Lärmauswirkungen bei unterschiedlichen Abflugverfahren

Ullrich Isermann
DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen

Dieser Vortrag kann aufgrund der Komplexität der Thematik nur eine grobe Übersicht geben. Weitergehenden Informationen finden sich u.a. im Internet zum Download.

Die hier in Form von Notizen eingestellten Zusatzinformationen beschränken sich darauf, Informationen zu ergänzen, die den Folien nicht direkt entnommen werden können. Sie dienen weitestgehend dazu, Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Dr. Ullrich Isermann
DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstraße 10
37073 Göttingen

Tel. 0551 709 2255
Fax 0551 709 2404
EMail ullrich.isermann@dlr.de

Begriffsbestimmung

Unter „Lärmoptimierung“ wird im Folgenden nur die Optimierung des vertikalen Flugbahnverlaufs im Hinblick auf eine Minderung der Lärmimmission am Boden verstanden.

Dies umfasst die Variation folgender Parameter:

- Flughöhe
- Fluggeschwindigkeit
- Triebwerksleistung
- Änderungen der aerodynamischen Konfiguration (Klappen, Fahrwerk)

Die horizontale Optimierung der Flugbahn fällt weitestgehend in den Bereich der Flugsicherung. Dies umfasst die Ausweisung von „Minimum Noise Routings“ für Abflüge im Luftfahrthandbuch oder auch von Vorgaben für Flächennavigation („Area Navigation“ RNAV). Derartige Optimierungen können sehr effizient sein, da sie sich primär an der Struktur der Besiedlung orientieren, d.h. ein Überfliegen bewohnter Gebiete zu vermeiden versuchen.

Auslegung von lärmoptimierten Abflugverfahren

Grundlegendes

- Lärmoptimierte Flugverfahren können nur auf der Basis von Modellrechnungen effizient und kostengünstig ausgelegt werden.

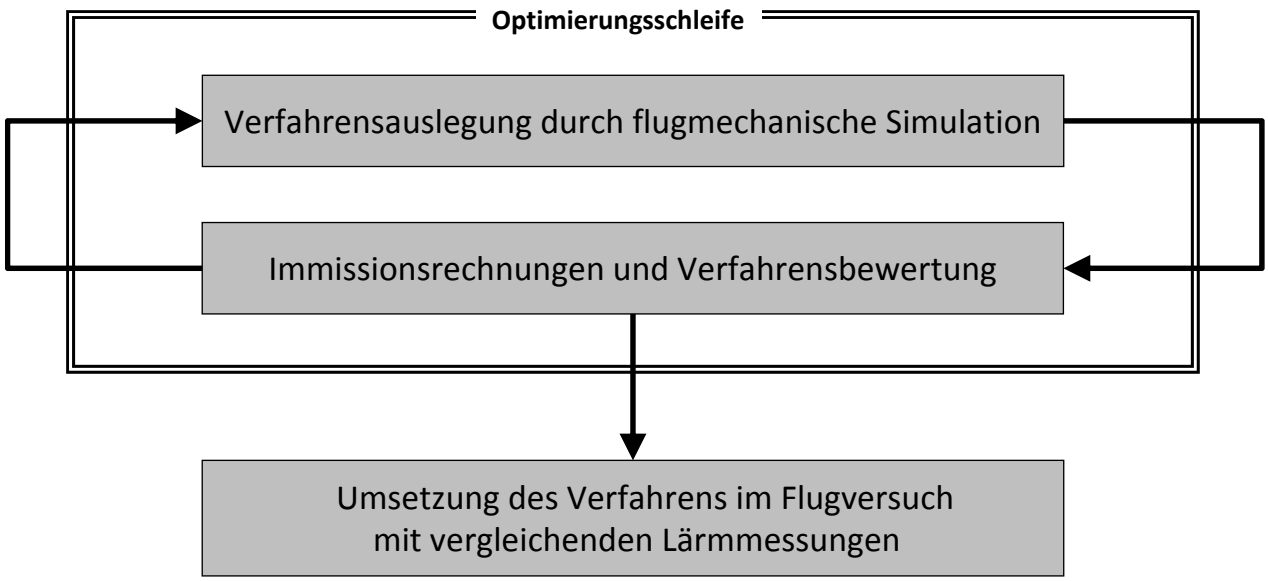
- Abflugverfahren können mit „best practice“ Rechenverfahren (AzB, INM) ausgelegt werden.

- Beachtet werden muss die Zielsetzung, nämliche **sicher** Höhe und Geschwindigkeit zu gewinnen.

Mit dem Begriff „Flugverfahren“ sind hier nicht die von der Flugsicherung erarbeiteten Verfahren gemeint. Verfahren in diesem Sinne beschreiben die Flugstreckenführung (z.B. über Wegpunkte) sowie zusätzliche Einschränkungen (z.B. Vorgaben für Geschwindigkeit oder Höhe).

Im folgenden sind Flugverfahren im Sinne einer flugsystemtechnischen Auslegung gemeint, die mit einer flugmechanischen Simulation des Vertikalprofils erstellt werden.

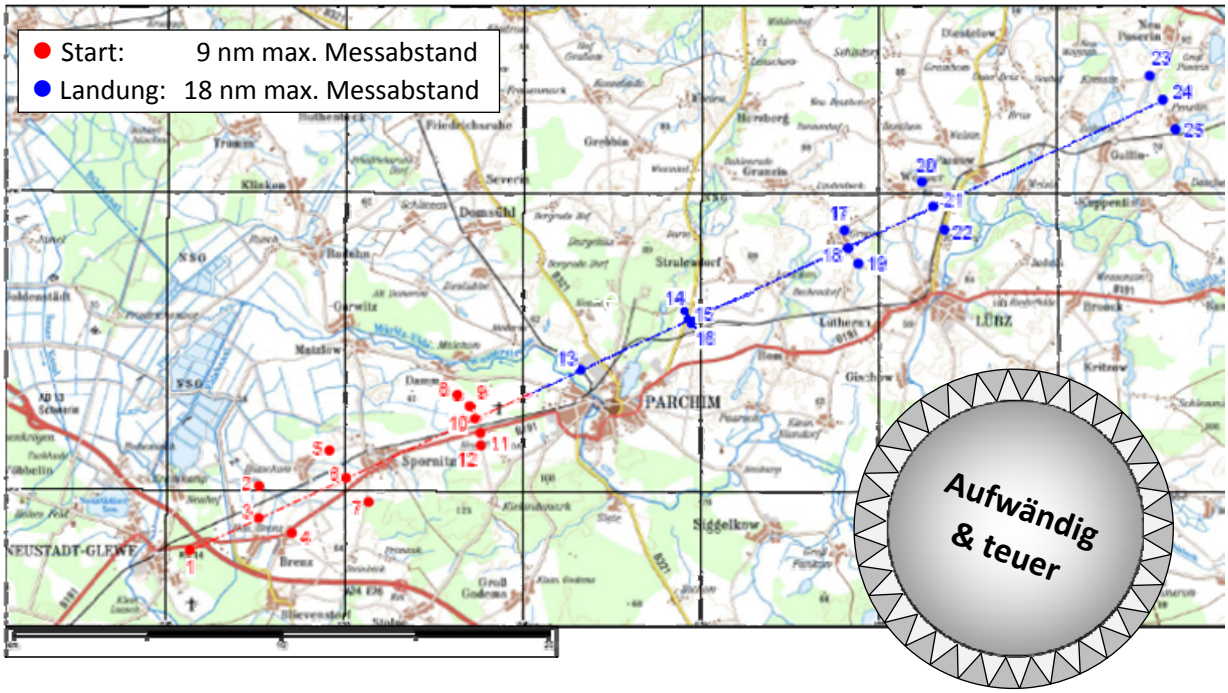
Auslegungsprozess – Optimierung und Validierung



Die Auslegung eines Verfahrens ist eine Simulation, die in einer Optimierungsschleife abläuft. Das für die Optimierung verwendete Gütekriterium kann dabei unterschiedlich ausfallen. Denkbar ist die Orientierung an der Belastung (reine Immissionswerte) oder an der Lärmwirkung (über ein Dosis-Wirkungs-Kriterium und eine hinterlegte Bevölkerungsstruktur). Außerdem kann das Gütekriterium auch tageszeitspezifisch ausgelegt werden.

Die Validierung des Verfahrens ist in der Praxis oft auf eine Auswertung von Meßdaten z.B. von Fluglärmüberwachungsanlagen nach der Einführung des Verfahrens beschränkt.

Validierung im Idealfall (Projekt LAnAb, Baltic Airport Parchim)



Hochwertige Validierungsuntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen sind in der Praxis aus Kostengründen kaum realisierbar. Ein Beispiel für eine derartige Validierung war die Messkampagne, die im Rahmen des LAnAb-Projektes unter Federführung von Lufthansa und DLR am Baltic Airport in Parchim durchgeführt wurde (siehe Link auf der letzten Folie). Hier wurde an 25 bemannten Messstationen, die über einen Bereich von ca. 50 km positioniert waren, gemessen.

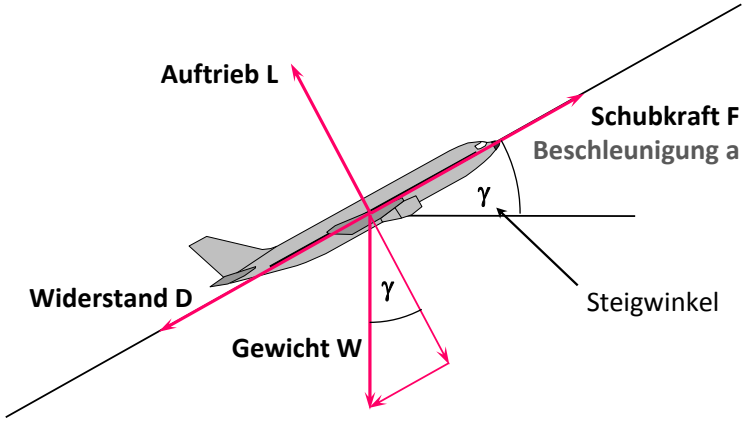
Die Messergebnisse wurden hier auch zur Validierung des DLR Rechenprogramms SIMUL herangezogen. Dazu wurden die realen Flugbahndaten (Daten des Flugschreibers) in das Rechenprogramm eingefüttert. Anschließend wurde eine Lärmberechnung für die 25 Messstellen durchgeführt und mit den Messwerten verglichen.

Abflug – einfaches flugmechanisches Modell

Kräfteverhältnisse:

- Aerodynamischer Widerstand wird durch Schubkraft kompensiert
- Gewicht wird durch Auftrieb und Schubkraft kompensiert
- Schubüberschuss kann in Beschleunigung und/oder Steigen umgesetzt werden („Energy-Sharing“)

$$F - W \cdot \sin - D = m \cdot a$$
$$L - W \cdot \cos\gamma = 0$$



Dieses Bild veranschaulicht ein einfaches Massenpunktmodell für flugmechanische Berechnungen, das von einem Kräftegleichgewicht ausgeht. Eins solches Modell ist z.B. im ECAC Document 29 beschrieben (Download über http://www.ecac-ceac.org/). Dieses Modell berücksichtigt keine Momentenbilanz, wie sie z.B. für die Berechnung von Übergängen zwischen einzelnen Flugphasen benötigt wird. Es ist aber vollkommen ausreichend für akustische Berechnungen.

Wie fliegt man möglichst leise ab ?

Wenig Triebwerksleistung (leise Schallquelle)

⇒ niedrig

⇒ langsam

Möglichst hoch (großer Abstand zum Empfänger, hohe Dämpfung)

⇒ langsam

Möglichst schnell (niedrige Geräuschdauer)

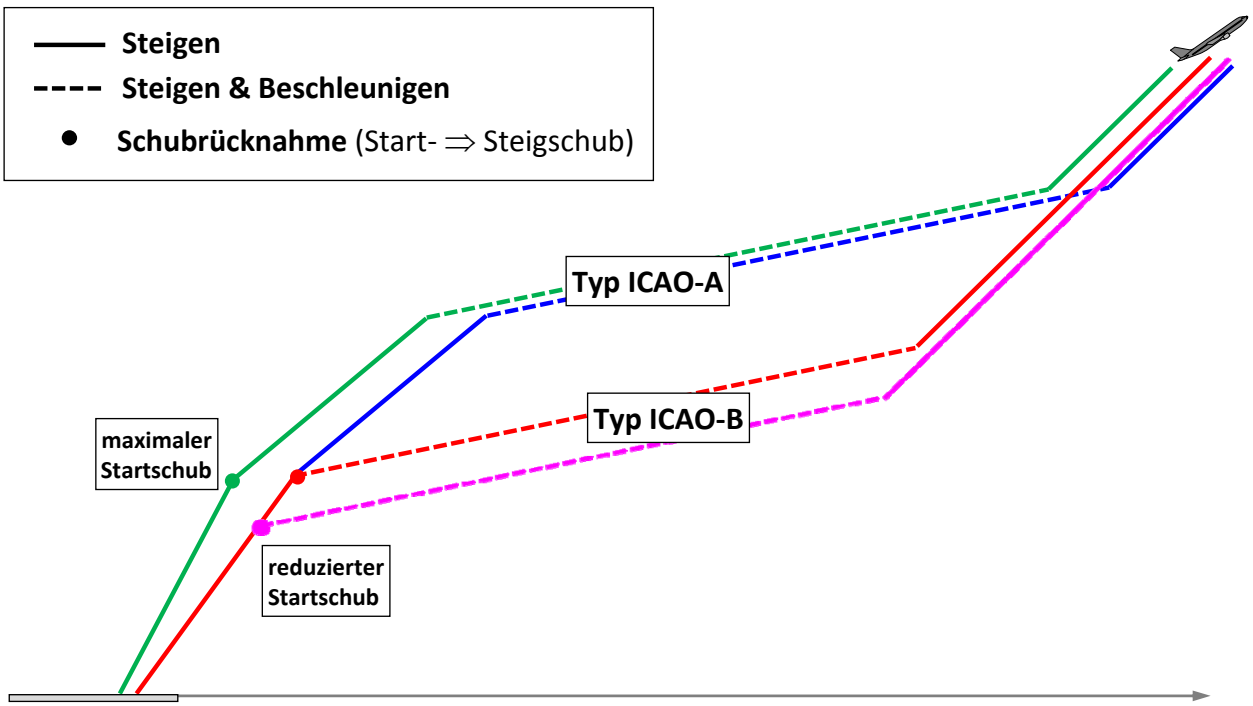
⇒ niedrig

Randbedingungen:
- ☞ **verfügbare Startrollstrecke**
- ☞ **Höhen-/Geschwindigkeitsvorgaben durch ATM**
- ☞ **.....**

Im Prinzip gibt es die drei oben ausgewiesenen Möglichkeiten, um leise abzufliegen. Diese Möglichkeiten widersprechen sich aber teilweise. So kann man den Triebwerksschub in Höhen- oder Geschwindigkeitsgewinn umsetzen. Die Auslegung dieses Energy-Sharings beeinflusst neben dem Lärm aber auch noch andere Faktoren wie z.B. den Treibstoffverbrauch.

Zusätzlich sind externe Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dies sind neben den oben ausgewiesenen z.B. noch meteorologische Faktoren wie Temperatur, Druck, Wind und Niederschlag.

Typische Abflugverfahren



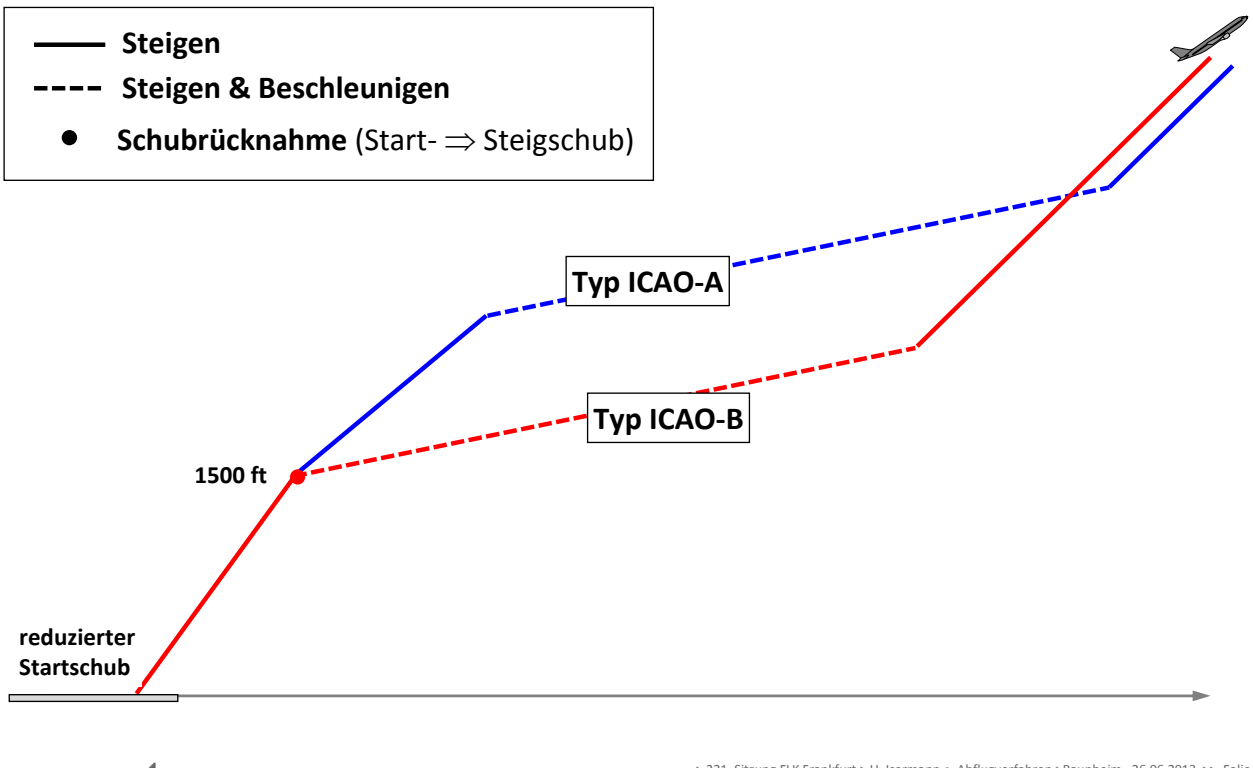
Beim Abflug wird üblicherweise nach dem Abheben bis auf eine bestimmte Höhe mit konstanter Geschwindigkeit gestiegen. Dies erfolgt bei modernen Flugzeugen in der Regel nicht mit dem maximal verfügbaren Startschub, sondern mit reduzierter Startleistung.

Ist die Zielhöhe erreicht, so wird der Schub auf Steigschub reduziert („Cutback“). Die Variation der Cutback-Höhe bildet einen der Ansatzpunkte für die Lärmoptimierung von Abflugverfahren. Anschließend kann man im Prinzip zwei Formen von charakteristischen Abflugverfahren unterscheiden, aus denen in der Praxis eine Reihe von Varianten abgeleitet werden.

Die eine Form wird z.B. durch das ICAO-A-Verfahren (in Deutschland als „Steilstartverfahren“ 1972 eingeführt) repräsentiert. Hier wird der Schub zunächst bis zum Erreichen einer zweiten Zielhöhe vollständig in Steigleistung umgesetzt.

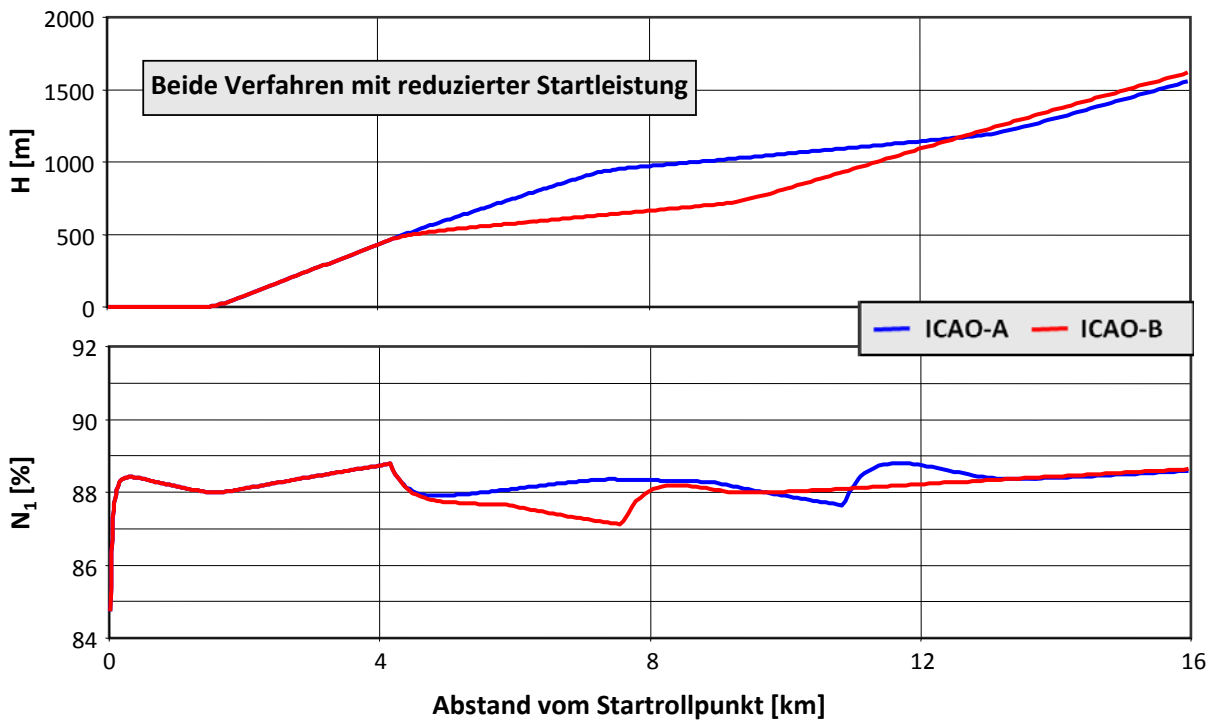
Beim ICAO-B Verfahren wird demgegenüber nach dem Cutback soweit beschleunigt, bis die Klappen eingefahren werden können. Anschließend erfolgt eine weiter Beschleunigung, bis diejenige Geschwindigkeit erreicht ist, mit der dann ohne weitere Beschleunigung auf Reiseflughöhe gestiegen wird. Diese beiden Segmente werden beim ICAO-A-Verfahren erst nach dem 2. Steigsegment erflogen.

Vergleich Abflugverfahren A319 (Flugversuche im Projekt LAnAb)



Die folgenden Folien zeigen die Ergebnisse von Vergleichsrechnungen für einen Airbus A319. Diesen lagen die im Rahmen des LAnAb-Projektes am Flughafen Parchim durchgeführten Flugversuche zu Grunde. Mehr Informationen finden sich in den auf der letzten Folie ausgewiesenen Berichten. Das ICAO-B-Verfahren wird in diesen Berichten in Anlehnung an die Nomenklatur von Lufthansa als MATA (modifiziertes ATA-Verfahren) bezeichnet.

Vergleich Abflugverfahren A319 – Höhe und Triebwerksleistung

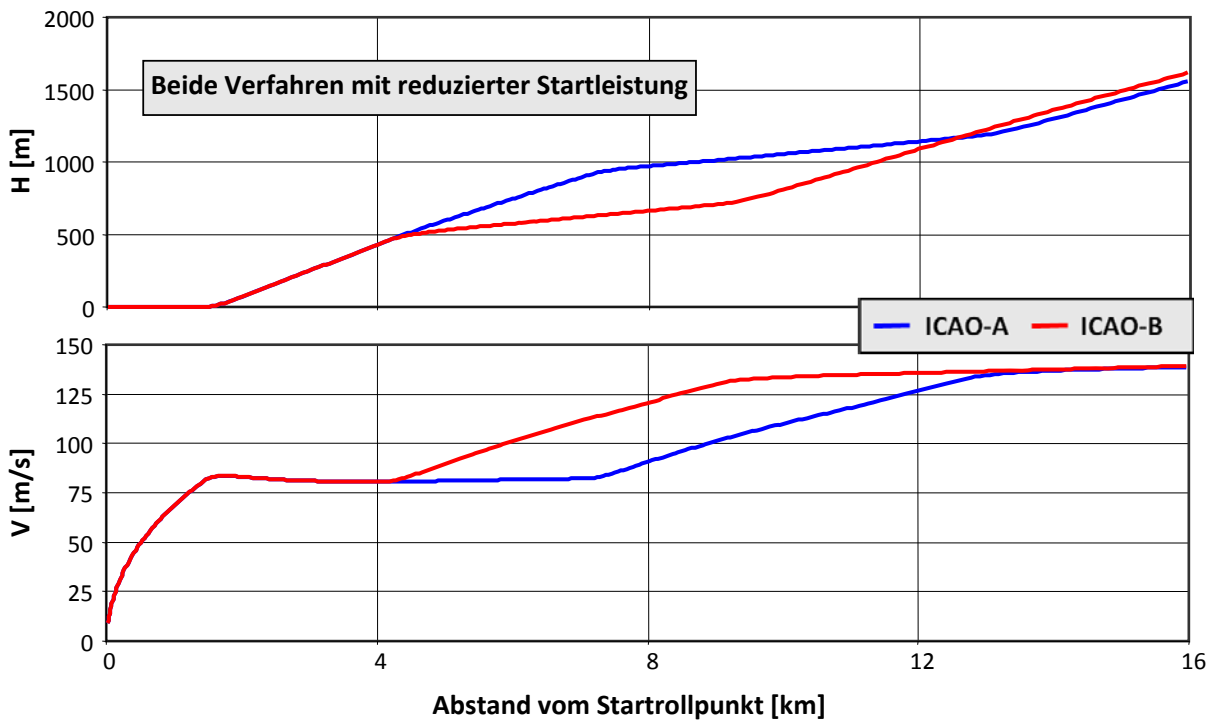


Dargestellt sind Flughöhenverlauf und Verlauf der Triebwerksleistung (ausgedrückt in % der Nenndrehzahl des Fans) als Funktion der ab Startrollpunkt zurückgelegten Strecke. Diese Daten stammen aus Aufzeichnungen des Flight Data Recorders.

Die Schubrücknahme findet in beiden Fällen in einer Flughöhe von 1500 Fuß statt. Beim ICAO-A-Verfahren wird dann weiter bis 3000 Fuß gestiegen bevor beschleunigt wird.

Der Start erfolgt mit einer niedrigen Leistungssetzung (FLEX-Power), die Schubrücknahme fällt also nur gering aus.

Vergleich Abflugverfahren A319 – Höhe und Geschwindigkeit

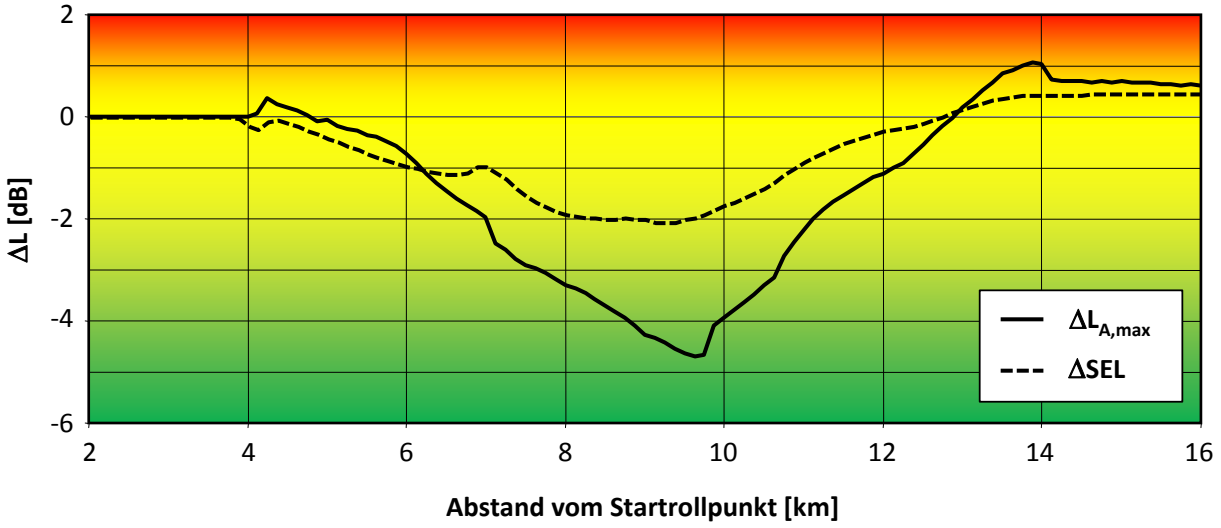


Diese Folie zeigt noch einmal den Verlauf der Flughöhe sowie den der Fluggeschwindigkeit.

Abflug A319 – Vergleich ICAO-A/ICAO-B (Berechnung mit SIMUL)

Pegeldifferenz ΔL = L(ICOA-A) – L(ICAO-B) unter der Flugbahn

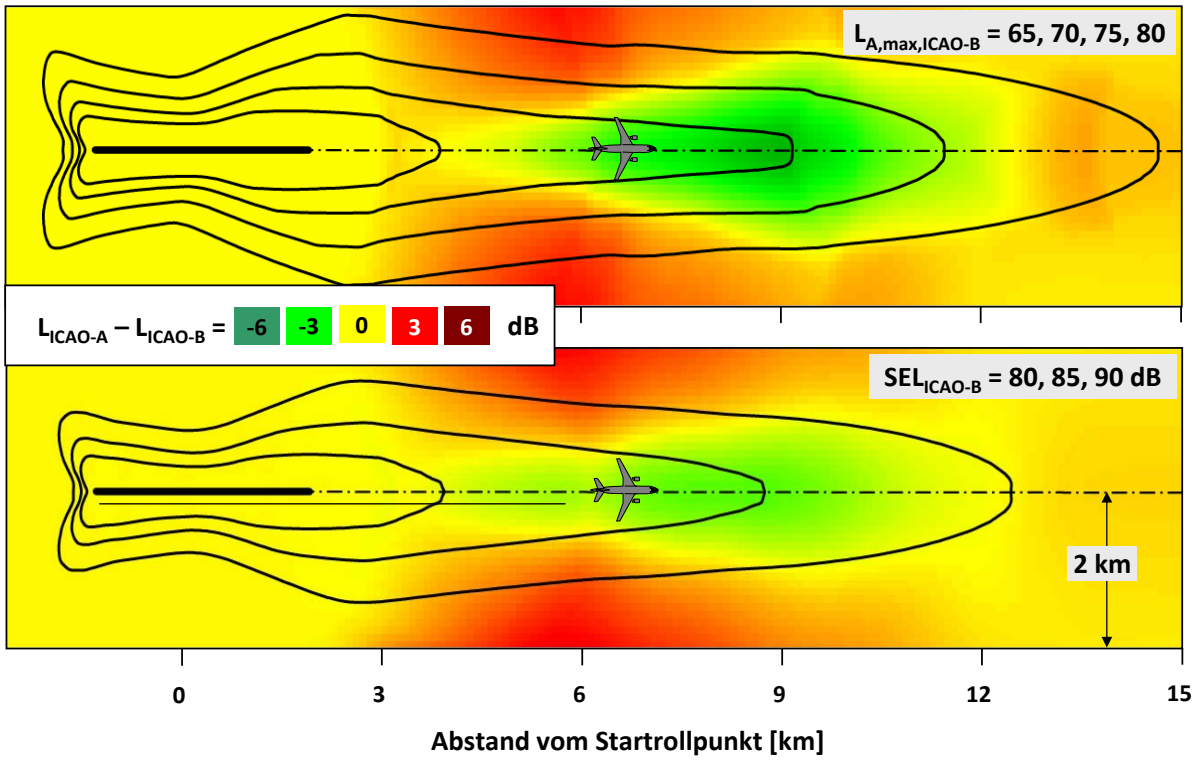
Cutback-Höhe in beiden Fällen 1500 ft



Hier sind die Pegeldifferenzen aufgetragen, die sich zwischen den beiden Verfahren direkt unter der Flugbahn ergeben. Die durchgezogene Kurve ist die Differenz im A-bewerteten Maximalschallpegel. Die gestrichelte Kurve ist die Differenz im Sound Exposure Level SEL . Diese Größe wird in Deutschland als Einzelereignis-Schalldruckexpositionspegel L_{pAeq} bezeichnet (z.B. DIN 45643). Sie ergibt sich aus der Integration des Schallpegelverlaufs eines Geräusches über die Zeit und kann im vereinfachend als die Summe aus dem A-bewerteten Maximalschallpegel und einer Dauerkorrektur dargestellt werden.

Erwartungsgemäß ergeben sich die größten Pegelunterschiede im Abstand von 4 bis 12 km vom Startrollpunkt. Diese fallen beim Maximalpegel deutlicher aus, da sich die Flughöhe auf die Geräuschdauer gerade entgegengesetzt wie auf den Maximalpegel auswirkt (große Höhe, große Dauer). Außerdem nimmt die Dauer auch mit der Geschwindigkeit ab.

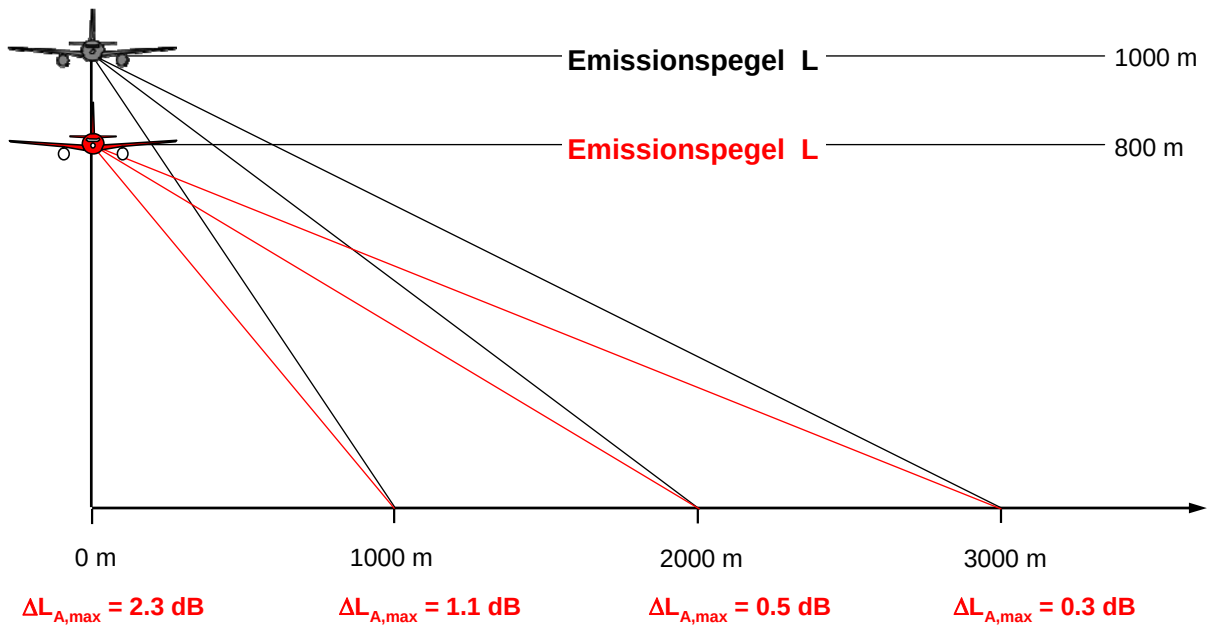
Abflug A319 – Vergleich ICAO-A / ICAO-B (Berechnung mit SIMUL)



Die in der vorigen Folie ausgewiesenen Pegeldifferenzen sind hier flächig dargestellt. Außerdem sind noch die Konturen konstanten A-bewerteten Maximalschallpegels bzw. konstanten Einzelereignispegels SEL für das ICAO-B-Verfahren eingetragen.

Hier ergibt sich ein deutlich anderes Bild als bei einer Analyse der Pegel direkt unter der Flugbahn, bei der das Steilstartverfahren deutlich vorteilhafter erscheint. Bezieht man auch die Bereiche seitlich der Flugbahn mit ein, so fällt diese Tendenz nicht mehr so eindeutig aus. Hier ergeben sich durch das Steilstartverfahren z.T. deutlich höhere Pegel, weil hier im Bereich von 4 bis 8 km ein höherer Schub als beim ICAO-B-Verfahren eingestellt ist.

Seitliches Abfallverhalten von Maximalpegeln



Ein Grund für diese Tatsache liegt im seitlichen Abfallverhalten des Maximalschallpegels. Ausgewiesen sind in obiger Folie die Differenzen, die sich im Maximalpegel zwischen Überflügen in 800 und 1000 m unter und seitlich der Flugbahn ergeben. Diese Pegeldifferenzen nehmen mit zunehmendem seitlichem Abstand ab, da sich hier die Längen der beiden Ausbreitungswege des Schalls einander annähern.

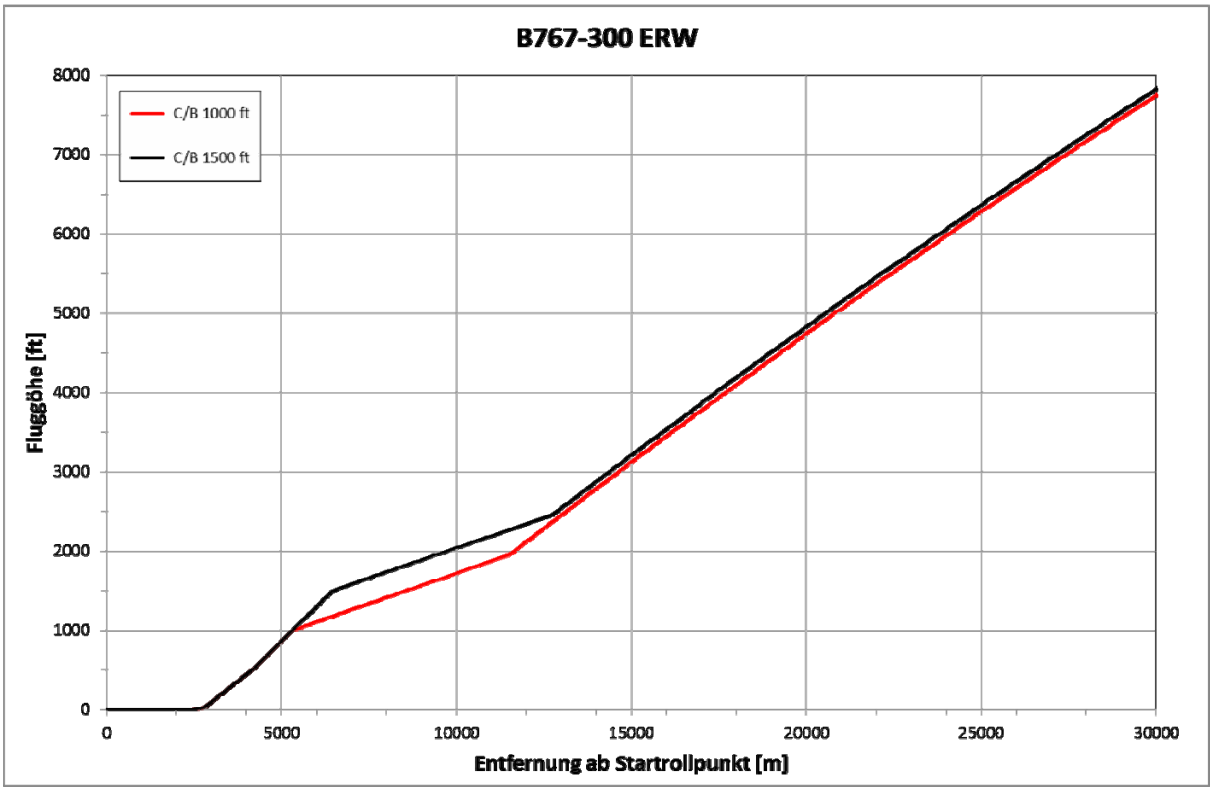
Variation der Cutback-Höhe

- **Berechnung von Abflugprofilen mit dem Boeing Climbout Program BCOP durch Condor Flugbetriebstechnik* für B737-800, B767-300 und B747-400 jeweils mit Cutback-Höhen von 1000 und 1500 ft**
- **Umsetzung der Profile in ein für das Integrated Noise Model (INM 7.0c) geeignetes Format**
- **Berechnung von charakteristischen Maximalpegel- und SEL-Konturen**

*Herzlichen Dank an Herrn W. Emmerling

Im Folgenden wird exemplarisch beschrieben, wie sich eine Absenkung der Cutback-Höhe von 1500 ft auf 1000 ft auf die Lärmimmission am Boden auswirkt. Die dazu notwendigen Flugleistungsrechnungen wurden von der Condor Flugbetriebstechnik mit dem Boeing Climbout Program BCOP durchgeführt. Die resultierenden Flugprofildaten wurden dann in das Integrated Noise Model (ein von der amerikanischen Bundesluftfahrtbehörde FAA entwickeltes Programm zur Fluglärmberechung) implementiert.

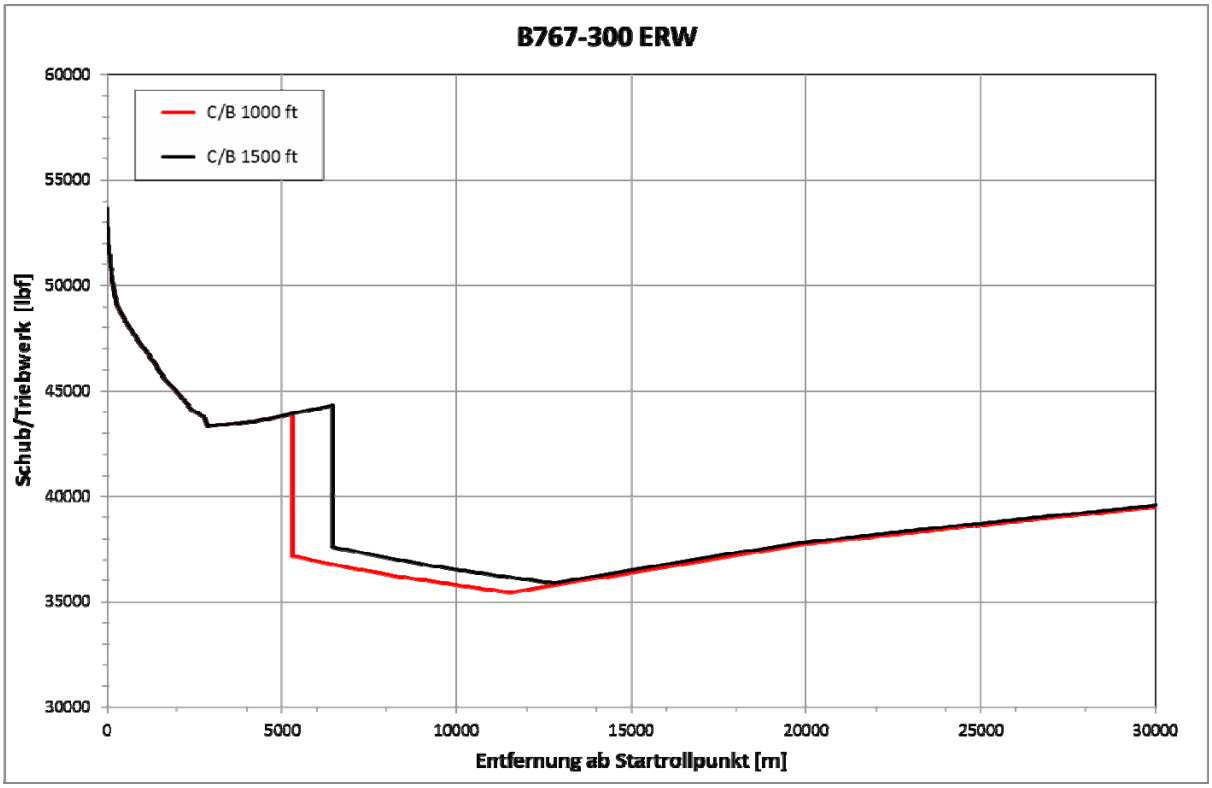
Flughöhe für B767-300 mit TOM = 185 t



> 221. Sitzung FLK Frankfurt > U. Isermann • Abflugverfahren >Raunheim, 26.06.2013 >> Folie 16

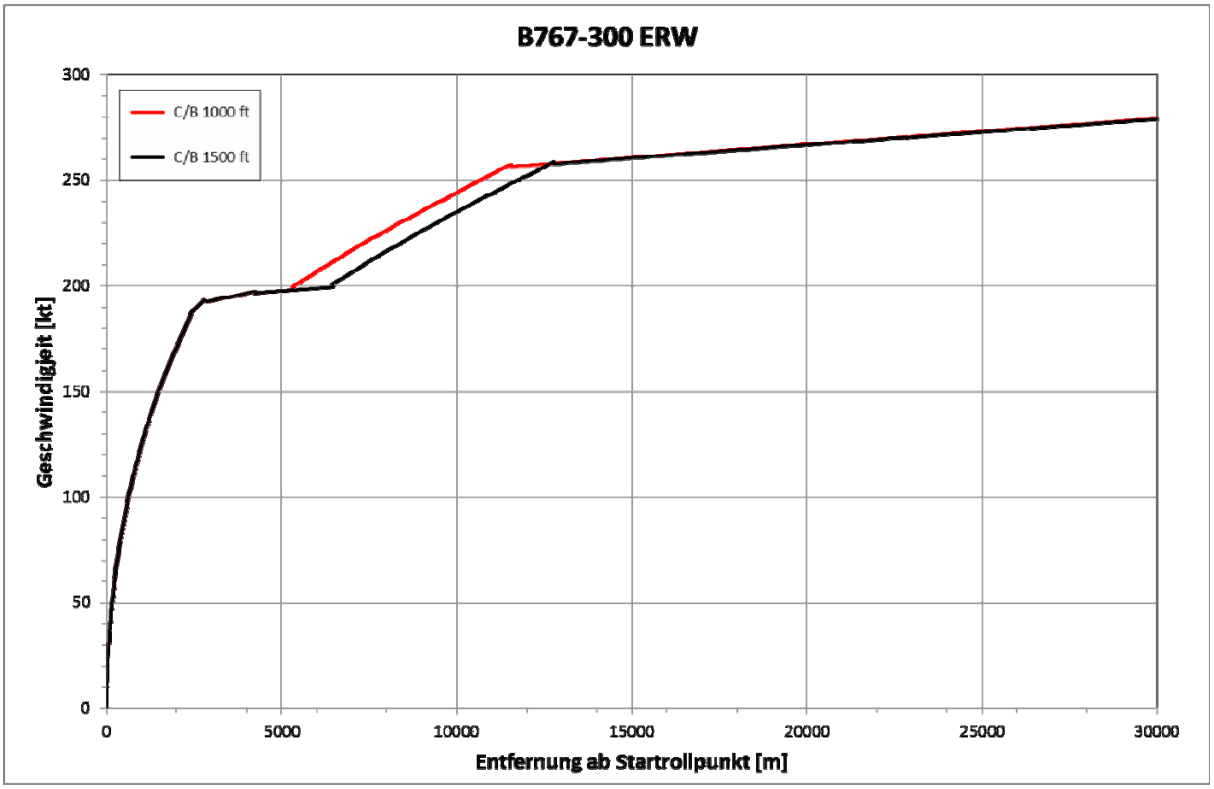
Diese Abbildung zeigt die aus den BCOP-Flugleistungsrechnungen ermittelten Flughöhenprofile für die beiden unterschiedlichen Cutback-Höhen am Beispiel der von Condor geflogenen B767-300. Den Daten liegt ein Abflug mit einer Masse von 185 Tonnen von der Startbahn 18 auf der Strecke ANEKI 6L zu Grunde.

Triebwerksschub für B767-300 mit TOM = 185 t



Diese Folie zeigt den zugehörigen Verlauf des Triebwerksschubes ...

Geschwindigkeit für B767-300 mit TOM = 185 t

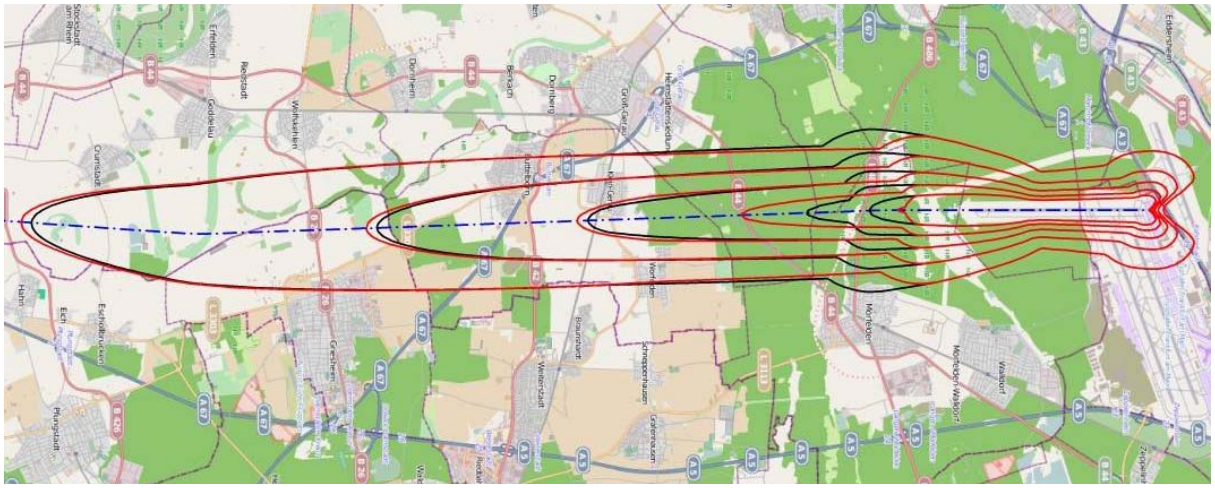


... und diese den Verlauf der Fluggeschwindigkeit.

FRA – Abflug ANEKI 6L – B767-300 (TOW = 185 t)

$L_{A,max}$ = 65, 70, 75, 80, 85 dB

Cutback 1000 ft
Cutback 1500 ft



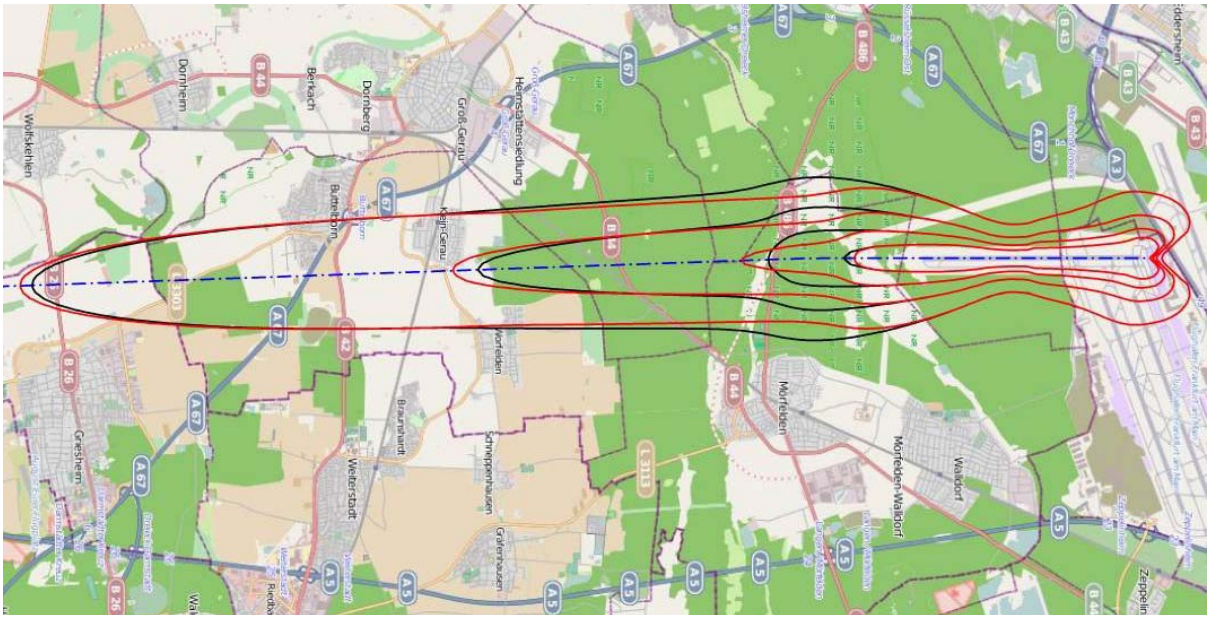
Map data © OpenStreetMap contributors, CC-BY-SA
www.openstreetmap.org

Dargestellt sind hier aus den INM-Berechnungen resultierenden Konturen konstanten A-bewerteten Maximalschallpegels im Bereich der Startbahn 18. Das Bild ist um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Die Absenkung der Cutback-Höhe führt hier im seitlichen Bereich zu Pegelabsenkungen, während direkt unter der Flugbahn im Bereich nach dem Cutback die Variante mit der Schubrücknahme in 1500 ft die günstigere ist. Für größere Entfernungen sind die Unterschiede beider Varianten marginal, was aus den Flugleistungsdaten auch zu erwarten war.

FRA – Abflug ANEKI 6L – B767-300 (TOW = 185 t)

SEL = 80, 85, 90, 95 dB

Cutback 1000 ft
Cutback 1500 ft

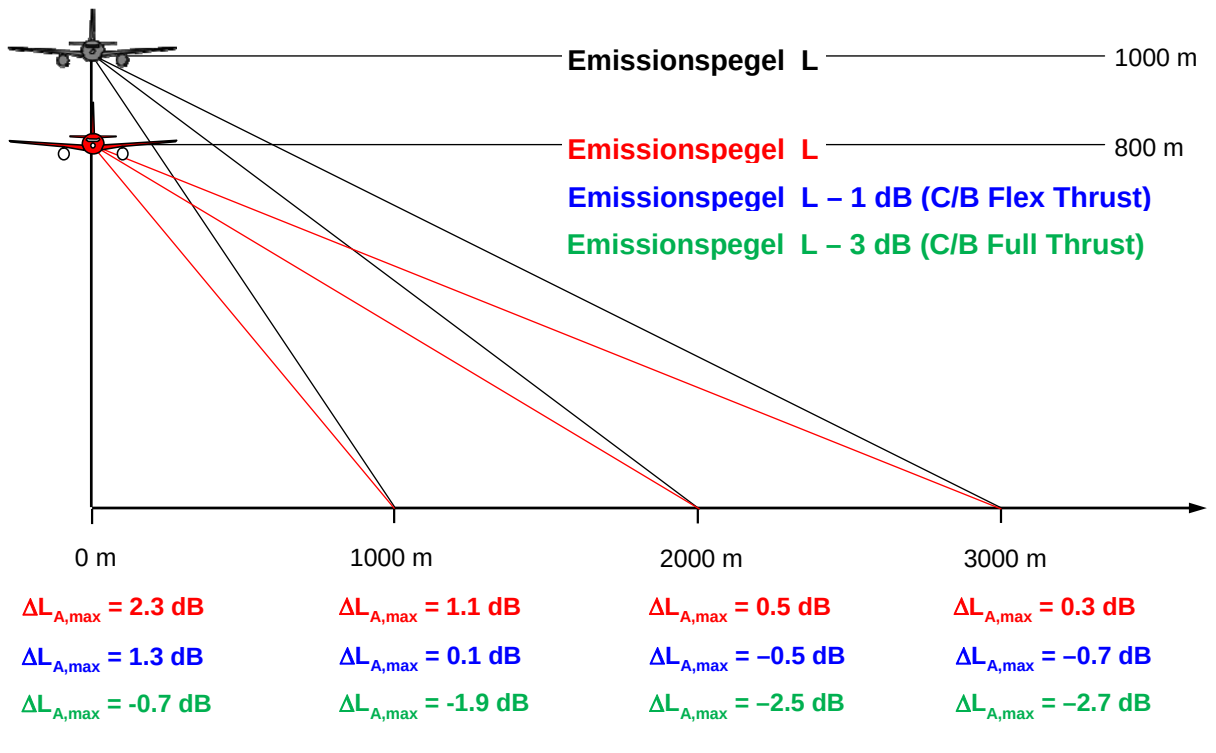


Map data © OpenStreetMap contributors, CC-BY-SA
www.openstreetmap.org

> 221. Sitzung FLK Frankfurt > U. Isermann • Abflugverfahren >Raunheim, 26.06.2013 >> Folie 20

Diese Folie zeigt entsprechend die Konturen konstanten Sound Exposure Levels SEL. Die Effekte entsprechen denen in den Maximalpegelkonturen, fallen allerdings geringer aus. Das hängt damit zusammen, dass in den SEL auch die Geräuschdauer eingeht und hohe Pegel in der Regel mit niedrigen Geräuschdauern verbunden sind und umgekehrt.

Seitliches Abfallverhalten von Maximalpegeln



0 m	1000 m	2000 m	3000 m
$\Delta L_{A,max}$ = 2.3 dB	$\Delta L_{A,max}$ = 1.1 dB	$\Delta L_{A,max}$ = 0.5 dB	$\Delta L_{A,max}$ = 0.3 dB
$\Delta L_{A,max}$ = 1.3 dB	$\Delta L_{A,max}$ = 0.1 dB	$\Delta L_{A,max}$ = –0.5 dB	$\Delta L_{A,max}$ = –0.7 dB
$\Delta L_{A,max}$ = -0.7 dB	$\Delta L_{A,max}$ = -1.9 dB	$\Delta L_{A,max}$ = –2.5 dB	$\Delta L_{A,max}$ = –2.7 dB

> 221. Sitzung FLK Frankfurt > U. Isermann • Abflugverfahren >Raunheim, 26.06.2013 >> Folie 21

Diese Folie zeigt in wie Folie 14 die Entwicklung der Maximalpegel mit zunehmendem seitlichen Abstand für Flughöhen von 800 und 1000 m. Hier ist zusätzlich angenommen, dass die Emissionspegel in 800 m Höhe einmal um 1 dB und einmal um 3 dB unter denen in einer Höhe von 1000 m liegen. Das entspricht typischen Pegelabsenkungen bei einem leichten bzw. starken Cutback (wie er etwa für reduzierte bwz. hohe Startleistung typisch ist).

Geht man von gleichen Emissionswerten aus, so bleiben die Pegeldifferenzen natürlich positiv. Setzt man aber den Emissionspegel für die Höhe von 800 m um 1 dB niedriger an, so ändern die Differenzen bei etwa 1000 m seitlichem Abstand das Vorzeichen – die Quelle in 1000 m erzeugt also höhere Pegel am Immissionsort. Bei einer Absenkung um 3 dB wird der Höheneffekt in allen Bereichen durch die Absenkung der Emissionswerte kompensiert.

Ein Einstellen niedrigerer Emissionswerte der Quelle ist also unter Lärmminderungsaspekten oft effektiver als eine größere Überflughöhe, da die Emissionswerte durch den seitlichen Abstand natürlich nicht beeinflusst werden.

Lärmoptimierte Abflugverfahren - Zusammenfassung

Potenziale

- **beim Abflug im wesentlichen Umverteilung von Lärm**
- **Änderung der Flughöhe wirkt sich primär unter der Flugbahn aus**
- **Absenkung der Triebwerksleistung ist effizientere Maßnahme**

Konsequenz

- **Einsatz muss an lokale Siedlungsstruktur angepasst werden**

Einschränkende Anforderungen

- **Gewährleistung der Sicherheit**
- **Vorgaben durch Flugsicherung**
  (z.B. Höhen- oder Geschwindigkeitsrestriktionen)

> 221. Sitzung FLK Frankfurt > U. Isermann • Abflugverfahren >Raunheim, 26.06.2013 >> Folie 22

Zusammenfassend kann man sagen, dass unterschiedliche Abflugverfahren den Lärm nur umverteilen. Die Konsequenz ist, dass die Wahl des Verfahrens der lokalen Struktur der Besiedlung in Bezug auf die Abflugstrecke angepasst werden muss. Diese Anpassung sollte idealerweise noch bezogen auf Flugzeugtypen oder –kategorien erfolgen. Hier sind allerdings ggf. noch einschränkende Bedingungen (Sicherheitsaspekte, Vorgaben durch die Flugsicherung) zu berücksichtigen.

Insbesondere muss noch gesagt werden, dass die gezeigten Ergebnisse nur exemplarischer Natur sein können. Es gibt eine Vielzahl von äußeren Parametern, die auf die Flugleistungen beim Abflug einen Einfluss haben können. Darunter fallen neben der Auslegung des reduzierten Startschubes insbesondere die Einflüsse von Wind und Temperatur, aber auch unterschiedliche Einstellungen im Energie-Sharing.