

Integrierte aerodynamische und akustische Auslegung eines Propellers für Ultraleichtflugzeuge

Ennes Sarradj¹, Christoph Fritzsche¹

¹ Juniorprofessur Aeroakustik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus,
03046 Cottbus, Deutschland, Email: ennes.sarradj@tu-cottbus.de

Einleitung

Die aerodynamischen und akustischen Eigenschaften eines Propellers werden wesentlich von der Form der Blätter bestimmt. Im Rahmen der Neuentwicklung eines für den Einsatz an Ultraleichtflugzeugen vorgesehenen 3-Blatt-Verstellpropellers mit Blättern aus CFK-Verbundwerkstoff sollten daher, neben Gewichtseinsparungen und verbesserten Wartungs- und Montageeigenschaften durch eine optimierte Blattform auch eine Lärminderung sowie eine Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften (Vortriebswirkungsgrad) erreicht werden. Grundlage für das Design bildeten die Flugeschwindigkeiten, Propellerdrehzahlen und -leistungen in den Flugzuständen Reiseflug, Start und Steigflug. Während beim Reiseflug eine möglichst hohe Effizienz durch einen hohen Schub für die vorgegebene Werte angestrebt wird, ist beim Start einer hoher Schub für eine kurze Startrollstrecke wünschenswert. Beim Steigflug ist der Lärm entscheidend. Dazu muss der sich durch den Überflug am Boden ergebende maximale Schalldruckpegel ermittelt werden.

Berechnungsverfahren

Als Berechnungsverfahren für die aerodynamischen Eigenschaften wurde eine verbesserte Blattelementemethode auf der Basis der [1] in beschriebenen eingesetzt, die unter anderem auch eine vom Radius abhängige, vom Propeller erzeugte Geschwindigkeit berücksichtigt. Für die Analyse wird bei diesem Verfahren das Blatt entlang des Radius in einzelne Elemente zerlegt. Für diese Elemente müssen jeweils die Profilform des Querschnitts (Auftriebs- und Widerstandsbeiwert) sowie Sehnenlänge s und Blattwinkel β bekannt sein. Der Schub und das dazu notwendige Drehmoment an der Propellerachse werden dann bei bekannter Anströmgeschwindigkeit und Drehzahl für jedes dieser Elemente ermittelt und über den Radius integriert. Die zugehörigen Gleichungen werden dazu iterativ gelöst. Das Verfahren erlaubt auch die Ermittlung von $s(r)$ und $\beta(r)$ für eine vorgegebene Leistung. Wird dabei noch eine über den Radius gleiche lokale Effizienz berücksichtigt, so ist das Ergebnis ein Blatt mit minimalen Verlusten. Im Gegensatz zu [1] werden für die Berechnung keine parametrisierten Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte verwendet, sondern diese werden im Verlauf der Iteration jeweils für den konkreten Anstellwinkel sowie die relevanten Mach- und Reynoldszahlen berechnet. Dazu wird ein 2D-Panelverfahren [2] eingesetzt.

Die Berechnung des vom Propeller abgestrahlten Schalls erfolgt auf der Grundlage der Ffowcs Williams-Hawkings Gleichung. Durch diese Gleichung kann die Schallabstrahlung durch bewegte Körper beschrieben werden. Vereinfacht ergibt sich die akustische Dichteschwankung an einem Beobachter-Aufpunkt \mathbf{x} als:

$$\rho'(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \dots dV - \frac{\partial}{\partial x_j} \int f_K(p, \mathbf{v}_n, r, \mathbf{M}_r) |_{\tau} dS + \frac{\partial}{\partial t} \int f_D(p, \mathbf{v}_n, r, \mathbf{M}_r) |_{\tau} dS. \quad (1)$$

Während das erste Integral, der Quadrupol-Anteil im Fall des Propellers vernachlässigt werden kann, ergeben sich aus den anderen beiden der Kraft- (Dipol-) und der Dickenanteil (Monopol). Die Integrale müssen jeweils über die Oberfläche des Propellerblattes ausgewertet werden. Dabei werden der Druck p , die zur Oberflächen normale Schnellekomponente \mathbf{v}_n sowie der Abstand r zum Beobachter und die zugehörige Machzahl \mathbf{M}_r jeweils zur retardierten Zeit τ benötigt. Da die praktische Auswertung numerisch erfolgen muss, ist es von Vorteil, wenn keine Ortsableitungen $\frac{\partial}{\partial x_j}$ berechnet werden müssen. Eine entsprechende Formulierung mit anderen Integranden [3]

$$p'(\mathbf{x}, t) = \int f_{KF}(p, \mathbf{v}_n, r, \mathbf{M}_r) |_{\tau} dS + \int f_{DF}(p, \mathbf{v}_n, r, \mathbf{M}_r) |_{\tau} dS, \quad (2)$$

erlaubt die Berechnung des Schalldrucks $p'(\mathbf{x})$ am bewegten Beobachter. Für den Fall eines sich bewegenden Propellers (Machzahl \mathbf{M}_s) in einer Zuströmung (Machzahl \mathbf{M}_{∞}) und ruhendem Beobachter ergibt sich die hier verwendete Form [4]:

$$p'(\mathbf{x}, t) = \int f_{KC}(p, \mathbf{v}_n, r, \mathbf{M}_s, \mathbf{M}_{\infty}) |_{\tau} dS + \int f_{DC}(p, \mathbf{v}_n, r, \mathbf{M}_s, \mathbf{M}_{\infty}) |_{\tau} dS. \quad (3)$$

Diese lässt sich in Form eines Randelementeverfahrens im Zeitbereich effizient implementieren, um den Schalldruckpegel zu berechnen (Beispielergbnis siehe Abb.1). Da im vorliegenden Fall der maximale Schalldruckpegel beim Überflug von Interesse ist, wurde jeweils für viele verschiedene Aufpunkte der Schalldruckpegel berechnet. Infolge der gerichteten Schallabstrahlung vom Propeller ist das zum Finden eines maximalen Wertes notwendig.

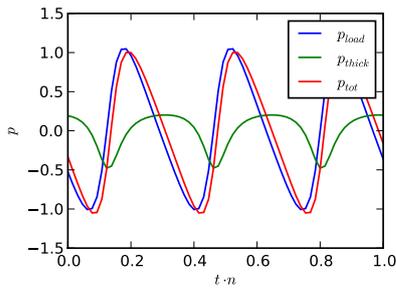


Abbildung 1: Beispielergebnis: Berechneter Schalldruck-Zeit-Verlauf für eine Umdrehung des Propellers

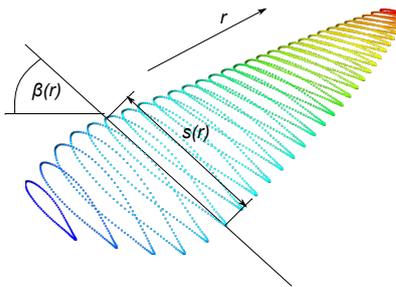


Abbildung 2: Parameter der Blattgeometrie

Optimierung und Ergebnisse

Als Optimierungsparameter für die Blattform wurden die Profilform des Blattquerschnitts F sowie der Auftriebsbeiwert c_L , beide in Abhängigkeit vom Propellerradius r , gewählt. Zur Optimierung wurde ein Brute-Force-Ansatz gewählt, beim dem zunächst die Sehnenlänge s und der Blattwinkel β (Abb. 2) für eine vorgegebene Verteilung $F(r), c_L(r)$ so bestimmt wurde, dass sich ein maximaler Schub T_R für die beim Reiseflug vorgegebene Motorleistung, Drehzahl und Zuström- bzw. Fluggeschwindigkeit ergibt. Für die so bestimmte Blattform wurde für die Motorleistung, Drehzahl und Zuströmgeschwindigkeit beim Start der Blatt-Verstellwinkel für maximalen Schub T_S beim Start ermittelt. Die gleiche Prozedur wurde anschließend noch für den Steigflug wiederholt und dort zusätzlich der maximale A-bewertete Schalldruckpegel $L_{pA,max}$ beim Überflug berechnet. Für die insgesamt über 600000 berechneten Varianten konnte im dreidimensionalen Kriterienraum $(T_R, T_S, L_{pA,max})$ eine Pareto-Front bestimmt und daraus Varianten, die sich gut fertigen lassen, ausgesucht werden [5]. Die Vorgehensweise ist im Schema in Abb. 3 zusammengefasst.

Im Ergebnis konnte eine Blattgeometrie (Abb. 4) gefunden werden, die gegenüber der Referenzgeometrie eines derzeit hergestellten Propellers eine Verbesserung des Schubs um etwa 11% sowohl im Reiseflug als auch beim Start ohne Erhöhung des Schalldruckpegels bewirkt. Bei entsprechend verminderter Drehzahl wird der gleiche Schub wie bei der Referenzgeometrie erzeugt und der Schalldruckpegel sinkt um etwa 2 dB.

Danksagung

Dieses ZIM-Verbundprojekt (Förderkennzeichen KF 2054301 LK 8) ist durch das Bundesministerium für

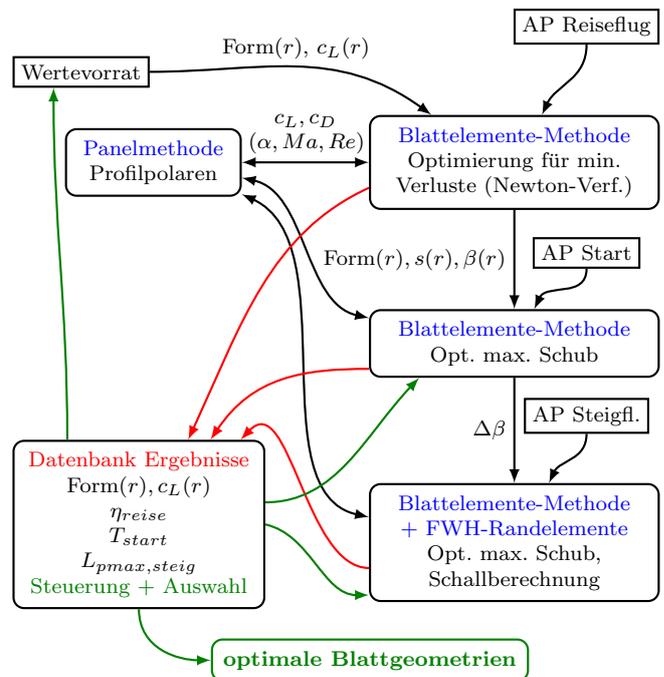


Abbildung 3: Optimierungsstrategie

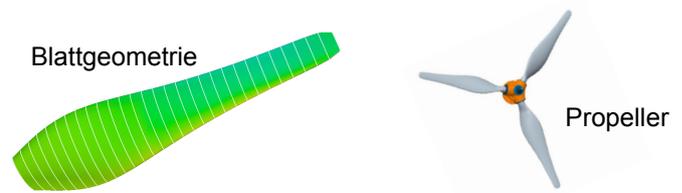


Abbildung 4: Im Ergebnis der Optimierung ausgewählte Blattgeometrie und zugehöriger Propeller

Wirtschaft und Technologie gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Drela, M.: QPROP Formulation. Technical report (2006), Massachusetts Institute of Technology, Aero & Astro
- [2] Hepperle, Martin, The Panel Method (as used in Javafoil) URL: http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/jf_analysis_panel.htm
- [3] Farassat, F.: Linear acoustic formulas for calculation of rotating blade noise. AIAA Journal 19(9) (1981), S. 1122-1130
- [4] Carley, M.: Time domain calculation of noise generated by a propeller in a flow. PhD Thesis (1996), Department of Mechanical Engineering, Trinity College, Dublin
- [5] Klauke, T. u.a.: Entwicklung eines 3-Blatt-CFK-Verstellpropellers für Ultraleichtflugzeuge. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010