

Prozedurale Fluglärmrechnungen mit der DIN 45689

Rainer Schmid¹, Felix Löble¹, Jason Blinstrub¹

¹ DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen
E-Mail: Rainer.Schmid@dlr.de

Einleitung

In Deutschland schreibt der Gesetzgeber zwei Verfahren zur Berechnung von Fluglärm vor. Mit der „Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen“ (AzB) [1] werden gemäß dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm¹ die Lärmschutzbereiche in der Umgebung von Flughäfen festgelegt. Die Lärmkartierung gemäß der EU-Umgebungslärmrichtlinie² erfolgt hingegen mit der „Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von Flugplätzen“ (BUF) [2] [3]. Beide Verfahren sind streng normiert. Insbesondere bietet die BUF keinen Freiraum für Anpassungen an lokale Gegebenheiten. Das Ziel bei der Entwicklung der DIN 45689 „Ermittlung von Fluggeräuschimmissionen an Flugplätzen“ war es, ein normiertes Berechnungsverfahren bereit zu stellen, welches einem Benutzer erlaubt Untersuchungen durchzuführen, in die weitere detaillierte Aspekte einfließen können. Auch eine explizite Untersuchungsmöglichkeit von An- und Abflugprozeduren wurde darin vorgesehen.

Die DIN 45689 ist zweiteilig aufgebaut. Teil 1 umfasst das „Berechnungsverfahren“ [4], Teil 2 wird die „Auswertung und Generierung von ergänzenden Eingangsdaten für die Berechnung - Flugverlaufsdaten und Datenerfassungssystem“ bereitstellen. In Teil 2 werden Flugzeuggruppen mit entsprechenden flugbetrieblichen und akustischen Datensätzen für Start und Landung mitgeliefert, die im Folgenden als Standarddatensätze bezeichnet werden. Die Berechnungsvorschrift aus Teil 1 bietet für An- und Abflugprozeduren eine definierte Methodik, um aus den Standarddatensätzen entsprechende Datensätze zu entwickeln, die im Folgenden als prozedurale Datensätze bezeichnet werden.

Beim Flugzeugstart ist die dominante akustische Quelle das Triebwerk. Dessen gesamte Schallemission hängt in erster Linie vom Schub ab. Der Start ist daher einfacher zu modellieren als eine Landung, bei der zusätzlich Umströmungsgeräusche von Auftriebshilfen und Fahrwerk für die Schallimmission maßgeblich sind. Um sachgerecht Landungen zu modellieren, sind daher umfangreichere Kenntnisse über die Abstrahlungseigenschaften der Schallquellen in Abhängigkeit des Flugzeugzustands nötig. Diese Arbeit zeigt exemplarisch an zwei Flugzeugmustern Ergebnisse von Fluglärmrechnungen derselben Startprozedur: einmal mit Standarddatensatz und einmal mit prozeduralem Datensatz. Da Teil 2 der DIN 45689 im

Moment noch nicht veröffentlicht ist, werden Datensätze aus dem Forschungsbericht „Überprüfung und Verbesserung der Berechnungsverfahren beim Fluglärm“ [5] verwendet.

Best-practice-Verfahren und immissionsbasierte Modelle

Soll die Lärmimmission in der Nähe von Flughäfen berechnet werden, kommen fast ausschließlich *best-practice*-Verfahren zum Einsatz. *Best-practice*-Verfahren wie die DIN 45689, AzB oder BUF sind speziell im Hinblick auf die Bestimmung von Fluglärmimmissionen konzipiert worden. In solchen Verfahren werden nur die Effekte berücksichtigt, die nötig sind, um das Ergebnis für die Aufgabenstellung hinreichend genau zu berechnen. In der Regel erhöht deshalb die Berücksichtigung von weiteren Effekten lediglich den Aufwand.

Im Allgemeinen erfolgt eine Fluglärmrechnung nach den folgenden Schritten: Bestimmung der Position des Luftfahrzeugs mit Betriebszustand (im einfachsten Fall Start/Landung), Bestimmung der Schallemission des Luftfahrzeugs, Berechnung der Schallausbreitung zum Immissionsort inklusive Einbeziehung der Immissionsumgebung und Lärmbewertung der Schallimmission. Für ein Flughafenszenario sind dann alle Luftfahrzeuge im betrachteten Bezugszeitraum mit einzubeziehen. Leider liegen aber die nötigen Informationen zur Beschreibung der Schallemission aller maßgeblichen Schallquellen nur für eine begrenzte Anzahl von Luftfahrzeugen in der nötigen Güte vor. Daher benutzen *best-practice*-Verfahren zur Berechnung des Lärms an Flughäfen keine emissionsbasierten Modelle (exakte Position und detailreiche Nachmodellierung der Schallquellen der Luftfahrzeuge), sondern immissionsbasierte Modelle. Diese stützen sich auf gemessene Fluglärmimmissionen. Dabei wird auf eine exakte detailreiche Modellierung der einzelnen Schallquellen verzichtet und das Luftfahrzeug als eine Gesamtschallquelle beschrieben. Zur Anwendung von immissionsbasierten Modellen sind daher sowohl flugbetriebliche als auch akustische Datensätze nötig, welche die Fluglärmimmission im Sinne der Aufgabenstellung hinreichend genau beschreiben. Die akustischen Datensätze werden durch eine Rückrechnung der Ausbreitung vom Immissionsort bestimmt und ein dazugehöriger flugbetrieblicher Datensatz für die Position und Betriebszustand mitgeliefert. Das heißt, dass sowohl die daraus folgenden Positionen als auch die Schallemissionen

¹ Der Bundesminister für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, *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, 2008.*

² Kommission der europäischen Gemeinschaften, *Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, 2002.*

nicht unbedingt realitätsnah sein müssen, da weder Positionen noch Schallquellen im Sinne der Aufgabenstellung benötigt werden. Sie sollten aber dennoch die Realität möglichst gut widerspiegeln. Das Verfahren ist dann praxistauglich, wenn mit der verwendeten Kombination aus flugbetrieblichem und akustischem Datensatz die gemessenen Immissionswerte adäquat abgebildet werden können.

Standarddatensätze

Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden vom DLR in dem Forschungsvorhaben „Überprüfung und Verbesserung der Berechnungsverfahren beim Fluglärm“ [5] Flugzeuggruppen definiert und entsprechende flugbetriebliche und akustische Datensätze für Start und Landung als Vorschlag für eine Novellierung der AzB-Datengrundlage und für die DIN 45689 Teil 2 entwickelt. Als Grundlage für diese Standarddatensätze dienten hauptsächlich Immissions- und Flugverlaufsdaten aus dem LuFo-Projekt „Modelle und Daten zur Entwicklung von aktiven Schallschutzmaßnahmen im Luftverkehr“ (MODAL) [6] mit ca. 2.9 Mio. ausgewerteten Flugbewegungen. Die flugbetrieblichen Datensätze wurden ausgehend von dem in Anhang B von ECAC Doc 29, Vol.2 [7] beschriebenen flugmechanischen Modell ermittelt und so festgelegt, dass die berechneten Profile den gemessenen Flugverlaufsdaten entsprechen. Auf Grundlage der so ermittelten flugbetrieblichen Daten wurden in einem iterativen Prozess die akustischen Datensätze (insbesondere der Zusatzpegel) so angepasst, dass mit den Standarddatensätzen die gemessenen Immissionsdaten an den Fluglärmüberwachungsstationen im Rahmen der mit ermittelten Standardunsicherheit zuverlässig wiedergegeben werden.

Prozedurale Datensätze

Die DIN 45689 bietet neben der Verwendung von Standarddatensätzen für diese Flugzeuggruppen auch die Möglichkeit, entwickelte prozedurale Datensätze zu verwenden, um Untersuchungen zu An- und Abflugprozeduren normativ zu ermöglichen.

Um die Fluglärmimmission von prozeduralen Profilen korrekt ermitteln zu können, ist neben dem Betriebszustand, dem Höhen- und Geschwindigkeitsverlauf auch die Information über den Triebwerksschub notwendig.

Zu beachten ist, dass in der Norm der Zusatzpegel verwendet wird, um eine Änderung der Schallemission während eines Fluges zu beschreiben. Beim Start ist das Triebwerk die dominante Schallquelle. Daher bietet die DIN 45689 im Kapitel „Triebwerksleistung und Zusatzpegel“ eine Methodik zur Berechnung der Zusatzpegel ausgehend von dem Standarddatensatz einer Flugzeugklasse mit Hilfe der Noise Power Distance (NPD) Tabellen der Aircraft Noise and Performance (ANP) Database [8]. Dafür werden druckkorrigierte Schübe F/δ in Zusatzpegel Z_D mit Hilfe der folgenden Gleichung überführt:

$$Z_D(F_D) = L_{max,NPD,D}(\frac{F_D}{\delta}) - L_{max,NPD,D}(\frac{F_{L0}}{\delta}) dB$$

Zunächst werden Pegelwerte für druckkorrigierte Schübe F/δ ermittelt. Dies erfolgt beim Start durch eine Mittelwertbildung der vier Maximalpegelwerte für 304.8 m (\approx

1000 ft), 609.6 m (\approx 2000 ft), 1219.2 m (\approx 4000 ft) und 1920.2 m (\approx 6300 ft) der NPD-Tabellen des entsprechenden Referenztyps der Flugzeugklasse. Die Zusatzpegel Z_D zu den in der Flugbahn vorkommenden Schüben F_D ergeben sich abschließend als Differenz der gemittelten Pegelwerte zu dem gemittelten Pegelwert beim Referenzschub F_{L0} . Mit den existierenden Schalleistungspegeln der Luftfahrzeugklasse und den neu berechneten Zusatzpegeln ist der akustische Teil des neuen prozeduralen Datensatzes komplett.

Ermittlung des Referenzschubs F_{L0}

Der Referenzschub ist der Schub am Abhebepunkt des Standarddatensatzes. Definitionsgemäß (und gemäß der zuvor beschriebenen Methodik) beträgt der Zusatzpegel bei Referenzschub 0 dB. Leider fehlt in den Standarddatensätzen eine Angabe über den zugehörigen Referenzschub F_{L0} . Somit muss ein Benutzer diesen Referenzschub durch Nachmodellierung der Standarddatensätze ermitteln. Während simultaner Berücksichtigung des Geschwindigkeits- und Höhenprofils ist der Startschub solange iterativ anzupassen, bis sich der gleiche Sprung des Zusatzpegels von Startschub zu Steigschub ergibt, der in den Standarddatensätzen angegeben ist. Dabei ist unbedingt zu berücksichtigen, dass eine Nachmodellierung nicht bei allen Flugzeugklassen zu einer adäquaten Übereinstimmung führt.

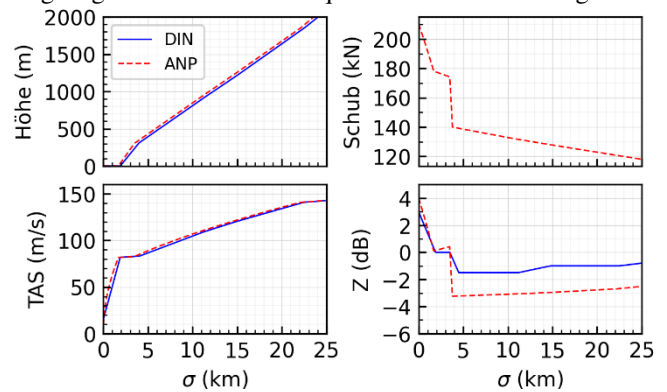


Abbildung 1: Höhen-, Geschwindigkeits-, Schub- und Zusatzpegelverlauf über die zurückgelegte Strecke σ für die Flugzeugklasse A320-S2B; Standarddatensatz in blau und prozeduraler Datensatz mit 100% Startschub in rot.

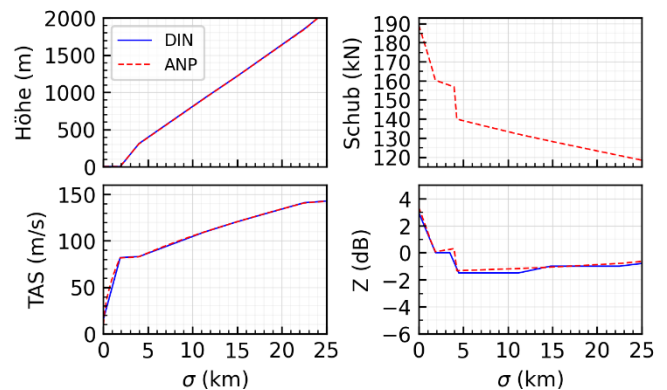


Abbildung 2: Höhen-, Geschwindigkeits-, Schub- und Zusatzpegelverlauf über die zurückgelegte Strecke σ für die Flugzeugklasse A320-S2B; Standarddatensatz in blau und prozeduraler Datensatz mit 90% Startschub in rot.

Für die Flugzeuggruppe A320-S2B sind in Abbildung 1 die Höhe, die wahre Geschwindigkeit TAS und der

Zusatzpegelverlauf des Standarddatensatzes in Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke σ in blau dargestellt. Zusätzlich ist der nachmodellerte prozedurale Datensatz für einen Startschub von 100% in rot eingetragen. Obwohl das Höhen- und das Geschwindigkeitsprofil gut übereinstimmen, ergibt sich ab dem Wechsel auf Steigschub eine Differenz von 2 dB für den Zusatzpegel. Somit ist ein Startschub von 100% zu hoch. Wird ein Startschub von 90% angesetzt, dann ergibt sich auch für den kompletten Zusatzpegelverlauf eine gute Nachmodellierung, wie aus Abbildung 2 zu entnehmen ist. Für diese Luftfahrzeugklasse muss also für den Schub 90% Startschub angesetzt werden, um die korrekten Zusatzpegelwerte zu erhalten.

In Abbildung 3 sind die Isokonturen des $L_{pAS,max}$ für die Flugzeugklasse A320-S2B für den Standarddatensatz und den nachmodellierten prozeduralen Datensatz mit 90% Startschub dargestellt. Auch aus der im Hintergrund dargestellten Differenzdarstellung der berechneten Pegel ist zu entnehmen (Abbildung 3, unten), dass sich der $L_{pAS,max}$ beider Berechnungen kaum unterscheidet.

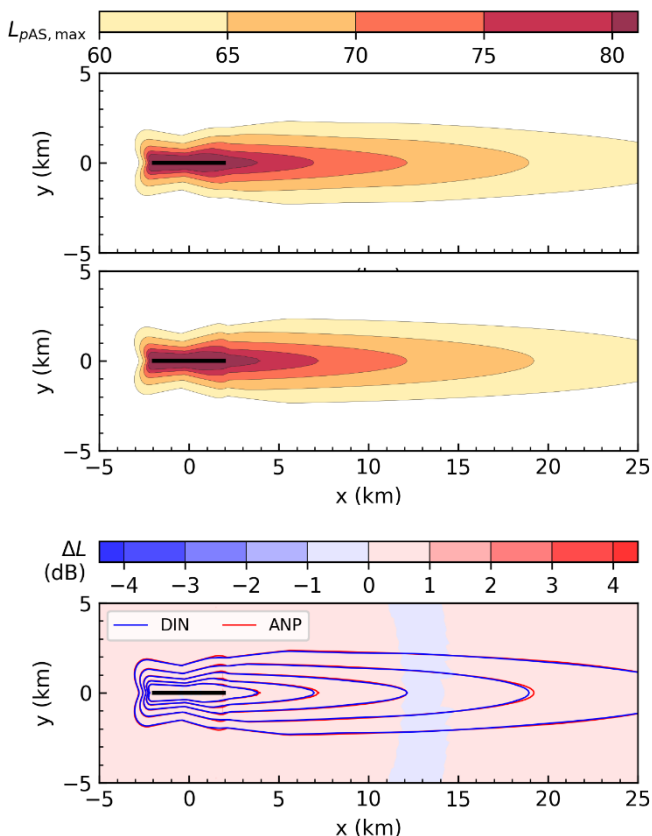


Abbildung 3: Isokonturen des $L_{pAS,max}$ für die Flugzeugklasse A320-S2B; oben Standarddatensatz, Mitte prozeduraler Datensatz mit 90% Startschub und unten Differenz des $L_{pAS,max}$ prozeduraler Datensatz - Standarddatensatz.

Güte von konstruierten Datensätzen

Der DIN 45689 liegt ein immissionsbasiertes Modell zu Grunde. Mit dem Forschungsvorhaben „Überprüfung und Verbesserung der Berechnungsverfahren beim Fluglärm“ [5] ermittelten Standarddatensätzen können die Fluglärmimmissionen zwar zuverlässig berechnet werden, mitunter widersprechen sich jedoch flugbetriebliche und akustische Daten aus physikalischer Sicht.

Wie oben erwähnt, wurde der akustische Teil der Standarddatensätze (insbesondere der Zusatzpegel) für die DIN 45689 in einem iterativen Prozess so angepasst, dass mit den Standarddatensätzen die gemessenen Immissionsdaten an den Fluglärmüberwachungsstationen im Rahmen der mitermittelten Standardunsicherheit zuverlässig wiedergegeben werden. Das bedeutet, dass mit den Iterationen die Kausalität zwischen Betriebszustand (beim Start der Schub) und Schallemission aufgebrochen wurde und letztendlich eine Anpassung der Lärmpegel durch eine Setzung der Zusatzpegel den Vorzug gegeben wurde. Wenn der Zusatzpegel für eine Luftfahrzeugklasse stark angepasst bzw. verändert werden musste, bedeutet das, dass die aus einem solchen Standarddatensatz abgeleiteten Schübe nicht dem flugbetrieblichen Teil entsprechen.

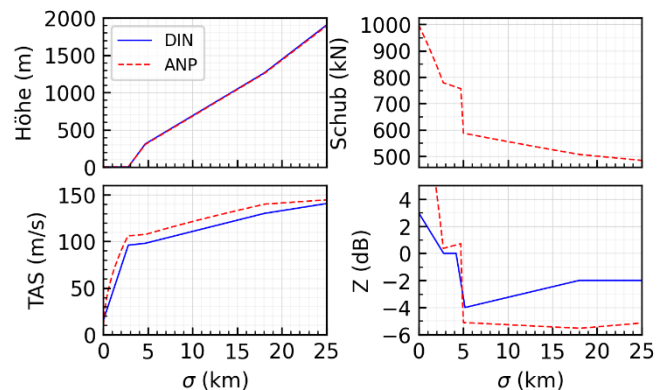


Abbildung 4: Höhen-, Geschwindigkeits-, Schub- und Zusatzpegelverlauf über die zurückgelegte Strecke σ für die Flugzeugklasse B777_300ER-S2B; Standarddatensatz in blau und prozeduraler Datensatz mit 100% Startschub in rot.

Bei der Konstruktion von prozeduralen Datensätzen über die Methodik der DIN 45689 ist ein korrigierender letzter Schritt an Messdaten nicht vorgesehen. Wird ein Standarddatensatz nachmodelliert und es ergibt sich eine gute Übereinstimmung wie in Abbildung 2, dann werden auch daraus abgeleitete prozedurale Datensätze die Fluglärmimmission zuverlässiger wiedergeben, da die Kausalität zwischen Schub und Schallemission weiterhin gegeben ist. Ergeben sich aber große Unterschiede, dann liefert dieser prozedurale Datensatz andere Lärmimmissionen als der entsprechende Standarddatensatz und es ist davon auszugehen, dass er zu keiner guten Übereinstimmung mit gemessenen Pegeln führt. In Abbildung 4 und 5 ist dafür ein Beispiel mit der Luftfahrzeugklasse B777_300ER-S2B dargestellt. Die Zusatzpegel unterscheiden sich für diese Luftfahrzeugklasse deutlich. Noch viel gravierender ist, dass sich vor allem der Zusatzpegelverlauf während des Steigflugs gegenläufig verhält. Wie in Abbildung 5 dargestellt, ergeben sich daher deutlich andere Isokonturen des $L_{pAS,max}$ für diese Flugzeugklasse auf Grundlage des Standarddatensatzes als mit dem nachmodellierten prozeduralen Datensatz. Wie die Differenzdarstellung des $L_{pAS,max}$ (Abbildung 5 unten) bei der Berechnungen zeigt, ergeben sich im Bereich der Rückstrahlung auf Grund des extrem hoch berechneten Zusatzpegels beim Losrollen unrealistisch hohe Pegel. In dem Bereich, in dem das Flugzeug mit Steigschub fliegt, ergeben sich ca. 3 dB niedrigere Pegel gegenüber einer Berechnung

mit Standardprofilen.

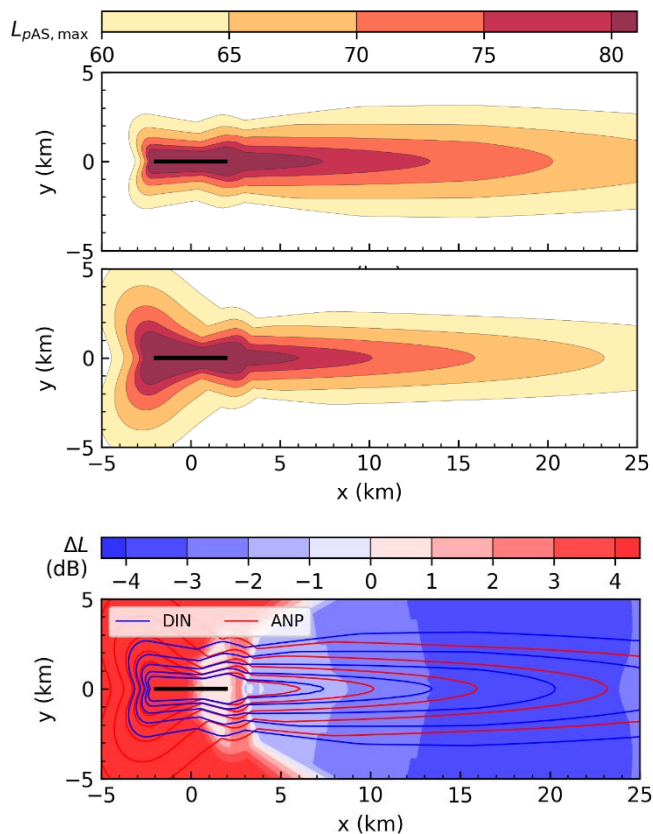


Abbildung 5: Isokonturen des $L_{pAS,max}$ für die Flugzeugklasse B777_300ER-S2B; oben Standarddatensatz, Mitte prozeduraler Datensatz mit 100% Startschub und unten Differenz des $L_{pAS,max}$ prozeduraler Datensatz - Standarddatensatz.

Diskussion

Mit Hilfe der DIN 45689 können anhand einer mitgelieferten Methodik prozedurale Datensätze konstruiert werden, um den Einfluss von An- und Abflugprozeduren auf die Fluglärmimmission von Flugzeugmustern zu untersuchen. Deren Entwicklung erfordert jedoch einen wesentlich höheren Kenntnisstand des Nutzers im Vergleich zur Verwendung der Standarddatensätze.

Bei der Entwicklung eines Datensatzes wird daher empfohlen zunächst den Standarddatensatz einer Flugzeugklasse zu modellieren. Zum einen kann ein Benutzer dadurch sicherstellen, dass der korrekte Referenzschub für diese Klasse zu Grunde gelegt wird, zum anderen kann auch abgeschätzt werden, ob die entwickelten prozeduralen Datensätze realitätsnahe Immissionspegel liefern werden. Dies wird aus dem Vergleich des nachmodellierten Datensatzes mit dem entsprechenden Standarddatensatz für eine Luftfahrzeugklasse deutlich. Kommt es hierbei zu größeren Abweichungen, können nur Differenzbetrachtungen innerhalb der Flugzeugklasse vorgenommen werden. Soll darüber hinaus auch eine Aussage über eine realitätsnahe Pegelhöhe vorgenommen werden, muss der Benutzer eine geeignete Korrektur im Datensatz vornehmen. Die Korrektur kann auf Grundlage von Messdaten oder weiteren Berechnungen durchgeführt werden.

Zusammenfassung

Mit der DIN 45689 ist es möglich weitere prozedurale Datensätze zu erzeugen, um die Lärmimmission von An- und Abflugprozeduren zu untersuchen. Dazu enthält die Norm eine Methodik, wie resultierende Triebwerksschübe über den Zusatzpegel in den neuen Datensätzen berücksichtigt werden können. Die Güte eines entwickelten Datensatzes ergibt sich aus einem Vergleich von einem nachmodellierten Datensatz mit dem entsprechenden Standarddatensatz (Höhe, Geschwindigkeit und Zusatzpegel). Ein solcher Vergleich wurde in der Studie exemplarisch an zwei Flugzeugmustern durchgeführt. Es zeigt sich, dass es mit dem in der Norm enthaltenen Methodik zu einer guten Übereinstimmung bei dem Standarddatensatz A320-S2B kommt. Größere Abweichungen ergeben sich beim Vergleich mit dem Standarddatensatz B777_300ER-S2B, da dort die Kausalität zwischen Schub und Zusatzpegel nicht gegeben ist. Zur Ermittlung von realitätsnahen Immissionspegeln müssen bei Flugzeugklassen, bei denen es bei einer Nachmodellierung zu großen Differenzen kommt, weitere Korrekturen vorgenommen werden.

Literatur

- [1] Der Bundesminister für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, *Bekanntmachung der Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD) und der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB)*, 2008.
- [2] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von Flugplätzen (BUF)*, 2018.
- [3] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von Flugplätzen (BUF-D)*, 2021.
- [4] Deutsches Institut für Normung (DIN), *Akustik - DIN 45689-1: Ermittlung von Fluggeräuschimmissionen an Flugplätzen - Teil 1: Berechnungsverfahren*, 2020.
- [5] J. Blinstrub, U. Isermann, T. Raitor und R. Schmid, „Überprüfung und Verbesserung der Berechnungsverfahren beim Fluglärm,“ Umweltbundesamt (UBA), 2021.
- [6] U. Isermann, R. König, M. Pott-Pollenske, R. Schmid und H. Siller, „Schlussbericht des Vorhabens Modelle und Daten zur Entwicklung von aktiven Schallschutzmaßnahmen im Luftverkehr (MODAL). Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2015.
- [7] European Civil Aviation Conference (ECAC), „Methodology for Computing Noise Contours around Civil Airports,“ 4, 2016.
- [8] European Union Aviation Safety Agency (EASA), „The legacy Aircraft Noise and Performance (ANP) data (ANP 2.3 database)“.