

MODELLBASIERTE ENTWICKLUNG ZUM NACHWEIS NEUER TECHNOLOGIEN FÜR HOCHAUFTRIEBSSYSTEME

Frank Thielecke*, Stefan Benischke, Dennis Doberstein,
Jan Grymlas, Christian Modest, Christian Raksch

Institut für Flugzeug-Systemtechnik,
Technische Universität Hamburg-Harburg,
Nesspriel 5, 21129 Hamburg,
Deutschland

* frank.thielecke@tuhh.de

KURZFASSUNG

Die Entwicklung eines Hochauftriebssystems stellt auf Grund einer hohen und interdisziplinären Systemkomplexität einen gleichermaßen anspruchsvollen wie zeitaufwendigen Prozess dar. In dieser Veröffentlichung wird ein modellbasierter Entwicklungsprozess im Bereich von Hochauftriebssystemen vorgestellt, welcher die Möglichkeiten einer optimierten Systementwicklung aufzeigt. Die eingesetzten und im Folgenden beschriebenen Methodiken und Werkzeuge wurden im Rahmen von Forschungsprojekten am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg entwickelt.

Um aus den Anforderungen und Randbedingungen an ein Hochauftriebssystem einen wissensbasierten Vorentwurf abzuleiten, wird die Software WISSBASYS für einen rechnergestützten Entwurfsprozess verwendet. Dabei werden unter Nutzung generischer Modellbibliotheken der Systemkomponenten und der Formulierung ihrer Randbedingungen in Form eines Constraint Satisfaction Problem erste Entwurfskonzepte erstellt. Im nächsten Schritt erfolgt die detaillierte Auslegung des Hochauftriebssystems mit der Entwicklung und dem virtuellen Test der Kinematik sowie die Auslegung der Antriebssysteme. Dies geschieht unter Nutzung der Werkzeuge TEFLAMES sowie PREMBS, einer entwickelten Toolbox unter MATLAB, welche die Übertragung von Entwurfsparametern an das MKS-Tool ADAMS ermöglicht. Die Aspekte der Zuverlässigkeit und die Bewertung der Sicherheit des Systementwurfes werden unter Nutzung des Werkzeuges SYRELAN betrachtet. SYRELAN stellt einen modellbasierten Ansatz zur Berechnung der System-Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Analysezeit sowie zur Durchführung von Importanzanalysen und der mehrkriteriellen Optimierung dar. Weitere Aspekte die in dieser Entwicklungsphase von großer Bedeutung sind, sind die optimierte Auswahl von Sensorik, die Auslegung von Monitoren sowie die modellbasierte Entwicklung von Diagnosefunktionalitäten. In Abstimmung mit dem vorhandenen Systementwurf und in Wechselwirkung mit SYRELAN erfolgt dies durch Nutzung des Werkzeuges SPYDER. Nach Abschluss der Entwicklungsphasen erfolgt ein Integrationstest des Gesamtsystems unter Nutzung der institutseigenen virtuellen Integrationsplattform VIPER. Der nächste Schritt, welcher jedoch außerhalb des eigentlichen modellbasierten Entwicklungsprozesses liegt, ist der Integrationstest in Form eines realen Test-Rigs. Die dort gewonnenen Daten können allerdings in den vorgestellten Prozess z.B. für die Generierung von Testfällen und die Analyse von Systemzuständen im Grenzbereich eingebunden werden. Das Ziel dieser Veröffentlichung ist es, einen Gesamtüberblick über die entwickelte Werkzeugkette und den damit gesammelten Projekterfahrungen in der Anwendung auf Hochauftriebssysteme darzustellen.

1 EINLEITUNG

Die Entwicklung komplexer, neuartiger Flugzeugsysteme erfordert neben der Verfügbarkeit passender Systemtechnologien ebenso die Entwicklung und Verbreitung geeigneter Assistenzfunktionen, die den Systemingenieur bei dem Analyse- und Nachweisprozess unterstützen. Der Entwurf neuer Hochauftriebssysteme umfasst hierbei unterschiedliche Disziplinen, die in verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses benötigt werden. In Abbildung 1 ist

der gängige V-Prozess mit den Definitions- und Nachweistufen abgebildet. Der vorliegende Übersichtsbeitrag stellt entlang des V-Prozesses verschiedene Werkzeuge vor, die die Entwicklung neuer Technologien für Hochauftriebssysteme unterstützen. Sämtliche Werkzeuge wurden im Rahmen unterschiedlicher Forschungsvorhaben am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg entwickelt.

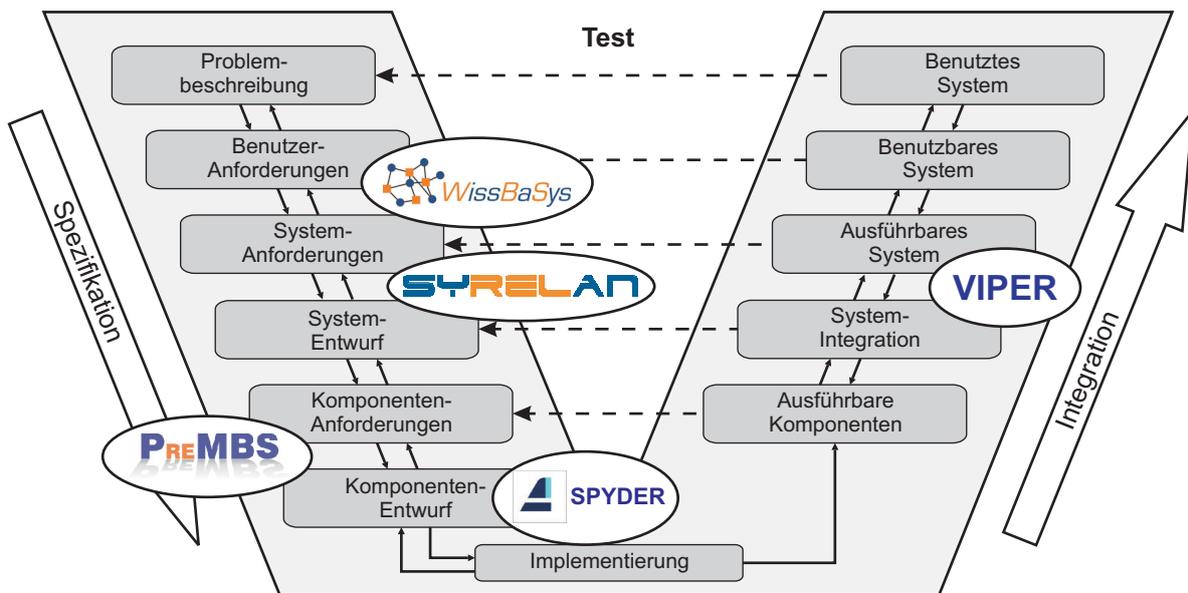


ABBILDUNG 1: Werkzeuge für modellbasierte Entwicklung im V-Prozess

Basierend auf den Systemanforderungen unterstützt im ersten Schritt das Werkzeug WISSBASYS die Architekturwahl und die Dimensionierung der Systemkomponenten [1]. Aufgrund der frühen Entwicklungsphase unterliegt diese Dimensionierung naturgemäß großen Unsicherheiten, denen mit Hilfe entsprechender Datenbanken zur Wissensspeicherung und einem passenden Lösungsverfahren mit Parameterintervallen begegnet wird. Im Anschluss an die Festlegung der Systemarchitektur und der Dimensionierung folgt der Nachweis funktionaler sowie sicherheitskritischer Anforderungen. Für letztere Analysen kann das Werkzeug SYRELAN (System Reliability Analysis) genutzt werden. Es bietet eine intuitive Modellierungsumgebung und die Möglichkeit sowohl zum Nachweis von Systemanforderungen als auch zur Untersuchung von Schwachstellen im Systementwurf [9]. Im weiteren funktionalen Nachweisprozess kann im Anschluss an den Entwurf des Antriebssystems durch WISSBASYS die Kinematik und das dynamische Verhalten des gesamten Antriebssystems untersucht werden. Dieses umfasst die Kinematiksynthese der Klappenbewegung mit dem Werkzeug TEFLAMES sowie die Mehrkörpermodellierung des gesamten Systems mit dem Werkzeug PREMBS in Verbindung mit der kommerziellen Software MSC.ADAMS [3, 5]. Auf Grundlage dieser Kinematikmodelle und erstellten dynamischen Simulationsmodellen in MODELICA kann der Systementwurf im Folgenden durch effiziente Diagnosekonzepte mit Hilfe des Werkzeugpakets SPYDER erweitert werden. Im aufsteigenden Ast des V-Prozesses folgt die Integration und der Nachweis der Systemanforderungen; dieser Prozessabschnitt wird durch die virtuelle Integrationsplattform VIPER unterstützt. Als Beispiel dient in diesem Übersichtsbeitrag ein Hochauftriebssystem mit einer geteilten Wellentransmission und einzeln angetriebenen Rotationsaktuatoren.

2 Wissensbasierter Systementwurf (WISSBASYS)

Zu Beginn des Entwurfsprozesses stehen die Anforderungen und Vorgaben, welche an ein zukünftiges Hochauftriebssystem zu stellen sind. Die Neuentwicklung eines Hochauftriebssystems ist dabei in den frühen Phasen gekennzeichnet durch einen nicht zu vernachlässigenden Teil an unsicheren Informationen sowie häufige Änderungen der Vorgaben. Des Weiteren ist der Entwicklungsprozess eines komplexen Hochauftriebssystems ein interdisziplinärer Vorgang, welcher stark von vorangehenden Untersuchungen und Randbedingungen abhängig ist. Die dadurch erforderlichen häufigen und zeitaufwendigen Iterationen in der Systemauslegung erlauben oft lediglich stark vereinfachte Systemmodelle zur Bestimmung wichtiger Kenngrößen. Erst im späteren Verlauf des Entwurfsprozesses nimmt der Anteil an gesicherten Informationen zu, wodurch sich die Möglichkeit einer Analyse des Systemverhaltens an Hand eines zuverlässigen Systemmodells ergibt. Eine verbesserte Speicherung und Dokumentation von Entwicklungsmethoden sowie der Erfahrungen und Informationen über bereits bestehende Hochauftriebssysteme würde den Prozess der Systemauslegung unterstützen. Zielführend soll dabei eine umfassende Rechnerunterstützung unter Einsatz von wissensbasierten Methoden sein. Das entsprechende Konzept eines im INSTITUT FÜR FLUGZEUGSYSTEMTECHNIK entstandenen Entwurfswerkzeugs mit dem Namen WISSBASYS ist hierzu in Abbildung 2 dargestellt [2].

Die Informationen und Randbedingungen zur Systemauslegung basieren hierbei im Allgemeinen auf der Festlegung von System- und Komponentenparametern sowie deren gegenseitigen Abhängigkeiten. Diese Informationen werden in WISSBASYS zum Einen über sogenannte Objekt-Attribut-Beziehungen dargestellt, wobei die realen Komponenten die *Objekte* sowie deren zugehörigen Modellparameter die Attribute verkörpern. Zum Anderen ergeben die

bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Objekten sowie die äußeren Randbedingungen ein komplexes Ungleichungssystem, welches die Lösungsmenge des Systementwurfs beschränkt. Einem Objekt lässt sich ein Satz von Parametern zuweisen, welche dann aus einer Datenbank eingelesen, vom Benutzer über eine grafische Oberfläche vorgegeben oder Ergebnisse von Berechnungen des Ungleichungssystems sein können. Die mathematischen Zusammenhänge dieses Ungleichungssystems bilden damit die Grundlage der Bestimmung der Systemparameter und werden durch ein Constraint-Netzwerk repräsentiert. Durch die vom Benutzer zu definierende mechanischen Verbindungsstellen der Komponenten können die Wirkzusammenhänge zwischen den Schnittgrößen beispielsweise für statische Systemanalysen ermittelt werden. Den Komponenten werden damit Schnittstellen zugewiesen, über welche diese die vorhandenen Constraints kommunizieren und auf diese Weise zu einem Gesamtsystem verknüpft werden können.

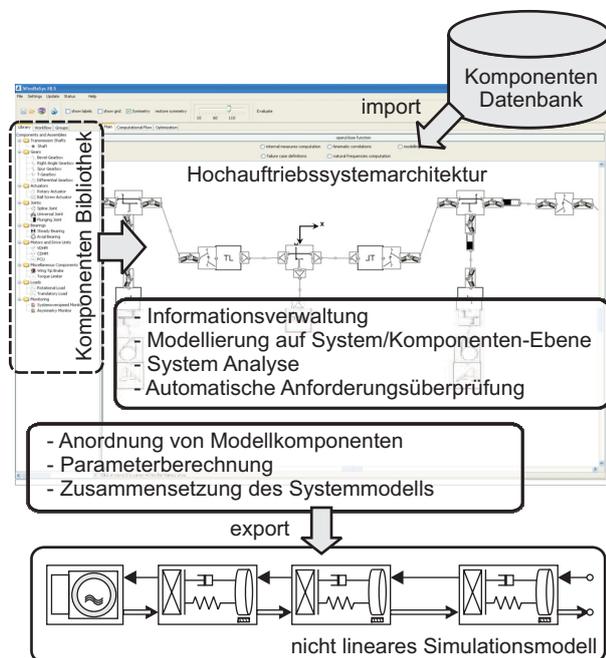


ABBILDUNG 2: Übersicht, Funktionalität von WissBaSys [2]

Die Komponenten, Parameter und Constraints bilden demnach die Kernelemente für eine Modellbildung in WissBaSys. Als erster Schritt in der Modellbildung wird über die grafische Oberfläche die Topologie des zu entwerfenden Hochauftriebssystems festgelegt. Hierzu können aus vorhandenen Bibliotheken auf bereits vorgefertigte Komponentenmodelle von Hochauftriebssystemen zugegriffen werden, die die entsprechenden Informationen zu Parametern und Constraints enthalten. Die Konzentration der zur Systemauslegung relevanten Informationen sowie deren Bereitstellung stellt eine weitere wichtige Funktion in WISSBASYS dar. Den Komponentenbibliotheken liegt die Idee zu Grunde, dem Benutzer den Zugriff auf bekannte System- und Komponentenkennwerte zu ermöglichen und damit ein großes Archiv an bekanntem Faktenwissen zur

Verfügung zu stellen. Auf diese Weise kann der Aufwand für das Überarbeiten der Informationsgrundlage für einen neuen Systementwurf, welche sich mit zunehmendem Erkenntniszuwachs im Entwurfsprozess häufig ändert, reduziert werden. Neben der Modellierung und Umsetzung von vorhandenen Systemkenntnissen, spielt die Analyse des zu entwerfenden Systems in Form von Simulationen und damit weiterem Erkenntniszuwachs eine wichtige Rolle im Entwurfsprozess. Im Falle eines Hochauftriebssystems betrifft dies statische wie auch dynamische Systemanalysen, wobei sich diese in hohem Maße gegenseitig beeinflussen. Für die Ermittlung von operativen Lasten im Transmissionssystem oder die Auslenkungen der Aktuatorik wären stationäre Systemanalysen ausreichend. Dabei können die gesuchten Zielgrößen aus den vorgegebenen physikalischen Attributen der Komponenten sowie den äußeren Randbedingungen bestimmt werden, wobei das zu lösende Gleichungssystem lediglich von der Systemtopologie beeinflusst wird. In Wechselwirkung treten diese Simulationsergebnisse nun mit Erkenntnissen aus einer dynamischen Systemanalyse, beispielsweise werden die Systemlasten neben stationären Auslegungsaspekten wesentlich durch Extremlasten infolge hoher Geschwindigkeitstransienten beeinflusst. Für die dafür erforderlichen dynamischen Untersuchungen stehen Schnittstellen zu Numerikprogrammen (z.B. MATLAB) zur Simulation und Auswertung linearer Modelle im Zeitbereich zur Verfügung [2]. Das Aufstellen sowie die iterativen Überarbeitungen der Gleichungssysteme und Komponentenparameter lassen sich mit Hilfe des wissensbasierten Entwicklungsansatzes automatisieren. Dabei kann das Netzwerk aus Variablen in Form von Intervallen und funktionalen Zusammenhängen durch ein *Interval Constraint Satisfaction Problem (ICSP)* beschrieben werden, welches wie folgt definiert ist [1]:

Definition: Ein ICSP $P = (V, D, C)$ ist definiert durch

- eine Menge von Variablen $V = \{v_1, \dots, v_n\}$
- eine Menge von kontinuierlichen Wertebereichen $D = \{D_1, \dots, D_n\}$, wobei D_i der Variable v_i zugeordnet ist und
- eine Menge von Constraints $C = \{C_1, \dots, C_n\}$, die eine numerische Beziehung zwischen Teilmengen aus V herstellen.

Diese Art der Beschreibung durch Intervalle bietet sich für das vorliegende Problem an, da zu Beginn des Entwurfsprozesses die zur Verfügung stehenden Informationen meist über eine Unschärfe verfügen und das Ungleichungssystem unterbestimmt ist. Der in WISSBASYS zur Auswertung des ICSP gewählte Algorithmus beruht auf sogenannten *solution functions*, wobei die Funktionen jeweils nach den darin enthaltenen Variablen aufgelöst werden und die Lösung des Ungleichungssystems ungerichtet erfolgt [1]. Dadurch können durch Vorgabe von beliebigen Parametern die Wertebereiche der im Constraint-Netzwerk

verknüpften Komponentenparameter eingeschränkt werden. Dieser Ansatz bringt für den Entwurf eines Hochauftriebssystems Vorteile mit sich, da bei Untersuchungen des Ungleichungssystems hinsichtlich Inkonsistenz die Anforderungen und Randbedingungen an den Systementwurf überprüft werden können. Die mögliche Verwendung von unscharfebehafteten Wertebereichen sowie eines unterbestimmten Ungleichungssystems ermöglichen ebenfalls eine rasche Ermittlung von Wertebereichen für systemspezifizierende Kennwerte bereits in frühen Entwicklungsphasen.

3 Sicherheitsanalyse mit SyRelAn

Nachdem mit Hilfe des Werkzeugs WISSBASYS die Systemarchitektur untersucht und dimensioniert wurde, können anhand des Werkzeugs SYRELAN Sicherheitsanforderungen an das System bewertet werden. Der folgende Abschnitt stellt zunächst den Funktionsumfang und Einsatzbereich von SYRELAN vor, nachfolgend wird eine Fehlerbedingung mit Hilfe des Werkzeugs untersucht und anschließend folgt die Interpretation der Ergebnisse. Das Werkzeug SYRELAN besteht aus drei Analyse- und Optimierungsmodulen und bietet an unterschiedlichen Stellen im Entwicklungsprozess komplexer Systeme eine Unterstützung für den Anwender. Das erste Analysemodul nutzt Zuverlässigkeitsblockdiagramme zur Abbildung von Funktions- und Ausfalllogiken. Die Modellierungsmöglichkeiten sind dabei identisch zu denen von Fehlerbäumen, die für Systemingenieure aufgrund der positiven Logik jedoch häufig verständlicher sind [7]. Das zweite Modul besteht aus der Erweiterung der Zuverlässigkeitsblockdiagramme zum hybriden Systemmodell, das unter Verwendung von nebenläufigen, endlichen Zustandsautomaten die Abbildung rekonfigurierbarer Systeme ermöglicht und unterschiedliche Redundanzstrategien durch variable Fehlerraten abbildet [8]. Das dritte Modul

dient zur Redundanzoptimierung und Definition optimaler Systemarchitekturen. Hierbei werden die vorherigen Analysemodelle vollständig unterstützt [9].

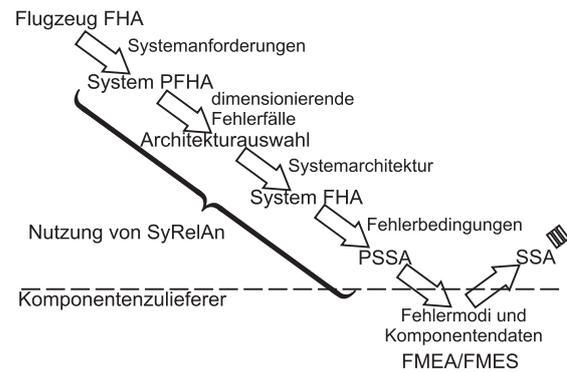


ABBILDUNG 3: Sicherheitsbewertungsprozess und Anwendung des Werkzeugs SyRelAn

Abbildung 3 zeigt den V-Prozess für die Sicherheitsbewertung von Flugzeugsystemen, die wichtigsten erforderlichen Analysen beziehungsweise Nachweise und die Nutzung von SYRELAN in diesem Prozess. Dabei eignet sich das Werkzeug vor allem für die quantitativen Analysen in der Konzeptphase. Das nachfolgende Beispiel zeigt die exemplarische Sicherheitsbewertung für die Fehlerbedingung der Signalübertragung und -verarbeitung „Verlust der Klappensynchronisation zwischen linker und rechter Tragfläche“ eines Landeklappensystems mit einzeln angetriebenen Klappensegmenten. Mit Hilfe des ersten SYRELAN-Moduls wurde das entsprechende Zuverlässigkeitsblockdiagramm aufgestellt. Bezüglich des Sicherheitsbewertungsprozesses nach Abbildung 3 werden Analysen dieser Art bis zum System Safety Assessment (SSA) benötigt [7].

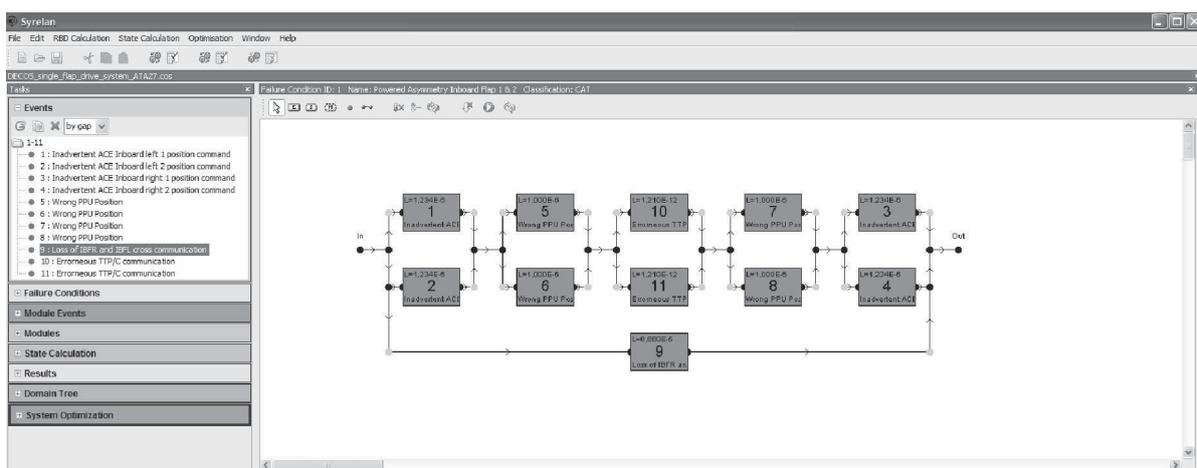


ABBILDUNG 4: In SyRelAn erstelltes Zuverlässigkeitsblockdiagramm

Während Fehlerbäume mit UND- sowie ODER-Gattern arbeiten, nutzen Zuverlässigkeitsblockdiagramme die parallele und serielle Verschaltung von Ereignissen und Komponenten. Dieses spiegelt häufig die Architektur eines Systems direkt wider. Anhand von Minimalpfaden lässt sich die Struktur des Zuverlässigkeitsblockdiagramms auslesen. Mit Hilfe effizienter Algorithmen ermöglicht das Werkzeug SyRelAn selbst von komplexen Systemen zeitnah die Überführung der Minimalpfade in die Systemstrukturfunktion und somit die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit, in diesem Fall ergibt sich:

$$(1) \quad F_{mean}(t = 1FH) = 3,360 \cdot 10^{-16} \frac{1}{FH}$$

Der quantitative Nachweis für die als *catastrophic* klassifizierte Anforderung ist somit erbracht. Für den weiteren Nachweisprozess sind jedoch zusätzliche *Common Cause Analyses* notwendig. Sofern Anforderungen nicht oder nicht ausreichend robust erreicht wurden, kann im weiteren Entwurfsprozess die Systemstrukturfunktion dieser Fehlerbedingung für weitere Analysen genutzt werden. Zur Identifikation von Schwachstellen im Redundanzkonzept und Treibern der Ausfallwahrscheinlichkeit stellt SYREL-AN unterschiedliche Importanzanalysen zur Verfügung.

4 Kinematiksynthese

In den vorherigen Abschnitten werden Entwicklungswerkzeuge beschrieben, welche für den Vorentwurf von Landklappenstellensystemen in der oberen Ebene des V-Prozesses angewendet werden. Im Folgenden wird hingegen näher auf den detaillierten Auslegungsprozess eingegangen. Hierzu wird zunächst das Entwurfswerkzeug TEFLAMES vorgestellt, welches dem Entwickler Unterstützung bei der Suche einer optimalen Klappenführungskinetik durch einen teilautomatisierten Optimierungsprozess bietet. Es ist dabei möglich, bereits während des Optimierungsvorganges eine Vielzahl verschiedener Entwurfsparameter zu berücksichtigen. Das erhaltene, ebene Klappensystem lässt sich in der Weiteren Entwurfskette in ein 3D-Mehrkörpersimulationsmodell überführen, an welchem räumliche Strukturanalysen durchgeführt und die Auslegungsparameter für die Klappenbetätigung abgeleitet werden können.

4.1 Getriebesynthese mit TEFLAMES

Maßgebend für den herkömmlichen Entwurfsprozess von Klappenkinematiken sind die aus der aerodynamischen Vorentwicklung vorgegebenen Landklappen- und Flügelhinterkantengeometrien sowie die einzuhaltenden Klappenstellungen [5]. Aus diesen können, nach Festlegung der grundlegenden Getriebestruktur, mit klassischen analytischen Syntheseverfahren, wie z.B. der BURMESTERmethode, geeignete Führungsmechanismen erzeugt werden. In der Strukturentwicklung wird dieses System hinsichtlich Masse, Komplexität und Kosten analysiert und bewertet [5]. Die Daten dienen als Referenz für den nächsten Iterationsschritt, für welchen die Entwurfsparameter des Klappensystems variiert werden. Es liegt damit eine weitgehende Trennung zwischen der Synthese und

der Analyse vor. Dieser Vorgang ist ein langwieriger, teilweise heuristischer Iterationsprozess, der zudem maßgeblich von der Intuition und Erfahrung des Entwicklers beeinflusst wird, welcher zu Beginn die Definitionsparameter festlegt. Das am Institut FST der TUHH entwickelte Entwurfssoftware TEFLAMES (*Trailing-Edge Flap Mechanism Synthesis*) stellt ein Optimierungswerkzeug für Klappensysteme dar, welches einen neuen Methodenansatz nutzt und dabei die Erfahrungen bzw. Methoden aus dem klassischen Entwurfsprozess in einem automatisierten Verfahren vereint. Der Syntheseprozess wird damit deutlich vereinfacht, beschleunigt und lässt sich in ein früheres Stadium des Gesamtentwicklungsprozesses eines Flugzeuges integrieren. Die Methoden von TEFLAMES und deren Entwicklung sind in [5] ausführlich beschrieben. Die durch TEFLAMES angewendete Methode umfasst die folgenden Schritte eines Syntheseprozesses: Entwurf, Analyse sowie Bewertung und Auswahl. Im Entwurf wird zunächst ein Getriebetyp ausgewählt sowie die vorläufige Parametrisierung und Formulierung der Randbedingungen vorgenommen. Die iterative Anpassung der Parameter zur Erlangung einer optimalen Lösung kann im Verlauf des Entwurfsprozesses manuell vom Entwickler bzw. von einem algorithmischen Optimierer vorgenommen werden. Die Bewertung der jeweiligen Lösung gibt die Richtung vor, in welche die Parameter beim nächsten Iterationsschritt variiert werden. Der in TEFLAMES angewendete Ansatz zur Bewertung von Führungsmechanismen der Hochauftriebs-elemente betrachtet verschiedene Kriterien, für welche jeweils Kostenfunktionale aufgestellt werden. Diese beurteilen jeweils die aerodynamische Leistungsfähigkeit, die Systemmasse und kinematisch-geometrische Eigenschaften einer Lösung [5]. Mit unterschiedlicher Gewichtung der Kriterien und Ausführung des Optimierungsalgorithmus ergibt sich damit eine sogenannte PARETO-Front optimaler Lösungen bzgl. des jeweils am stärksten gewichteten Kriteriums. Über ein weiteres Auswahlverfahren wird aus ggf. gleichwertigen Lösungen das geeignetste Konzept ausgewählt. In Abbildung 5 ist beispielhaft ein durch TEFLAMES erzeugtes Getriebeschema des Klappenmechanismus eines AIRBUS A320 dargestellt. Der Vorteil des beschriebenen Synthesewerkzeuges gegenüber dem klassischen Verfahren liegt darin, dass der Entwurf von Mechanismen stärker interdisziplinär ausgerichtet ist und damit eine Steigerung der Leistungsfähigkeit des entworfenen Systems erreicht werden kann. Alle bei der Bewertung herangezogenen Kriterien werden bereits während des Entwurfsprozesses berücksichtigt, wie z.B. die technische Realisierung von kinematischen Lösungen. Hierdurch lässt sich die Entwicklungszeit deutlich verkürzen. Es können gegenüber dem klassischen Entwurfsprozess zudem auch mehr als drei Klappenpositionen berücksichtigt werden, was die Synthese komplexer Mechanismen zulässt.

Eine vollständige Automatisierung des Entwicklungsprozesses ist allerdings mit TEFLAMES nicht möglich. Es ist auch hier weiterhin die Einschätzung sowie Erfahrung des Konstrukteurs erforderlich. Zudem ist mit TEFLAMES bisher nur der ebene Getriebeentwurf möglich. Für

die räumliche Systemauslegung und Lastberechnung ist eine Abbildung des Klappensystem als Mehrkörpermodell erforderlich. Das Vorgehen hierzu wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

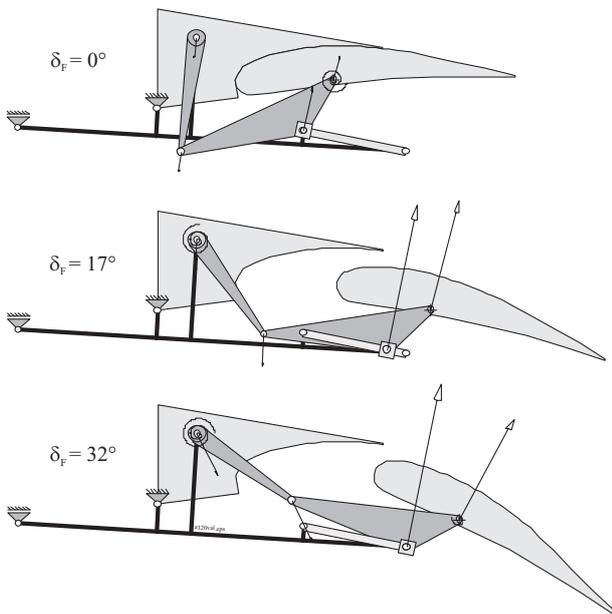


ABBILDUNG 5: Vom Synthesewerkzeug TEFLA-MES erzeugte Getriebeschemata des Mechanismus eines AIRBUS A320 in eingefahrener Position sowie in Start- und Landstellung [5]

4.2 Mehrkörpermodellierung mit (PREMBS/ADAMS)

Ein mechanisches Mehrkörpersystem (MKS) beschreibt im Allgemeinen ein System, welches sich aus einer endlichen Anzahl von Körpern und Verbindungselementen zusammensetzt. Zur Modellbildung wird ein reales System vereinfacht durch eine begrenzte Anzahl starrer Körper wiedergegeben, welche durch verschiedene masselose Verbindungselemente in ihren Freiheitsgraden eingeschränkt werden. Durch die Mehrkörpersimulation lässt sich das dynamische Bewegungsverhalten eines mechanischen Systems, welches durch die Bewegung der Teilkörper und ihre mechanischen Bindungen und Kräfte untereinander bestimmt wird, erfassen und beschreiben. Das MKS-Modell liefert unter Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen die Bewegungsabläufe und die dabei an den Körpern wirkenden Kräfte und Momente [3].

Die Software MSC.ADAMS ist ein Beispiel für eine häufig eingesetzte kommerzielle Mehrkörpersimulationssoftware. Hiermit ist es möglich, das Klappensystem als räumliches Kinematikmodell abzubilden und statische sowie dynamische Strukturanalysen durchzuführen, um die im Vorauslegungsprozess gemachten Annahmen zu prüfen. Ein Vorteil gegenüber der analytischen Systemauslegung ist, dass die Erstellung der Differentialgleichungen zur Beschreibung des Systems durch die 3D-Modellierung übernommen werden und damit auch die Berücksichtigung von z.B. dynamischen und elastischen Effekten als auch Rei-

bung sehr leicht möglich ist. Auch andere, interne Kraftelemente lassen sich leicht in das MKS-Modell integrieren. Der Leistungsumfang moderner MKS-Software umfasst in der Regel einen eigenen 3D-Modellierer sowie eine Geometrieschnittstelle zu den wichtigsten CAD-Systemen. Es können zudem die Bewegungsabläufe und Berechnungsergebnisse visualisiert werden. Durch eine parametrische Beschreibung der MKS-Modelle ist es zudem möglich, sogenannte Design Studien durchzuführen. Mit diesem systematischen, empirischen Verfahren sind Sensitivitätsanalysen sowie Design-Optimierungen bzgl. ausgewählter Modellparameter unter Berücksichtigung der oben genannten Effekte durchführbar.

Innerhalb eines Hochauftriebssystems liegen oft mehrere Baugruppen vor, die sich in ihrer Topologie gleichen, deren Parametrisierung jedoch unterschiedlich ist. Eine individuelle Modellierung jedes dieser Submodelle wäre sehr aufwändig und erhöht zudem das Risiko der Bedienungsfehler. Des Weiteren sind bei der Erstellung eines MKS-Modelles sehr häufig Änderungen nötig, welche den Modellierungsaufwand zusätzlich und in erheblichem Umfang erhöhen. An dieser Stelle kann als Unterstützung zur Modellierung größtenteils das am Institut entwickelte Preprocessing-Tool PREMBS genutzt werden. Mit Hilfe von PREMBS wird zunächst ein Mehrkörpermodell in Matlab modelliert und anschließend über einen integrierten Compiler in ein neutrales Dateiformat exportiert. In diesem Dateiformat liegt das Mehrkörpermodell bezüglich seiner Geometrie und Kinematik vollständig beschrieben vor und kann von sämtlichen Programmen für Mehrkörpersimulationen genutzt werden. PREMBS besteht somit zum einen aus der Modelldefinition und zum anderen aus der Modellkompilierung zur Weiterverarbeitung des Modells in verschiedenen kommerziellen Mehrkörpersimulationssoftware. Modelle in PREMBS werden nach einer besonderen Struktur definiert, um ein erhöhtes Maß an Flexibilität in der Modellbildung zu erreichen. Durch eine parametrisierte Modellbildung werden eine vereinfachte Anpassung der Struktur sowie des Detaillierungsgrads des Modells an sich ändernde Randbedingungen ermöglicht. Die Definition eines Modells soll in gewisser Weise ein Baukastenprinzip erlauben und unterteilt sich in Submodelle, welche in einer Assembly-Datei zusammengefügt werden, die das Gesamtsystem beschreibt. Submodelle wiederum werden durch das Zusammenwirken einer Subsystem-Datei und einer Template-Datei definiert. Die Template-Dateien beschreiben die Struktur und Topologie eines Submodells in Abhängigkeit von bestimmten Parametern und Raumpunkten. Diese Parameter und Raumpunkte, die in einer Template-Datei verwendet werden, sind in einer Subsystem-Datei mit Werten und Koordinaten belegt. Daraus resultiert, dass ein Submodell mit Hilfe der Verbindung zwischen Subsystem-Datei und Template-Datei vollständig beschrieben ist. Mit Hilfe von PREMBS konnte die Erstellung von einem Mehrkörpermodell eines Klappensystems, dargestellt in Abbildung 6, in MSC.ADAMS erheblich vereinfacht werden.

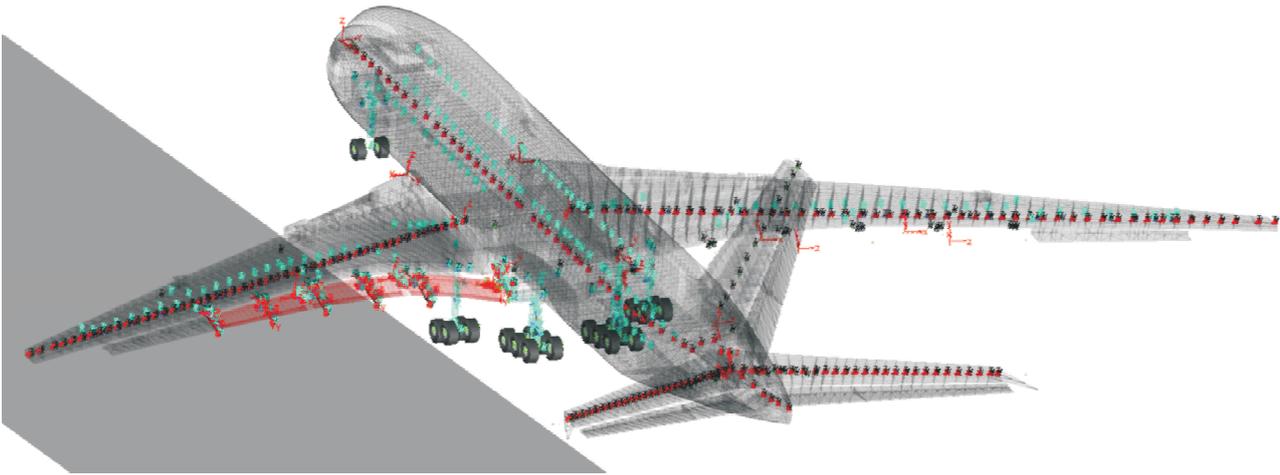


ABBILDUNG 6: Mehrkörpermodell eines Klappensystems in MSC.ADAMS

Mit Hilfe der Mehrkörpersimulation ist eine vollständige Beschreibung der Bewegung eines Klappensystems sowie eine Bestimmung der operativen Lasten möglich. Es lassen sich hieraus die relevanten Betriebswerte für das Klappenantriebssystem entnehmen. Das Antriebssystem selber, insbesondere das spezifische Verhalten der Antriebseinheit, ist in MSC.ADAMS allerdings nur sehr eingeschränkt abbildbar. Hierfür eignen sich eher Systemsimulationsprogramme, wie z.B. MATLAB-SIMULINK oder DYMOLA. Diese können ggf. mit einem geeigneten Kinematikmodell gekoppelt werden. Aufgrund der weit verbreiteten Anwendung wird auf die Systemsimulation an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen.

5 Controller- und Diagnose-Konzepte

Parallel zum Entwurf und der Bewertung geeigneter Systemarchitekturen für ein neuartiges Hochauftriebssystem müssen geeignete Controller-, Monitoring- und Diagnose-Konzepte entwickelt werden. Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, wie solche Systeme modellbasiert entwickelt und mit Hilfe einer Modellbibliothek der Systemkomponenten bewertet und validiert werden können.

5.1 Multidisziplinäre Modellbibliotheken

Für die Modellierung von Systemkomponenten eines neuartigen Hochauftriebssystems werden am Institut für Flugzeug-Systemtechnik die Werkzeuge Matlab/Simulink/SimScape und Dymola verwendet. Diese sind dazu geeignet, insbesondere multidisziplinäre Gesamtsystemsimulationen aufzubauen. Die Matlab Toolbox SimScape sowie Dymola basieren auf einem akasalen Modellierungsansatz, der eine objektorientierte Darstellung physikalischer Systeme erlaubt. Alle mathematischen Gleichungen, die das physikalische Verhalten einer Komponente darstellen, können in einem Block abgelegt werden. Die Verknüpfung der Blöcke erfolgt anschließend über ungerichtete Kanten, die Domains bzw. Interfaces genannt werden. Dort müssen alle erforderliche Potential- und Flussgrößen definiert werden. Bei der Wellentransmission eines Hochauftriebssystems stellt die Winkelge-

windigkeit der Welle zum Beispiel die Potentialgröße dar und das übertragene Moment die Flussgröße. Neben der Domain-spezifischen Kopplung der Blöcke, werden diese zudem mit gerichteten Ein- und Ausgängen versehen, die Stell- und Messgrößen darstellen. Die generischen Modelle können anschließend zu einer Modellbibliothek zusammengefügt werden, die es im Weiteren erlaubt, das entworfene Hochauftriebssystem in einer Gesamtsystemsimulation zusammen mit dem Verhalten auf Flugzeugebene zu betrachten.

5.2 Regelungs- und Steuerungs-Entwicklung

Ein wichtiger Bestandteil der Systementwicklung ist der Entwurf und die Validierung geeigneter Regelungs- und Steuerungssysteme. Dieser Entwurfsschritt sollte möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess von Hochauftriebssystemen durchgeführt werden. Gerade bei komplexen Automatisierungssystemen kann eine frühzeitige Fehlervermeidung zu einer signifikanten Reduzierung von Entwicklungskosten beitragen. Im Bereich von Hochauftriebssystemen ist neben der dynamischen Regelung der Klappenposition auch die Realisierung von zustandsbasierten Steuerungen erforderlich, die den Betriebsmodus und somit die Sollwerte für die dynamischen Regelungen einstellen. Zudem sind Software-Komponenten für die Überwachung des Systems erforderlich, die im Fehlerfall den Piloten benachrichtigen und ggf. das System in eine sichere Position verfahren. Der Entwurf und die Validierung der spezifizierten Funktionen können im Fall von dynamischen Regelungssystemen mit Hilfe von Matlab/Simulink erfolgen. Zustandsbasierte Steuerungen und Überwachungsapplikationen werden als Zustandsautomaten modelliert und mit dem Simulink Design Verifier validiert.

5.3 Modellbasierte Diagnose

Mit steigender Komplexität und zunehmendem Funktionsumfang neuartiger Hochauftriebssysteme steigen neben den funktionellen auch die operationellen Anforderungen in der Entwicklung und dem Betrieb. Um einen kosteneffektiven Wartungsprozess verbunden mit minimierten fehlerbedingten Standzeiten zu gewährleisten und darüber

zur ökonomisch vorteilhaften Integration neuer Technologien in das System Flugzeug beizutragen, bedarf es einer systematischen, methodisch gestützten Einbettung der Systemdiagnose¹ in den allgemeinen Produktentwicklungsprozess. In den vorherigen Abschnitten wurde ein Überblick zu einzelnen Phasen des modellbasierten Prozesses vorgestellt. Dieser beinhaltet in seiner Gesamtheit sowohl die Entwicklung als auch den Nachweis neuer Technologien. Im Folgenden wird erläutert, wie der Aspekt der Systemdiagnose in diesen Prozess integriert wird.

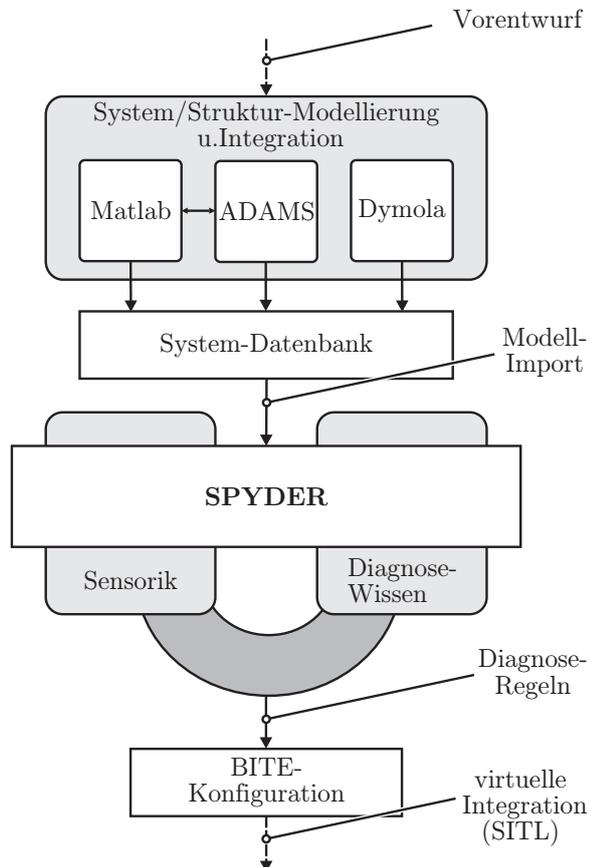


ABBILDUNG 7: Integration der Systemdiagnose in den modellbasierten Entwicklungsprozess

Am Institut für Flugzeug-Systemtechnik werden drei wesentliche Fragestellungen der Systemdiagnose betrachtet. Diese umfassen die optimierte Auswahl von Sensorik und Konzeption von Monitoren, die modellbasierte Ableitung von Diagnosewissen, sowie die Entwicklung eines Diagnosesystems. Um diese Aspekte in Form eines modellbasierten Ansatzes softwaretechnisch zu unterstützen, wird das Werkzeug SPYDER (Software Package For SYstem Diagnosis EngineeRING) entwickelt. Die Schwerpunkte von SPYDER sind die optimierte Platzierung von Sensorik und Konfiguration von Monitoren, sowie die modellbasierte Ableitung von Diagnosewissen. Beide Aspekte werden im Folgenden vorgestellt.

Eine optimierte Sensorkonfiguration ist eine minimale Konfiguration, die es einerseits ermöglicht alle potentiellen Komponentenfehler auf Systemebene zu detektieren, sowie andererseits für eine anforderungsorientierte Fehlerisolation notwendig ist. Korrespondierend hierzu weist eine optimierte Konfiguration von Monitoren keine Unterdeckung, sowie eine minimale Überdeckung auf. Über den Aspekt des Monitorings wird die Schnittstelle zur modellbasierten Ableitung von Diagnosewissen dargestellt. Dies wird in Form von Diagnoseregeln abgebildet. Allgemein stellen diese Regeln einen kausalen Zusammenhang zwischen Beobachtungen und erklärenden Ursachen dar. In der Anwendung dienen die Diagnoseregeln dazu, Wartungsmaßnahmen durch präzise Fehlermeldungen mit minimal möglichen Fehlerursachen zu optimieren und dadurch Kosten zu senken.

In Abbildung 7 ist der modellbasierte Prozess für den Aufbau diagnostischer Fähigkeiten schematisch dargestellt. Der Ausgangspunkt wird durch den Abschluss der nominalen Modellierung gebildet. Die entwickelten Systemmodelle werden in einer Datenbank gespeichert um sie anschließend direkt in SPYDER weiterverwenden zu können. Dies hat zum Ziel die modellbasierte Entwicklungskette zu schließen. Durch eine direkte Weiterverwendung von Simulationsmodellen entfällt eine arbeitsintensive, erneute Modellierung des jeweiligen Systems für diagnostische Fragestellungen.

Zusammenfassend besteht das Ergebnis des geschilderten Prozesses in Diagnoseregeln für optimierte Sensor- und Monitoringkonfigurationen. Die Regeln werden in einer Datenbank gespeichert und können im nächsten Schritt für die Konfiguration des BITE (**B**uild **I**n **T**est **E**quipment) verwendet werden. Anschließend kann die entwickelte Systemüberwachung virtuell integriert werden, um sie durch Software-In-The-Loop (SITL) zu testen und zu validieren.

6 Virtuelle Integrationsplattform VIPER

Der rechte Zweig im V-Modell beinhaltet im klassischen Entwicklungsprozess die Integration aller Komponenten zu einem Gesamtsystem und die erforderlichen Funktionstests. Die Integration beinhaltet zunächst neben dem Verbinden aller Systemkomponenten auch die Verkopplung des Gesamtsystems mit der Controller-Hardware über Bussysteme. Der Integrationstest soll die spezifizierten Gesamtsystemfunktionen nachweisen, die aus der Kombination von den Systemkomponenten mit den implementierten dynamischen Regelungen sowie allen Steuerungs- und Monitoring-Applikationen realisiert werden. Zudem hat der Integrationstest zum Ziel, ein System wie das Hochauftriebssystem im Verbund mit benachbarten Flugzeugsystemen und der Umgebung zu testen. Das Hochauftriebssystem ist zum Beispiel abhängig von einer hydraulischen oder, im Rahmen von neuartigen Konzepten, von einer elektrischen Leistungsversorgung. Zudem interagieren die Klappen mit der Umgebung und sind somit zusätzlich von

¹Der Begriff der Diagnose umfasst in diesem Kontext die Fehlerdetektion und die anschließende Isolation möglicher Ursachen.

der Lage des Flugzeuges und der Flugphysik beeinflusst. Der Integrationstest soll folglich auch nachweisen, dass zwischen der Umgebung und den integrierten Flugzeugsystemen keine unerwünschten Wechselwirkungen vorhanden sind, die in einem kritischen Betriebszustand zu einem Gesamtsystemversagen führen können.

Alle Fehler, die im Rahmen von Integrationstests identifiziert werden, können im klassischen Entwicklungsprozess zu hohen Kosten führen, da bereits vorhandene Systemprototypen und Controller-Hardware ggf. angepasst werden müssen. Aus diesem Grund wird bei der Entwicklung von neuartigen Hochauftriebssystemen verstärkt der Ansatz der virtuellen Integration angewendet. Dadurch ist es möglich, Fehler frühzeitig zu identifizieren, die aus der Interaktion von der Umgebung mit Flugzeugsystemen inklusiver der beteiligten Controller-Applikationen resultieren. Die Korrektur der Fehler kann somit erfolgen, bevor ein Systemprototyp entstanden ist. Die frühzeitige Fehlervermeidung führt zu deutlich reduzierten Entwicklungskosten.

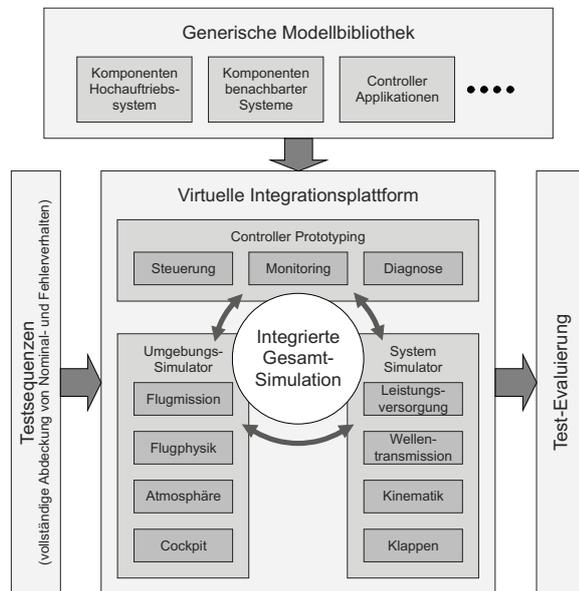


ABBILDUNG 8: Verwendung der virtuellen Integrationsplattform VIPER

Die virtuelle Integration bildet die systematische Fortführung des modellbasierten Entwicklungsprozesses. Dabei werden Modellbibliotheken, die bereits während der Systemauslegung und der Steuerungsentwicklung entstanden sind, verwendet und für virtuelle Integrationstests erweitert. Die erste Herausforderung besteht darin, generische Modelle aller beteiligten Systeme in einer numerisch stabilen Gesamtsystemsimulation zu vereinigen. Die Modelle werden mit Systemparametern geladen, die in der Phase der Systemauslegung ermittelt wurden. Dazu zählen zum Beispiel die Klappen- und Kinematik-Geometrie sowie Parameter der Wellentransmission. Die integrierte Gesamtsystemsimulation wird anschließend mit den Controller-Applikationen und einer Umgebungssimulation gekoppelt. Die zweite Herausforderung ist in der Realisierung eines vollständigen Integrationstests zu se-

hen. Die virtuelle Integration ermöglicht es, neben dem Nominalverhalten auch beliebige Fehlerzustände des Systems zu betrachten, die bei einem realen Prüfstand zu Schäden führen würden. Folglich kann bei der virtuellen Integration eine signifikant höhere Testabdeckung als bei einem realen Test erreicht werden.

Als Grundlage für den virtuellen Integrationstest können die Testsequenzen verwendet werden, die bereits für die Validierung einzelner Controller- und Monitoring-Applikationen definiert wurden. Gerade Testsequenzen im Bereich der Monitoring-Applikationen basieren häufig auf Systemfehlern, die nur virtuell getestet werden können. Abbildung 8 zeigt den Aufbau der virtuellen Integrationsplattform VIPER (Virtual Integration Platform for Education and Research), die am Institut für Flugzeug-Systemtechnik entwickelt wird. Die Architektur des Hochauftriebssystems wird auf Basis der Modellbibliothek zusammenstellt und anschließend als echtzeitfähiges Modul an die virtuelle Integrationsplattform übergeben. Dort wird dieses Modell mit den Controller-Applikationen und den Umgebungsmodellen verschaltet. Anschließend werden systematisch definierte Testsequenzen ausgeführt und das integrierte Systemverhalten beobachtet und ausgewertet. Auf diese Weise können Fehler identifiziert und anschließend korrigiert werden. Die virtuelle Integration kann allerdings die Demonstration der Funktionen an einem realen Prüfstand nicht ersetzen, sondern sie dient zur Fehlervermeidung bei realen Integrationstests.

7 HITL-Simulation zum Nachweis neuer Technologien

Für Weiterentwicklungen von Komponenten bzw. Funktionalitäten eines Hochauftriebssystems müssen die zuvor im modellbasierten Entwurfsprozess gewonnenen Erkenntnisse mit den Untersuchungen an einem möglichst realitätsnahen Experimentalsystem validiert werden. Als Beispiel für eine kürzliche erfolgte Untersuchung von neuen Funktionalitäten eines Hochauftriebssystems, sei an dieser Stelle die Integration eines Schräglauf-Detektionssystems (engl. *skew-detection-system*) an der Flügelvorderkante zu nennen. Die Klappenfläche eines Vorflügels wird in der Regel von zwei Antriebsstationen geführt und bewegt, welche beide über das Wellentransmissionssystem angetrieben werden. Eine gleichmäßige Flügelvorderkante bei Ein- und Ausfahrvorgängen wird bei der Verfahrbewegung durch ein abgestimmtes Verhältnis der Übersetzungen der Rotationsaktuatoren sowie der Radien der Führungsschienen gewährleistet. Um Schäden bei verhältnismäßig kleinen Asymmetrien der Verfahrwege im Nominalverhalten zu verhindern, sind die Kinematiken der Anbindungen der Klappenflächen an die Führungsschienen in einer Master/Slave-Anordnung ähnlich einer Fest-Los-Lagerung ausgeführt, dargestellt in Abbildung 9. Im Zuge einer strengeren Auslegung der Zulassungsvorschriften wurden die Anforderungen an die Systemzuverlässigkeit von Hochauftriebssystemen für ein betrachtetes Vorflügelsystem eines neuen Langstreckenflugzeuges verschärft. So sind nun Fehlerfälle zu berücksichtigen, welche mit den bisherigen Sicherheitseinrichtungen in Hochauftriebssystemen nicht de-

tektiert werden können. Dies sind im Wesentlichen mechanische Fehler innerhalb der Rotationsaktuatoren, welche zu großen Asymmetrien der Stellwege zweier Abtriebsstationen einer Klappenfläche führen können. Der daraus resultierende Schräglauf einer Klappenfläche ist ein sicherheitskritischer Fall, da hierbei die Struktur des Vorflügel-systems und der primären Flugsteuerung beschädigt werden kann. Da für den zuvor beschriebenen Fehlerfall des Schräglauflens einer Klappenfläche keine gewichtsoptimalen Lösungen auf struktureller oder systemtechnischer Ebene bekannt sind, muss das Vorflügel-system um ein entsprechendes Schräglauferkennungssystem (engl. *skew detection system*) erweitert werden.

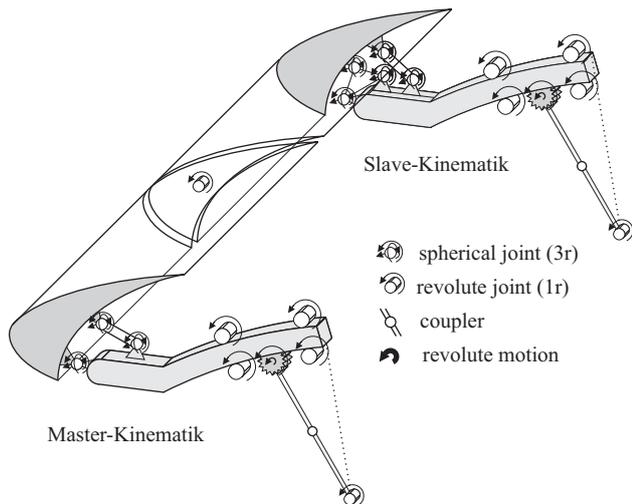


ABBILDUNG 9: Räumliche Darstellung des Vorflügel-Führungsmechanismus

Am Institut für Flugzeugsystemtechnik wurden Konzepte zur Integration einer Schräglauferkennung in das Hochauftriebssystem eines neuen Langstreckenflugzeugs untersucht. Als Randbedingungen stand neben einer zuverlässigen und robusten Fehlererkennung ebenso die Forderung nach einem sensorminimalen Konzept mit maximal einem zusätzlichen Sensor pro Flügelhälfte. Ausgewählt wurde zunächst ein bewährtes Konzept von BOEING, welches bis November 2014 patentrechtlich geschützt ist. Dieses nutzt eine Kabelführung entlang der Klappenflächen, um Relativbewegungen zwischen diesen im Falle eines Schräglaufls durch einen Linearsensor zu detektieren. Des Weiteren wurde ein Konzept mit einer modellbasierten Fehlererkennung entworfen und untersucht, welches eine Weiterentwicklung des Konzepts einer Kabelführung darstellt und die Nachteile einer erschwerten Fehlerdetektion an außen gelegenen Abtriebsstationen kompensieren soll. Dazu führt ein Kabel von einer Verankerung im Flügelkasten durch die Klappenflächen in eine Konstruktion am Flügelkasten, welche die Änderung der Kabelstrecke erfasst. So kann aus dem Abgleich des modellbasierten Nominalverhaltes und den Messwerten eine Fehlerdetektion erfolgen. Um die Konzepte auf ihre Eignung für den Einsatz in einem neuen Langstreckenflugzeug zu untersuchen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein entsprechendes Mehrkörper-

Simulationsmodell des Vorflügel-systems in MSC.ADAMS unter Zuhilfenahme von PREMBS erstellt. Mit Hilfe der Simulation von unterschiedlichen Belastungszuständen des Tragflügels konnte modellbasiert der Nachweis erbracht werden, dass durch eine frühzeitige Fehlererkennung maximale Klappenwinkeldifferenzen von wenigen Winkelgrad nicht überschritten wurden. Für den Nachweis einer neuen Technologie müssen nun weitere Untersuchungen an einem möglichst realitätsnahen Experimentalsystem erbracht werden. Ein mögliches Experimentalsystem für derartige Untersuchungen stellt ein am Institut für Flugzeugsystemtechnik befindliches Klappenpaar dar, wobei das Antriebssystem einer Klappe als reales System ausgeführt ist, dargestellt in Abbildung 10. Das Antriebssystem der anderen Klappe ist für reproduzierbare Umgebungs- und Anfangsbedingungen als Echtzeit-Simulationsmodell ausgeführt. Durch die Integration beispielsweise der zu testenden Sensorik eines *skew-detection-systems* in eine Nachbildung der technischen Umgebung werden realistische und ausführbare Hardware-Tests (Hardware-in-the-Loop) ermöglicht. Auf diese Weise könnten Testergebnisse früher, kostengünstiger und umfassender erzielt werden. Als wichtige Aussagen aus diesen Untersuchungen sind die Güte der Fehlerdetektion und der darin verwendeten Monitoring-Konzepte zu nennen. Des Weiteren ist der Einfluß der zuvor modellbasiert ermittelten Sensitivität der Fehlerdetektion auf die Belastungen im Antriebssystem, den Anbindungs-kinematiken sowie der Klappenfläche zu untersuchen.

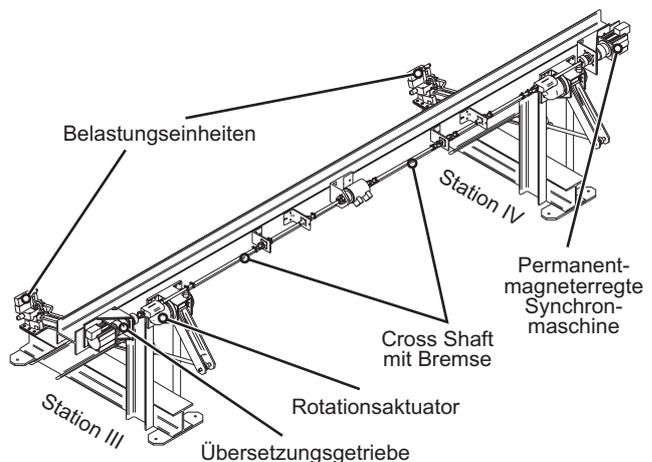


ABBILDUNG 10: Versuchsstand eines Einzelklappenantriebes [4]

8 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag erläutert Möglichkeiten einer optimierten Systementwicklung durch einen modellbasierten Entwicklungsprozess im Bereich von Hochauftriebssystemen. Dieser im Allgemeinen stark iterative und interdisziplinäre Prozess ist durch einen hohen Zeitaufwand sowie durch einen hohen Bedarf an Erfahrung seitens der Systemingenieure geprägt. Mit dem Ziel eines rechnergestützten Entwurfsprozesses wurden hierfür am Institut für Flugzeugsystemtechnik eine Prozeß- und Werkzeugkette ent-

wickelt. Mit Hilfe des Vorentwurfwerkzeuges WISSBASYS können bereits in den frühen Entwurfsphasen aus den Anforderungen und Randbedingungen auf Flugzeugebene erste Konzeptentwürfe erstellt sowie Wertebereiche für systemspezifizierende Kennwerte eines Hochauftriebssystems ermittelt werden. Für die Auslegung der Klappenführungsmechanismen auf Systemebene bietet das Werkzeug TEFLAMES die Möglichkeit einer teilautomatisierten Kinematiksynthese mit Vorgabe spezifischer Randbedingungen. Detaillierte Auslegungen und räumliche Analysen der Kinematiken erfolgen dann im Rahmen von Mehrkörpersimulationen in MKS.ADAMS. Die Modellbildung wird dabei durch das Werkzeug PREMBS unterstützt, um durch eine parametrisierte Modellerstellung den Aufwand für sich wiederholende Arbeitsschritte zu reduzieren sowie Änderungen am Modell zu vereinfachen. Einen modellbasierten Ansatz zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit in Abhängigkeit der Analysezeit sowie die Durchführung von Importanzanalysen und einer mehrkriteriellen Optimierung stellt das Werkzeug SYRELAN dar. In Abstimmung mit dem vorhandenen Systementwurf kann durch Nutzung des Werkzeuges SPYDER eine optimierte Auswahl der Sensorik, eine Auslegung von Monitorfunktionen sowie eine modellbasierte Entwicklung von Diagnoseregeln erfolgen. Abschließend bietet die virtuelle Integrationsplattform VIPER die Möglichkeit eines Integrations-test des Gesamtsystems.

LITERATUR

- [1] PFENNIG, M.; THIELECKE, F.: Konzepte und Methoden für eine rechnergestützte Auslegung der Antriebssysteme von Hochauftriebssystemen, In: *DGLR Jahrestagung - Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. Darmstadt, 2008.
- [2] PFENNIG, M.; THIELECKE, F.: A Knowledge-Based Approach for Design and Modelling of High Lift Actuation Systems, In: *Journal of Aerospace Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G 225(2011)*, Nr. 3, S. 302-311.
- [3] GÜLZAU, H. 2009, *Eine Methode zur Analyse der Dynamik von räumlichen Landeklappenmechanismen in Fehlerfällen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik, Shaker Verlag.
- [4] GEILSDORF, H. 2009, *Modellbasierter Entwurf der Synchronisationsregelung und Fehlerüberwachung elektrischer Einzelantriebe in Landeklappensystemen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik, Shaker Verlag.
- [5] HOLERT, B., *Eine Methode zum mehrkriteriellen Entwurf der Führungsmechanismen in Hochauftriebssystemen von Transportflugzeugen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Flugzeug-Systemtechnik, Dissertation, 2006.
- [6] REULEAUX, *Der Constructeur*, Viehweg, Braunschweig, 1872.
- [7] VAHL, A. 1998, *Interaktive Zuverlässigkeitsanalyse von Flugzeug-Systemarchitekturen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., Fortschrittsberichte VDI, Volume 10, Issue 565, Düsseldorf.
- [8] REHAGE, D. 2009, *Zustandsmodellierung- und Zuverlässigkeitsanalyse fehlertoleranter Systemarchitekturen auf Basis Integrierter Modularer Avionik*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation.
- [9] RAKSCH, C., THIELECKE, F. 2009, *Multiobjective Optimization of Fault-Tolerant Aircraft Systems Considering System Degradation*. European Safety and Reliability Conference, Prag, Tschechien, 7.-10. September 2009.