realität: zum einen aufgrund der Unsicherheiten und Setzungen, die für die Untersuchung gemacht werden mussten; zum anderen, weil in der Realität nicht alle Airlines das gleiche Verfahren fliegen (wie in der Berechnung angenommen). Eine Übertragbarkeit auf die Realität ist somit nicht automatisch gegeben.

## 6 Anhang

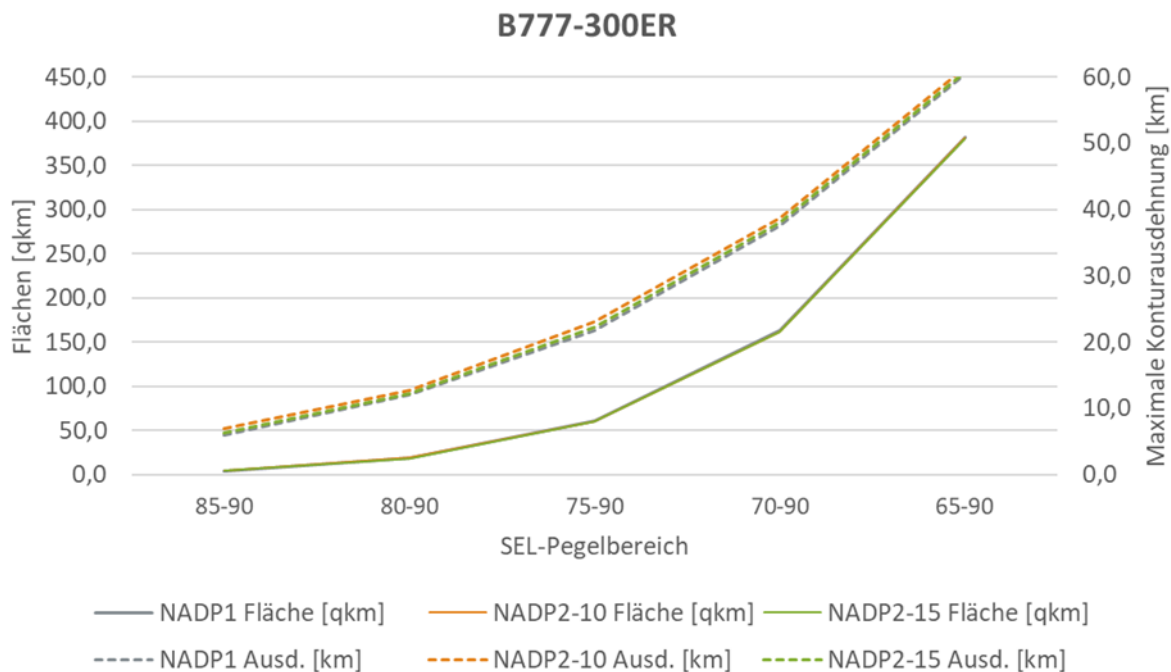
### 6.1 Anhang A: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints für die Startverfahren NADP<sub>1</sub> (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP<sub>2-15</sub> (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) einzelner Flugzeugmuster



Quelle: Fraport AG

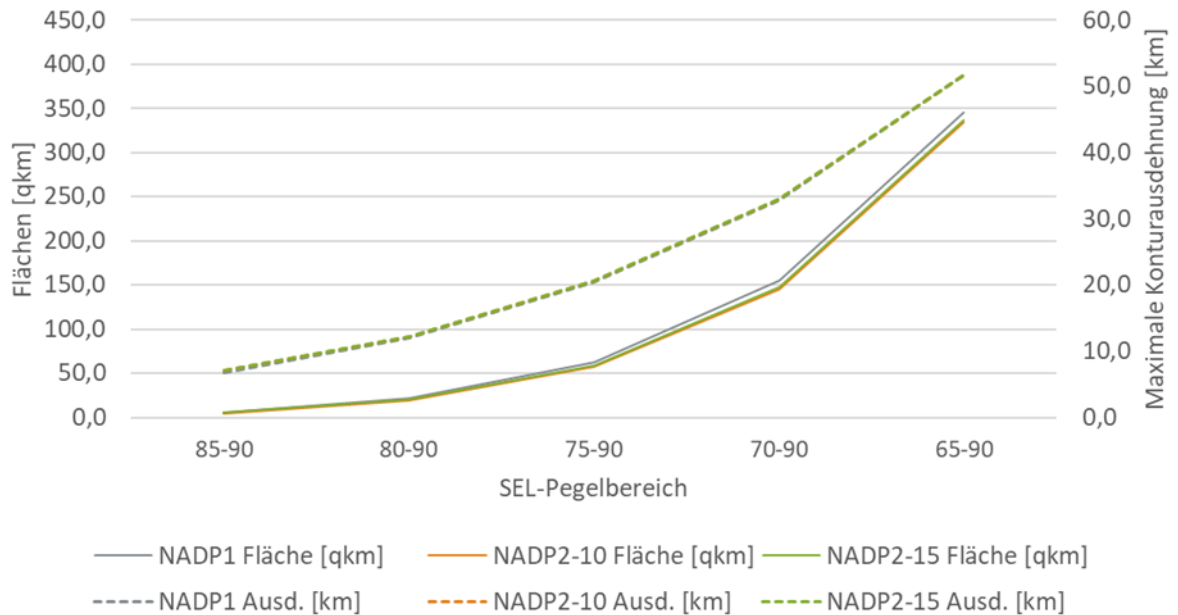


Quelle: Fraport AG



Quelle: Fraport AG

### B737-800



Quelle: Fraport AG

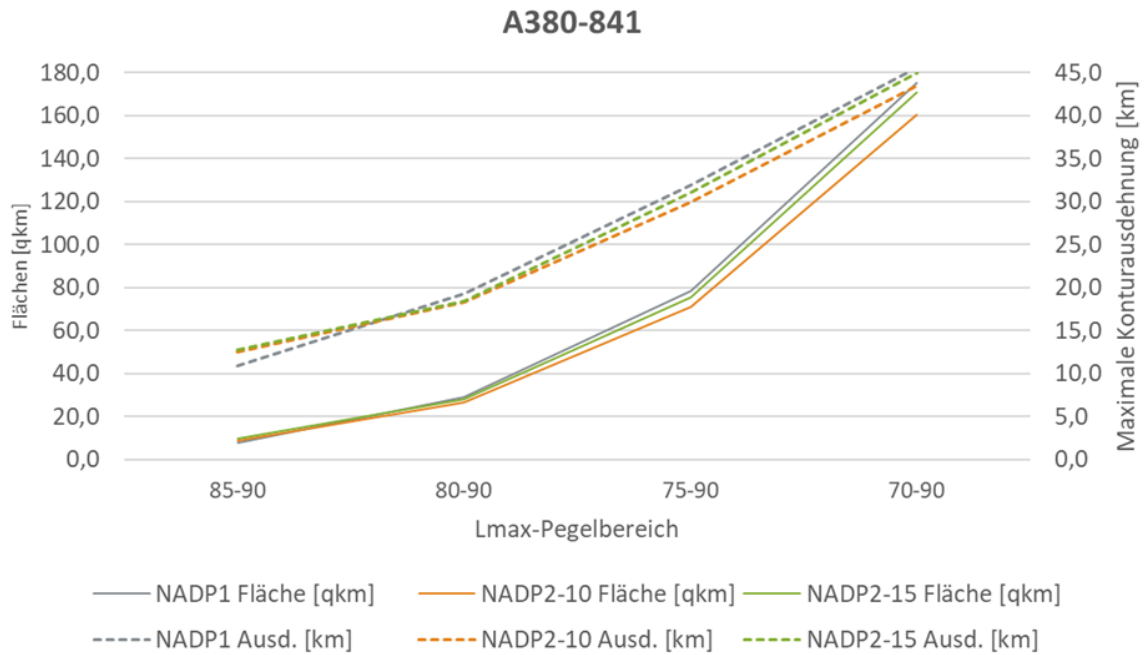
Tabelle 6: Flächen und maximale Konturausdehnung der SEL-Footprints mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn)

|             | NADP1<br>Fläche [qkm] | NADP2-10<br>Fläche [qkm] | NADP2-15<br>Fläche [qkm] | NADP1<br>Ausd. [km] | NADP2-10<br>Ausd. [km] | NADP2-15<br>Ausd. [km] |
|-------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| <b>B744</b> |                       |                          |                          |                     |                        |                        |
| 95-100      | 7,2                   | 7,7                      | 7,2                      | 9,7                 | 10,6                   | 10,4                   |
| 90-100      | 32,7                  | 29,0                     | 29,1                     | 19,5                | 18,0                   | 17,8                   |
| 85-100      | 95,9                  | 87,3                     | 88,3                     | 32,2                | 31,0                   | 30,8                   |
| 80-100      | 224,0                 | 210,3                    | 212,5                    | 48,2                | 47,2                   | 47,2                   |
| <b>A380</b> |                       |                          |                          |                     |                        |                        |
| 95-100      | 10,5                  | 10,3                     | 11,0                     | 11,4                | 12,0                   | 12,3                   |
| 90-100      | 43,2                  | 38,3                     | 40,1                     | 20,8                | 20,1                   | 20,3                   |
| 85-100      | 124,6                 | 110,6                    | 117,9                    | 36,3                | 34,1                   | 35,6                   |
| 80-100      | 305,2                 | 273,7                    | 294,1                    | 57,4                | 54,3                   | 56,7                   |
| <b>B748</b> |                       |                          |                          |                     |                        |                        |
| 95-100      | 7,6                   | 8,1                      | 7,7                      | 9,9                 | 10,6                   | 10,4                   |
| 90-100      | 35,1                  | 31,2                     | 31,0                     | 19,9                | 18,8                   | 18,5                   |
| 85-100      | 102,5                 | 94,6                     | 95,3                     | 32,9                | 32,0                   | 31,8                   |
| 80-100      | 243,9                 | 232,1                    | 233,4                    | 50,1                | 49,2                   | 49,1                   |

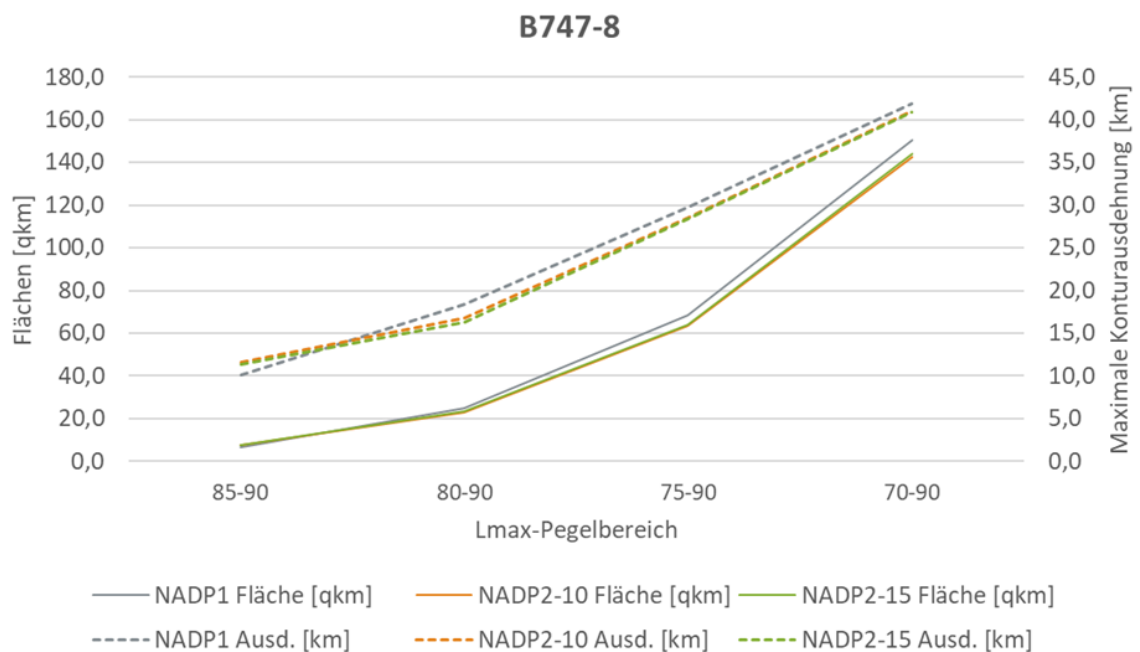


|             | NADP1<br>Fläche [qkm] | NADP2-10<br>Fläche [qkm] | NADP2-15<br>Fläche [qkm] | NADP1<br>Ausd. [km] | NADP2-10<br>Ausd. [km] | NADP2-15<br>Ausd. [km] |
|-------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| <b>B777</b> |                       |                          |                          |                     |                        |                        |
| 85-90       | 4,4                   | 4,6                      | 4,4                      | 5,9                 | 7,0                    | 6,2                    |
| 80-90       | 18,6                  | 19,0                     | 18,7                     | 12,0                | 12,8                   | 12,2                   |
| 75-90       | 60,5                  | 60,6                     | 60,0                     | 21,7                | 23,2                   | 22,3                   |
| 70-90       | 162,7                 | 161,6                    | 161,3                    | 37,6                | 38,7                   | 38,1                   |
| 65-90       | 382,1                 | 381,5                    | 380,5                    | 60,4                | 61,5                   | 60,8                   |
| <b>A320</b> |                       |                          |                          |                     |                        |                        |
| 85-90       | 4,5                   | 5,3                      | 5,3                      | 5,2                 | 6,6                    | 6,3                    |
| 80-90       | 21,3                  | 20,8                     | 22,0                     | 11,6                | 11,9                   | 11,9                   |
| 75-90       | 69,1                  | 64,9                     | 67,2                     | 22,2                | 22,3                   | 22,0                   |
| 70-90       | 182,4                 | 174,3                    | 177,7                    | 36,3                | 36,4                   | 36,2                   |
| 65-90       | 409,2                 | 398,7                    | 402,6                    | 55,1                | 55,2                   | 55,0                   |
| <b>B738</b> |                       |                          |                          |                     |                        |                        |
| 85-90       | 5,4                   | 5,0                      | 5,1                      | 6,8                 | 7,1                    | 7,1                    |
| 80-90       | 21,8                  | 19,6                     | 20,2                     | 12,0                | 12,3                   | 12,2                   |
| 75-90       | 63,0                  | 57,4                     | 58,8                     | 20,5                | 20,6                   | 20,6                   |
| 70-90       | 154,8                 | 145,7                    | 147,9                    | 32,8                | 32,9                   | 32,9                   |
| 65-90       | 345,8                 | 334,3                    | 336,9                    | 51,6                | 51,8                   | 51,7                   |

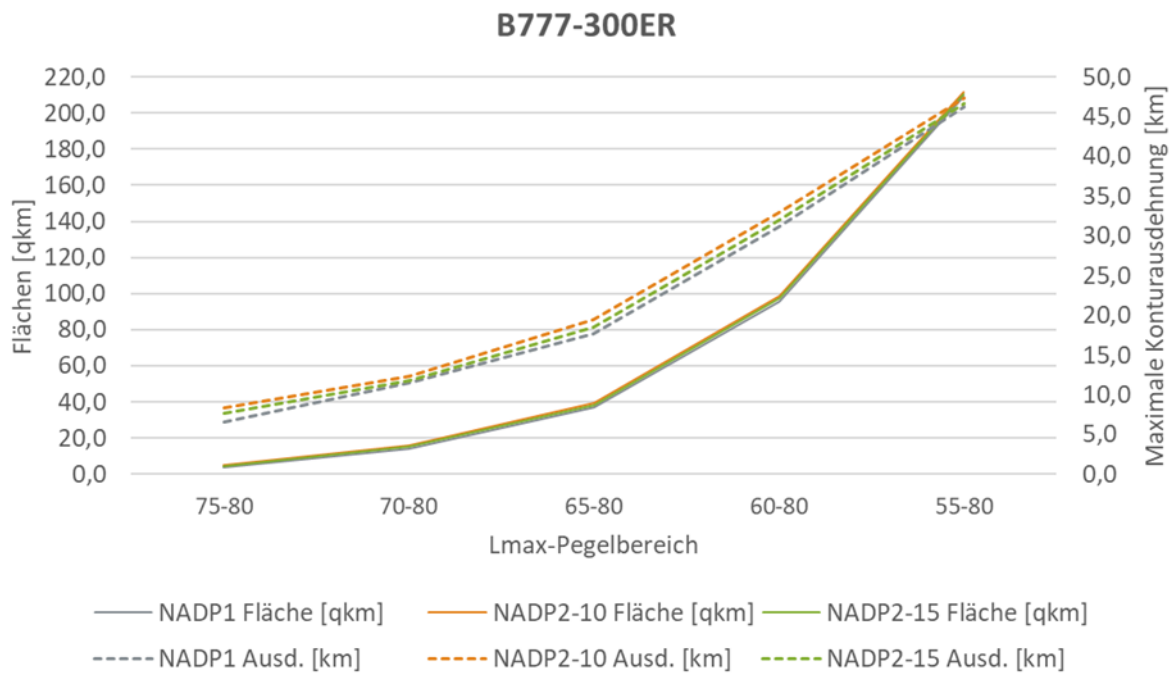
6.2 Anhang B: Flächen und maximale Konturausdehnung der Lmax-Footprints für die Startverfahren NADP1 (grau), NADP 2-10 (orange) und NADP2-15 (grün) mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) einzelner Flugzeugmuster



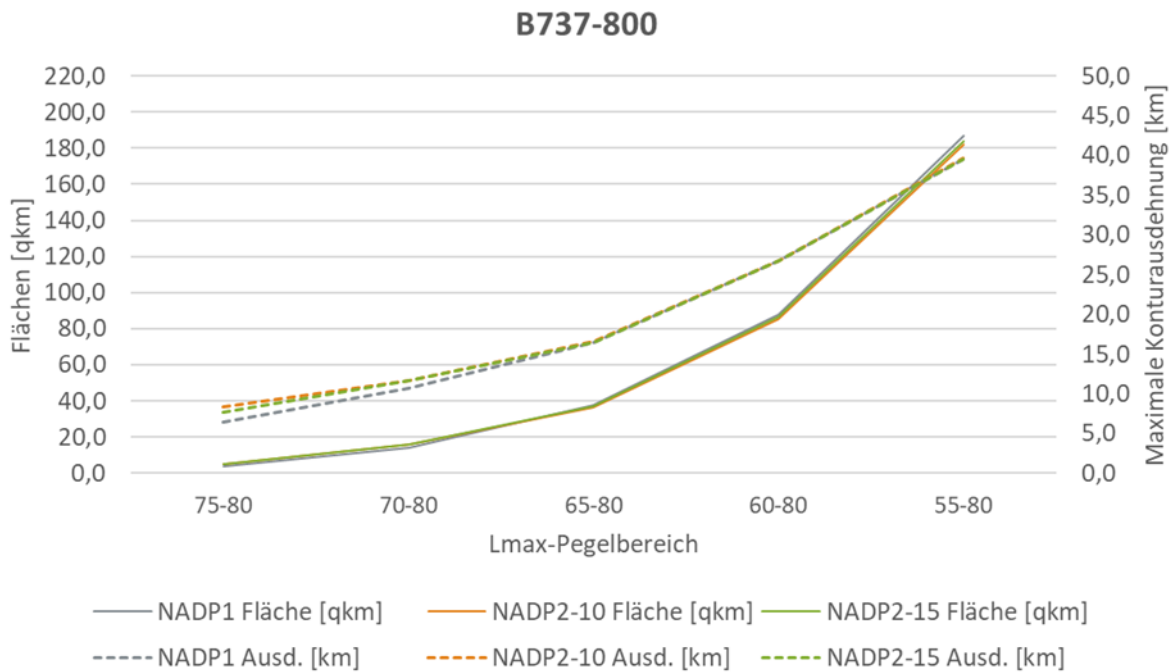
Quelle: Fraport AG



Quelle: Fraport AG



Quelle: Fraport AG



Quelle: Fraport AG

Tabelle 7: Flächen und maximale Konturausdehnung der Lmax-Footprints mit Geschwindigkeitsbegrenzung (220kn) einzelner Flugzeugmuster

|             | NADP1 Fläche [qkm] | NADP2-10 Fläche [qkm] | NADP2-15 Fläche [qkm] | NADP1 Ausd. [km] | NADP2-10 Ausd. [km] | NADP2-15 Ausd. [km] |
|-------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| <b>B744</b> |                    |                       |                       |                  |                     |                     |
| 85-90       | 6,5                | 7,5                   | 7,7                   | 10,3             | 11,8                | 11,6                |
| 80-90       | 23,8               | 22,5                  | 23,0                  | 18,0             | 16,7                | 16,5                |
| 75-90       | 65,3               | 60,9                  | 61,3                  | 29,5             | 28,6                | 28,4                |
| 70-90       | 142,2              | 134,3                 | 135,9                 | 41,3             | 40,2                | 40,2                |
| 65-90       | 274,4              | 262,3                 | 265,2                 | 55,5             | 54,4                | 54,6                |
| <b>A380</b> |                    |                       |                       |                  |                     |                     |
| 85-90       | 7,7                | 8,7                   | 9,7                   | 10,9             | 12,5                | 12,8                |
| 80-90       | 28,8               | 26,6                  | 28,1                  | 19,3             | 18,3                | 18,4                |
| 75-90       | 78,6               | 71,2                  | 75,6                  | 31,9             | 29,9                | 31,1                |
| 70-90       | 175,4              | 160,3                 | 170,5                 | 45,6             | 43,5                | 45,0                |
| <b>B748</b> |                    |                       |                       |                  |                     |                     |
| 85-90       | 6,7                | 7,6                   | 7,9                   | 10,1             | 11,6                | 11,4                |
| 80-90       | 24,9               | 22,9                  | 23,3                  | 18,4             | 16,7                | 16,3                |
| 75-90       | 68,5               | 63,4                  | 63,8                  | 29,8             | 28,6                | 28,4                |
| 70-90       | 150,4              | 142,6                 | 143,9                 | 41,8             | 41,0                | 40,8                |
| 65-90       | 291,8              | 280,7                 | 282,2                 | 56,4             | 55,6                | 55,4                |
| <b>B777</b> |                    |                       |                       |                  |                     |                     |
| 75-80       | 3,9                | 5,2                   | 4,7                   | 6,5              | 8,3                 | 7,7                 |
| 70-80       | 13,9               | 15,9                  | 15,4                  | 11,5             | 12,4                | 11,8                |
| 65-80       | 37,3               | 39,6                  | 38,3                  | 17,7             | 19,5                | 18,5                |
| 60-80       | 95,6               | 98,9                  | 97,2                  | 31,2             | 32,9                | 31,9                |
| 55-80       | 209,5              | 211,3                 | 210,4                 | 46,2             | 47,3                | 46,7                |
| <b>A320</b> |                    |                       |                       |                  |                     |                     |
| 75-80       | 3,4                | 5,5                   | 5,1                   | 4,9              | 7,6                 | 7,4                 |
| 70-80       | 13,2               | 16,3                  | 16,8                  | 9,9              | 11,1                | 11,0                |
| 65-80       | 38,0               | 38,0                  | 39,5                  | 16,2             | 16,4                | 16,1                |
| 60-80       | 99,3               | 97,9                  | 99,2                  | 29,4             | 29,5                | 29,2                |
| 55-80       | 213,1              | 208,8                 | 211,1                 | 41,4             | 41,4                | 41,2                |
| <b>B738</b> |                    |                       |                       |                  |                     |                     |
| 75-80       | 4,2                | 5,4                   | 4,9                   | 6,5              | 8,4                 | 7,7                 |
| 70-80       | 14,2               | 15,8                  | 15,9                  | 10,7             | 11,7                | 11,6                |
| 65-80       | 37,5               | 36,5                  | 36,9                  | 16,5             | 16,6                | 16,5                |
| 60-80       | 88,1               | 85,6                  | 86,8                  | 26,7             | 26,7                | 26,7                |
| 55-80       | 187,0              | 182,2                 | 183,8                 | 39,5             | 39,6                | 39,6                |

Autoren Expertengremium Aktiver Schallschutz des Forum Flughafen & Region Frankfurt

Herausgeber Forum Flughafen & Region | Gemeinnützige Umwelthaus GmbH  
Rüsselsheimer Str. 100 | 65451 Kelsterbach | [www.umwelthaus.org](http://www.umwelthaus.org)

Fachliche Koordination Christoph Brunn, Lara Schmitt (Öko-Institut e.V. / [www.oeko.de](http://www.oeko.de))

Quelle Titelbild iStockphoto / igmarx