

# VIRTUELLES TESTEN FÜR HOCHAUFTRIEBSSYSTEME

T. Ulmer,  
Airbus Operations GmbH, Airbus Allee 1, 28199 Bremen, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Verbesserung des Verifikations- und Zulassungsprozesses von Hochauftriebssystemen durch die Einführung von virtuellem Testen ist einer der Ansätze, den Herausforderungen beim Test zukünftiger Flugzeuge zu begegnen – Herausforderungen die sich durch die Notwendigkeit einer steigenden Zahl von Tests an komplexeren Systemen bei gleichzeitiger Verkürzung des Entwicklungs- und Testzeitraumes ergeben. Die Sicherstellung der Qualität der verwendeten Modellierungsansätze sowie die komplette Verfolgbarkeit des Simulations-Lifecycle während der Entwicklung des Flugzeuges sind dabei unerlässlich.

Der Vortrag zeigt, wie existierende Prozesse zum Management aller testrelevanten Daten erweitert werden müssen, um die speziellen Anforderungen bei der Anwendung von Mehrkörpersimulation zu Testzwecken zu erfüllen. Auf Basis eines Demonstrators haben MSC Software und Airbus basierend auf der Software SimManager das sogenannte High Lift Virtual Test Portal entwickelt.

Dieses Portal muss einerseits globale und allgemeine Anforderungen wie Datenmanagement, Daten-Verfolgbarkeit und Workflowmanagement erfüllen. Andererseits ergeben sich aus dem Kontext der High Lift Test Abteilung spezielle Anforderungen. Dies betrifft in erster Linie die Anbindung an das existierende, abteilungsweite Test Management System (TMS). Hierbei müssen zunächst relevante Testprozeduren vom TMS importiert werden können. Nach der Ausführung dieser Testprozeduren über entsprechende Simulationen in MSC.Adams und der Auswertung der Simulationsergebnisse müssen die Auswerteergebnisse wiederum an das TMS zurückgeführt werden.

Gegenwärtig durchgeführte Verbesserungen und Erweiterungen sind beispielsweise die Schaffung einer Möglichkeit zur effizienten Durchführung von sogenannten Multi-Runs, d.h. mehrfach Simulationen zur Ermittlung von Parameterabhängigkeiten oder Design of Experiment Studien.

Darüber hinaus wird das Portal um Funktionen erweitert, die neben der Verfolgung der Durchführung von Tests auch den Aufbau von Modellen steuert und verfolgt.

## 1. EINLEITUNG

Mehr Tests von komplexeren Systemen mit einfacheren Prüfständen in weniger Zeit - Diese Vorgaben stellen eine Herausforderung dar, die sich mit klassischem Test auf physikalischen Prüfständen alleine nicht bewältigen lässt. Airbus begegnet dieser Herausforderung mit einem kombinierten Ansatz aus physikalischem Test sowie virtuellen Tests in Form von Computersimulationen auf Basis von physikalischen Modellen.

### 1.1. Kontext

Die Hochauftriebshilfen eines Flugzeugs dienen zur Veränderung der Flügelgeometrie und damit zur Anpassung der aerodynamischen Eigenschaften an Anforderungen in den Flugphasen Start und Landung. Durch Ausfahren von Landeklappen (Flaps) zur Erhöhung der Flügelfläche und der Wölbung der Flügel sowie durch Ausfahren von Vorflügeln (Slats) werden sowohl der Auftriebsbeiwert als auch der maximal mögliche Anstellwinkel erhöht, was den Flug bei niedrigeren Geschwindigkeiten ermöglicht.

Das Hochauftriebssystem umfasst den Flaps Lever im Cockpit zur Vorwahl einer Position von Landeklappen und Vorflügeln, die Command Sensing Unit (CSU) zur Wandlung der Position des Flaps Levers in ein elektrisches Signal, die Steuercomputer (Slat Flap Control Computer, SFCC), die zentrale Antriebseinheit (Power Control Unit, PCU), die Transmission zur Übertragung der Rotation der PCU an die Stellglieder (Actuators) von Landeklappen und Vorflügeln sowie Sensoren zur

Positionsermittlung.

Die Entwicklung der High Lift Systeme aller Flugzeugtypen von Airbus erfolgt auf Basis eines Katalogs von Systemanforderungen (Requirements Based Engineering). Im Zuge der behördlichen Zulassung eines neuen Flugzeugmusters ist der Nachweis zu erbringen, dass das System alle dieser Anforderungen erfüllt. Dieser Nachweis umfasst neben der Vorbereitung und Durchführung entsprechender Tests auch die Erstellung der zugehörigen Dokumentation.



BILD 1. High Lift Systemprüfstand A380

Um im Rahmen einer Testkampagne den sicheren, fehlerfreien und robusten Betrieb über die gesamte Lebensdauer des Systems unter allen Betriebs- und Umgebungsbedingungen zu garantieren, ist eine

bedeutende Anzahl an Tests notwendig. Typischerweise werden diese Tests auf Systemlevel auf physikalischen Prüfständen (siehe beispielsweise BILD 1) durchgeführt. Auf diesen Prüfständen sind alle relevanten Systemkomponenten (siehe oben) integriert.

Aufgrund der gegensätzlichen Trends von ansteigender Systemkomplexität einerseits und reduzierten Entwicklungs- und Testzeiten andererseits sowie dem Wunsch, Prüfstände eher einfacher als komplexer auszuführen, ergibt sich die Notwendigkeit, zusätzlich zum klassischen Prüfstandsversuch alternative Testmethoden einzurichten. Als eine dieser möglichen Alternativen hat sich in den letzten Jahren das virtuelle Testen etabliert. Für Hochauftriebssysteme ist der bevorzugte Ansatz für das virtuelle Testen der Einsatz von Mehrkörper Simulationsmodellen.

### 1.2. Historie

Die Abteilung High Lift Test sammelt bereits seit 2002 Erfahrungen auf dem Gebiet der Mehrkörper Simulation zu Testzwecken, zunächst im Rahmen von Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hamburg Harburg [1] und mit verschiedenen Partnern im EU Projekt VIVACE [3]. BILD 2 zeigt, dass die Aktivitäten seither kontinuierlich ausgebaut wurden. Zwischenzeitlich erfolgte der Einsatz beispielsweise im Rahmen der Testkampagne von A400M zur Risikominimierung, wobei kritische Versagenstests vor der Ausführung auf dem Prüfstand durch Simulation abgeschätzt wurden und somit eine Beschädigung des Prüfstandes ausgeschlossen werden konnte. Im Rahmen der Testkampagne zu A350 tritt der virtuelle Test erstmals in der V&V Matrix neben den klassischen Testwerkzeugen auf und trägt zur Systemzertifizierung bei.

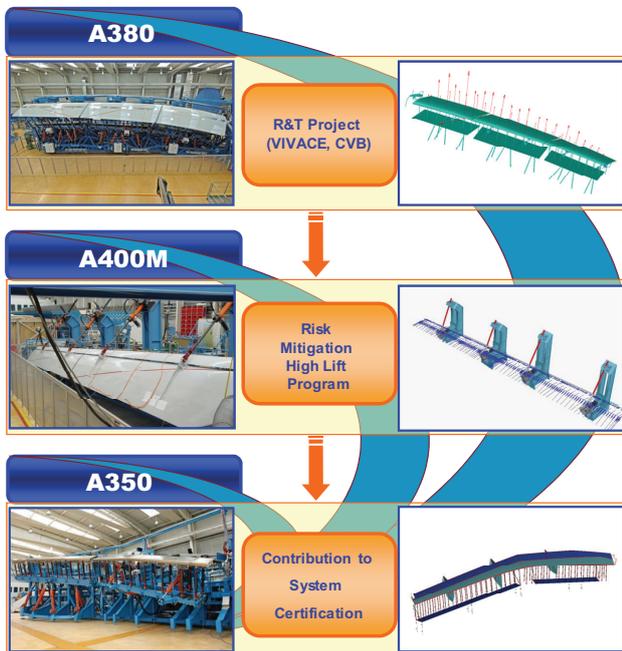


BILD 2. Virtuelles Testen – Einsatz und Entwicklung

### 1.3. Ansatz

Der bei High Lift Test verwendete Ansatz basiert auf einer engen Kopplung zwischen physikalischem und virtuellem Test. Auf diese Weise wird eine Modellvalidierung mit physikalischen Testergebnissen ermöglicht. Wie in BILD 3

gezeigt, wird zunächst von einem prüfstandsähnlichen Modell ausgegangen, das dem physikalischen Prüfstand in allen relevanten Details (wie z.B. Form der Luftlastaufbringung etc.) entspricht. Diese Modellvariante wird anschließend mit Prüfstandsergebnissen validiert und schließlich zu einer (oder mehreren) flugzeugähnlichen Variante(n) erweitert. Die Hauptunterschiede zwischen prüfstandsähnlichen und flugzeugähnlichen Modellen bestehen in der Lastaufbringung (diskrete Lastzylinderkräfte im Gegensatz zu verteilten Luftlasten) sowie der Simulation von Flügelbiegung. Diese wird auf dem Prüfstand im Allgemeinen nicht betrachtet, wohingegen im virtuellen Test die Aufbringung von lastabhängigen Flügeldeformationen erfolgt.

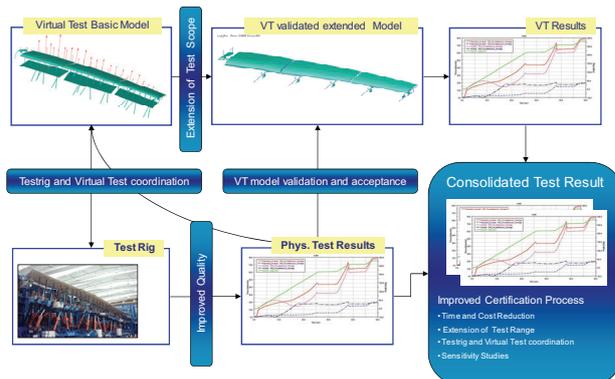


BILD 3. Prinzipielle Vorgehensweise

Die Testergebnisse des physikalischen Prüfstandes mit den Ergebnissen des erweiterten, flugzeugähnlichen Computermodells führen gemeinsam zu einem konsolidierten Testergebnis. Darüber hinaus führt die Simulation weiterer Testvarianten (z.B. weitere Lastfälle oder Lastniveaus sowie weitere Systempositionen, entweder mit dem validierten Basismodell oder mit dem erweiterten Flugzeug-Modell) sowie die Simulation von Modellvarianten z.B. in Form von Parametervariationen zu einem Erkenntnisgewinn und damit insgesamt zu einem optimierten Zertifizierungsprozess.

## 2. MODELLBILDUNG

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die eingesetzte Modellierungsmethode sowie den Prozess zur Modellbildung.

### 2.1. Methode

Im Rahmen des virtuellen Tests für Hochauftriebssysteme kommt die Methode der Mehrkörpersimulation zum Einsatz. Klassisch wird hierbei ein Mechanismus durch starre Körper und verbindende Gelenke modelliert. Die daraus resultierenden Bewegungs-Differentialgleichungen und algebraischen Nebenbedingungen werden numerisch gelöst. Neben dynamischen Betrachtungen sind auch rein kinematische sowie statische / quasi-statische Berechnungen möglich. Eine Erweiterung des klassischen Ansatzes stellt die flexible Modellierung einzelner oder mehrerer Körper des Mechanismus dar. Im Falle der bei High Lift Test eingesetzten Simulations-Software kommt dabei ein modaler Ansatz zur Verwendung, das heißt die Verformung eines flexiblen Körpers wird durch eine Superposition der Eigenformen des Körpers ausgedrückt.

Die Verwendung der klassischen, linearen FEM ist nicht zielführend, da aufgrund großer Rotationen und

Starrkörperbewegungen (z.B. beim Betätigen der Landeklappen) eine nichtlineare Betrachtung notwendig ist. Zwar ist auch mit der linearen Methode eine statische Betrachtung in der Umgebung einer Ausgangslage möglich (wobei ein Modell z.B. auf Basis von kinematischen Punkten die aus einer nichtlinearen Kinematikberechnung stammen aufgebaut und positioniert wird), zum Vergleich mit Prüfstandsergebnissen sollen jedoch komplette Fahrzyklen simuliert werden. Darüber hinaus werden dynamische Berechnungen zur Simulation der Vorgänge beim Versagen von Systemkomponenten unter Luftlast benötigt.

Aus der Notwendigkeit einer nichtlinearen, dynamischen Betrachtung ergibt sich schließlich die Begründung für die Verwendung der Mehrkörpersimulation bei High Lift Test, denn im Gegensatz zur nichtlinearen FEM bietet sie einen sehr guten Kompromiss zwischen Berechnungsgeschwindigkeit und erreichter Qualität bzw. Genauigkeit der Ergebnisse.

Ausgangspunkt der Simulationsaktivitäten ist daher ein flexibles Mehrkörpermodell des Klappensystems, dessen Komponenten an den entsprechenden kinematischen Punkten fest mit der Umgebung verbunden sind. Je nach Bedarf wird dieses Basismodell durch spezifische Komponenten erweitert. Hierbei handelt es sich beispielsweise um die Modellierung von Kontakt, die Einführung einer flexiblen Flügelstruktur anstelle einer direkten, steifen Anbindung der Komponenten des Hochauftriebssystems an die Umgebung sowie die Einführung von externen Systembibliotheken (Extended System Libraries) um über allgemeine Zustandsgleichungen (General State Equations), das physikalische Verhalten von Systemkomponenten oder zugehörigen Regelkreisen in einem höheren Detaillierungsgrad abzubilden.

**2.2. Vorgehensweise und Modellierungsprozess**

Die Modellierung beginnt mit einem konzeptionellen Modell, in dem die Topologie des zu simulierenden Systems erfasst und abgebildet wird. Es dient zur Identifizierung der einzelnen Körper des Systems und deren Schnittstellen zueinander. An dieser Stelle erfolgt eine erste Festlegung, welche Körper als starr und welche Körper als flexibel modelliert werden sollen. Außerdem erfolgt die Festlegung, durch welche Art von Gelenken die Körper miteinander verbunden werden. BILD 4 zeigt ein konzeptuelles Modell am Beispiel eines Spoilers inklusive seines Aktuators.

Nach Abschluss und Validierung des konzeptuellen Modells erfolgt der Aufbau des Computermodells in Form eines MSC.Adams bzw. MSC.SimXpert Mehrkörpermodells. Hierbei wird Information aus verschiedenen Abteilungen zusammengeführt:

Die Modellierung startet auf Basis eines existierenden CATIA Kinematikmodells. Dieses wird durch weitere gegebene kinematische Punkte und/oder durch Verwendung geometrischer Informationen zunächst in ein starres Mehrkörpermodell transformiert. Hierbei werden die einzelnen Körper zunächst standardmäßig durch ideale Gelenke miteinander verbunden.

Um dynamische Berechnungen zu ermöglichen wird dieses durch Massen-, Schwerpunkts- und Trägheitsinformationen erweitert.

Einzelne Körper werden durch flexible Gegenstücke ausgetauscht. Diese basieren gemäß des MSC.Adams Ansatzes auf einer modalen Repräsentierung (Craig-Bampton-Transformation) die durch eine Eigenwertanalyse der zugehörigen FEM Modelle berechnet wird [4].

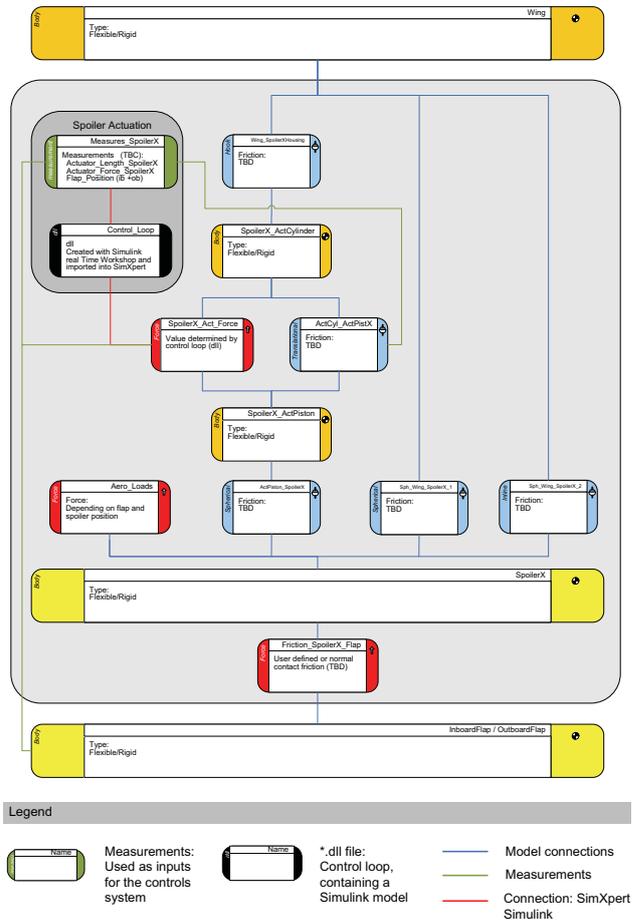


BILD 4. Beispiel für konzeptionelles Modell

Falls notwendig werden die idealen Gelenke durch flexible Gelenke (z.B. in Form von Bushings) mit einer Steifigkeit und Dämpfung ersetzt und es wird Reibung beaufschlagt.

Je nach Anwendungsfall werden Systemkomponenten durch Matlab-Simulink basierte General State Equations modelliert.

Ebenfalls abhängig vom Anwendungsfall werden zusätzliche Kontaktkräfte definiert. Hierbei kommen die in die Software implementierten Standard-Algorithmen zum Einsatz (rigid-rigid, rigid-flex sowie flex-flex contact). Darüber hinaus wird ein Ansatz verwendet, der im Rahmen der A350 Testkampagne entwickelt wurde. Hierbei werden zunächst auf einem Körper eines Kontaktpaares Schnittebenen definiert. Diese Ebenen werden mit dem Körper mitbewegt und zur Simulationszeit mit dem anderen Körper des Kontaktpaares geschnitten. Hierdurch entsteht ein Satz von komplarenen Schnittkurven, über die der Abstand bzw. die Durchdringung der beiden Körper ermittelt wird und ggf. Kontaktkräfte ermittelt und aufgebracht werden.

**2.3. Modellvalidierung**

Der Verwendungszweck von Computermodellen im Bereich Virtual Test setzt einen hohen Grad an

Genauigkeit und Verlässlichkeit der generierten Simulationsergebnisse voraus. Dabei bietet der im Bereich High Lift Test gewählte kombinierte physikalisch-virtuelle Ansatz (siehe Abschnitt 1.3) die Möglichkeit eines Vergleiches des Computermodells mit zugehörigen physikalischen Testergebnissen. Dennoch sind je nach Verwendungszweck der Simulationsdaten und je nach Verfügbarkeit von Vergleichsdaten alternative Validierungsschritte sinnvoll und notwendig. Dementsprechend kommt beim Virtual Testing von High Lift Systemen ein mehrstufiger Validierungs- und Verifikationsprozess zur Anwendung.

Nach einer Validierung des konzeptuellen Modells sowie der Überprüfung der korrekten Umsetzung des Computermodells (Modell Verifikation) werden Ergebnisse der Mehrkörpersimulation zunächst mit anderen Berechnungsmethoden verglichen (z.B. CAD-Daten, FEM Berechnungsergebnisse). Erst abschließend erfolgt die Validierung in Form eines Vergleichs mit Prüfstandsergebnissen. Hierbei werden sowohl skalare Werte aus statischen Berechnungen als auch Zeitverläufe aus quasi-statischen und dynamischen Berechnungen mit entsprechenden Referenzwerten verglichen.

Bei sämtlichen Validierungsschritten wird eine gewisse Abweichung zwischen Simulations- und Referenzergebnis zugelassen. Durch Aufbringung dieser Validierungstoleranz auf den Referenzwert ergibt sich ein Toleranzband, innerhalb dessen das Simulationsergebnis für eine erfolgreiche Validierung verlaufen muss. Zur Berücksichtigung einer ggf. vorhandenen Unsicherheit des Referenzergebnisses (Messfehler, zulässige Schwankungen aufgrund von geometrischen Toleranzen etc.) wird das Toleranzband zudem um diese Unsicherheit erweitert sowie eingeschränkt.

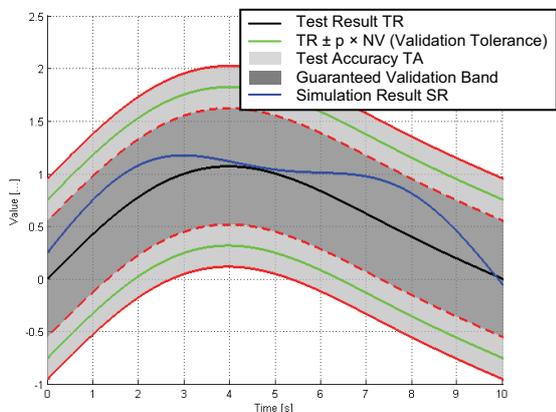


BILD 5. Toleranzbänder bei Modellvalidierung

Wie in BILD 5 dargestellt, ergibt sich so das garantierte Validierungsband (Toleranz abzüglich der Unsicherheit) sowie das erweiterte Validierungsband (Tolerant zuzüglich Unsicherheit). Verläuft das Simulationsergebnis innerhalb des garantierten Validierungsbandes, sind keine weiteren Maßnahmen notwendig. Eine Verletzung des erweiterten Validierungsbandes führt zur Nicht-Validierung des Modells. Für Verläufe innerhalb des erweiterten aber außerhalb des garantierten Bandes sind weitere Untersuchungen vor der endgültigen Validierungsentscheidung notwendig.

### 3. TESTPROZESS UND SIMULATIONS DATEN MANAGEMENT

Die Verwendung von Computersimulation im Rahmen der Zertifizierung eines Flugzeugsystems setzt nicht nur den Aufbau von Modellen mit ausreichender Genauigkeit und Qualität voraus. Die Anforderungen der Zulassungsbehörden bedingen darüber hinaus einen definierten und robusten Prozess für die gesamte Kette der an der Zertifizierung beteiligten Daten.

Gegenwärtig ist das Requirements Based Engineering (RBE) bei Airbus der formale Weg, neue Flugzeuge und ihre Systeme zu entwickeln. Auf Seite des System Tests führt dies zu einem Requirements Based Testing (RBT) Prozess.

Alle Anforderungen und Eigenschaften des Systems im Sinne seiner Leistungen, Sicherheit etc. werden verbal in einzelnen Anforderungen (Requirements) festgelegt und in einer Datenbank verwaltet.

Durch die Verwendung eines Test Management Systems (TMS) wird bzw. werden zur Verifikation jedes Requirements ein oder mehrere Tests auf einem oder mehreren der existierenden Testwerkzeuge zugeordnet. Die Testwerkzeuge haben ihrerseits ein lokales Prozess- und Datenmanagement. Nach Durchführung eines Tests zur Requirements-Verifizierung werden die Ergebnisse an das Test Management System zurückgemeldet, um dort die Abdeckung der Erfüllung aller Requirements zu ermitteln und schließlich die Zertifizierungsdokumentation zu erstellen. BILD 6 zeigt eine Übersicht dieser Vorgehensweise.

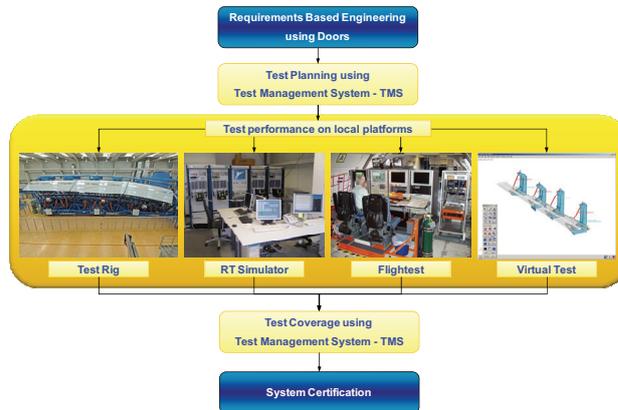


BILD 6. Zuordnung Requirements zu Testwerkzeugen

Für eine erfolgreiche Eingliederung des virtuellen Tests in den existierenden Testprozess wurde für das lokale Daten- und Prozess Management in Zusammenarbeit mit MSC-Software eine Lösung auf Basis des Produktes Sim.Manager entwickelt [2]. Zusammengefasst ausgedrückt dient dieses sogenannte High Lift System Virtual Test (HLSVT) Portal zur Adressierung der folgenden Belange:

- Verknüpfung von Simulationsergebnissen mit den zur Generierung verwendeten Modellen.
- Verknüpfung von Modellen mit zum Aufbau verwendeten Inputdaten und Modellierungsprozessen.

#### 3.1. Globale Anforderungen

Um die im vorangegangenen Abschnitt erwähnten

Aufgaben erfüllen zu können, muss das HLSVT Portal die folgenden globalen Anforderungen erfüllen bzw. Eigenschaften aufweisen:

- Schnittstelle zum globalen Test Management System
- Schnittstelle zu Pre- und Postprocessing Software (MSC.SimXpert, Matlab)
- Schnittstelle zur Solving Software (MSC.Adams)
- Simulationsdaten Management
- Workflow Management und Prozess-Kontrolle sowie Prozess-Automatisierung
- Configuration Management und Lifecycle Management
- Verfolgbarkeit und Wiederholbarkeit von virtuellen Tests
- Verfügbarkeit einer Bibliothek vorhandener Modelle, Unterstützung eines multidisziplinären Ansatzes zur System Modellierung

### 3.2. Realisierung

Einer der wichtigsten und kritischsten Aspekte bei der Entwicklung des Virtual Test Portals war die korrekte Erfassung und Implementierung des virtuellen Test Prozesses sowie die Ausführung der Schnittstelle zum Test Management System zur Eingliederung in den übergeordneten Test Prozess.

Die Entwicklung erfolgte auf Basis einer vorab erstellten, detaillierten Spezifikation zur Erfassung aller Prozessschritte, Objekte und der zugehörigen Attribute.

In einer ersten Entwicklungs- und Implementierungsphase lag der Fokus auf dem Aspekt der Durchführung von virtuellen Tests mit bereits vorhandenen Modellen (Adressierung der Anforderungen an die Verknüpfung von Modellen und Simulationsdaten).

BILD 7 zeigt einen Screenshot aus dem High Lift Test Portal. Gezeigt ist hier der sogenannte Audit Trail, der hier den Zusammenhang zwischen einem Simulationsergebnis und dem zu Grunde liegenden Modell graphisch darstellt.

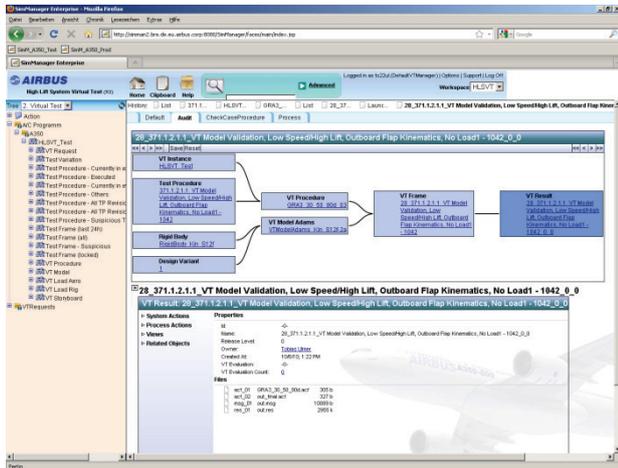


BILD 7. Screenshot High Lift Test Portal

Im zweiten Schritt erfolgte die Erweiterung hinsichtlich der Verknüpfung von Modellen mit deren Inputdaten sowie den Modellierungsprozessen. Hierzu erfolgt die eigentliche Modellbildung gesteuert aus dem Portal heraus. Dabei werden über das Portal z.B. Skripte ausgeführt (beispielsweise in Form von SimXpert Templates) oder auch interaktive Preprocessing Sitzungen in SimXpert gestartet.

BILD 8 zeigt eine schematische Darstellung der Systemarchitektur des High Lift System Virtual Test Portals. Herzstück sind der SimManager Server sowie eine Datenbank zur Verwaltung aller Prozessobjekte. Die Bedienung des Portals erfolgt über einen Webclient. Je nach Prozessschritt erfolgt die Ausführung der zugehörigen Aktion direkt auf dem SimManger Server oder auf einer Template Maschine (SimXpert Templates bzw. Modellierungsskripte sowie die eigentlichen Simulationsläufe). Interaktive SimXpert Preprocessing Sitzungen werden auf einer SimXpert Client Maschine ausgeführt, die in diesem Falle physikalisch der SimManager Client Machine entspricht. Der Data Vault dient zur Abspeicherung der im Rahmen der Simulationen generierten Daten sowie der im Preprocessing erstellten Modelle.

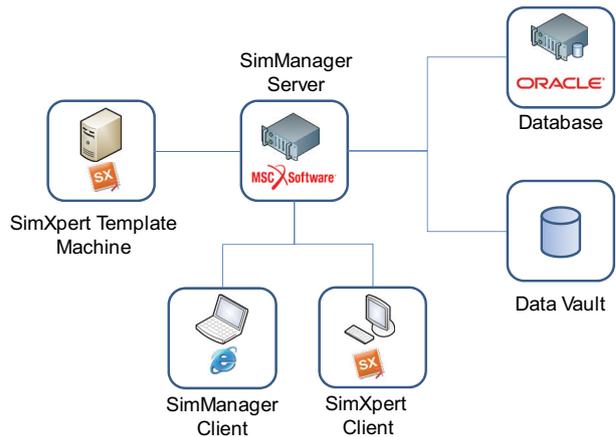


BILD 8. Systemarchitektur High Lift Test Portal

Zur Erhöhung des Durchsatzes von virtuellen Tests, das heißt um Sensitivitätsanalysen, Parametervariationen, Design of Experiment Studien oder Testvariationen bequem und leistungsstark durchführen zu können, wurde darüber hinaus eine Multi-Run Architektur realisiert. Ein skriptbasiertes Postprocessing schließt diesen Bereich ab.

### 4. SCHRIFTTUM

- [1] Gülzau, H and Carl, U.B., 2007. Parametric Modelling and Experimental Validation of multi body simulation of elastic flap systems in transport aircraft. In: O. Estorff, ed. 2007, 1<sup>st</sup> International Workshop on Aircraft System Technologies. Hamburg: TUHH, pp. 39-48.
- [2] MSC, 2008. MSC SimManager R3.1 User's Guide. MSC Software.
- [3] VIVACE Consortium Members, 2007. Final Technical Achievements. System Simulation, pp. 12ff.
- [4] MSC, 2010. Theory of Flexible Bodies, MSC.Adams Users's Guide. MSC Software.