DIGITALE INNOVATIONEN IN DER FLUGZEUGKABINEN-ENTWICKLUNG

M. C. Berschik, F. Laukotka, M. Hanna, L. Schwan, D. Krause, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Zukünftig wird die Flugzeugkabine ein noch individuelleres Produkt für die Airlines und den Passagieren sein, als sie es heute bereits ist. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse verschiedene Forschungsprojekte die sich mit der Kabinenentwicklung in verschiedenen Produktlebensphasen der Kabine beschäftigen dargestellt. Es wird der Mehrwert und die Herausforderungen der Nutzung von Systemmodellen beschrieben und der Bedarf für eine ganzheitliche Betrachtung über die Grenzen der beteiligten Bereiche und Lebensphasen herausgestellt.

Keywords: Digitalisierung, Flugzeugkabinenentwicklung, Modellbasierte Ansätze, Lebenszyklus, Varianz

1. MOTIVATION

Aufgrund des zunehmenden Wettbewerbs im Transportsektor sind die Fluggesellschaften motiviert, ihren Kunden wettbewerbsfähige Preise, höhere Zuverlässigkeit und mehr Komfort zu bieten. Um sich von der Konkurrenz abzuheben, wird die Flugzeugkabine der Zukunft ein noch individuelleres Produkt für die Fluggesellschaft und den Passagier sein, als sie es heute bereits ist. [1] Gleichzeitig spielt die Nachhaltigkeit eine zunehmend größere Rolle. Daraus resultieren verschiedene Herausforderungen für die Hersteller von Passagierflugzeugen und Flugzeugkabinen in den unterschiedlichen Produktlebensphasen. Beispielsweise lassen sich hier die gegensätzlichen Anforderungen, die unzureichende oder unvollständige Dokumentationsgrundlage für Retrofit-Betriebe sowie teure und zeitaufwändige Änderungen im späteren Verlauf der Entwicklung nennen. All diese Herausforderungen zeichnen sich durch eine hohe Bedeutung von Daten, Informationen und insbesondere auch deren Verknüpfung aus. Diese weisen gerade im Kontext der fortschreitenden Digitalisierung noch viel Potential auf. Gleichzeitig ist besonders in der Luftfahrt durch die strikten Zertifizierungsprozesse, vielen Stakeholder und das komplexe Gesamtsystem die Skalierung bzw. durchgängige Abbildung auch über verschiedene Abteilungen und Domänen hinweg noch nicht vollständig abgebildet. Entsprechend sind in diesem Bereich modellbasierte Ansätze vielversprechend, wie sie in anderen Domänen und Anwendungsfeldern auch bereits erprobt sind und zunehmend zum Einsatz kommen. [2]

Es gibt eine Vielzahl an Anwendungsfällen, in denen der Weg von überwiegend dokumentenbasierten Prozessen bei der Flugzeugkabinenentwicklung hin zu einer modellbasierten Unterstützung einen vielversprechenden Ansatz darstellt, da er explizit an den Schwachstellen des momentanen Vorgehens Abhilfe schafft. Gleichzeitig ergeben sich durch diese Ansätze weiterer Herausforderungen die im Rahmen der Forschung geklärt werden müssen.

In diesem Paper werden daher Fortschritte in einzelnen Bereichen, sowie anschließend die Idee eines lebensphasenübergreifenden Ansatzes zur Digitalisierung der gesamten Flugzeugkabinenentwicklung vorgestellt.

2. AKTUELLE FORSCHUNGSANSÄTZE

Im Rahmen der Digitalisierung und den damit verbundenen Herausforderungen forscht das Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) in verschiedenen Forschungsprojekten an unterschiedlichen Bereichen der Kabinenentwicklung. Zum einen in der frühen Phase der Produktentwicklung, wobei hier vor allem ein Fokus auf den teilweise konträren Zielen des Leichtbaus und der Modularisierung sowie Individualisierung liegt. Als zweiter Bereich wird die späte Phase der Produktentstehung betrachtet, in der insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklung, Produktion und Montage als ein großer Kostentreiber gilt und eine Verknüpfung dieser Teilbereiche fehlt. In einem dritten Bereich wird die nachgelagerte Produktentstehung betrachtet. In diesem Bereich stehen die verfügbaren Daten bei der Maintenance, Repair and Operations (MRO) im Mittelpunkt der Forschung. Durch die modellbasierte Unterstützung der Etablierung Digitaler Zwillinge kann hier die Entwicklungsarbeit von Kabinenanpassungen im Zuge des Retrofits verbessert werden. [2] Diese dargelegten Phasen der Produktentstehung und -nutzung sowie die Forschungsaktivitäten des PKT sind in Abbildung 1 gezeigt. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die verschiedenen Projekte näher eingegangen und im Anschluss der Mehrwert und die Herausforderungen der Zusammenführung der verschiedenen Ansätzen zur Digitalisierung besprochen.

©2022

doi: 10.25967/570357

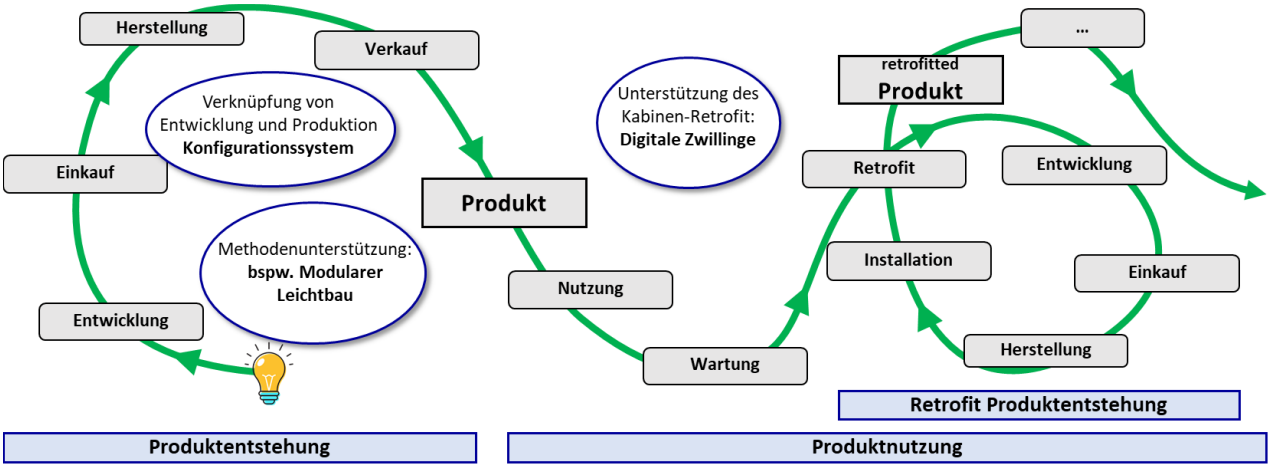

BILD 1. Abbildung des Kabinenlebensprozesses mit den betrachteten Forschungsaspekten

2.1. Modellbasierter Modularer Leichtbau

Im Folgenden wird der modellbasierte Modulare Leichtbau vorgestellt, wobei in Kapitel 2.1.1 auf die entsprechenden Herausforderungen in der Flugzeugkabinenentwicklung eingegangen und der Modulare Leichtbau als Lösungsansatz eingeführt wird. In Kapitel 2.1.2 wird die modellbasierte Umsetzung des Modularen Leichtbaus aufgezeigt.

2.1.1. Herausforderungen und Ansatz

Herausforderung in der Produktentwicklung von Flugzeugkabinen

Monumente in der Flugzeugkabine, wie Flugzeug-Galleys -Lavatories oder Gepäckfächer sind Bereiche, in denen die Produktarchitektur weiterentwickelt wird. Bei der Entwicklung von Flugzeugkabinen müssen dabei zwei gegensätzliche Anforderungen erfüllt werden. Einerseits gilt es, eine hohe Vielfalt aufgrund individueller Kundenwünsche der Fluggesellschaften anzubieten und andererseits eine Gewichtsreduktion durch Leichtbau zu erzielen. [3]

Um den Airlines eine hohe Vielfalt anbieten zu können, sind in der Flugzeugkabinenindustrie dabei Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien, wie der Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien, ideal, um die individuellen Kundenanforderungen der Airlines mit einer möglichst geringen Anzahl von internen, varianten Komponenten zu erfüllen und dabei insbesondere unterschiedliche Ziele verschiedener Lebensphasen zu berücksichtigen. Da eine modulare Produktarchitektur aufgrund der Standardisierung von Schnittstellen allerdings oft zu einer Überdimensionierung führen kann, haben sie u.a. ein höheres Gewicht, und sind damit möglicherweise schwerer als nötig. Dies wirkt beispielsweise dem Ziel des Leichtbaus entgegen, Produkte leichter zu machen und Emissionen einzusparen. [2]

Herausforderung des Datenmanagements in der methodischen Produktentwicklung

Darüber hinaus ist insbesondere in der Flugzeugentwicklung die Anzahl an Daten in den letzten Jahren stark angestiegen ist, was zu einer vermehrten Nutzung modellbasierter Ansätze geführt hat [4]. Da der Integrierte PKT-Ansatz, wie auch bei anderen Methoden in der Produktentwicklung, dokumentenbasiert durchgeführt wird, kann keine Daten-Durchgängigkeit gewährleistet werden und es kann zu redundanten Informationsquellen kommen. Vorhandene Modelle, wie CAD- oder FE-Modelle, sind dadurch nicht konsistent und führen dazu, dass Änderungen aufwändig und fehleranfällig sind. In der Methodenanwendung werden die benötigten Informationen ebenfalls nur in Dokumenten abgelegt und vorhandene Modelle einzelner Methodenschritte sind, sofern vorhanden, nicht softwaretechnisch miteinander verknüpft. Beispielsweise werden im Integrierten PKT-Ansatz unterschiedliche Visualisierungswerkzeuge mit verschiedenen Datenelementen verwendet, die aber nicht miteinander verknüpft sind. [2, 5]

Im Rahmen des Konsistenzmanagements kann die Modelltheorie durch die Verwendung eines Datenmodells hierbei Abhilfe schaffen. Dabei kann die software-unterstützte Umsetzung eines Datenmodells durch Werkzeuge des MBSE ermöglicht und somit die digitale Entwicklung modularer Produktfamilien von Flugzeugkabinen in einem SysML-Modell erreicht werden.

Modularer Leichtbau als methodischer Ansatz zur Lösung des Zielkonfliktes der Flugzeugkabine

Um die dargestellten, konträren Ziele parallel zu erreichen, wurde der Modulare Leichtbau (engl. Modular Lightweight Design (MLD)) eingeführt [6], welcher sich dadurch auszeichnet, dass die Modularisierung und der Leichtbau gleichzeitig berücksichtigt werden, um ein neues Design zu erstellen. Die Harmonisierung der beiden Bereiche kann dabei mit Methoden des MLD ermöglicht werden, bei welchen die Prozessstruktur berücksichtigt wird und auch das Datenmanagement durch die Implementierung

konsistenter Produkt- und Prozessmodelle in SysML verbessert ist. Das MLD bietet die Möglichkeit, eine hohe externe Vielfalt einer Produktfamilie anzubieten und gleichzeitig das Leichtbaupotenzial zu nutzen. Dabei können standardisierte Prozesse und integrierte Daten die Entwicklung neuer Varianten beschleunigen, die Fehleranfälligkeit reduzieren und die Durchführung eines Innovationsprozesses vereinfachen.

Das MLD wurde bereits für Flugzeugkabinen im Rahmen des Forschungsprojektes MICHEL[1] erforscht und ein sechsschrittiger Prozess entwickelt [7]. Dabei ist insbesondere der iterative Charakter hervorzuheben. Die Leichtbauoptimierung und die Entwicklung einer modularen Produktarchitektur stehen hier gleichberechtigt nebeneinander und werden in Einklang gebracht, um die optimale Granularität zwischen den beiden Bereichen erreichen zu können. Mit diesem Ansatz kann somit ein Kompromiss zwischen den beiden Bereichen erreicht und die Überdimensionierung der Schnittstellen und damit das Gewicht minimiert werden.

2.1.2. Modellbasierte Umsetzung

Im Modularen Leichtbau ist die Herausforderung des Datenmanagements besonders gegeben, da hier neben den methodischen Daten ganzer Produktfamilien auch die Daten der Leichtbauoptimierung zusammengebracht werden müssen und gleichzeitig die Konsistenz gewahrt bleiben muss.

Dieses Problem wird mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes versucht zu lösen. Dabei wird SysML als zentrale DB und *single source of truth* eingesetzt [4]. Auf Produktmodellebene werden die Werkzeuge des Integrierten PKT-Ansatzes einerseits konsistent modelliert, andererseits der zugrundeliegende methodische Prozess des MLD durchgängig abgebildet. Anschließend erfolgt die Anknüpfung an die FEM-Daten für die leichtbauoptimierte Flugzeugkabine.

Modellierung methodischer Daten der Flugzeugkabine

Die im Rahmen des Integrierten PKT-Ansatzes entwickelten Werkzeuge sind im Cameo-System Modeler modelliert und entsprechend angepasst.

Die Anwendung für die Flugzeugkabine zeigt, wie eine variantengerechte Produktgestaltung und die Lebensphasenmodularisierung umgesetzt werden kann. Externe und interne Vielfalt werden erfasst, dargestellt und mit den verschiedenen Diagrammtypen in SysML implementiert. Darauf aufbauend kann ein variantengerechtes Konzept entwickelt werden. Dabei sind die methodischen Daten als Elemente durch Abhängigkeiten miteinander verbunden. Im Variety Allocation Model wird einerseits die externe Vielfalt, die durch die Kundenwünsche der Airlines an die Flugzeugkabine gestellt werden, aufgenommen. Andererseits wird die interne Vielfalt für die Umsetzung der externen Vielfalt in Form der varianten Wirkprinzipien, Funktionen und Komponenten der Flugzeugkabine dargestellt und miteinander verknüpft. Durch die Verwendung eines konsistenten Datenstamms können alle individuellen Elemente, wie die Komponenten, über die verschiedenen Zustände und Werkzeuge konsistent über alle Modelle und Instanzen gehalten werden.

Dies unterstützt und vereinfacht die Harmonisierung unterschiedlicher Flugzeugkabinenlebensphasen erheblich, da durch die Durchgängigkeit über die anderen Modelle auch die davon betroffenen Modelle geändert werden und somit eine konsistente Anpassung der Modulzuordnung erfolgt. [5]

Modellierung des methodischen Vorgehens des MLD

Als Grundlage wird eine datengetriebene Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodellen für Methoden verwendet. Um diese innerhalb der Methode des Modularen Leichtbaus zu etablieren, wurden die sechs Hauptschritte im Hinblick auf mögliche Inkonsistenzen und Verknüpfungen analysiert. Dabei ist es besonders wichtig, welche Eingangs- und welche Ausgangsdaten in jedem dieser Schritte benötigt bzw. erzeugt werden. Anhand dieser Informationen kann die Verbindung zwischen dem Prozess- und dem Produktdatenmodell hergestellt werden. Mit dieser Verknüpfung kann die Konsistenz und Kontinuität der Daten verbessert werden, da Verwendungen und Änderungen in einem Schritt auf andere relevante Schritte zurückgeführt werden können.

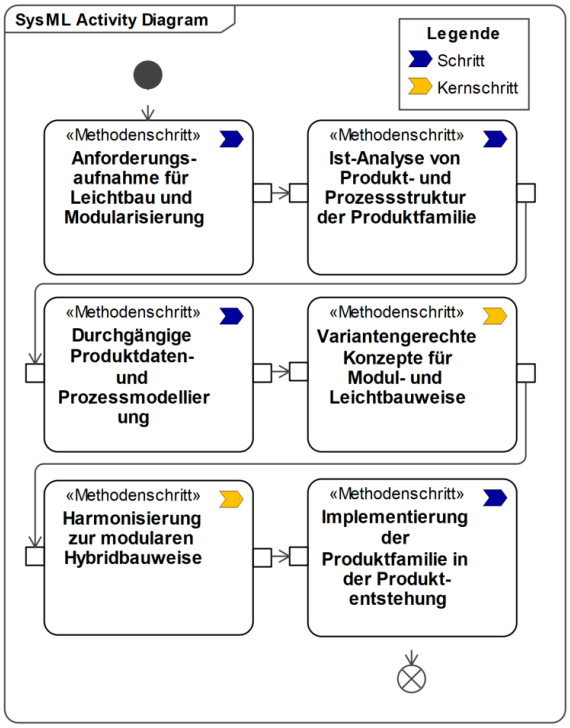

BILD 2. Darstellung des Vorgehens des Modularen Leichtbaus modelliert in SysML, basierend auf [7]

[1]* MICHEL - Multifunktionales Leichtbaudesign für variabel konfigurierbare Monumente, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des fünften zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO V-3). In Kooperation mit u.a. Lufthansa Technik, Airbus und Diehl Aviation

Da die Daten selbst nun konsistenter sind, bieten die Schritte und die Methode selbst eine bessere Konsistenz und Durchgängigkeit. In Abbildung 2 ist ein SysML-Modell gezeigt, mit dem das Produktdatenmodell auf Basis eines Datenbaums konsistent mit dem Prozessdatenmodell verknüpft werden kann. Dieses integrierte Prozess- und Produktdatenmodell wird auf die Flugzeugkabinenentwicklung angewandt, um auf methodische Weise ein durchgängiges, konsistentes Modell zu entwickeln. Auf dieser Grundlage wird im Projekt ANKA[2] weiter geforscht. Dabei werden die leichtbaugerechten und modularen Daten erweitert mit den Daten der Komplexitätskostenrechnung, um die Ausweitungen unterschiedlicher Konzepte von Flugzeugkabinengroßmodulen auf die Kostenstruktur zu ermöglichen. Dabei kann ein zusammengefasstes SysML-Modell helfen, welches die Produktdaten mit den Prozessdaten und den Kostendaten enthält. [9]

Verknüpfung von System-Modellen und FEM-Modellen

Eine Herausforderung bei der modellbasierten Umsetzung des Modularen Leichtbaus bleibt allerdings die Verknüpfung und der Datenaustausch zwischen den methodischen Daten der Modularisierung, welche in SysML-Modellen strukturiert sind, mit denen aus den Finite-Elemente Methode (FEM)-Modellen, welche im Kontext des Leichtbaus benötigt werden. Diese Problemstellung besteht auch in weiteren Bereichen der Produktentwicklung, in welcher ein datengetriebener Produktentwicklungsprozess angestrebt wird [10]. Im Folgenden wird daher gezeigt, wie die Daten aus den FEM-Modellen mit den Daten aus den SysML-Modellen verknüpft werden können und wie eine entsprechende Schnittstelle gestaltet sein muss, um in der Luftfahrt angewendet werden zu können. Die Ergebnisse wurden in Teilen im Forschungsprojekt EFFEKT*[3] entwickelt, in welchem an virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen in Flugzeugkabinenmonumenten auf Basis der FEM geforscht wird. Neben der Implementierung von FEM-Modellen zur Vorhersage des Strukturverhaltens auf Substruktur-Ebene liegt ein Fokus des Projekts auch darauf, Ansätze zur Wiederverwendung von Teilmodellen, wie beispielsweise der FEM-Modelle kommunal eingesetzter Komponenten, zu erforschen. Hierfür kann beispielsweise ein modellbasierter Ansatz verwendet werden, bei welchem die verknüpften Daten aus einem Systemmodell über eine entsprechende Schnittstelle zunächst an ein FEM-Modell übergeben werden und die Ergebnisse nach der erfolgreichen Berechnung wieder zurück in das Systemmodell eingepflegt werden.

Um die Daten zwischen den Systemmodellen und FEM-Modellen austauschen zu können, erfolgt zunächst die Ableitung eines methodischen Vorgehens zur Modellierung einer entsprechenden Schnittstelle. Die Schritte des Vorgehens gliedern sich dabei in die *(1) Analyse der für das FEM-Modell benötigten Daten,* die *(2) Definition der Datentypen,* die *(3) Definition der Datenstruktur und des Datenflusses,* die *(4) Definition der Datenaustauschformate zwischen Systemmodell und FEM-Modell* sowie die *(5) Konzipierung der Datenaufbereitung für den Import und Export im Systemmodell.* [11]

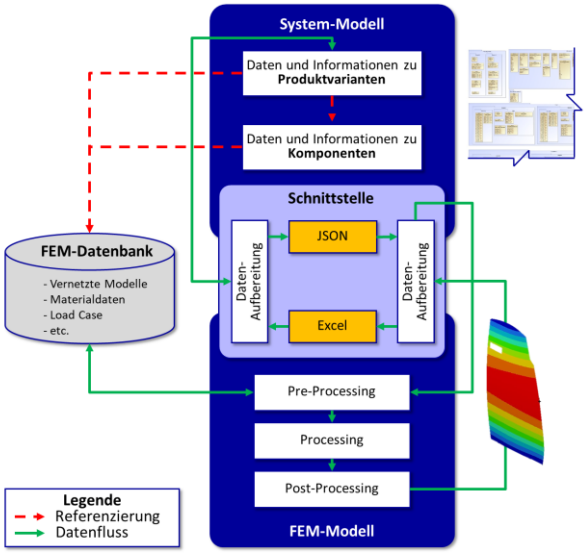

BILD 3. Konzeptionelle Darstellung der Schnittstelle zum Datenaustausch zwischen System-Modellen und FEM-Modellen, basierend auf [11]

Die entsprechenden Vorgehens-Schritte können anschließend durchlaufen und dabei ein generisches Schnittstellen-Konzept für Flugzeugkabinenmonumente modelliert werden, welches in Abbildung 3 dargestellt ist.

Im Systemmodell sind die Daten zu den unterschiedlichen Produktvarianten abgelegt, wobei für den Aufbau der FEM-Modelle insbesondere relevant ist, welche Komponenten verbaut sind, wie deren Schwerpunkte zueinander ausgerichtet sind und welche Belastung diese erfahren. Neben weiteren Entwicklungsdaten und -informationen können in dem spezifischen Produktvarianten-Block auch die Ergebnisse der jeweiligen FEM-Simulation eingepflegt und im späteren Verlauf zur Entscheidungsfindung genutzt werden. Entsprechende Daten zu den verbauten Komponenten sind ebenfalls im Systemmodell abgelegt, wobei von den unterschiedlichen Produktvarianten auf diese verwiesen wird. Über IDs wird auf vernetze FEM-Modelle und Materialmodelle in einer externen FEM-Datenbank referenziert, sodass eine Wiederverwendung kommunal verwendeter Teilmodelle möglich ist. Die entsprechenden IDs werden während des Pre-Processing im weiteren Verlauf wieder entschlüsselt. Um die Daten vom Systemmodell an das FEM-Modell zu übergeben, eignen sich neutrale Datenaustauschformate, wie JSON oder

[2]* ANKA - Autonome nachhaltige Kabine; Untersuchung der Auswirkungen und Bewertung von modularen Produktstrukturkonzepten, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-1). In Kooperation mit u.a. Airbus

[3]* EFFEKT - Effiziente Kabine durch digitale Vernetzung von Technologien und Systemen, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-1). In Kooperation mit u.a. Diehl Aviation.

XML. Hierfür muss neben der Konfiguration, der für das FEM-Modell benötigten Daten, auch eine entsprechende Datenaufbereitung erfolgen, um die Daten aus dem Systemmodell in das benötigte Format umzuwandeln, wobei sich hierfür entsprechende Template Skripte eignen. Wurden die Daten über die Schnittstelle an das FEM-Modell übergeben wird dieses im Rahmen des Pre-Processings aufbereitet und rechenfähig gemacht. Nach dem Processing und Post-Processing liegen die Ergebnisse vor und können wieder in ein Austauschformat umgeformt werden. Hierfür ist aufgrund der Kompatibilität zu verschiedenen MBSE-Programmen beispielsweise Excel geeignet. Die Ergebnisse aus der FEM-Simulation müssen im Systemmodell aufbereitet und der entsprechenden Produktvariante zugeordnet werden. [11]

Das generische Schnittstelle-Konzept wurde für den spezifischen Anwendungsfall der Partition in enger Zusammenarbeit mit Diehl Aviation erfolgreich umgesetzt. Dabei wurden zwei Partition-Varianten betrachtet, welche kommunal verwendete Komponenten enthalten. Die praktische Umsetzung erfolgt mithilfe des MBSE-Programms Cameo Systems Modeler und dem FEM-Programm Altair Hyperworks, wobei die benötigten Daten zunächst in das Systemmodell eingepflegt werden. Über ein Apache Velocity Template Skript werden die Daten in das neutrale Datenaustauschformat JSON gebracht und können in Altair Hyperworks wieder eingelesen und im Rahmen des Pre-Processing wieder zu einem rechenbaren FEM-Modell weiterverarbeitet werden. Der Import der FEM-Ergebnisse in das Systemmodell wird mithilfe der Mapping Funktion im Cameo System Modeler umgesetzt, mit welchem die Ergebnisse der berechneten Flugzeug-Partition aus einer Excel-Tabelle den entsprechenden Einträgen im Systemmodell zugeordnet werden können. [11]

Das Schnittstellen-Konzept eröffnet die Möglichkeit, den kritischen Harmonisierung-Schritt des Modularen Leichtbaus zu lösen und auch über unterschiedliche Modelltypen hinweg einen kontinuierlichen Datenfluss zu gewährleisten und Daten-Inkonsistenzen zu minimieren. Eine Erweiterung des Schnittstellen-Konzepts auf weitere Flugzeugkabinenmonumente ist geplant.

2.2. Head-of-Version Customisation Prozess

Durch den steigenden Wettbewerb im Flugsektor, sind die Fluggesellschaften darauf angewiesen ihren Kunden im Wettbewerb das beste Flugerlebnis, nicht nur aus Sicht des Komforts, sondern auch bezüglich der Sitzplatzkosten und Ergonomie zu liefern. Die Kabine als größtes Differenzierungselement für den Kunden ist dementsprechend eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale für die Airlines. [12]

Aus Entwicklungssicht treffen in der Kabine die Anforderungen verschiedener Stakeholder wie Fluggast, Kabinenbesatzung oder Airline auf die von den OEMs und Zulieferern existierenden Kabinenkonfigurationen. Das Erstellen der kundenspezifischen Head-of-Version stellt dabei eine große Herausforderung für die Entwicklung und die darüber hinaus beteiligten Produktlebensphasen wie die Arbeitsvorbereitung oder Herstellung und Montage dar, da die verschiedenen Anforderungen oftmals sehr konträr sind und zu verschiedensten Lösungen führen. Zusätzlich läuft dieser Prozess zumeist analoge oder in einzelnen Schnittstellendokumenten ab, was insgesamt die Komplexität erhöht und zu Fehlern im Konfigurationsprozess führen kann.

Das aktuelle Luftfahrtforschungsprojekt VERDIKA[4*] beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit dem aufgezeigten Bedarf einer ganzheitlichen Systembetrachtung. Das PKT erarbeitet dabei explizit einen durchgängigen, digitalisierten Head-of-Version Customisation Prozess, der nicht nur die Kabinenentwicklung betrachtet, sondern auch Schnittstellen zur Montageplanung bzw. insgesamt des Industrial Engineerings aufzeigt.

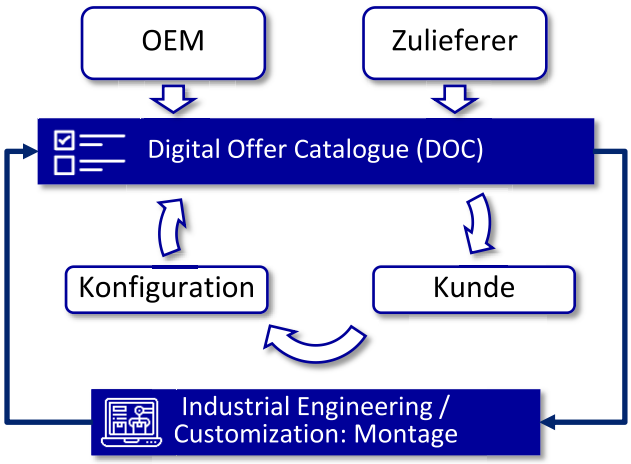

BILD 4. Schematische Konfigurationsprozess mithilfe des Digital Offer Catalogues

Abbildung 4 gibt den angedachten schematisch Konfigurationsprozess wieder. Der Kunde erhält den ausgeleiteten DOC, in dem eine Auswahl angebotenen Kabineneigenschaften in verschiedenen Ausprägungen vorliegt. Der Kunde konfiguriert sich so anhand der verschiedenen kundenrelevanten Eigenschaften die Head-of-Version der Kabine. Spezielle Änderungen und Kundenwünsche werden zusätzlich aufgenommen. Innerhalb des DOC wird nun auf Grundlage verschiedener Modelle die relevanten Produktdaten bzw. die Gesamtkonfiguration erstellt und an das Industrial Engineering weitergegeben. Im Industrial Engineering wird teilautomatisiert die Montierbarkeit geprüft und Parameter wie Montagezeit, Kosten und Realisierbarkeit an den DOC zurückgespiegelt. Gleichzeitig werden Randbedingungen und relevante Vorgaben, wie beispielsweise maximale Baugrößen, Materialrestriktionen oder Gewichtseinschränkungen vom Hersteller und Zulieferer mit in den Konfigurationsprozess eingebracht. Der DOC ist somit die Schnittstelle für die Konfiguration einer HoV zwischen dem Kunden und der OEM und/oder Zulieferern.

[4*] VERDIKA - Vernetzte Digitale Kabine; Entwicklung eines Kabinen-Metamodells für die Entwicklungsschritte und die Produktionsprozesse zu einer digitalen Kabinenauslegung, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-1). In Kooperation mit u.a. Airbus

Die genaue Ausarbeitung insbesondere des DOC ist weiterhin Stand der Forschung im Projekt VERDIKA. Für die Erstellung und die dafür benötigte Darstellung der verschiedenen Datenelemente wurde ein grundlegendes Metamodell erstellt, um die vorhandenen Datensilos der einzelnen Produktlebensphasen aufzulösen und in einem holistischen ganzheitlichen Modell miteinander zu verknüpfen. [13] Ein generisches Metamodell kann das Systemverständnis fördern und die Entwicklungsprozesse auch in einer heterogenen Umgebung verbessern. Aus hierarchischer Sicht ist das Metamodell eine Abstraktionsschicht über dem Modell. So definiert ein Metamodell die Elemente und die Syntax der Modellierungssprache. Für diese Definition wird üblicherweise das Konzept der Abstraktion verwendet. [14]

2.2.1. Zugrundeliegendes Metamodell

Für den Entwicklungsprozess von komplexen Systemen wie beispielsweise einem Flugzeug werden viele Methoden und Richtlinien in der Entwicklung genutzt. Zu erwähnende Methoden sind beispielsweise das CMMI, SPICE, ISO61508 sowie das INCOSE-Prozesshandbuch, in dem Prozesse und Aktivitäten im allgemeinen Systems Engineering beschrieben werden. [15] In der Luftfahrt werden Richtlinien für die Prozesse durch die SAE ARP-4754 [16] vorgegeben. Darin wird der Entwicklungsprozess allgemein auf Basis des V-Modells beschrieben und auf die spezifischen Bedürfnisse der Luftfahrtindustrie zugeschnitten. Zur besseren Unterteilung wird das System in unterschiedlichen Ebenen betrachtet, diese sind unter anderem das *Aircraft Level, System Level* und das *Item Level*. Diese Einteilung kann jedoch je nach Betrachtung noch erweitert werden. Die aufgezählten Methoden geben einen Leitfaden für die Entwicklung und bilden die Grundlage für die spätere Zertifizierung durch die Luftfahrtbehörden. Um die anfallenden Daten dies Vorgehens bestmöglich in modelbasierte Ansätze zu überführen, wird die Einteilung nach dem RFLP (Requirements, Functional, Logical, Physical) Entwicklungsframework umgesetzt. In diesem Framework wird mithilfe von Anforderungen beschrieben, warum ein System entwickelt wird, die funktionalen Modelle beschreiben was das System tun soll. Mithilfe der logischen Ebene wird beschrieben, welche logische Komponente welche Funktion erfüllt. Die Physische Ebene erweitert die logischen Komponenten mit den physischen Produktdaten und baut so die Brücke zwischen dem physisch realen System und seinen Anforderungen. [17]

Aufbauend auf den vorgestellten Ansätzen wurde das Kabinen Metamodel hergeleitet, um wie eingangs beschrieben, die verschiedenen Datensilos der Produktlebensphasen aufzulösen und eine Grundlage für die holistische Modellierung zu erzeugen. Dazu können die einzelnen Datentypen der Produktlebensphasen mit ihren Schnittstellen zueinander modelliert werden und im ganzheitlichen Entwicklungsprozess eingeordnet werden. In Abbildung 5 ist die Beschreibung des Metamodells abstrakt dargestellt vgl. [14].

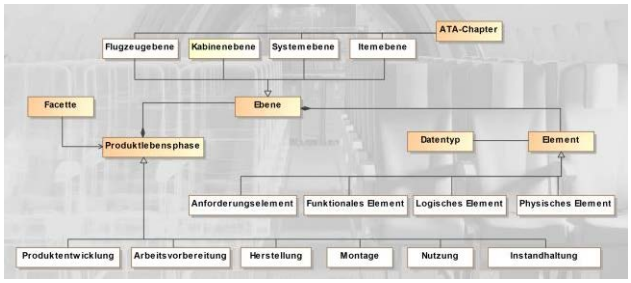

BILD 5. Beschreibung des Kabinen-Metamodells, basierend auf [14]

Den Mehrwert des Metamodells ergibt sich durch die Sicherstellung der Kompatibilität verschiedener Domänen und Stakeholder über verschiedene Lebensphasen hinweg. So kann die Anwendung beispielsweise für die Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Montageplanung über einen Montageablaufplan, wie in [14] gezeigt, ohne Medienbrüche umgesetzt werden. Die für die Beschreibung verwendeten Ontologien nutzen dabei die durch das Metamodel vorgegebene Syntax. Die dadurch entstehende Maschinenlesbarkeit kann für die (semi-)automatisierte Nutzung z.B. für die auf dem Metamodell aufbauenden Konfiguration, genutzt werden. Aufbauend auf den Teilbereichen des Metamodel, wird im Folgenden ein Überblick über die am Konfigurationsprozess beteiligten Daten und Verknüpfungen am Beispiel der OHSC gegeben.

2.2.2. Daten des HoV-Konfigurationsprozesses

Aufbauend auf dem Metamodell wird im Head-of-Version Konfigurationsprozess die Verbindung zwischen den Anforderungen der Kunden und den angebotenen physischen Systemdaten der Zulieferer und OEMs modelliert. Mithilfe dieser Modellierung können die oftmals subjektiven Eindrücke und Wünsche anhand von messbaren Entscheidungen der Kunden in physisch realisierbare Alternativen bzw. Varianten, die entweder schon im Portfolio existieren oder erst noch durch weitere Anpassungen des Engineerings entworfen werden müssen, umgesetzt werden. Dazu werden die Business-Anforderungen der Kunden in verschiedene Cluster eingeteilt die anhand von kundenrelevanten Eigenschaften und dazugehörigen Ausprägungen den Kundenwunsch auf der Anforderungsebene abbilden. Am Beispiel einer OHSC kann die Anforderung an die Tiefe der Gepäckablage aus Sicht des Kunden unterschiedlich ausgeprägt sein. Gleichzeitig sind auch sämtliche funktionale und nicht-funktionale Anforderungen die durch die Wünsche der Kunden impliziert werden und darüber hinaus für das Gesamtprodukt relevant sind abgebildet. Diese Anforderungen haben beispielsweise den Ursprung in Richtlinien bzw. Zulassungskriterien der EASA, von Rahmenbedingungen der Zulieferer oder OEMs. Am Beispiel des OHSCs können von diesen Stakeholdern die maximale Abmaße, das Gewicht oder die minimale Kraftaufnahme am Einleitungspunkten als Anforderungen gesehen werden.

Um nach dem RFLP-Ansatz die weiteren Ebenen aufzubauen werden sowohl Funktionen als auch auf der Logischen Ebene mögliche Konfigurationen als grundlegende Architekturen erstellt. Mithilfe von

Verknüpfungsmatrizen werden nun die Anforderungen mit entsprechenden Konfigurationen verknüpft. Die Verbindung zur physischen Umsetzung baut auf der logischen Konfiguration auf und detailliert diese soweit, dass sie im weiteren Schritt an die Montageplanung übergeben werden kann. Da eine eins-zu-eins Zuordnung bei der großen Anzahl an verschiedenen Anforderungen zu einer entsprechenden Konfiguration nicht realistisch umsetzbar ist, wird anhand der Clusterung der logischen Konfiguration eine grobe Einteilung vorgenommen und anschließend anhand der Konfiguration die physische Umsetzung parametrisch definiert.

Abbildung 6 zeigt eine vereinfachte Übersicht der verwendeten Datentypen anhand der verschiedenen Elementarten. Zu sehen sind die auf der Anforderungselemente verwendeten Datentypen wie Funktionale Anforderung oder kundenrelevante Eigenschaft, die Funktionen, Wirkprinzipien und die physischen Elemente wie Komponenten, Module und Varianten. Aufbauend auf den vorgestellten Datentypen wird der Digital Offer Kataloge erstellt.

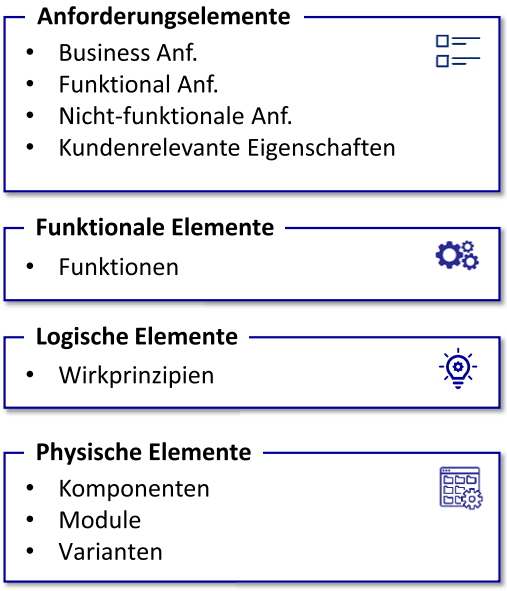

BILD 6. Übersicht verwendeter Datentypen im HoV-Konfigurationsprozess

Durch die Anwendung des Kabinenmetamodells konnte gezeigt werden, dass die Daten und Prozesse verschiedene Produktlebensphasen mit einander verknüpft werden konnten. Somit konnten die vorhandenen Datensilos teilweise aufgelöst werden. [14] Gleichzeitig ergibt sich durch diese Art der Modellierung die Möglichkeit den HoV-Konfigurationsprozess, (semi-)automatisiert aufzubereiten, sodass die verwendeten Daten auch über die Produktlebensphasen hinweg maschinenlesbar und damit automatisierbar verknüpft und bearbeitet werden können.

2.3. Unterstützung des Kabinen-Retrofits

Flugzeuge zeichnen sich unter anderem durch ihre Langlebigkeit aus, auf Grund derer es im Laufe des Lebens mehrfach zu Anpassungen und Neueinrüstungen der Kabine, oder Teilen davon, kommt. Diese Kabinen-Retrofits werden zumeist von spezialisierten und dazu zertifizierten Unternehmen durchgeführt und selten durch den Flugzeughersteller. Auch wenn diese Kabinen-Retrofits in der Regel für mehrere Flugzeuge einer Flotte durchgeführt werden sollen, sind für die Planung und Entwicklung dabei möglichst akkurate Informationen über jedes spezifische Flugzeug erforderlich, in das diese Kabine eingebaut werden soll. [18]

Liegen diese Informationen nicht vor, verzögert sich der Kabinen-Retrofit deutlich, da Einbaukonflikte erst im Zuge der eigentlichen Umrüstung identifiziert und behoben werden können. Somit wird der gesamte Umrüstprozess verzögert, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Kosten der Umrüstung und Verfügbarkeit der Flotte. [19]

2.3.1. Der Digitale Zwilling in der Produktlebensmitte

So eine exakte und spezifische digitale Repräsentation wird gegenwärtig oftmals unter dem Konzept Digitaler Zwilling beschrieben, allerdings in der Regel aus Sicht des Herstellers. Aufgrund der vielen Stakeholder der Luftfahrt, von Zulieferer und Hersteller, über Leasinggeber und Airlines bis zu Wartungs- und eben Retrofit-Organisationen, sind die dafür notwendigen Informationen der Retrofit-Organisation allerdings nicht immer direkt verfügbar, und wenn meist nicht im der notwendigen Detailgrad. Die Tatsache, dass viele Flugzeugmuster in Zeiten entwickelt wurden, in denen diese Daten noch überwiegend analog vorlagen sowie firmenstrategische Aspekte wie Intellectual Property Regularien erschweren diese Situation noch weiter. Der bekannte Ansatz der Instanziierung des Digitalen Zwillings, basierend direkt auf Daten der Produktentstehung ist in diesem Fall also nicht ohne weiteres möglich. Stattdessen ist eine Reverse-Instanziierung in der Mitte des Flugzeuglebens notwendig. [20]

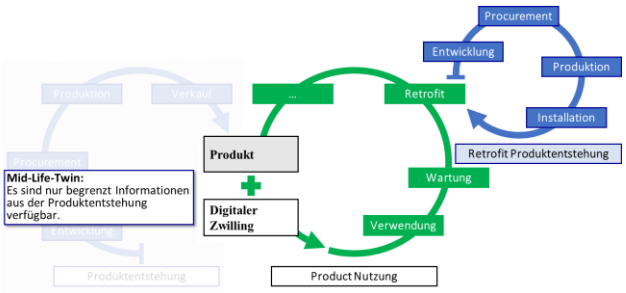

BILD 7. Anwendungsfall und Herausforderungen vom Mid-Life-Twin (MLT), basierend auf [20]

Für diese stellt sich jedoch insbesondere die Herausforderung der Datenbeschaffung und -organisation. Viele der, für den Retrofit notwendigen Informationen liegen bereits vor. Allerdings verteilt in unterschiedlichen Dokumenten wie vorherigen Wartungs- oder Modifikationsberichten. Andere Informationen können basierend auf dem generischen Aufbau des Flugzeugmusters abgeschätzt werden während wieder andere schlicht nicht ausreichend erfasst oder dokumentiert sind. Neben der Herausforderung der Datenbeschaffung kommt bei der digitalen Repräsentation

von Assets wie Flugzeugen daher noch die Datenvielfalt sowie die gegebene Dokumentationsstrukturen der Luftfahrt dazu, die es zu managen gilt. Insbesondere Metadaten aber auch geplante und ungeplante Unterschiede zwischen einzelnen Flugzeugen oder der vorhandenen Dokumentation und dem tatsächlichen Zustand gilt es zu berücksichtigen.

2.3.2. Metadaten

Um insbesondere auch Zusammenhänge und Abhängigkeiten digital dokumentierbar und nutzbar abzubilden, eignet sich an dieser Stelle eine modellbasierte Unterstützung, wie sie auch beispielsweise in der Disziplin des Systems Engineering durch Systemmodelle des MBSE zum Einsatz kommt. In so einer modellbasierten Unterstützung des Datenhandlings beispielsweise in Form von SysML-Modellen können dann insbesondere diese Metadaten dokumentiert und verwaltet werden. [21]

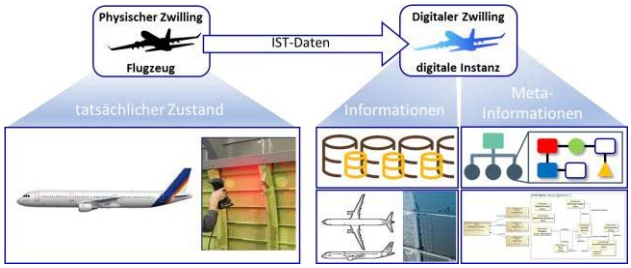

BILD 8. Die Instanz eines Digitalen Zwilling seines spezifischen Flugzeugs, basierend auf klassischen Informationen sowie Metadaten, basierend auf [21]

Aber auch generische Informationen, wie allgemeingültige Strukturen des Rumpfes der Flugzeugmuster lassen sich so modellbasiert dokumentieren und ermöglich damit eine digitale Verarbeitung und Einbindung in andere Prozesse. Dokumentenbasiertes oder explizites Wissen lässt sich somit für digital umgesetzte semantische Abfragen nutzen.

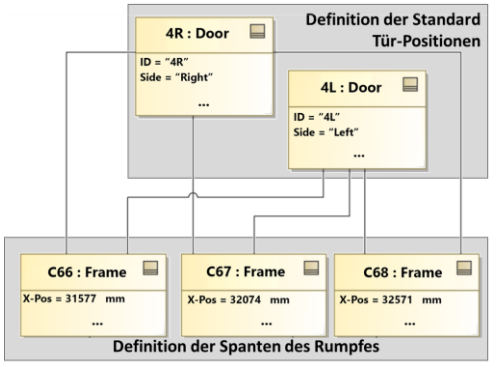

BILD 9. Beispielausschnitt eines SysML-Models mit generischen Informationen, basierend auf [18]

Im aktuellen Luftfahrtforschungsprojekt InDiCaT*[5] wird der beschriebene Sachverhalt aufgegriffen, in dem in Kooperation mit einem führenden Modifikations- und Umrüstungsunternehmen an der Entwicklung einer digitalen, flugzeugspezifischen Repräsentation geforscht wird. Neben der Speicherung der verschiedenen Informationen für den Retrofit geht es dabei insbesondere auch um das Datenmanagement von Meta-Daten sowie der Gewinnung der dazu notwendigen Daten und Aufnahme exakter Geometriedaten via 3D-Scanning-Verfahren. Neben den bereits beschriebenen Ansätzen zur Modellierung wird der aktuelle Stand der Forschung, insbesondere hinsichtlich Datengewinnung und Geometrie-Rückführung um Folgenden kompakt beschrieben.

2.3.3. Vorgehen zur Datengewinnung

Um den Herausforderungen der Datengewinnung zur Lebensmitte (siehe 2.3.1) zu begegnen lohnt sich ein Blick auf andere Themenfelder, die sich mit Datenbeschaffung und -verwaltung auseinandersetzen. So hat sich in dem Wissenschaftsfeld der Data Science das Prozess-Modell *CRISP-DM* (*CRoss-Industry Standard Process for Data Mining*) etabliert, das ein Rahmenwerk und *Best-Practises* für die Aufnahme und Organisation von Daten im Rahmen von Datenmining-Projekten darstellt, dabei aber bewusst generisch gehalten ist und für den jeweiligen Anwendungsfall erweitert und angepasst werden kann. So eignet sich CRISP-DM, in modifizierter Form, auch als grundlegendes Rahmenwerk für ein Vorgehen zur Datenbeschaffung und Organisation im Kontext der Instanziierung des Digitalen Zwillings eines bestehenden Flugzeugs mit dem Ziel der Unterstützung des Retrofit. [20]

CRISP-DM unterteilt ein Daten-Projekt in sechs Phasen (business understanding, data understanding, data preparation, modeling, evaluation, and deployment) [22], wobei die ersten 3 für die Datengewinnung als Grundlage für den Digitalen Zwilling am relevantesten sind. In der ersten Phase (business understaning) geht da bei primär darum, die Rahmenbedingungen zu identifizieren und festzulegen. Dazu gehört neben der Festlegung des Anwendungsfalls und insbesondere des Ziels des Digitalen Zwillings unter anderem auch die Analyse, auf welche Daten bereits Zugriff besteht. In der zweiten Phase (data understanding) werden gemäß CRISP-DM nun die zugreifbaren Daten zusammengestellt und untersucht. Als Ergänzung zum Standardvorgehen folgt für den Retrofit anschließend ein Vergleich der so gewonnenen und nun vorhandenen Daten mit denen, die für die Durchführung des Retrofits notwendigen sind. In der Regel werden dem MRO-Unternehmen nämlich nicht sofort alle Informationen zur Verfügung stehen. Dieses Defizit lässt sich allerdings erst nach einer genaueren Begutachtung der tatsächlich bereits vorhandenen Daten realistisch einschätzen.

---

[5]* InDiCaT - Intelligent Digital Cabin Twin; Holistische Virtualisierung des Produktlebenszyklus in der Luftfahrt mit Fokus auf Bauteilherstellung und Kabinenmodifikation, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-1). In Kooperation mit u.a. Lufthansa Technik und 3D.aero

Basierend auf dem Defizit folgt der Schritt der weiteren Datengewinnung, die je nach benötigter Information mit verschiedenen Strategien erfolgen kann; einige lassen sich womöglich durch Anfragen an Drittparteien beschaffen, andere lassen sich – sofern Zugriff auf das Asset besteht – manuell erfassen. Sind eine Vielzahl detailgetreuer Daten, beispielsweise von Geometrien erforderlich lassen diese sich hingegen nicht mehr manuell, sondern sensorunterstützt, beispielsweise mit 3D-Scannern beschaffen. [20]

2.3.4. 3D-Scanning für Kollisions-Analysen

Diese 3D-Scans resultieren in Punktewolken, bestehend aus mehreren Millionen einzelner Punkte in 3D-Koordianten. Klassischerweise müssen diese Punkt-Daten in mehreren Schritten aufbereitet werden, oftmals bis zu volldefinierten Solid-Elementen, bevor diese Beispielsweise für Kollisions-Analysen verwendet werden können. Das Ziel dieser Kollisions-Analysen ist festzustellen, ob 3D-Objekte der geplanten Kabine mit anderen Geometrien der Kabine oder des Flugzeugrumpfes kollidieren. Gängige CAD-Autorenprogramme unterstützen dabei bereits die Kollisions-Analysen zwischen Solid-Elementen, nicht jedoch zwischen Solid und 3D-Punkten. Die Aufbereitung der Punktwolken zu diesen vollwertigen Solid-Elementen ist dabei sehr zeit- und ressourcenaufwendig. Mit einem Algorithmus basierend auf einer Punkt-in-Polygon-Analyse konnte exemplarisch demonstriert werden, dass nach erfolgter Ausrichtung, beispielsweise in Flugzeug-Koordinaten, so eine Kollisions-Analyse auch bereits mit 3D-Daten in Form einer Punktwolke durchgeführt werden kann. Durch die Entwicklung eines Add-Ons konnte dies dabei direkt in das gängige CAD-Autorenprogramm SolidWorks integriert werden. Zwecks Performance-Optimierung wird dabei mit zwei unterschiedlichen Dichten der Punktwolke gearbeitet, um die Darstellung im Programm zu verbessern, gleichzeitig jedoch den vollen Datensatz für die Analyse zu verwenden. [23]

Abbildung 10 zeigt das Ergebnis der Analyse einer bewusst provozierten Kollision zwischen einem Hatrack und der Flugzeugstruktur. Erkennbar ist dabei der Hohe Detailgrad der identifizierten Konfliktpunkte (blaue Punkte).

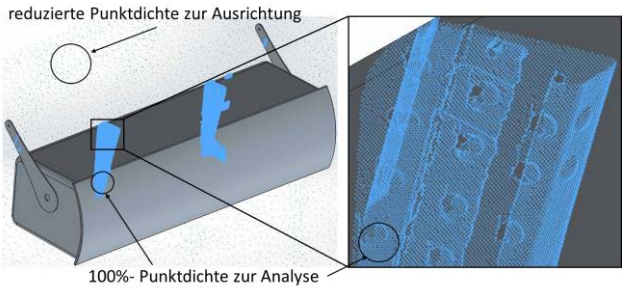

BILD 10. Beispielhafte Kollisions-Analyse zwischen Hatrack und Flugzeugrumpf, basierend auf [23], [18]

Eine Digitale Repräsentation für den Retrofit muss demnach nicht unbedingt die vollwertigsten CAD-Daten in Form von Solid-Elementen beinhalten. Je nach Anwendungsfall können bereits 3D-Punktwolken den Retrofit-Prozess unterstützen.

3. HOLISTISCHE ZUSAMMENFÜHRUNG

Die digitale Innovation die durch die gezeigten Modellierungen zu erkennen sind zeigen, dass in den einzelnen Bereichen schon Mehrwert generiert werden kann und Fortschritte in der Verknüpfung und Aufbereitung der anfallenden Entwicklungsdaten zu erkennen ist (siehe Kapitel 2).

Um im komplexen System Luftfahrt noch weiteren Mehrwert zu schaffen, gilt es eine holistische Zusammenführung von der Produkt-Idee bis zum End-Of-Life zu ermöglichen. Dadurch können auch die Prozesse wie Maintenance und Retrofit in späteren Lebensphasen trotz der Herausforderung an Langlebigkeit und Vielfalt an Stakeholder effizient eingebunden werden, ohne in den einzelnen Datensilos zu verharren. Damit könnten Informationen, die auf diese Art und Weise in einer der Lebensphasen gewonnen und beispielsweise modellbasiert dokumentiert wurden, auch in den anderen Lebensphasen genutzt werden, ohne dass es dabei zu zusätzlichen Medienbrüchen käme. Die Modelle in den einzelnen Lebensphasen sollen dabei nicht ersetzt werden, vielmehr wird der generelle Zugriff auf relevante Informationen durch eine geschaffene Kompatibilität erleichtert. Bisher wurden die einzelnen Modelle mit starkem Fokus auf den entsprechenden Bereich erstellt, ohne die geschilderte Kompatibilität zu berücksichtigen.

Insbesondere in der Produktentwicklung zeigen die Ansätze in Kapitel 2 die Möglichkeiten der Digitalisierung in der Entwicklung bei unterschiedlichen Zielstellungen. Allerdings schöpfen diese Ansätze zur Entwicklung innovativer und nachhaltiger Flugzeugkabinenmonumente ihr Potential nur dann vollständig aus, wenn sie miteinander im Einklang gebracht werden können und über die Produktlebensphasen hinaus harmonisiert werden. Durch die Digitalisierung der Produktentwicklung und darüber hinaus in allen Lebensphasen können somit erhebliche Vorteile für die Flugzeugkabinenentwicklung ermöglicht werden.

Um die geschilderte Etablierung über Grenzen hinweg zu ermöglichen, muss zunächst eine Grundlage geschaffen werden. Dies könnte beispielweise durch die Etablierung eines Modellierungsvorgehens für die lebensphasenübergreifende Modellierung der Kabine erfolgen. Dabei wird sowohl der Prozess als auch spezifische Syntax beschrieben und stellt damit ein Rahmenwerk dar, an dem sich während der Modellierung orientiert werden kann. Ein zentrales Datenaustauschformat, wie es vom DLR in Form von CPACS [24] entwickelt wird, kann dabei ein Baustein für den Datenaustausch sein. Mit dem Fokus auf Systemmodelle und die Prozessgestaltung sind jedoch darüber hinaus viele Faktoren, wie beispielsweise Prozess Rahmenbedingungen oder Belange der Organisation, zu berücksichtigen.

Insbesondere die, über viele Unternehmen und Abteilungen verteilte Produktentstehung der Flugzeugkabine führt zu einer sehr heterogenen Datenstruktur. Diese in Einklang zu bringen, so dass alle

Stakeholder den Datenaustausch umsetzen können und wollen, stellt eine besondere Herausforderung an das Datenmanagement dar. Die Konsistenz und Durchgängigkeit erfordert ein zentrales Systemmodell mittels bidirektionaler Schnittstellen für die unterschiedlichen Datentypen der verschiedenen Stakeholder.

Die Luftfahrt zeichnet sich durch eine hohe Vielzahl an Stakeholdern mit individuellen Zielen und Beiträgen zum Gesamtprodukt aus. Bei diesen Überlegungen gilt es daher auch elementare Fragen wie – Wem gehören in so einem Fall die jeweiligen Daten? – zu berücksichtigen. Zu diesen Erläuterungen sei abschließend gesagt, dass sie teilweise Gegenstand der aktuellen Forschung sind.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Paper wurde eine Vielzahl an Ergebnissen aktueller Forschungsprojekte hinsichtlich der Digitalisierung in verschiedenen Bereichen der Flugzeugkabinenentwicklung vorgestellt. Diese reichen von der Unterstützung in den frühen Phasen der Produktentstehung im Kontext des Modularen Leichtbaus über die Kopplung von Entwicklung und Produktion im Kontext der Head-of-Version bis zu Retrofit-Prozessen während der Nutzungsphase spezifischer Flugzeuge. Kern ist dabei oftmals die Verwendung von modellbasierten Ansätzen, wie sie in Form von SysML-Systemmodellen bereits aus dem MBSE bekannt sind. Aufgrund dieses gemeinsamen Kerns wurde anschließend die Idee beschrieben, dass eine kompatible Verwendung der Modelle eine holistische Zusammenführung der einzelnen Ergebnisse und Ansätze ermöglichte. Da so eine Zusammenführung im gesamten Lebenszyklus genutzt werden und damit in jedem der vorgestellten Bereiche zusätzliche Synergien erzeugt werden können, ist sie Gegenstand aktueller Forschung und wird auch in zukünftigen Forschungsprojekten weiter fortgeführt.

DANKSAGUNG

Die präsentierten Ergebnisse sind Teil der Forschungsprojekte *Multifunktionales Leichtbaudesign für variabel konfigurierbare Monumente* (MICHEL), *Autonome nachhaltige Kabine; Untersuchung der Auswirkungen und Bewertung von modularen Produktstrukturkonzepten* (ANKA), *Effiziente Kabine durch digitale Vernetzung von Technologien und Systemen* (EFFEKT), *Vernetzte Digitale Kabine* (VERDIKA) und *Intelligent Digital Cabin Twin* (InDiCaT), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des fünften bzw. sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO V-3 bzw. LUFO VI-1).

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

LITERATUR

[1] AerQ GmbH. AERQ TAKES DIGITAL TRANSFORMATION OF AIRCRAFT CABINS TO A NEW LEVEL. https://www.aerq.com/news/aerq-takes-digital-transformation-of-aircraft-cabins-to-a-new-level, zuletzt aufgerufen am 22.02.2022.

[2] Hanna, M.; Schwenke, J.; Heyden, E.; Laukotka, F.; Krause, D.: Neue Trends in der Flugzeugkabinenentwicklung, in: Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 207-228. DOI: 10.1007/978-3-662-62393-0_9

[3] Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Springer Verlag, ISBN 978-3-662-53039-9, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-53040-5

[4] Holt, J.; Perry S.; Brownsword, M.: Model-Based-Requirements, Engineering. The Institution of Engineering and Technology, 2012.

[5] Seiler, F. M.; Hanna, M.; Schwede, L.-N.; Laukotka, F.; Krause, D.: MBSE zur Unterstützung der Produktentwicklung von modularen Produktarchitekturen, in Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 111-134. DOI: 10.1007/978-3-662-62393-0_5

[6] Hanna, M.; Schwenke J.; Krause, D.: Modularer Leichtbau – Chancen und Herausforderungen im digitalisierten Entwicklungsprozess, Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX 2019), Jesteburg, Germany, 2019, pp. 73-84. DOI: 10.35199/dfx2019.7

[7] Hanna, M.; Schwenke, J.; Schwede, L.-N.; Laukotka, F; Krause, D.: Model-based application of the methodical process for modular lightweight design of aircraft cabins, Procedia CIRP, Vol. 100, 2021, pp. 637-642. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.136

[8] Hanna, M.; Schwede, L.-N.; Schwenke, J.; Laukotka, F.; Krause, D.: Methodical Modeling of Product and Process Data of Design Methods Using the Example of Modular Lightweight Design, Proceedings of the ASME 2021, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2021), 2021. DOI: 10.1115/IMECE2021-71259

[9] Hanna, M..; Schwenke, J.; Schwan, L.; Krause, D.: Methodical Approach for the Model-Based Development of Aircraft Cabin Product Families under Consideration of Lightweight and Cost-Based Design, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Dubrovnik, Croatia, 2022, pp. 435 - 444. DOI: 10.1017/pds.2022.45

[10] Russwurm, E.; Faltus, F.; Laukotka, F.; Schwan, L.; Brossog, M.; Krause, D.; Franke, J.: Methodik zur frühzeitigen Integration prozessspezifischer Einflussfaktoren aus der automatisierten Montage in die Auslegung funktionskritischer Komponenten, Proceedings of the 32nd Symposium Design for X (DFX2021), Tutzing, Germany, 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.02

[11] Schwan, L.; Hanna, M..; Schwenke, J.; Krause, D.: Modeling of an Interface Between System Models & FEM Models for the Support of Model-Based Development in Modular Lightweight Design for Aircraft Cabins, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Dubrovnik, Croatia, 23-26 May 2022, pp. 1965-1974. DOI: 10.1017/pds.2022.199

[12] Hall, A., Mayer, T., Wuggetzer, I., Childs, P.: Future aircraft cabins and design thinking: optimisation vs. win-win scenarios. Propulsion and Power Research 2(2):85–95, 2013. DOI: 10.1016/j.jppr.2013.04.001

[13] Berschik, M. C.; Laukotka, F.; Krause, D.: Ansatz eines holistischen Datenstamms zur modellbasierten, domänenübergreifenden Nutzung in der Produktentstehung, 32nd Symposium Design for X (DFX2021), Tutzing, Germany, 2021. DOI: 10.35199/dfx2021.19

[14] Berschik, M. C.; Blecken, M.; Kumawat, H.; Rath, J.-E.; Krause, D.; God, R.; Schüppstuhl, T.: A Holistic Aircraft Cabin Metamodel As An Approach Towards An Interconnected Digitised Cabin Lifecycle, 33rd Congress of the International Council of The Aeronautical Sciences (ICAS 2022), Stockholm, Sweden, 2022.

[15] Alt O. Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. Carl Hanser, 2012. DOI: 10.3139/9783446431270

[16] SAE. Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. SAE-ARP-4754A, 2010. DOI: 10.4271/ARP4754A

[17] Li T, Lockett H and Lawson C. Using requirement-functional-logical-physical models to support early assembly process planning for complex aircraft systems integration. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 54, pp 242–257, 2020. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.001

[18] Moenck, K.H.W., Laukotka, F.N., Deneke, C., Schüppstuhl, T.; Krause, D.; Nagel, T.J.: Towards an Intelligent Digital Cabin Twin to Support an Aircraft's Retrofit and Base Maintenance, SAE Technical Paper 2022-01-0046, 2022. DOI: 10.4271/2022-01-0046

[19] Deneke, C.; Oltmann, J. Schüppstuhl, T.; Krause, D.: Technology Innovations for Faster Aircraft Cabin Conversion, 8th international Workshop on Aircraft System Technology (AST), Shaker Verlag, Hamburg, Germany, 2019.

[20] Moenck, K.H.W., Laukotka, F.N., Krause, D.; Schüppstuhl, T.: Digital Twins of existing long-living assets: reverse instantiation of the mid-life twin, Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022), Hamburg, 2022. DOI: 10.35199/dfx2022.20

[21] Laukotka, F.; Hanna, M.; Krause, D.: Digital Twins of Product Families in Aviation based on an MBSE-assisted approach, Procedia CIRP, Vol. 100, 2021, pp. 684-689. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.144

[22] Shearer, C.: The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. In *Journal of Data Warehousing* 5 (4),2000, pp. 13–22.

[23] Laukotka, F.; Oltmann, J.; Krause, D.: A digitized approach to reduce assembly conflicts during aircraft cabin conversions, Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX 2019), Jesteburg, Germany, 2019, pp. 251-262. DOI: 10.35199/dfx2019.22

[24] COMMON LANGUAGE FOR AIRCRAFT DESIGN https://www.cpacs.de/, zuletzt aufgerufen am 13.09.2022.