

## Schlussbericht

– öffentlich –

# BMWK-Verbundprojekt im Rahmen des Luftfahrt Forschungsprogramms (LuFo) VI-1

## – TOKIOS - dSPACE –

Test-Optimierung mittels KI-basierter  
Observer & Simulationen von dSPACE

im Verbundvorhaben TOKIOS



### Förderkennzeichen

20D1917C

### Laufzeit des Vorhabens

01. Juni 2021 – 31. August 2024

### Berichtszeitraum

01. Juni 2021 – 31. August 2024

### Zuwendungsempfänger

dSPACE GmbH, Rathenaustraße 26, 33102 Paderborn

Version 1.0, 12.02.2025

### Ansprechpartner:

Sören Reglitz

E-Mail: [SReglitz@dspace.de](mailto:SReglitz@dspace.de)

Tel.: +49 5251 1638-1720

Fax: +49 5251 16198-0

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzbeschreibung des Vorhabens.....</b>	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Voraussetzungen bei Projektdurchführung.....	3
1.3	Planung und Ablauf.....	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn.....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
<b>2</b>	<b>Ausführliche Darstellung (öffentlich).....</b>	<b>6</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	6
2.1.1	HAP 1 Methoden zur Verbesserung von In-Service Daten Analysen.....	6
2.1.2	HAP 2 Einsatz von KI im Flugzeug Systemtest und in Simulationen .....	7
2.1.3	HAP 3 Entwicklung von Test Methoden basierend auf operationellen Daten....	9
2.1.4	HAP 4 Demonstration und agiles Management.....	10
2.2	Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans .....	11
2.3	Fortschritte innerhalb der Projektlaufzeit bei anderen Stellen .....	11
2.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse .....	11
	<b>Fachliteratur .....</b>	<b>12</b>

# **1 Kurzbeschreibung des Vorhabens**

## **1.1 Aufgabenstellung**

Vorrangiges Ziel des Verbundvorhabens TOKIOS war es, innovative Methoden und Techniken wie Künstliche Intelligenz (KI) und Big Data Analysen in Integrations- und Systemtests von Flugzeugen zu implementieren. Die Test- und Validierungsphase stellt im Entwicklungsprozess einen kosten- und ressourcenintensiven Anteil dar und unterliegt somit einem ständigen Druck zur Reduzierung der Personal-, Sach- und Zeitaufwände, bei gleichbleibender, oder besser noch steigender Qualität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

Der bestehende und ständig wachsende Fundus an Daten aus dem operationellen Betrieb der AIRBUS-Flugzeuge eröffnet neue Möglichkeiten, die Definition und Durchführung von Testkampagnen mit entsprechenden Analysewerkzeugen, Optimierungsverfahren und Algorithmen näher an den realen Betriebsbedingungen des Produktes zu leisten.

Der Einsatz von „Big Data“-Analysetechniken sollte am Ende des Projektes als Standardwerkzeug zum Tagesgeschäft im Testbetrieb gehören und nicht mehr allein hochspezialisierten Analysten vorbehalten sein.

Außerdem sollten die vielfältigen Systemsimulationen, die während der Testphasen zum Einsatz kommen, mit Hilfe von KI-Verfahren soweit optimiert werden, dass ein zuverlässiges digitales Abbild des System entsteht, dass über den gesamten Lebenszyklus des Produktes parallel für weitere Analysen zu Verfügung steht, z.B. Wartungsvorhersagen, Untersuchung von Anomalien und Fehlverhalten.

Abgeleitet aus den operationellen Daten der fliegenden AIRBUS-Flotte sollten Pakete von Testprozeduren definiert werden, die entsprechend den Flugphasen verschiedene Betriebssituationen abbilden und auf unterschiedlichen Testeinrichtungen ausführbar sind. Dabei sollten sie nicht nur die realen Systemzustände enthalten, sondern gleichfalls auch die notwendigen „Observer“, um das Verhalten zu beobachten und zu analysieren.

Durch die beitragenden Partner in TOKIOS stand die notwendige Expertise zur Verfügung, um die oben formulierten Ziele adäquat zu adressieren. Die in LuFo V-1 STEVE und LuFo V-3 AGILE-VT begonnene Zusammenarbeit des FuT-Partnernetzwerks zum virtuellen und hybriden Testen wurde dabei in TOKIOS anteilig fortgeführt und in Deutschland erfolgreich weiter ausgebaut.

dSPACE hat sich im Rahmen des TOKIOS-Projektes an allen Hauptarbeitspaketen (HAP) beteiligt, wobei der inhaltliche Schwerpunkt auf HAP 3 (Entwicklung von Testmethoden basierend auf operationellen Daten) und HAP 4 (Demonstratoren und agiles Management) lag.

## **1.2 Voraussetzungen bei Projektdurchführung**

Das Projekt TOKIOS wurde im Rahmen des ersten Aufrufs für das sechste nationale zivile Luftfahrtforschungsprogramm des BMWK (LuFo VI-1) ausgewählt und gefördert, um zeit- und kostenintensiven Test- und Entwicklungsphasen durch bessere Verfahren zu optimieren, die für die sichere und passagierfreundliche Luftfahrt entscheidend sind. Sie sind ein Schlüsselfaktor, um den steigenden Anforderungen an Luftverkehrssysteme zu begegnen und zu einer sicheren, leistungsfähigen und effizienten Luftfahrt beizutragen.

Darüber hinaus spiegelte sich das Potenzial der Kooperationspartner in einem ausgewogenen Verhältnis aller Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette wider (Flugzeughersteller ► Industriepartner ► KMU ► Universität) und wurde zu Projektende in einem aussagekräftigen Demonstrator unter Beweis gestellt. Dadurch konnte auch ein optimaler Technologietransfer sichergestellt werden, der eine zügige Ergebnisverwertung gewährleistet.

### **1.3 Planung und Ablauf**

Gegenüber der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung haben sich in TOKIOS Änderungen hinsichtlich Unterbeauftragungen durch die Projektpartner ergeben. Die Aktivitäten von dSPACE blieben durch die geplanten Unterbeauftragungen jedoch unberührt.

In TOKIOS wurde der bereits in den Vorgängerprojekten entwickelte Ablauf in 5 Schritten als Grundlage für die Projektausführung verwendet. Der Funktionsumfang wurde jeweils erweitert, neue Funktionen und Mechanismen implementiert.

Die Zeit- und Meilensteinplanung hat sich dabei gegenüber der Darstellung in der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung um 5 Monate verschoben. Dies lag darin begründet, dass TOKIOS nicht wie geplant zum 01.01.2021, sondern erst zum 01.06.2021 bewilligt wurde. Das Projektende erfolgte nach neuer Planung zum 31.08.2024.

### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn**

Im Hinblick auf die Automatisierung von Tests wurden im Vorgängerprojekt LuFo V-3 AGILE-VT bereits einige Bausteine entwickelt, die als Grundlage für TOKIOS dienen. Beispielsweise wurde ein portierbarer sprach- und plattformunabhängiger Standard Namens TA-SCXML definiert, mittels dessen Tests und Observer beschrieben werden konnten. Außerdem wurde das Observer-Konzept dahingehend weiterentwickelt, mehrere Observer in Echtzeitumgebungen gleichzeitig einzusetzen, um eine große Anzahl von Systemanforderungen simultan überwachen zu können.

Während der Labor- und Flugtests in der Entwicklungsphase eines Flugzeugs fielen und fallen bereits sehr große Datenmengen an. Zusätzlich kamen, dank neuer Erfassungssysteme, um ein Vielfaches größere Datenmengen aus dem Betrieb der Airlines hinzu. Diese Daten wurden zu Projektstart bereits ausgewertet, allerdings vorrangig zur Untersuchung einzelner Ereignisse. Eine massenhafte und systematische Analyse fand kaum statt und war nur von spezialisierten Datenanalysten mit tiefgehenden Programmierkenntnissen zusammen mit den Systemspezialisten durchführbar. Eine breite, quasi routinemäßige, Anwendung von „Big Data“-Techniken war nicht gegeben. Die vorhandenen Tools ermöglichten dem Testingenieur – nach eingehender Schulung – nur einzelne Analysen mit simplen Analysefunktionen.

Simulationen nahmen und nehmen eine Schlüsselrolle im gesamten V&V Prozess ein, nicht nur während der Entwicklungsphase neuer Flugzeuge, sondern auch durch deren kontinuierliche Weiterentwicklung während des gesamten Lebenszyklus. Ihr Einsatz im Integrationstest ist vielfältig: Zum einen um die Anzahl kostspieliger Originalteile zu reduzieren, oder aber die Eingänge des zu testenden Systems zu stimulieren, den Zugriff auf interne Parameter zu erleichtern, oder auch um die Testumgebung, z.B. durch physikalische Modelle, zu komplettieren. In einem vollständigen virtuellen Test ersetzen sie obendrein den Prüfling selbst. Die Anzahl der eingesetzten und interagierenden Simulationen kann in einer komplexen Testkampagne leicht bei 50-100 liegen, die Anzahl der Parameter bei mehreren 100.000. Die Qualität

der Testergebnisse hängt dabei entscheidend von der Repräsentativität dieser Simulationen ab.

Die Qualität der Simulationen variiert über einen großen Bereich, von einfachen linearen Modellansätzen bis hin zu nichtlinearen, dynamischen Modellansätzen, mittels derer komplexe physikalische Gegebenheiten modelliert werden. Die Evolution dieser Simulationen über einen längeren Zeitraum, wie z.B. den Lebenszyklus eines Flugzeuges, ist eher langsam. Updates werden nur dann vorgenommen, wenn sich das simulierte System selbst ändert. Eine Anpassung an das reale Verhalten der modellierten Komponente, z.B. um Alterungs- und Verschleißvorgänge abzubilden, findet nicht statt.

Moderne Passagierflugzeuge verfügen über eine Vielzahl von Datenerfassungssystemen. Nahezu alle Simulationen der Systeme werden während eines Flugs aufgezeichnet und an Bord gespeichert. Dementsprechend reflektieren diese Daten sämtliche Aktivitäten und dazugehörige Systemantworten des Flugzeugs. Sie werden dann später auf einen Datenspeicher am Boden übertragen und stehen somit für weitergehende Analysen zu Verfügung. Dies können z.B. gezielte technische Untersuchungen, statistische Auswertungen oder auch, mit Hilfe von Big Data Analysemethoden, das Aufspüren bisher unbekannter physikalischer oder logischer Abhängigkeiten im Systemverhalten sein. Diese Daten, generiert aus tausenden von kommerziellen Flügen, könnten ebenfalls genutzt werden, um tiefergehende systematische Erkenntnisse über das Betriebsverhalten der Systeme zu erlangen und daraus Rückschlüsse auf optimierte Testszenarien zu ziehen. Die hierzu notwendigen Methoden und Algorithmen existieren bei Projektstart noch nicht.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

dSPACE hat im Berichtszeitraum ausschließlich an regelmäßigen wöchentlichen Meetings mit den Partnern im Verbundprojekt teilgenommen. Für Abstimmungen zwischen den Projektpartnern, die über den Rahmen der Meetings im Gesamtverbund hinausgingen, wurden zusätzliche Meetings und Workshops zu den jeweiligen Schwerpunktthemen organisiert. Darüber hinaus hat keine Zusammenarbeit mit weiteren Stellen stattgefunden.

## **2 Ausführliche Darstellung (öffentlich)**

Die nachfolgende Beschreibung gibt einen Überblick über die von dSPACE im Rahmen von TOKIOS geleisteten Arbeiten. Eine detailliertere Darstellung wurde dem Projektträger in der vertraulichen Version des Schlussberichts vorgelegt. Alle weiteren zur Veröffentlichung freigegebenen Informationen sind Kapitel 2.4 zu entnehmen.

### **2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse**

Ziel von dSPACE in TOKIOS war die Integration von Methoden und Techniken aus der „Big Data“-Analyse und der künstlichen Intelligenz in Werkzeugen für Integrations- und Systemtests von Flugzeugen, bspw. mit der Übertragung von im LuFo-Projekt AGILE-VT entwickelten Observern und ihrer Beschreibungssprache auf die Analyse von Big Data. Das Ziel bestand darin, Durchgängigkeit zwischen der Analyse echter Flugdaten und den Tests für Verifikation und Validierung (V&V) zu erreichen. In einem zweiten Schritt wurden Methoden der künstlichen Intelligenz für selbstlernende Simulationen basierend auf Echtdateen angewendet, Methoden für die Testerstellung und -durchführung aus Echtdateen auf ihre Gültigkeit untersucht und neue Methoden zur Gruppierung von Testszenarien entwickelt.

Um das Projektziel erreichen zu können, wurde ein tiefgehendes Verständnis von den Anforderungen der Luftfahrtindustrie in den Bereichen Testen, virtualisiertes Testen und Testautomatisierung benötigt. Es musste sichergestellt werden können, dass diese Anforderungen mit den im Rahmen des Projektes entwickelten Konzepten abgedeckt werden können. Diese Voraussetzungen waren nur dadurch gegeben, dass unter der Konsortialführung von Airbus als Flugzeughersteller die verschiedenen Projektpartner in ihren Rollen als Systemlieferant und Testsystemhersteller ihr Know-how im Rahmen eines Forschungsförderprojektes bereitstellen und partnerschaftlich zusammenarbeiten konnten. Dies galt insbesondere, weil die Ziele von TOKIOS auf der einen Seite Echtdateen des Flugzeugherstellers und auf der anderen Seite Expertise zur Daten Analyse, künstlichen Intelligenz, virtuellen Validierung und Testgenerierung erforderten. Die Ziele von TOKIOS konnten daher nur durch das Einbringen des Know-Hows aller Partner gemeinsam erreicht werden.

Nachfolgend werden die inhaltlichen Schwerpunkte und Ergebnisse der Arbeiten von dSPACE in den Hauptarbeitspaketen dargestellt, die gleichzeitig die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises repräsentieren.

#### **2.1.1 HAP 1 Methoden zur Verbesserung von In-Service Daten Analysen**

In Hauptarbeitspaket 1 (HAP1) erarbeiteten die Partner einen sogenannten „Zugang zu Big Data für Jedermann“. Kernstück war die Erweiterung existierender Observer-Ansätze (siehe Vorgängerprojekt AGILE-VT, HAP ViTA) um zwei wesentliche, neue Aspekte: Die Anwendbarkeit auf (1) große Mengen von (2) Offline-Daten. In diesem Zusammenhang erfolgte in Zusammenarbeit mit den Partnern eine Definition und Entwicklung von Methoden zur fortgeschrittenen (offline) Datenanalyse (z.B. „Advanced Trigger“-Analysen in Form von komplexen und verketteten Trigger-Bedingungen). Ziel war es, verschaltete Ketten von Analyseschritten über ein graphisches Interface intuitiv und dynamisch definieren zu können und auf große Mengen von Testdaten eines breiten Spektrums anwenden zu können. Wesentliche Aspekte waren dabei die Sicherstellung der Interoperabilität der beteiligten Komponenten sowie eine Generalisierung der Methoden dahingehend, dass durch Parametrierbarkeit und eine generische Beschreibung eine möglichst universelle Einsetzbarkeit hinsichtlich verschiedener Flugzeugsysteme und Programme erreicht wird.

Das Hauptarbeitspaket 1 in TOKIOS war in drei Arbeitspakete gegliedert:

1. AP1100 Anpassung von Beobachtern für die Offline Big-Data Anwendung
2. AP1200 Entwicklung eines Katalogs vorgefertigter Funktionen zur Flugzeug Datenanalyse
3. AP1300 Grafische virtuelle Messinstrumente zur Big-Data Analyse

Im Hauptarbeitspaket 1 beteiligte sich dSPACE ausschließlich an AP1100, was nachfolgend beschrieben wird.

#### **2.1.1.1 AP 1.1 Anpassung von Beobachten für die Offline Big-Data Anwendung**

Das Ziel der Partner im Projektverbund für Arbeitspaket AP1100 war die Anpassung der im Vorgängerprojekt AGILE-VT ViTA standardisierten Beobachter in TA (Test Automation) SCXML (vormals Generic SCXML) für die Nutzung in „Offline Big Data“-Anwendungen. Hierfür wurde im ersten Schritt der Stand der Technik zur Datenspeicherung von großen Daten sowie zu deren Fileformaten vom Partner BIBA ermittelt.

dSPACE stellte den Partnern im Berichtszeitraum die gängigen Standards der Automobilbranche in diesem Bereich vor. Zu erwähnen sind in diesem Kontext das im ASAM-Standard entwickelten MDF4-Format [1] und das CSV-Format zur Messdatenspeicherung. Das MDF4-Format ist im ASAM-Gremium entwickelt worden, um Daten schnell und in großen Mengen zu speichern. Das Anwendungsgebiet besteht unter anderem in der Datenaufzeichnung von Sensor- und Kameradaten im Fahrzeug während Testfahrten auf realen Strecken. In solchen Szenarien fallen mehrere Terabyte an Daten an, weshalb die hierfür verwendeten Datenformate für eine weitere Evaluierung in TOKIOS hervorragend geeignet waren. Die Verwendung dieser Datenformate hat dem Projekt eine zusätzliche Relevanz und eine erhöhte, domänenübergreifende Reichweite in der Industrie ermöglicht. Des Weiteren hat dSPACE durch Recherchearbeiten eine Bibliothek zum Lesen von MDF4-Dateien ermittelt und dem BIBA zur Verfügung gestellt, um ein systematisches und automatisiertes Einlesen in die BIBA-Datenbank zu ermöglichen.

Das BIBA entwickelte auf dieser Basis ein „Framework for Process Automation“ (später TOKIOS Flow Manager). Für die Erweiterung des Frameworks in Hinsicht auf die Ausführung von Modellen oder Testfällen haben das BIBA und dSPACE beschlossen, eine generische Schnittstelle zu entwickeln. Diese Schnittstelle ermöglicht eine Anbindung und Ausführung von Testfällen auf den zugehörigen Simulationsumgebungen. Die Schnittstelle wurde innerhalb des Berichtszeitraumes definiert. Für die Testfälle wurden die Strukturen und Konzepte aus AGILE-VT ViTA verwendet.

#### **2.1.2 HAP 2 Einsatz von KI im Flugzeug Systemtest und in Simulationen**

Das Projektziel in HAP2 war der Einsatz von KI-basierten Methoden zur Kalibrierung von physikbasierten Modellen zu untersuchen. Bislang erfolgte die Anpassung unzureichend bekannter Parameter eines physikbasierten Modells zur Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Modell und Realität überwiegend manuell. Der Einsatz von KI-basierten Methoden zur Parameteroptimierung sollte den Prozess verbessern, um in kürzerer Zeit und mit weniger personellem Aufwand eine bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Realität zu erreichen. Die generierten Modelle sollten als digitale Abbilder realer Flugzeugsysteme eingesetzt werden. Für ein bestimmtes betrachtetes System sollte dabei für jedes Flugzeug ein entsprechendes eigenes Modell zur Verfügung stehen. Neben einer Simulation und Betrachtung des

nominalen Verhaltens des Flugzeugsystems (1) wurden das Fehlverhalten (2) und das Degradationsverhalten (3) modelliert und simuliert. Dadurch wurde es ermöglicht, bei beobachteten Systemfehlern eines Flugzeugs der Flotte die Ursache des Fehlverhaltens zu ermitteln. Ein weiterer Aspekt im HAP2 war die Untersuchung von Modellen oder Teilmodellen, die direkt auf Basis gemessener, operationeller Daten mittels KI-basierter Methoden erstellt wurden. Die Fähigkeiten und Beschränkungen dieser selbstlernenden Modelle wurden ermittelt und untersucht. Es wurde überprüft, inwieweit sich ein hybrider Betrieb von KI- bzw. datenbasierten Modellen mit physikbasierten Modellen zur Abbildung der relevanten Systemeigenschaften eignet.

Das Hauptarbeitspaket 2 in TOKIOS war in drei Arbeitspakete gegliedert:

1. AP2100 Optimierung von Simulationsparametern mittels KI-Methoden
2. AP2200 Digitaler Zwilling zur Maschinen- und Systemanalyse und Verhaltensprognose
3. AP2300 Methoden zur Entwicklung von selbstlernenden, KI unterstützten Simulationen

Im Hauptarbeitspaket 2 beteiligte sich dSPACE an allen Arbeitspaketen, die nachfolgend beschrieben werden.

#### ***2.1.2.1 AP 2.1 Optimierung von Simulationsparametern mittels KI-Methoden***

Das Ziel des Arbeitspakets war die Untersuchung von KI-basierten Methoden zur Kalibrierung von im Test eingesetzten Simulationsparametern in physikbasierten Modellen zur Verbesserung der Repräsentativität auf Basis echter Flugdaten. Zur Erreichung dieses Ziels wurde von den Partnern eine Recherche zur Identifizierung geeigneter KI-Methoden durchgeführt. Die Recherche führte dazu, dass der Partner BIBA einige Optimierungsalgorithmen im Flow Manager, der im Rahmen von TOKIOS entwickelt wurde, integrieren konnte.

#### ***2.1.2.2 AP 2.2 Digitaler Zwilling zur Maschinen- und Systemanalyse und Verhaltensprognose***

Das Ziel des Arbeitspakets war es, Methoden und Strategien für die Erstellung digitaler Abbilder realer Flugzeugsysteme zu spezifizieren. Hierfür wurde im Projektzeitraum mit den Partnern besprochen, wie ein Digital Twin aussehen kann und welche Form eines Digital Twin im Projekt erreicht werden soll.

Der Partner Airbus hat im Berichtszeitraum mehrere Use Cases bereitgestellt, die durch die Partner evaluiert wurden. Letztendlich ist der Liquid Cooling System (LCS) Use Case von den Partnern als komplex genug für die Zwecke von TOKOS bewertet worden. Die Beschreibung des LCS Use Cases erfolgt in Abschnitt 2.1.4.1. dSPACE hat für das LCS-Modell relevante Anforderungen zur Ausführung auf SIL- und HIL-Umgebungen formuliert. Mit diesen Anforderungen wurde sichergestellt, dass ein möglichst reales Testszenario für den LCS Use Case gegeben ist, welches gleichzeitig eine durchgängige Verwendung sowohl in SIL- als auch HIL-Plattformen zu Demonstrationszwecken ermöglicht.

#### ***2.1.2.3 AP 2.3 Methoden zur Entwicklung von selbstlernenden KI unterstützten Simulationen***

Das Ziel dieses Arbeitspaketes für dSPACE war eine Untersuchung von Modellen oder Teilmodellen, die direkt auf Basis gemessener, operationeller Daten mittels KI-basierter Methoden erstellt worden sind, und deren Kompatibilität mit bestehenden dSPACE Plattformen. Hierfür

hat die Technische Universität Hamburg in Kooperation mit dSPACE untersucht, wie sich ein KI-basiertes Modell in einem „simulation in the loop“-Fall verhält und mit welchen Mitteln ein KI-Modell von der Entwicklungssprache in eine Simulationssoftware übersetzt werden kann.

Es konnte nachgewiesen werden, dass falls ein datengetriebenes KI-Modell in einem MATLAB Simulink Modell integriert ist, dieses mit vorhandenen Tools interpretiert und ausgeführt werden kann. Mit dieser Erkenntnis konnte der LCS Use Case in einem hybriden Ansatz entwickelt werden. Der hybride Anteil entspricht der Kopplung eines KI-Anteils (Ventil) und eines physikalischen Modells (LCS). Weitere Ausführungen zum LCS Use Case werden in 2.1.4.1 erläutert.

### **2.1.3 HAP 3 Entwicklung von Test Methoden basierend auf operationellen Daten**

In HAP3 erfolgte die Ableitung von Testfällen aus In-Service Daten der fliegenden Flotte sowie von zugehörigen Paketen von Testfällen und Beobachtern. Diese Testprozeduren bauten auf den Erkenntnissen aus Vorgängerprojekten auf (LuFo V-1 STEVE und LuFo V-3 AGILE-VT) und zeichneten sich durch einen modularen Aufbau aus. Das heißt, dass sie einerseits Informationen zur Testdurchführung inklusive der System-Stimuli beinhalteten, andererseits aber auch die notwendigen Beobachter zur Testauswertung bzw. zur Bewertung eines Testergebnisses. Sowohl zur Ableitung von Testfällen als auch zur Generierung der zugehörigen Test- und Beobachtergruppen kamen dabei die im HAP1 entwickelten Methoden zum Einsatz.

Das Ziel der Test- und Beobachtergruppen war es, eine zusammenhängende Teststruktur aufzubauen, die zwischen Abteilungen und Zulieferern gleichermaßen geteilt und verstanden werden kann. Damit sollte erreicht werden, dass in der letzten Integrationstestphase weniger Fehler auftreten, die dann aufwändige Maßnahmen in anderen Abteilungen oder bei Zulieferern zur Folge haben.

Das Hauptarbeitspaket 3 in TOKIOS war in zwei Arbeitspakete gegliedert:

1. AP3100 Ableitung von Testfällen aus In-Service Daten der fliegenden Flotte
2. AP3200 Definition von Test- und Beobachtergruppen basierend auf operationellen Daten

Im Hauptarbeitspaket 3 beteiligte sich dSPACE an allen Hauptarbeitspaketen, dieses wird nachfolgend beschrieben.

#### ***2.1.3.1 AP 3.1 Ableitung von Testfällen aus In-Service Daten der fliegenden Flotte***

Das Ziel in diesem Arbeitspaket war die Entwicklung von Testmethoden basierend auf operationellen Daten aus echten Flugdaten unter realen Betriebsbedingungen. Hier wollte dSPACE das Know-how zur automatisierten Erzeugung von Testfällen aus realen Messdaten aus dem automotiven Kontext mit einbringen und auf die komplexe Ebene der Luftfahrt anzuwenden. Dabei sollte das Wissen aus dem LuFo-Projekt AGILE-VT ViTA weiter genutzt werden.

Im ersten Schritt wurde ein gemeinsames Konzept entwickelt. Die Definition der einzelnen Schnittpunkte erfolgte im Laufe des Projektes, inklusive der detaillierten Schnittstelle zu AP3200. Nach dem Schritt der Selektierung wurden Test Cases und Observer generiert. Diese wurden in AP3200 genutzt, um einen Gruppierungsalgorithmus zu testen. Hierfür wurden folgende grundlegende Fragen geklärt:

- Welches Format wird für die Test Cases und Observer genutzt?
- Wie soll eine Gruppierung aussehen?
- Welche Bedienmöglichkeiten soll die Schnittstelle bieten bzw. wie soll die Selektierung im Detail aussehen?
- Soll es ein programmiertechnisches Interface geben, um eine Selektierung zu triggern?

Diese Fragen wurden mit der Einführung des Konzepts zur Gruppenbildung in das Projekt weitestgehend geklärt. Das Konzept zum Grouping wird in 2.1.3.2 beschrieben.

### **2.1.3.2 AP 3.2 Definition von Test- und Beobachtergruppen basierend auf operationellen Daten**

Das Ziel des Arbeitspaketes 3200 war die Erstellung von Test Cases und Observer-Gruppen. Insbesondere für AP3200 war eine engere Zusammenarbeit mit Airbus zur Validierung der Konzepte notwendig, da diese auf das gelebte Testverhalten angepasst werden sollten.

Eine Gruppierung von Test Cases oder Observern kann in unterschiedlicher Weise erfolgen. Um eine eindeutige Gruppierung zu erzeugen, muss in einem ersten Schritt geklärt werden, mit welchem Ziel gruppiert werden soll. Das von dSPACE entwickelte Konzept wurde von allen Partnern als sinnvoll eingestuft. Die im Vorgängerprojekt entwickelte Test Automation Suite ermöglicht es nach spezifischen Attributen zu suchen, die über das vorgeschlagene Konzept definiert wurden, und diese als Paket bereitzustellen. Dieses Paket enthält die Test Cases in einem generischen Format und lässt sich daher leicht an Dritte weitergeben.

## **2.1.4 HAP 4 Demonstration und agiles Management**

dSPACE hat zusammen mit anderen Projektpartnern in TOKIOS einen Demonstrator aufgebaut. In HAP4 wird der Ablauf und die Ergebnisse der geplanten Demonstratoren beschrieben und vorgestellt. Zur Vorbereitung auf die Demonstratoren hat dSPACE auf Basis der Entwicklungen in AGILE-VT wie in der Vorhabensbeschreibung geplant den Demonstrator konzeptuell weiterentwickelt, um vorhandene Technologien im Rahmen von TOKIOS nutzen zu können.

### **2.1.4.1 AP 4.1 Demonstration**

Für die Entwicklung eines Demonstrators war die Definition eines projektweiten Use Cases notwendig. Nach Bewertung unterschiedlicher Use Cases wurde letztendlich der Liquid Cooling System (LCS) Use Case für eine Brennstoffzelle ausgewählt. Für das TOKIOS Projekt wurden vereinfachende Annahmen getroffen, um die Komplexität auf ein handhabbares Niveau zu reduzieren. Für den Use Case konnten Daten aus der Prototypenentwicklung anteilig auch in TOKIOS verwendet werden. Nach eingehender Evaluierung wurde von den Partnern beschlossen, den LCS Use Case für Demonstrationszwecke zu nutzen. dSPACE legte in diesem Use Case den Fokus auf die Ausführung eines hybriden Modells, d.h. eine Zusammensetzung aus Standard-Simulationsmodell und einem KI-Modell. Für sinnvolle Nutzung des Modells im Projekt waren zudem Test Cases notwendig, die von dSPACE in TA-SCXML entworfen wurden. Parallel zum LCS Use Case hat dSPACE mit dem Partner TUHH an einem weiteren Use Case gearbeitet. Der ULTRA (Unmanned Low-Cost Testing Research Aircraft) Use Case beinhaltet Entwicklungen an einem unbemannten Modellflugzeug durch die TUHH. Mit dem LCS und dem ULTRA Use Case konnten die Konzepte der Partner in unterschiedlicher Weise getestet und ihre Eignung nachgewiesen werden.

#### **2.1.4.2 AP 4.2 Agiles Management**

Im Projekt wurde agiles Management gelebt. Dies hat sich in Form von unterschiedlichen technischen Workshops gezeigt. In diesen Workshops wurden unter anderem die Architektur der zu entwickelnden Lösungen von den Partnern gemeinsam besprochen. Durch die agile Arbeitsweise konnte sich die Architektur über den Projektzeitraum den gegebenen Herausforderungen anpassen. Im letzten technischen Workshop wurden die finalen Deliverables der einzelnen Partner festgelegt und der zeitliche Rahmen festgelegt.

## **2.2 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans**

Im Anschluss an die Projektlaufzeit wurden von dSPACE verschiedene Patentanmeldungen auf Basis der in TOKIOS ausgeführten Arbeiten eingereicht. dSPACE plant darüber hinaus zu evaluieren, inwieweit die erarbeiteten Konzepte, Erweiterungen und ggf. erteilten Patente in die Produktentwicklung einfließen können. Beispielweise soll geprüft werden, in welcher Form die im TOKIOS Projekt entwickelten Ergebnisse in die dSPACE-Testwerkzeuge wie HIL-Simulatoren und Testausführungssoftware integriert werden können. Es ist davon auszugehen, dass die im Projekt entwickelten Erweiterungen in Produkte von dSPACE integriert werden, um sie entweder als Commercial-Off-the-Shelf-Produkte und/oder als Bestandteile von kundenspezifischen Lösungen anbieten zu können. Nach derzeitigem Kenntnisstand können erste Versionen kurzfristig (nach 1 bis 2 Jahren) nach Beginn der Produktentwicklung in Pilotprojekten genutzt werden und mittelfristig (nach 3 bis 5 Jahren) auf Produktniveau verfügbar sein. Auf Basis dieser Erweiterungen wird erwartet, dass dSPACE seine Position und seinen Umsatz im Markt für Testsysteme (Hardware, Software und Dienstleistungen) für die Luftfahrtindustrie ausbauen kann, zunächst vor allem in Deutschland, später in Europa und USA.

Die neuen bzw. verbesserten Produkte werden weiterhin in Deutschland am Firmensitz in Paderborn entwickelt und produziert. Dort erfolgt die Software- und Hardware-Entwicklung der dSPACE Werkzeuge und der weit überwiegende Teil der Fertigung der HIL-Simulatoren. Es ist also nach wie vor davon auszugehen, dass durch die erwarteten Projektergebnisse vor allem in Deutschland Arbeitsplätze geschaffen bzw. gesichert werden. Weiterhin wird auch die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie insgesamt gestärkt, da ihr durch den Know-How-Aufbau im Bereich Wissenschaft und Werkzeugentwicklung kompetente Ansprechpartner zur Anwendung der neuen Konzepte zur Verfügung stehen.

## **2.3 Fortschritte innerhalb der Projektlaufzeit bei anderen Stellen**

Innerhalb der Projektlaufzeit von TOKIOS wurden keine Ergebnisse Dritter bekannt, die die Problemstellung in ähnlichem Umfang und mit demselben Anspruch an einen breiten industriellen Einsatz mit geeigneten Methoden adressieren.

## **2.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse**

Während der Projektlaufzeit von TOKIOS wurden von dSPACE folgende wissenschaftliche Veröffentlichungen eingereicht:

1. Krause, S., Reglitz, S., Hillig, D., Thielecke, F., Franke, M., "Identification of Critical Test Scenario Groups for Aircraft Functions Based on Operational Design Domains", Orlando, FL, USA: AIAA SciTech Forum and Exhibition, 2025.

## **Fachliteratur**

Im Berichtszeitraum wurde folgende Fachliteratur verwendet:

- [1] ASAM, *Measurement Data Format*, Version 4.2.0, 2019.
- [2] D. Hillig und F. Thielecke, „Approach to Systematic Test Signal Definition for Operation Scenarios of Aircraft Systems,“ in *Workshop on Avionics Systems and Software Engineering (AVIOSE'20)*, Innsbruck, 2020.