

Rein elektrisch

ZFL und Sikorsky entwickeln neue Technologie
für elektrische Rotorsteuerung

ZF Luftfahrttechnik (ZFL) und Sikorsky arbeiten an einem neuen elektrischen Rotorsteuerungssystem (LIBRAS™), das primäre Flugsteuerung und individuelle Blattsteuerung zur Vibrations- und Lärmreduzierung, Energieeinsparung und Leistungsverbesserung für Hubschrauber vereint. Dabei wird ein dSPACE System eingesetzt, um die Sensordaten des Rotorkopfes auszulesen, zu verarbeiten und das System so zu steuern, dass es bei der Identifizierung und Optimierung von Regelfunktionen hilft.

Der ca. 25 x 12 m große Testbereich des National Full-Scale Aerodynamic Complex (NFAC), wo der Windkanaltest stattfinden wird.



Im Jahr 1939 fand der erste erfolgreiche Hubschrauberflug statt.

Dieser Hubschrauber namens VS-300 wurde von dem Flugpionier Igor Sikorsky konzipiert; er verfügte über ein Triebwerk und einen Dreiblattrotor mit variablem Anstellwinkel, um den Luftstrom zu lenken und es dem Hubschrauber so zu ermöglichen, senkrecht in die Luft zu steigen und zu fliegen. Seither hat sich an der Grundkonstruktion des klassischen Hubschraubers nicht viel verändert. Hubschrauber sind nach wie vor auf Blattrotoren angewiesen, um zu starten, zu landen, zu schweben und vorwärts und rückwärts zu fliegen; und sie verfügen über Verbrennungsmotoren als Antrieb. Als die Hubschrauber immer größer und schwerer wurden, integrierten die Ingenieure hydraulische Steuersysteme, um die Piloten beim Kontrollieren der Flugbewegungen zu unterstützen. Heutzutage, in der Ära der zunehmenden Elektrifizierung, ist der Hubschrauber aber bereit für grundlegende Veränderungen.

Von hydraulischen zu elektrischen Lösungen

Derzeitige Hubschrauber-Steuerungen nutzen immer noch hydraulische Servomotoren zum Bewegen der aerodynamischen Flächen, allerdings rücken elektrische Lösungen immer mehr in den Fokus. Doch bevor ein vollelektrischer Hubschrauber möglich wird, muss sichergestellt sein, dass hydraulische Komponenten effektiv durch elektrische Systeme ersetzt werden können. Der internationale Zulieferer für Helikopterkomponenten ZF Luftfahrttechnik (ZFL) und der Flugzeughersteller Sikorsky (ein Unternehmen der Lockheed-Martin-Gruppe) sehen hier Potential und arbeiten mit Unterstützung der deutschen und der US-Regierung gemeinsam an der Entwicklung einer neuen Rotorsteuerungstechnologie auf Basis einer rein elektrischen Blattsteuerung für ein Hochgeschwindigkeitsrotorsystem. Das eLectrical Blade

Root Actuation System (LIBRAS™) soll die hydraulischen Komponenten ersetzen, die derzeit für die Flugsteuerung zum Einsatz kommen. Und das System könnte noch weitere Vorteile mit sich bringen. „Das neue Einzelblattsteuerungssystem (Individual Blade Control, IBC), das wir in diesem Programm entwerfen und testen, ist eine innovative Methode zur Steuerung eines Hubschraubers und kann viele Vorteile bieten, da es jedes Rotorblatt über einen eigenen elektrischen Antrieb individuell steuert“, sagt Chris Sutton, Flight Sciences Technology Lead bei Sikorsky. „Zu diesen Vorteilen gehören geringere Lärmemission, verbesserte Treibstoffeffizienz und weniger Vibrationen, die für den Piloten und die Passagiere ermüdend und störend sind und zum Verschleiß von Komponenten führen.“

Blattverstellung steuern – auf die herkömmliche Art

Bei einer traditionellen Hubschrauberkonstruktion bestimmt der Anstellwinkel der Rotorblätter die Art und Weise, wie der Hubschrauber abhebt und fliegt. Alle Änderungen der Flugeschwindigkeit sowie von Steig- und Sinkmanövern werden durch diesen Anstellwinkel reguliert. Je größer der Winkel, desto stärker der Luftstrom. Die Blattverstellung wird mechanisch durch eine Taumelscheibe gesteuert, die mit dem Flugsteuerungssystem des Hubschraubers verbunden ist (Abbildung 1). Das Flugsteuerungssystem sendet zu diesem Zweck Befehle an hydraulische Servos, die dann die Bewegung der Taumelscheibe steuern, und so den Anstellwinkel der Rotorblätter über Blattverstellstangen einstellen. Obwohl die Taumelscheibe dem Piloten die Möglichkeit gibt, den Hubschrauber in jede Richtung zu bewegen, führt ihre Konstruktionsweise trotzdem zu kinematischen Einschränkungen. Denn die Taumelscheibe ist in einem nicht rotierenden festen Rahmen installiert, wodurch die Verstellung der Rotorblätter im

>>



Abbildung 1: Rotorkopf des Sikorsky S-92 mit traditionellem Steuerungssystem. Die Hydraulikservos (nicht sichtbar) befinden sich unterhalb der Taumelscheibe.

Zyklus der Rotorumdrehung erfolgt, was alles andere als optimal ist. ZFL und Sikorsky wollen mit der Individual-Blade-Control (IBC)-Technologie die Rotorkonstruktion optimieren und effizienter gestalten. Bei der IBC-Technologie besitzt jedes Blatt einen eigenen Aktor, was sowohl die in einem einzigen System kombinierte Primärsteuerung mit der Frequenz der Rotorumdrehung ermöglicht als auch höherfrequente (in der Regel harmonische) Änderungen der Blattverstellung. „Mit dem IBC-System lässt sich, in Kombination mit der Fähigkeit, jedes Blatt individuell zu steuern, auch das realisieren, was wir Oberwellensteuerung nennen“, erklärt Sutton. „Herkömmliche Steuerungssysteme können nur stetige Steuereingaben einmal pro Umdrehung an den Rotorkopf übertragen. Das bedeutet, dass sich jedes Rotorblatt bei jeder Umdrehung einmal auf und ab bewegt. Mit einer Oberwellensteuerung kann dies zweier oder mehrmals während einer Umdrehung geschehen. Die Oberwellensteuerung und die individuelle Blattsteuerung reduzieren zum Beispiel

die Vibrationen und verbessern die Effizienz, wenn man weiß, wie man sie anwenden muss.“

Individual Blade Control (IBC)

Seit vielen Jahren leistet ZFL mit dem IBC-Konzept Pionierarbeit. Tatsächlich wurden während verschiedener Windkanal- und Flugtests mehrere Systeme entwickelt und erfolgreich demonstriert. Bei Flugversuchen mit IBC-Technologie an Bord konnten die Vibrationen um bis zu 90 % reduziert, die Lärmemissionen um 3 bis 9 dB gedämpft und der Leistungsbedarf des Rotors konsequent um mehr als 5 % gesenkt werden. Darüber hinaus stabilisieren solche aktiven Systeme den Rotorweg während des Fluges und kompensieren das Ungleichgewicht von Blatt zu Blatt. Zudem eröffnen die Systeme inhärente Rekonfigurationsmöglichkeiten zur Vermeidung von gefährlichen Fremdkörperschäden (FOD). ZFL entwickelt neuartige Rotorsteuerungssysteme, die auf mehrfach redundanten elektromechanischen Hochleistungsaktoren basieren. Bei der Architektur dieses Systems werden

nicht nur alle hydraulischen Elemente ersetzt (keine Blattverstellstangen, keine Taumelscheibe, keine hydraulischen Verstärker), sondern es fallen auch alle mechanischen Steuerstangen vom Rumpf bis zu den Rotorblättern weg (Abbildung 2). Wird die Taumelscheibe entfernt, kann ein IBC-System die volle Funktionalität erreichen und so die oben genannten Vorteile (Vibrations- und Geräuschreduzierung, Energieeinsparung und Leistungssteigerung) erzielen. Durch den Verzicht auf ein Hydrauliksystem ergibt sich außerdem ein zusätzlicher Vorteil in puncto Sicherheit, denn es befindet sich damit dann auch kein heißes, unter Druck stehendes und entflammendes Hydrauliköl mehr an Bord.

Anpassung an die Leistung hydraulischer Aktoren

Die IBC-Technologie und ihre elektrischen Pendanten bieten viele Vorteile, allerdings ist der Aufwand, die gleiche Leistungsdichte wie mit hydraulischen Aktoren zu realisieren, deutlich höher. Damit das Gewicht des Systems konkurrenzfähig wird, muss eine völlig neue Steuerungstopologie zum Einsatz kommen. Insbesondere müssen die Primärsteuerung und die IBC-Funktionen in einem einzigen System kombiniert werden. Eine solche Konstruktion könnte die gleiche Zuverlässigkeit bieten, die für das primäre Regelsystem erforderlich ist, und damit den Einsatz für sicherheitskritische aktive Regelanwendungen ermöglichen, wie zum Beispiel die Unterdrückung von Bodenresonanzen. Darüber hinaus ist es denkbar, dass der Ausfall eines einzelnen Blattes (sei es der Aktor für die Blattverstellung oder das Blatt selbst) durch eine geeignete Anpassung der Steuerung der übrigen

„Das dSPACE System spielt eine zentrale Rolle dabei, die Zielvorgaben für unser elektrisches Rotorsteuerungssystem zu erreichen.“

Chris Sutton, Flight Sciences Technology Lead, Sikorsky

Blätter kompensiert werden kann. Laut Sutton stützen entsprechende Simulationen dieses Konzept, allerdings stehen Tests mit Hardware in einer geeigneten Umgebung noch aus.

Validierung des Konzepts

Um die Durchführbarkeit des IBC-Konstruktionskonzepts zu validieren, haben Sikorsky und ZFL einen Demo-Aufbau entworfen, bei dem Hardware in Originalgröße unter realistischen Bedingungen getestet wird. Sikorsky hat alle relevanten High-Level-Systemanforderungen für die mechanische und primäre Steuerleistung, die Betriebslasten, die elektrischen Schnittstellen und die IBC-Leistung definiert. In verschiedenen Simulationen wurde der erforderliche IBC-Einfluss bei den jeweiligen höheren harmonischen Frequenzen bestimmt. Es besteht Grund zu der Annahme, dass sich die IBC-Technologie nicht nur für etablierte Anwendungen wie Vibrations- und Geräuschreduzierung eignet, sondern auch für innovative Möglichkeiten in Bezug auf die Eigenschaften des koaxialen starren Rotors wie die Optimierung des Hubversatzes oder kleinere Zwischenrotorabstände.

Systemarchitektur

Auf Grundlage der identifizierten Systemanforderungen hat ZFL ein Systemkonzept entworfen und mit Sikorsky abgestimmt. Die High-Level-Systemarchitektur besitzt eine LIBRAS™ Rotornabe (Abbildung 3). Diese enthält die elektromechanischen Aktoren (EMAs) sowie die Leistungs- und Steuerelektronik, die sogenannte Actuator Power Control Unit (APCU). Die meisten ZFL-Komponenten befinden sich im rotierenden Rahmen und sind in der Systemarchitektur in Rot, Grün und Blau dargestellt (Abbildung 4). Die Hardware- und Software-Komponenten für die Steuerungs- und Versorgungsfunktionen befinden sich hauptsächlich im nicht rotierenden Rahmen (in Blau). Die übergreifende dreifach-redundante

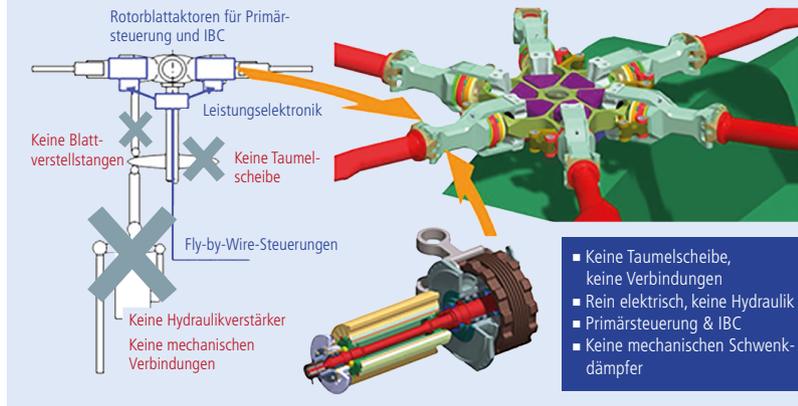


Abbildung 2: Ansatz für ein elektrisches Rotorsteuerungssystem ohne Taumelscheibe.

Architektur ist leicht zu erkennen (abgebildet in Rot, Blau und Grün, eine Farbe für jede Einheit des dreifach-redundanten Systems) und reicht von der Stromversorgung bis zum elektromechanischen Aktor und seinen Sensoren. Die Hauptkomponenten der Systemarchitektur sind nachfolgend zusammengefasst:

Rotierende Rahmenkomponenten:

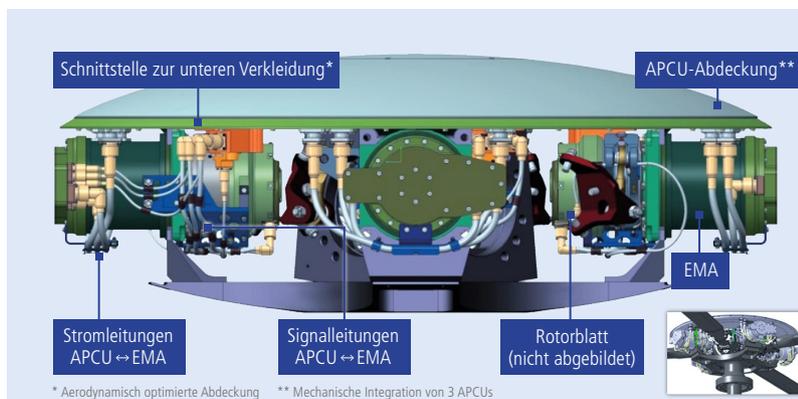
- 4x elektromechanische Aktoren (EMA)
- 3x Actuator Power Control Unit (APCU) (zur Verarbeitung der eingehenden Befehle, zur Steuerung der Leistungselektronik, zur Lageregelung der Stellantriebe und zum Überwachen der Grenzwerte [Ströme, Drehmomente, Temperaturen usw.]

- 3x Rotor-Azimuthsensoren (erforderlich für eine zuverlässige Referenz der Ist-Rotorposition)
- Datenerfassungssysteme (DAS) zum Empfangen von Sensorsignalen und Überwachen der Blattlasten und anderer sicherheitsrelevanter Flugparameter

Nicht drehende Rahmenkomponenten:

- 1x Flugsteuerungsrechner (FCC) bestehend aus:
 - Pilot Control Console (stellt primäre Eingaben für die Steuerung bereit)
 - Higher Harmonic Controller (ein dSPACE System das geeignete Amplituden- und Phasenwerte für die Oberwellen- und/oder blattindividuellen Komponenten auf >>

Abbildung 3: Ein CAD-Modell der Rotorkonstruktion von LIBRAS™.



* Aerodynamisch optimierte Abdeckung ** Mechanische Integration von 3 APCUs

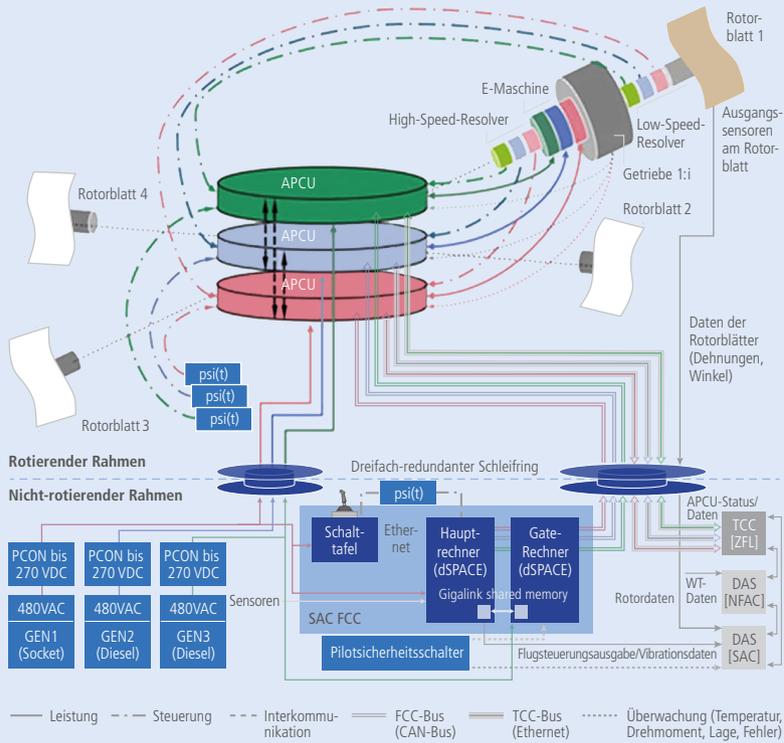


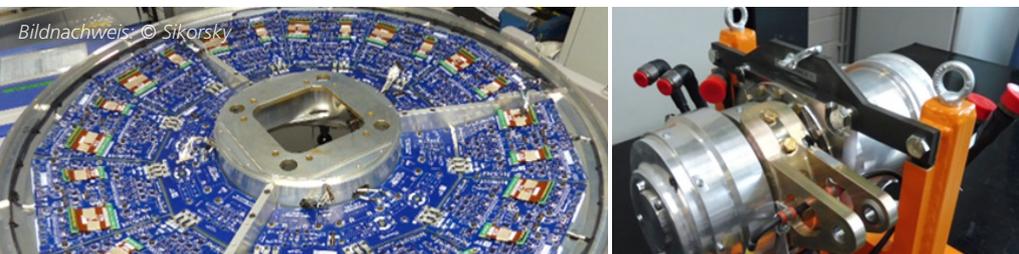
Abbildung 4: High-Level-Systemarchitektur und Aufbau der Steuerungs-Überwachungs-peripherie.

- Basis eingeegebener Voreinstellungen synthetisiert oder aus Echtzeit-Sensorsignalen berechnet
- Gate Verification System (ein dSPACE System, das Pilot- und HHC-Steuerungseingaben anhand eines Regelbereichs und einer Hüllkurve überwacht, um ungültige oder außerhalb des Bereichs liegende Befehle zu verhindern)
- 1x Teststeuerungsrechner (TCC)
- 3x Stromversorgung
- Datenerfassungssysteme

Zur Testplattform von Sikorsky und ZFL gehört auch ein ausgereiftes

Regelungssystem. Für die Testplattform wurden die Rotornabe und das Rotorblattdesign fertiggestellt und zusammen mit den Aktoren, der Leistungselektronik und den Stromrichtern hergestellt. Die Rotornabe und die Rotorblätter wurden mit anderen Systemkomponenten integriert, was zu einem sehr ausgeklügelten Design sowohl der mechanischen als auch der elektronischen Teile geführt hat. Abbildung 5 zeigt die kundenspezifische Leistungs- und Steuerelektronik-Hardware (APCU), die zur Kühlung und für geringen Luftwiderstand in eine Rotorverkleidung

Abbildung 5: Montage der Leistungselektronik auf der Aluminiumverkleidung (links) und der elektromechanische Aktor (rechts).



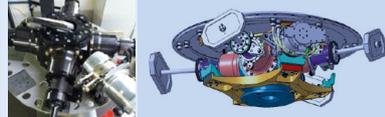
eingebaut ist, sowie den kundenspezifischen, hochgradig integrierten, hochgradig zuverlässigen und hochleistungsstarken Rotoraktor (EMA).

Simulation und Test

Um den mechanischen Aufbau und die Leistungsfähigkeit der elektromechanischen Aktoren und Software-Funktionen zu verifizieren, führen Sikorsky und ZFL Simulationen und Tests auf Komponentenebene, Teilsystemebene und Systemebene durch. Außerdem werden verschiedene Software-Tests innerhalb einer hochautomatisierten Testumgebung durchgeführt, um die Anforderungen auf Grundlage des DO-178-Standards zu verifizieren. Dazu gehören zum Beispiel komplexe Sensordatenverarbeitung, Lageregelung, Querkommunikation, Abstimmungen und Fehlerbehebungs-funktionen der Software der Antriebssteuer-einheit. Zusätzlich wurden thermische Simulationen durchgeführt, um die Wärmeverteilung unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu validieren.

Funktionen des dSPACE Systems

ZFL und Sikorsky setzen bei dieser Forschungsarbeit dSPACE Systeme für eine Vielzahl von Anwendungen ein. So erfolgt beispielsweise die Steuerung und Überwachung aller Prüfstände für Komponenten- und Teilsystemtests bei ZFL mit dSPACE Systemen. Auf Seiten von Sikorsky kommt ein dSPACE System zum Einsatz, das über vier DS1005 PPC Boards für die Verarbeitung und Berechnung von Echtzeitanwendungen verfügt, außerdem ein DS2202 HIL I/O Board für die Simulation und Messung von Signalen, ein DS4002 Timing and Digital I/O Board für die Erzeugung und Erfassung digitaler Signale sowie ein DS2302 Direct Digital Synthesis Board für die Simulation komplexer Sensorsignalförmungen. Der dSPACE Controller empfängt Daten von Sensoren wie beispielsweise Beschleunigungssensoren und Dehnungsmess-

Komponentenebene (vollständig)	Teilsystemebene (steht kurz vor dem Abschluss)	Systemebene (gestartet)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Netzteil ■ Power Control Unit Converter ■ Aktor-Steuergerät (erster Hardware-Test) ■ Aktor-Steuergerät (Software-Modultest) ■ Elektromotor 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Elektromechanischer Aktor ■ Aktor-Steuergerät: Hardware-Software-Integrations-test ■ Actuator Power Control Unit: Funktionaler Integrationstest 	<ul style="list-style-type: none"> ■ LIBRAS-System (nicht rotierend) ■ LIBRAS-System (rotierend) ■ Mit Rotorblattsimulator
		

Bildnachweis: © Sikorsky

Abbildung 6: Qualifikationstests: Komponenten-, Teilsystem- und Systemebene.

streifen am Rotor, verarbeitet die Daten und nutzt diese Informationen dann in einem Regelalgorithmus, um optimierte Regeleingaben zu identifizieren. Das dSPACE System schlägt Amplituden, Oberwellenphasen und Rotorblätterbefehle vor, um relevante Größen wie Vibrationen, Blattlasten oder den Leistungsbedarf anzupassen. Die Befehle für die Vorsteuerungen sowie die höherharmonischen und blattindividuellen Steuerungen werden dann digital gepackt und als Triplex-Stream vom dSPACE Rechner an das ZFL-IBC-System am Rotorkopf gesendet. „Das dSPACE System ist von zentraler Bedeutung, um die anvisierten Ziele zu erreichen“, sagt Sutton.

Ausblick und zukünftige Tests

Nach Abschluss der meisten Qualifikationstests bei ZFL in Deutschland wird im Jahr 2020 ein vollständiges System an Sikorsky in den USA geliefert, um mit den Vorbereitungen für die System-Integration-Lab Tests bei Sikorsky zu beginnen. Hauptziele der Tests:

1. Verifizieren des Testaufbaus und der mechanischen Integration des LIBRAS-IBC-Systems
2. Verifizieren des Sikorsky-Flugsteuerungsrechners (worin das dSPACE System eine Hauptkomponente ist) im vollintegrierten System

3. Validieren des LIBRAS-Systembetriebs über einen Bereich von Rotordrehzahlen und Steuerbewegungen hinweg
4. Nachweisen der Robustheit der Triplex-Systemarchitektur gegenüber eingespeisten Fehlern
5. Erfüllen der Anforderungen der Eingangskriterien für die Windkanalanlage (Dauerlauf-, Vibrations- und Übergeschwindigkeitstests)

Nach Abschluss dieser Tests finden Windkanaltests statt, um die primäre Flugsteuerung zu demonstrieren, den Nutzen der IBC-Technologie zu quantifizieren und die IBC-Konstruktion und ihre Herausforderungen bei der Implementierung zu bewerten. Während der Windkanaltests verpackt das dSPACE System Befehle und sendet sie zusammen mit Vorsteuerungen an einen menschlichen Piloten, der das Modell mit einem Joystick von einem an den Windkanal angrenzenden Kontrollraum aus steuert. Sobald die Befehle implementiert sind, liest der Controller die Sensordaten, um die Veränderungen zu messen und wiederholt dann den Vorgang. „Im Windkanal werden wir unter verschiedensten Bedingungen unterschiedliche Fluggeschwindigkeiten testen, um festzustellen, wie das IBC-System

die Parameter beeinflussen kann, damit zukünftige Hubschrauberplattformen davon profitieren“, so Sutton. „Wenn die System-Integration-Lab- und Windkanaltests günstig verlaufen, werden wir Folgeversuche durchführen. Dies ist der nächste logische Schritt nach einem Windkanaltest in unserer Technologieentwicklung.“ Am Ende wollen Sikorsky und ZFL die Machbarkeit eines rein elektrischen, „taumelscheibenlosen“ Steuerungssystems demonstrieren, das sowohl Primär- als auch IBC-Funktionen vereint. ■

Chris Sutton, Sikorsky

Chris Sutton

Chris Sutton leitet den Bereich der flugwissenschaftlichen Technologien in der Engineering Sciences Group bei Sikorsky, einer Lockheed Martin Company in Stratford, Connecticut, USA.

