



Numerische Strömungssimulation

Ein fliegendes Teleskop in turbulenter Strömung

Abb. 1: Die fliegende Sternwarte SOFIA während eines Testflugs mit offener Tür über der Mojave Wüste im Westen der USA.

Die fliegende Sternwarte SOFIA beweist, dass Astronomie auch von Flugzeugen aus erfolgreich betrieben werden kann. Numerische Strömungssimulationen auf dem Höchstleistungsrechner des Leibniz-Rechenzentrums leisten hierzu einen wichtigen Beitrag.

VON CHRISTIAN ENGFER

DAS VERSTÄNDNIS UND DIE korrekte Berechnung turbulenter Strömungen ist eine Schlüsseldisziplin in der Entwicklung und Optimierung von Transportsystemen, aber auch bei vielen anderen Industrieanwendungen. Turbulente Strömungen sind im Gegensatz zu laminaren Strömungen durch das Auftreten von stochastischen Fluktuationen der Strömungsgeschwindigkeit charakterisiert – diese zu erfassen, ist eine Herausforderung für die rechnerische Vorhersage. Alle modernen Flugzeuge operieren während des Reiseflugs bei hohen so genannten Reynoldszahlen, was zur Folge hat, dass die Grenzschicht schon im vorderen Bereich des Flugzeugs von einem laminaren in einen turbulenten Zustand übergeht. Folglich ist der größte Teil des Flugzeugs von einer turbulenten Strömung umgeben.

Numerische Strömungssimulation in der Flugzeugentwicklung

Während sich die Flugzeugentwicklung früher fast ausschließlich auf Windkanaltests stützte, ist heutzutage die numerische Strömungssimulation (CFD) ein wichtiges Hilfsmittel während der Entwicklungsphase. Um turbulente Flugzeugumströmungen zu berechnen, kommt dabei in der Regel das RANS-Verfahren zum Einsatz. Hier werden die Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)-Gleichungen unter Verwendung eines geeigneten Turbulenzmodells gelöst, um stationäre anliegende Grenzschichten zu simulieren. Das RANS-Verfahren betrachtet hierbei nur gemittelte Größen, und die turbulenten Fluidbewegungen werden statistisch durch empirische Gleichungen erfasst. Diese Methodik ist hinreichend genau bei der Simulation von Flugzeugen, die um ihren Designpunkt operieren und somit keine Strömungsablösung auftritt.

DER AUTOR

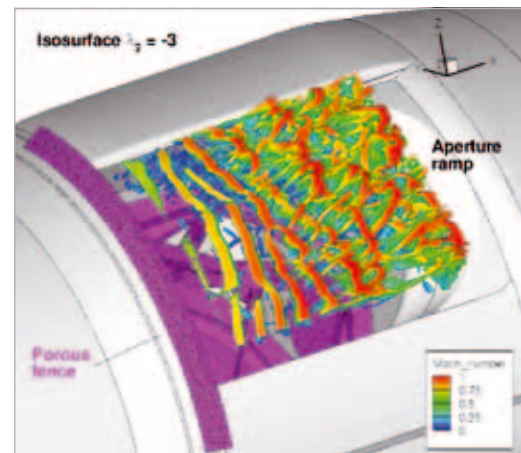
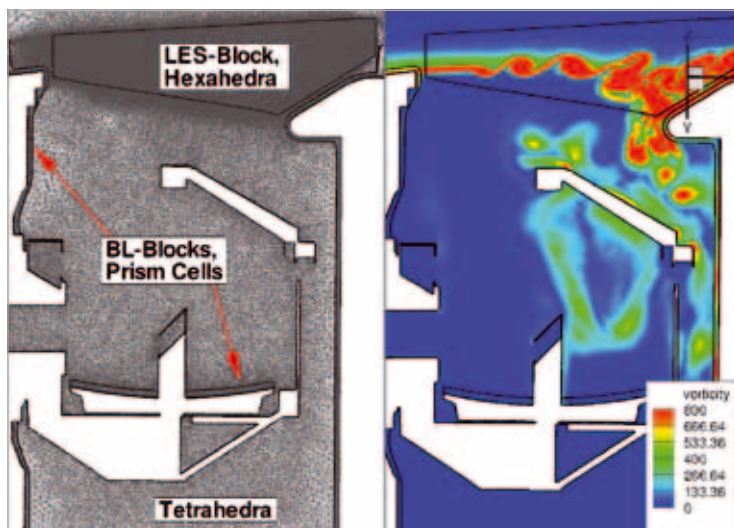
Dipl.-Ing. Christian Engfer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen SOFIA Institut in Palmdale, Kalifornien. Seine Forschungsschwerpunkte sind Cavity Aero-Akustik und Aero-Optik. Das Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) ist ein Gemeinschaftsprojekt der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.

Bei SOFIA, dem Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, einer von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betriebenen Boeing 747SP zur Beobachtung des Universums im infraroten Wellenlängenbereich, ist das RANS-Verfahren zur Beschreibung der Flugzeugaerodynamik ebenfalls anwendbar, solange die im hinteren Rumpfteil integrierte Tür geschlossen ist. Während der nächtlichen Beobachtungsflüge, die in 13 km Höhe bei Mach 0,85 stattfinden, wird diese Tür jedoch geöffnet, um dem sich dahinter befindlichen 2,7 m Spiegelteleskop einen Blick auf den Sternenhimmel zu ermöglichen (Abb. 1). Die Flugzeugumströmung ändert sich dadurch abrupt, da die turbulente Strömung beim Überschreiten der Hohlraumvorderkante massiv ablöst und sich über dem Hohlraum, auch Cavity genannt, in eine hochgradig instationäre Scherschicht entwickelt.

Numerische Verfahren zur Beschreibung der Strömung um SOFIA

Die korrekte numerische Strömungssimulation von SOFIA inklusive Cavityströmung wird dadurch viel aufwändiger und komplizierter, da das RANS-Verfahren auf Grund der Ablösung und der Instationarität nicht mehr anwendbar ist. In Fällen großskaliger instationärer Strömungsphänomene, bei denen die Zeitskalen viel größer sind als die der turbulenten Strömungsbewegungen, kommt in der Regel der instationäre RANS-Ansatz, auch URANS genannt, zum Einsatz. Die große Differenz zwischen den Zeitskalen turbulenter und großskaliger Strömungsbewegungen impliziert dabei eine spektrale Lücke, wodurch die Turbulenz als quasi-stationär betrachtet werden kann. Cavityströmungen wie die von SOFIA besitzen aber keine spektrale Lücke, da große Wirbel zu kleineren zerfallen,

Abb. 2: Darstellung der DES-Gittertopologie (links) und der Wirbelstärke (rechts) in einem Schnitt durch die Cavity bei 40° Elevation.

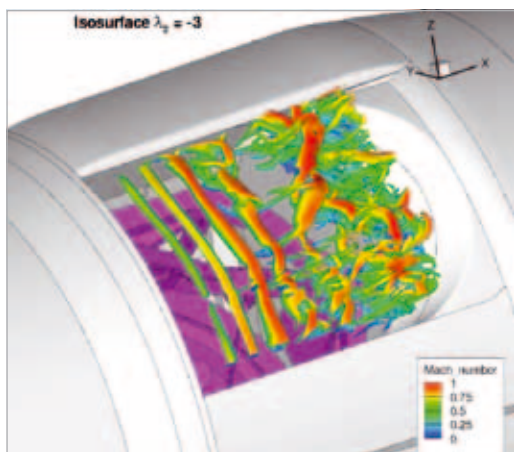


so dass der Einsatz von URANS-Verfahren bei der Simulation von SOFIA fragwürdig ist. Für eine akkuraten Strömungssimulation von SOFIA bedarf es daher aufwändigerer Verfahren wie LES (Large Eddy Simulation) oder DES (Detached Eddy Simulation).

Die DES-Simulation bietet dabei den besten Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit. Sie kombiniert die Vorteile einer RANS, um anliegende Grenzschichten effizient zu simulieren, mit denen einer weitaus aufwändigeren LES, um die großen Skalen in der Scherschicht direkt aufzulösen und dabei die kleinen Skalen über ein „Subgrid“-Modell zu erfassen. Nachteilig wirkt sich aber die starke Abhängigkeit der Rechenergebnisse von der räumlichen und zeitlichen Auflösung aus.

Rechenmodell und Simulationsanforderungen

Basierend auf diesen Verfahrensgrundlagen werden am Deutschen SOFIA Institut (DSI) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG) der Universität Stuttgart 3-D-CFD-Simulationen der SOFIA-Konfiguration unter Anwendung des finiten Volumen-Lösers TAU (ein vom DLR entwickelter Strömungslöser) in Verbindung mit URANS- und DES-Methoden durchgeführt. Der Rechenaufwand solcher instationären CFD-Simulationen ist dabei immens und erfordert den Einsatz des Höchstleistungsrechners des Leibniz-Rechenzentrums (LRZ). Das Rechengitter einer DES ist, wie Abbildung 2 zeigt, charakterisiert durch einen isotropen Hexaederblock über der Cavity zur Auflösung der Scherschicht, wodurch sich die Gittergröße auf 46 Millionen Zellen aufbläht. Auf dem Höchstleistungsrechner des LRZ wird dieses Gitternetz auf Grund des großen Arbeitsspeicherbedarfs massiv parallelisiert und zur Rechnungsbeschleunigung auf 1.020 Rechenkernen berechnet. Mit einer zeitlichen Auflösung von 5 μ s und 80 Iterationen pro Zeitschritt benötigt eine DES zur Berechnung von 1,1 Sekunden Umströmung ca. 200.000 CPU-Stunden.



Passive Strömungsbeeinflussung bei SOFIA

Ziel der numerischen Simulationen ist es, die komplexe Cavityströmung zu verstehen, ihren Einfluss auf das SOFIA-Teleskop zu beschreiben und Möglichkeiten aufzuzeigen, die aero-akustische Anregung des Teleskops zu minimieren und damit seine Positioniergenauigkeit zu verbessern. Im Allgemeinen zeichnen sich Cavityströmungen durch markante Druckfluktuationen aus, die durch akustische Resonanzen in der Cavity verstärkt werden. Im Fall von SOFIA würden diese unerwünschte Vibrationen der Teleskopstruktur hervorrufen, welche die Bildstabilität beeinträchtigen. Dank der am LRZ durchgeführten Simulationen ist eine detaillierte räumliche und zeitliche Vorhersage des Strömungsfeldes im Teleskopschacht möglich.

Die rechte Graphik in Abbildung 3 zeigt die Scherschichtcharakteristik über der Cavity, so wie sie von einer DES-Simulation berechnet wird. Sie zeichnet sich durch großskalige Strukturen, so genannte Kelvin-Helmholtz-Wirbel aus, die sich bei der Grenzschichtablösung bilden, weiter stromab zerfallen und dabei auf eine halbmondförmige dreidimensional geformte Aperturrampe treffen. Letztere bildet das Herzstück der passiven Strömungsbeeinflussung bei SOFIA. Durch sie wird die Scherschicht stabilisiert und nach außen hin abgeleitet. Dadurch wird vermieden, dass hochenergetische Strömung in die Cavity gelangt, auf das Teleskop trifft und dieses zum Schwingen anregt. Zum anderen unterdrückt die Aperturrampe damit auch akustische Resonanzen im Teleskopschacht, wodurch instationäre Druckschwankungen minimiert werden. Mit anderen Worten ist sie der Garant dafür, dass SOFIA erfolgreich Infrarotastronomie betreiben kann.

Im Rahmen der Simulationen für SOFIA wurden mehrere Ansätze zur passiven Strömungskontrolle untersucht. Das Hauptziel war dabei, die strömungsinduzierten Druckschwankungen innerhalb der Cavity zu minimieren, um damit die Positioniergenauigkeit des Teleskops zu verbessern. Ein viel versprechender Ansatz ist die Installation eines porösen „Zauns“ stromauf der Cavity (Abb. 3 links). Der Vergleich beider Graphiken in Abbildung 3 zeigt, dass mit Hilfe dieses Zauns die Kelvin-Helmholtz-Strukturen schneller aufbrechen und somit schon zu einem früheren Zeitpunkt zerfallen. Der indirekte Einfluss dieses Zauns auf die Druckfluktuationen am Teleskop ist in Abbildung 4 visualisiert. Die Druckschwankungen auf der Teleskopoberfläche, hier angegeben in Sound Pressure Levels (SPL), sind in weiten Bereichen reduziert.

Aktuelle Simulationen für SOFIA

Die mittlerweile abgeschlossenen Testflüge von SOFIA ermöglichten es, die durchgeführten numerischen Simulationen umfassend zu validieren. Trotz vieler Übereinstimmungen gibt es auch Diskrepanzen bei der Abbildung der Cavity-Akustik und der Reproduktion der aero-optischen Eigenschaften der Scherschicht. Der letztgenannte Aspekt hat entscheidende Bedeutung bei der Bewertung der aufgenommenen infraroten Bilder. Zum besseren Verständnis dieser Unterschiede werden derzeit auf SuperMUC, dem neuen Höchstleistungsrechner des LRZ, weitere Simulationen auf noch feineren Rechengittern und unter Anwendung verbesserter DES-Verfahren (IDDES) durchgeführt.

Abb. 3: Scherschichtcharakteristik, links mit und rechts ohne Installation eines porösen „Zauns“ stromauf der Cavity.

Abb. 4: Konturplot der Druckfluktuationen auf der Teleskopoberfläche, links mit und rechts ohne „Zaun“ stromauf der Cavity.

