

Elektronik startet durch

Echtzeittests von modernen Aktorsystemen
bei Moog



Im Luftfahrtbereich geht der Trend bei modernen Aktoranwendungen weg von hydraulischen Aktoren, hin zu elektrischen. Diese Entwicklung bringt komplexe Elektronik und eingebettete Software in einen Industriezweig, der in der Vergangenheit naturgemäß auf mechanische Systeme ausgerichtet war. Durch diese Veränderung benötigen die Entwickler heute effektivere Teststrategien, um Zuverlässigkeit, Leistung und Sicherheit der Systeme zu gewährleisten. Daher spielen Echtzeittests eine wichtige Rolle bei der Entwicklung komplexer, moderner Aktorsysteme.



Moog setzt dSPACE Echtzeittestsysteme in einer Vielzahl von Anwendungen ein: von der Regelelektronik für herkömmliche Hydraulikaktoren bis hin zu Echtzeitsimulatoren für die Qualifizierung sicherheitskritischer Flug-Software in redundanten elektrischen Aktorsystemen.

Moog ist seit 60 Jahren einer der Hauptzulieferer der Luftfahrtindustrie und hat sich vom Hersteller anspruchsvoller Technologiekomponenten hin zu einem führenden Anbieter integrierter Aktorsysteme in Flugsteuerungen entwickelt. Die Flugsteuerungssysteme und speziellen Steuerkomponenten von Moog haben ihre Zuverlässigkeit in Flugzeugen auf der ganzen Welt unter Beweis gestellt. Die Moog Aircraft Group bietet eine Vielzahl integrierter Flugsteuerungssysteme wie Primär- und Sekundärflugsteuerungen, Hochauftriebssysteme und Landeklappenantriebe (Auftriebshilfe) bis hin zu sicherheitskritischen Steuerungen, beispielsweise für die Triebwerkssteuerung, aktive Schwingungskontrolle, Wafenschächte sowie Navigations- und Leitsysteme. Moog liefert sowohl integrierte Systemlösungen als auch Einzelkomponenten. Das Moog Entwicklungsspektrum umfasst zudem sicherheitsrelevante Produkte zur Steuerung wie Flugsteuerungscom-

puter und -Software, Cockpitbedienelemente, Ansteuer Elektronik und elektrische Antriebe, Aktoren, Sensoren und zugehörige Komponenten. Die Palette der sicherheitskritischen Produkte für den Flugzeugbetrieb wird immer breiter. Um mit dieser Entwicklung Schritt halten zu können, ist eine moderne Entwicklungsumgebung notwendig, die den hohen Anforderungen an Entwurf und Test Rechnung trägt.

Entwicklung von Flugsteuerungs- und Aktorsystemen

Flugsteuerungssysteme sind für den Betrieb moderner Hochleistungsflugzeuge entscheidend. Schon mit dem ersten bemannten Flug kam diesen Systemen besondere Aufmerksamkeit zu. Die frühen Flugzeuge hatten rein mechanische Steuerelemente, mit denen der Pilot die Steuerflächen nur durch Muskelkraft bediente. Mit der Weiterentwicklung der Flugzeuge wuchs jedoch der Kraftaufwand zum Bewegen der Steuerflächen, so dass der Pilot eine hydraulische Unterstützung benötigte. Mit der Zeit entwickelten sich daraus vollständig hydraulische Systeme zur Bewegung der Steuerflächen. Diese Aktorsysteme positionieren die Steuerflächen als Reaktion auf mechanische Eingaben des Piloten.



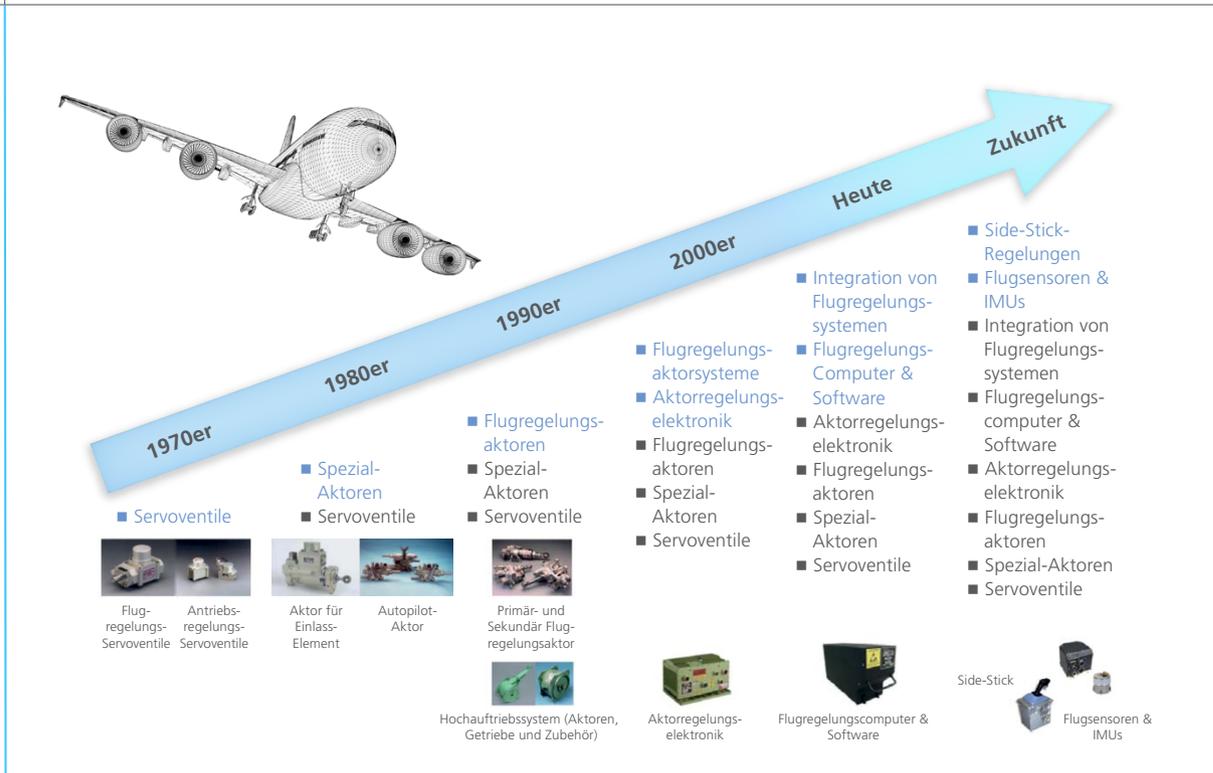


Abbildung 1: Moog wandelte sich vom Komponentenanbieter zum Zulieferer für integrierte Systeme.

Ein großer Fortschritt durch mechanisch-hydraulische Systeme war die Einführung von Fly-by-Wire-Aktorsystemen. Bei diesen Systemen werden die Steuerbefehle des Piloten nicht direkt an die Flugsteuerung übertragen, sondern an den Flugsteuerungscomputer, der die Hydraulikaktoren mit Hilfe elektrischer Signale steuert. Diese bedeutende Weiterentwicklung und die Art der Aktorik findet man heute noch in vielen modernen Flugzeugen. Den nächsten großen Schritt in der Entwicklung von Aktorsystemen markiert der Übergang zur Power-by-Wire-Technologie. Power-by-Wire-Systeme werden rein elektrisch gesteuert und betrieben. Die Steuerbefehle des Piloten werden vom Flugsteuerungscomputer empfangen, der den elektrisch betriebenen Aktor steuert. Die Befehlssignale an das Aktorsystem werden direkt als elektrische Signale oder als Kommunikationsbotschaften über Kommunikationsbusse wie ARINC 429, MIL-STD-1553, IEEE 1394B gesendet. Der Stellantrieb positioniert den Aktor als Reaktion auf die Befehle des Flugsteuerungscomputers. Neben der oben beschriebenen Entwick-

„Moog nutzt dSPACE Systeme auf vielfältige Weise: von der Regelelektronik für herkömmliche Hydraulikaktoren bis hin zu Echtzeitsimulatoren bei sicherheitskritischer Flug-Software.“

David Cook, Moog

lung hatten zwei weitere wichtige Änderungen auf technischer und wirtschaftlicher Ebene großen Einfluss auf die Aktorsysteme. Zum einen tendierte die Luftfahrtindustrie dazu, integrierte Aktorsysteme, bestehend aus Reglern und Aktoren, von nur einem Zulieferer zu beziehen. Das führte dazu, dass die Verantwortung für die Integration beim Zulieferer lag. Als Folge davon mussten Zulieferer sich vom reinen Komponentenanbieter hin zum Hauptsystemzulieferer mit einem hohen Maß an Systemengineering-Expertise weiterentwickeln. Zum anderen geht der Trend in Richtung verteilte Systeme, bei denen der Stellantrieb direkt auf den Aktoren angebracht ist. Die Folgen dieses Trends sind ein höherer Anteil an Elektronik und Software in traditionell rein mechanischen Produkten. Diese Veränderungen führten zu-

sammen mit Fortschritten in der Aktortechnologie zu Produkten wie elektromechanischen Aktoren (EMA), elektrohydrostatischen Aktoren (EHA), hydraulischen Aktoren mit elektrischem Backup (EBHA) und hydraulischen Aktoren mit integrierter Steuerelektronik. Durch den Einsatz elektrischer Aktoren in drucklosen Flugzeugschächten mussten sich die Aktorzulieferer das Know-how für den Einsatz von elektronischen Hochleistungssteuerungen in großen Höhen aneignen. Durch diese Entwicklungen wurden Systeme und Komponenten immer komplexer und erforderten anspruchsvolle Entwicklungsprozesse und Testmöglichkeiten.

Entwicklungsprozess für moderne Aktorsysteme

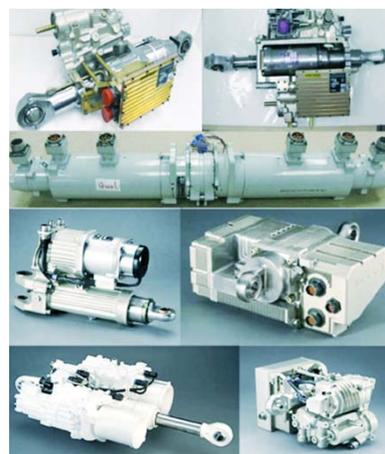
Wie bereits erwähnt, brachte die Entwicklung von Aktoren hin zu voll-

ständigen Systemen zusätzliche Herausforderungen für den Entwicklungsprozess mit sich. Insbesondere galt das für die Bereiche Anforderungsmanagement, Systemanalyse und -entwurf, Systemintegration sowie Systemverifikation und -validierung. Nachfolgend sind einige der Herausforderungen bei der Entwicklung von Aktorsystemen beschrieben:

Mit steigender Systemkomplexität werden ein sorgfältiges Anforderungsmanagement und eine klare Nachverfolgbarkeit immer wichtiger. Für den Prozess ist es entscheidend, die Anforderungen auf Spezifikationen für bestimmte Komponenten herunterzubrechen (Flowdown) und die Anforderungen einzelnen Entwicklungsteams zuzuweisen (Allocation). Anforderungszuweisung und Flowdown sind essentiell, um sicherzustellen, dass die Systemkomponenten alle notwendigen Funktionen besitzen, die zur Erfüllung der Anforderungen des integrierten Systems notwendig sind. Zudem spielt die Nachverfolgbarkeit der Anforderungen eine große Rolle, um zu gewährleisten, dass alle System- und Komponentenanforderungen korrekt verifiziert sind.

Je komplexer das System, desto schwieriger werden Systemanalyse und -entwurf. Der effektive Systementwurf ist wichtig, um das zuverlässige Funktionieren der Systemkomponenten sicherzustellen. Dazu sind oftmals Systemüberwachungen zur Fehlererkennung, eingebaute Tests (Built-in Tests, BIT) zur Bestimmung der Systemgesundheit und Logiken für den Betrieb redundanter Systemelemente erforderlich. Im Entwurfs- und Analyseprozess ist stets darauf zu achten, dass der Fokus auf dem Optimieren des Systems liegt und nicht auf dem Optimieren einzelner Systemkomponenten.

Mit steigender Systemkomplexität ist zusätzlicher Aufwand notwendig, um sicherzustellen, dass die Komponenten auch nach der Integration im Gesamtsystem korrekt arbeiten. Bei der Systemintegration wird definiert und getestet, wie die Systemkomponenten in das Aktorsystem integriert werden und letzteres in andere Flugzeugsysteme integriert wird. Die Hardware- und Software-Komponenten müssen interagieren, um die notwendigen Systemfunktionen auszuführen, ohne die Sicherheit des Systems zu gefährden. Die Systemintegration beinhaltet das Verwalten



Aktoren mit Fernsteuerungselektronik

Rotations-Primär-EMAs

Linear-Primär-EMAs

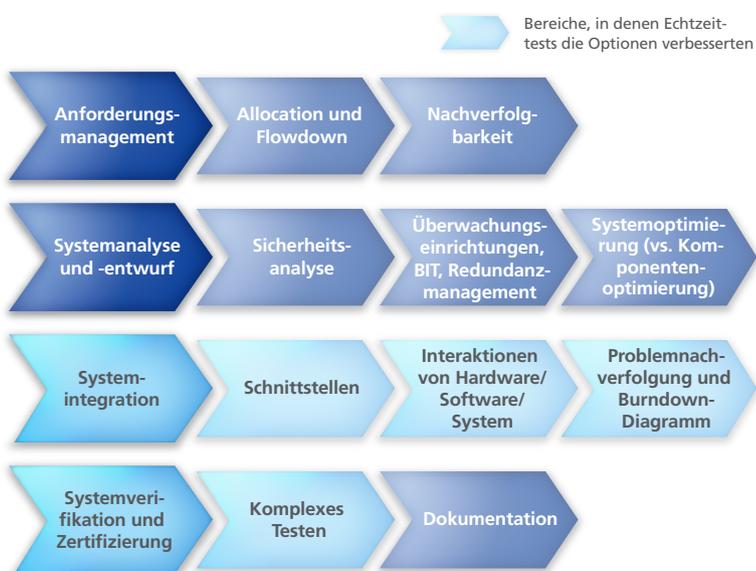
EHAs und EBHAs

Abbildung 3: Verschiedene Flugzeug-Aktor-Systeme

von Systeminteraktionen bereits während des Entwurfsprozesses und gipfelt in der Integration des Aktorsystems im Labor. Obwohl ohne die Systemintegration kein betriebsfähiges System entstehen kann, müssen trotzdem Tests durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass das System kein unerwünschtes oder unsicheres Verhalten zeigt. Wenn Probleme am System gefunden werden, müssen diese analysiert, nachverfolgt und gelöst werden, damit das System sicher betrieben werden kann und die Systemanforderungen erfüllt werden können.

Sobald ein System montiert und integriert ist, folgt das Verifizieren, um zu gewährleisten, dass das System die gestellten Anforderungen erfüllt. Bei manchen Projekten sind Zertifizierungsschritte für weitere FAA- oder EASA-Typ-Zertifizierungen des Flugzeugs notwendig. Für eine Zertifizierung muss Software die DO-178 und komplexe Elektronik-Hardware die DO-254 einhalten. Aktorsystem-Projekte erfordern stets umfassende Testläufe, um die Leistungsfähigkeit und Sicherheit des Systems in der späteren Betriebsumgebung zu verifizieren. Mit steigender Systemkomplexität wird auch das Testen immer anspruchsvoller. Das Testen auf Komponentenebene reicht nicht aus,

Abbildung 2: Herausforderungen bei der Entwicklung von Aktorsystemen





„Moog setzt dSPACE Echtzeittestsysteme bereits seit 1991 ein, unter anderem für Entwicklungen bei Verkehrsflugzeugen, Business Jets und unbemannten Luftfahrzeugen.“

David Cook, Moog

um die Systemanforderungen zu verifizieren. Komplexe Forschungseinrichtungen sind für den Systemstimulus notwendig und dafür, die Systemreaktionen für die Verifizierung des Systemverhaltens zu messen. Der gesamte Verifikations- und Zertifizierungsprozess erfordert eine exakte Dokumentation, um sicherzustellen, dass das richtige System auf die richtige Art und Weise und auf die richtigen Anforderungen hin getestet wird.

Aufgaben und Vorteile von Echtzeittests

Von den genannten Herausforderungen bieten die Systemintegration und die Systemverifikation das größte Potential, um vom Einsatz automatisierter Echtzeittestsysteme zu profitieren. Daher verwendet Moog diese Systeme für eine Vielzahl von Aufga-

ben während des gesamten Entwicklungsprozesses. In der nachfolgenden Tabelle finden sich Beispiele für Anwendungen mit Echtzeitsystemen: Modellbasierte Echtzeitsimulationssysteme haben dazu beigetragen, die Flexibilität von Moog-Testsystemen zu erhöhen. Moog setzt Echtzeittestsysteme ein, um Controller beim Testen von Aktoren zu emulieren, um Aktoren beim Testen von Regelsoftware zu emulieren und um integrierte Systeme durch Emulieren der Systemeingänge und Messen der Systemantworten zu testen. Zudem können komplexe Testsequenzen durch automatisiertes Testen wiederholt und deterministisch ausgeführt werden. Dadurch ist es möglich, in kürzester Zeit Regressionstests für modifizierte Systeme und Varianten durchzuführen. Die Automatisierung und die deterministischen Echtzeitsysteme ermöglichen es

außerdem, anspruchsvolle Testbedingungen im Labor zu schaffen. Insbesondere erlaubt dieses Vorgehen vollständige und gründliche FMET (Failure Mode and Effects Testing)-Tests. So ist durch die Simulation von Aktorfehlern das Testen von aktorspezifischen Fehlererkennungsalgorithmen ohne kostspielige Testhardware möglich. Diese Möglichkeiten führen zu einer weitreichenden Verbesserung der Testmöglichkeiten und zu beträchtlichen Kosteneinsparungen. Moog nutzt die Vorteile der dSPACE Echtzeittestsysteme bereits seit 1991. Zunächst wurden dSPACE Testsysteme für die Aktoren eines Verkehrsflugzeuges eingesetzt. Anschließend verbreiterte sich das Einsatzspektrum der dSPACE Echtzeitsysteme auf unterschiedlichste Projekte und für eine Vielzahl von Aufgaben. Derzeit verfügt Moog über 20-30 Testsysteme,

Testaufgabe	Anwendung	Beispiel
Emulation der Aktor-Regelung	<ul style="list-style-type: none"> Abnahmeprüfung von Aktoren Qualifizierungs-/Eignungstest von Aktoren 	<ul style="list-style-type: none"> Emulation der Regelalgorithmen des FCC (Flight Control Computers) für die Abnahme- und Qualifizierungstests von Aktoren
Regelung des Testsystems	<ul style="list-style-type: none"> Verschiedene Arten von Tests 	<ul style="list-style-type: none"> Regelung eines dynamischen Lastsystems für Aktor- oder Systemtests
Reglerprototyping	<ul style="list-style-type: none"> Überprüfen der Komponenten-Entwicklung Überprüfen der Aktoren-Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> Bereitstellung von Regelkreisen für Ventiltests Regler-Prototyping während der Forschung und Entwicklung von Aktoren
Aktorsimulation	<ul style="list-style-type: none"> Überprüfen der Komponenten-Entwicklung Software/Systemintegrations- und Verifizierungstests 	<ul style="list-style-type: none"> Aktorsimulation für Komponententests (EHA Pumpen) Simulation von mechanischen oder elektrischen Elementen für System- oder Softwaretests
Simulation externer Systeme	<ul style="list-style-type: none"> System/Softwareintegrations- und Verifizierungstests 	<ul style="list-style-type: none"> Simulation des FCC (Flight Control Computers) für Integrations- und Verifizierungstests

Abbildung 4: Aufgaben und Vorteile von Echtzeittests



Abbildung 5: Flugzeuge mit Moog-Aktorsystemen, die mit dSPACE getestet wurden.

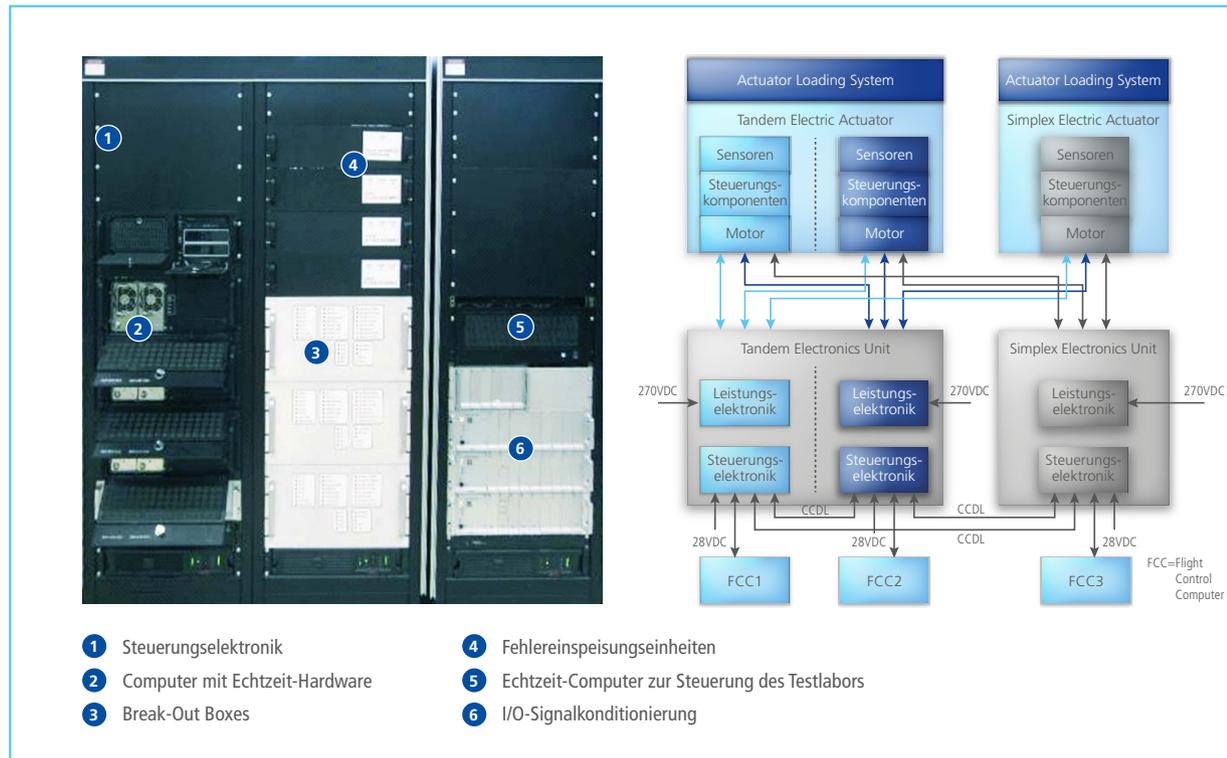


Abbildung 6: System-Software-Workstation für elektrische Aktorsysteme (links). Einsatz der Workstation für den Test eines dreifach redundanten, elektrischen Aktorsystems (rechts).

die auch für neue Anwendungen eingesetzt werden. dSPACE Echtzeittestsysteme kommen für Flugzeugprogramme wie V-22, F-117, B-2, X-35, F-35, A400M, KC-46, 787, A350 und auch für andere unbemannte Luftfahrzeuge, Business Jets und Verkehrsflugzeuge zum Einsatz.

Anwendungsbeispiele:

Im Folgenden finden sich drei Beispiele für Anwendungen, bei denen Moog dSPACE-basierte Echtzeittestsysteme für die Entwicklung komplexer Aktorsysteme eingesetzt hat.

1. System-Software-Workstation für elektrische Aktorsysteme

Das erste Testsystem (Abbildung 6) wird für den Test eines dreifach red-

undanten, elektrisch betriebenen Aktorsystems eingesetzt. Das Testsystem bietet Testmöglichkeiten für die Software-Verifikation sowie für Tests des integrierten Systems. Es dient als Hardware-in-the-Loop-Plattform für Software-Tests und ermöglicht Messung, Steuerung und Datenerfassung für integrierte Systemtests. Um die Software zu testen, können mit dem System Leistungselektronik und Aktoren des Triplex-Systems in Echtzeit simuliert werden. Das Testsystem enthält sieben DS1005 PPC Boards in einer Multiprozessor-Konfiguration, die über fünf Schaltschränke verteilt sind. Zur Hardware gehören zudem drei IEEE-1394-Busse mit Fehlereinspeisung und drei proprietäre CCDL-

Busse. Leistungsstarke Motormodelle werden mit mehr als 30 kHz ausgeführt und führen so Reaktionen in Echtzeit an die Motorsteuerungssoftware zurück. Dieses System hat ca. 780 I/O-Kanäle.

Die Simulatorfunktion wird für Software-Tests und für Systemtests mit schwer implementierbaren Fehlern eingesetzt. Durch die Automatisierung ist es möglich, diese Tests unbeaufsichtigt im Batch-Modus oder mit Fernüberwachung auszuführen. Anhand der Streckensimulation können die Software-Tests in einer aussagekräftigen Closed-Loop-Umgebung getestet werden. Die realitätsnahe Simulation mit Hilfe dieses Testsystems reduziert zudem die Zeit für die Fehlerbehebung im



Abbildung 7: Aktorprüfstände für den Test von Verkehrsflugzeugsteuerungen (links: Ruder-Aktor-Prüfstand; Mitte: HSTA-Prüfstand; rechts: Spoiler-Aktor-Prüfstand)

Labor. Der Einsatz einer automatisierten Software-Test-Umgebung verringerte die Zeit für die Software-Verifikation von 2 Wochen auf 2 Tage pro Systemkonfiguration.

2. System-Software-Workstation für Flugsteuerungssysteme von Verkehrsflugzeugen

Bei dem zweiten Beispiel (Abbildung 7 - 9) handelt es sich um ein Testsystem für ein Flugsteuerungssystem eines Verkehrsflugzeugs. Ähnlich der vorherigen Anwendung verfügt auch dieses Testsystem über eine Testplattform, um entweder das komplette, integrierte System zu testen oder nur die Software zu verifizieren. Damit ist es möglich, echte Komponenten in den Test zu integrieren oder einzelne

Komponenten sowie das gesamte System zu simulieren.

Außerdem bietet das System auch die Möglichkeit für reale Piloteneingaben. Diese können aber auch simuliert werden, beispielsweise um Tests wiederholt durchzuführen. Im Prüflabor findet sich eine Vielfalt von Aktor-Hardware mit den zugehörigen Prüfständen. Verschiedenste Aktorprüfstände sind mit dem Testsystem verbunden, das die Prüfstände steuert und überwacht.

Das Flugsteuerungssystem in dieser Anwendung enthält zudem die Steuerungen für die High-Lift-Klappen des Flugzeugs. Der High-Lift-Prüfstand besteht aus der Hardware einer Tragfläche. Die andere Tragfläche wird von einem Lastmotor und

Echtzeitsteuerungen simuliert.

Dadurch kann der benötigte Arbeitsplatz für den Testaufbau reduziert werden. Dieser Aufbau erlaubt den Test komplexer Fehlerszenarien, die mit echter Hardware nur schwer nachzustellen sind.

Dieses System besteht aus zwei dSPACE PX20 Expansion Boxes mit sieben DS1005 PPC Boards in einer Multiprozessor-Konfiguration, 16 TX/RX-Kanälen vom Typ ARINC 429, Relais zum Umschalten zwischen simulierter und realer Hardware sowie fast 400 I/O-Kanälen. Das System bietet zahlreiche Fehler-einspeisungsmöglichkeiten sowie die Fähigkeit, zahlreiche Prüfstände in der Testumgebung einzeln oder als System einzusetzen. Automati-

Abbildung 8: Pilotenplatz mit realitätsnahen Steuerungen und Flugsteuerungshardware (links); Hochauftriebsprüfstand für Verkehrsflugzeuge (rechts)



- 1 Mechanische Eingabe für Hub-Aktor
- 2 Rudder Feel Unit
- 3 Motor zur Simulation für eine Tragfläche



- 1 Motorsteuerung für Hochauftriebssimulation
- 2 Simulator-I/O-Konditionierung
- 3 dSPACE PX20 Expansion Boxes
- 4 Relaissteuerung
- 5 Lastkontrolle der Prüfstände
- 6 Fehlereinspeisungs-/Schalt-Relais
- 7 Simulator-Lasten
- 8 ARINC-Verbindung

Abbildung 9: Testsystem-Hardware für Steuersysteme von Verkehrsflugzeugen

sierte Testdurchläufe erlauben die formale Verifikation von Software- und Systemanforderungen. Diese repräsentative Closed-Loop-Umgebung stellt eine effiziente Entwicklungs- und Zertifizierungsplattform für das integrierte System und die eingebettete Software dar.

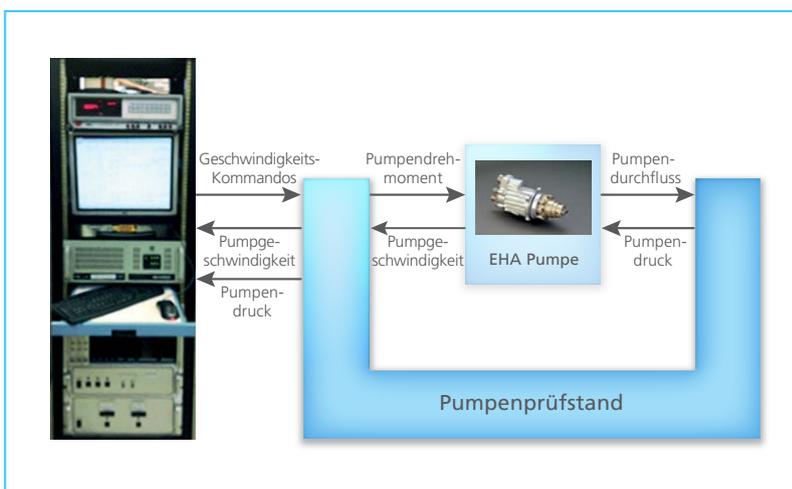
3. Virtueller elektrohydrostatischer Aktor (EHA) für den Pumpentest

Dieses System (Abbildung 10) bietet eine einzigartige Testmöglichkeit während der Entwicklung von Pumpen für Flugsteuerungs-EHAs. Aussetzbetrieb, Umkehrbewegungen und -lasten sowie hohe Beschleunigungen sind Beispiele für die speziellen Anforderungen, die Flugsteuerungs-EHAs an Hydraulikpumpen

stellen. Die Ableitung von Pumpenarbeitszyklen aus Aktorarbeitszyklen kann sehr unsicher sein. Zur Risikominimierung wurde daher für den Test einer neuen EHA-Pumpe ein virtueller EHA modelliert und in einem Testsystem für die Lebensdauer von Pumpen umgesetzt. Das System stellt realitätsnah dar, welchen Bedingungen die Pumpe im realen Betrieb im Aktor unterliegt. Der Einsatz von Echtzeittestsystemen mit virtuellem EHA beseitigt auch viele der pumpenspezifischen Unwägbarkeiten und liefert akkurate und aussagekräftige Testergebnisse. ■

David Cook,
Moog Aircraft Group

Abbildung 10: Testumgebung für elektrohydrostatische Pumpen



Zusammenfassung

Die Komplexität moderner Aktorsysteme hat durch die Integration von Elektronik und Aktor-Software enorm zugenommen. Der Trend in Richtung elektrisch betriebener Aktoren sorgt dafür, dass Motorsteuerungstechnologie essentiell für die Entwicklung moderner Aktorsysteme geworden ist. Diese Entwicklungen stellen eine zusätzliche Herausforderung für diejenigen dar, die moderne Aktorsysteme für Flugsteuerungen entwickeln. Auf dSPACE basierende Echtzeittestsysteme bieten beispiellose Testmöglichkeiten, die es Moog erlauben, die anspruchsvollen Testanforderungen zu bewältigen, die mit der Entwicklung moderner komplexer Aktorsysteme und Flugsteuerungssysteme einhergehen.

David Cook
David Cook ist Military Systems Engineering Manager bei Moog Aircraft Group in East Aurora, New York, USA.

