

Marvin Müller, Christoph Strümpfel

# Methodik zur Bewertung von Flugverfahren hinsichtlich Fluglärm und weiteren Kriterien

Journal article | Accepted manuscript (Postprint)

This version is available at <https://doi.org/10.14279/depositonce-8303>



Müller, Marvin; Strümpfel, Christoph (2019): Methodik zur Bewertung von Flugverfahren hinsichtlich Fluglärm und weiteren Kriterien. In: *Lärmbekämpfung*, 14 (1), pp. 9–15.

## Terms of Use

Copyright applies. A non-exclusive, non-transferable and limited right to use is granted. This document is intended solely for personal, non-commercial use.

# Methodik zur Bewertung von Flugverfahren hinsichtlich Fluglärm und weiteren Kriterien

Marvin MÜLLER<sup>1</sup>, Christoph STRÜMPFEL<sup>2</sup>  
Technische Universität Berlin

*Der vorliegende Artikel erschien als Erstveröffentlichung in der Fachzeitschrift „Lärmbekämpfung“ der VDI Fachmedien GmbH & Co. KG (Hrsg) und weist gegenüber der Erstveröffentlichung Änderungen im Abschnitt ABSTRACT auf. Der Vollverweis zur Erstveröffentlichung lautet:*

*Müller, M.; Strümpfel, C.: Methodik zur Bewertung von Flugverfahren hinsichtlich Fluglärm und weiteren Kriterien. Lärmbekämpfung Bd. 14 (2019) Nr. 1 – Januar.*

## ABSTRACT

Geänderte Betriebsverfahren an Flughäfen können für Bewohner von flughafennahen Gebieten verminderten Fluglärm und verbesserte Luftqualität bedeuten, während in anderen Gebieten im Umkreis von Flughäfen gegensätzliche Effekte zu beobachten sind. Folglich ist an Flughäfen, insbesondere jenen in Industrieländern, ein massiver Interessenkonflikt während des Flugbetriebs und in Hinblick auf Änderungen von flugbetrieblichen Verfahren zu beobachten. Während der Luftverkehr kontinuierlich wächst sind positive wirtschaftliche Effekte für Flughäfen unbestritten. Dennoch konzentriert sich der aktuelle öffentliche Streit auf die Lärmbelastung durch abfliegende und ankommende Flugzeuge sowie den Boden- und Rollverkehr.

Der vorliegende Artikel analysiert die Interessenlage aller am Flugverfahrensplanungsprozess Beteiligten und untersucht Methoden zur ausschließlichen fluglärm-basierten Bewertung von Flugverfahren. Zurückgegriffen wird dabei auf eine bewährte Methode, um in anderen Themenfeldern gewonnenes methodisches Wissen zu nutzen. Die Kosten-Nutzen-Analyse stellt sich dabei als das am besten geeignete Verfahren heraus. Basierend auf der methodischen und fachlichen Analyse des Festsetzungsprozesses von Flugverfahren und der im Prozess vertretenen Interessen werden Kriterien ermittelt, die zur Bewertung eines Flugverfahrens herangezogen werden können und die zuvor ermittelten Interessen umfassend abdecken. Für eine Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) werden für diese Kriterien jeweils monetäre Bewertungsmodelle entwickelt oder vorgestellt. Das anschließende „Proof of Concept“ wendet das entwickelte Bewertungsverfahren auf einen fiktiven Flugverfahrensänderungsfall am Flughafen Berlin-Tegel an.

---

<sup>1</sup> Masterstudent, Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr

<sup>2</sup> Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet Flugführung und Luftverkehr, Marchstr. 12 – F3 10587 Berlin

# 1 EINFÜHRUNG

Im Folgenden soll ein generisches, kosten-nutzen-basiertes Bewertungsverfahren beschrieben werden, das die Beurteilung verschiedener Flugverfahrenskonzepte hinsichtlich ökoeffizienter Parameter wie Treibstoffverbrauch, Lärmimmission und Schadstoffemission ermöglicht. Die Anforderungen an ein solches Bewertungsverfahren können wie folgt zusammengefasst werden:

- Berücksichtigung der Interessen aller betroffenen Parteien
- Neutrale Bewertung von positiven und negativen Auswirkungen
- Transparente und nachvollziehbare Bewertung
- Standortunabhängigkeit

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden bewährte wirtschaftliche Bewertungsverfahren auf ihre Eignung für die Beurteilung von Flugverfahren überprüft. Da derzeit kein adäquates und allen Anforderungen entsprechendes Bewertungsverfahren existiert, sind bei der Entwicklung des neuen Bewertungsverfahrens bewährte Verfahrensansätze eingesetzt worden. Um die Anwendbarkeit zu belegen und Potentiale aufzuzeigen, wurde das entwickelte Verfahren auf ein fiktives Szenario von Abflügen am Flughafen Berlin-Tegel angewandt.

## 1.1 Status Quo

Aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich der Flugverfahrensbetrachtung behandeln beinahe ausschließlich die Fluglärmwirkungen (Leder, 1996; Hotes, et al., 2013). Dies ist nachvollziehbar, da die durch Luftverkehr verursachte Lärmbelastung die häufigste negative und vordergründige Auswirkung des Flugbetriebs darstellt und somit im Mittelpunkt der Medienberichterstattung steht. Für eine umfassende und objektive Beurteilung der Flugverfahren sind jedoch auch andere Faktoren zwingend zu berücksichtigen.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die aktuelle Rechtslage in Deutschland, basierend auf dem aktuellen Prozess zur Festlegung nicht-temporärer Flugverfahren für den Betrieb nach Instrumentenflugregeln (engl. Instrument Flight Rules, IFR) (§33 II LuftVO & §33 III LuftVO). Um die Bedürfnisse und Interessen der beteiligten Parteien zu verstehen, ist eine Analyse des Prozesses und seiner Teilnehmer erforderlich. Die entsprechenden Rechtsnormen für Deutschland sind im „Luftverkehrsgesetz“ (LuftVG), in der „Luftverkehrsordnung“ (LuftVO), im „Gesetz über die Errichtung des Bundesaufsichtsamtes für Flugsicherung“ (BAFG) sowie im „Gesetz über den Schutz vor Fluglärm“ (FluLärmG) und den damit verbundenen Vorschriften festgelegt.

## 1.2 Prozess zur Festlegung von Flugverfahren

Das BAF ist für die Koordination der im Rahmen des Prozesses erforderlichen Maßnahmen zur Festlegung von Flugverfahren verantwortlich. Neben dem BAF sind die Fluglärmkommission (FLK) sowie die Deutsche Flugsicherung (DFS) maßgeblich am Prozess be-

teilt. Die DFS ist für die technische Planung von Flugverfahren nach internationalen Vorschriften zuständig, wobei die Bevölkerung vor unzumutbarer Lärmbelastung zu schützen ist (vgl. §29b II LuftVG). (ICAO, 2006)

Änderungsvorschläge für Flugverfahren müssen dem Umweltbundesamt (UBA) zur Stellungnahme vorgelegt werden. Basierend darauf trifft das BAF eine Entscheidung über die vorgeschlagene Änderung bzw. Neufestlegung der Flugverfahren. (BAF, 2018)

## **2 BEWERTUNGSVERFAHREN**

Die Studie verwendet ein mehrdimensionales Bewertungsverfahren, um die oftmals diametral gegenüberstehenden Interessen der beteiligten Akteure abzudecken. Aus Transparenzgründen wird ein quantitativer Ansatz gegenüber einer qualitativen Methode bevorzugt. Da nicht jedes Kriterium quantitativ bewertet werden kann, verfolgt das Verfahren einen semi-quantitativen Ansatz. (Lengwenat, 2013)

Hierfür müssen alle Bewertungskriterien in quantifizierbare Kriterien überführt werden, wodurch zusätzliche „Zwischen“-verfahren notwendig werden. Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) gilt hier als die Methode der Wahl, da sie in der öffentlichen Verwaltung, insbesondere bei Bauvorhaben, einen bewährten Ansatz darstellt (Lengwenat, 2012). Das KNA-Verfahren und die daran anschließende Bewertung der Risiken und Unsicherheiten erfordert die Festlegung von Randbedingungen sowie eine monetäre Beurteilung der durch die Flugverfahrensänderung hervorgerufenen Auswirkung. (Hanusch & Jung, 2011)

Die KNA ist auch deshalb ein adäquates Bewertungsverfahren für Flugverfahren, da die monetäre Bewertung einem sehr einfachen und leicht verständlichen Ansatz folgt, der abhängig vom Detailgrad unterschiedlich komplex ausgeprägt sein kann. Die präzise monetäre Bewertung einzelner Kriterien ist eine zentrale Herausforderung bei der Anwendung der KNA auf einen Beurteilungsfall. Die Verständlichkeit des Ansatzes ermöglicht es auch einem fachfremden Publikum, dem Bewertungsverfahren zu folgen, wodurch die Transparenz in einem öffentlichen Diskurs unterstützt wird.

In der Literatur wird zwischen verschiedenen Arten von Effekten unterschieden, die mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren einer monetären Bewertung zugeführt werden können. Grundsätzlich wird zwischen internen (beabsichtigten) und externen (unbeabsichtigten) Effekten unterschieden (Hanusch & Jung, 2011). Die Bewertung der einzelnen Effekte eines Flugverfahrens findet im vorliegenden Verfahren auf Ebene des betroffenen Haushaltes statt.

In vielen Fällen externer und interner Effekte fehlen jedoch die zur Bewertung der Auswirkung notwendigen beobachtbaren Preise. Diese können durch sog. Schattenpreise ersetzt werden (Hanusch & Jung, 2011). Dies wären beispielsweise die Kosten für die Vermeidung von Lärmauswirkungen im Inneren eines Hauses mittels Schallschutzfenster.

In der Literatur stehen weitere Verfahren zur Ermittlung von Schattenpreisen zur Verfügung. Das vorliegende Verfahren bedient sich verschiedener Verfahren, um Schattenpreise für Effekte zu erhalten, die über keine beobachtbaren Preise verfügen.

Eine weitere Herausforderung für die monetäre Bewertung liegt in der zeitlichen Verteilung von Nutzen und Aufwänden über den Bewertungszeitraum. Sämtliche Bewertungen müssen sich dabei stets auf denselben Zeitraum beziehen.

## **2.1 Bewertungskriterien**

Das entwickelte Bewertungsverfahren berücksichtigt nicht die Einhaltung der Vorschriften und die betriebliche Sicherheit der vorgeschlagenen Änderungen. Es wird davon ausgegangen, dass ein Flugverfahren, welches in Einklang mit allen internationalen Standards und gesetzlichen Vorschriften konzipiert wurde, ein angemessenes Maß an Sicherheit im Betrieb gewährleistet. Die betriebliche Eignung und Durchführbarkeit, gemeint ist hier nicht die betriebliche Leistungsfähigkeit oder die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse, wird ebenfalls als gegeben angenommen.

Schlussendlich bestimmt das Bewertungsverfahren die beste Alternative der untersuchten Flugverfahren. Bewertungsfaktoren, bei denen keine Unterschiede zu erwarten sind, werden daher nicht berücksichtigt. So ist davon auszugehen, dass die untersuchten Verfahren die gleiche Kapazität aufweisen. Somit ist eine Untersuchung dieser Effekte nicht notwendig.

### **2.1.1 Umwelt**

Innerhalb des Bereichs Umwelt sind jene Kriterien enthalten, die eine Umweltauswirkung haben. Im Folgenden wird lediglich auf eine Auswahl von Umwelteffekten eingegangen, da eine Vielzahl von sekundären Umwelteinflüssen (bspw. auf Flora und Fauna) nur unzureichend quantifiziert werden können.

Zunächst sei hier die Lärmbelastung auf den Menschen zu nennen. Während die Auswirkungen der Lärmbelastung auf den menschlichen Körper noch Gegenstand der Forschung sind, ist ein allgemeiner negativer Effekt offensichtlich (Guski & Schreckenberg, 2015). Das entwickelte Verfahren basiert auf einem vereinfachten Ansatz zur Berechnung der Kompensation negativer Effekte auf die Umwelt durch technische Maßnahmen.

Negative Auswirkungen auf den Wohnbereich eines Hauses können bspw. durch Schallschutzfenster abgedeckt werden. Die Berechnung dieser externen Kosten basiert auf dem Spitzenpegel, den Kosten für spezielle Fenster und der durchschnittlichen benötigten Fensterfläche je Wohngebäude. Für die Berechnung des Fensterbereichs ist ein Unterbewertungsverfahren erforderlich: Um eine Abschätzung der Fläche pro Einwohner zu ermöglichen, sind Daten zur Bevölkerungsdichte sowie eine durchschnittliche Haushaltsgröße erforderlich. Daraus ergibt sich die Anzahl der betroffenen Haushalte, die dann mit der durchschnittlichen Fensterfläche pro Haushalt multipliziert werden kann, die wiederum je nach Wohnungstyp variieren kann. Eine Bewertung der Art des Wohnraums in einem Gebiet kann mit Hilfe von Satellitenbildern erfolgen. Die Berechnung mit den erforderlichen Dämmwerten ergibt die durchschnittlichen Kosten für Schallschutzfenster.

Während die externen Kosten der Lärmbelastung im Innenwohnbereich einfach abzuschätzen sind, ist diese bei Außenwohnbereichen, z.B. Gärten, weniger offensichtlich und

damit schwieriger, da es keine technische Möglichkeit der Kompensation gibt. Der Gesetzgeber verlangt eine Mindestentschädigung nach dem Standort des betroffenen Haushalts (§4 (2) 3. FlugLSV i.V.m. §2 (2) FluLärmG) und der Art der Unterkunft. (§5 3. FlugLSV). Diese Kompensationswerte können als Bewertung herangezogen werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die einzelnen Beeinträchtigungen im Außenwohnbereich erheblich von diesen offiziellen Werten abweichen können.

Außergewöhnlich sensible Bereiche wie Krankenhäuser oder Kindergärten erfordern eine spezielle Bewertung, die auf einer technischen Lärminderung basieren kann und dem oben beschriebenen Verfahren ähnelt. In seltenen Fällen sind sogar Kosten für eine Verlagerung der Anlage zu berücksichtigen.

Die durch Kraftstoffverbrennung im Triebwerk freigesetzten Luftschadstoffe sind ein wesentlicher Effekt des Flugbetriebs, da die globale Zivilluftfahrt derzeit flächendeckend auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe basiert. Einige der Schadstoffe sind in einem festen Verhältnis zum verbrannten Kraftstoff verknüpft, z.B. Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ , andere sind variabel, basierend u.a. auf Schubzustand und Verbrennungstemperatur. Die wichtigsten Schadstoffe sind Stickoxide  $\text{NO}_x$ , Kohlenmonoxid  $\text{CO}$ , Schwefeldioxid  $\text{SO}_2$ , (nicht-verbrannte) Kohlenwasserstoffe  $\text{C}_x\text{H}_y$  und Ruß. (Masiol & Harrison, 2014)

Sofern spezifische Angaben zur Menge von Schadstoffemissionen abgeschätzt wurden (bspw. durch Modellierung/Simulation der Flugverfahren) steht eine umfangreiche Datenbank mit verschiedenen externen Kostenabschätzungen zur Verfügung, welche u.a. auch vom UBA entwickelt worden ist. (Schwermer, et al., 2014)

### **2.1.2 Flugbetrieb**

Der Treibstoffverbrauch ist ein wesentlicher Faktor bei der wirtschaftlichen Bewertung von Flugverfahren. Sofern die benötigte Kraftstoffmenge je Verfahren bekannt ist, sind die Kosten für den Kraftstoffverbrauch trivial zu berechnen, da ein Marktpreis für den Kraftstoff verfügbar ist.

Ein weiteres wichtiges Betriebskriterium ist die benötigte Flugzeit, die ein alternatives Flugverfahren erfordert. Längere Flugzeiten (z.B. aufgrund einer längeren Flugstrecke oder einer langsameren Fluggeschwindigkeit über Grund) verursachen einen Anstieg der zeitabhängigen Betriebskosten (z.B. Wartung pro Flugstunde oder Personalkosten pro Betriebsstunde). Leider sind Betriebskosten und jeweiligen Kostenanteile der Fluggesellschaften für eine Bewertung nicht öffentlich zugänglich, wodurch es nur wenige bis gar keine öffentlichen Informationen für eine Bewertung gibt.

Mittels des IATA-Berichts "Airline Cost Management Group" (ACMG) kann dennoch eine erste grobe Schätzung der Betriebskosten pro Flugstunde für einzelne Fluggesellschaften getroffen werden (IATA, 2018). Zuvor ist der benötigte Zeitaufwand und Treibstoffverbrauch für ein spezifisches Verfahren durch Simulation zu berechnen, z.B. mit Hilfe der EUROCONTROL Base of Aircraft Data (BADA) für die Modellierung der Flugzeugleistung. (Eurocontrol, 2015)

## 2.2 Fluglärm- und Leistungsberechnung

Für Simulationszwecke im Rahmen der Demonstration des Bewertungsverfahrens (z.B. Lärmkonturen, Flugzeiten und Treibstoffverbrauch) wurde das Aviation Environmental Design Tool (AEDT) der US Federal Aviation Administration (FAA), Version 2d SP1, verwendet.

Mittels AEDT und dem darin integrierten BADA-Flugleistungsmodul wird die Flugzeugleistung in 4D (Raum und Zeit) modelliert, wodurch Fluglärm, benötigte Flugzeit, Kraftstoffverbrauch und Triebwerksemissionen berechnet werden können. Mit AEDT werden sowohl Einzelflugereignisse und Flugverkehrsszenarien im Umfeld von Flughäfen modelliert und Abhängigkeiten zwischen Treibstoffverbrauch, Lärmemission und Luftqualität umfassend untersucht. (Zubrow, 2016)

Die in der aktuellen AEDT Version 2d implementierten Methoden zur Fluglärm Berechnung entsprechen der Methodik gemäß ECAC Doc 29 (4th Edition) (ECAC, 2016) und der ICAO Doc 9911 (1st Edition) (ICAO, 2018). Die für den Fluglärm relevanten Flugtrajektorien und Flugleistungen werden gemäß ECAC Doc. 29, SAE-AIR-1845 (SAE, 2012) und EUROCONTROL BADA 3 Family berechnet. (Zubrow, 2016; Eurocontrol, 2015)

Der für den Anwendungsfall entwickelte fiktive Flugplan, die Flugzeugtypen sowie die lateralen Verläufe der Flugverfahren wurden im Berechnungsprogramm hinterlegt. Gemäß der Streckenlänge im Flugplan (Großkreisdistanz von Abflug bis Ankunft) konnte von AEDT eine durchschnittliche Abflugmasse abhängig von der Großkreisdistanz bestimmt werden („Stage Length“).

Im Rahmen der Lärmstudie wird der energieäquivalente, a-bewertete Schallpegel  $L_{Aeq}$  für ein Rastermaß von 50x26 km und 200 m Gitterabstand berechnet, wobei der Flughafenbezugspunkt des Flughafens Berlin-Tegel den Mittelpunkt des Rasters darstellt. Emissionen, Treibstoff- und Zeitverbrauch werden zentral für jede einzelne Operation im Flugplan berechnet.

## 3 ANWENDUNGSBEISPIEL

Das Anwendungsbeispiel basiert auf einem fiktiven Szenario einer Flugverfahrensänderung am Flughafen Berlin-Tegel. Dieser ist durch seine innerstädtische Lage mit dichter Bebauung für ein Bewertungsverfahren besonders geeignet, da ein erheblicher Teil der Bevölkerung vom Fluglärm betroffen ist. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel werden zwei laterale und vertikale Variationen eines Abflugverfahrens in Betriebsrichtung West bewertet und anschließend die präferierte Variante ausgewählt.

### 3.1 Aufbau der Fallstudie

Das aktuell veröffentlichte Verfahren sieht einen geraden Abflug in Richtung Westen vor und ist als B-RNAV Abflugverfahren „BRANE 2L/2N“ im Luftfahrthandbuch für den Flughafen Berlin-Tegel veröffentlicht (DFS, 2018). Die laterale Variation (innerhalb der Fallstudie als „Variante“ bezeichnet, gegenüber „Standard“) beinhaltet eine Rechtskurve in

Richtung Norden direkt nach dem initialen Steigflug, damit die dicht besiedelten Bereiche von Berlin-Spandau und Falkensee umflogen werden können (vgl. Abbildung 1). Die vertikale Variation besteht aus den zwei von der ICAO definierten lärmindernden Abflugverfahren (Noise Abatement Departure Procedures (NADP) 1 und 2). (vgl. Tabelle 1) Diese unterscheiden sich an dem Punkt, an dem die Schubreduktion einsetzt und eine Beschleunigung von Start- zur Steiggeschwindigkeit erfolgt. (vgl. (ICAO, 2006) Abb. 2) In Berlin-Tegel ist das NADP2-Verfahren das derzeit meistgeflogene operationelle Abflugverfahren. (Strümpfel & Mitzkat, 2018)

Tabelle 1: Übersicht der Szenarien in der Fallstudie

	Standard AIP Verfahren	Nordumfliegung
NADP 2	A-Standard	A-Variante
NADP 1	B-Standard	B-Variante

Das alternative Abflugverfahren wurde nach den grundlegenden Vorgaben gemäß ICAO PANS-OPS konzipiert (ICAO, 2006). stellt sowohl das derzeitige Standardverfahren (blau) und das alternative Abflugverfahren (rot) vergleichend dar.

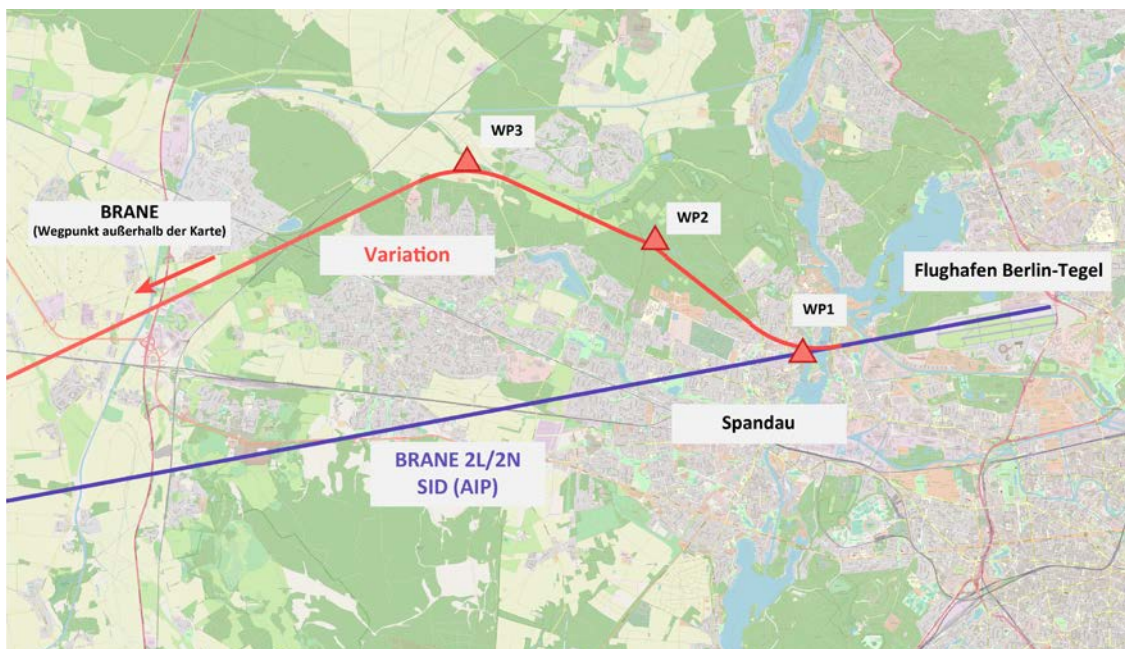


Abbildung 1: Darstellung beider Abflugverfahren



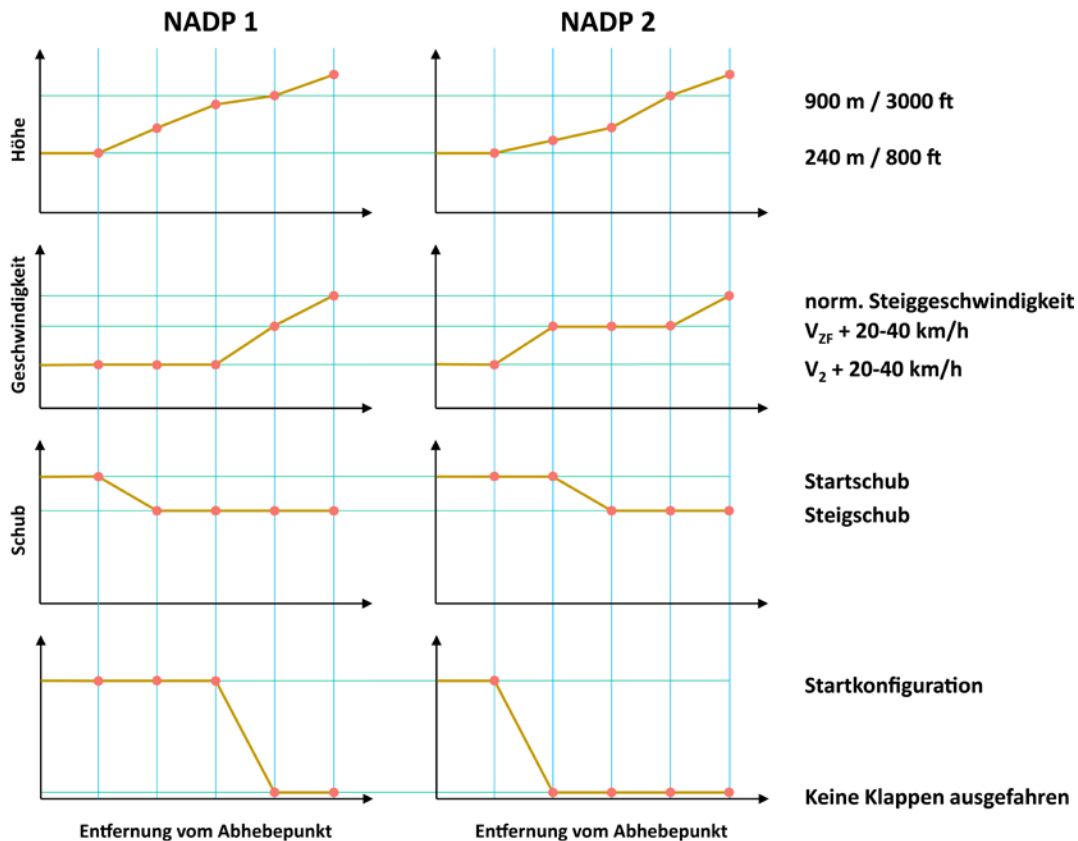


Abbildung 2: Vergleichende Darstellung der sog. Noise Abatement Departure Procedures der ICAO (ICAO, 2006)

Der im Szenario verwendete Flugplan basiert auf dem tatsächlichen Flugplan des 28. Juni 2016 als repräsentativer Tag. Weiterhin wurden Vereinfachungen im Flugplan vorgenommen, in dem die sechs häufigsten Flugzeugtypen verwendet wurden, um die Komplexität des Szenarios zu begrenzen. Trotz dieser Reduktion können 92,1% der Flüge abgebildet werden, die fehlenden Flüge werden im späteren Verlauf durch Hochrechnungen auf das Jahr (365 Tage) ausgeglichen, um externe Kosten für das gesamte Jahr zu erhalten. Die betrachteten Flugzeugtypen sowie die angenommenen Triebwerkstypen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Berücksichtigte Flugzeug- und Triebwerkstypen

Lfz-Code	Abflüge	Flugzeugtyp in AEDT	Triebwerkstyp in AEDT
A320	124	Airbus A320-200 Series	CFM56-5B4/2
A319	53	Airbus A319-100 Series	CFM56-5B9/2P
A321	25	Airbus A321-200 Series	CFM56-5B1/P
DH4	24	Bombardier de Havilland Dash 8 Q400	PW127C
738	23	Boeing 737-800 Series	CFM56-7B20/2
737	12	Boeing 737-700 Series	CFM56-3C-1
E190	8	Embraer ERJ190	CF34-8E5

## 3.2 Durchführung

Die zu einem Simulationsszenario zusammengefassten Einzelflugereignisse wurden durch AEDT basierend auf dem oben beschriebenen Flugplan berechnet. Die resultierenden Werte für Emissionsmenge und Treibstoffverbrauch konnten anschließend zur Bewertung der Kriterien genutzt werden. Die Bewertung der Kriterien ist im folgenden Kapitel dargestellt.

### 3.2.1 Ökologische Faktoren

Die im Anwendungsbeispiel ermittelten Emissionsmengen wurden direkt für den gesamten Flugplan in AEDT ermittelt (Masse je Schadstoffart). Die Menge wurde anschließend mit den externen Kosten je Gewichtseinheit multipliziert. Aufgrund der Komplexität der Bewertung externer Kosten für einzelne Schadstoffe, wird auf eine weitere Ausführung an dieser Stelle verzichtet. Tabelle 3 stellt die Zwischenergebnisse und die Bewertungsergebnisse der Varianten im Bereich Schadstoffemissionen dar.

Tabelle 3: Ermittelte externe Kosten für Schadstoffemissionen; Eigene Berechnungen (Schwermer, et al., 2014)

Einheit	Bewertung [€ je t]	Preisjahr	A-Standard [kg]	A-Variante [kg]	B-Standard [kg]	B-Variante [kg]
CO <sub>2</sub>	135	2010	820.984	830.840	794.821	804.740
NO <sub>x</sub>	12.300	2010	3.697	3.735	3.612	3.651
CO	132	2010	2.497	2.521	2.457	2.482
SO <sub>2</sub>	9.840	2010	305	308	295	299
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	12.300	2010	163	164	162	163
Ruß (PM <sub>10</sub> )	39.700	2010	153	155	137	140
Einzelbewertung	[€]		167.716	169.638	162.387	164.380
Multiplikationsfaktoren			365; 1/0,921	365; 1/0,921	365; 1/0,921	365; 1/0,921
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>[€]</b>		<b>66.467.152</b>	<b>67.228.994</b>	<b>64.355.349</b>	<b>65.145.122</b>

Anmerkung: Bewertungskosten wurden dem Kapitel entnommen, die Bewertung von SO<sub>2</sub> orientiert sich an der Bewertung von NO<sub>x</sub> nach dem Toxizitätsverhältnis 1:1,25 (Jilek, et al., n.d., p. 128); C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> orientiert sich an NO<sub>x</sub> aufgrund der gemeinsamen Ozonbildung.

Für die Bewertung ist es notwendig, dass die Kosten für Lärmschutzfenster bestimmt werden. In Abhängigkeit des Bebauungstyps ist hierfür zunächst eine Approximation der vorhandenen Fensterfläche je Wohngebäude erforderlich. Für Ein-/Zweifamilienhäuser kann die Fensterfläche je Haushalt mit 40 m<sup>2</sup>, bei Mehrfamilienhäuser mit 15 m<sup>2</sup> je Haushalt veranschlagt werden. (Kaltschmitt & Wiese, 1993)

Für das gesamte Untersuchungsgebiet wurde die Art der Bebauung aus öffentlich zugänglichen Satellitenbildern in diese zwei Kategorien eingeteilt. Aus verfügbaren GIS-Datensätzen zur durchschnittlichen Zahl der Einwohner je Haushalt wurde die Zahl der betroffenen Haushalte über die durchschnittliche Einwohnerdichte (2,02 Einwohner je Haushalt) ermittelt (bpb, 2012). Anschließend kann die jeweilige Fensterfläche je Haushalt bestimmt werden und die Bewertung kann mittels gängiger Marktpreise für Schallschutz-

fenster (basierend auf 2,4 m<sup>2</sup> Fensterfläche je Fenster, abhängig von max. Schalldämmwert sowie Installationskosten je Fenster) vorgenommen werden. Tabelle 4 zeigt die Anzahl der betroffenen Haushalte, wohingegen Tabelle 5 das Bewertungsergebnis zeigt, basierend auf einer Abschreibungsdauer von 25 Jahre (Lebensdauer von Schallschutzfenstern).

Tabelle 4: Anzahl der Haushalte in den jeweiligen Lärmkonturen; Quelle: Eigene Berechnungen

	<b>A-Standard</b>	<b>A-Variante</b>	<b>B-Standard</b>	<b>B-Variante</b>
innerhalb der 55 dB Kontur	54.279	23.565	50.345	21.680
innerhalb der 60 dB Kontur	9.440	7.517	12.543	7.676
innerhalb der 65 dB Kontur	1.341	1.197	1.889	1.618
innerhalb der 70 dB Kontur	19	-	19	19

Tabelle 5: Bewertungsergebnisse Innenwohnbereich; Quelle: Eigene Berechnungen

Einheit	<b>A-Standard</b> [€]	<b>A-Variante</b> [€]	<b>B-Standard</b> [€]	<b>B-Variante</b> [€]
Innenwohnbereich	497.757.177	389.705.412	488.312.189	384.725.715
Multiplikationsfaktor	1/25	1/25	1/25	1/25
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>19.910.287</b>	<b>15.588.217</b>	<b>19.532.488</b>	<b>15.389.029</b>

Zur Berechnung der externen Effekte für den Außenwohnbereich wird ebenfalls auf das im obigen Kapitel beschriebene Verfahren zurückgegriffen. Es werden dazu dieselben Simulationsergebnisse wie diese für den Innenwohnbereich genutzt. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse wird die Anzahl der Haushalte mit einer äquivalenten Dauerschallbelastung über dem Grenzwert ebenfalls analog zum Innenwohnbereich ermittelt. Anschließend wird die Kompensation über die im obigen Kapitel beschriebenen Entschädigungssätze ermittelt und über eine durchschnittliche Wohndauer von 12 Jahren verteilt. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Bewertungsergebnisse Außenwohnbereich; Quelle: Eigene Berechnungen

Einheit	<b>A-Standard</b> [€]	<b>A-Variante</b> [€]	<b>B-Standard</b> [€]	<b>B-Variante</b> [€]
Außenwohnbereich	2.589.629	2.473.979	3.420.043	3.141.311
Multiplikationsfaktoren	1/12	1/12	1/12	1/12
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>215.802</b>	<b>206.165</b>	<b>285.004</b>	<b>261.776</b>

### 3.2.2 Operationelle Faktoren

Die für die Betriebsszenarien notwendigen Kraftstoffmengen werden während der Simulation von AEDT mit Hilfe des BADA Performance Modells automatisch errechnet. Zur monetären Bewertung müssen daher lediglich Marktpreise und der Korrekturfaktor für die

fehlenden Flüge im Flugplan angewandt werden. Die Bewertungsergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Ermittelte externe Kosten für Kraftstoffverbrauch; Quelle: Eigene Berechnungen

Bewertung	Preisjahr	A-Standard	A-Variante	B-Standard	B-Variante	
Einheit [€ je t]		[t]	[t]	[t]	[t]	
Kraftstoff	356	2017	260	263	252	255
Einzelbewertung	[€]	92.560	93.628	89.712	90.780	
Multiplikationsfaktoren		365; 1/0,921	365; 1/0,921	365; 1/0,921	365; 1/0,921	
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>[€]</b>	<b>36.682.302</b>	<b>37.105.559</b>	<b>35.553.616</b>	<b>35.976.873</b>	

Zur Berechnung der Zeitkosten werden die Daten der IATA Airline Cost Management Group (ACMG) genutzt (IATA, 2018). Die Zeitkosten werden dort je Flugzeugtyp und Flugstunde angegeben. Eine Summierung der Kosten für die im Bewertungsbeispiel angegebenen Flugzeugtypen mit den aus AEDT ermittelten Flugzeiten ergibt die in Tabelle 8 dargestellte Bewertung:

Tabelle 8: Ermittelte externe Kosten für Zeitbedarf; Quelle: Eigene Berechnungen

Bewertung	Preisjahr	A-Standard	A-Variation	B-Standard	B-Variation	
Einheit [€ je min]		[min]	[min]	[min]	[min]	
Zeitbedarf	13,87	2017	5.513	5.557	5.425	5.470
Einzelbewertung	[€]	76.465	77.076	75.245	75.869	
Multiplikationsfaktoren		365; 1/0,921	365; 1/0,921	365; 1/0,921	365; 1/0,921	
<b>Gesamtbewertung</b>	<b>[€]</b>	<b>30.303.842</b>	<b>30.545.701</b>	<b>29.820.124</b>	<b>30.067.479</b>	

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Um die Variantenauswahl durchführen zu können, ist es notwendig, die einzelnen Teilbewertungsergebnisse zu summieren. Das Summierungsergebnis kann Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Summierte externe Kosten; Quelle: Eigene Berechnungen

Einheit	A-Standard [€]	A-Variante [€]	B-Standard [€]	B-Variante [€]
Zeitbedarf	30.303.842	30.545.701	29.820.124	30.067.479
Kerosinbedarf	36.682.302	37.105.559	35.553.616	35.976.873
Emissionen	66.467.152	67.228.994	64.355.349	65.145.122
Innenwohnbereich	19.910.287	15.588.217	19.532.488	15.389.029
Außenwohnbereich	215.802	206.165	285.004	261.776
<b>Summe</b>	<b>153.579.385</b>	<b>150.674.636</b>	<b>149.546.581</b>	<b>146.840.279</b>

Um die präferierte Variante nach der erfolgten Bewertung wählen zu können, ist ein strukturiertes Vorgehen zur Variantenauswahl notwendig. In diesem Anwendungsbeispiel wird die Variante mit der höchsten Bewertung gewählt, andere Kriterien werden nicht berücksichtigt. Die höchste Bewertung wird in diesem Beispiel durch die Variante mit den geringsten Kosten repräsentiert. Hierbei ist das Szenario „B-Variante“ (NADP2-Verfahren und Nordumfliegung) das präferierte Flugverfahren gemäß Bewertungsverfahren, da es die geringsten Gesamtkosten aufweist. Weiterhin kann bestätigt werden, dass das NADP2-Verfahren (B-Standard/Variante) bezüglich Kraftstoffverbrauch und Zeitbedarf dem NADP1-Verfahren (A-Standard/Variante) überlegen ist. Daher ist die Nordumfliegung des Bezirks Berlin-Spandau in der Gesamtbetrachtung bei gleichen vertikalen Abflugprofilen stets die kostengünstigere Alternative.

Eine Betrachtung der absoluten Unterschiede ist zulässig und beträgt zwischen teuerstem und günstigstem Verfahren ca. 6,7 Mio. € im Jahr. Maßgeblich sind dabei vor allem die externen Kosten für Schadstoffe sowie die Zeit- und Kraftstoffkosten. Ganz entgegengesetzt zur allgemeinen Erwartungshaltung, dass die externen Kosten für Lärmausgleich überwiegen müssten.

Es zeigt sich, dass das AIP-Standardverfahren mit geraden Abflug hinsichtlich Treibstoffverbrauch und somit auch Schadstoffemissionen das kostengünstigere Verfahren darstellt, da die zurückgelegte Flugstrecke kürzer ist. Dies wird durch eine Betrachtung der Zeitkosten bestätigt. Die Nordumfliegung von Spandau ist immissionsseitig lärmärmer, da absolut weniger Haushalte vom Fluglärm betroffen sind. Dies betrifft sowohl die Bewertung für den Innen- als auch Außenwohnbereich. Anhand der Bewertung für dieses Fallbeispiel wird auch deutlich, dass das NADP1-Verfahren (A-Standard und A-Variante) gegenüber dem NADP2-Verfahren (B-Standard und B-Variante) weniger fluglärmbezogene Kosten verursacht. Hier liegen im Mittel die Trajektorien des NADP1-Verfahrens höher, wodurch die Anzahl der lärm betroffenen Haushalte und Grundstücke unterhalb der Flugbahn reduziert werden können.

Die Anwendung des Bewertungsverfahrens auf den fiktiven Anwendungsfall zeigt, dass die Kosten-Nutzen-Analyse durchführbar ist und zu plausiblen Ergebnissen führt, die dazu geeignet sind, Abflugverfahrensvarianten effektiv zu unterscheiden und damit im Sinne der monetären Bewertung in eine Reihenfolge zu bringen.

Zur Berücksichtigung der Unsicherheit der Bewertung könnte die Methode um Unsicherheitsbereiche erweitert werden. Dabei könnte je Bewertungskriterium ein Wahrscheinlichkeitsbereich um den Erwartungswert der Bewertung gebildet werden (bspw. ein 95 % Intervall). In der Folge könnte in der Summierung eine Best- und Worst-Case-Szenarioberechnung ermittelt werden. Mit Hilfe der daraus resultierenden Fehlerbalken können die Varianten in einem Boxplot-Diagramm hinsichtlich signifikanter Unterschiede verglichen werden. Das Bewertungsverfahren kann dabei auf einen beliebigen Flughafen angewandt werden. Die Komponenten müssen lediglich an die lokale Situation angepasst werden, so

zum Beispiel auf die verwendeten Flugzeugtypen. Werden die einzelnen Sub-Bewertungsmodelle und Bewertungskostensätze bei der Übertragung an anderen Flughäfen beibehalten, ist auch eine Vergleichbarkeit zwischen mehreren Flughäfen möglich.

## LITERATUR

**BAF, 2018.** Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF): *Festlegung von Flugverfahren*. [Online] Verfügbar unter: [http://www.baf.bund.de/DE/Themen/Luftraum\\_Flugverfahren\\_Recht/Flugverfahren/flugverfahren\\_node.html](http://www.baf.bund.de/DE/Themen/Luftraum_Flugverfahren_Recht/Flugverfahren/flugverfahren_node.html) [Zugriff am 01.12.2018].

**bpb, 2012.** *Bundeszentrale für politische Bildung (bpb); Zahlen und Fakten: Die soziale Situation in Deutschland*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/> [Zugriff am 01.12.2018].

**DFS, 2018.** *Luftfahrthandbuch Deutschland, AIP Germany. Standard Departure Chart - Instrument (SID). Berlin-Tegel RWY 26L/26R. AD 2 EDDT 5-7-3. AMDT 02/18*. Langen: Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS).

**ECAC, 2016.** ECAC.CEAC Doc. 29 4th Edition - Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports. Volume 1: Applications Guide. Neuilly-sur-Seine Cédex: European Civil Aviation Conference (ECAC).

**Eurocontrol, 2015.** Base of Aircraft Data (BADA) Factsheet. [Online] Verfügbar unter: <https://www.eurocontrol.int/publications/base-aircraft-data-bada-factsheet> [Zugriff am 01.12.2018].

**Guski, R. & Schreckenber, D., 2015.** Noise-related annoyance, cognition, and health (NORAH): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld. Band 7: Gesamtbetrachtung des Forschungsprojekts NORAH. Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.

**Hanusch, H. & Jung, M., 2011.** Nutzen-Kosten-Analyse. München: Valens Kurzlehrbücher.

**Hotes, A. et al., 2013.** Verfahren zur Beurteilung und Festlegung von lärmindernden Flugstrecken. Dessau: Umweltbundesamt.

**IATA, 2017.** IATA Fact Sheet: Industry Statistics. [Online] Verfügbar unter: [http://www.iata.org/pressroom/facts\\_figures/fact\\_sheets/Documents/fact-sheet-industry-facts.pdf](http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-industry-facts.pdf) [Zugriff am 01.12.2018].

**IATA, 2018.** Airline Cost Management Group (ACMG). [Online] Verfügbar unter: <https://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Pages/airline-cost-mgmt.aspx> [Zugriff am 01.12.2018].

**ICAO, 2006.** Doc 9868: Procedures for Air Navigation Services: Aircraft Operations, 5. Edition. Montreal: International Civil Aviation Organization.

- ICAO, 2018.** Doc 9911: Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports. First Edition. Montreal: International Civil Aviation Organization (ICAO).
- Jilek, W., Karner, K. & Rass, A.,** kein Datum Externe Kosten im Energiebereich: 2. Zwischenbericht - Literaturrecherche. [Online] Verfügbar unter: <http://www.lev.at/Download/ExterneKosten.pdf> [Zugriff am 01.12.2018].
- Kaltschmitt, M. & Wiese, A.,** 1993. Erneuerbare Energieträger in Deutschland: Potentiale und Kosten. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Leder, J., 1996.** Ein Verfahren zur Optimierung dreidimensionaler Flugtrajektorien im Hinblick auf eine minimale Fluglärmbelastung der Bevölkerung mittels eines physiologisch geprägten Gütekriteriums. Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt.
- Lengwenat, E., 2012.** Ein Entscheidungsproblem des Alltags, Lehrstuhl für Forstliche Wirtschaftslehre, TUM. [Online] Verfügbar unter: [http://www.fwl.wi.tum.de/fileadmin/Downloads/Master\\_Forst/AHP\\_II-2012.pdf](http://www.fwl.wi.tum.de/fileadmin/Downloads/Master_Forst/AHP_II-2012.pdf) [Zugriff am 01.12.2018].
- Lengwenat, E., 2013.** Analytischer Hierarchieprozess (AHP): Methodik der multikriteriellen Bewertung, Lehrstuhl für Forstliche Wirtschaftslehre, TUM. [Online] Verfügbar unter: [http://www.fwl.wi.tum.de/fileadmin/Downloads/Master\\_Forst/AHP-2013.pdf](http://www.fwl.wi.tum.de/fileadmin/Downloads/Master_Forst/AHP-2013.pdf) [Zugriff am 01.12.2018].
- Masiol, M. & Harrison, R.,** 2014. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution. Atmospheric Environment, Volume 95 (Elsevier), pp. 409-455.
- SAE, 2012.** AIR1845: Procedure for the Calculation of Airplane Noise in the Vicinity of Airports (Revision A). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers (SAE).
- Schwermer, D. S., Preiss, P. & Müller, W.,** 2014. Best-Practice-Kostenansätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmezeugung: Anhang B der "Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten". [Online] Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba\\_methodenkonvention\\_2.0\\_-\\_anhang\\_b\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_methodenkonvention_2.0_-_anhang_b_0.pdf) [Zugriff am 01.12.2018].
- Strümpfel, C. & Mitzkat, M.,** 2018. Aktive Lärminderungsstrategien für Postflüge zwischen Berlin-Tegel und Stuttgart, 71. Sitzung der Fluglärmschutzkommission Berlin-Tegel am 24.01.2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.30512.46087. [Online] Verfügbar unter: [https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/politik\\_planung/luft/tegel/download/20180124\\_laermminderung\\_postfluege.pdf](https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/politik_planung/luft/tegel/download/20180124_laermminderung_postfluege.pdf) [Zugriff am 01.12.2018].
- Zubrow, A.,** 2016. Aviation Environmental Design Tool (AEDT), Technical Manual - Version 2b Service Pack 3. Cambridge, MA: Federal Aviation Administration.