

ERWEITERUNG EINES WISSENSBASIERTEN ENTWURFSSYSTEMS ZUR RUMPFINTEGRATION ZUKÜNFTIGER FRACHTFLUGZEUGE IM GESAMTFLUGZEUGENTWURF

P. Zemke*, S. Hellbrück*, C. Hesse*, J. Biedermann*, M. Fuchs*, B. Nagel*

* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt
Hein-Saß-Weg 22, 21129 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Der Markt für Frachtflugzeuge verzeichnet einen stetigen Anstieg. Daher werden mehr Passagierflugzeuge am Ende ihrer Lebenszeit umgerüstet, um Fracht zu transportieren. Das Problem dabei ist jedoch, dass Passagierflugzeuge nicht von Anfang an als Frachtflugzeuge konzipiert sind und sich daher erst durch spätere Umbaumaßnahmen für spätere Frachtmismissionen eignen. Dies führt zu Problemen bei der physischen Umsetzung in Bezug auf Lasten, Massen, Schwerpunkte und Bauraum. Eine mögliche Lösung besteht darin, die Umrüstung von Passagierflugzeugen in den digitalen Entwurfsprozessen von Anfang an als Frachtvariante zu berücksichtigen. Dabei können wissensbasierte Methoden und digitale Modelle unterstützen. In dieser Arbeit wird dazu ein wissensbasiertes Entwurfssystem für die Umrüstung von Passagier- in Frachtflugzeugkabinen erweitert, um den Vorentwurfsprozess um diese neuen Entwurfparameter zu ergänzen. Dies ermöglicht es, effizientere Flugzeugkonfigurationen zu entwerfen. Ein weiteres wichtiges Ziel ist es, die Entwicklung von Frachtflugzeugen zu beschleunigen und optimale Entwurfsentscheidungen zu treffen. Dazu müssen die neuen Entwurfsmethoden ohne Datenverlust und über geeignete Schnittstellen in den Gesamtentwurfsprozess eingebettet werden. Zu diesem Zweck wird ein methodischer Ansatz entwickelt, der das Entwurfssystem für Frachtflugzeuge sowie das für Passagierflugzeuge mit dem Flugzeugvorentwurf in einem digitalen, disziplinübergreifenden Entwurfsprozess verbindet. Dadurch ist eine Bewertung von Passagier- und Frachtkabinen im selben Entwurfsprozess möglich, sodass die Umbauprozesse im Gesamtflugzeugvorentwurf berücksichtigt werden können.

Keywords

Knowledge-based Engineering, Flugzeugkabine, Flugzeugstruktur, Passenger to Freighter, Gesamtflugzeugentwurf, Multidisziplinäre Optimierung

1. EINLEITUNG

Das Ziel einer nachhaltigen Luftfahrt wird durch politische Vorgaben, gesellschaftliches Umweltbewusstsein und wirtschaftliche Notwendigkeiten vorangetrieben. Dies erfordert effiziente Flugzeugkonfigurationen und ressourcenschonende Technologien. Bedeutsam ist die technische, wirtschaftliche und ökologische Effizienz von Flugzeugkabinen, denn sowohl Original Equipment Manufacturers (OEMs) als auch Airlines streben an, die Kosten in der Produktion und im Betrieb zu senken. Ein verbessertes Kabinendesign für umbaufähige Passagierkabinen kann die Umbauprozesse von Passagier- in Frachtkabinen vereinfachen und den steigenden Bedarf an Lufttransport decken.

Die Luftfahrtbranche sieht sich vor einer weiteren Herausforderung im Bereich des expandierenden Frachtflugzeugmarktes. Dieser wächst, indem immer mehr Passagierflugzeuge zu Frachtflugzeugen umgerüstet werden („Passenger to Freighter“, P2F). Laut einer Prognose von Boeing, die in Bild 1 dargestellt ist, wächst der Frachtflugzeugmarkt von 2019 bis 2040 um über 1400 Flugzeuge, wobei ca. 540 im P2F-Bereich entstehen [1].

Die spätere Nutzung der Passagierkabinen als Frachtflugzeugkabinen wird in den Vorentwurfsprozessen derzeit nicht berücksichtigt. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Probleme hinsichtlich der Lasten, Massen, Schwerpunkte und des Bauraums bei den Umbauprozessen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, können bereits in

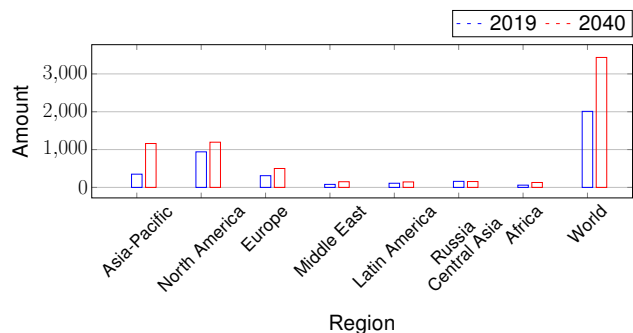


BILD 1. Globale Frachtflugzeuganzahl nach Region im Jahr 2019 und 2040. Etwa 1400 der Frachtflugzeuge entstehen im Bereich P2F [1] [2].

den Vorentwurfsprozessen wissensbasierte Methoden eingesetzt werden. So kann das Gesamtentwurfskonzept auf digitaler Ebene frühzeitig verbessert werden, indem die umbaufähigen Passagierkabinen von Anfang an als Frachtkabinen mitbetrachtet werden. Damit können die Probleme, die aus den Umbauprozessen resultieren, angegangen werden. Wissensbasierte Methoden ermöglichen die Wiederverwendung von Expertenwissen, die Anpassung an neue Entwurfsrichtlinien und die automatisierte Generierung verschiedener Entwurfsvarianten. Gleichzeitig verfügen sie über gute Systemeigenschaften, um Schnittstellen für die Integration in digitale Infrastrukturen zu entwickeln. Zudem unterstützen sie bei der Auslegung

nachvollziehbarer und neuer Kabinenkonzepte.

Obwohl wissenschaftliche Entwurfsmethoden den Gestaltungsprozess deutlich unterstützen und strukturieren, bleibt die Herausforderung bestehen, dass die Komplexität durch die Vielzahl der beteiligten Disziplinen hoch ist. Um dies zu adressieren, wird das Konzept des digitalen Fadens verfolgt. Dieses Konzept beschreibt die Speicherung von Informationen und Daten für physische oder logische Objekte über die Produktlebenszyklen hinweg und bildet sie als ein ganzheitliches System aus weiteren Systemen ab [3]. Dadurch ist eine vollständige Rückverfolgbarkeit der Daten möglich, was die Optimierung ganzheitlicher digitaler Entwurfsprozesse unterstützt.

Basierend auf diesen Herausforderungen befasst sich diese Forschungsarbeit mit der Rumpfindegration von Frachtflugzeugkabinen in das bestehende wissenschaftliche Entwurfssystem *Fuselage Geometry Assembler (FUGA)* sowie die Einbettung der wissenschaftlichen Entwurfsmethoden in multidisziplinäre Entwurfsprozesse [4]. Dafür wird das *Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS)* als Produktdatenformat verwendet, um die Konsistenz der ausgetauschten Daten zwischen den Disziplinen sicherzustellen [5]. Der Ansatz ermöglicht die Betrachtung verschiedener Nutzlastszenarien sowohl für die Passagierkabine als auch für deren umgebaute Frachtvarianten im Vorentwurfsprozess der Flugzeuge. Die neuen Entwurfsparameter erhöhen den Detaillierungsgrad und verbessern damit die Qualität des Gesamtentwurfs.

Zunächst wird der Stand der Wissenschaft im Knowledge-based engineering (KBE) betrachtet und der Vorentwurfsprozess innerhalb des Gesamtflugzeugentwurfs vorgestellt. Anschließend werden die Grundlagen der verwendeten wissenschaftlichen Modellierung erläutert. Darauf aufbauend beschreibt der methodische Teil die Erweiterung der Entwurfsmethodik in *FUGA* für Frachtkabinen. Zudem wird die Integration der wissenschaftlichen Methoden in *FUGA* für Passagier- und Frachtkabinen als Tool in die *Remote Component Environment (RCE)*-Integrationsumgebung erläutert [4] [6]. Damit entsteht ein disziplinübergreifender Entwurfsprozess zwischen *FUGA* und *openAD*, bei dem die detaillierten Informationen aus dem Kabinen- und Strukturentwurf von *FUGA* über das Produktdatenformat *CPACS* in den Vorentwurfsprozess von *openAD* zurückgeführt werden [4] [7] [5]. Hierdurch werden die empirischen und semi-empirischen Vorentwurfsannahmen durch detaillierte Informationen ersetzt. Im ersten Anwendungsbeispiel wird die Plausibilität der neuen Entwurfsmethoden für Frachtkabinen überprüft. Ein zweites Anwendungsbeispiel zeigt den Einfluss der Ergebnisse aus dem disziplinübergreifenden Entwurfsprozess für eine Passagier- und zwei Frachtkabinen eines gemeinsamen Flugzeugtyps der DLR-F25 auf den Vorentwurfsprozess [8]. Abschließend werden die Anwendungsbeispiele diskutiert und der Mehrwert der Methoden zur Bewältigung der eingangs formulierten Herausforderungen aufgezeigt.

2. TECHNISCH-METHODISCHE GRUNDLAGEN

Zunächst wird der Stand der Wissenschaft für KBE-Systeme betrachtet. Darüber hinaus werden die technisch-methodischen Grundlagen des Flugzeugvorentwurfs und der wissenschaftlichen Modellierung im Kontext des Gesamtflugzeugentwurfs erläutert. Zudem wird die Integrations-

umgebung *RCE* vorgestellt, die als Ausgangspunkt zur Orchestrierung eines ganzheitlichen Entwurfsprozesses dient.

2.1. Stand der Wissenschaft

In der Literatur finden sich für den wissenschaftlichen Entwurf verschiedene KBE-Ansätze. In der Publikation von LaRocca wird der von der TU Delft entwickelte MMG thematisiert. Dieser MMG ist in der Lage, anhand von Wissen und Regeln Geometriemodelle unterschiedlicher Produktfamilien für Flugzeuge mit verschmolzenem Flügel-Rumpf-Entwurf (englisch: Blended Wing Body Aircraft, BWB) zu generieren. Eine Objektbaumstruktur ermöglicht die einzelne Instanziierung der Objekte wie beispielsweise Rumpf und Flügel [9]. In *FUGA* wird die Instanziierung für Rumpf, Struktur oder darunter liegender Kompetenzen über den graphenbasierten Ansatz gesteuert [4]. Die objektorientierte Struktur ist klar, hierarchisch und leicht verständlich, daher ist sie für einfache Produktstrukturen gut geeignet. Wenn jedoch komplexere Produktstrukturen benötigt werden, die erweiterbar, flexibel und rückwärtskompatibel sein müssen, bietet sich der graphenbasierte Ansatz an. Ein weiterer Ansatz ist das KBE-System von Chapman, das in der Automobilindustrie für die strukturelle Rohkarosserie von Fahrzeugen verwendet wird [10]. Im Vergleich zu La Roccas MMG und *FUGA* ist das von Chapman vorgestellte KBE-System nur auf einen Teil des Produktes ausgerichtet. Der Ansatz von Chapman ist generisch und damit auf unterschiedliche Karosseriestrukturen anwendbar. Ein weiterer Ansatz eines wissenschaftlichen Systems von Häußler kommt aus dem Bauingenieurwesen und befasst sich mit der Planung von Eisenbahninfrastruktur [11]. Obwohl sich dieser Ansatz nicht für die Modellierung von Geometrien eignet, demonstriert er das Potenzial wissenschaftlicher Methoden, den Entwicklungsprozess signifikant zu beschleunigen. Eine detaillierte Analyse zum Stand der Wissenschaft ist vom DLR aufgeführt [2].

In der wissenschaftlichen Literatur lassen sich derzeit keine Ansätze für ein KBE-System finden, das die automatisierte Generierung von Frachtflugzeugkabinen unter ganzheitlicher Integration des äußeren Formlinienentwurfs, des Strukturentwurfs und des Kabinenlayouts umfasst. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein Ansatz für eine Entwurfsmethode für die Produktarchitektur „Frachtkabine“ basierend auf den wissenschaftlichen Entwurfssystem *FUGA* vorgestellt. Dieses nutzt als Entwurfsbasis die *CPACS*-Daten aus dem Gesamtflugzeugentwurf.

2.2. Gesamtflugzeugvorentwurf

Am Anfang des Gesamtflugzeugentwurfs wird anhand der Top-Level Aircraft Requirements (TLARs) und Missionsprofile das Flugzeug grob ausgelegt. Es wird die äußere Form und die Grundkonfiguration festgelegt sowie erste Massen- und Leistungsabschätzungen getroffen. Hierfür wird der vom DLR entwickelte Design Synthesizer *openAD* verwendet. Damit können konventionelle oder neue Flugzeugkonfigurationen in einem definierten Entwurfsraum generiert, optimiert und analysiert werden. Das Entwurfstool integriert die Disziplinen Aerodynamik, Strukturdesign, Antriebssysteme, Massen- und Schwerpunktberechnung, Flugleistungsrechnung sowie Flugmechanik. [7]

Wie Abbildung 2 zeigt, besteht der iterative und multidisziplinäre Entwurfsprozess in *openAD* grundsätzlich aus

drei Hauptphasen. In der konzeptionellen Phase L0 findet eine erste Erfassung der Flugzeugkonfiguration basierend auf den obersten Entwurfsanforderungen statt. Mithilfe empirischer, semi-empirischer und analytischer Methoden kann eine schnelle erste Abschätzung ohne den Einsatz komplexer externer Werkzeuge erfolgen. In L1 wird eine detailliertere disziplinäre Integration durchgeführt, um die Genauigkeit durch die Einbindung spezialisierter Tools für Aerodynamik, Triebwerksleistung und Massenabschätzung zu erhöhen. Zur Konvergenz des Entwurfs werden iterative Anpassungen durchgeführt, bis die maximale Startmasse stabil ist („Schneeballeffekt“). Als Schneeballeffekt wird ein selbstverstärkender Massekopplungseffekt bezeichnet, bei dem lokale Massenänderungen strukturelle Anpassungen des Flugzeugs nach sich ziehen, die wiederum zu einer weiteren Erhöhung der Gesamtmasse führen. In L2 werden detaillierte Untersuchungen für spezifische Flugzeugkomponenten mit hochgenauen Methoden durchgeführt, beispielsweise die detaillierte Strukturauslegung anhand von Lastfällen aus Phase L1. Somit erhöht jede Phase den Detaillierungsgrad des Entwurfs. Die Flugzeugkonfigurationen werden nach dem Entwurfsprozess von *openAD* im CPACS-Format bereitgestellt. [7]

CPACS ist ein vom DLR entwickeltes standardisiertes Datenmodell für den Datenaustausch in kollaborativen Projekten der Luftfahrt und für den Entwurf von Flugzeugen. Das Datenmodell verbindet die heterogenen Disziplinen mit ihrem unterschiedlichen Expertenwissen. CPACS beschreibt Luftfahrzeuge, wie Hubschrauber und Flugzeuge, anhand einer hierarchischen Datenstruktur. Diese kann Parameterwerte oder auch andere Daten, wie beispielsweise Missionsdaten oder spezifische Informationen anderer Werkzeuge enthalten. [5]

2.3. Wissensbasierte Modellierung

Eine disziplinäre Integration innerhalb der Phase L1 des Gesamtentwurfs stellt der initiale und wissensbasierte Struktur- und Kabinenentwurf der Flugzeuge dar, der mit dem vom DLR entwickelten KBE-Methoden innerhalb von FUGA umgesetzt wird. FUGA ist ein Framework und implementiert den von Walther entwickelten wissensbasierten Ansatz zur detaillierten Flugzeugmodellierung auf Vorentwurfsebene, das den initialen Rumpf- und Kabinenentwurf von Flugzeugen unterstützt [4]. Die in FUGA implementierte Methode ist nicht nur ein einfacher *Multi Model Generator* (MMG), der Flugzeuggeometrien auf unterschiedlichen Fidelitätsgraden erzeugt, sondern alle Modelleigenschaften werden basierend auf CPACS auf einer konsistenten parametrischen Grundlage generiert und gespeichert [4] [12] [13]. Auf Basis der geometrischen Informationen lassen sich weitere Daten zur Massenverteilung der Sekundärelemente in der Kabine ableiten, um zusätzliche Entscheidungen im disziplinübergreifenden Entwurfsprozess der Kabine zu unterstützen. Zudem können mithilfe der von FUGA bereitgestellten Geometrien hochauflösende solveragnostische Finite Elemente Modelle für kabinenakustische und strukturdynamische Analysen erzeugt werden [14] [15].

Die Betrachtung unterschiedlicher Ansätze von KBE-Systemen ergibt fünf wesentliche Merkmale [10] [16] [9]:

- **Wissensbasis:** Enthält alle Regeln, Berechnungen und das für den Entwurf notwendige Wissen.

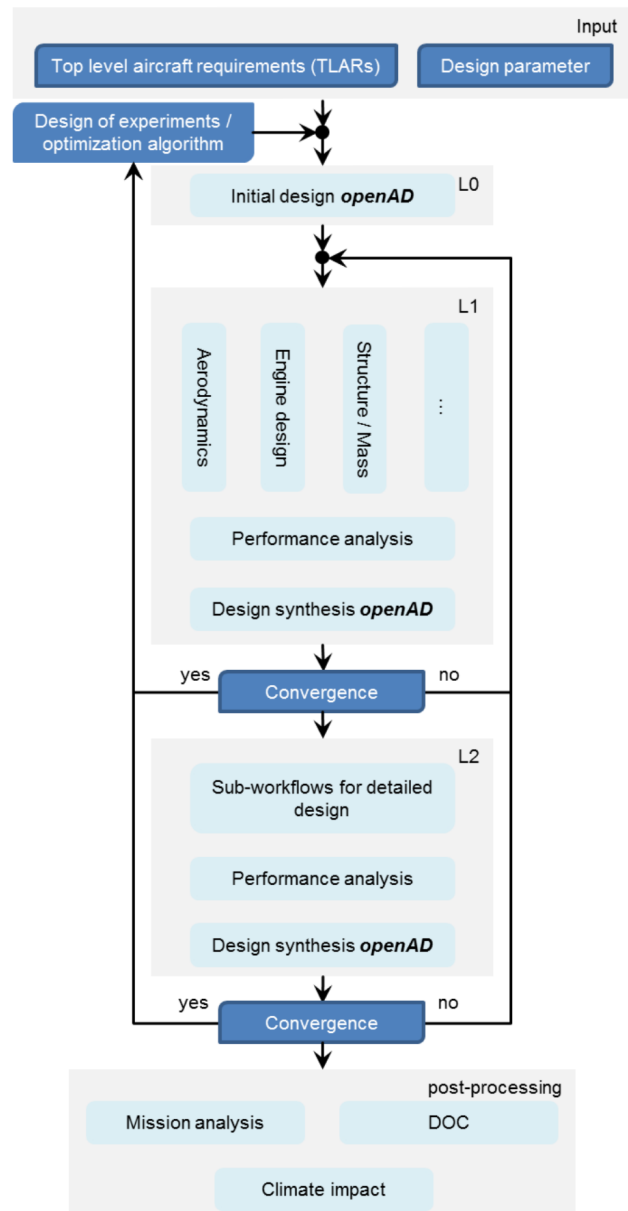


BILD 2. Flowchart des Entwurfsprozesses in *openAD* [7].

- **Schlussfolgerungsmaschine:** Verarbeitet die Regeln aus der Wissensbasis und leitet Entwurfsentscheidungen ab.
- **Produktdatenspeicher:** Ermöglicht das Einbinden externer Daten und Analysewerkzeuge.
- **Modellierungswerkzeug:** Ermöglicht Geometrieerstellung, kann an ein CAD-System angebunden werden oder ein eigenes CAD-Modul enthalten.
- **Benutzeroberfläche:** Bietet eine Kommandozeile oder grafische Oberfläche zur Interaktion mit dem System.

Die Basis des Produktdatenspeichers in FUGA bildet das CPACS-Datenformat. Der Produktdatenspeicher kann diverse Datenformen enthalten, beispielsweise externe Geometriemodelle mit eindeutiger Ressourcenidentifizierung (englisch: Uniform Resource Identifier, URI) und den Python-Bindings des OCCT-CAD-Kernels (*Open CASCADE Technology*) [17].

Das Wissensrepositorium in FUGA fasst alle Regeln in einem Entwurfssystem zusammen. Jede Regel folgt einem standardisierten Regelprotokoll welches in Python als

Klasse mit einer eindeutigen URI implementiert ist.

Die Inferenzmaschine in *FUGA* basiert auf dem Python-Paket *NetworkX*, wie in Hagberg [18] dargestellt. Der in der Inferenzmaschine integrierte Ansatz ist graphenbasiert und setzt Lazy Evaluation und Invalidation um. Sie steuert die logischen Abfolgen zwischen den Regeln. Die Regeln bilden die Knoten, die URIs der Regeln sind die Verbindungsmerkmale zwischen den Knoten der Graphen. Der Graph, der alle Regeln und deren Abhängigkeiten enthält, ist der maximale Konnektivitätsgraph (englisch: maximum connectivity graph, MCG). Der fundamentale Problemlösungsgraph (englisch: fundamental problem graph, FPG) wird für anwendungsspezifische Entwurfsprobleme des Struktur- und Kabinenentwurfs aus dem MCG erzeugt und verwendet die angeforderten URIs der Regelsätze. Zur Erstellung des FPG werden alle Vorfahren der initialen Knoten und alle Nachfahren der angefragten Knoten entfernt. Um eine Lösung für den FPG zu generieren, wird ein Problemlösungsgraph (engl.: problem solution graph, PSG) erstellt, da jede Regel erst angefragt werden kann, wenn alle notwendigen Eingaben im Produktdatenspeicher abgelegt sind. Die topologische Sortierung erfolgt nach dem Kahn-Algorithmus, sodass in einem gerichteten azyklischen Graphen (engl.: directed cyclic graph, DAG) jeder Knoten vor dem Knoten erscheint, auf den er zeigt. Alle Knoten werden so in eine lineare Reihenfolge gebracht, was die Lösung des Entwurfsproblems in der richtigen Reihenfolge sicherstellt [19]. Die topologische Sortierung der Wissensregeln innerhalb des PSG ist zwingende Voraussetzung um die Lösung des Entwurfsproblems zu ermöglichen.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass sich neue Regeln einfach in das KBE-System integrieren lassen und die Systemarchitektur im *FUGA*-Framework dadurch eine geeignete Grundlage bietet, um neue Produktarchitekturen oder Subsysteme in das bestehende System einzubinden. Dies wird von Hellbrück am Beispiel der Integration von Wasserstofftanks und deren Systemintegration gezeigt [20].

2.4. Disziplinübergreifende Integrationsumgebung

Für einen disziplinübergreifenden Entwurfsprozess können die heterogenen Toollandschaften der verschiedenen Disziplinen mit dem Ziel eines digitalen und durchgängigen Gesamtentwurfs des Flugzeugs in die *RCE*-Integrationsumgebung eingebettet werden. So kann ein

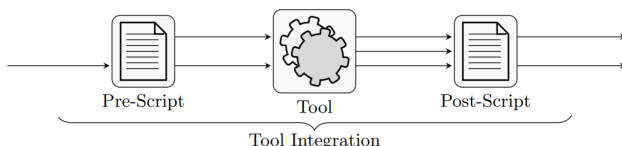


BILD 3. RCE-Konzept der Werkzeugintegration [6].

einzelner Ingenieur verschiedene Werkzeuge in einem Prozess verwenden und die Berechnung oder Simulation unterschiedlichster Daten automatisieren [6]. RCE bietet eine grafische Benutzeroberfläche, die die Integration der Werkzeuge vereinfacht. Die Abbildung 3 zeigt das Konzept der Werkzeugintegration. So können zusätzlich zu den in RCE integrierten Werkzeugen Pre-Scripts und Post-Scripts erstellt werden, um die erforderlichen Daten im multidisziplinären Workflow anzupassen [6]. Dies ermöglicht die

Verknüpfung der wissensbasierten Entwurfsmethoden in *FUGA* mit dem Design Synthesizer *openAD* in einem gemeinsamen durchgängigen Entwurfsprozess.

3. WISSENSBASIERTE ENTWURFSMETHODIK ZUR RUMPFINTEGRATION VON FRACHTFLUGZEUGEN

In diesem Abschnitt wird die Weiterentwicklung der KBE-Methoden innerhalb des *FUGA-Frameworks* für den initialen Rumpf- und Kabinenentwurf von Frachtflugzeugkabinen beschrieben. Eine ausführliche Darstellung des methodischen Vorgehens wird vom DLR aufgeführt [2]. Um die Komplexität zu begrenzen und eine ausreichende Grundlage für das anschließende methodische Vorgehen und die Analysen zu schaffen, werden im *FUGA*-Framework die folgenden systemischen Anpassungen für das neue Frachtflugzeugentwurfssystem vorgenommen:

- Die Erweiterung domänenspezifischen Wissens erfordert die Modifizierung der benutzerdefinierten Eingaben und Knoten
- Anpassung des Strukturentwurfs für Fenster, Türen und Main Deck Cargo Door (MDCD)
- Neue Regeln und Regelwerke für den Frachtkabinenentwurf zur Modellierung der 9g-Barriere, neuer Containertypen und ihre Platzierung auf zusätzlichen Decks sowie die Zuweisung individueller Beladungsdichten
- Modifizierung von Regelwerken für Visualisierungen
- Zusätzliches Wissen in Form von Regelwerken für den Massenentwurf und das Multifidelity-Massenmodell
- Wissenserweiterung zum Generieren *CPACS*-konformer Entwurfsergebnisse

Basierend auf diesen Erweiterungen können anschließend Frachtflugzeugmodelle aus den *CPACS*-basierten Vorentwurfsdaten generiert werden. Das neue Entwurfssystem dient dann als Grundlage für den zweiten Teil der Methodik, in dem die KBE-Entwurfsmethodik in die *RCE*-Umgebung für disziplinübergreifende Analysen integriert wird.

3.1. Systembasis

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung der neuen Entwurfs- und Modellierungssysteme für Frachtflugzeugkabinen erläutert. Darüber hinaus werden die Regelwerke für den Strukturentwurf modifiziert. Außerdem müssen die benutzerdefinierten Eingaben für die Frachtflugzeugkonfigurationen berücksichtigt werden. Dazu wird eine neue Eingabedatei mit den initialen Entwurfsparametern auf den spezifischen Anforderungen der Frachtkabinen aufgebaut. Das Ziel der Entwicklung einer Systembasis in diesem Abschnitt besteht darin, den initialen Rumpf- und Kabinenentwurf für die Frachtflugzeuge funktionsfähig in das bestehende KBE-System zu integrieren, zunächst ohne die Sekundärstrukturen des oberen Decks.

Um eine passende Struktur für das bestehende System aufzubauen, wird mittels Reverse Engineering die bestehende Struktur des Passagierentwurfssystems analysiert, die notwendigen Systemteile für den Frachtkabinenentwurf extrahiert und auf die Anforderungen der neuen Produktarchitektur angepasst. Abbildung 4 veranschaulicht das erstellte Fracht- und Strukturentwurfssystem sowie das Multifidelity-Frachtmodell inklusive des Massenentwurfssystems als UML-Klassendiagramm, das lediglich einen Ausschnitt des Systems abbildet. Jede Klasse in den einzelnen Systemen instanziiert eine Plugin-Klasse, diese übergibt bestimmte Argumente in Form von Konfigurationsparametern, Pfaden und strukturiert die jeweiligen

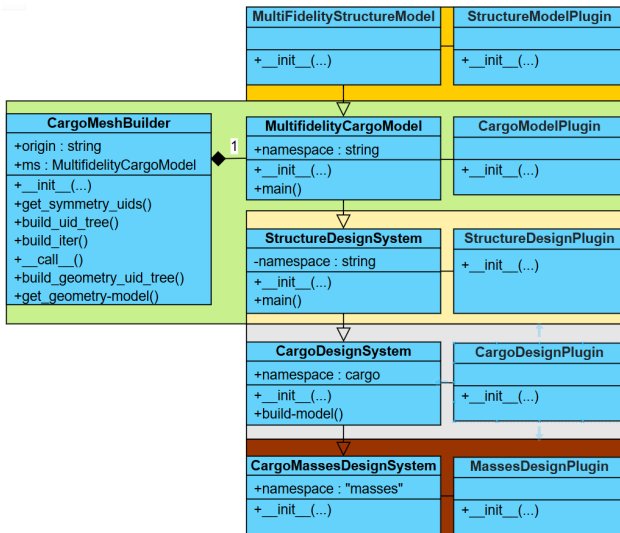


BILD 4. Partielle Systemdarstellung des FUGA-Frameworks als UML-Klassendiagramm für die Entwurfs- oder Modellierungssysteme im Struktur-, Kabinen- und Massenentwurf [2].

Subsysteme bei der Initialisierung der Entwurfssysteme. Jedes Subsystem stellt seine Regeln mit den dazugehörigen URIs über Listen bereit. Ferner organisiert die Plugin-Architektur die jeweiligen Regelwerke der Subsysteme für das Wissensrepositorium.

Mit der dieser neuen Systembasis können anschließend die neuen Regelwerke für den Frachtkabinenentwurf entwickelt werden. Da die unteren Frachtdecks für Passagier- und Frachtkabinen strukturell gleich sind, sind alle Regeln für den Frachtbereich des unteren Decks aus dem Passagierentwurf- und Modellierungssystem äquivalent zum neuen Entwurfs- und Modellierungssystem der Frachtflugzeuge. Zudem wird eine an die Anforderungen der Frachtkabinen angepasste XML-Datei erstellt. Diese übermittelt bei der Initialisierung der Entwurfsprozesse die benutzerdefinierten Parameter für den Struktur- und Kabinenentwurf an das Datenrepositorium. Sowohl das Entwurfssystem für die Passagiere als auch das für die Frachtkabinen greifen beide auf das Subsystem für den Strukturentwurf zu. Das erfordert Anpassungen im Regelwerk des Strukturentwurfs, sodass beide Kabinenstrukturen ohne Logikdiskrepanzen generiert werden können. Die methodischen Erweiterungen umfassen Aspekte zu den Türplatzierungen und zu den Fensterausschnitten.

Das Ergebnis der in diesem Abschnitt beschriebenen Methode ist eine Systembasis für den Entwurf von Kabinen für Frachtflugzeuge. Auf Basis der neuen Struktur der XML-Datei für die benutzerdefinierten Parameter erzeugt sie die Geometriemodelle ohne Sekundärstrukturen des oberen Decks. Somit ist sowohl die Strukturauslegung als auch die Kabinenauslegung des unteren Frachtdecks möglich. Auf dieser Grundlage kann das neue Entwurfssystem durch weitere Methoden und Entwurfsregeln um zusätzliche Frachtkabinenelemente ergänzt werden.

3.2. Erweiterung der wissensbasierten Methoden für Frachtkabinenmodelle

Auf Basis der neuen Systemgrundlage im FUGA-Framework werden die wissensbasierten Methoden für den Frachtkabinenentwurf erweitert. Diese Erweiterungen

ermöglichen dann den Entwurf der Frachtkabinen für unterschiedliche Nutzlastszenarien, inklusive Massenentwurf und das Speichern der Ergebnisse in das CPACS-Format. Die grundlegenden Schritte für die Entwicklung der neuen Wissensregeln sind in Abbildung 5 dargestellt. Diese Erweiterungen umfassen die Modellierung und Platzierung verschiedener Containertypen auf beiden Frachtdecks, die Integration der MDCD und der 9g-Barriere, die Erstellung von Kabinenlayouts und Querschnitten, den Massenentwurf sowie das Speichern CPACS-konformer Entwurfsergebnisse.

Zunächst werden die neuen Entwurfsmethoden für die Platzierung von Containern, neue Containertypen sowie Eigenschaften dieser Typen für das obere und untere Frachtdeck implementiert. Dies erlaubt sowohl die Verteilung unterschiedlicher Unit Load Devices (ULDs) auf einem Deck als auch die automatische Generierung spezieller Typen (z. B. AAY) [21], wenn diese in den Eingabeparametern vordefiniert werden. Zusätzlich wird eine Beladungsdichte eingeführt, um eine präzisere Massendefinition und Lastverteilung zu ermöglichen.

Darauf aufbauend werden Regeln für die automatisierte Modellierung der Hauptfrachttür sowie für die Integration der 9g-Barriere im oberen Frachtdeck entwickelt. Das erhöht die Detailtiefe für spätere Bauraumbetrachtungen und Massenauslegungen. Ebenso wird das Regelwerk für die Visualisierung der Kabinenlayouts und Querschnitte angepasst, sodass automatisiert Kabinenlayouts und Querschnitte aus den Entwurfsergebnissen generiert werden können.

Um die Informationen aus den Kabinenkonfigurationen in den Vorentwurfsprozess einfließen zu lassen, werden zusätzliche Regeln definiert. Diese ermitteln auf Basis der Geometriemodelle die Massen und Positionen der Kabinenelemente. Die Ergebnisse werden in den Komponenten *mpayload*, *mFurnishing* und *mOperatoritems* des jeweiligen CPACS-Knoten abgelegt, deren Schwerpunkte anschließend nach Gleichung 1 berechnet werden.

$$(1) \quad r_S(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i r_i(t).$$

Dabei bezeichnet $r_S(t)$ den zeitabhängigen Schwerpunkt des Gesamtsystems, M die Gesamtmasse, m_i die Masse der i -ten Komponente und $r_i(t)$ deren zeitabhängige Schwerpunktposition, wobei über alle n betrachteten Komponenten summiert wird. Abschließend müssen alle Entwurfsergebnisse CPACS-konform an das CPACS-Produktdatenformat übergeben werden, um sie disziplinübergreifend für weitere Analysen verfügbar zu machen. Dies erfordert eine Anpassung zusätzlicher Regeln für das Parsing der Daten. Einerseits werden die toolspezifischen Informationen aus den Entwurfsprozessen im toolspezifischen Knoten der CPACS-Datei abgelegt. Andererseits werden die Daten aus der Modellierung sowie aus dem Massenentwurf des wissensbasierten Struktur- und Kabinenentwurfs in die entsprechenden Knoten der CPACS-Hierarchie gemappt.

Auf Basis dieser Erweiterungen können Frachtkabinenkonfigurationen automatisiert aus CPACS-Vorentwurfsdaten und benutzerdefinierten Parametern generiert werden. Das neue Frachtflugzeugentwurfssystem bildet die Grundla-

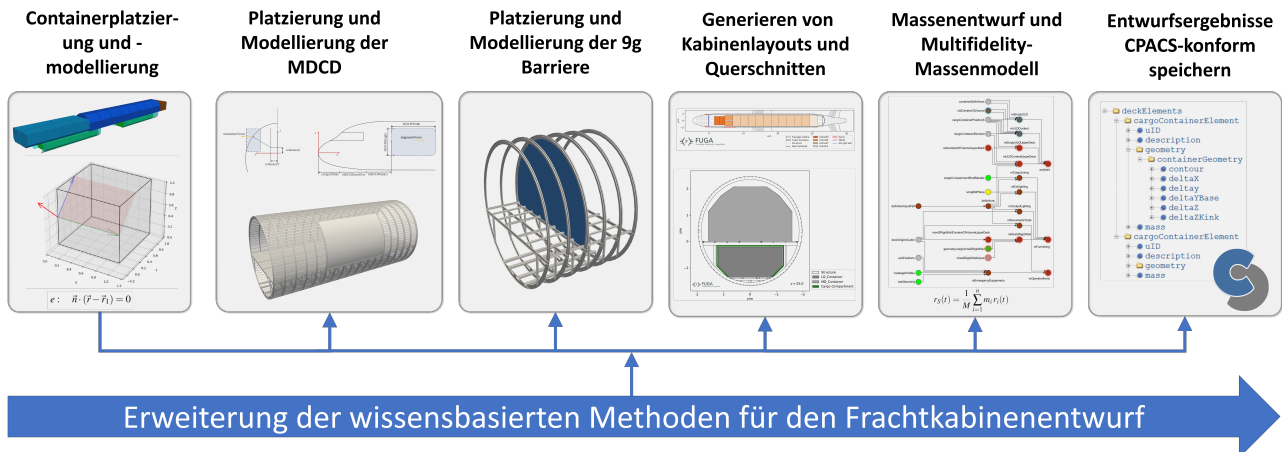


BILD 5. Erweiterung der Wissensbasis um den Entwurf der Frachtkabine inklusive Massenentwurf und CPACS-Schnittstelle.

ge für eine parallele Untersuchung von Passagier- und Frachtkabinen im Flugzeugvorentwurfsstadium, in dem die wissensbasierten Entwurfsmethoden in *FUGA* in die *RCE*-Umgebung integriert und ein multidisziplinärer Workflow aufgebaut wird. Dadurch können die Vorentwurfsannahmen durch detaillierte Ergebnisse ersetzt werden, was die Genauigkeit der Vorentwurfsprozesse erhöht.

4. METHODE ZUR ITERATIVEN ENTWURFSOPTIMIERUNG IN DER *RCE*-INTEGRATIONSUMGEBUNG

Der zweite Teil der Methodik beschreibt die Vorgehensweise zur Integration der in *FUGA* vorhandenen Entwurfssysteme für Passagier- und Frachtflugzeugkabinen in die *RCE*-Integrationsumgebung sowie die Entwicklung eines multidisziplinären Workflows. Dies ermöglicht die Verbindung des wissensbasierten Passagierflugzeugentwurfs und des Frachtflugzeugentwurfs für weiterführende Analysen mit dem Flugzeugvorentwurf. Die methodische Umsetzung zur Integration der KBE-Entwurfsmethoden in die *RCE*-Integrationsumgebung wird anhand des Frachtflugzeugentwurfssystems vorgestellt. Für das Passagierentwurfssystem kann analog vorgegangen werden.

4.1. Toolintegration der wissensbasierten Methoden

Nachfolgend wird die Integration des Frachtkabinenentwurfs einschließlich des Massenentwurfs als Werkzeug in die *RCE*-Integrationsumgebung beschrieben. Ein Werkzeug in *RCE* besteht im Wesentlichen aus einem vorgeschalteten Skript und einem nachgeschalteten Skript sowie der dazwischen liegenden Anwendung. Die Konfiguration der Anwendung erfolgt über die Datei *configurations.json*, in der alle Parameter festgelegt werden, um das Tool und deren Funktion in *RCE* zu beschreiben. Dazu gehören die Pfade für ein- und ausgehende Daten, der Speicherort des Tools, die Kommandozeilenbefehle zur Aktivierung der erforderlichen Umgebung und weitere Einstellungen, die für die Integration erforderlich sind.

Die Code-Basis der Werkzeugintegration wurde in Python entwickelt und untergliedert sich in drei primäre Prozesse. Der initiale Prozessschritt lädt die *CPACS*-Datei über den in der Konfigurationsdatei *configurations.json* hinterlegten Pfad und stellt sie dem Kernprozess und somit der Anwendung zur Verfügung. Im Kernprozess werden die erforderlichen Python-Module bzw. die jeweiligen Entwurfssysteme importiert. Zudem wird der Kabinen- und

Massenentwurf durchgeführt und sämtliche Entwurfsergebnisse werden in einer Dictionary-Struktur mit eindeutigen Schlüsseln gespeichert. Zu den Entwurfsergebnissen zählen die *CPACS*-Daten für den Kabinen- und Strukturentwurf und den Massenentwurf sowie die Kabinenlayouts. Im nachgeschalteten Prozessschritt werden alle Ergebnisse aus dem Dictionary extrahiert. Die Ausgabe der *CPACS*-Datei erfolgt direkt als XML-Datei, während alle Layouts über einen Rückgabepfad ausgegeben werden. Jeder dieser drei Hauptprozesse wird durch eine eigene Python-Klasse abgebildet und anschließend in einem Kernprozess der *core.py* zusammengeführt. Die *CPACS*-Datei stellt den initialen Datensatz für das Werkzeug dar, welcher über den in *RCE* integrierten *Input-Provider* bereitgestellt wird. Der Output umfasst die um zusätzliche Informationen aus dem Kabinenentwurf angereicherte *CPACS*-Datei sowie die Visualisierungen der Kabinenlayouts, diese werden über die *RCE*-Funktion des *Output-Provider* ausgegeben. Die Initialisierung des Werkzeugs erfolgt über die *run.py*, die den Kernprozess in der *core.py* und alle zuvor beschriebenen Prozessphasen nacheinander ausführt.

4.2. Iterativer multidisziplinärer Flugzeugvorentwurf

Im Folgenden wird die Methode zur Rückführung der Ergebnisse der detaillierten Massenauslegung aus dem wissensbasierten Entwurf von Passagier- und Frachtflugzeugkabinen in den Vorentwurfsprozess dargelegt. Zu diesem Zweck wird in der *RCE*-Integrationsumgebung ein multidisziplinärer Entwurfsprozess durch die Kopplung von *FUGA* mit *openAD* in einem iterativen Entwurfsprozess aufgebaut. Dies ermöglicht die Bewertung des Einflusses der Massen aus dem wissensbasierten Entwurf auf den Gesamtflugzeugentwurf. Auf dieser Grundlage können weitere Analysen durchgeführt werden, um Synergien zwischen Fracht- und Passagierkabine desselben Flugzeugtyps im Vorentwurfsprozess für verschiedene Nutzlastszenarien zu identifizieren. Dadurch können Struktur, Geometrie, Massen und Bauraum der Fracht- und Passagierkabinen betrachtet werden. *RCE* stellt bereits eine Reihe integrierter Werkzeuge zur Verfügung, darunter das Flugzeugvorentwurfswerkzeug *openAD*. Auf dieser Basis und der zuvor umgesetzten Integration der Entwurfsmethodiken von *FUGA* in *RCE* kann ein multidisziplinärer Entwurfsprozess aufgebaut werden.

Abbildung 6 zeigt den in *RCE* implementierten multidisziplinären Workflow zur Integration der wissensbasierten Entwurfsmethoden des *FUGA*-Frameworks in den *openAD*-Vorentwurfsprozess. Die Phase L0 beginnt mit

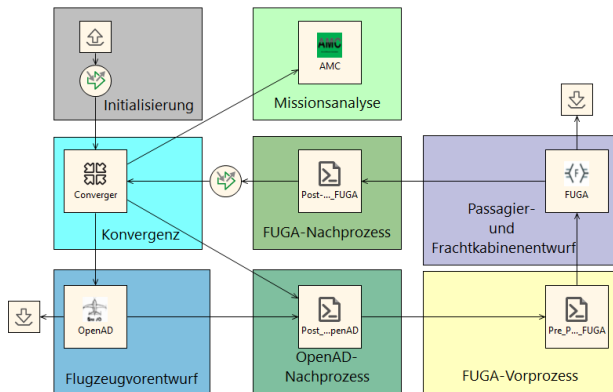


BILD 6. Multidisziplinäre Entwurfsoptimierung innerhalb von *RCE*, basierend auf der Rückführung der Entwurfsergebnisse für Nutzlast, Betriebsmittel und Ausstattung aus dem initialen Struktur- und Kabinenentwurf mit *FUGA* in den Flugzeugvorentwurf zur Neuauslegung von Flugzeugen mit *openAD* [2].

der Initialisierung, in der die initiale *CPACS*-Datei geladen wird. Anschließend werden Konvergenzkriterien festgelegt und basierend auf den TLARs wird eine initiale Flugzeugauslegung mit dem Design-Synthesizer *openAD* durchgeführt. Die Phase L1 der detaillierten disziplinären Integration in den Gesamtentwurf setzt sich zusammen aus den Prozessschritten *openAD*-Nachprozess, die Missionsanalyse, der *FUGA*-Vorprozess, dem Struktur- und Kabinenentwurf sowie dem *FUGA*-Nachprozess. Im *openAD*-Nachprozess werden die initialen Entwurfparameter für weitere Iterationen mit den neuen *CPACS*-Konfiguration zusammengeführt. Im vorgeschalteten Arbeitsschritt für den wissensbasierten Entwurf mit *FUGA* werden die *CPACS*-Daten in einem toolspezifischen Knoten um die initialen Entwurfparameter für die Struktur- und Kabinenauslegung der Flugzeuge ergänzt. Darauf aufbauend erfolgt der initiale und wissensbasierte Struktur- und Kabinenentwurf der Flugzeuge. Im *FUGA*-Nachprozess werden die Massen und Schwerpunkte aus der wissensbasierten Modellierung für Nutzlast, Betriebsmittel und Ausstattung in den toolspezifischen *components*-Knoten von *openAD* geschrieben. Damit können die detaillierteren Ergebnisse in der nächsten Entwurfsiteration als neue Entwurfparameter berücksichtigt werden. Abschließend erfolgt eine Konvergenzprüfung mit dem *Converger* für die maximale Startmasse des Flugzeugs, bei Nichterfüllung des Kriteriums wird automatisch eine neue Iteration durchlaufen. Mit dem auskonvergierten Flugzeugentwurf können anschließend zusätzliche Missionsanalysen durchgeführt werden.

Die entwickelte Methodik ermöglicht die Durchführung eines multidisziplinären Entwurfsprozesses. Dies wurde durch die Integration und Verknüpfung von *FUGA* mit *openAD* in der *RCE*-Integrationsumgebung erreicht. Dadurch werden verschiedene Disziplinen wie Geometrie, Massen und Struktur miteinander verknüpft, was eine iterative Entwurfsoptimierung unter Berücksichtigung des Schneeball-Effektes ermöglicht. Die detaillierten Massenberechnungen aus dem wissensbasierten Kabinenentwurf mit *FUGA* ersetzen dabei die empirischen und semiempirischen Ergebnisse des Vorentwurfs. Dadurch ist eine

präzisere Auslegung der Flugzeuge mit größerer Detailtiefe in der konzeptionellen Phase möglich. Zudem ermöglicht der hier vorgestellte Ansatz die Betrachtung von Fracht- und Passagierkabinen gleicher Flugzeugtypen.

5. ANWENDUNG UND AUSWERTUNG WISSENSBASIERTER, ITERATIVER ENTWURFSPROZESSE

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt wird das neue Frachtflugzeugentwurfssystem einschließlich des Massenentwurfssystems an einem Flugzeugtyp getestet. Dazu wird das Testflugzeug mit dem Referenzmodell aus der Industrie verglichen. Zudem wird der Massenentwurf des Testflugzeugs visuell und mathematisch überprüft.

Der zweite Abschnitt befasst sich mit der Auswertung der Ergebnisse der iterativen und multidisziplinären Entwurfs-optimierung für Passagier- und Frachtflugzeugkabinen, die anhand eines weiteren Flugzeugtyps durchgeführt wird. Dafür werden mittels der wissensbasierten Entwurfsmethodik mit *FUGA* drei unterschiedliche Kabinenkonfigurationen erstellt, eine Passagier- und zwei Frachtkabinen. Die Entwurfsergebnisse der unterschiedlichen Kabinenkonfigurationen werden dann innerhalb des neu entwickelten disziplinübergreifenden Entwurfsprozesses, der in Abschnitt 5.2 hergeleitet wird, an das Flugzeugentwurfswerkzeug *openAD* zurückgeben und die Flugzeuge neu ausgelegt. Anschließend werden die neu ausgelegten Flugzeuge mit dem Referenzmodell verglichen und bewertet.

5.1. Plausibilität des Frachtflugzeugentwurfssystems

In diesem Abschnitt werden das neu entwickelte Entwurfssystem für Frachtflugzeugkabinen und das zugehörige Massenentwurfssystem auf Plausibilität überprüft. Plausibel sind die Entwurfsergebnisse dann, wenn sie die zu erwartenden Ergebnisse zur Modellierung und Platzierung der Kabinenelemente widerspiegeln, sowie die Massen korrekt berechnen. Zu diesem Zweck werden ausgewählte Sekundärelemente einer Überprüfung bezüglich ihrer Position und Masse unterzogen.

Die Überprüfung der neuen Entwurfsmethodik erfolgte anhand der Kabinenauslegung mit dem neuen Frachtflugzeugentwurfssystem. Als initiale Entwurfsdaten für das Datenrepositorium werden die *CPACS*-Vorentwurfsdaten der D239-Konfigurationen sowie die benutzerdefinierten Entwurfparameter für die Primär- und Sekundärstruktur verwendet.

Für das Beladungsszenario mit den ULDs für das obere und untere Frachtdeck wird die Kabinenkonfiguration mit einer standardisierten Frachtbestückung modelliert. Abbildung 7 zeigt zu diesem Zweck die mit *FUGA* modellierte Kabine, die mit der Referenzkabine des umgebauten Passagierflugzeugs A321 der Elbe Flugzeugwerke GmbH verglichen wird. Damit kann belegt werden, dass die Platzierung und Modellierung der Container mit den neuen Entwurfsmethoden plausibel ist. Zu diesem Zweck wird die Konfiguration des D239-Frachtflugzeugs für eine vorgegebene Anzahl von ULDs für das obere und untere Frachtdeck erstellt. Die Frachtflugzeugvariante der D239 wird auf dem oberen Deck mit jeweils elf ULDs des Typs AAY und auf dem unteren Deck mit zehn ULDs des Typs AKH bestückt. Die Gegenüberstellung der Kabine aus dem wissensbasierten Entwurf mit dem Referenzmodell

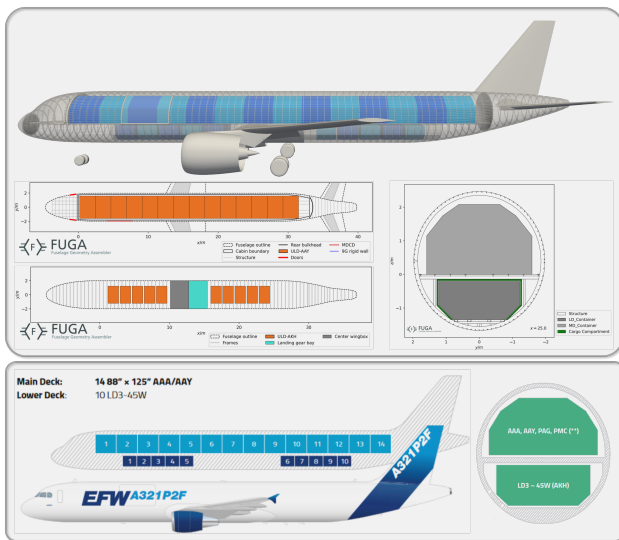


BILD 7. D239 mit *FUGA* modelliertes Frachtkabinenmodell für die Plausibilitätsprüfung der neuen Methoden dem Referenzmodell A321 gegenübergestellt [2] [22].

in Abbildung 7 zeigt eine Übereinstimmung bezüglich der Layoutstruktur. Daraus kann geschlossen werden, dass die neuen, wissensbasierten Entwurfsmethoden in der Lage sind, reale Kabinenkonfigurationen für anforderungsspezifische Fälle abzubilden. Dies bestätigt die Plausibilität des automatisierten und wissensbasierten Kabinenentwurfs hinsichtlich der Modellierung und Platzierung der Container auf dem oberen und unteren Deck der Frachtflugzeuge.

Ein weiterer Schritt ist die Plausibilisierung zur Bestimmung der Massen und ihrer Schwerpunkte in der Frachtflugzeugkabine, da diese die Grundlage für die nachfolgenden Analysen des multidisziplinären Entwurfsprozesses bilden. Um zu überprüfen, ob die Positionen der Massen korrekt bestimmt werden, werden die Massen des multifidelen Massenmodells der Frachtkabinen relativ zu ihrem Gewicht als Sphären im Geometriemodell des Flugzeugs platziert. Abbildung 8 zeigt durch die stimmige Zuordnung und Größenskalierung der Schwerpunktsphären zu den entsprechenden Bauteilen, dass die Schwerpunkte und Massen der Geometriemodelle korrekt ermittelt und aus den Informationen der jeweiligen Strukturelemente im Massenentwurf plausibel bestimmt werden.

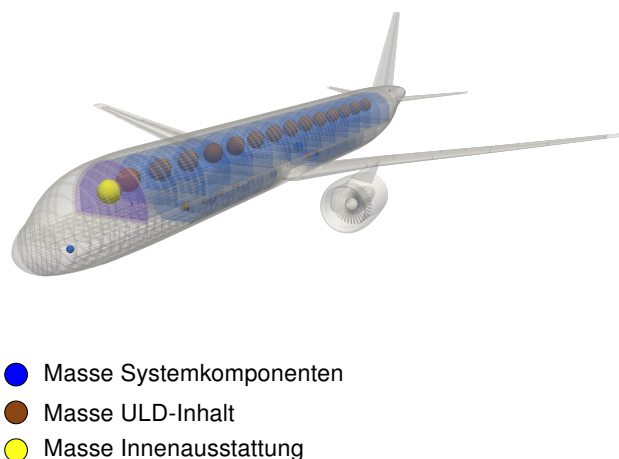


BILD 8. Geometriemodell der D239 Frachtvariante mit integriertem Multifidelity-Massenmodell [2].

Zur Prüfung der neuen Entwurfsmethoden wurde in diesem Abschnitt der Flugzeugtyp D239 als Frachtflugzeugkabine für eine standardisierte Frachtbestückung konfiguriert. Der Vergleich der Kabinenkonfigurationen mit einem physikalischen Referenzmodell aus der Industrie zeigt, dass die Ergebnisse in geeignetem Maße die Realität widerspiegeln. Folglich sind sie für zukünftige Entwürfe geeignet.

5.2. Iterative Entwurfsoptimierung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der aus dem wissensbasierten Kabinenentwurf zurückgeführten Masseninformationen auf den konzeptionellen Flugzeugentwurf untersucht. Grundlage dafür ist der im methodischen Teil 4.2 entwickelte multidisziplinäre Entwurfsprozess, der exemplarisch auf die DLR-F25 [8] angewendet wird. Das Ziel besteht in der Untersuchung des Einflusses der Rückführung der Entwurfsergebnisse aus dem wissensbasierten Entwurf in den Vorentwurf von Passagierflugzeugkabinen und deren Frachtflugzeugvarianten.

Für die Analysen wird die DLR-F25 mit der von *FUGA* bereitgestellten wissensbasierten Entwurfsmethodik für den Rumpf- und Kabinenentwurf initial ausgelegt. Es werden eine Passagierkabine und zwei Frachtflugzeugkabinen mit unterschiedlicher Massenverteilung konfiguriert. Die berechneten Massen und ihre Positionen werden anschließend an den konzeptionellen Flugzeugvorentwurf zurückgegeben und in weiteren Entwurfsiterationen als fixer Entwurfsparameter berücksichtigt. Dabei fließen die von *FUGA* berechneten Gesamtmassen für Betrieb, Ausstattung und Nutzlast sowie deren Positionen als neue Entwurfsparameter in den Vorentwurfsprozess mit ein, was die empirischen und semi-empirischen Annahmen für diese Massenanteile ersetzt.

- **Passagierkonfiguration:** Zweiklassenlayout mit 30 Sitzen in der Business-Class und 210 Sitzen in der Economy-Class. Im unteren Frachtdeck befinden sich acht mittig positionierte AKH-Container (siehe Abbildung 9).
- **Frachtkonfiguration 1:** Maximale Ausnutzung des Laderaums durch 10 mittig platzierte AKH-Container im unteren Deck sowie zehn AAY-Container im oberen Deck (siehe Abbildung 10).
- **Frachtkonfiguration 2:** Hat eine identische Containeranordnung im oberen Deck wie in Frachtkonfiguration 1. Im unteren werden nur sieben AKH-Container geladen, die vom Heck aus in Richtung Bug platziert werden. Ziel dieser Variante ist eine Schwerpunktlage, die möglichst nah an der Passagierversion des Referenzmodells liegt (siehe Abbildung 10).

Bei der Neuauslegung der Flugzeuge werden vereinfachte Annahmen für die Massenauslegung getroffen, sodass bestimmte Massenkomponenten konstant bleiben. Der Fokus liegt dabei auf dem Einfluss der Massenkomponenten für Betriebslast, Ausstattung und Nutzlast auf den Gesamtentwurfsprozess.

Abbildung 11 zeigt die Massenabweichungen der iterierten Flugzeugkonfigurationen gegenüber dem Referenzmodell und welche Massen als konstant angenommen werden. Die Passagierkabine ist mit gleicher Nutzlast wie das Referenzmodell konfiguriert. Die beiden Frachtkabinen sind mit einer größeren Nutzlast ausgestattet. Deutlich wird, dass die Massenkomponenten Höhenleitwerk und Seitenleitwerk für die Passagier- und die beiden Frachtkabinen gegenüber dem Referenzmodell negative Abweichungen haben und

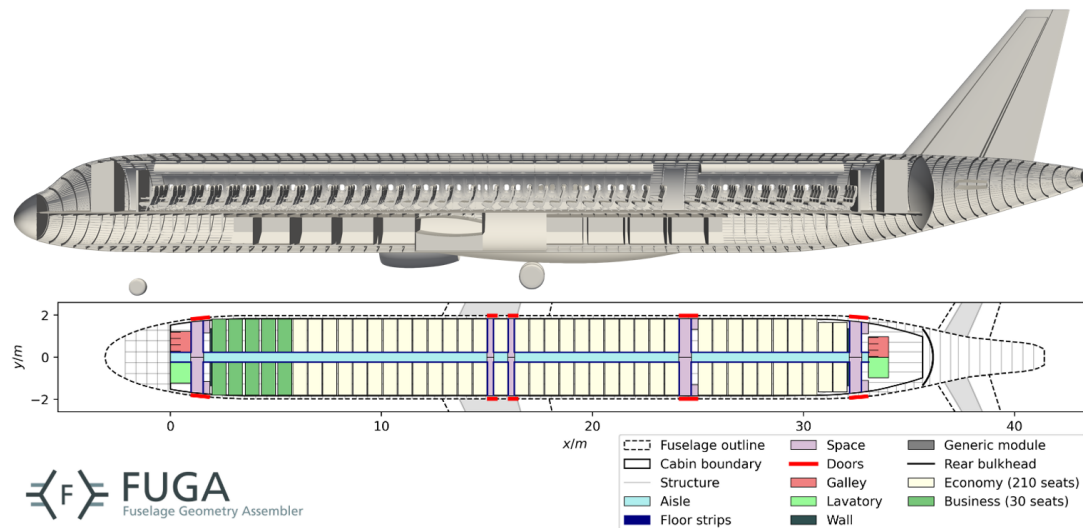


BILD 9. DLR-F25 Passagierkonfiguration aus der iterativen Entwurfsoptimierung.

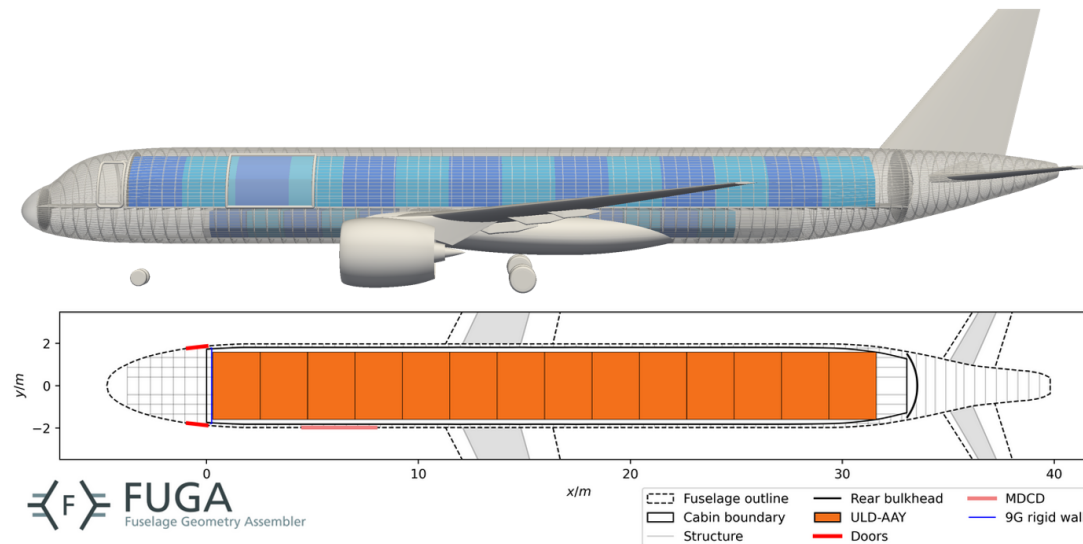


BILD 10. DLR-F25 Frachtkonfiguration aus der iterativen Entwurfsoptimierung.

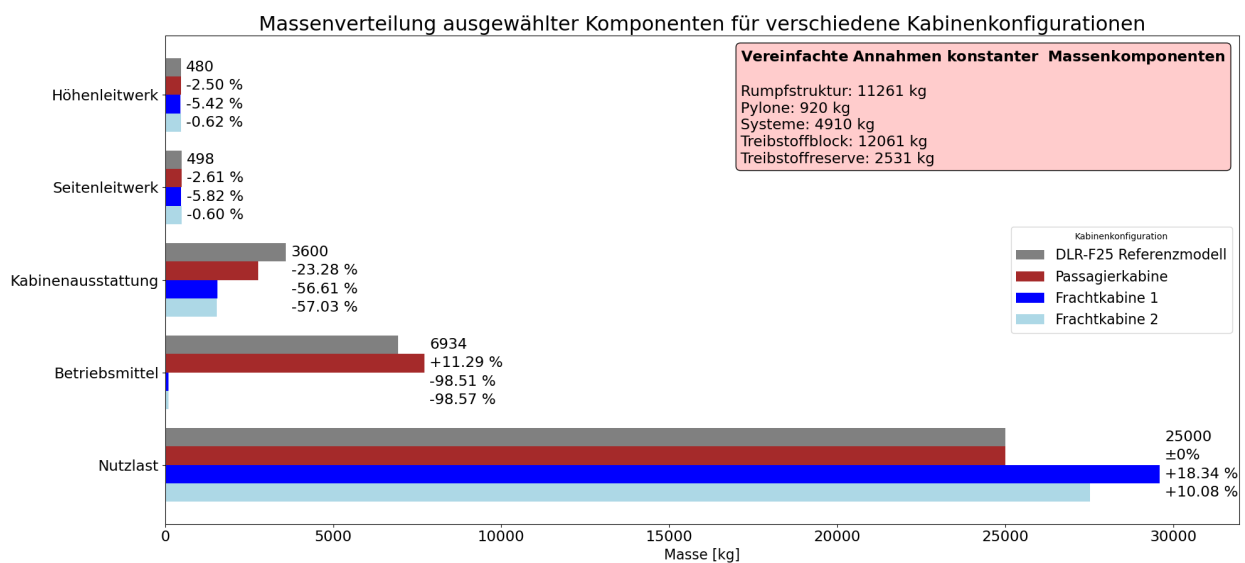


BILD 11. Massenverteilung der Startmasse für alle Kabinenkonfigurationen aus der iterativen Entwurfsoptimierung, inklusive Referenzmodell.

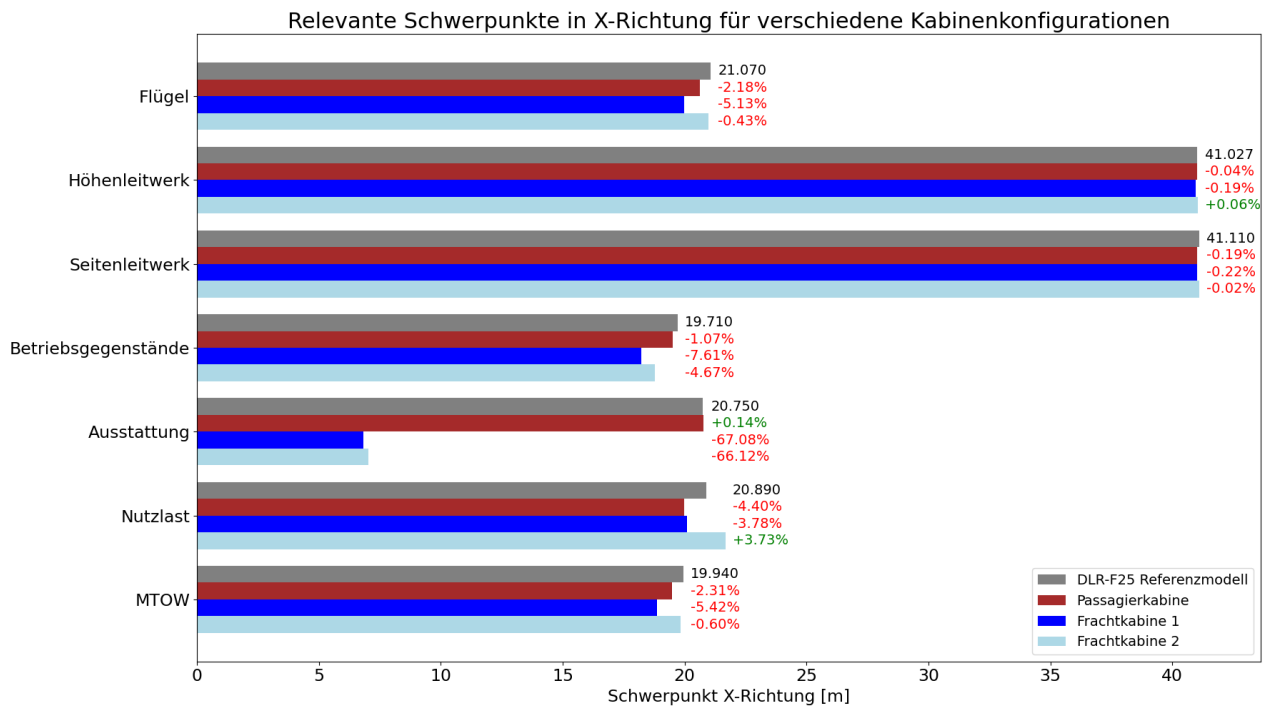


BILD 12. Schwerpunkte relevanter Massenelemente der neuen Kabinenkonfigurationen aus der iterativen Entwurfsoptimierung in X-Richtung, inklusive Referenzmodell. Die Abweichungen der neuen Entwürfe gegenüber dem Referenzmodell sind in % angegeben. Grün steht für eine Verschiebung des Schwerpunkts zum Heck, Rot für eine Verschiebung zum Bug.

die Massen der iterierten Kabinen geringer sind. Das deutet auf eine Trimmanspassung aufgrund einer veränderten Schwerpunktlage hin.

Abbildung 12 zeigt die Schwerpunkte in X-Richtung für die iterierten Konfigurationen und das Referenzmodell. Die Nutzlast hat den stärksten Einfluss auf den Schwerpunkt für das maximale Abfluggewicht (Maximum Take-off Weight, MTOW), bedingt durch ihren Massenanteil und die maximale Verschiebung. Es verschiebt sich der Gesamtschwerpunkt der Passagier- und der beiden Frachtkabinen, was die Anpassung unterschiedlicher Komponenten für den Gesamtflugzeugentwurf zur Folge hat (Schneeball-effekt). Zudem zeigt der Gesamtschwerpunkt der zweiten Frachtkonfiguration, dass sich durch die gezielte Variation der Nutzlastanordnung Schwerpunktlage und verfügbare Kabinenräume so aufeinander abstimmen lassen, dass die Abweichungen gegenüber der Passagierversion minimiert werden.

Die detaillierten, wissensbasierten Entwurfsergebnisse der unterschiedlichen Kabinenkonfigurationen für Nutzlast, Betriebsmittel und Ausstattung und deren Rückführung in den Gesamtflugzeugentwurf ersetzen die bisherigen empirischen und semi-empirischen Annahmen. Gleichzeitig kann eine Bauraumbetrachtung für die Passagier- und deren umgebauten Frachtkabinen basierend auf den Geometrie-modellen durchgeführt werden. Somit kann zukünftig in den Gesamtentwurfsprozessen die umbaufähige Passagierkabine als Frachtkabine in den Gesamtflugzeugentwurf mit einfließen und eine Synthese beider Produktarchitekturen angestrebt werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde gezeigt, dass der in *FUGA* implementierte Ansatz zur wissensbasierten Modellierung von Frachtkabinen auf

Basis unterschiedlicher *CPACS*-Vorentwurfsdaten realisiert werden konnte. Mit der wissensbasierten Entwurfsmethodik können viele verschiedene Umbauvarianten auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden in kurzer Zeit modelliert werden. Der im *FUGA*-Framework graphenbasierte Ansatz und die Modularität des KBE-Systems erlaubten die einfache Implementierung der neuen Produktarchitektur, indem vorhandene Subsysteme einfach in neue Systemstrukturen integriert werden konnten.

Darüber hinaus wurde der neuartige Ansatz in der *RCE*-Integrationsumgebung in einem multidisziplinären Workflow integriert und mit dem Design-Synthesizer *openAD* verknüpft, womit der Gesamtflugzeugentwurf durch neue Entwurfparameter ergänzt wurde. Dieser neue Ansatz ermöglicht einerseits die Betrachtung von Frachtkabinen im frühen Vorentwurfsprozess und ermöglicht so eine höhere Entwurfsgenauigkeit umbaufähiger Passagierflugzeuge im Flugzeuggesamtentwurf. Die Berücksichtigung verschiedener Entwurfsdisziplinen in einem gemeinsamen digitalen Entwurfsprozess mit hohem Automatisierungsgrad ermöglicht die schnelle Generierung und Analyse unterschiedlicher Flugzeugkabinen. Zukünftig soll dieser Prozess auch die Synthese von Passagier- und Frachtkabinen unterstützen, indem zusätzliche Methoden für die Strukturauslegung betrachtet werden.

Zukünftige Forschung betrachtet für detailliertere Aussage weitere Methoden und Annahmen, die die angepasste Struktur der umgebauten Frachtkabine für Fenster, Türen und Strukturverstärkungen berücksichtigen. Zusätzlich müssen die Strukturmassen anstelle der vereinfachten Annahmen aus den Lastfällen der Auslegung berücksichtigt werden.

Die vorliegende Forschungsarbeit leistet einen Beitrag zum globalen Marktwachstum im Bereich der Frachtflugzeuge

und beleuchtet die Herausforderungen, die mit dem Umbau von Passagier- zu Frachtflugzeugen einhergehen. Der in dieser Arbeit präsentierte Ansatz ermöglicht auf Basis der Passagierkabine den automatisierten Entwurf von Frachtkabinen im Flugzeugvorentwurf. Was den gesamten Entwurfsprozess effizienter und schneller macht.

Kontaktadresse:

Paul Zemke
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
paul.zemke@dlr.de

Literatur

- [1] Boeing. Commercial market outlook. Zugriff am: 2025-04-18. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/market/assets/downloads/CMO-2021-Report_13Sept21-A.pdf.
- [2] Paul Zemke. Erweiterung eines wissensbasierten Entwurfssystems zur Rumpfintegration zukünftiger Frachtflugzeuge. Masterarbeit, Hochschule Wismar, Hamburg, 2025. <https://elib.dlr.de/217060/>.
- [3] Michael Baessler, Sebastian Haufe, Hendrik Meyer, Jonas Zimdahl, Alexander Kamtsiuris, Robert Meissner, and Florian Raddatz. Development of a digital twin for aviation research. 11 2020. DOI: 10.25967/530329.
- [4] Jan-Niclas Walther. *Knowledge-based engineering to provide aircraft fuselage design details for multidisciplinary and multifidelity analysis model generation*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2024. DOI: 10.14279/depositonce-20898, <https://depositonce.tu-berlin.de/items/eebc2dce-341f-4637-b74d-57de8618c4d0>.
- [5] Marko Alder, Carsten Liersch, Martin Hepperle, Reinhold Maierl, Sebastian Deinert, Jan Kleinert, Martin Siggel, Dieter Kohlgrüber, Erwin Moerland, and Björn Nagel. 20 years of cpacs: A brief history and future vision of establishing a common language for aircraft design. In *Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress (DLRK) 2024*, Oktober 2024. <https://elib.dlr.de/208791/>.
- [6] Brigitte Boden, Jan Flink, Niklas Först, Robert Mischke, Kathrin Schaffert, Alexander Weinert, Annika Wohlan, and Andreas Schreiber. Rce: An integration environment for engineering and science. *SoftwareX*, 15:100759, 2021. ISSN: 2352-7110. DOI: 10.1016/j.softx.2021.100759.
- [7] Sebastian Woehler, Georgi Atanasov, Daniel Silberhorn, Benjamin Fröhler, and Thomas Zill. Preliminary aircraft design within a multidisciplinary and multifidelity design environment. In *Aerospace Europe Conference 2020*, April 2020. <https://elib.dlr.de/185515/>.
- [8] Sebastian Wöhler, Jannik HäBy, and Vivian Kriewall. Establishing the dlr-f25 as a research baseline aircraft for the short-medium range market in 2035. In *34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, September 2024. https://www.icas.org/icas_archive/icas2024/data/papers/icas2024_0398_paper.pdf.
- [9] Gianfranco La Rocca. Knowledge based engineering: Between ai and cad. review of a language based technology to support engineering design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2):159–179, 2012. ISSN: 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2012.02.002.
- [10] Craig Chapman and Martyn Pinfold. The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure. *Advances in Engineering Software*, 32(12):903–912, 2001. ISSN: 09659978. DOI: 10.1016/S0965-9978(01)00041-2.
- [11] Marco Häußler and André Borrmann. Knowledge-based engineering in the context of railway design by integrating bim, bpmn, dmn and the methodology for knowledge-based engineering applications (moka). *Journal of Information Technology in Construction*, 26:193–226, 2021. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.012.
- [12] Jan-Niclas Walther, Bahadır Kocacan, Christian Hesse, Alex Gindorf, and Björn Nagel. Automatic cabin virtualization based on preliminary aircraft design data. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(2):403–418, 2022. DOI: 10.1007/s13272-021-00568-w.
- [13] Jan-Niclas Walther, Christian Hesse, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. Extensible aircraft fuselage model generation for a multidisciplinary, multi-fidelity context. In *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 2022. https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2022/data/papers/ICAS2022_0254_paper.pdf.
- [14] Christian Hesse, Jan-Niclas Walther, Pia Allebrodt, Martin Wandel, Stephan Algermissen, and Ray Donald Dewald. Wissensbasierte modellgenerierung für die vorhersage von kabinenlärm im kontext des flugzeugvorentwurfs. In *49. Jahrestagung für Akustik (DAGA)*, 2023. <https://elib.dlr.de/194485/>.
- [15] Christian Hesse, Pia Allebrodt, Mark Teschner, and Jörn Biedermann. Knowledge-based model generation for aircraft cabin noise prediction from pre-design data. *CEAS Aeronautical Journal*, September 2024. ISSN: 1869-5590. DOI: 10.1007/s13272-024-00769-z.
- [16] Isaac Oludare Sanya and Essam Shehab. An ontology framework for developing platform-independent knowledge-based engineering systems in the aerospace industry. *International Journal of Production Research*, 52(20):6192–6215, 2014. ISSN: 0020-7543. DOI: 10.1080/00207543.2014.919422.
- [17] OPEN CASCADE SAS. Open cascade technology – collaborative development portal, 2026. Zugriff am: 2025-07-24. <https://dev.opencascade.org/>.
- [18] Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult, and Pieter J. Swart. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. *Python in Science Conference*, 2008. DOI: 10.25080/TCWV9851.
- [19] Albert Kahn. Topological sorting of large networks. *Commun. ACM*, 5(11):558–562, Nov. 1962. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/368996.369025.
- [20] Sven Hellbrück, Christian Hesse, Thimo Bielsky, Frank Thielecke, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. Knowledge-based engineering methods for hydrogen

tank and system integration in aircraft fuselage design. *CEAS Aeronautical Journal*, Februar 2026. ISSN: 1869-5590. DOI: [10.1007/s13272-026-00942-6](https://doi.org/10.1007/s13272-026-00942-6).

- [21] International Air Transport Association (IATA). Unit load devices (ULD), 2026. Zugriff am: 2025-05-14. <https://www.iata.org/en/programs/cargo/cargo-operations/unit-load-devices/>.
- [22] Elbe Flugzeugwerke. Airbus freighter conversion, 2024. Zugriff am: 2025-04-04. https://www.elbflugzeugwerke.com/fileadmin/user_upload/pdf/solutions/freighter-conversion/EFW-Broch-AirbusFreighterConvert-07-Screen-EN.pdf.