

Nurflügler optimiert

AFRL, Boeing und die NASA meistern
Windkanaltests mit unbemanntem
Rautenflügler SensorCraft



Bildnachweis: NASA

Das SensorCraft-Projekt am Air Force Research Laboratory (AFRL) dient zur Entwicklung von Technologien für zukünftige unbemannte Überwachungsplattformen in großen Höhen. Ein Teilbereich dieses Forschungsprojekts ist das Aerodynamic Efficiency Improvement (AEI) Program. Zu den Zielen gehören die Flutterunterdrückung und die Böenlastminderung bei reduzierter struktureller Belastung, wodurch sich das SensorCraft-Flugzeug mit weniger Gewicht, größerer Reichweite und Belastbarkeit sowie höherer Ladekapazität konstruieren lässt. Zwei unterschiedliche SensorCraft-Modelle absolvierten während des AEI-Programms die Testreihe im Transonic Dynamics Tunnel, einem NASA-Windkanal in Langley, Virginia. Dabei handelte es sich um einen Nurfügler und einen Rautenflügler (siehe Abbildung 1 sowie Referenzen [1] und [2]). Bei beiden Modellen musste die Konstruktion Freiheitsgrade bei starren Körpern unterstützen, damit sie im Windkanal „geflogen“ werden konnten, was das Projekt deutlich komplexer und risikoreicher machte. Bei den Windkanaltests sind zwei dSPACE Systeme im Einsatz. Das eine ist zuständig für die Flugkontrollregelung, das andere für die Einstellung der Steuerflächen mittels Servoventilen, das WatchDog-System und die Notfallsysteme. Dieser Artikel beschreibt die Flugregelungsarchitektur und die Implementierung mit Hilfe von dSPACE Systemen mit Fokus auf den Rautenflüglertests. Zum Testteam gehörte das Air Force Research Lab (AFRL), Boeing und das NASA-Forschungszentrum.

Experimentaufbau

Die Rautenflüglertests wurden im NASA-Windkanal in Langley, Virginia, durchgeführt. Dieser ist speziell darauf ausgelegt, Probleme im Bereich >>

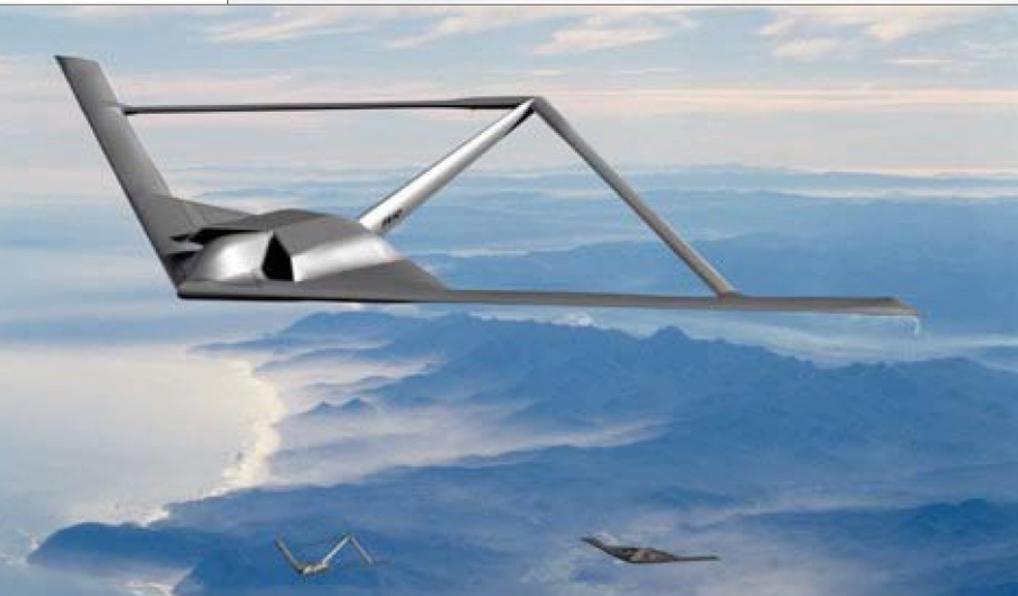
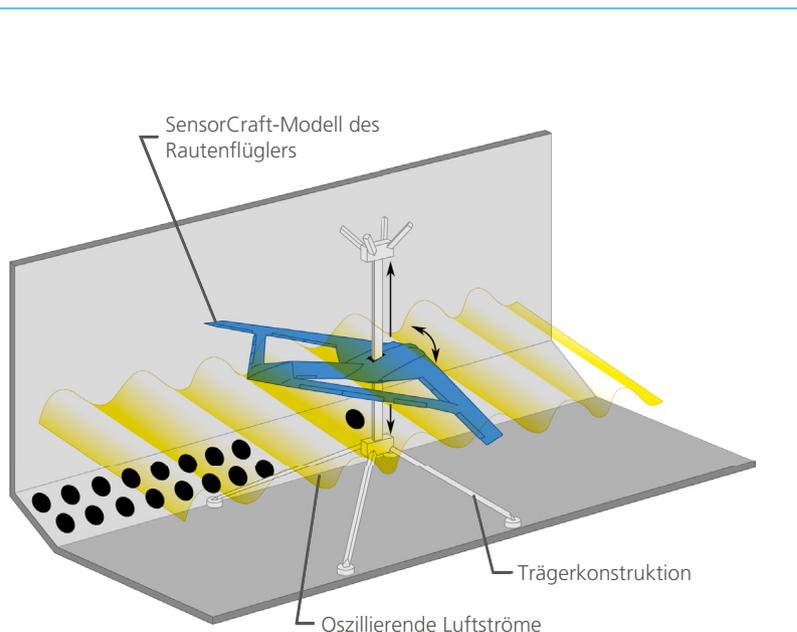


Abbildung 1: Eine der zwei Bauformen für SensorCraft-Flugzeuge.

Aeroelastizität und Aeroservoelastizität zu untersuchen. Der Windkanal hat eine geschlossene Luftführung mit variablem Betriebsdruck und einer Messkammer von knapp 5 x 5 m mit gekappten Ecken. Der Windkanal verwendet entweder Luft oder schweres Gas als Testmedium und kann im Bereich von 0 bis 1,2 Mach betrieben werden. Besonders geeignet ist er für Flattertests, und der Kontrollraum bietet optimale Sicht auf das Modell sowie ein Notfallsystem zu dessen

Schutz. Eine besondere Eigenschaft ist die Möglichkeit für oszillierende Luftströme (Windböen), die in dieser Testreihe ausgiebig zum Einsatz kamen. Abbildung 2 zeigt das Modell des Rautenflüglers und die Trägerkonstruktion. Die Freiheitsgrade werden durch die beiden Pfeile angezeigt. In Abbildung 3 ist der Rautenflügler im Windkanal zu sehen. Die Trägerkonstruktion besteht aus einer speziellen Aufhängung mit einer Führungsschiene, die an den Enden über Dämpfungs-

Abbildung 2: Modell des SensorCraft-Rautenflüglers an einer Trägerkonstruktion mit zwei Freiheitsgraden im NASA-Windkanal in Langley.



einrichtungen verfügt, um ein sanftes Abbremsen zu ermöglichen. Zudem ist das Modell mit zahlreichen Instrumenten ausgestattet, darunter Beschleunigungsmesser, Dehnungsmessstreifen, Gyroskope und Potentiometer, sowie 13 hydraulisch gesteuerten Steuerflächen, jede mit einem Drehfeldgeber (RVDT)-Positionssensor. Die Steuerflächen befinden sich an den Abströmkanten der Flügel, sechs an den vorderen Flügeln, sechs an den hinteren Flügeln und eine an der Mittelstrebe. Um die Tests durchführen zu können, wurde außen am Rautenflüglermodell eine Reihe an Komponenten integriert. Dazu gehören zwei dSPACE Systeme, ein herkömmliches Signalkonditionierungssystem, spezielle Signalkonditionierer für die Drehfeldgeber und die Moog-Servoventile, zahlreiche Netzanschlüsse und ein spezielles Stoßdämpfungssystem. Das Schaltbild in Abbildung 4 zeigt, wie das Windkanalmodell und die unterschiedlichen Systeme miteinander verbunden sind. Bei den externen Signalen an dSPACE Systeme handelt es sich ausschließlich um analoge Signale. Die Anti-Aliasing-Filter waren für die Drehfeldgeber auf 400 Hz eingestellt, da sie mit einem Regelsystem verbunden waren, das eine Abtastfrequenz von 1000 Hz hatte (dSPACE System 1). Alle anderen Signale wurden bei 100 Hz gefiltert, um mit dem anderen Regelsystem kompatibel zu sein, das eine Abtastfrequenz von 200 Hz hatte (dSPACE System 2). Die Datenerfassungsrate im Windkanal betrug 500 Hz.

Regelsysteme

Zwei dSPACE Systeme übernehmen die Regelaufgaben bei den Windkanaltests des Rautenflüglers. Die Servoregelschleifen für die Positionierung der Steuerflächen durch den Drehfeldgeber und die Servoventile sowie das Watch-Dog-System waren auf dem dSPACE System 1 implementiert. Die Flugsteuerung (Trimming und Böenlastminderung) befand sich auf dSPACE System 2. Die speziell auf die Windkanal-

tests ausgelegte Dämpfungsregelung bestand aus einer Sperrschaltung, diversen Schaltern und einer Stromversorgung. Die Dämpfungsregelung mit den Magnetventilen und die hydraulischen Aktoren an Bord des Modells verhinderten die Starrkörperbewegung. Dieses System kann manuell gestartet werden, allerdings wurde diese Option nie genutzt. Stattdessen löst das automatische WatchDog-System auf dem dSPACE System 1 zuverlässig den Dämpfungsbefehl zum Schutz des Modells aus. Die Kernfunktionen der beiden dSPACE Systeme und des Dämpfungssystems sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Eingaben des Anwenders sind dunkelgrau gekennzeichnet. Die Algorithmen zur Böenlastminderung und zur Trimmung wurden im Flugsteuerungsblock auf dem dSPACE System 2 implementiert. Über die Benutzeroberfläche und die Programmierlogik des Blocks werden Ereignisse gesteuert oder ausgelöst, zum Beispiel wird das System zurückgesetzt oder der Startvorgang eingeleitet. Bei Parameteridentifikationstests lässt sich ein Anregungssignal zu mehreren Kom-

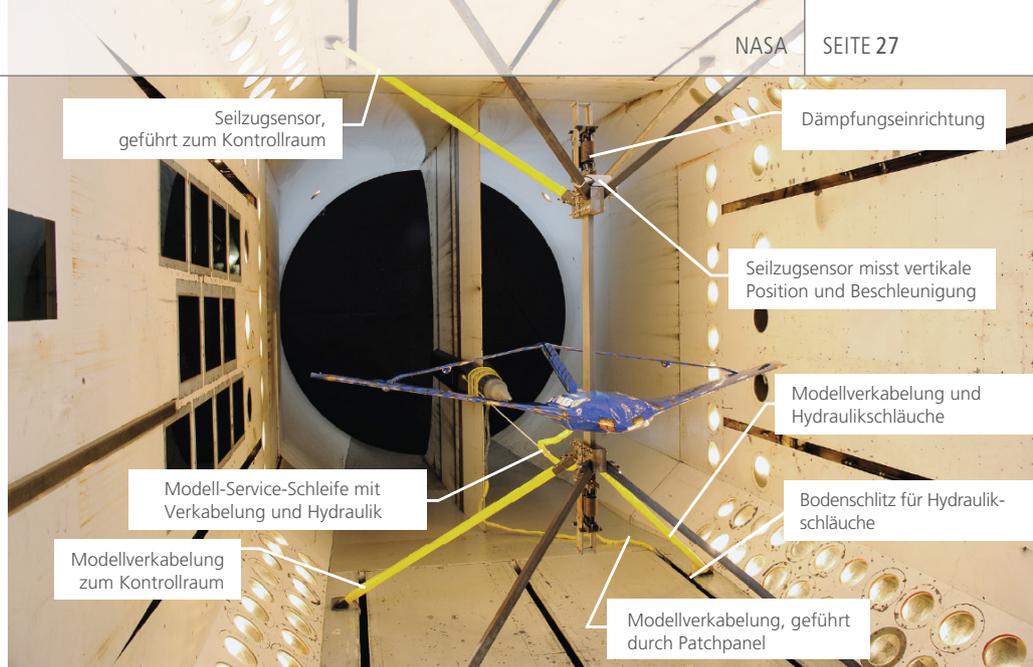


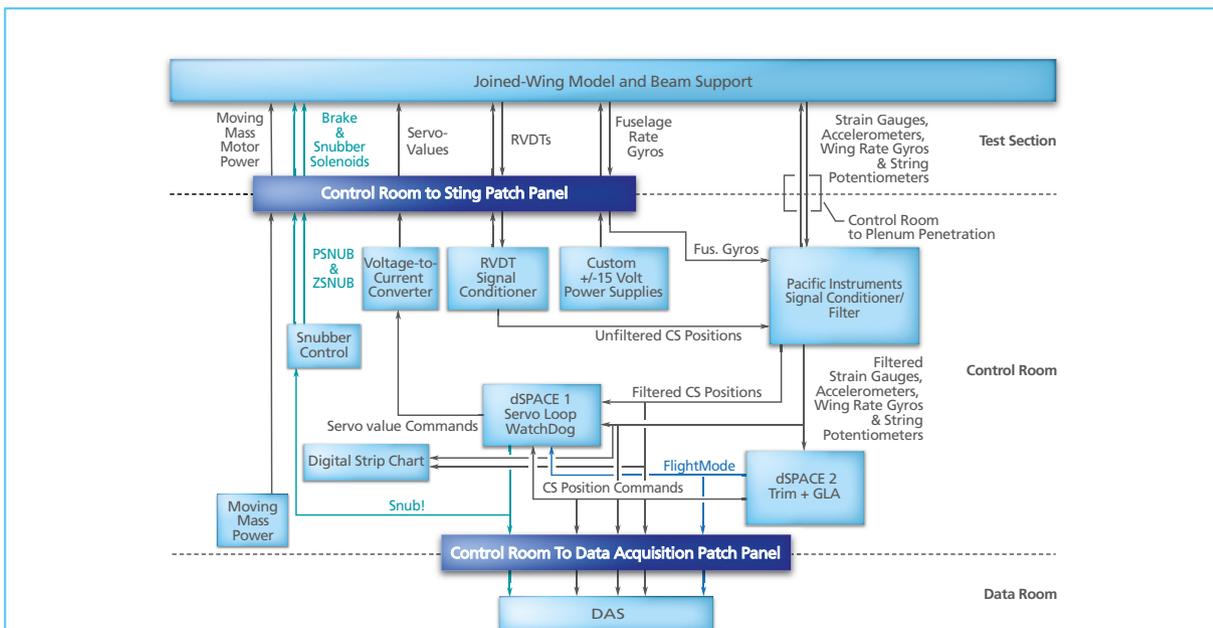
Abbildung 3: SensorCraft-Rautenflügler im NASA-Windkanal Transonic Dynamics Tunnel in Langley.

binationsmöglichkeiten von Steuerflächenbefehlen hinzufügen. Diese Befehle werden als analoge Signale an das dSPACE System 1 ausgegeben. Die Servoregelschleifen und das WatchDog-System waren auf dem dSPACE System 1 implementiert. Bei den Servoregelschleifen handelt es sich um unabhängige PID-Regelschleifen mit Sättigungsblöcken als Ausgang, um ein Übersteuern des Aktors zu verhindern. Das WatchDog-System überwacht die Modellsignale. Tritt eine Stö-

rung auf, wird der Dämpfungsbefehl ausgegeben und über den Schalter in Abbildung 5 an den Notfallalgorithmus übertragen, der die Steuerung übernimmt. Im Störfall stellt der Notfallregler die Steuerflächen augenblicklich in Neutral/Nullstellung. In dem in Referenz [1] beschriebenen Test wurde ein geschlossener Regelkreis angewandt. Wie in Abbildung 5 gezeigt, kommunizieren die unterschiedlichen Systeme über die Statussignale vom Dämpfungsregelsystem an dSPACE

>>

Abbildung 4: Signalfluss in den Rautenflüglertests.



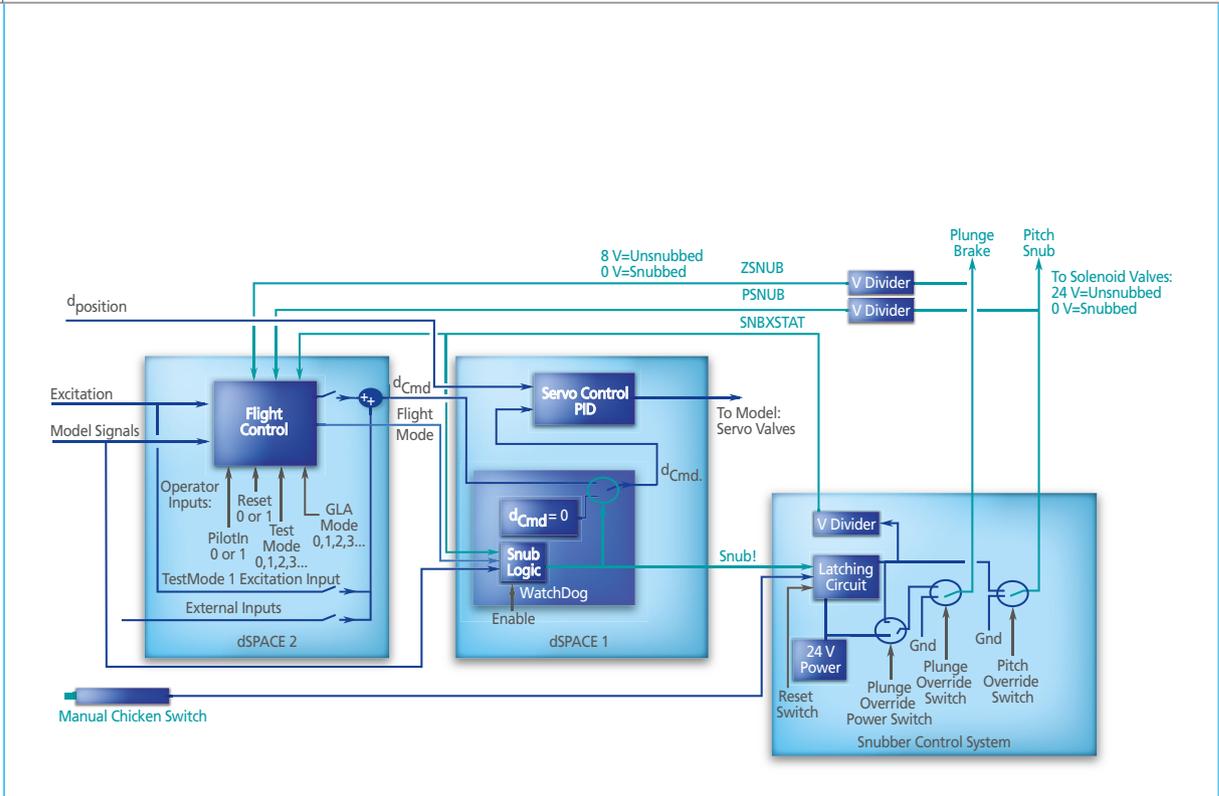


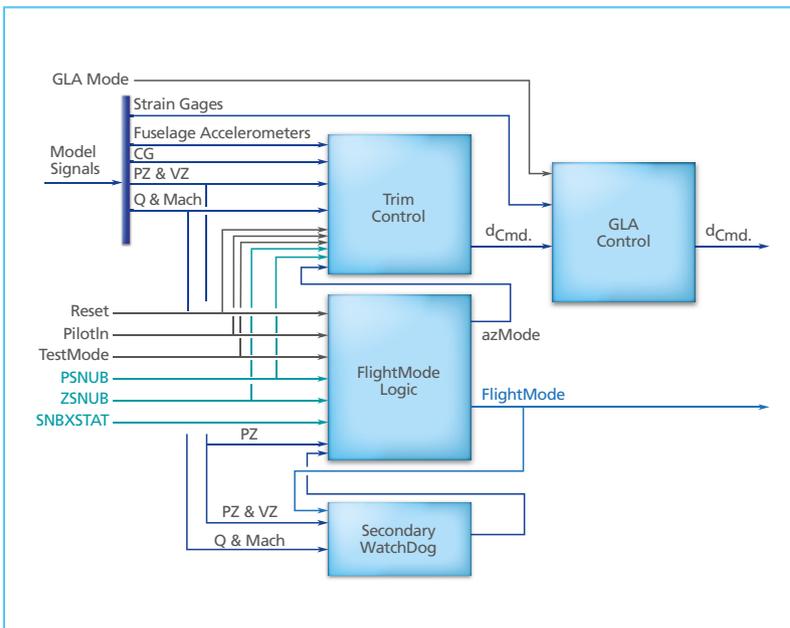
Abbildung 5: dSPACE Systeme und Blockdiagramm der Dämpfungsregelung.

System 1, über das Flugmodussignal von dSPACE System 2 an dSPACE System 1 und über das Dämpfungs-signal von dSPACE System 1 an das Dämpfungsregelsystem. Diese Kommunikationswege zusammen mit Anwendereingaben meistern eine der wesentlichen Herausforderungen des Rautenflüglers im Windkanal:

den Übergang des Modells von ganz unten vertikal nach oben trotz aktiver Dämpfungseinrichtung bis zum freien Schwebeflug in der Mitte des vertikalen Flugbereichs. Die dazu notwendigen Schritte sind detailliert in Referenz [2] erläutert. Abbildung 6 zeigt die Hauptmerkmale des Flugsteuerungsblocks von dSPACE System 2.

Die Hauptkomponenten sind die Blöcke für Trimmung und Böenlastminderung (GLA) sowie die Blöcke für die Flugmoduslogik und die Fehlererkennung. Dargestellt sind Modell-signale, dämpfungsrelevante Signale, Anwendereingaben und die entsprechenden Modellsignale. Der Trimmungsregler hat zwei Betriebsmodi: Theta Hold und Altitude (Z) Hold. Der genaue Betriebsmodus wird von der Anwendereingabe und der vertikalen Position des Modells bestimmt. Auch enthält der Trimmungsblock eine Logik zum Ändern des Rampen-sollwerts der vertikalen Position vom unteren Haltepunkt bis zur Windkanalmitte. Der Anwender steuert den Böenlastminderungsblock durch seine Eingabe im GLAMode. Wenn GLAMode gleich 0 ist, durchlaufen die Steuerflächenregelungsbefehle den GLA-Block. Ist GLAMode größer 0, werden mit dem Signal des Dehnungsmessstreifens Befehle für die Steuerflächen zur Böenlastminderung generiert, die zu den Ausgängen des Trimmungsreglers addiert werden. Der Trimmungsregler wurde zum Starten, Fliegen und Landen des Modells im Windkanal entwickelt

Abbildung 6: Blockdiagramm des Flugsteuerungssystems.



und dient als Referenz, um die Böenlast zu reduzieren. Der Trimmungsregler besteht aus zwei Hauptelementen, einem vertikalen (Z) Regelkreis und einem Neigungsregelkreis (θ). Der vertikale Regelkreis besteht aus einem einfachen PID-Regler, der den Beschleunigungsbefehl generiert. Der Neigungsregelkreis besteht aus einer PID- und einer Feed-Forward-Regelung für die Beschleunigung, um aus dem Beschleunigungsbefehl einen Befehl für das Höhenruder zu generieren. Die beiden Regelkreise verwenden Verstärkungen, basierend auf dem Modellschwerpunkt. Der Steuerflächenbefehl durchläuft einen Tiefpassfilter dritter Ordnung, um die Reaktion bei höheren Frequenzen zu dämpfen.

dSPACE Systeme

Jedes dSPACE System besteht aus einem Host-Rechner, einem Zielprozessor, einer Tastatur, einem Monitor, einem BNC-Patchpanel für die I/O und einer unterbrechungsfreien Stromversorgung. Den Kern des dSPACE Systems bildet ein DS1006 Processor Board mit AMD-Opteron™-Prozessor (2,6 GHz), verbunden mit drei dSPACE D2002 Multi-Channel A/D Boards und einem dSPACE DS2103 Multi-Channel D/A Board. Die A/D Boards haben jeweils 32 Kanäle mit 16 Bit Quantisierung und einem Eingangsbereich

von ± 10 Volt. Das D/A Board hat 32 Kanäle mit 14 Bit Quantisierung, ist ausgelegt für ± 10 Volt und hat eine Einschwingzeit von 10 μ sec. Die Regler-Software wird in MATLAB®/Simulink® entwickelt, kompiliert und über dSPACE Real-Time Interface auf den Zielprozessor heruntergeladen. Eine integrale Komponente der dSPACE Werkzeugkette ist die Experimentiersoftware ControlDesk®. ControlDesk ist die Benutzerschnittstelle zum Zielprozessor für die Entwicklung und Implementierung der GUI. Die GUI wird auf dem Host-Rechner ausgeführt und steuert die Kommunikation zwischen den Prozessoren. ■

David A. Coulson und Robert C. Scott, NASA

Referenzen

[1] Scott, R., Vetter, T., Penning, K., Coulson, D., and Heeg, J., "Aeroservoelastic Testing of Free Flying Wind-Tunnel Models Part 1: A Sidewall Supported Semispan Model Tested for Gust Load Alleviation and Flutter Suppression," NASA/TP-2013-218051, Oct. 2013.

[2] Scott, R., Castelluccio, M., Coulson, D., and Heeg, J., "Aeroservoelastic Testing of Free Flying Wind-Tunnel Models Part 2: A Centerline Supported Fullspan Model Test for Gust Load Alleviation," NASA/TP-2014-218170, Feb. 2014.

Ergebnisse

Mit dem Aufbau wurde im Laufe von sechs Wochen eine Vielzahl von Windkanaltests absolviert. Dabei gelang es, die Regelalgorithmen für die Trimmung und die Böenlastminderung schrittweise von Test zu Test zu verfeinern. Generell wurden die Regelungen entworfen, implementiert, getestet und evaluiert. Dieser Prozess wurde in der Testphase mehrfach durchlaufen. Mit fortschreitenden Testreihen wurden optimierte Testprozesse entwickelt, die zu verbesserten Datensätzen aus der Parameteridentifikation führten. Diese Datensätze kamen zur weiteren Optimierung der analytischen Modelle zum Einsatz und halfen bei der Verbesserung der Reglerentwürfe von Trimmung und Böenlastminderung. Das Ergebnis sind Regelalgorithmen, die die Fluglage und Flugstabilität des Flugzeugs soweit optimieren, dass die Belastung durch Böen um deutlich mehr als 50 % geringer ist als zu Beginn der Testreihen. Wegen der schnellen Abfolge und der ständigen Veränderungen der zahlreichen Tests waren zum einen die Anpassbarkeit und die Konfigurierbarkeit des dSPACE Systems ein Schlüsselfaktor für den Erfolg der Experimente, zum anderen die MATLAB/Simulink-Kompatibilität. Dies zeigt sich beispielsweise daran, dass die Entwicklung der Regelalgorithmen von einem Teammitglied an der US-Westküste erledigt wurde, obwohl sich der Windkanal an der US-Ostküste befindet. Überarbeitete Regelungen wurden einfach als neues Simulink-Modell an die Ingenieure am Windkanal geschickt und in den bestehenden Rahmen eingefügt, kompiliert und waren nach wenigen Minuten einsatzbereit. Auf diese Weise ließen sich zahllose Iterationen in kürzester Zeit bewerkstelligen.

David A. Coulson

David A. Coulson, Senior Research Engineer, Aktive Regelungen NASA-Windkanal, Analytical Sciences & Materials, Inc., Hampton, Virginia, USA.



Robert C. Scott

Robert C. Scott, Senior Aerospace Engineer, Bereich Aeroelastizität, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA.

