

SODIX - Inverse Schallquellenanalyse an Flugzeugtriebwerken mit Mikrofonarrays

Stefan Funke und Ulf Michel

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik,
Müller-Breslau-Str. 8, 10623 Berlin, Email: stefan.funke@dlr.de, ulf.michel@dlr.de

Einleitung

Das gesamte von einem Flugzeugtriebwerk abgestrahlte Schallfeld setzt sich aus den einzelnen Beiträgen des Einlaufs, der Düsen und des Strahls zusammen. Zur detaillierten Untersuchung dieser gerichteten Teilschallquellen bedarf es Analysemethoden, die absolute Quellstärken und Richtcharakteristiken bestimmen können. Häufig angewandte Array-Verfahren wie klassisches Beamforming liefern aufgrund von Verdeckungseffekten keine absoluten Ergebnisse und können außerdem die Richtcharakteristik der einzelnen Quellen durch die räumliche Mittelung der Mikrofonsignale nur in beschränktem Maße auflösen. Mit dem inversen Array-Verfahren SODIX (Source Directivity Modeling in Cross-Spectral Matrix) können die absoluten Beiträge der gerichteten Schallquellen bestimmt werden.

Methodik

Blacodon und Elias [2] haben die Verteilung der aerodynamischen Schallquellen eines Flugzeugmodells im Windkanal durch die Modellierung eines Gitters ungerichteter Punktschallquellen (Spectral Estimation Method - SEM) berechnet. Dabei wurde im Frequenzbereich der Fehler F zwischen gemessener und modellierter Kreuzspektralmatrix Γ minimiert.

$$F = \sum_{m,n=1}^M |\Gamma_{mn}^{\text{mod}} - \Gamma_{mn}^{\text{mess}}|^2 \quad (1)$$

Mit der Annahme J ungerichteter Quellstärken S_j und Steering Vektoren g lässt sich Gl. 1 schreiben als

$$F(S) = \sum_{m,n=1}^M \left| \Gamma_{mn}^{\text{mess}} - \sum_{j=1}^J g_{jm} S_j g_{jn}^* \right|^2 \quad (2)$$

Dabei ist M die Anzahl der Mikrofone. Die Minimumbedingung

$$\frac{\partial F(S)}{\partial S_j} = 0, \quad 1 \leq j \leq J \quad (3)$$

führt dann zum linearen Gleichungssystem [2]

$$\sum_{j=1}^J V_{ij} S_j = U_i, \quad 1 \leq i \leq J, \quad (4)$$

$$U_i = \sum_{m,n=1}^M g_{im} \Gamma_{mn}^{\text{mess}} g_{in}^*, \quad V_{ij} = \left| \sum_{m=1}^M g_{im} g_{jm}^* \right|^2.$$

Das Verfahren SODIX erweitert den Ansatz in Gl. 1 um die Annahme gerichteter Quellstärken D_{jm} . Dies führt zum nichtlinearen Minimierungsproblem

$$F(D) = \sum_{m,n=1}^M \left| \Gamma_{mn}^{\text{mess}} - \sum_{j=1}^J g_{jm} D_{jm} D_{jn} g_{jn}^* \right|^2 \quad (5)$$

Die Lösung erfolgt mit einem für positive Lösungen modifizierten Gradientenverfahren nach Rasmussen [3]. Als erste Annahme für eine Lösung werden die Ergebnisse des linearen Gleichungssystems (4) genutzt, das mit Hilfe eines für positive, reellwertige Lösungen modifizierten Gauss-Seidel Verfahrens [1] gelöst wurde. Zusätzlich wurden die Glättungsfunktionen G_{dist} und G_{dir} eingeführt, die die Lösung durch Vermeidung unphysikalischer Sprünge der Quellverteilung und der Richtcharakteristik unterstützen.

$$G_{\text{dist}}(D) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=2}^{J-1} (D_{jm} - (D_{j-1m} + D_{j+1m})/2)^2 \quad (6)$$

$$G_{\text{dir}}(D) = \sum_{j=1}^J \sum_{m=2}^{M-1} (D_{jm} - (D_{jm-1} + D_{jm+1})/2)^2 \quad (7)$$

Die dann zu minimierende Fehlerfunktion ist

$$G(D) = F(D) + \sigma_{\text{dir}} G_{\text{dir}}(D) + \sigma_{\text{dist}} G_{\text{dist}}(D) \quad (8)$$

mit den Schlupfvariablen σ_{dir} und σ_{dist} . Der Einfluss der Strömung kann in den Steering Vektoren durch die Annahme einer mittleren Strömungs-Mach-Zahl M_f bei der Berechnung der Weglänge r_{jm} zwischen Quelle j und Mikrofon m berücksichtigt werden.

$$r_{fjm} = \frac{r_{jm}}{\sqrt{1 - M_f^2 \sin^2 \theta_{jm} - M_f \cos \theta_{jm}}} \quad (9)$$

Dabei ist θ_{jm} der Raumwinkel zwischen der Verbindung Quelle-Mikrofon und der Strömungsrichtung mit 0° entgegen der Strömung.

Analyse simulierter Daten

Mit einem simulierten Linienarray konnten die Richtcharakteristiken synthetischer Quadrupol-Quellen berechnet werden. Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei stark von der Auflösung des verwendeten Quellgitters ab. Im Vergleich zum klassischen Beamforming konnten eine größere Dynamik (20 dB bei einer Gitterauflösung von $0,4 \lambda$) sowie um 15 dB schwächere Alias-Quellen bei Unterabtastung des Schallfelds nachgewiesen werden. Unkorrelierte Störgeräusche (SNR 10 dB) verursachten eine nur geringe Verschlechterung der Ergebnisse, wodurch das Verfahren auch für Messungen in Windkanälen oder unter Einfluss diffuser Sekundärschallfelder geeignet ist.

Analyse der breitbandigen Schallquellen eines Turbofan-Triebwerks

Abbildung 1 illustriert eine Arraymessung mit 128 Mikrofonen auf einem Freifeld-Prüfstand für Flugtriebwerke in Hucknall (GB). Der Abstand der Arraymikrofone beträgt im Bereich des Triebwerks 12 cm und wurde stromauf und stromab des Triebwerks für ein konstantes Winkelinkrement von $1,25^\circ$ erweitert. Das lineare Quellgitter ist unter Annahme radialsymmetrischer Schallabstrahlung auf der Oberfläche des Triebwerks definiert und im Bereich des Strahls auf der Triebwerksachse verlängert. Die Auflösung des Gitters beträgt $0,4\lambda$. Für Frequenzen oberhalb 1,6 kHz wurde die Auflösung für bessere Konditionierung auf $0,8\lambda$ verringert.

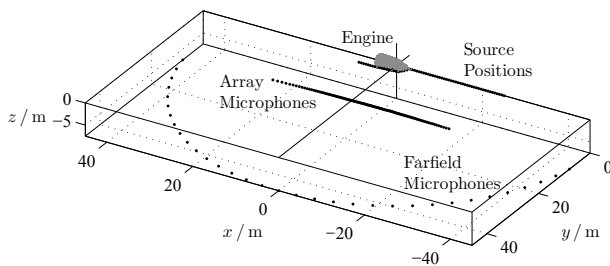


Abbildung 1: Versuchsanordnung Freifeldprüfstand

Das Schallfeld des mit SODIX modellierten Quellgitters soll zur Validierung mit Fernfeldmessungen in 45 m Abstand (Abb. 1) verglichen werden. Die Integration einzelner Bereiche des Quellgitters erlaubt dann die Beschreibung der Teilschallquellen Einlauf, Düsen und Strahl. Weil das Verfahren die Korrelation einzelner Quellen nicht berücksichtigt, wurde die Untersuchung auf Breitbandlärmquellen beschränkt. Die tonalen Signalanteile wurden durch Interpolation auf Breitbandgeräuschpegel aus den Kreuzspektralmatrizen entfernt.

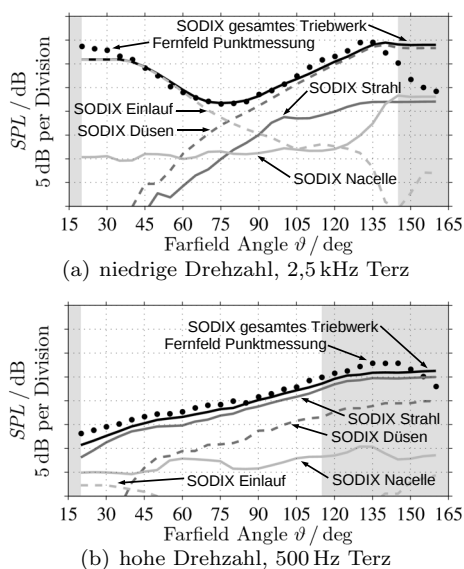


Abbildung 2: Vergleich der im Fernfeld gemessenen Richtcharakteristik mit den über das gesamte Quellgitter bzw. über einzelne Triebwerkskomponenten integrierten SODIX-Fernfeldprognosen

Abbildung 2 zeigt exemplarisch für zwei Terzen den Vergleich des vom SODIX-Quellmodell abgestrahlten Schallfelds mit Messungen an den Fernfeldmikrofonpositionen bei unterschiedlichen Triebwerksleistungen. Grau hinterlegt sind Winkelbereiche, für die die Richtcharakteristiken einzelner Quellen aufgrund der limitierten Abmessungen des Arrays extrapoliert werden mussten. Das SODIX-Gesamtmodell (schwarze Kurve) zeigt dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen (schwarze Punkte). Die Abweichungen betragen für beide Terzen innerhalb eines großen Winkelbereichs maximal 2 dB. Die Integration einzelner Quellbereiche ergibt die Richtcharakteristik der Teilschallquellen (graue Kurven). Im Falle niedriger Drehzahlen (Abb. 2(a)), wie sie beim Landeanflug geflogen werden, ist erkennbar, dass für hochfrequenten Breitbandlärm um 2,5 kHz der Triebwerkeinlauf die Hauptschallquelle im Winkelbereich bis 75° ist. Für größere Winkel dominiert die Schallabstrahlung der Düsen. Der Strahl spielt, entsprechend den Erwartungen, in diesem Leistungs- und Frequenzbereich eine untergeordnete Rolle. Für die beim Start eines Flugzeugs erforderlichen hohen Drehzahlen (Abb. 2(b)) ist der Strahl im gesamten Winkelbereich die tieffrequente Hauptschallquelle. Die Düsen strahlen tieffrequent ebenfalls in einem großen Winkelbereich ab, liegen mit 6-8 dB jedoch deutlich unter dem Pegel des Strahlärms.

Ausblick

Mit dem inversen Verfahren SODIX können detaillierte Informationen über die gerichtete Schallabstrahlung einzelner Triebwerkskomponenten gewonnen werden. Die Implementierung mehrdimensionaler Quellgitter und Mikrofonanordnungen, sowie die Berücksichtigung der Korrelation einzelner Quellen sind mögliche Erweiterungen des Verfahrens. Die Analyse synthetisch gestörter Mikrofonensignale hat gezeigt, dass das Verfahren auch für die Auswertung von Messungen unter Einfluss unkorrelierter Störgeräusche, also auch in Windkanälen, geeignet ist.

Literatur

- [1] Brooks, T. and Humphreys, W.: A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays. AIAA-Paper 2004-1954
- [2] Blacodon, D. and Élias, G.: Level Estimation of Extended Acoustic Sources Using a Parametric Method. Journal of Aircraft, Vol. 41, 2004, pp. 1360-1369
- [3] Rasmussen, C. E.: Evaluation of Gaussian Processes and other Methods for Non-Linear Regression. PhD Thesis, Graduate Department of Computer Science in the University of Toronto, 1996
- [4] Michel, U. and Funke, S.: Inverse Method for the Acoustic Source Analysis of an Aeroengine. 2nd Berlin Beamforming Conference, 2008
- [5] Michel, U. and Funke, S.: Noise Source Analysis of an Aeroengine with a New Inverse Method SODIX. AIAA-Paper 2008-2860