Einfluss lokaler Wetterschwankungen auf die psychoakustische Wahrnehmung von Fluglärm

Christian Dreier, Nasimalsadat Tavoosi, Michael Vorländer
Institut für Hörtechnik und Akustik, RWTH Aachen University, 52074 Aachen, Deutschland, Email: cdr@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

Vor dem Hintergrund der psychoakustischen Optimierung von Flugzeugen wurden in einer Reihe auralisationsbasierter Untersuchungen die Einflüsse der Schallquellen und Wetterbedingungen abgeschätzt. Dazu sind u.a. die Auswirkungen von lärmoptimierten Flugzeugentwürfen bei konstanter Atmosphäre durch Optimierung der Triebwerksanordnung [1] und der Düsengeometrie [2] sowie eines Referenz-Flugzeugentwurfs bei Variation der Atmosphäre an unterschiedlichen Orten [3] untersucht worden. Durch Erzeugung der Signale im Zeitbereich kann in der algorithmischen Auswertung die Signalverarbeitungsfähigkeit des menschlichen Gehörs mitberücksichtigt werden. Aufbauend auf die genannte Untersuchungen, wird in dieser Studie der saisonale Einfluss und die lokale Variation von Fluglärm mittels eines Referenz-Flugzeugentwurf bei Variation der Atmosphäre am gleichen Ort untersucht.

Auralisierung von Fluglärm

Methodisch zeichnet sich die Auralisation [4] zur Abschätzung einzelner Parameter auf Fluglärm aus, indem sie über die Trennung von Quellen-, Ausbreitungs- und Empfängereigenschaften (Abb. 1) hinaus zur Beurteilung der akustischen Qualität eingesetzt werden kann.

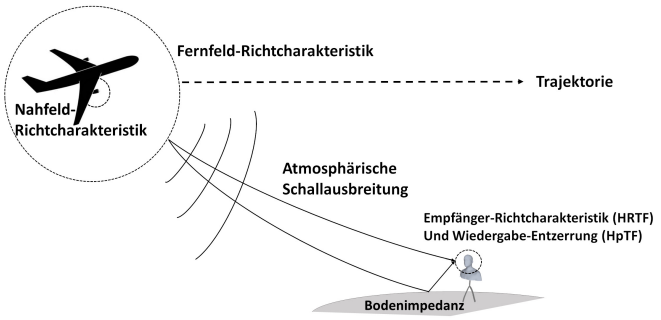

Abbildung 1: Modellierung der akustischen Quellen-, Ausbreitungs- und Empfändereigenschaften in der Fluglärm-Auralisierung.

Die Grundlage der Modellierung kann dabei auf vollständig simulierten akustischen Daten bestehen. Im Falle von Fluglärm setzt sich das Auralisationsmodell aus folgenden Variablen zusammen:

- Quellen: Strahl, Umströmung und Rotor
- Ausbreitung: Integration über höhenabhängige Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Druck und Wind; materialabhängige Bodenimpedanz, Turbulenz und Doppler-Effekt
- Empfänger: Messmikrofon und Kunstkopf

Allgemein bestehen die einzelnen Quellen aus parametrisch synthetisierten und richtungsunabhängigen Zeitsignalen, denen durch Kombination mit räumlichvarianten Filtern richtungsabhängige Eigenschaften hinzugefügt werden (Abb. 2). Die Schallausbreitungspfade durch das inhomogene und bewegte Medium werden zwischen Sender und Empfänger mittels atmosphärischem *ray tracing* gefunden [6]. Jeder Schallpfad berücksichtigt die Dämpfungsmechanismen bei Ausbreitung im Freien [5], d.h.

- den $\frac{1}{r}$-Schalldruckabfall A_{div},
- eine materialabhängige Bodendämpfung A_{gr} und
- zeitvariante Turbulenzen A_{misc}.

In dieser Studie werden Halbfreifeldbedingungen angenommen, sodass Beugungseffekte A_{bar} vernachlässigt werden können. Die Parameter der in Abb.2 farbig markierten atmosphärischen Dämpfung A_{atm} sind Grundlage der im Folgenden gezeigten Resulate. Wiedergabeseitig bestehen in *Virtual Acoustics* (VA) [7] Reproduktionsmöglichkeiten über lautsprecher- und kopfhörerbasierte Systeme. In dieser Studie werden die Empfängersignale durch Faltung mit den Außenohr-Übertragungsfunktionen eines virtuellen Kunstkopfes berechnet [8]. Die Details zu den Quellen- und Ausbreitungsmodellen sowie der simulierten Trajektorie gleichen dem in [3] dokumentierten Verfahren.

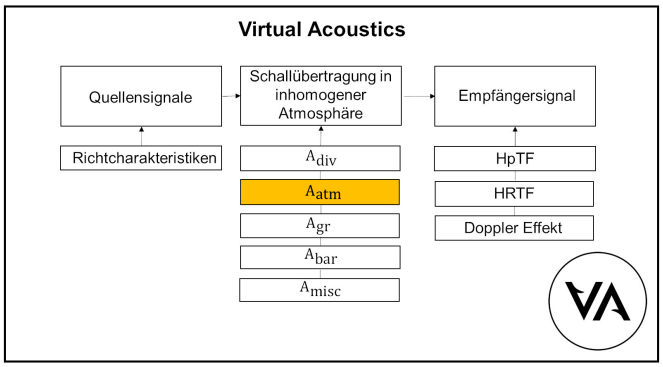

Abbildung 2: Blockdiagramm der Fluglärm-Auralisierung in VA.

Psychoakustische Auswertung von Fluglärm

Motiviert durch den nachgewiesenen Unterschied von objektiven Lärmmaßen im Vergleich zu subjektiven Bewertungen durch Probanden, werden in dieser Studie psychoakustische Parameter zur Auswertung herangezogen. Bei objektiver Beurteilung von unterschiedlichen Verkehrslärmquellen mittels des üblicherweise herangezogenen A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegels $L_{A,eq}$ zeigt Fluglärm im Vergleich zu Schienen- und Straßenlärm bei gleichem $L_{A,eq}$ eine Überbewertung von etwa 5dB(A), dessen Effekt von Fastl als *aircraft-malus* bezeichnet wurde [9]. Die Berechnung psychoakustischer Parameter hängt vom algorithmisch zugrunde liegenden Hörmodell ab, so dass die Ergebnisse unterschiedlich ausfallen können. Da es sich bei einem Überflug um ein sich spektral eher langsam-veränderliches Ereignis handelt, wurden die Lautheitswerte in dieser Studie nach der Norm ANSI S3.4-2007 berechnet. Dieser Algorithmus basiert auf einem Modell von Glasberg und Moore [10], das auf die Lautheitsbestimmung von stationären Signalen abzielt. Im Gegensatz zur Pegelbeschreibung in dB erlaubt die Beschreibung durch Lautheit eine intuitive, proportionale Form, sodass das Verhältnis zweier Schallwerte auch ihrem subjektiv empfundenen Verhältnis entspricht. Da der abgestrahlte Triebwerksschall insbesondere bei niedrigen Flughöhen von hochfrequenten Schallanteilen des Rotors dominiert wird, bietet sich der psychoakustische Parameter *Schärfe* zur Bewertung an, der sich nahezu antiproportional zur *Angenehmheit* verhält und tendenziell hochfrequente Spektralanteile in einem Geräusch zu dessen tieffrequenten Spektralanteile setzt. Auch hier existieren unterschiedliche Algorithmen zur Berechnung, deren Ergebnisse stark variieren können. Da bei technischen Geräuschen ein Zusammenhang zwischen dem Schärfeempfinden und der Lautheit besteht, wird in dieser Studie die Berechnungsmethode nach Aures [11] zugrunde gelegt.

Lokale Variation atmosphärischer Übertragungsfunktionen

Um die mögliche Schwankungsbreite der an einem festen Standort auftretenden atmosphärischen Übertragungsfunktionen analysieren zu können, werden in dieser Studie höhenabhängige Wetterdaten aus einer frei verfügbaren Datenbank ausgewertet [12].

Dabei werden die Langzeitdaten monatsweise im Zeitraum 1973-2019 am Standort Essen extrahiert und die Korrelationen der fünf akustisch relevanten Wetterparameter Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Druck, Windrichtung und -geschwindigkeit in diskreten Höhenintervallen berechnet. Die Diskretisierung der Daten erfolgt in 54 Schritten im Höhenbereich 0m bis 12000m (Abb. 3). Während die Variablen der Parameter Druck und Temperatur *innerhalb* als auch *untereinander* starke Korrelation zeigen – ausgenommen erdnahe Temperaturschichten – zeigen Luftfeuchtigkeit, sowie Windrichtung und -geschwindigkeit diesbezüglich schwache bis keine Korrelation.

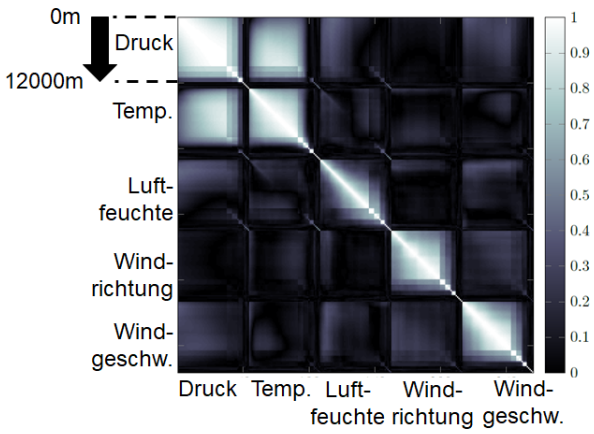

Abbildung 3: Höhendiskretisierte Korrelation akustisch relevanter Wetterparameter am Standort Essen für den Monat Januar im Zeitraum 1973-2019 (0=keine Korrelation, 1=perfekt positive Korrelation).

Atmosphärische Übertragungsfunktionen zwischen Quellpunkten auf der Flugtrajektorie und einem ebenerdigen Empfangspunkt zeigen Tiefpassverhalten, dessen obere Grenzfrequenz von den oben genannten Wetterparametern abhängt. Bei einem Überflugspunkt in 1000m Flughöhe erreichen die Mittelwerte der atmosphärischen Übertragungsfunktionen einen als obere Grenzfrequenz definierten Abfall um 10 dB bei (Abb. 4):

- Januar: 1750 Hz
- Juli: 2100 Hz.

Die von Triebwerken abgestrahlten Lärmemissionen besitzen auch in diesem Spektralbereich Beiträge, die dominanterweise durch *multiple pure tones* (MPT) am Rotor entstehen [13].

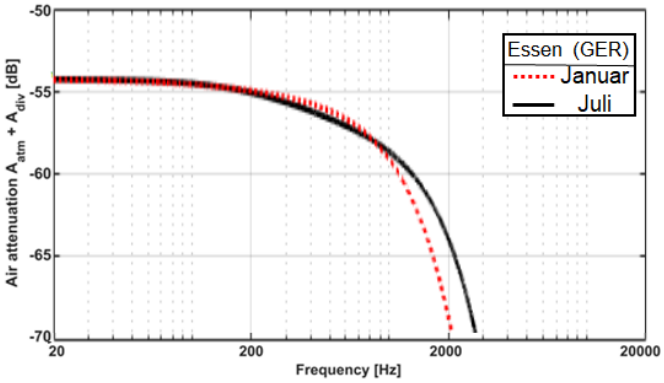

Abbildung 4: Mittelwert der atmosphärischen Übertragungsfunktionen zwischen 1973-2019 in den Monaten Januar und Juli am Standort Essen.

Darüber hinaus zeigen die einfachen Standardabweichungen, dass die obere Grenzfrequenz zwischen

- Januar: 1300 - 2300 Hz
- Juli: 1800 - 2500 Hz

liegt.

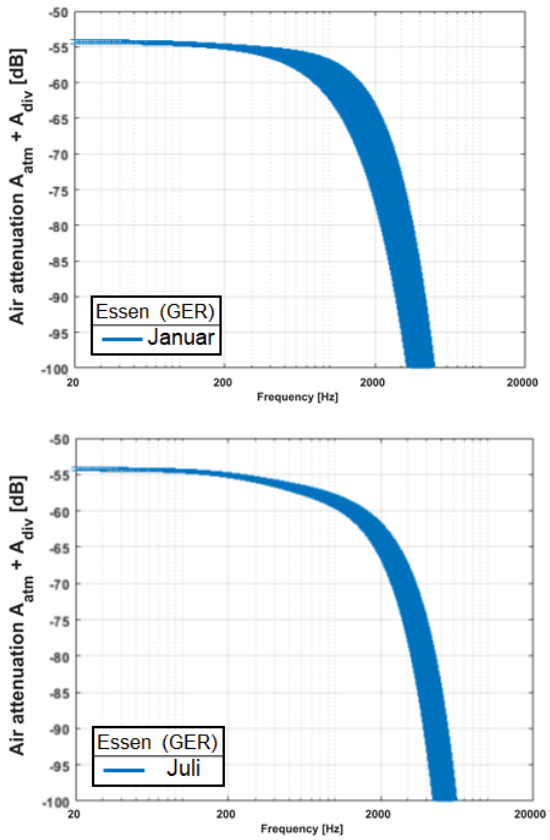

Abbildung 5: Einfache Standardabweichung der atmosphärischen Übertragungsfunktionen zwischen 1973-2019 im Januar (oben) und Juli (unten) am Standort Essen.

Daraus lässt sich schließen, dass die Übertragung von Fluglärm im Winter tendenziell leiser ist und größeren Schwankungen der oberen Grenzfrequenz unterliegt, als im Sommer.

Psychoakustische Auswirkungen

Basierend auf den berechneten Standardabweichungen der atmosphärischen Übertragungsfunktionen in den Monaten Januar und Juli soll im Folgenden der Einfluss lokaler Wetterschwankungen auf die psychoakustische Wahrnehmung von Fluglärm untersucht werden. In Abb. 6 sind die psychoakustische Lautheit und Schärfe während des auralisierten Überflugszenarios an einem virtuellen Kunstkopfempfänger gezeigt. Die folgende Tabelle fasst die zeitlich gemittelten Lautheits- und Schärfewerte der positiven und negativen Standardabweichung (+/- std) zusammen:

	Lautheit [sone]	Schärfe [acum]
Januar	40.8 - 58.8	1.8 - 2.9
Juli	51.2 - 64.4	2.3 - 3.1

Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der nicht kontrollierbaren Randbedingungen gestaltet sich die messtechnisch-basierte Analyse der Auswirkungen wechselnder Wetterbedingungen auf die akustische Wahrnehmung von Fluglärm schwierig. In dieser Studie wird ein auralisationsbasierter Ansatz verfolgt, der im Rahmen der Modellgenauigkeit die

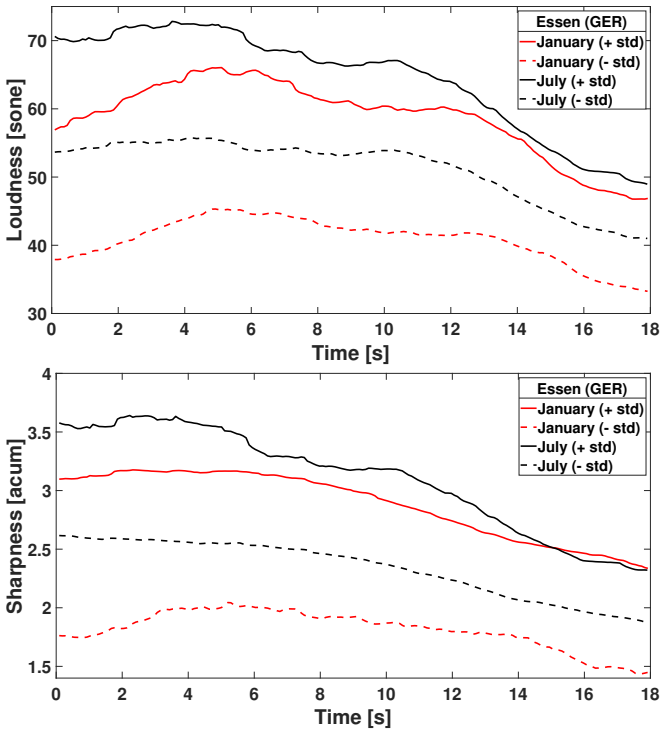

Abbildung 6: Lautheit (oben) und Schärfe (unten) der vier auralisierten Überflüge auf Basis der positiven (+std) und negativen (-std) Standardabweichungen von atmosphärischen Übertragungsfunktionen gemäß Abb.5.

Parametervariation von Quellen-, Ausbreitungs- und Empfängereigenschaften ermöglicht. Zunächst wurden auf Basis frei verfügbarer Wetterdaten Langzeitmessungen im Zeitraum 1973-2019 am Beispiel des Standorts Essen statistisch ausgewertet. Anschließend konnte anhand von den Mittelwerten der Monate Januar und Juli der maximale Unterschied zwischen den atmosphärischen Übertragungsfunktionen festgestellt und anhand einer oberen Grenzfrequenz quantifiziert werden. Zu diesen Mittelwerten wurde anschließend auf Basis der einfachen positiven und negativen Standardabweichungen vier Auralisierungen eines Überflugszenario an einem virtuelle Kunstkopfempfängers erzeugt und psychoakustische ausgewertet. Die folgende Tabelle fasst die – für die die Dauer des Überflugs zeitlich gemittelten – relativen Lautheiten und Schärfen bei Auralisierung der Wetterbedingungen mit einfacher positiver und negativer Standardabweichung zusammen:

	rel. Lautheit (%)	rel. Schärfe (%)
Januar	44	58
Juli	25	33

Diese nachgewiesenen Schwankungen des Fluglärms auf Lautheit und Schärfe liegen über den durch lärmreduzierende Maßnahmen, wie dem *engine over wing*-Konzept, erzielbaren Verbesserungen (vgl. [2]). Im Zuge der etablierten Besteuerung von Fluglärm weisen die Ergebnisse darauf hin, dass auch temporäre Wettereffekte relevanten Einfluss haben und mitberücksichtigt werden sollten.

Literatur

[1] Pieren R. et al.: Improving future low-noise aircraft technologies using experimental perception-based evaluation of synthetic flyovers, *Sci. Total Environ.* **692**, 68-81 (2019)

[2] Dreier, C., Vorländer, M.: Psychoacoustic optimisation of aircraft noise – challenges and limits. In: *Proc. InterNoise*, Seoul (2020)

[3] Dreier, C., Vorländer, M.: Aircraft noise – Auralization-based assessment of weather-dependent effects on loudness and sharpness. *J. Acoust. Soc. Am.* **149**(5), 3565-3575 (2021)

[4] Vorländer, M.: Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. 2nd edition. Springer, 2020

[5] ISO 9613-1: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. International Organization for Standardization, 1993

[6] Schäfer, P., Vorländer, M.: Atmospheric Ray Tracing: An efficient, open-source framework for finding eigenrays in a stratified, moving medium. *Acta Acustica* **5**(26), (2021)

[7] Virtual Acoustics, URL: `www.virtualacoustics.org`

[8] Schmitz, A.: Ein neues digitales Kunstkopfmeßsystem. *Acta acustica united with acustica* **81**(4), 416-420 (1995)

[9] Fastl, H., Hunecke, J.: Psychoakustische Experimente zum Fluglärmmalus. *Fortschritte der Akustik, DAGA 1995*, 407-410 (1995)

[10] Moore, B., Glasberg, B., Baer, T.: A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *J. Audio Eng. Soc* **45**(4), 224-240 (1997)

[11] Aures, W.: Der sensorische Wohlklang als Funktion psychoakustischer Empfindungsgrößen. *Acustica* **58**, 282-290 (1985)

[12] Atmospheric Weather Database, URL: `http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html`

[13] Hawkings, D.: Multiple tone generation by transonic compressors. *J. Sound Vib.* **17**(2), 241-250 (1971)