

Fluglärmrechnungsverfahren – von der AzB zum Werkzeug für den aktiven Schallschutz

Ullrich Isermann

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,
Bunsenstr. 10, D-37073 Göttingen, Email: ullrich.isermann@dlr.de*

Einleitung

Fluglärmrechnungsverfahren sind essenzielle Werkzeuge zur Beurteilung der Lärmsituation im Umfeld von Flughäfen. Es können prinzipiell zwar auch Messungen dazu herangezogen werden. Diese sind aber aus technischen und finanziellen Gründen in der Regel nur an einer begrenzten Anzahl von Orten bzw. in einem begrenzten Bereich nahe des Flughafens möglich. Im Falle von prognostizierten Flugbetriebsszenarien kann ohnehin nur auf Berechnungen zurückgegriffen werden.

Im Jahr 1975 wurde in Deutschland die „Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB)“ [1] als gesetzliches Verfahren zur Berechnung von Fluglärm eingeführt. Zum damaligen Zeitpunkt setzte das Verfahren Maßstäbe. Der Erfolg der AzB spiegelt sich auch darin wieder, dass der Rechenalgorithmus über 30 Jahre unverändert im Einsatz war. Allerdings war der Anwendungsbereich der AzB – und auch ihrer Fortschreibung aus dem Jahr 2008 [2] – immer ausgelegt auf die Berechnung von Lärmschutzbereichen auf der Basis prognostizierter Flugverkehre.

Verbunden mit den zunehmenden Rechnerleistungen, dem verbesserten Kenntnisstand bei der Modellierung der Quellmechanismen des Fluglärms und der allgemeinen Verfügbarkeit von Flugleistungsdatenbasen bietet sich mittlerweile ein deutlich breiteres Anwendungsspektrum für Fluglärmrechnungen. Besondere Schwerpunkte waren in den letzten Jahren die Auslegung lärmoptimierter Flugverfahren [3] sowie die Entwicklung und Optimierung von Maßnahmen des sog. „aktiven Schallschutzes“ (wie z. B. lärmarme Flugverfahren oder technische Modifikationen am Flugzeug) [4]. Dadurch hat sich seitens der Exekutive und auch der Betroffenen eine gewisse Erwartungshaltung bezüglich der Leistungsfähigkeit und Einsetzbarkeit der Verfahren zur Berechnung von Fluglärm eingestellt, die durch diese aber nicht immer vollständig erfüllt werden kann.

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Entwicklung der Fluglärmrechnungsverfahren gegeben, wobei zunächst auf die speziellen Rahmenbedingungen des Fluglärms eingegangen wird. Weiterhin wird sich auch mit der Rolle der Datengrundlagen und der Quellmodellierung auseinandergesetzt. Weiterhin werden typische Anwendungsbereiche sowie Limitierungen in der Anwendung von Rechenverfahren aufgezeigt. Letztendlich wird ein Ausblick auf zukünftige Modelle gegeben, und zwar sowohl im Hinblick auf den praktischen Bereich als auch im Hinblick auf Modelle für wissenschaftliche Anwendungen.

Die Historie der AzB

Im Jahr 1965 wurde ein vom Bundesministerium für Gesundheitswesen in Auftrag gegebenes Gutachten veröffentlicht, das sich mit den wesentlichen Aspekten des Fluglärms auseinandersetzte [5]. Dieses Gutachten liefert die Grundlage für das 1971 verabschiedete Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm [6]. Allerdings wurde in diesem Gesetz zunächst lediglich in der Anlage zum §3 ein äquivalenter Dauerschallpegel als Grundlage für die nach dem Gesetz auszuweisenden Schutzzonen definiert. Wie diese Zonen zu berechnen waren, war zu diesem Zeitpunkt noch offen. Mit der Erarbeitung eines entsprechenden Verfahrens wurde vom Bundesministerium des Inneren eine am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen tätige Wissenschaftlergruppe (E. Koppe, K. Matschat und E.-A. Müller) beauftragt. Die Arbeit dieser Gruppe resultierte in der 1975 veröffentlichten AzB.

Die AzB basierte auf dem seinerzeit gebräuchlichen Ansatz des „Closest Point of Approach“ (CPA), der im Folgenden noch detaillierter erläutert wird. Allerdings verwendete die AzB im Gegensatz zu den meisten damals eingesetzten Rechenverfahren schon eine spektrale Beschreibung der Ausbreitungsvorgänge. Eine andere Besonderheit war die separate Berechnung von Maximalpegel und Geräuschkdauer anstelle der Ermittlung eines Einzelereignispegels. Der Formalismus der Berechnung der Geräuschkdauer basierte auf einem theoretischen Ansatz für die Richtwirkung [7].

Eine weitgehende Überarbeitung der AzB erfolgte erst im Rahmen der Novellierung des Fluglärmgesetzes [8]. Das in der 1. Fluglärmenschutzverordnung beschriebene und im Folgenden als AzB-2008 bezeichnete Rechenverfahren ist als Segmentierungsverfahren ausgelegt und entspricht damit dem Stand eines aktuellen „Best-Practice-Verfahrens“. Neu eingeführt wurde bei der Überarbeitung auch der Einschluss des vom Rollverkehr und dem Betrieb von Hilfsaggregaten (APU) erzeugten Lärms. Dies stellt international ein Novum dar. Allerdings erhöhte sich durch den Einschluss der Rollbewegungen der Aufwand bei der Datenerfassung und auch der Berechnung beträchtlich, ohne in den meisten Anwendungsfällen zu substantiell besseren Ergebnissen zu führen.

Die Besonderheiten von Fluglärm

Um ein Fluglärmrechnungsverfahren zu entwickeln oder auch anzuwenden, muss man mit denjenigen Eigenheiten des Fluglärms vertraut sein, die ihn von den anderen Arten des Umgebungslärms unterscheiden. Das sind im Wesentlichen Folgende:

(1) Fluglärm breitet sich über große Entfernungen aus und beaufschlagt räumlich weit ausgedehnte Gebiete (im Umfeld

größerer Flughäfen bis zu mehreren Hundert Quadratkilometern). Entsprechend treten in großen Abständen vom Flughafen nur sehr kleine Gradienten in der Lärmbelastung auf, sodass geringe Änderungen in den Immissionswerten große Änderungen der vom Lärm beaufschlagten Flächen nach sich ziehen. Bei Dauerschallpegeln gilt die Faustregel, dass eine Änderung von 1 dB in etwa einer Flächenänderung von 20 % entspricht.

(2) Einflüsse von Bewuchs und Bebauung werden bei der Berechnung von Fluglärm üblicherweise nicht berücksichtigt. Da die berechneten Immissionsgitter hier typische Rasterweiten von 50 m oder mehr aufweisen, macht die Berücksichtigung kleinräumigerer Strukturen wenig Sinn. Diese Effekte sind allerdings auch nur dann von Bedeutung, wenn sich das Flugzeug am Boden oder in sehr geringen Höhen befindet.

(3) Da sich beim Fluglärm die Quelle fast durchweg in großer Höhe befindet, ist freie Schallausbreitung ohne Hindernisse der Regelfall. Abschirmungseffekte werden daher bei der Berechnung von Fluglärm nur in Sonderfällen berücksichtigt, z. B. Abschirmung durch Gelände. In der Regel geht der Effekt der Topografie aber nur in Form eines geänderten Abstandes zwischen Flugzeug und Immissionsort in die Rechnungen ein.

(4) Die Lage der Quelle ist beim Fluglärm nur innerhalb gewisser Grenzen zu definieren. Bezogen auf einen nominalen, z. B. im Luftfahrthandbuch ausgewiesenen Verlauf einer Flugstrecke werden bei Abflügen Abweichungen beobachtet, die in der Bildung von Korridoren von bis zu einigen Kilometern Breite resultieren (Abbildung 1).

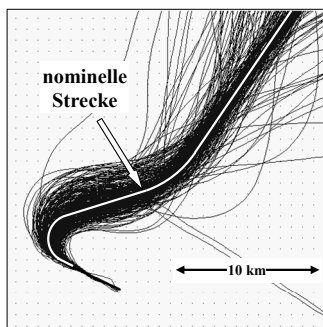


Abbildung 1: Streuung von Radarflugspuren für Abflüge.

Zusätzlich dazu können vertikale Streuungen von bis zu einigen Hundert Metern auftreten. Diese sind bedingt durch Variationen in der Flugzeugmasse, in den Flugverfahren und in den meteorologischen Randbedingungen.

(5) Der Einfluss der Meteorologie wirkt sich beim Fluglärm primär auf Lage und Leistung der Schallquelle aus, wie die beiden folgenden Beispiele verdeutlichen:

- Flugzeuge starten in der Regel gegen den Wind, und zwar umso steiler, je höher die Gegenwindkomponente ist. Es bleibt aber nicht bei diesem Windeinfluss auf die Vertikalposition. Sobald eine Rückenwindkomponente eine bestimmte Geschwindigkeit überschreitet, werden nämlich auf dem Flughafen die Start-/Landebahnen in Gegenrichtung betrieben und die Lärmsignatur ändert

sich vollständig (Abbildung 2). Die Lärmsituation kann daher über kurze Zeiträume deutlich von der mittleren, in der Regel über mindestens 6 Monate betrachteten Situation deutlich abweichen.

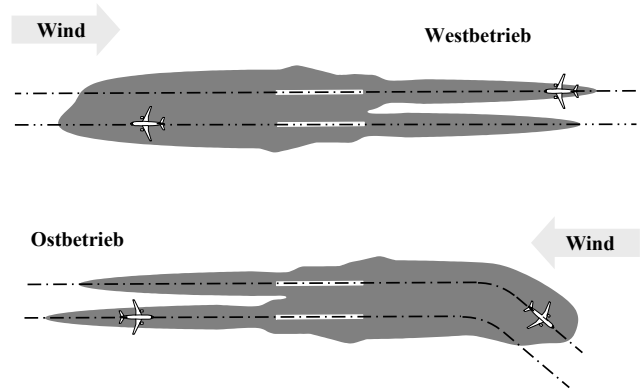


Abbildung 2: Einfluss des Windes auf Betriebsrichtung und Lärmkonturen (schematisch).

- Druck und Temperatur beeinflussen Triebwerksleistung und Auftriebs Eigenschaften eines Flugzeugs beträchtlich. Abbildung 3 zeigt eine Modellrechnung für Abflüge einer Boeing B737-400 in Madrid und Stockholm [9] bei der Vorgabe einer identischen Flugprozedur. Der Abflug in Madrid erfolgt trotz höherer Triebwerksleistung (und damit verbunden höheren Emissionspegeln) deutlich flacher als in Stockholm. Die Pegel direkt unter der Flugbahn fallen daher um bis zu 3 dB höher aus.

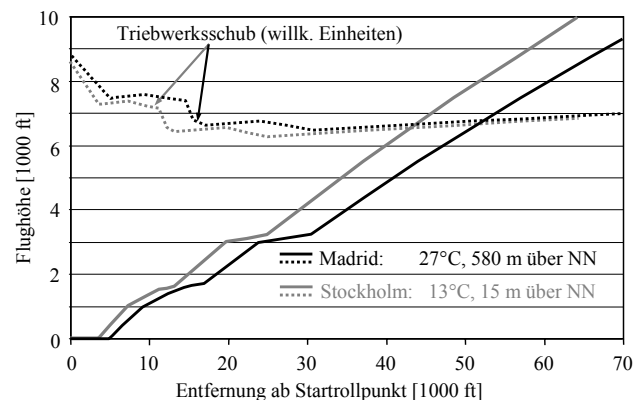


Abbildung 3: Vergleich von Höhenprofil und zugehöriger Triebwerksleistung für Abflüge einer B737-400 in Madrid und Stockholm.

- (6) Der Einfluss der Meteorologie auf die Ausbreitung beschränkt sich bei Fluglärm im Regelfall auf die von Temperatur und relativer Feuchte abhängige atmosphärische Dämpfung. Temperatur- und Windstruktur der Atmosphäre zeigen lediglich bei bodennaher Schallausbreitung – also im Flughafennahbereich – eine Wirkung auf die Ausbreitung. Untersuchungen im Rahmen des DLR-Projektes „Leiser Flugverkehr“ [10] zeigten diesbezüglich, dass die Annahme einer isotropen Atmosphäre, die den meisten der in der Praxis eingesetzten Berechnungsverfahren zugrunde liegt, für Mittelungspegel über typische Beurteilungszeiträume von 6 bis 12

Monaten eine belastbare Näherung liefert und dabei die Immissionswerte in der Regel überschätzt.

Damit ergibt sich die Konsequenz, dass bei der Berechnung von Fluglärm Ausbreitungseffekte durch vergleichsweise einfache Annahmen modelliert werden können. Vielmehr muss der Schwerpunkt auf der Bestimmung von Position und Emissionseigenschaften der Quelle liegen. Um diesem Tatbestand Rechnung tragen zu können, sind bei der Berechnung von Fluglärm eine Reihe von nicht-akustischen Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dazu zählen neben Randbedingungen für die horizontale Flugbahnkomponente, die sich in der Regel aus Anforderungen der Flugführung ergeben, insbesondere flugmechanische Parameter, die die vertikale Position des Flugzeugs bestimmen.

Das Prinzip einer Fluglärmrechnung

Eine Fluglärmrechnung setzt in der Regel auf einem sog. „Szenario“ auf. Ein solches umfasst eine Aufgabenstellung und einen Satz von Daten, der den zu untersuchenden Flugbetrieb charakterisiert. Dieser Datensatz enthält eine geometrische Beschreibung der Start- und Landebahnen und der An- und Abflugstrecken sowie eine Beschreibung der Verteilung der Flugbewegungen auf diese Strecken.

Das für die Untersuchung benutzte Berechnungsverfahren besteht aus einer Berechnungsvorschrift, die im Wesentlichen ein Schallausbreitungsmodell realisiert. Fester Bestandteil des Berechnungsverfahrens ist eine Datenbasis, die akustische Datensätze für die Quellbeschreibung sowie flugtechnische Datensätze zur Beschreibung bzw. Ermittlung der Flugbahn bereitstellt (Abbildung 4).

Wenn eine Fluglärmrechnung belastbare Ergebnisse liefern soll, dann müssen Berechnungsverfahren und Szenario aufeinander abgestimmt sein.

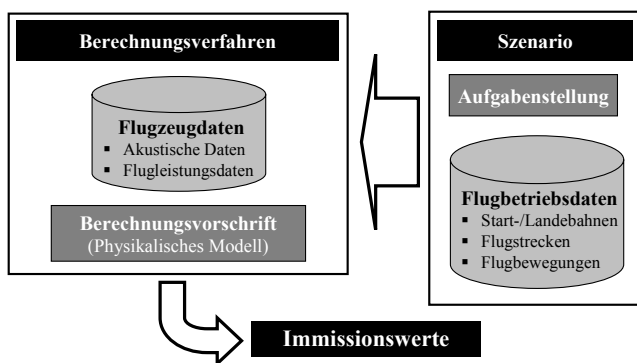


Abbildung 4: Prinzip einer Fluglärmrechnung

Wichtig ist auch, dass bei einem für den praktischen Einsatz konzipierten Verfahren Berechnungsvorschrift und Form der Datenbasis eindeutig und widerspruchsfrei definiert sind. Nur so kann gewährleistet werden, dass verschiedene Implementierungen des Verfahrens in Form von Computerprogramm identische Ergebnisse liefern. Dieser Punkt ist besonders dann von Bedeutung, wenn – wie bei der AzB – die nach dem Verfahren berechneten Ergebnisse die Grundlage für die Lärmschutzgesetzgebung bilden.

Die Rolle der Datenbasis

Umfang und Qualität der akustischen und flugbetrieblichen Grunddaten setzen die Grenzen für die Auslegung eines Fluglärmrechnungsverfahrens. Umgekehrt stellt dessen Struktur auch Mindestanforderungen an die Datengrundlage. Hohe Flexibilität des Rechenverfahrens erfordert dabei immer komplexe Datenbasen und stellt in der Regel auch hohe Anforderungen an den Anwender. Außerdem ist die Erstellung hochwertiger Datengrundlagen gerade im akustischen Bereich sehr aufwendig und auch teuer. Aus diesem Grund sind hochwertige Emissionsmodelle zurzeit nur für eine begrenzte Anzahl von Flugzeugmustern verfügbar und können daher nur für eher wissenschaftlich orientierte Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Modelle, die in der Praxis eingesetzt werden, müssen demgegenüber alle am Flugverkehr teilnehmenden Luftfahrzeuge abdecken. Sie setzen zwangsläufig auf einfacheren Quellmodellen auf.

Ein wichtiger Aspekt ist die Kopplung zwischen dem akustischen und dem flugbetrieblichen Teil der Daten. Die Mindestanforderung ist hier ein Kopplungsparameter, der die Triebwerksleistung beschreibt, denn diese bestimmt primär das Emissionsverhalten. Welche Form dieser Parameter haben muss, hängt davon ab, wie die Datengrundlage strukturiert ist. Wenn das Modell nicht auf flugmechanische Rechnungen ausgelegt ist, so wählt man zweckmäßigerweise die Größe, mit der die akustischen Daten ohnehin parametrisiert sind. Das kann der Triebwerksschub, das Druckverhältnis am Turbineneinlass oder auch eine willkürliche Skala (z. B. von 0 bis 100 %) sein. Die AzB bildet Leistungsänderungen über den Zusatzpegel Z ab, der einen Zu- oder Abschlag auf die Referenz-Emissionswerte darstellt.

Anders ist es, wenn flugmechanische Rechnungen ein Teil des Modells sind. In diesem Fall wird der Schub benötigt, da er in das für Flugleistungsrechnungen zugrunde zu legende Kräftegleichgewicht eingeht. Die akustischen Daten müssen in diesem Fall über den Schub parametrisiert werden können. In der Regel wird hier eine Umrechnung notwendig, da der Schub kein direkter operationeller Parameter ist – die Leistungssetzung des Triebwerks erfolgt meist über ein bestimmtes Triebwerksdruckverhältnis oder die Drehzahl der ersten Stufe der Niederdruckturbinen.

Gruppierung und Gruppierungskriterien

Unter Gruppierung versteht man das geeignete Zusammenfassen von einzelnen Flugzeugen zu Kategorien [11]. Ein wichtiger Grund für Gruppierung ist z. B. eine mangelnde Kenntnis über die Typenzusammensetzung des zu untersuchenden Verkehrsszenarios. Dies ist insbesondere bei Prognoseszenarien der Fall. Bestes Beispiel hierfür ist die AzB, mit der die Schutzzonen für einen 10 Jahre in der Zukunft liegenden Flugbetrieb ausgewiesen werden müssen. Eine entsprechende Verkehrsprognose kann hier nicht typenscharf ausfallen – sie wird sich an Sitzplatzkategorien und Destinationen orientieren. Gruppierung kann aber auch zur Minimierung des Aufwandes benutzt werden, da die Rechenzeit etwa linear mit der Anzahl der untersuchten Flugzeugtypen oder -kategorien skaliert.

Wenn gruppiert werden soll, müssen zunächst Parameter für die Gruppierung definiert werden. Beispiele hierfür sind die Höchstabflugmasse, die Art und Anzahl der Triebwerke oder das ICAO-Lärmzeugnis. Die darauf folgende Vorgehensweise wird im Wesentlichen durch zwei Prinzipien bestimmt, die „Lärmsignifikanz“ und die „akustische Äquivalenz“.

Das Prinzip der Lärmsignifikanz besagt, dass diejenigen Luftfahrzeugmuster (oder auch Gruppen), die die größten Beiträge zur Lärmbelastung liefern, so detailliert und genau wie möglich modelliert werden müssen. Luftfahrzeuge, die nur geringe Beiträge zur Lärmbelastung liefern, können zur Minimierung des Aufwandes auch in Kategorien eingeordnet werden, deren Gruppierungskriterien sie nicht oder nur unvollständig erfüllen. Alternativ können dafür auch neue Gruppen mit weniger scharfen Gruppierungskriterien geschaffen werden. Bei der Anwendung dieses Prinzips sind immer die Randbedingungen zu beachten. So ist es z. B. bei der Untersuchung großer Verkehrsflughäfen in der Regel unproblematisch, alle kleinen Propellerflugzeuge in einer Gruppe zusammenzufassen. Häufig kann man diese Gruppe auch ganz vernachlässigen. Untersucht man dagegen einen Landeplatz, bei dem ausschließlich derartige Flugzeuge verkehren, so ist eine Zerlegung in Untergruppen oder sogar einzelne die Lärmsituation dominierende Typen nicht zu vermeiden.

Das Prinzip der akustischen Äquivalenz besagt, dass man Flugzeugmuster zu Gruppen zusammenfassen kann, sofern sie in dem für die Ermittlung der Lärmbelastung relevanten Bereich um einen Flughafen vergleichbare Immissionswerte, und zwar sowohl Expositions- als auch Maximalpegel, erzeugen (also vergleichbare „Noise-Footprints“ haben).

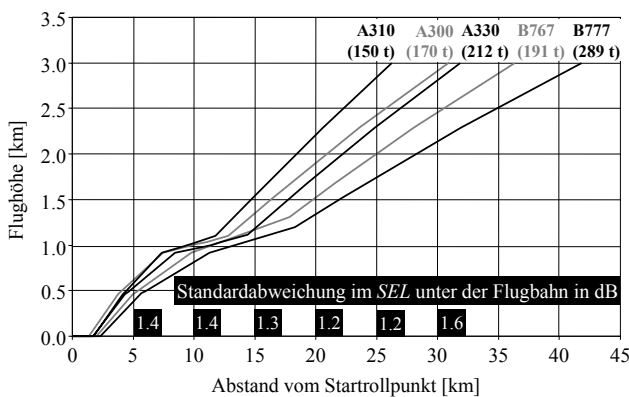


Abbildung 5: Akustisch äquivalente 2-motorige Flugzeuge mit Höchstabflugmassen über 120 Tonnen (Gruppe S6.1 der AzB-2008).

Ein gutes Beispiel für die Anwendung dieses Prinzips ist die Gruppe S6.1 der AzB-2008. Diese Gruppe umfasst alle 2-motorigen Strahlflugzeuge mit Höchstabflugmassen von mehr als 120 Tonnen und Lärmzeugnissen nach Kap. 3 des ICAO Annex 16. Wie man der Abbildung 5 entnehmen kann, decken Flugzeuge dieser Gruppe einen Bereich von 150 bis etwa 300 t ab, und die Flughöhenprofile unterscheiden sich beträchtlich. Trotzdem erzeugen sie unter der Flugbahn vergleichbare Immissionswerte: Die Standardabweichung im Schallexpositionspegel SEL unter der Flugbahn

liegt über die gesamte Gruppe in der Größenordnung von 1.5 dB.

Ausgehend vom Prinzip der akustischen Äquivalenz kann man Datengrundlagen aufbauen, die sehr kompakt sind und dennoch bei einer Berechnung belastbare Ergebnisse liefern, Beispiel hierfür ist die AzB. Man erkaufte sich dies u. a. wie bei der Gruppe S6.1 aber durch eine Vermischung von Emission und Ausbreitung: Ob ein Flugzeug „hoch und laut“ oder „niedrig und leise“ fliegt, kann nicht mehr aufgelöst werden. Man ist also von einem Emissionsmodell zu einem Immissionsmodell übergegangen. Bezogen auf den Anwendungszweck der AzB ist das durchaus sinnvoll. Wenn man dieses Verfahren allerdings außerhalb des vorgesehenen Anwendungsbereichs betreibt, etwa zur Optimierung von Flugverfahren, muss man sich des Konzepts bewusst sein und ggf. sogar die Gruppe umstrukturieren oder aufspalten.

Klassifizierung von Rechenverfahren

Grob kann man Fluglärmrechnungsverfahren in zwei Kategorien einordnen. Verfahren, die für den praktischen Einsatz (Schutzzonenberechnung, Lärminderungs- und Siedlungsplanung) ausgelegt sind, werden als „konventionelle“ Verfahren bezeichnet. Diese Verfahren sind primär dazu ausgelegt, komplexe Flugverkehre zu untersuchen. Sie sind nicht oder nur begrenzt dazu geeignet, Einzelflüge zu modellieren. Konventionelle Verfahren können vom Modellierungsansatz her in drei Kategorien unterteilt werden:

- CPA-Verfahren wie die AzB von 1975
- Segmentierungsverfahren wie die AzB von 2008 oder das im ECAC Doc.29 [12] beschriebene Verfahren
- Zeitschrittverfahren wie FLULA2 [13]

Die zweite Kategorie von sind die „Simulationsverfahren“, die eher für den wissenschaftlichen Einsatz gedacht sind. Der Begriff „Simulation“ bezieht sich hier auf eine hochwertige Modellierung des Flugzeugs als Schallquelle, die es gewährleistet, dass auch die durch einzelne Flüge hervorgerufenen Immissionswerte möglichst detailgetreu wiedergegeben werden können.

CPA-Verfahren

Der CPA-Ansatz, auf dem auch die AzB aus dem Jahr 1975 aufsetzt, ist einfach und effizient und daher erste Wahl wenn nur begrenzte Rechnerkapazitäten zur Verfügung stehen. Bei diesem Verfahren werden die Immissionswerte (Maximalpegel, Expositionspegel oder auch Geräuschdauer) für den geringsten Abstand des Immissionsortes zu einer als unendlich lang angenommenen Flugbahn bestimmt. Bei der AzB werden die entsprechenden Pegelwerte aus Oktavspektren bestimmt. Eine alternative und weitverbreitete Methode ist die Interpolation der Pegel aus „Noise-Power-Distance-Data“. In derartigen „NPD-Tabellen“ sind die Immissionspegel als Funktion von kleinstem Vorbeiflugabstand d und Triebwerksleistung für eine bestimmte Referenzgeschwindigkeit abgespeichert.

Ein Nachteil von CPA-Verfahren ist, dass im Bereich von gekrümmten oder nur endlich langen Flugstreckensegmenten

die Annahme eines unendlich langen Geradeausfluges zwangsläufig zu Ungenauigkeiten führen muss. Es ergeben sich aber auch noch andere Probleme [14], wie z. B. die Überlappung von Einflussbereichen bei der AzB.

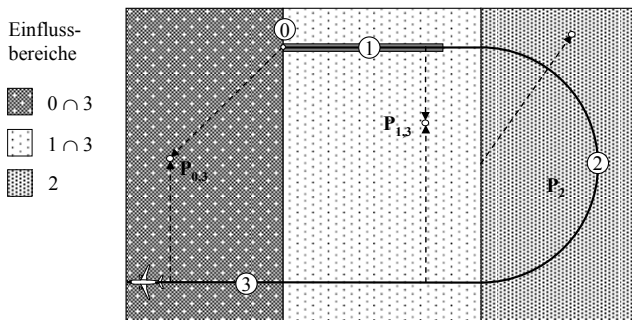


Abbildung 6: Einflussbereiche bei CPA-Verfahren für eine Flugstrecke mit 3 Segmenten. Dem Startpunkt wird das Segment Nr. 0 zugeordnet. Die Immissionsorte $P_{i,j}$ liegen in den Einflussbereichen der Streckensegmente i und j .

Flugstrecken werden in der AzB durch eine nummerierte Folge von geraden und kreisbogenförmigen Abschnitten beschrieben. Ein Punkt P liegt „im Einflussbereich“ eines solchen Abschnitts, wenn ein Lot durch ihn darauf gefällt werden kann. Die gesamte Halbebene hinter dem Startpunkt (Streckenabschnitt 0) ist dessen Einflussbereich. Einflussbereiche können sich überschneiden (Abbildung 6). Verläuft eine Lärmkontur über eine Bereichsgrenze zwischen überlappenden Bereichen, so treten in der Regel Sprünge im Kurvenverlauf auf.

Um die mit den CPA-Verfahren verbundenen Probleme zu kompensieren wurden oft willkürliche Rechenkonventionen („ein Immissionsort kann nur im Einflussbereich eines einzigen Segments liegen“) oder empirische, z.T. sehr komplizierte Korrekturalgorithmen eingeführt. Bei der AzB wurde darauf verzichtet. Hier wurden aber Vorgehensweisen zur nachträglichen Behandlung von Besonderheiten im Verlauf der Lärmkonturen definiert.

Segmentierungsverfahren

Viele der mit CPA-Verfahren verbundenen Einschränkungen können mit dem Prinzip der Segmentierung eliminiert werden. Ansatz ist hier eine Zerlegung der der Flugbahn in lineare Segmente, die jeweils einen Beitrag E_i zur Gesamtmission an einem Immissionsort liefern (Abbildung 7).

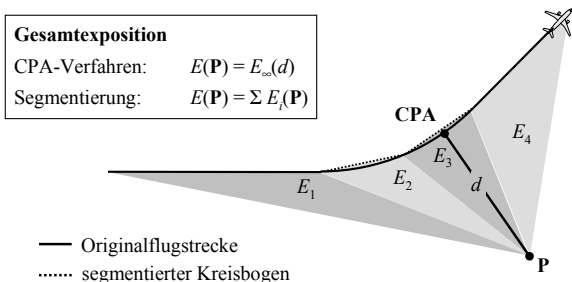


Abbildung 7: Gesamtexposition am Immissionsort P für CPA- und Segmentierungsverfahren.

Die Generierung der 3-dimensionalen, segmentierten Flugbahn ist ein zweistufiger Prozess (Abbildung 8), der sich aus der Überlagerung des Flugweges (d. h. der Projektion der Flugbahn in die Horizontalebene) mit einem vertikalen Flughöhenprofil, das aus linearen Segmenten besteht, ergibt. An den Knickpunkten dieses Vertikalprofils ändern sich in der Regel Flugleistungsdaten wie Beschleunigung, Triebwerksleistung oder Steigwinkel.

Der erste Segmentierungsschritt ist die Zerlegung der kreisbogenförmigen Flugwegsegmente in Sehnen. Die dadurch definierten Knickstellen werden dann auf das Vertikalprofil projiziert und definieren im 3-dimensionalen Profil neue Segmentpunkte, an denen sich der Kurswinkel ändert.

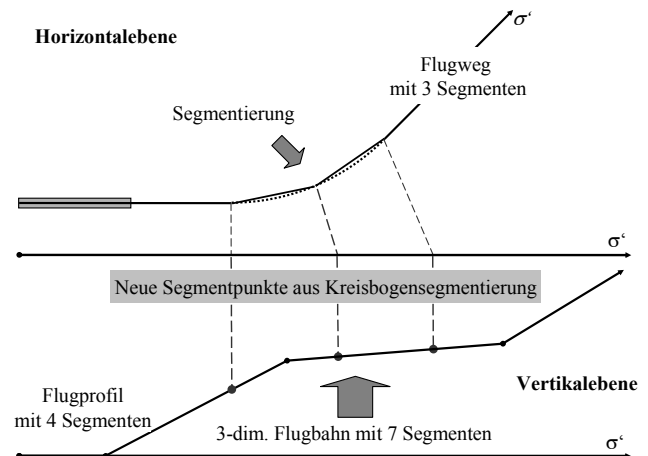


Abbildung 8: Geometrische Segmentierung der Flugbahn

Nach dieser geometrischen Segmentierung ist die Zerlegung in der Regel noch nicht abgeschlossen. Wie sich die Expositionsbeiträge am Immissionsort bestimmen, hängt vom jeweiligen Modellansatz ab. Die zwei bekanntesten sollen im Folgenden beschrieben werden.

Die Energy Fraction nach ECAC Doc.29

Der wohl verbreitetste Segmentierungsansatz ist das im ECAC Doc.29 beschriebene Prinzip der „Energy-Fraction“ (Abbildung 9).

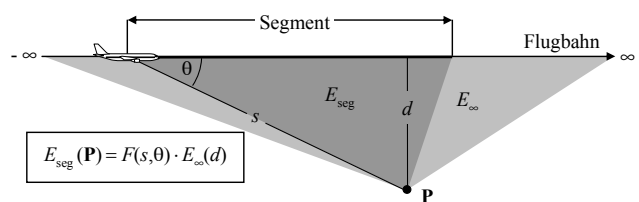


Abbildung 9: Segmentierung nach dem Prinzip der Energy-Fraction.

Hier ergibt sich der Beitrag E_{seg} eines Segments zur Exposition am Punkt P als Bruchteil F desjenigen Beitrags E_{∞} , den ein Vorbeiflug auf einer unendlich langen horizontalen Flugbahn in P erzeugen würde. Der Wert von E_{∞} wird aus entsprechenden NPD-Tabellen entnommen, die in der „Aircraft Noise and Performance Database ANP“ [15] als Funkti-

on des kürzesten Vorbeiflugabstandes d abgespeichert sind. Der Faktor F wird als „Energy Fraction Factor“ bezeichnet.

Doc.29 beschreibt die Richtwirkung über einen Dipolansatz. Befindet sich das Flugzeug im Abstand s vom Immissionsort \mathbf{P} , so ergibt sich dort das Quadrat des Schalldrucks p_s als:

$$p_s^2 = p_d^2 \cdot \frac{d^2}{s^2} \cdot \sin^2 \theta = p_d^2 \cdot \frac{d^4}{s^4} \quad \text{Pa}^2 \quad (1)$$

Dabei ist p_d der Schalldruck für den kürzesten Vorbeiflugabstand d (auf dem die Pegelwerte in den NPD-Tabellen basieren) und θ der Winkel zwischen Flugrichtung und Richtungsvektor zum Immissionsort. Aus diesem Ansatz ergibt sich eine analytische Lösung für F aus der Geometrie zwischen Segment und Immissionsort \mathbf{P} und der Flugeschwindigkeit.

Da die NPD-Kurven, aus denen E_∞ bestimmt wird, für eine feste Flugeschwindigkeit und eine feste Triebwerksleistung gelten, sollten diese beiden Größen längs des betrachteten Segments nicht zu stark variieren. Andernfalls muss das Segment in folgenden Schritten weiter unterteilt werden.

Der Ansatz einer Dipol-Richtcharakteristik liefert bei der Ermittlung der Schallexposition für moderne Strahlflugzeuge erstaunlich gute Resultate im Vergleich zu Messungen oder Simulationen auf der Basis von gemessenen Richtcharakteristiken. Dies hängt damit zusammen, dass bei modernen Strahltriebwerken mit hohem Nebenstromverhältnis das Abstrahlmaximum näher zur Senkrechten ($\theta = 90^\circ$) liegt als bei alten Mustern. Außerdem kommt der maßgebliche Beitrag zur Gesamtexposition nur aus einem vergleichsweise kleinen Winkelbereich.

Ein Problem ergibt sich aber, wenn sowohl Expositionspegel als auch Maximalpegel betrachtet werden sollen. Aus dem Dipolmodell ergibt sich eine bestimmte Differenz $\Delta L_{\text{Dipol}}(d)$ zwischen Effektiv- und Maximalpegel. Diese stimmt aber in der Regel nicht mit der entsprechenden Differenz $\Delta L_{\text{NPD}}(d)$ überein, die sich aus den in den NPD-Daten abgespeicherten Expositions- und Maximalpegeln ergibt. Diese Daten sind aus Messungen abgeleitet und basieren dementsprechend auf realen Richtcharakteristiken.

Um diese Diskrepanz zu eliminieren, wird eine „Scaled Distance d_λ “ eingeführt [9]. Diese ergibt sich aus der Forderung, dass die Pegeldifferenzen für NPD-Daten und Dipolmodell gleich sein müssen:

$$\Delta L_{\text{Dipol}}(d_\lambda) = \Delta L_{\text{NPD}}(d) \quad \text{dB} \quad (2)$$

Die aus dieser Bedingung resultierende Scaled Distance d_λ geht anstelle von d in die Berechnung des Energy Fraction Factors F ein.

Das Teilstückverfahren nach AzB-2008

Bei der AzB-2008 erfolgt nach der in Abbildung 10 beschriebenen geometrischen Segmentierung eine weitere Zerlegung auf der Grundlage der spezifischen Emissionen (Abbildung 10).

Dazu werden für ein Flugbahnsegment sowohl die Differenzen des Pegels der A-bewerteten längenbezogenen Schallleistungsexposition L_{WAE} als auch des A-bewerteten Schallleistungspegels L_{WA} zwischen Anfang Ende des Segments bestimmt. Sind nicht beide Differenzen kleiner als 1 dB, wird das Segment in 2 gleich lange Teilstimente unterteilt. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis alle Differenzen ΔL_{WAE} und ΔL_{WA} kleiner als 1 dB sind.

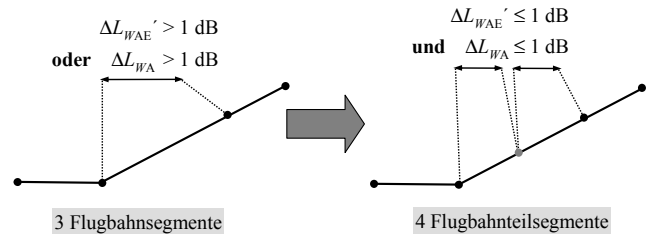


Abbildung 10: Segmentierung durch Anpassung der spezifischen Emissionen bei der AzB-2008.

Die Unterteilung kann bei der Emission aber noch keine Effekte der Richtwirkung berücksichtigen. Diese wird in der AzB für jede Flugzeuggruppe (getrennt für An- und Abflug) durch einen Zuschlag $D_{i,n}^*(\theta)$ für jedes Oktavband n beschrieben. Der Zuschlag ergibt sich durch eine Reihenentwicklung im Kosinus des Abstrahlwinkels θ :

$$D_{i,n}^*(\theta) = 3 \cdot \sum_{i=1}^3 a_{i,n} \cdot \cos(i \cdot \theta) \quad \text{dB} \quad (3)$$

Die ganzzahligen Koeffizienten $a_{i,n}$ sind über die spektralen „Richtungsfaktoren“ R_n als 3-Tupel definiert. Abbildung 11 zeigt eine entsprechende Richtcharakteristik für ein Flugzeug der Gruppe S5.2 beim Abflug.

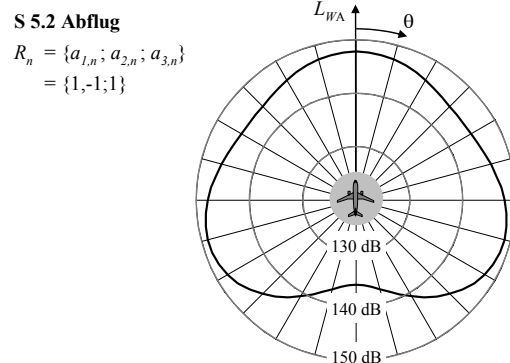


Abbildung 11: Richtwirkung nach AzB-2008 für Flugzeuge der Gruppe S5.2 (B737, A320, ...) beim Abflug.

Bei ausgeprägten Richtcharakteristiken kann es passieren, dass sich trotz der Anpassung der spezifischen Emissionen bezogen auf einen Immissionsort größere Differenzen als 1 dB zwischen den Pegeln an den Teilstimentenden ergeben. Aus diesem Grund wird noch ein zusätzlicher Segmentierungsschritt eingeführt, der von der Geometrie zwischen Segment und Immissionsort abhängt.

Beträgt die Länge l_i eines Flugbahnteilsegmentes mehr als $1/10$ seines kürzesten Abstandes r_i zu einem Immissionsort \mathbf{P} , so muss dieses Segment in sog. „Teilstücke“ unterteilt werden (Abbildung 12). Diese Unterteilung erfolgt sukzessive so lange, bis alle Teilstücke der obigen Bedingung genügen.

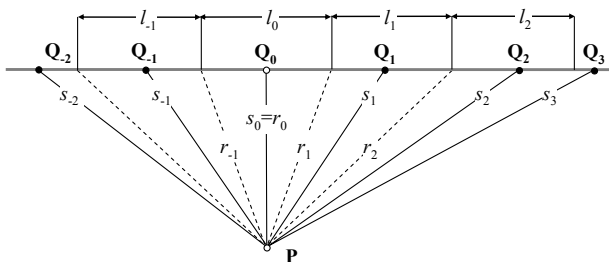


Abbildung 12: Teilstückverfahren nach AzB-2008. Es wird so lange unterteilt, bis überall gilt $l_i < 0.1 \cdot r_i$.

Bei der Immissionsberechnung wird dann jedes Teilstück durch eine Punktschallquelle \mathbf{Q}_i repräsentiert, die in der Regel in der Mitte des Teilstücks liegt. Die Ausbreitungsrechnung erfolgt dann für den Abstand s_i zwischen \mathbf{Q}_i und \mathbf{P} .

Zeitschrittverfahren

Der Prozess der Segmentierung ist – insbesondere bei der AzB – relativ kompliziert und kann gerade für sehr kurze Abstände zwischen Flugzeug und Immissionsort Overhead in den Rechenzeiten erzeugen. Eine konsequente Fortsetzung – und der am einfachsten umzusetzende Ansatz einer Segmentierung – ist das Modell der bewegten Punktschallquelle. Dieses wird realisiert durch die Zerlegung der Flugbahn in diskrete Punkte, die das Flugzeug in konstanten Zeitabschnitten (in der Regel einer Sekunde) passiert.

Von den konventionellen Fluglärmerechnungsverfahren verwendet das an der schweizerischen EMPA entwickelte FLULA2-Verfahren diesen Ansatz. FLULA2 basiert auf einer Funktion, mit der sich der A-bewertete Schallpegel als Funktion des Abstandes R zum Immissionsort und des Abstrahlwinkels θ für $R \leq 4500$ m nach folgender Gleichung ermitteln lässt:

$$L_A = \sum_{i=0}^7 [H_{i1} \cdot 20 \cdot \log(R) + H_{i2} + H_{i3} \cdot R + H_{i4} \cdot R^2] \cdot \cos^i \theta \quad \text{dB} \quad (4)$$

Die 32 notwendigen Koeffizienten H_{ik} wurden aus umfangreichen Messungen für verschiedene Flugzeugmuster bestimmt. Dieser Ansatz ist mathematischer Art. Er basiert nicht auf einem physikalischen Modell, bei dem Emission und Ausbreitung getrennt sind. Für Entfernungen oberhalb von 4500 Metern versagt diese Näherung. Hier wird ein Ansatz benutzt, in den geometrische Dämpfung und Luftdämpfung eingehen.

Simulationsverfahren

Von den bisher beschriebenen konventionellen Verfahren basiert keines auf einer vollständigen Trennung von Quelle

und Ausbreitung. Die AzB trennt beides zwar rein formal im Berechnungsalgorithmus. Sie setzt aber, wie die Ausführungen zur akustischen Äquivalenz am Beispiel der Gruppe S6.1 zeigen, auf Immissionsdaten auf. Dadurch werden unterschiedliche Emissionseigenschaften innerhalb der Gruppe kaschiert.

Simulationsverfahren – die immer als Zeitschrittverfahren ausgelegt werden – zeichnen sich demgegenüber dadurch aus, dass die Quelle so genau wie möglich bzw. wie notwendig beschrieben wird. Dass dies alles andere als trivial ist, wird durch Abbildung 13 deutlich. Hier sind die wichtigsten Quellmechanismen des durch die Umströmung und das Triebwerk erzeugten Lärms am Beispiel einer Boeing B747 dargestellt.

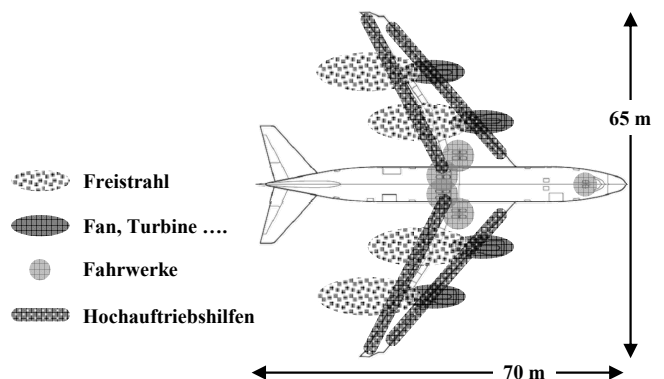


Abbildung 13: Schallquellmechanismen am Flugzeug am Beispiel einer Boeing B747-400.

Bei allen Verfahren zur Berechnung von Fluglärm wird das Flugzeug letztendlich als Punktschallquelle betrachtet. Das entspricht angesichts der in der Abbildung ausgewiesenen Dimensionen zwar einer sehr willkürlichen Vereinfachung, ist aus praktischen Gründen aber unumgänglich. Eine genaue und umfassende Modellierung der einzelnen Mechanismen ist derzeit nicht realisierbar. Allerdings muss man sich sowohl bei der Vermessung zur Datengewinnung als auch bei der Interpretation von Rechenergebnissen der Tatsache bewusst sein, dass das Flugzeug bei 2-dimensionaler Betrachtung eine Flächenschallquelle mit inhomogener und auch noch zeitlich variierende Quellverteilung ist, deren Ausdehnung einige Hundert Quadratmeter umfasst. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass immer wieder thematisiert wird, dass eine Fluglärmerechnung mit zunehmender Ausbreitungsentfernung immer ungenauer wird. Dass dies auch für geringe Entfernungen der Fall ist, wird meistens ignoriert.

Quellmodelle

Die einfachste Form eines Quellmodells ist eine empirische, spektrale Beschreibung des Schallleistungspegels $L(\theta, \varphi, \dots)$ als Funktion der beiden Polarwinkel θ und φ sowie einer Anzahl anderer, die Emission beeinflussender Parameter. Diese müssen den für eine Berechnung relevanten Bereich vollständig und in geeigneter Auflösung abdecken. Für Strahlverkehrsflugzeuge wären dies:

- Triebwerksleistung (Leerlauf bis zum Maximalschub)

- Fluggeschwindigkeit (bis zu etwa 150 m/s)
- Konfiguration (alle auftretenden Kombinationen von Klappenstellung und Fahrwerk)

Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass eine entsprechende Vermessung nur unter sehr hohem personellen und finanziellen Aufwand möglich ist [3,10]. Sie ist daher kaum für alle lärmsignifikanten am Luftverkehr teilnehmenden Flugzeugmuster realisierbar. Außerdem können bei empirischer Modellierung einzelne Quellmechanismen und insofern auch lärmindernde technische Maßnahmen am Flugzeug nicht abgebildet werden.

Am anderen Ende der Skala steht eine umfassende, auf einem physikalischen Modell der Quellmechanismen bestehende Beschreibung. Hier können auf Grundlage von flugzeugspezifischen Parametern (Triebwerksbauart, Klappen- und Fahrgestellgeometrie etc.) und aus operationellen Randbedingungen (Drücke und Temperaturen im Triebwerk, Klappenstellungen) mithilfe analytischer Beziehungen alle Quellmechanismen beschrieben werden. Dieser Ansatz wäre ideal, dürfte aber in absehbarer Zeit nicht umsetzbar sein.

Einen Kompromiss verfolgt ein beim DLR verwendetes, auf einem Teilschallquellenmodell beruhendes Verfahren mit dem Namen SIMUL, das vom Grundkonzept her in den 80er Jahren entstand [16,17]. Es basiert auf einer Anwendung des Prinzips der Lärmsignifikanz auf Quellebene. Dabei werden nur die charakteristischen Quellmechanismen für den jeweiligen Betriebszustand modelliert – also Triebwerke immer und Umströmungslärm nur bei der Landung. Nicht signifikante Quellmechanismen werden nicht separat modelliert.

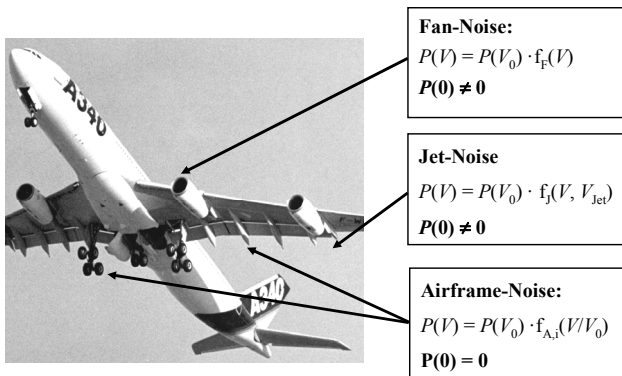


Abbildung 14: Schallquellmechanismen am Flugzeug und ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Erläuterungen der Symbole im Text).

Der bei SIMUL verfolgte Ansatz einer geeigneten Zerlegung in Teilschallquellen geht davon aus, dass die einzelnen Mechanismen der Schallentstehung unterschiedlich von der Fluggeschwindigkeit V abhängen. Derzeit beschreibt SIMUL vier Quellmechanismen (Abbildung 14):

- Die Leistung P des durch den Triebwerksstrahl erzeugten Schalls („Jet-Noise“) ist von der Fluggeschwindigkeit V und der Strahlgeschwindigkeit V_{jet} abhängig. Im statischen Fall ist die Schallleistung nicht Null.
- Dies gilt auch für den Schall der übrigen Komponenten des Triebwerks, die unter der Bezeichnung „Fan-Noise“

zusammengefasst werden, da der Triebwerksfan den dominierenden Anteil dieses Lärms erzeugt. Fan-Noise ist in erster Näherung nur von V abhängig.

- Die Umströmungsgeräusche („Airframe Noise“) sind ebenfalls nur von der Geschwindigkeit abhängig, verschwinden aber im statischen Fall. In der aktuellen Version von SIMUL werden Fahrwerkslärm und der Lärm der Hochauftriebshilfen separat modelliert, da sie unterschiedlich mit der Geschwindigkeit skalieren.

Die Abhängigkeiten von V werden durch unterschiedliche Funktionen f_f, f_j und zwei Funktionen $f_{A,i}$ (für Fahrwerk und Hochauftriebshilfen) beschrieben. In diese Funktionen gehen noch eine Reihe anderer Parameter ein, z. B. eine Bezugsgeschwindigkeit V_0 für den Umströmungslärm und der Abstrahlwinkel.

Mit dem Teilschallquellenmodell können sowohl technische Modifikationen am Triebwerk und an der Zelle als auch Änderungen in den Flugverfahren untersucht werden. Der Aufwand an benötigten Daten ist geringer als bei rein empirischen Modellen, da der Einfluss der Geschwindigkeit über physikalische Modelle analytisch eingeht.

Nichtsdestoweniger sind die benötigten Daten immer noch nur durch vergleichsweise aufwendige Messungen zu gewinnen, wie die Erkenntnisse aus den Vorhaben „LANAb“ [3] und „Leiser Flugverkehr“ [10] gezeigt haben. Ein vollständiger Datensatz für SIMUL liegt derzeit nur für den Airbus A319/A320 vor. Allerdings sind mittlerweile auch kontrollierte Überflugmessungen mit einer B747-400 sowie einer B737-800 durchgeführt worden, die aber noch ausgewertet werden müssen.

Ein Beispiel für eine typische Anwendung von SIMUL zeigt Abbildung 15. Hier wurde der Effekt einer Umrüstung eines Airbus A319 durch lärmreduzierende Maßnahmen untersucht [18]. Angenommen wurde, dass der Strahlärm um 2 dB und der Lärm des Fans um 3 dB gemindert werden können. Für die Hochauftriebshilfen wurde eine Minderung um bis zu 2 dB, für das Fahrwerk um 2.5 dB angesetzt.

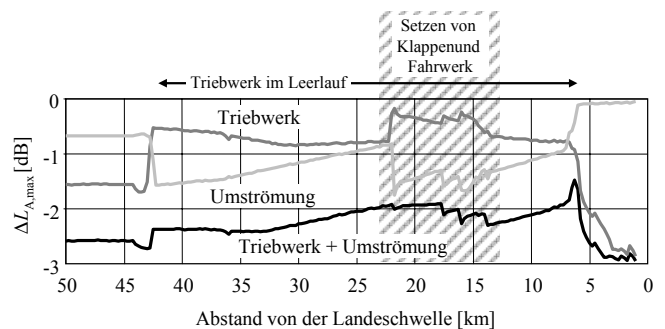


Abbildung 15: Modellierung von Umrüstmaßnahmen mit SIMUL – resultierende Maximalpegelabsenkungen $\Delta L_{A,max}$ unter der Flugbahn beim Anflug eines A319.

Die Abbildung zeigt die durch diese Maßnahmen erreichbare Absenkung $\Delta L_{A,max}$ des A-bewerteten Maximalschallpegels direkt unter der Flugbahn beim Landeanflug, getrennt nach den einzelnen Mechanismen. Man erkennt, dass in dem Bereich, in dem das Triebwerk im Leerlauf arbeitet, die Maß-

nahmen zur Reduktion des Umströmungslärms am effektivsten greifen – insbesondere in dem Bereich des Anfluges, in dem Klappen und Fahrwerk gesetzt werden. Die Maßnahmen am Triebwerk zeigen die höchste Wirkung vor dem Eintritt auf den Gleitweg in einer Entfernung von mehr als 45 km sowie im Endanflug – also in Bereichen, in denen die Triebwerksleistung erhöht werden muss, um nicht zu stark zu verzögern.

Grundlagen der Flugbahnmodellierung

Die Flugbahn eines Flugzeuges ergibt sich aus dem Gleichgewicht der auf das Flugzeug wirkenden Kräfte und Momente. Lässt man Letztere außer Acht, so erhält man ein einfaches flugmechanisches Massenpunktmodell, dessen Ansatz in der Abbildung 16 skizziert ist.

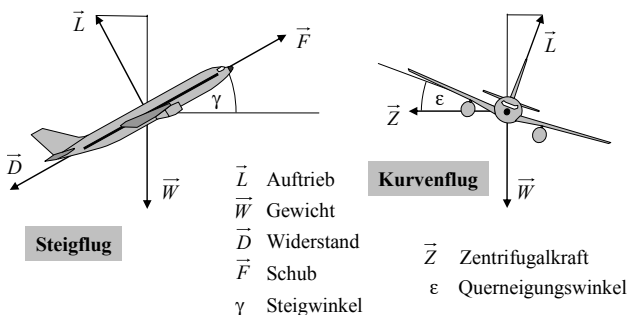


Abbildung 16: Kräftegleichgewichte für Steigflug und Kurvenflug beim flugmechanischen Massenpunktmodell.

Im Fall des beschleunigten Steigflugs durch eine Kurve erhält man aus dem Kräftegleichgewicht folgende Grundgleichung:

$$\sin \gamma = \frac{F}{W} - \frac{a}{g} - \frac{D}{L} \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos \epsilon} \quad (5)$$

Dabei ist a die Beschleunigung, die sich aus dem nicht zum Steigen umgesetzten Triebwerkschub ergibt. g ist die Schwerkbeschleunigung. Der bei einem Kurvenflug einzustellende Querneigungswinkel ϵ dient der Kompensation der Zentrifugalkraft und ergibt sich aus der Fluggeschwindigkeit und dem Radius der durchflogenen Kurve.

Da Widerstand und Auftrieb nur als Quotient auftreten, kann man diese Kräfte durch ihre aerodynamischen Beiwerte ersetzen. Damit und mit der Vereinfachung, dass der Kosinus des Steigwinkels ungefähr 1 ist, geht die Gleichung über in:

$$\sin \gamma = \frac{F}{W} - \frac{a}{g} - \frac{R}{\cos \epsilon} \quad (6)$$

Die „Gleitzahl“ R ist der Quotient aus Widerstands- und Auftriebsbeiwert. Sie hängt von der aerodynamischen Konfiguration (Stellung von Klappen, Spoilern und Fahrgestellen) ab. Werte für R können z. B. aus der „Aircraft Noise and Performance Database ANP“ [15] für Zwecke der Lärmberechnung entnommen werden.

Natürlich hängt der Steigwinkel ebenso wie die Triebwerksleistung noch von den meteorologischen Randbedingungen

(Wind, Temperatur, Druck) ab. Die notwendigen Korrekturen sind im ECAC Doc.29 beschrieben [11,12]. Die für die rechnerische Behandlung dieser Korrekturen nötigen Parameter finden sich ebenfalls in der ANP oder in der Datengrundlage des Integrated Noise Models INM [19]. Das INM hat sich in den letzten Jahren weltweit als Standardprogramm für Fluglärmberechnung etabliert und erfüllt in der Version 7 die Anforderungen des Doc.29.

In der Praxis werden zwei Ansätze zur Beschreibung einer Flugbahn verwendet. Gemeinsam ist beiden, dass sie die Bahn als eine Folge von geradlinigen Segmenten („Flugprofil“) beschreiben. An den Endpunkten der Segmente müssen zumindest Flughöhe, Geschwindigkeit und ein Parameter für die Triebwerksleistung als Kopplungsgröße für die Emissionsgrößen bekannt sein.

- „Festpunkt-Flugprofile“ wie in der AzB beschreiben eine unveränderbare Bahn für definierte Randbedingungen (Masse, Flugverfahren, Meteorologie). Sie können auch als charakteristische Profile für eine Kategorie von Flugzeugen definiert sein. Festpunkt-Profile sind unabhängig vom Flugstreckenverlauf.
- „Prozedurale Flugprofile“ geben demgegenüber lediglich eine Verfahrensbeschreibung vor (z. B. „Steigen bis auf 1500 Fuß, dann Schubrücknahme auf Steigschub und Beschleunigung auf 210 Knoten, dann Klappen einfahren“). Die aktuelle Flugbahn ergibt sich daraus durch eine Flugleistungsrechnung auf der Grundlage des aerodynamischen Massenpunktmodells. Prozedurale Profile sind der wesentlich flexiblere Ansatz und spiegeln die realen Vorgänge im Flugbetrieb wieder. Insbesondere berücksichtigen sie auch die Einflüsse von Flugzeugmasse, Kurvenflügen und Meteorologie (siehe Abbildung 3). Sie fordern aber vom Anwender auch deutlich höhere Sachkenntnisse aus den Bereichen der Flugsystemtechnik und der Flugführung.

Welche Art der Flugbahnmodellierung man benötigt, hängt vor allem von der konkreten Aufgabenstellung ab – so ist z. B. eine Untersuchung lärmarmen Flugverfahren mit Festpunktprofilen nicht durchzuführen.

Anforderungsprofile und Rechenverfahren

Im Folgenden sollen einige typische Anwendungen aus dem Bereich des Fluglärms sowie deren Anforderungen an ein Fluglärmberechnungsverfahren vorgestellt werden. Die Reihenfolge dieser Aufgabenstellungen spiegelt im Prinzip die historische Entwicklung wieder. Das reicht von den grundlegenden Anforderungen, die erst zur Entwicklung von Verfahren zur Fluglärmberechnung führten, über die derzeit aktuelle Anwendung zur Optimierung von Maßnahmen des aktiven Schallschutzes bis hin zum Einsatz von Modellen für den Bereich der Grundlagenforschung. Die hinsichtlich dieser Anforderungen untersuchten Rechenverfahren sind die AzB und das im ECAC Doc.29 beschriebene Verfahren als „Best-Practice-Verfahren“ sowie das SIMUL-Verfahren des DLR als Simulationsmodell.

„Klassische“ Anwendungen sind Untersuchungen an umfangreichen Flugverkehrsszenarien zu planerischen Zwecken

oder zu solchen der Lärmschutzgesetzgebung. Verfahren wie SIMUL kommen hier nicht infrage, da die Datengrundlage sehr begrenzt ist.

- Untersuchungen von prognostizierten Flugbetrieben sind im Rahmen des Fluglärmsgesetzes oder bei der Aus- oder Neubauplanung von Flughäfen notwendig. Hier ist eine für Flugverkehrsprognosen geeignete Einteilung in Flugzeuggruppen sinnvoll. Die AzB ist speziell auf diese Art von Anwendungen zugeschnitten. Die dem Doc.29 bzw. INM hinterlegten Datengrundlagen müssen erst gruppiert werden, da sie typenspezifisch ausgelegt sind.
- Eine aktuelle Anforderung ist die Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie [20]. Dies erfordert u. a., dass von allen Mitgliedsstaaten Fluglärmberechnungen für bereits vergangene Flugbetriebe durchgeführt werden. Das impliziert für das europaweit zu verwendende Verfahren, dass es nationale Eigenheiten (Typenzusammensetzung des Luftverkehrs, benutzte Flugverfahren, meteorologische Randbedingungen) berücksichtigen kann. Das ECAC Doc.29 kann diese Anforderungen erfüllen – es ist schließlich als Verfahren zur Umsetzung der Umgebungslärmrichtlinie entwickelt worden. Die AzB kann für diesen Zweck nur eingesetzt werden, wenn die speziell auf Deutschland zugeschnittene Datengrundlage umfangreich modifiziert wird.
- Vergleichende Untersuchungen („What-if-Studies“) sind ein weiterer klassischer Anwendungsfall. Sie dienen z. B. zur Quantifizierung der Effekte der Verlagerung von Flugstrecken oder der Ausmusterung, Ersetzung und Umschichtung einzelner Flugzeugmuster. Sofern hier einzelne Typen untersucht werden müssen, ist die AzB im Gegensatz zum Doc.29 nur nach Modifikation der Datengrundlage einsetzbar.

Erweiterte Anwendungen sind solche, für die Best-Practice-Verfahren nur mit Einschränkungen benutzt werden können. Hierunter fallen lärmarme Flugverfahren (NAP = Noise Abatement Flight Procedures) und auch technische Modifikationen an der Quelle – beides aktuelle umzusetzende Maßnahmen aus dem Bereich des aktiven Schallschutzes. Da diese Maßnahmen durchweg typenbezogen sind, fällt die AzB als Werkzeug zu ihrer Umsetzung prinzipiell aus.

- Die Auslegung lärmarmen Abflugverfahrens erfordert die Möglichkeit, prozedurale Profile zu erstellen. Eine Parametrisierung der akustischen Datenbasis über die Triebwerksleistung ist hier ausreichend. Diese Anforderungen erfüllt die dem Doc.29 hinterlegte ANP-Datengrundlage. SIMUL bietet hier zwar das ausgefeiltere akustische Modell und kann auch mehr operationelle Parameter einbinden, ist aber auf wenige Typen beschränkt.
- Bei der Untersuchung lärmarmen Abflugverfahrens wird zusätzlich ein Umströmungslärmmodell benötigt, das über die aerodynamische Konfiguration parametrisiert ist. Es muss also zumindest die Flugleistungsdaten, die in Abbildung 17 dargestellt sind, einbinden können. Das ist mit dem Doc.29 nicht mehr möglich – hier sind Simulationsverfahren wie SIMUL einzusetzen. Das gilt auch für die Modellierung der Einflüsse von technischen Maß-

nahmen zur Minderung von Triebwerks- und Umströmungslärm (siehe Abbildung 15).

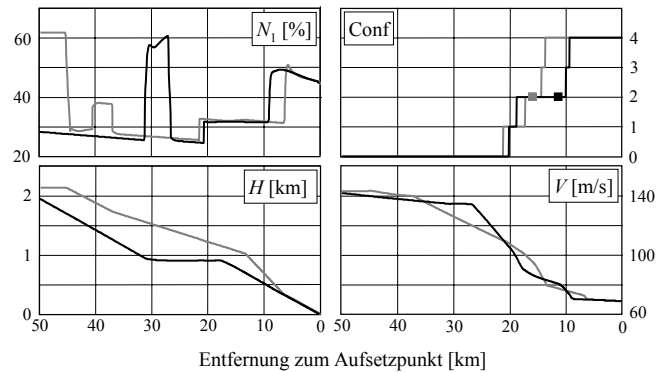


Abbildung 17: Flugleistungsdaten für zwei verschiedene Anflugverfahren: Drehzahl N_1 , Fluggeschwindigkeit V und Flughöhe H . „Conf“ bezeichnet die Klappenstellung, die Quadrate markieren das Ausfahren des Fahrwerkes.

Modifikation von konventionellen Verfahren

Die Ausführungen im vorherigen Abschnitt legen die Interpretation nahe, dass konventionelle Verfahren nur mit Einschränkungen für die Auslegung von Maßnahmen des aktiven Schallschutzes herangezogen werden können. Das ist prinzipiell auch richtig. Allerdings kann man fortschrittliche Verfahren zur Modifikation einfacherer Verfahren benutzen und so deren Anwendungsbereich erweitern.

Ein Beispiel hierfür wäre die Implementation von Anflugverfahren unter Berücksichtigung der Effekte des Umströmungslärms in die Datensätze der AzB. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden:

- Im ersten Schritt definiert man die benötigten prozeduralen Verfahrensschritte, z. B. über Informationen seitens der Airlines.
- Mithilfe des ECAC Doc.29 kann hieraus ein prozedurales Profil generiert werden. Damit ergeben sich die Verläufe von Flughöhe H und Geschwindigkeit V , die für die AzB-Datensätze benötigt werden.
- Der dritte Schritt besteht in einer Lärmberechnung mit SIMUL für das prozedurale Profil aus Schritt (ii.).
- Die aus dieser Berechnung resultierenden Pegeldifferenzen längs der Flugbahn werden analysiert. Daraus kann der Verlauf des Zusatzpegels Z für den AzB-Datensatz abgeleitet werden.

Abbildung 18 zeigt mit einer solchen Methodik ermittelte AzB-Datensätze für zwei verschiedene Varianten des Low-Drag-Low-Power-Anflugverfahrens für den A319 im Vergleich zum Anflugdatensatz der Gruppe S5.2, in die dieser Typ einzuordnen ist.

Die Kalibrierung der Zusatzpegel erfolgte hier anhand der Werte für das LDLP-Verfahren im Endanflugbereich. Der hohe Z -Wert für die Simulation im Abstand von etwa 30 km vor dem Aufsetzpunkt ist ein Indiz dafür, dass der Horizon-

talflugteil für den notwendigen Geschwindigkeitsabbau zu lang ist und daher eine Schuberrhöhung notwendig macht.

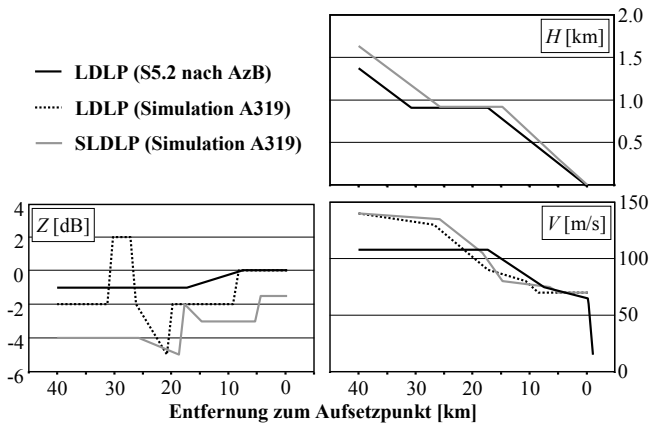


Abbildung 18: Mit Hilfe von SIMUL generierte Datensätze für zwei Varianten des Low-Drag-Low-Power-Anfluges LDLP für einen A319 im Vergleich zum Standard-Datensatz der AzB für die Gruppe S5.2. Das Höhenprofil ist für die beiden LDLP-Varianten identisch.

Fazit

In den vergangenen Dekaden haben sich die Anforderungen, die an den Einsatz von Verfahren zur Berechnung von Fluglärm gestellt werden, deutlich gewandelt. Früher stand der Einsatz in der Lärmschutzgesetzgebung und im Bereich der Siedlungsplanung im Vordergrund. Durch die rasante Entwicklung in der Computertechnik eröffnete sich die Möglichkeit, auch umfangreichere und rechenintensivere Aufgabenstellungen zu untersuchen. Dies reicht vom Einsatz im praktischen Bereich (wie die im Rahmen des aktiven Schallschutzes zu entwickelnden Maßnahmen) über die Anwendung von Simulationsverfahren bis hin ins Arbeitsgebiet der Computational Aeroacoustic (CAA), das sich mit Grundlagenuntersuchungen befasst.

Nichtsdestoweniger sind noch nicht alle Mechanismen der Entstehung von Fluglärm vollständig verstanden. Dies betrifft u. a. den Umströmungslärm, dessen Minderung aufgrund der immer leiser werdenden Triebwerke mehr und mehr an Bedeutung gewinnt. So wird man bei der Modellierung in Zukunft auch weiterhin auf empirische und semiempirische, aus Messungen abgeleitete Modelle nicht verzichten können.

Die Best-Practice-Modelle wie AzB-2008, ECAC Doc.29 und FLULA2 haben naturgemäß ihre Stärken und Schwächen. Die AzB-2008 als das zeitlich aktuellste Verfahren basiert auf einem flexiblen und erweiterbaren akustischen Modell. Sie ist aber hinsichtlich der Gruppeneinteilung speziell auf die deutschen Verhältnisse zugeschnitten. Außerdem bietet sie keine Vorgaben zur Generierung von prozeduralen Profilen wie das Doc.29. Letzteres basiert demgegenüber auf einem akustischen Modell, welches zwar effizient, aber nicht so leistungsfähig wie das der AzB-2008 ist. Das trifft auch auf FLULA2 zu. Dieses Verfahren setzt aber gegenüber AzB-2008 und Doc.29 auf dem sehr einfachen und daher gut umsetzbaren Prinzip der bewegten Punktquelle auf.

Es liegt nahe, die Vorzüge dieser Modelle zu kombinieren und damit ein Verfahren zu schaffen, das den aktuellen Stand der „Best-Practice“ erweitert. In ein solches Modell sollten auch die Erkenntnisse, die aus Verfahren wie SIMUL gewonnen werden können, mit einfließen. Die DIN 45689 [21], mit deren Bearbeitung im Jahr 2011 begonnen wird, wird auf diesem Konzept aufsetzen.

Mit der DIN 45689 bietet sich die Möglichkeit, eine erste Brücke zwischen Best-Practice und Simulation zu schlagen und den in Zukunft anfallenden Anforderungen an die Fluglärmrechnung gerecht zu werden [22]. Allerdings erfordert dies vor allem die Erstellung einer entsprechenden akustischen Datengrundlage. Diese muss umfassend und validiert sein. Konzepte zur Erstellung dieser Datengrundlage liegen bereits vor (Auswertung der Messungen von Fluglärmüberwachungsanlagen in Kombination mit Auswertung von Radardaten). Ohne die Unterstützung von Flughäfen, Fluggesellschaften, Herstellern von Fluglärmmesssystemen und verantwortlichen Ministerien bzw. Bundesämtern wird diese Aufgabe aber nicht zu bewältigen sein.

Literatur

- [1] Der Bundesminister des Innern: Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30.3.1971. GMBI 26, Ausgabe A, S.162-227 (1975).
- [2] Erste Verordnung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm (Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen - 1.FlugLSV) vom 27. Dezember 2008. BGBl I, S.2980.
- [3] Neise, W.: Lärmoptimierte An- und Abflugverfahren (LANAb) Zusammenfassender Schlussbericht des Forschungsprojekts gefördert vom Bundesministerium Wirtschaft und Technologie, November 2007. URL: <http://www.fvleiserverkehr.de/pdf-dokumente/1600DLRAT-TA.pdf>.
- [4] Expertengremium Aktiver Schallschutz des Forums Flughafen und Region Frankfurt: Bericht zum ersten Maßnahmenpaket Aktiver Schallschutz am Flughafen Frankfurt/Main, Dezember 2008 bis Mai 2010.
- [5] Bürck, W.; Grützmacher, M.; Meister, F.J.; Müller, E.-A., Matschat, K.: Fluglärm. Gutachten, erstattet im Auftrag des Bundesministers für Gesundheitswesen. Göttingen, Mai 1965.
- [6] Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30.03.1971, Bundesgesetzblatt Teil I, S.282-287, zuletzt geändert am 25.09.1990, Bundesgesetzblatt Teil I, S.2.106ff.
- [7] Matschat, K.; Müller, E.-A.: Effektivpegel und Geräuschkdauer bei Flugzeugvorbeiflügen. In: Festschrift zum 100-jährigen Bestehen der Versuchs- und Forschungsanstalt Wien.Wien, Mai 1979.
- [8] Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung der Neufassung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm vom 31. Oktober

2007. BGBl 2007, Teil I, Nr.56, S. 2550-2556, Bonn, 9. November 2007.
- [9] Isermann, U.: Die Überarbeitung des ECAC Dokuments ECAC Doc.29. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE-Bericht Nr. L-6/2001-50.2878/2001. Göttingen, 13.01.2006.
- [10] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Leiser Flugverkehr – zusammenfassender Projekt-Abschlußbericht. Göttingen, Juni 2004
Leiser Flugverkehr II - Abschlußbericht, Göttingen, Dezember 2007.
URL: <http://www.dlr.de>
- [11] Isermann, U.; Schmid, R.; Tontsch, I.: Umsetzung des ECAC Doc.29 in Hinblick auf deutsche Anforderungen. Im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. FE-Bericht Nr. L-6/2005 - 50.0317/2005. Göttingen, 10.07.2008.
- [12] European Civil Aviation Conference (ECAC): Methodology for Computing Noise Contours around Civil Airports. Volume 1: Applications Guide, Volume 2: Technical Guide. ECAC/CEAC Doc.29, 3rd Edition, December 2005.
URL: <http://www.ecacceac.org>
- [13] Thomann, G.; Bütikofer, R.: FLULA2 – ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programmdokumentation, Version 1, EMPA Nr.840'143/513.1933, Dübendorf (CH), Juli 1999.
- [14] Isermann, U.; Schmid, R.: Bewertung und Berechnung von Fluglärm. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, FE-Bericht Nr. L-2/96-50144/96. DLR Institut für Strömungsmechanik, Göttingen, Juli 1999
- [15] Eurocontrol Experimental Centre: The Aircraft Noise and Performance (ANP) Database: An international data resource for aircraft noise modellers
URL: <http://www.aircraftnoisemodel.org>
- [16] Isermann, U.: Berechnung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Verkehrsflughäfen mit Hilfe eines Simulationsverfahrens. MPI für Strömungsforschung, Bericht 7/1988, Göttingen, Februar 1988.
- [17] Isermann, U.: Erweiterung des Rechenprogramms SIMUL. Forschungsverbund Leiser Verkehr, Bereich Leises Verkehrsflugzeug, Projekt 1600, Einzelaufgaben 1624-1627, Göttingen, Juni 2007.
- [18] Neise, W.; Dobrzynski, W.; Isermann, U.; König, R.; Claßen, A.B.; Bischoff, G.: Strategien zur Lärmminde- rung an der Quelle unter Einschluss operationeller Möglichkeiten, speziell für den Nachtflug. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadt- entwicklung. FE-Bericht Nr. L-3/2004-50.0307/2004. Berlin, 2009.
- [19] He, H.; Boeker, E.; Dinges, E. et al.: Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide. FAA-AEE-07-04, April 2007.
- [20] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Richt- linie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Be- kämpfung von Umgebungslärm. Luxemburg, 25. Juni 2002. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L189/12 vom 18.7.2002.
- [21] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Akustik – Ermittlung von Geräuschimmissionen an Flughäfen. DIN 45689 (in Vorbereitung).
- [22] Isermann, U.: DIN 45689 – eine AzB mit mehr Profil? DAGA 2010, Berlin, März 2010.