

DLR-IB-SL-HF-2025-138

**Erweiterung eines wissensbasierten
Entwurfssystems zur
Rumpfindegration zukünftiger
Frachtflugzeuge**

Paul Zemke



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Dokumenteigenschaften

Titel Erweiterung eines wissensbasierten Entwurfssystems zur Rumpfintegration zukünftiger Frachtflugzeuge

Betreff Masterarbeit

Institut Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt (SL)

Erstellt von Paul Zemke

Beteiligte

Geprüft von M.Sc. Sven Hellbrück (DLR-SL)

Freigabe von Prof. Dr.-Ing. Uwe Lämmel (Hochschule Wismar)

Datum 01.10.2025

Version 1.0

Dateipfad



Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Masterarbeit

Erweiterung eines wissensbasierten Entwurfssystems zur
Rumpfintegration zukünftiger Frachtflugzeuge

Abschlussarbeit zur Erlangung des Grades eines

Master of Science in Wirtschaftsinformatik

der Hochschule Wismar

eingereicht von:	Paul Zemke geboren am 02. April 1985 in Wolgast Studiengang Wirtschaftsinformatik
Matrikelnummer:	455064
Erstgutachter:	Prof. Dr. Uwe Lämmel
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Jürgen Cleve

Hamburg, den 30. September 2025

Kurzfassung

Der wachsende Frachtflugzeugmarkt bringt neue Herausforderungen an die Umrüstung von Passagier- zu Frachtflugzeugen mit sich. Frachtflugzeuge müssen im Hinblick auf Effizienz und Nachhaltigkeit für eine klimaneutrale und nachhaltige Luftfahrt entwickelt werden. Derzeit werden die späteren Umbauprozesse der Passagierflugzeuge im Flugzeugvorentwurf nicht betrachtet, woraus Probleme zu Lasten, Massen, Schwerpunkte und Bauraum resultieren. Mit wissensbasierten Entwurfsmethoden können diese Herausforderungen angegangen werden. Dazu wird in dieser Arbeit ein wissensbasiertes Entwurfssystem für Passagierflugzeug- auf Frachtflugzeugkabinen erweitert, um den Vorentwurfsprozess mit neuen Entwurfsparametern zu ergänzen. Dies ermöglicht effizientere Flugzeugkonfigurationen zu entwerfen. Ein weiteres wichtiges Ziel um die Entwicklung der Frachtflugzeuge zu beschleunigen und optimale Entwurfsentscheidungen zu treffen, ist ein durchgängiger digitaler Entwurfsprozess. Dazu wird ein methodischer Ansatz entwickelt, der das Frachtflugzeug- sowie das Passagierflugzeugentwurfssystem mit dem Flugzeugvorentwurf in einem digitalen disziplinübergreifenden Entwurfsprozess verbindet. Dies ermöglicht die Bewertung von Passagier- und deren Frachtkabinen in einem Entwurfsprozess, wodurch die Umbauprozesse im Gesamtflugzeugvorentwurf mit betrachtet werden können.

Abstract

The growing cargo aircraft market poses new challenges for the conversion of passenger aircraft to cargo aircraft. Cargo aircraft must be developed with a view to efficiency and sustainability for climate-neutral and sustainable aviation. Currently, the subsequent conversion processes of passenger aircraft are not considered in the preliminary aircraft design, resulting in problems with loads, masses, centres of gravity and installation space. These challenges can be tackled using knowledge-based design methods. In this thesis, a knowledge-based design system for passenger aircraft cabins is extended to cargo aircraft cabins in order to supplement the preliminary design process with new design parameters. This enables more efficient aircraft configurations to be designed. Another important goal for accelerating the development of cargo aircraft and making optimal design decisions is an end-to-end digital design process. To this end, a methodological approach is being developed that combines the freighter and passenger aircraft design system with the preliminary aircraft design in a digital cross-disciplinary design process. This enables the evaluation of passenger cabins and their cargo cabins in one design process, whereby the conversion processes can also be considered in the overall aircraft preliminary design.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) am Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt und wurde an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Wismar verfasst.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Uwe Lämmel für die Begleitung und Begutachtung der Arbeit sowie für seine wertvollen Anregungen. Für die Möglichkeit, die Arbeit am Institut für Systemarchitekturen durchzuführen, sowie für die Unterstützung meines Fernstudiums danke ich Dr.-Ing. Björn Nagel und Prof. Dr.-Ing. Jörn Biedermann. Ebenso danke ich Prof. Dr. Jürgen Cleve für die Übernahme der Zweitbegutachtung.

Ein besonderer Dank geht an Sven Hellbrück für die kontinuierliche und wertschätzende Betreuung meiner Arbeit, die fachliche Unterstützung sowie das stets konstruktive Feedback. Ein weiterer besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Christian Hesse für seine Unterstützung, seine fachliche Expertise und die vielen hilfreichen Hinweise während meiner gesamten Arbeitszeit. Ebenso danke ich Mara Fuchs für ihr stets offenes Ohr und ihre Unterstützung.

Darüber hinaus danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen für die angenehme Zusammenarbeit und allen, die mit Ideen und Feedback zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Die Arbeit im Team war durchweg motivierend und von Wertschätzung geprägt.

Abschließend gilt mein herzlicher Dank meiner Freundin Joanna Smolinski für ihre Geduld, den Rückhalt, die aufmunternden Worte und ihre liebevolle Unterstützung während des gesamten Arbeitsprozesses.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Herausforderungen beim Umbau von Passagier- zu Frachtflugzeugen	2
1.2. Wissensbasierter Entwurfsansatz für Frachtflugzeuge	3
1.3. Wissensbasierte und multidisziplinäre Entwurfsmethodik für Frachtflugzeugka- binen	4
1.4. Plausibilität und Analyseergebnisse der Flugzeugentwürfe	5
2. Historie, Grundlagen und Umbauprozesse in der Frachtluftfahrt	6
2.1. Historische Entwicklung der Luftfahrt	6
2.2. Grundlagen und Klassifikation von Frachtflugzeugen	7
2.3. Umrüstung von Passagierflugzeugen in Frachtflugzeuge	8
3. Technisch-methodische Grundlagen und aktueller Forschungsstand	12
3.1. Definition und Grundlagen von KBE	12
3.2. RCE	17
3.3. OpenAD und Gesamtflugzeugvorentwurf	18
3.4. CPACS	19
3.5. Fuselage Geometry Assembler	21
3.6. Stand des Wissens und der Technik	28
4. Begründung des wissensbasierten Entwurfsansatzes	34
4.1. Wirtschaftliche und ökologische Motivation	34
4.2. Potenziale wissensbasierter Entwurfsmethoden	34
4.3. Systemintegration von FUGA in den disziplinübergreifenden Vorentwurfsprozess	35
4.4. Zusammenfassung der Problemstellung und methodische Einordnung	36
5. Wissensbasierte Entwurfsmethodik zur Rumpfintegration von Frachtflugzeugen	38
5.1. Strukturelle und konzeptionelle Überlegungen zur Systementwicklung	39
5.2. Systembasis des Frachtkabinenentwurfs	42

5.3. Erweiterung der Entwurfsmethode für Frachtcontainer	48
5.4. MDCD - Erweiterung und Anpassung der wissensbasierten Methoden	56
5.5. Wissensintegration zur Modellierung der 9g-Barriere	59
5.6. Modifizierung und Erweiterung von Wissen für Maßanalysen der Schnittdarstellungen	62
5.7. Entwicklung von Massenentwurfssystem und Multifidelity-Massenmodell . . .	65
5.8. Wissensintegration zur Ableitung CPACS-konformer XML-Daten der Entwurfsergebnisse	69
6. Iterative Entwurfsoptimierung in der RCE-Integrationsumgebung	73
6.1. RCE-Integration des wissensbasierten Frachtkabinenentwurfs	73
6.2. Iterativer multidisziplinärer Flugzeugvorentwurf	75
7. Anwendung und Auswertung wissensbasierter, iterativer Entwurfsprozesse	77
7.1. Plausibilität des Entwurfssystems	78
7.2. Iterative Entwurfsoptimierung	84
7.2.1. Anwendung der Multidisziplinären Analyse zur Entwurfsbewertung . .	84
7.3. Reflexion der Hypothesen	92
7.3.1. Hypothese 1	92
7.3.2. Hypothese 2	95
7.3.3. Hypothese 3	96
8. Fazit und Ausblick	99
8.1. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	99
8.2. Ausblick auf zukünftige Arbeiten	103
Literaturverzeichnis	105
A. Anhänge	XIII
A.1. Gliederung nach Form des Flugzeugrumpfes	XIII
A.2. Kabinenraum basierend auf Spantendefinitionen	XIV
A.3. Übersicht relevanter ULDs	XV
A.4. Erforderliche Entwurfsdaten für den Strukturentwurf	XVI
A.5. Flowchart des Entwurfsprozesses in openAD	XVII
A.6. FPG der Türausschnitte	XVIII
A.7. FPG MDCD	XIX

A.8. FPG der Rumpfausschnittelemente mit Vorfahren	XX
A.9. FPG des Massenentwurfs für Passagierflugzeugkabinen	XXI
A.10.Exemplarisches Multifidelity-Massenmodell der D239	XXII
A.11.Benutzerdefinierte Parameter des Frachtkabinenentwurfs	XXIII
A.12.DLR-F25 Kabinenentwurf - Charakteristische Eingabegrößen	XXIV
A.13.TLARs der D239, D180 und der DLR-F25	XXV
A.14.Detaillierte Prozessschritte der Entwurfsoptimierung	XXVI
A.15.EFW - Airbus P2F Frachter	XXIX
A.16.Überprüfung der Entwurfsmethoden	XXX
A.17.DLR-F25	XXXIV
A.18.Flügelgeometrien der Flugzeugkonfigurationen	XXXV
A.19.Geometrien der Höhenleitwerke	XXXVI
A.20.Geometrien der Seitenleitwerke	XXXVII

Abbildungsverzeichnis

2.1. Globale Frachtflugzeuganzahl nach Region im Jahr 2019 und 2040	7
2.2. Standard-Frachtkonfigurationen umgebauter Passagiermaschinen	10
3.1. Relative Position von KBE	13
3.2. RCE-Konzept der Werkzeugintegration	17
3.3. Beispielentwürfe des openAD-Entwurfsraums	18
3.4. CPACS XML-Baum	19
3.5. Deckelemente-Knoten	19
3.6. CPACS-Visualisierung im TiGL Viewer	20
3.7. UML-Darstellung des Regelprotokolls	22
3.8. Maximaler Konnektivitätsgraph nach Regelsätzen	23
3.9. Grafische Oberfläche in Jupyter	27
3.10. Marktübersicht Kommerzieller KBE-Systeme	30
5.1. D239 - Schematische Darstellung der Sekundärstruktur	40
5.2. UML-Klassendiagramm der Entwurfs- und Modellierungssysteme	43
5.3. Ausschnitt der benutzerdefinierten Parameter	45
5.4. Positionierung der Ausgänge	46
5.5. D239 ohne Sekundärstrukturen des oberen Decks	47
5.6. FPG für den Entwurf der Containergeometrien	48
5.7. Ausschnitt der benutzerdefinierten Parameter für das obere Frachtdeck und die Containerklassen	49
5.8. Exemplarischer Rumpfquerschnitt der D239	51
5.9. Ebenenverschnitt des Begrenzungsrahmens	53
5.10. Testmodellierung der Kabine in Paraview	54
5.11. Aktualisierter FPG für den Entwurf der Containergeometrien	55
5.12. Ausschnitt-Definition der MDCD	57
5.13. Illustration MDCD	58
5.14. Dedizierter FPG der 9g-Barriere	60

5.15. Illustration der 9g-Barriere	61
5.16. Exemplarischer Kabinenquerschnitt der D239	63
5.17. Beispielhaftes Kabinenlayout der D239 Frachtkabine	64
5.18. UML-Klassendiagramm der Entwurfs- und Modellierungssysteme inklusive Massenentwurfssystem	66
5.19. MCG des Massenwurfs für das Frachtflugzeugentwurfssystem	68
5.20. Deckknoten der Entwurfsergebnisse in CPACS	71
5.21. Deckelementknoten für den Frachtkabinenentwurf in CPACS	72
6.1. Darstellung für ein Minimalbeispiel der FUGA-RCE-Integration	74
6.2. Multidisziplinäre Entwurfsoptimierung innerhalb von RCE	76
7.1. D239 und D180 Frachtkabinen	80
7.2. Geometriemodelle der D239 und der D180 Frachtvarianten mit integriertem Multifidelity-Massenmodell	82
7.3. DLR-F25 Passagierkonfiguration	86
7.4. DLR-F25 Frachtkonfiguration 1	86
7.5. DLR-F25 Frachtkonfiguration 2	87
7.6. MCG für den Kabinenentwurf der Frachtflugzeuge	94
A.1. Kabinenraum basierend auf Spantendefinitionen	XIV
A.2. Abbildungen der ULD-Typen	XV
A.3. Flowchart des Entwurfsprozesses in openAD	XVII
A.4. FPG der Türausschnitte	XVIII
A.5. FPG der MDCD mit einem Nachfahren	XIX
A.6. Dedizierter FPG der Rumpfausschnittelemente	XX
A.7. MCG des Massenentwurfs für Passagierflugzeugkabinen	XXI
A.8. Exemplarisches Multifidelity-Massenmodell der D239 Frachtvariante	XXII
A.9. Airbus 320/321 Frachtversionen der Elbe Flugzeugwerke GmbH	XXIX
A.10. 2D-Polygonquerschnitt eines AKH-Containers mit sechs Punkten $P_i(y_i, z_i)$	XXXII
A.11. 2D-Polygonquerschnitt eines AAY-Containers mit acht Punkten $P_i(y_i, z_i)$	XXXII
A.12. Drei Ansichten der DLR-F25	XXXIV
A.13. Flügelgeometrien der Flugzeugkonfigurationen	XXXV
A.14. Geometrien der Höhenleitwerke	XXXVI
A.15. Geometrien der Seitenleitwerke	XXXVII

Tabellenverzeichnis

3.1. Regelgruppen der Subsysteme in FUGA	26
5.1. Erweiterten und hinzugefügten Regelwerke im FUGA-Framework	41
5.2. Initiale Parameter für den Entwurf der MDCD	56
5.3. Initiale Entwurfsparameter für die 9g-Barriere	59
5.4. Schematische Struktur des Massen-DataFrames	67
7.1. Vergleich der Schwerpunktskoordinaten	83
7.2. Vergleich der Massen	83
7.3. Massenverteilung der Startmasse	87
7.4. Schwerpunkte relevanter Massenelemente der neuen Kabinenkonfigurationen	88
A.1. Übersicht einiger Frachtflugzeuge von Boeing und Airbus	XIII
A.2. Übersicht verwendeter ULDs und ihrer Eigenschaften	XV
A.3. Erforderliche initiale Entwurfsdaten für den Strukturentwurf	XVI
A.4. Initiale Entwurfsparameter für die Frachtflugzeugkabinen der D239 und D180	XXIII
A.5. Relevante initiale Entwurfsparameter der DLR-F25	XXIV
A.6. Top Level Aircraft Requirements der D239/DLR-F25 und D180	XXV
A.7. Technische Daten der A321P2F	XXIX
A.8. Geometrie- und initiale Entwurfsparameter der Containerelemente	XXXI
A.9. Position und Masse der zuletzt platzierten Containerelemente	XXXII

Symbol- und Einheitenverzeichnis

Symbole

g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s ²
m	Masse	kg
V	Volumen	m ³
ρ	Materialdichte	kg/m ³
A	Fläche	m ²
Δs	relative Abweichung der Strecke	%
Δm	relative Abweichung der Masse	%

Einheiten und Umrechnungen

h	Stunde	1 h = 3600 s
in	Zoll	1 in = 0,0254 m
nm	Nautische Meile	1 nm = 1852 m
t	Tonne	1 t = 1000 kg
ft ³	Kubikfuß	1 ft ³ = 0,02832 m ³

Verzeichnis der Abkürzungen

AI	Artificial Intelligence	14
AML	Adaptive Modeling Language	29
BIM	Building Information Modeling	32
BPMN	Business Process Model and Notation	32
BRep	Boundary Representaion	27
BWB	Blended Wing Body Aircraft	30
CAD	Computer-Aided Design	14
CAE	Computer-Aided Engineering	14
CS	Certification Specifications	11
DAG	Directed acyclic graph	23
DART	Design Analysis Response Tool	31
DLR	Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.	3
DMN	Decision Model and Notation	32
DS	Dassault Systems	29
EASA	European Union Aviation Safety Agency	10
FAA	Federal Aviation Administration	10
FEA	Finite Elemente Analyse	15
FedEx	Federal Corporation Express Inc.	6
FEM	Finite Elemente	9
FPG	Fundamental Problem Graph	22
GDL	Generative Design Language	29
KBS	Knowledge-Base Systems	12
LOPA	Layout of Passenger Accommodations	62
MCG	Maximum Connectivity Graph	22
MDCD	Main Deck Cargo Door	11
MDO	Multidisciplinary Design Optimization	28
MMG	Multi Model Generator	21
MOKA	Methodology and tools Oriented to KBE Applications	29

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

OAD	Overall Aircraft Design	4
OCCT	Open CASCADE Technology	21
OEM	Original Equipment Manufacturer	1
OML	Outer Mold Line	32
OOP	Object Oriented Programming	14
PLM	Product Lifecycle Management	28
PSG	Problem Solution Graph	22
RCE	Remote Component Environment	12
URI	Uniform Resource Identifier	21
XML	Extensible Markup Language	19
XSD	XML Schema Definition	19

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 Erstausrüster (englisch: „Original Equipment Manufacturer“, OEM) als auch Airlines streben an, die Kosten in der Produktion und im Betrieb zu senken. Der expandierende Markt für Frachtflugzeuge bringt neue Herausforderungen für die Luftfahrtbranche mit sich, die auf eine klimaneutrale Zukunft hinsteuert, besonders hinsichtlich der Umrüstung von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen. Die Nutzung der Passagierkabinen als Frachtflugzeugkabinen im späteren Lebenszyklus der Flugzeuge wird derzeit nicht in den Gesamtorentwurfsprozessen berücksichtigt. Daraus resultieren unterschiedliche Probleme für Lasten, Massen, Schwerpunkte und Bauraum. Wissensbasierte Entwurfsmodellierung bietet vielseitige Methoden, um diese Lücke im Gesamtentwurfsprozess durch die Modellierung von Frachtkabinen basierend auf Flugzeugvorentwurfsdaten schließen zu können. Ausgehend von diesen Anforderungen wird in dieser Arbeit ein bestehendes wissensbasiertes Entwurfssystem für Passagierflugzeugkabinen um neue Entwurfsmethoden auf Frachtflugzeugkabinen erweitert. Dies ermöglicht die Betrachtung von Passagierkabinen und deren umgebauten Frachtvarianten, indem sich unterschiedliche Kabinenkonfigurationen generieren und bewerten lassen. Anschließend werden die neuen wissensbasierten Methoden für die Frachtkabinen sowie die der Passagierkabinen in eine disziplinübergreifende Integrationsumgebung eingebettet und ein gemeinsamer Entwurfsprozess entwickelt, der die Rückführung der wissensbasierten Entwurfsergebnisse für detailliertere Auslegungen der Flugzeuge in den Vorentwurfsprozessen ermöglicht. Dieses methodische Vorgehen wird anhand exemplarischer Flugzeugmodelle erprobt, worauf die eingangs formulierten Herausforderungen unter dem Einsatz wissensbasierter Entwurfsmethoden diskutiert werden können.

1.1. Herausforderungen beim Umbau von Passagier- zu Frachtflugzeugen

Im Bereich der Wirtschaftsinformatik spielt die Digitalisierung im Zusammenhang mit dem digitalen Faden in der Luftfahrt eine besondere Rolle. Der digitale Faden ist ein Konzept in der Luftfahrt, das die Speicherung von Informationen und Daten für physische oder logische Objekte über die Produktlebenszyklen beschreibt und diese als ein ganzheitliches System bestehend aus weiteren Systemen abbildet. Dies ermöglicht eine vollständige Rückverfolgbarkeit der Daten über den gesamten Produktlebenszyklus und hilft bei der Optimierung ganzheitlicher Entwurfsprozesse (Meyer et al., 2020). Eine besondere Herausforderung dabei ist die Komplexität des Flugzeugentwurfs, die aus den vielen Disziplinen und ihren heterogenen Werkzeugen resultiert.

Der Umbau von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen gehört in den Bereich „Passagier zu Frachter“ (englisch: „Passenger to Freighter“, P2F), wird als „Passenger to Freighter (P2F)“ bezeichnet. Die aktuellen Umbauprozesse können je nach Anforderung sehr zeitintensiv sein, außerdem verursachen sie hohe Kosten. Der Umbau erfolgt, wenn ältere Passagierflugzeuge im Passagierbetrieb nicht mehr rentabel sind oder der Bedarf an Frachtkapazität steigt. Nach Mlynářčik und Janovec (2022) kann die Lebensdauer der Flugzeuge durch den P2F-Umbau um bis zu 20 Jahre verlängert werden. Zudem ist der Umbauprozess von Passagierflugzeugen in Frachtflugzeuge für die meisten Luftfahrtgesellschaften die kostengünstigere Variante, die Ressourcen schont und damit zur Nachhaltigkeit beiträgt.

Die frühzeitige Berücksichtigung von Passagier- und Frachtkabinen im Flugzeugvorentwurf kann die Umbauprozesse verbessern. Derzeit basieren die Flugzeugvorentwürfe zur Massenauslegung der Kabine auf empirischen und semi-empirischen Daten. Es fehlt jedoch ein geeigneter Ansatz, um Passagierkabinen zusammen mit ihren Frachtvarianten in einem gemeinsamen Vorentwurfsprozess zu untersuchen. Dadurch wird die Bewertung der Umbauvarianten erschwert, was die Entscheidungsfindung in der Vorentwurfsphase verlangsamt. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, können wissensbasierte Systeme eingesetzt werden. Sie ermöglichen die Wiederverwendung von Expertenwissen, das für die Auslegung und Bewertung neuer Kabinenkonfigurationen erforderlich ist. Die regelbasierte Automatisierung von Entscheidungsprozessen kann an neue Entwurfsrichtlinien und Anforderungen angepasst werden. Wissensbasierte Systeme bieten geeignete Schnittstellen, um sie in andere digitale Infrastrukturen zu integrieren. Außerdem können so verschiedene Entwurfsvarianten in kurzer Zeit generiert werden. Sie unterstützen

daher bei der Auslegung nachvollziehbarer und neuer Kabinenkonzepte. Für die zugrunde liegenden Herausforderungen ergeben sich folgende Hypothesen:

- **Hypothese 1:** Ein bestehendes KBE-System für Passagierflugzeuge lässt sich auf Rumpf- und Kabinenintegration von Frachtflugzeugkabinen erweitern.
- **Hypothese 2:** Wissensbasierte Systeme können in multidisziplinäre, digitale Entwurfsprozesse integriert werden, um den Gesamtentwurfsprozess von umbaufähigen Passagierflugzeugen zu optimieren.
- **Hypothese 3:** Die wissensbasierte Modellierung von Frachtflugzeugen innerhalb multidisziplinärer und digitaler Entwurfsprozesse und die daraus abgeleiteten Analysen lassen sich einsetzen, um die Herausforderungen des wachsenden globalen Frachtflugzeugmarktes im Bereich P2F effektiv anzugehen.

1.2. Wissensbasierter Entwurfsansatz für Frachtflugzeuge

Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung von Geometriemodellen für Frachtflugzeuge auf Basis eines bestehenden wissensbasierten Konstruktionssystems (englisch: Knowledge-Based-Engineering-System, (KBE)-System) und die Integration der wissensbasierten Entwurfsmethode in multidisziplinäre Analyseprozesse. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) nutzt und entwickelt dazu wissensbasierte Modellierungsmethoden (Knowledge-Based-Engineering), um detaillierte Struktur- und Kabinenentwürfe für den Flugzeugvorentwurf zu erstellen.

Der wissensbasierte Ansatz wird mithilfe des vom DLR entwickelten Werkzeugs Fuselage Geometry Assembler (FUGA) realisiert, das eine regelbasierte Methode zur Struktur- und Kabinenauslegung bietet (Walther et al., 2022b). Ausgehend von der vorhandenen Wissensbasis in FUGA wird eine neue Produktarchitektur für Frachtflugzeuge in das bestehende System integriert. Dadurch ist es möglich, Entwürfe für Fracht- und Passagierkabinen mit gleicher Struktur und Außengeometrie zu erstellen, davon ausgenommen sind die strukturellen Anpassungen in der Frachtkabine nach dem Umbauprozess. Das ermöglicht eine Bewertung umbaufähiger Passagierflugzeuge in den Vorentwurfsprozessen. Dieser wissensbasierte Ansatz nutzt Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) als Produktdatenformat und dies stellt somit die Konsistenz der ausgetauschten Daten zwischen den verschiedenen Disziplinen sicher (Alder & Skopnik, 2022). Durch die Integration von KBE-Systemen mit anderen Datenquellen und IT-

1.3. WISSENSBASIERTE UND MULTIDISZIPLINÄRE ENTWURFSMETHODIK FÜR FRACHTFLUGZEUGKABINEN

Systemen werden die interdisziplinäre und die multidisziplinäre Zusammenarbeit für den Gesamtflugzeugentwurf verbessert, indem die Entwurfsprozesse detaillierter und automatisierter gestaltet werden können. Der Detaillierungsgrad wird dadurch erhöht, dass die Ergebnisse aus den wissensbasierten Entwurfsprozessen den Vorentwurf und die unterschiedlichen Entwurfsdisziplinen für einen höheren Genauigkeitsgrad und weitere Analysen bereitgestellt werden. Dafür stellt die Wirtschaftsinformatik Methoden zur Verbesserung des Daten- und Wissensmanagements bereit, die dabei helfen, den gesamten Produktlebenszyklus der Flugzeuge ganzheitlich zu betrachten. Dazu zählen beispielsweise KBE-Systeme oder digitale Integrationsumgebungen zur Verknüpfung heterogener Toollandschaften. Die wissensbasierte Modellierung von Frachtkabinen ermöglicht die Bewertungen der umbaufähigen Passagierkabinen innerhalb eines gemeinsamen digitalen Entwurfsprozesses beider Produktarchitekturen, indem die Geometriemodelle für Bauraumuntersuchungen und die Entwurfsergebnisse für eine höhere Genauigkeit der Vorentwurfsmodelle herangezogen werden. Mit diesem wissensbasierten Ansatz können aus dem Gesamtflugzeugentwurf (englisch: Overall Aircraft Design, OAD) und deren Daten verschiedene Frachtflugzeugvarianten generiert werden, mit dem Ziel, den Vorentwurfsprozess zu verbessern, indem umrüstbare Passagierflugzeuge bereits im frühen Entwurfsprozess als Frachtflugzeuge betrachtet werden. Dadurch wird eine Bewertung der Entwurfsergebnisse umbaufähiger Passagierkabinen im frühen Entwurfsprozess ermöglicht.

1.3. Wissensbasierte und multidisziplinäre Entwurfsmethodik für Frachtflugzeugkabinen

Als Ausgangsbasis und Wissensgrundlage dient das multidisziplinäre, regelbasierte Expertensystem FUGA, das in Kapitel 5 um ein neues Entwurfssystem für Frachtflugzeuge erweitert wird. Auf Basis des existierenden Passagierentwurfssystems wird mittels Reverse Engineering eine angepasste Architektur für Frachtflugzeuge aufgebaut und um weiteres domänenspezifisches Wissen für Frachtflugzeuge ergänzt. Der Prozess des Reverse Engineering hilft dabei, das Produkt oder die Software zu verstehen. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse über Struktur und Funktionalität ermöglichen eine bestmögliche Integration neuer Lösungen in das bestehende System.

Es werden jeweils ein Entwurfs- und Modellierungssystem für den Frachtkabinenentwurf sowie ein Entwurfs- und Modellierungssystem für den Massenentwurf der Frachtkabinen entwickelt, sowie zusätzliche Regelwerke im KBE-System erweitert. Basierend auf Flugzeugmodellen des

Vorentwurfs im CPACS-Datenformat ermöglicht die weiterentwickelte Entwurfsmethodik die Generierung von Frachtflugzeugmodellen auf unterschiedlichen Fidelitätsgraden. Für weitere Analysen der Passagierflugzeuge und ihrer Frachtflugzeugvarianten werden die Entwurfssysteme beider Produktarchitekturen in Kapitel 6 als Werkzeuge in die RCE-Integrationsumgebung eingebettet. Dort werden sie mit dem Vorentwurfswerkzeug openAD zur Orchestrierung eines ganzheitlichen multidisziplinären Entwurfsprozesses verknüpft. Der wissensbasierte Entwurfsansatz in Kombination mit der multidisziplinären Analyse ermöglicht die Betrachtung der Passagierflugzeuge als Frachtflugzeugvarianten sowie die Untersuchung von Bauraum, Lasten, Massen und Schwerpunkten. Mit den neuen Entwurfsmethoden und der Anwendung dieser auf exemplarische Flugzeugmodelle können neue Erkenntnisse gewonnen werden, die dann die Auseinandersetzung mit den eingangs formulierten Herausforderungen und Hypothesen erlauben.

1.4. Plausibilität und Analyseergebnisse der Flugzeugentwürfe

Das neue Entwurfssystem für Frachtflugzeugkabinen sowie der multidisziplinäre Entwurfsprozess ermöglichen weitere disziplinübergreifende Analysen von Passagierflugzeugen und ihren umgebauten Frachtflugzeugvarianten. Im ersten Teil des Ergebniskapitels 7 wird die neue Entwurfsmethodik anhand zweier Flugzeugtypen plausibilisiert. Zu diesem Zweck werden die DLR-eigenen, umbaufähigen Flugzeugtypen D180 und D239 mithilfe des neuen Entwurfssystems als Frachtkabinen modelliert und mit ihren Referenzkonfigurationen, den umgerüsteten Flugzeugen der Typen A320 und A321, verglichen. Zudem werden die Ergebnisse aus dem Massenentwurfssystem beider Testkonfigurationen überprüft. Damit wird sichergestellt, dass alle weiteren Ergebnisse und Untersuchungen plausible und aussagekräftige Lösungen liefern. Im zweiten Teil des Kapitels 7 wird der Einfluss der Massen für drei ausgelegte Kabinenkonfigurationen bezüglich Nutzlast, Ausstattung und Betriebsmittel untersucht. Dazu werden die Massenanteile in den konzeptionellen Vorentwurf zurückgeführt. Dafür wird der multidisziplinäre Entwurfsprozess für den Passagier- und Frachtflugzeugentwurf exemplarisch auf die DLR-F25 angewendet. Es werden eine Passagierkabine und zwei Frachtkabinen modelliert. Die erste Frachtkabine wird standardmäßig mit Frachtcontainern bestückt und in der zweiten Frachtkabine werden die Container so verteilt, dass der Schwerpunkt möglichst nah an der Referenzkonfiguration liegt. Anschließend werden die neu ausgelegten Flugzeugkonfigurationen der Ausgangskonfiguration gegenübergestellt, die auf empirischen und semiempirischen Annahmen für den Entwurf einer Passagierkabine ausgelegt ist. Dies erlaubt eine Bewertung des Einflusses der wissensbasierten Modellierung auf den Vorentwurfsprozess sowie einen Vergleich zwischen Passagierkabinen und deren umgebauten Frachtvarianten.

2. Historie, Grundlagen und Umbauprozesse in der Frachtluftfahrt

Die historische Entwicklung der Frachtluftfahrt beschäftigt sich mit dem wachsenden Markt der Frachtflugzeuge und deren zukünftiger Entwicklung. Zudem werden die Grundlagen und die Klassifizierung von Frachtflugzeugen sowie die technischen Voraussetzungen für den Umbau von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen erläutert. Diese Grundlagen sind für die spätere Methode grundlegend. Einerseits ermöglichen sie ein Verständnis des Umbauprozesses, andererseits erlauben sie eine angemessene Abgrenzung der Methode und liefern Referenzpunkte standardisierter Frachtkabinenauslegungen für die spätere Plausibilisierung der Entwurfsmethodik.

2.1. Historische Entwicklung der Luftfahrt

Die Anfänge der Luftfahrt reichen bis in den Beginn des 20. Jahrhunderts zurück, sie gilt heute als strategisch und wirtschaftlich wichtiger Sektor und macht mit einem Anteil von 300 Mrd. EUR 2,1 % des Bruttoinlandsprodukts der EU aus (Helmold, 2023, S. 143). Mit den ersten erfolgreichen Motorflügen der Gebrüder Wright im Jahr 1903 begann die Geschichte der Luftfahrt, wie in Baerlocher et al. (2024) beschrieben. Ein wichtiger Meilenstein in dieser Entwicklung war nach Schäfer (2020, S. 6) der erste Frachtflug im Jahr 1910, der nicht nur den Beginn des kommerziellen Luftverkehrs markierte, sondern auch den Anstoß für die Entwicklung des Passagierflugverkehrs gab. Diese frühen Transporte legten den Grundstein für die heutige Luftfracht- und Passagierindustrie. In den USA wurden 1925 die ersten offiziellen Luftpoststrouen eingerichtet, der Luftposttransport wurde nun auch von privaten Fluggesellschaften durchgeführt (Schäfer, 2020, S. 8). Die folgenden Aussagen referenzieren Airportscouncil (2020), demnach entwickelten sich in den 1970er Jahren Expressdienste wie DHL und Federal Corporation Express Inc. (FedEx), was den Lufttransport durch die Globalisierung weiter revolutionierte, auch der Einsatz von Großraumflugzeugen wie der Boeing 747 ermöglichte nun den Transport großer Mengen an Luftfracht. Die Entstehung großer Logistikunternehmen und die stetig zunehmende

2.2. GRUNDLAGEN UND KLASSIFIKATION VON FRACHTFLUGZEUGEN

Globalisierung führten zu einer steigenden Nachfrage nach kostengünstigen Frachtflugzeugen. Die Umrüstung von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen nimmt seitdem stetig zu.

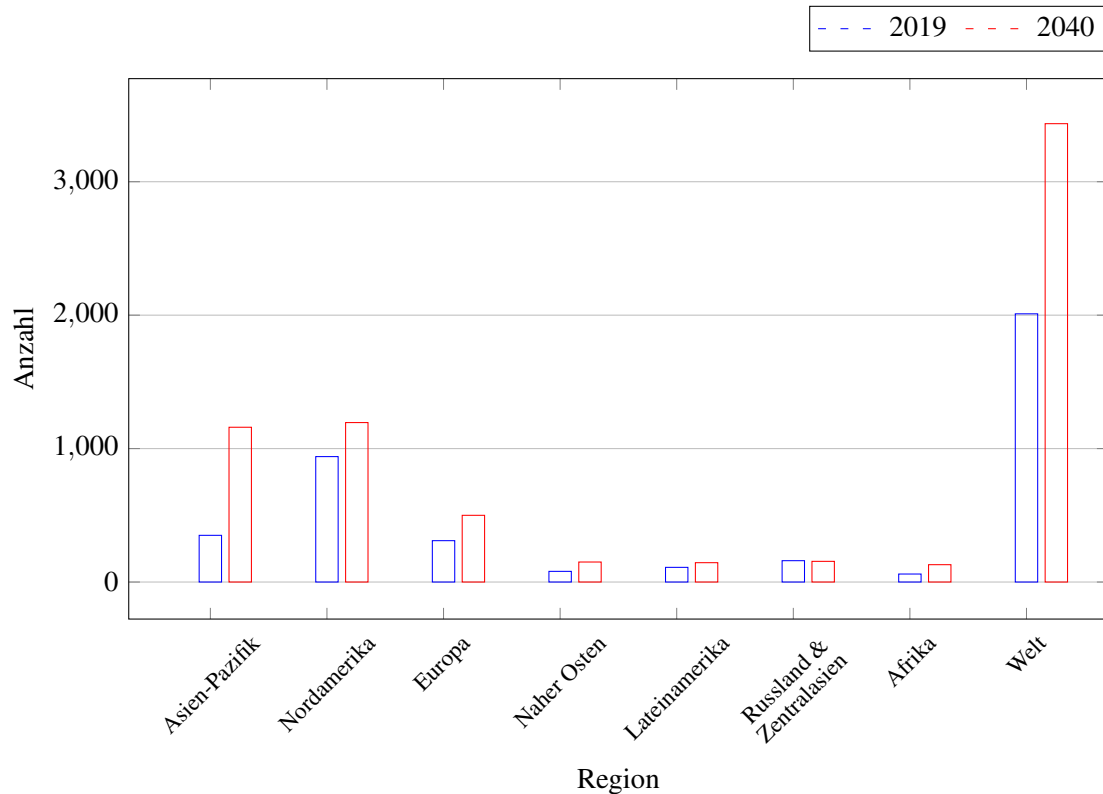


Abbildung 2.1.: Globale Frachtflugzeuganzahl nach Region in 2019 und 2040 (Boeing, 2021, S. 18)

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt wird die globale Frachtflugzeugflotte zwischen 2019 und 2040 um 1400 Flugzeuge ansteigen, ca. 500 dieser Flugzeuge werden im Bereich P2F entstehen.

2.2. Grundlagen und Klassifikation von Frachtflugzeugen

Frachtflugzeuge sind spezielle Luftfahrzeuge, die für den Transport von Gütern anstelle von Passagieren ausgelegt sind. Markant für Frachtflugzeuge sind eine robuste Bauweise, ein großes Ladevolumen und spezielle Ladesysteme, um unterschiedliche Frachttypen beladen und transportieren zu können. Die Flugzeuge unterscheiden sich vor allem in Größe, Alter, Kapazität, Antrieb und Einsatzgeschichte. Die verschiedenen Flugzeugkonstruktionen unterscheiden sich stark in Form und Größe, weisen aber Gemeinsamkeiten in bestimmten Konstruktionsmerkma-

len auf. Diese Bestandteile, die sich seit Beginn des motorisierten Flugs nur marginal unterscheiden, sind der Flugzeugrumpf, die Anordnung der Tragflächen, das Fahrwerk, das Piloten-Cockpit und das Steuerruder. In den Antriebsarten untergliedern sich Flugzeuge in Propellerantrieben, Turboprop und Strahltriebwerken, wobei die propellerbetriebenen Modelle oft für Kurzstreckenflüge eingesetzt werden. Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Form des Flugzeugrumpfs, hier wird in Narrowbodies, Widebodies und große Widebodies untergliedert, ein kurzer Überblick über die wichtigsten Flugzeugmodelle und ihrer Rumpfform ist in der Tabelle im Anhang A.1 dargestellt.

Schäfer (2020, S. 163–165)

Wie Airbus (2024) erläutert, können Frachtflugzeuge grob in drei Typen untergliedert werden, in reine Frachtflugzeuge, in umbaufähige Typen und als Kombiversion.

Frachtflugzeuge sind auf dem oberen Deck mit einem Frachttransportsystem ausgestattet, sodass die Positionierung der ULDs ohne großen Aufwand möglich ist. Das Hauptdeck ist wegen der schweren Lasten verstärkt, außerdem haben diese Flugzeugtypen zusätzliche Frachttüren auf den Hauptdecks. Im Gegensatz zu Passagierflugzeugen lassen sich Frachtflugzeuge hinsichtlich ihrer Kapazität grob in drei Kategorien einteilen: kleine Frachtflugzeuge bis 30t, mittlere Frachtflugzeuge von 30 t bis 80 t und große Frachtflugzeuge über 80 t. Für die Kapazität eines Flugzeugs ist das maximale Abfluggewicht (engl.: Maximum Takeoff Weight, MTOW) von Bedeutung. Es stellt sicher, dass die Funktionsfähigkeit des Flugzeugs erhalten bleibt und keine Schäden oder Unfälle durch Überladung entstehen. Das MTOW kann aus den Angaben des Flugzeugherstellers ermittelt werden. Flüge können in Kurz-(bis 3 h), Mittel-(3 h-6 h), Lang-(über 6 h) und Ultralangstreckenflüge eingeordnet werden. Die auf Langstreckenflügen beförderte Fracht ist in der Regel Teil der Nutzlast von Passagierflügen. Die meisten Frachtflugzeuge, auch solche, die ursprünglich als Passagierflugzeuge konzipiert wurden, befördern hauptsächlich Fracht auf Mittelstreckenflügen. Dies ermöglicht eine höhere Frachtbeladung im Vergleich zum Kerosinverbrauch bei längeren Flügen.

(Schäfer, 2020, S. 163–172)

2.3. Umrüstung von Passagierflugzeugen in Frachtflugzeuge

Die Notwendigkeit der Umrüstung von Passagierflugzeugen in Frachtflugzeuge wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Ältere Flugzeuge werden nicht mehr als Passagierflugzeuge genutzt und können nach Ablauf der Betriebstauglichkeit zu Frachtflugzeugen umgebaut werden. Andere Gründe sind eine erhöhte Nachfrage nach Frachtkapazität, was z.B. während der Zeit der COVID-19-Pandemie vorgekommen ist. Zudem kann die Lebensdauer umgerüsteter

2.3. UMRÜSTUNG VON PASSAGIERFLUGZEUGEN IN FRACHTFLUGZEUGE

Passagierflugzeuge um bis zu 20 Jahre verlängert werden (Mlynarčík & Janovec, 2022). Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die Umrüstung von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen die kostengünstigere Variante, um die Frachtflotten zu vergrößern. Mlynarčík und Janovec (2022) zufolge kostet der Umbau eines Schmalrumpfflugzeugs zwischen 15 und 20 Mio. USD und bei mittelgroßen Widebodies etwa 20 bis 30 Mio. USD. Im Vergleich dazu liegt der Preis für ein neues mittelgroßes Widebody-Frachtflugzeug bei ca. 70 Mio. USD. Daher ist die Umrüstung von Flugzeugen eine kostengünstigere Option, die gleichzeitig die Lebensdauer eines Flugzeugs verlängert. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, wird die weltweite Flotte laut den Prognosen von Boeing im Jahr 2040 fast 3.400 Frachtflugzeuge umfassen. Ein knappes Drittel davon wird durch die Umrüstung von Passagierflugzeugen entstehen.

Die Abbildung 2.2 zeigt die Frachtkonfiguration bzw. die typische Innenaufteilung verschiedener umgerüsteter Passagierflugzeuge. Unabhängig davon, welcher Umrüster den P2F-Umbau technisch durchführt, bleiben die Frachtkapazität und die Anordnung der einzelnen Flugzeugtypen gleich (Zhang et al., 2018). Ein Vergleich der Abbildung 2.2 aus einer wissenschaftlichen Arbeit mit den Frachtflugzeugen der Elbe Flugzeugwerke GmbH in Abbildung A.9 zeigt, dass die Auslegung der Kabinen mit ULDs für die Frachtflugzeugtypen A320 und A321 identisch sind. Dies bekräftigt die Aussage aus Zhang et al. (2018), dass die optimale Innenaufteilung der Frachtlast unabhängig vom Umrüstungsunternehmen ist.

Mlynarčík und Janovec (2022) beschreiben darüber hinaus, dass die P2F-Umwandlung in einem vierstufigen Prozess durchgeführt wird. Dies umfasst folgende Stufen:

- Boden- und Flugtests vor der Umrüstung zur Datenerfassung, einschließlich Flügelverformungs- und Rumpfdrucktests, zur Überprüfung der Beanspruchungen an kritischen Punkten und Lasten sowie der Leistung des Umweltsystems.
- Der Entwurf der modifizierten Struktur und Innenausstattung mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM).
- Die Entwicklung, Qualifizierung und Zertifizierung neuer und weiterentwickelter mechanischer, elektrischer und avionischer Systeme unter Berücksichtigung von Industriestandards.
- Zertifizierungstests am Boden und in der Luft zum Nachweis der Lufttüchtigkeit und zur Überprüfung der Anforderungen gemäß FAA 14 CFR Part 25 [Lufttüchtigkeitsstandards für Transportflugzeuge].

2.3. UMRÜSTUNG VON PASSAGIERFLUGZEUGEN IN FRACHTFLUGZEUGE

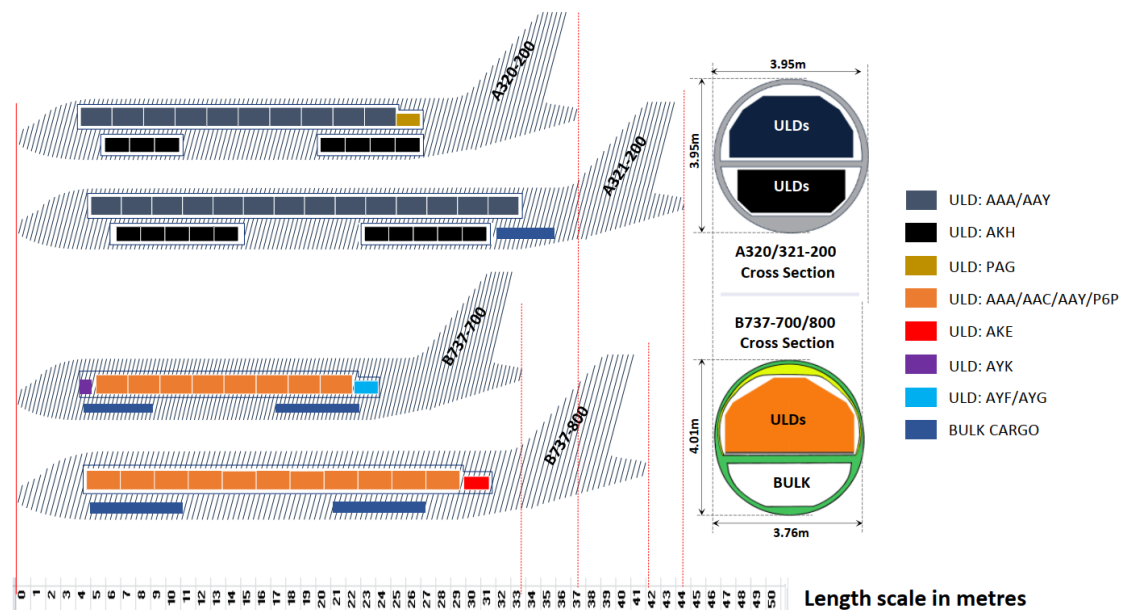


Abbildung 2.2.: Standard-Frachtkonfigurationen umgebauter Passagiermaschinen (Zhang et al., 2018)

Die Modifikation für den P2F-Umbau ist ein sehr komplexer Umbauprozess, der über die Anpassung der Flugzeugstruktur und die Entfernung von Passagierkomponenten hinausgeht. Er umfasst unter anderem mechanische, elektrische und avionische Systeme. Diese Systeme müssen akribisch angepasst und ergänzt werden, um die Effizienz und Sicherheit des Flugzeugs im Frachtbetrieb zu gewährleisten.

Die Luftfahrtindustrie unterliegt rechtlich bindenden Standards, die von der Federal Aviation Administration (FAA) und der European Union Aviation Safety Agency (EASA) festgelegt werden. Damit unterliegt der Bereich P2F strengen regulatorischen Standards (FAA 14 CFR/ EASA CS Part 25). Die Änderungen brauchen kein neues Typenzertifikat, sie müssen durch ein Supplemental Type Certificate als genehmigte Modifikation dokumentiert werden (Mlynarčík & Janovec, 2022, S. 2). Die nachfolgenden Inhalte zur Umrüstung von Passagierflugzeugen beziehen sich exemplarisch auf die B737NG, wobei die grundlegenden Modifikationen im P2F-Bereich typenunabhängig sind und je nach Kundenwunsch variieren können. Eine wesentliche Modifikation ist der Wegfall von Passagierausstattungen wie Sitzen, Ablagen, Kommunikationssystemen, Toiletten, Küchen und Seitenverkleidungen. Außerdem werden alle Türen bis auf die vorderen Haupttüren entfernt und durch Luken ersetzt, die für den Zugang der Besatzung und für Wartungszwecke erhalten bleiben. Zusätzlich wird auf dem Hauptdeck eine hydraulisch zu betäti-

gende Frachttür (engl.: „Main Deck Cargo Door“, MD CD) installiert, um den Zugang zur Fracht auf dem Hauptdeck zu ermöglichen. Ein weiterer relevanter Aspekt des Umbaus ist die Verstärkung des Flurs, aber vor allem der darunter liegenden Längs- und Querträgerstrukturen auf dem Hauptdeck aufgrund der höheren Belastung durch andere Nutzlastszenarien. Ein Laderaum der Klasse C muss mit einem Rauch- und Feuermeldesystem, einem integrierten Feuerlöschsystem, Dichtungen und Sperren, sowie einer Lüftungsanlage ausgestattet sein. Die vorderen und hinteren Frachträume im Unterdeck bleiben in ihrer Konfiguration beim Umbau als Klasse C erhalten (Mlynarčík & Janovec, 2022, S. 2–3). Die Frachtbereiche sind in den Certification Specifications (CS) 25.857, den Vorschriften der European Union Aviation Safety Agency, die für die Sicherheit in der Zivilluftfahrt in Europa zuständig ist, typisiert (Agency, 2019, S. 310). Zusätzlich wird ein Besatzungsruheraum zwischen dem Cockpit und dem Frachtbereich geschaffen, der als Fluchtbereich für die Besatzung dient und den Zugang zum Hauptdeck ermöglicht. Der neu installierte Innenraum der Kabine berücksichtigt die Verkleidungen, diverse Paneele und Decken, Druckausgleichs- und Wartungspanel, Fensterstopfen sowie zusätzliche Aufkleber und Markierungen für das Frachtladesystem. Außerdem werden eine 9 g starre Barriere und eine Rauchbarriere installiert, um den Überdruck und die Dichtigkeit im Cockpit zu gewährleisten. Dies schützt die Flugzeugbesatzung vor Rauch, Gasen und Fracht und stellt sicher, dass die Anforderungen für eine Notlandung erfüllt werden.

(Mlynarčík & Janovec, 2022, S. 2–3)

In diesem Abschnitt über die Einführung in die Luftfahrt wurde einleitend ein kurzer historischer Überblick zur Luftfahrt gegeben. Zusätzlich wurde grundlegendes theoretisches Wissen zu Frachtflugzeugen und deren Klassifikationen vermittelt. Ferner wurden die wichtigsten wirtschaftlichen und technischen Aspekte für den Umbau von Passagier- zu Frachtflugzeugen erklärt. Die Prognosen für den zukünftigen globalen Markt für Frachtflugzeuge verzeichnen einen stetigen Anstieg. Etwa ein Drittel dieser Frachtflugzeuge entsteht durch die Umrüstung alter Passagierflugzeuge. Der Umbau der Passagierflugzeuge stellt für die meisten Luftfahrtgesellschaften entgegen einer Neubeschaffung eine kostengünstigere Option dar, welche zudem einen Nachhaltigkeitsaspekt berücksichtigt. Weiterhin thematisierte der Abschnitt die typische Innenaufteilung umgerüsteter Passagierflugzeuge. Abschließend wurden die Phasen der Umrüstungsprozesse sowie die technischen Modifikationen der umgebauten Frachtkabinen thematisiert.

3. Technisch-methodische Grundlagen und aktueller Forschungsstand

In diesem Kapitel werden die wichtigsten technischen Grundlagen, Werkzeuge und Methoden vorgestellt, die für den digitalen Flugzeugentwurf relevant sind. Zunächst werden die Grundlagen von KBE behandelt, die für das Verständnis wissensbasierter Methoden sowie des Stands der Wissenschaft Voraussetzung sind. Darauf aufbauend wird das Produktdatenformat CPACS, die Remote-Komponenten-Umgebung (englisch: „Remote Component Environment“, RCE) für disziplinübergreifende Arbeitsabläufe sowie das Flugzeugvorentwurfswerkzeug openAD vorgestellt. Ferner wird der in FUGA implementierte wissensbasierte Ansatz beschrieben. Abschließend wird ein Überblick über den aktuellen Wissens- und Technologiestand von KBE-Systemen gegeben. Dies ermöglicht die Auseinandersetzung mit den Entwurfsprozessen für Frachtflugzeuge in Kapitel 4. Auf Basis passender Werkzeuge kann dort anschließend eine geeignete methodische Grundlage für die eingangs formulierten Probleme und Ziele festgelegt werden.

3.1. Definition und Grundlagen von KBE

Wissensbasierte Methoden finden in digitalen Entwurfsprozessen Anwendung, um Expertenwissen zu formalisieren, wiederverwendbar zu machen und automatisierte Entscheidungs- und Konstruktionsprozesse zu ermöglichen. In der Literatur gibt es verschiedene Definitionen von KBE, die von den jeweiligen Akteuren in diesem Bereich geprägt sind. Darüber hinaus schreibt Ammar-Khodja et al. (2008, S. 91), dass es keine eindeutigen Definitionen gibt, die meisten sich aber ähneln. Um an dieser Stelle Verwirrung zu vermeiden, wird zunächst zwischen KBE und Knowledge-Based Systems (KBS) differenziert.

Nach Ammar-Khodja et al. (2008, S. 90) ist ein KBS ein computergestütztes System, das Wissen über bestimmte Domänen nutzt, um eine Lösung für ein bestimmtes Problem zu generieren. Laut Ammar-Khodja et al. (2008, S. 90) sind die ersten KBS Expertensysteme, in denen abgespeichertes Fachwissen in Form von unterschiedlichen Fakten und Regeln abgelegt ist. Wenn

3.1. DEFINITION UND GRUNDLAGEN VON KBE

wir der Beschreibung folgen, ist KBE ein spezielles KBS, das sich in einem bestimmten Bereich bewegt und sich explizit mit der Verarbeitung von Ingenieurwissen beschäftigt. Diesen Beschreibungen zufolge ist KBE eine Disziplin des KBS. Abbildung 3.1 stellt die relative Position von KBE zu Wissensmanagement und Knowledge Engineering dar, um den Begriff KBE noch differenzierter einordnen zu können. Die Abbildung zeigt, dass der Schwerpunkt von KBE eher in der technischen Entwicklung von KBE-Applikationen liegt, wohingegen Knowledge Engineering die Akquisition und Kodifizierung von Wissen behandelt. Im Folgenden werden zwei Definitionen von KBE vorgestellt.

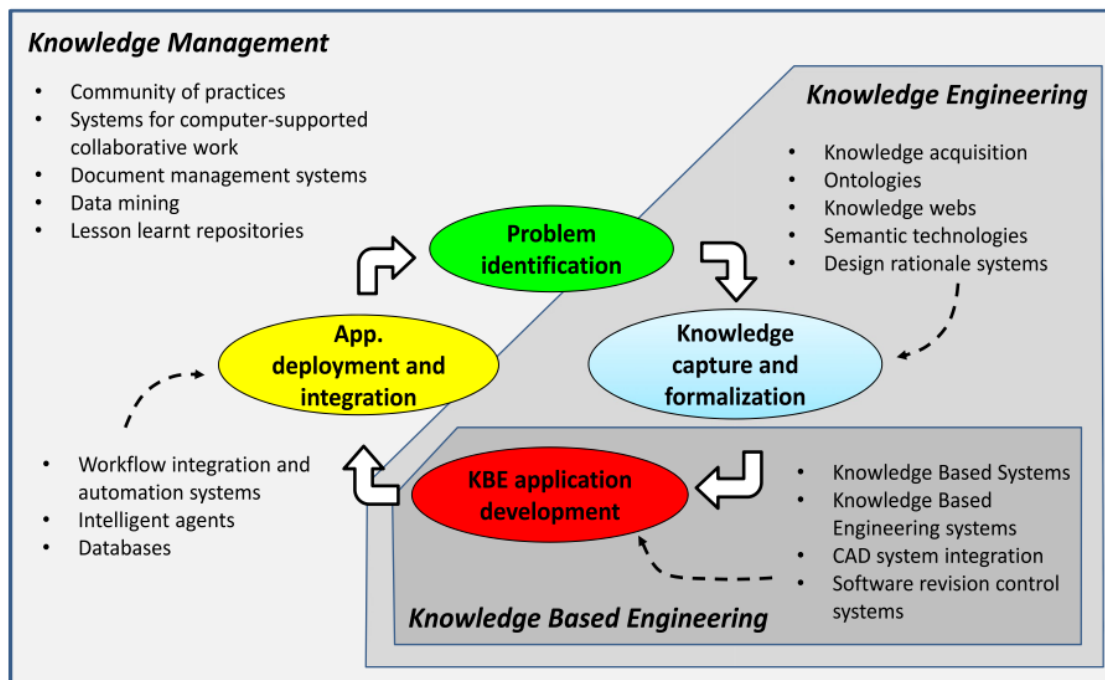


Abbildung 3.1.: Relative Position von KBE zu Knowledge Engineering und Wissensmanagement (La Rocca, 2012)

So definiert La Rocca KBE als:

„Knowledge Based Engineering (KBE) is a technology based on the use of dedicated software tools called KBE systems, which are able to capture and systematically reuse product and process engineering knowledge, with the final goal of reducing time and costs of product development by means of the following: Automation of repetitive and non-creative design tasks and support of multidisciplinary design optimization in all the phases of the design process.“ (La Rocca, 2012, S. 161)

Chapman beschreibt KBE wie folgt:

„KBE represents an evolutionary step in Computer-Aided Engineering (CAE) and is an engineering method that represents a merging of object oriented programming (OOP), artificial intelligence (AI) techniques and Computer-Aided Engineering (CAD) technologies, giving benefit to customised or variant design automation solutions. “ (Chapman & Pinfold, 2001)

Nach den beiden oben genannten Definitionen ist der Begriff der Automatisierung eine grundlegende Eigenschaft von KBE. Da KBE-Systeme, wie oben beschrieben, disziplinspezifisch eingesetzt werden und gespeichertes Fach- bzw. Expertenwissen nutzen, werden sie vor allem in komplexen, multidisziplinären Umgebungen eingesetzt, wie z.B. in der Luftfahrt- oder Automobilindustrie. Die Kodifizierung der Konstruktionsregeln und Automatisierung von Entscheidungsprozessen ermöglichen den Ingenieuren dabei mehr Raum für innovative Ideen und Entwicklungen. Diese Formalisierungen und Automatisierungen ermöglichen schnelle Designiterationen und fördern damit die interdisziplinäre Zusammenarbeit.

(La Rocca, 2012)

Dieser Abschnitt beschreibt die Eigenschaften wissensbasierter Systeme. Ein Expertensystem oder KBE-System stellt seine Überlegenheit gegenüber anderen Systemen durch domänenspezifisches Wissen dar, das mit dem Wissen und den analytischen Fähigkeiten eines oder mehrerer menschlicher Experten vergleichbar ist. Nach Tripathi sind KBE-Systeme durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- KBE-Systeme lösen schwierige Aufgaben in einer spezifischen Domain so gut oder besser wie menschliche Experten
- Sie beinhalten eine enorme Menge an domänenspezifischen Wissen.
- Außerdem verwenden sie Heuristiken, um den Suchraum zu minimieren und eine logische Lösungsabfolge zu ermöglichen.
- Die Verwendung von Symbolen für die Abbildung der verschiedenen Wissenstypen.
- Diese Systeme können Daten modifizieren, aktualisieren, erweitern und sind in der Lage, mit unsicheren oder irrelevanten Daten umzugehen.

(Tripathi, 2011)

Wissen in KBE-Systemen kann durch verschiedene Ansätze formalisiert und repräsentiert werden. Die Art der Wissensrepräsentation ist abhängig von der Wissensdomäne. Nach Singer (2014) werden die Möglichkeiten der Wissensrepräsentation und -formalisierung in Logik, Constraint-basierte Ansätze, Graphen, semantische Netze, Produktionssysteme und regelbasierte Ansätze und Entscheidungsbäume unterteilt. Außerdem erläutert Singer (2014), dass das Erfassen, Formalisieren, Verarbeiten und Visualisieren die vier grundlegenden Aufgaben von wissensbasierten Systemen sind.

Vor der Betrachtung der Grundbausteine eines KBE-Systems werden drei verschiedene Ansätze für KBE-Systeme vorgestellt. In La Rocca (2012) wird ein Ansatz verfolgt, der für multidisziplinäre Entwurfs- und Optimierungsprozesse in der Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Diese Variante eines KBE-Systems ist in der Lage, verschiedene Entwürfe auf Basis komplexer Regelwerke, Geometrie- und Konfigurationsregeln zu erzeugen. Der Ansatz von Chapman und Pinfold (2001) demonstriert ein KBE-System für den Entwurf und die Finite-Elemente-Analyse (FEA) unterschiedlicher Karosseriestrukturen. Der in Sanya und Shehab (2014) vorgestellte Ansatz eines KBE-Systems ist speziell für die Luftfahrt konzipiert, basiert auf einem ontologischen Framework und bietet eine plattformunabhängige und modulare Variante des KBE-Systems. Wie die drei Ansätze zeigen, gibt es unterschiedliche Architekturen und Anwendungsfälle für KBE-Systeme. Sie haben alle einen ähnlichen Aufbau in der Basis ihrer Architektur. Wesentliche Merkmale eines KBE-Systems sind:

- **Wissensbasis:** Speichert Regeln, Berechnungen und Entwurfswissen. Chapman und Pinfold (2001) beschreibt die Wissensbasis als Wissensquelle mit Regeln, Berechnungen und Entwurfswissen für Design- und Analyseprozesse, La Rocca (2012, S. 168) untergliedert die Wissensbasis ebenfalls in Regeltypen, wie beispielsweise logische und mathematische Regeln.
- **Inference Engine (Schlussfolgerungsmaschine):** Sie verarbeitet die in der Wissensbasis gespeicherten Regeln und leitet Entwurfsentscheidungen ab. La Rocca (2012, S. 161) beschreibt die Inferenzmechanismen als formalisiert strukturiertes Domänenwissen, welches durch Regeln in der Wissensdarstellung ausgedrückt wird.
- **Modellierungswerkzeuge für Geometrie:** Ermöglichen die Erstellung und Manipulation von 3D-Geometrien. Ein KBE-System ist entweder mit einem CAD-System verbunden oder hat ein eigenes integriert. (La Rocca, 2012, S. 163)
- **Benutzeroberfläche:** Zudem wird die Schnittstelle für die Interaktion zwischen Benutzer

und KBE-System in La Rocca (2012, S. 163) thematisiert, diese kann sowohl als Kommandozeile als auch grafische Oberfläche eingebettet sein.

- **Produktdatenspeicher:** Ein weiteres Merkmal ist das Einbinden externer Daten und Analysewerkzeuge. In Chapman und Pinfold (2001) sind dies Wissensdatenbanken und spezifische Benutzereingaben. La Rocca (2012) beschreibt Kommunikationsregeln zur Datenintegration auf einer ähnlichen Basis wie Chapman.

KBE ist eine regelbasierte Methode. Im KBE werden viele Aspekte, wie z.B. die Definition von Attributen, die Anzahl und Art der zu benennenden Objekte oder die Interaktion mit externen Schnittstellen durch sogenannte „Regeln“ beschrieben. Diese Regeln verwalten und standardisieren die Struktur und Funktionalität der Objekte und ermöglichen die Kommunikation innerhalb und außerhalb des KBE-Systems. Darüber hinaus spiegeln die Regeln das Wissen über den Entwurf der Produkte wider.

(La Rocca, 2012, S. 168)

Eine Unterteilung der Regeln nach La Rocca erfolgt nach:

- **Logische Regeln (Bedingungsausdrücke):** Verwendung einfacher IF-THEN-Regeln oder komplexerer Bedingungen.
- **Mathematische Regeln:** Umfassen mathematische Operationen wie Trigonometrie, Matrizen und Vektorrechnung. Sie steuern Entscheidungen im System durch IF-THEN-Beziehungen, wobei dynamisch berechnete Slots oder untergeordnete Objekte in objektorientierten Umgebungen für die Regelanwendung sowie mathematische Ausdrücke in Antezedens und Konsequenz für logische Entscheidungen verwendet werden.
- **Geometriemanipulationsregeln:** Erzeugen und Manipulieren geometrischer Entitäten, z.B. Punkte und Flächen, und können auch für komplexere Transformationen verwendet werden. Die geometrischen Entitäten sind reale Objekte, die z.B. Informationen wie Position, Dimension, Masse und Schwerpunkt enthalten.
- **Konfigurationsauswahlregeln:** Steuern dynamisch die Anzahl und Art der Objekte und beeinflussen die Topologie des Modells.
- **Kommunikationsregeln:** Ermöglichen den Datenaustausch und die Interaktion mit externen Programmen und Datenbanken

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein KBE-System aus den grundlegenden Bausteinen Wissensbasis, Inferenz-Engine, Modellierungswerkzeugen für Geometrie, Benutzeroberfläche sowie Produktdatenspeicher besteht. Es ist stark regelbasiert. Es befasst sich explizit mit der Verarbeitung von Ingenieurwissen mit Schwerpunkt auf domänenspezifischen Produkten und den damit verbundenen nachgelagerten Aktivitäten. KBE ist eine geeignete Technologie, wenn sich für wiederholende Aufgaben mittels Erfahrungswerten und Expertenwissen Regeln für Produktkonfigurationen und Geometriemodellierung generieren lassen.

(La Rocca, 2012, S. 163)

3.2. RCE

In diesem Abschnitt geht es um RCE, ein Open-Source-Framework für Ingenieure und Wissenschaftler, das vom DLR entwickelt wurde, um disziplinübergreifende Workflows zu erstellen. RCE ermöglicht die Erstellung und Ausführung verteilter Workflows, die verschiedene Disziplinen und deren heterogene Werkzeuge einbeziehen. So kann ein einzelner Ingenieur verschiedene Werkzeuge in einem Prozess verwenden und die Berechnung oder Simulation unterschiedlichster Daten automatisieren. RCE bietet eine grafische Benutzeroberfläche, die die Integration der Werkzeuge vereinfacht. Die Abbildung 3.2 zeigt das Konzept der Werkzeugintegration, so

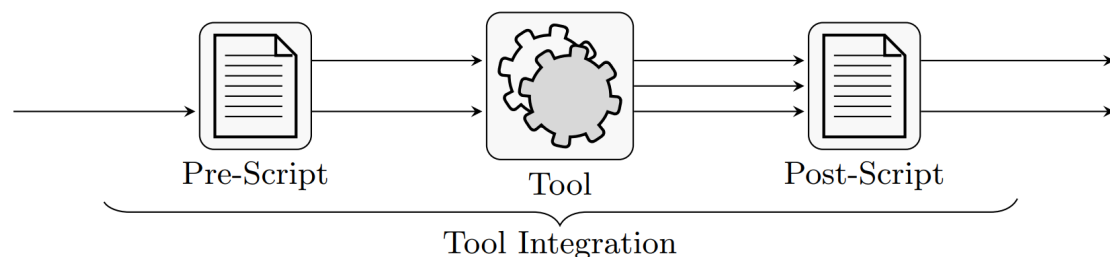


Abbildung 3.2.: RCE-Konzept der Werkzeugintegration (Boden et al., 2021)

können zusätzlich zu den in RCE integrierten Werkzeugen Pre-Scripts und Post-Scripts erstellt werden, um die benötigten Daten im multidisziplinären Workflow anzupassen. In RCE sind bereits unterschiedliche Anwendungen für die Workflows verfügbar. In der DLR-internen RCE-Serverumgebung ist beispielsweise das Vorentwurfswerkzeug openAD bereits integriert.

(Boden et al., 2021)

3.3. OpenAD und Gesamtflugzeugvorentwurf

OpenAD ist eine Python-basierte, multidisziplinäre Entwurfsumgebung, die einen konsistenten, validen und erweiterbaren Gesamtflugzeugentwurf ermöglicht. Mit einem Satz von Top-Level-Anforderungen können konventionelle oder neue Flugzeugkonfigurationen in einem definierten Entwurfsraum generiert, optimiert und analysiert werden. Abbildung 3.3 zeigt einige Flugzeug-



Abbildung 3.3.: Beispielenwürfe des openAD-Entwurfsraums (Woehler et al., 2020)

varianten aus dem Entwurfsraum von openAD. Das Entwurfstool integriert die Disziplinen Aerodynamik, Strukturdesign, Antriebssysteme, Massen- und Schwerpunktberechnung, Flugleistungsrechnung sowie Flugmechanik. Abbildung A.3 zeigt das Flowchart für den iterativen und multidisziplinären Entwurfsprozess in openAD. Dieser besteht grundsätzlich aus drei Hauptphasen. In der konzeptionellen Phase L0 findet eine erste Erfassung der Flugzeugkonfiguration basierend auf den obersten Entwurfsanforderungen statt. Mithilfe empirischer, semiempirischer 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“). 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. (Woehler et al., 2020)

3.4. CPACS

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. Die Verwendung eines gemeinsamen Datenformats fördert die Zusammenarbeit, ohne dass umfangreiche Anpassungen an den Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Disziplinen erforderlich sind. CPACS basiert auf der Extensible Markup Language (XML) und ist eine für Menschen und Maschinen verständliche Sprache. XML bietet dazu die XML Schema Definition (engl.: „XML Schema Definition“, XSD), die komplexe Strukturen und semantische Regeln ermöglicht. CPACS beschreibt Luftfahrzeuge wie Hubschrauber oder Flugzeuge in einer hierarchischen Struktur, diese kann Parameterwerte oder auch andere Daten, wie beispielsweise Missionsdaten oder werkzeugspezifische Informationen anderer Werkzeuge enthalten.

(Alder et al., 2024)

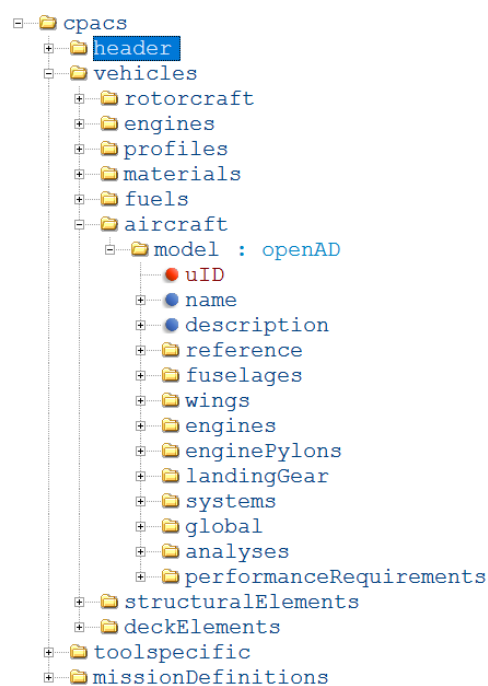


Abbildung 3.4.: CPACS XML-Baum



Abbildung 3.5.: Deckelemente-Knoten

(Walther et al., 2022a)

Eine beispielhafte XML-Baumstruktur für ein Flugzeug ist in Abbildung 3.4 dargestellt. In Ab-

bildung 3.5 ist der Deckelemente-Knoten mit den in CPACS definierten Kindelementen abgebildet. Auf diese Weise wird z.B. eine detaillierte Datenspeicherung auf Ebene des Kabinenentwurfs umgesetzt (Walther et al., 2022a). Konsistente Daten sind für den Flugzeugentwurf enorm wichtig, da die Entwurfsprozesse, deren Informationen und das multidisziplinäre Umfeld sehr komplex sind. Die CPACS-Produktstruktur kann sowohl einfache als auch detaillierte disziplinäre Daten enthalten. Der TiGL-Viewer ist ein CPACS-basiertes Visualisierungsprogramm, das parametrische Flugzeuggeometrien auswertet und in einer interaktiven 3D-Ansicht darstellt.



Abbildung 3.6.: CPACS-Visualisierung der D239 im TiGL Viewer

Abbildung 3.6 zeigt die D239 im TiGL-Viewer, mit den zugrundeliegenden CPACS-Konventionen, der Ursprung des Flugzeuges liegt an der Rumpfspitze in Höhe der Mitte des zylindrischen Querschnitts des Rumpfs für diese Art der Flugzeugkonfiguration. Die x-Achse ist die Längsachse, die y-Achse zeigt nach Steuerbord und die z-Achse zeigt nach oben.

Das hier vorgestellte Produktdatenformat CPACS bietet somit eine optimale Grundlage für den disziplinübergreifenden, konsistenten Austausch von Daten und Informationen im Gesamtflugzeugentwurf, da es einen einheitlichen Standard bietet. CAPCS ist die Datengrundlage für die wissensbasierte Entwurfsmethode in FUGA, die im nachfolgenden Abschnitt behandelt wird.

3.5. Fuselage Geometry Assembler

FUGA ist ein python-basiertes KBE-Werkzeug und implementiert den von Walther entwickelten wissensbasierten Ansatz zur detaillierten Flugzeugmodellierung auf Vorentwurfsebene, das den initialen Rumpf- und Kabinenentwurf von Flugzeugen unterstützt (Walther et al., 2022b). Die in FUGA implementierte Methode ist nicht nur ein einfacher MMG (englisch: multi model generator, MMG), der Flugzeuggeometrien auf unterschiedlichen Fidelitätsgraden erzeugt, alle Modelleigenschaften werden basierend auf CPACS auf einer konsistenten parametrischen Grundlage erzeugt. Im Abschnitt 3.1 wurden die Grundlagen von KBE-Systemen erarbeitet, aufbauend auf diesen Grundlagen und den beschriebenen Eigenschaften eines KBE-Systems wird in diesem Abschnitt die wissensbasierte Methode im FUGA-Framework detailliert beschrieben.

Die CPACS-Datensätze aus den Vorentwurfsprozessen werden als Grundlage für den Produktdatenspeicher (englisch: Knowledge Repository) verwendet. Alle Entwurfsergebnisse werden von FUGA in ein CPACS-konformes Format geschrieben. Dabei ergänzt FUGA nicht nur vorhandene Daten, sondern fügt auch neue hinzu. Dazu wird in Python ein Dictionary verwendet, um die Werte mit eindeutigen Schlüsseln abzulegen. Die Schlüssel sind Strings und die Werte können verschiedene Datenformen annehmen. Werte können beispielsweise Dataframes, Dictionarys oder auch primitive bzw. komplexere Geometriemodelle sein. Die Daten werden in CPACS in einer XML-Struktur gespeichert, die es ermöglicht, auf alle Elemente in der Baumstruktur über deren Strings im XPATH zuzugreifen. CPACS enthält somit alle produktspezifische Informationen. Das Ablegen der Geometriemodelle im Produktdatenspeicher erfolgt durch eine eindeutige Ressourcenidentifizierung (englisch: Uniform Resource Identifier, URI) und den Python-Bindings des OCCT (Open CASCADE Technology) CAD-Kernels. Geometriemodelle können so als Objekte eindeutig dem Produktdatenspeicher zugeordnet werden. Zusätzlich verwendet der Produktdatenspeicher einen Spenderdatensatz, der zusätzliche benötigte Information enthält. Das Wissensrepositorium bildet die Gesamtheit aller im System definierten Regeln. (Walther, 2024, S. 79–93)

Um eine konsistente Verarbeitung der Regeln durch die Inferenzmaschine zu gewährleisten und zur Vereinfachung der Regelimplementierung, stellt FUGA ein standardisiertes Regelprotokoll zur Verfügung. Abbildung 3.7 zeigt die UML-Darstellung des Regelprotokolls, dass als Klasse in Python definiert wird. Diese Klasse hat die Attribute *provides* und *requires* und besitzt die Methode *compute*. Das Attribut *provides* vom Typ *string* enthält die URI, so kann das Ergebnis

jeder Regel eindeutig als ein Eintrag im Datenrepositorium gespeichert werden. Das Attribut *requires* liefert alle für die Berechnung notwendigen URIs, die Werte werden dann über den Produktdatenspeicher bereitgestellt. In der Methode *compute* wird die Regel ausgeführt und die Berechnung durchgeführt, die dann den Rückgabewert an den Produktdatenspeicher liefert. Die *compute*-Methode erwartet ein Dictionary, sodass die angeforderten URIs genau einem Eintrag im Wissensrepositorium entsprechen.

RuleProtocol
+provides: str
+requires: set
+compute(inputs:dict={ })

Abbildung 3.7.: UML-Darstellung des Regelprotokolls (Walther, 2024, S. 84)

Daher werden die Attribute der Klasse nicht direkt referenziert und die Methode *compute* ist statisch. Diese Art der deklarativen Implementierung entgegen des prozeduralen Ansatzes ermöglicht eine bessere Testbarkeit des Programms, mehr Modularität und erleichtert die Erweiterbarkeit des KBE-Systems. Das Wissensrepositorium fasst alle Regeln in einem Entwurfssystem zusammen, diese Regeln werden durch die Unterpakete *fuga.geometry* und *fuga.design* bereitgestellt.

(Walther, 2024, S. 79–93)

Die Inferenzmaschine ist die Komponente zur Auswertung und Anwendung von Regeln innerhalb des wissensbasierten Entwurfssystems. Sie verarbeitet die Regeln und leitet neue Entwurfsentscheidungen ab, die wiederum weitere Regeln auslösen. Für die Inferenzmaschine kann ein gerichteter Graph des gesamten Entwurfssystems auf der Grundlage des Regelrepositoriums und der darin enthaltenen Regeln und ihrer Abhängigkeiten erstellt werden. Der Graph, der alle Regeln und deren Abhängigkeiten enthält, ist der maximale Konnektivitätsgraph (englisch: maximum connectivity graph, MCG) und ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Alle Regeln werden als Knoten und die Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den Regeln als gerichtete Kanten modelliert. Der fundamentale Problemlösungsgraph (englisch: fundamental problem graph, FPG) wird für anwendungsspezifische Entwurfsprobleme aus dem MCG erzeugt und verwendet, wie in Abbildung 3.8 dargestellt, 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 not-

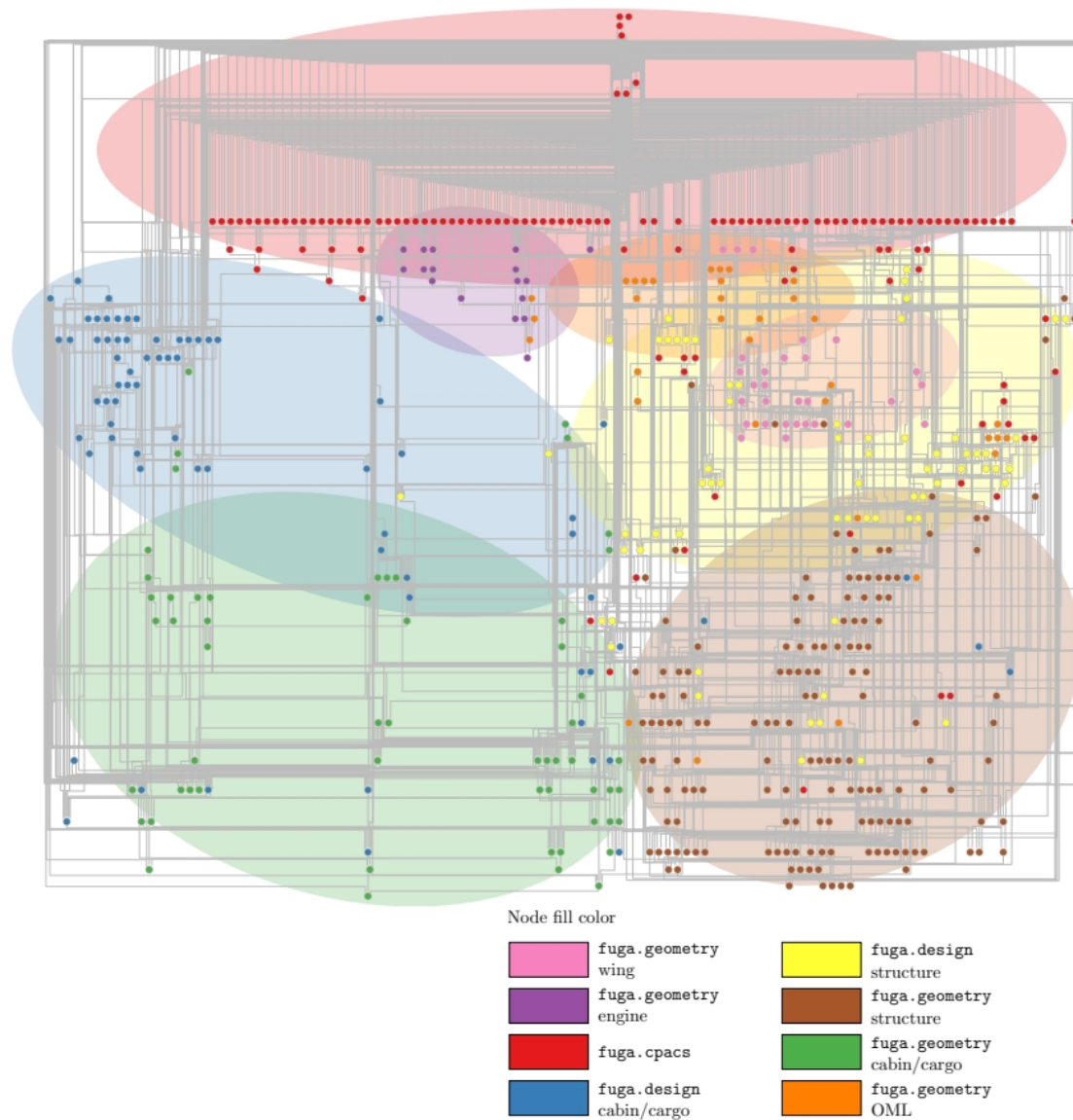


Abbildung 3.8.: Maximaler Konnektivitätsgraph des Passagierentwurfssystems nach Regelsätzen

(Walther, 2024, S. 94)

wendigen Eingaben im Repository abgelegt sind.

(Walther, 2024, S. 79–93)

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 (Kahn, 1962).

Die topologische Sortierung der Wissensregeln innerhalb des PSG ist zwingende Voraussetzung um die Lösung des Entwurfsproblems zu ermöglichen. Ein großer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass sich neue Regeln einfach in das KBE-System integrieren lassen. Die Inferenzmaschine bietet somit eine ideale Grundlage zur besseren Nachverfolgung und Anpassung der bestehenden Wissensstrukturen.

(Walther, 2024, S. 79–93)

Die nachfolgenden Inhalte geben einen Überblick über die Wissensarchitektur im FUGA-Framework. Die Architektur ist eine Plug-in-basierte Lösung, die eine Anpassung der Anforderungen an das Entwurfsproblem ermöglicht. Die Plug-in-basierte Architektur ermöglicht die Erstellung dedizierter MCGs für die jeweiligen Subsysteme. Dieser Ansatz erlaubt das einfache Hinzufügen neuer Regelgruppen. Die oberste Ebene der Wissensgruppierung und ihre Funktionen sind wie folgt beschrieben:

fuga.core:

Die Subpakete in diesem Teilsystem beinhalten die grundlegenden Funktionen für das Datenrepositorium, das Regelprotokoll und die Inferenzmaschine.

fuga.cpacs:

Diese Systemkomponente hat die Aufgabe, die CPACS-Daten zu verwalten. Einerseits wird hier das Datenrepositorium mit den vorhandenen CPACS-Daten durch das Einlesen der XML-Daten initialisiert. Zum anderen werden hier Methoden bereitgestellt, mit denen sich die Entwurfsergebnisse aus dem Datenrepositorium für den konsistenten Datenaustausch wieder in das CPACS-Format übergeben lassen.

fuga.geometry:

Das Subsystem repräsentiert alle Regeln für die parametrische Modellierung auf Basis der CPACS-Daten und verfügt über einen integrierten MMG, mit dem die geometrischen Modelle erzeugt werden. Darüber hinaus erzeugt es alle grafischen Darstellungen der Kabinenlayouts.

fuga.design:

Die vorliegenden Entwurfsdaten liefern nicht immer alle notwendigen Fidelitätsgrade. Wenn zusätzliche Details erforderlich sind, können die CPACS-Daten und die Informationen ge-

nutzt werden, um weitere Daten und Informationen zu generieren. Die zusätzlichen Entwurfsregeln können den Fidelitätsgrad der Modelle sowohl im Kabinenentwurf, im Geometrieentwurf als auch im Massenentwurf entsprechend den Anforderungen erhöhen.

fuga.simulation:

Das Subsystem verwaltet die Wissensregeln für die Generierung von Simulationsmodellen.

(Walther, 2024, S. 89–92)

Für die Implementierung einer neuen Produktarchitektur, wie die der Frachtflugzeugkabinen, sind die drei Submodule `fuga.cpacs`, `fuga.geometry` und `fuga.design` relevant. `fuga.cpacs` ermöglicht die Erweiterung der Schnittstellen für den Import und Export von Entwurfsdaten, sodass diese an den Anforderungen einer neuen Produktarchitektur angepasst werden können. Über `fuga.design` kann ein neues Entwurfssystem, für die neue Produktarchitektur mit den jeweiligen Anforderungen und auf dem gewünschten Genauigkeitsgrad, integriert werden. Der Plug-in-basierte Ansatz in FUGA bietet einen idealen Ausgangspunkt, um ein modulares und anpassungsfähiges Entwurfssystem zu integrieren. Ein neues Entwurfssystem kann dann über den in FUGA integrierten Graphen-Ansatz mittels neuer Regeln um die produktspezifischen Entwurfsdaten wie neue Deckdefinitionen oder neue Kabinenelemente erweitert werden. Basierend auf den Ergebnissen des Entwurfssystems können in `fuga.geometry` die Geometriemodelle des Frachtflugzeugs generiert werden, welche dann für weitere Analysen und Simulationen verwendet werden. Die Geometriemodelle sind wichtig für die Auslegung der Massen, so lassen sich die Positionen und Massenanteile bestimmen, welche dann zur Verbesserung der Vorentwurfsprozess verwendet werden können. `fuga.simulation` ist für die Ziele in dieser Arbeit nicht relevant, da keine Simulationsmodelle erzeugt werden.

Tabelle 3.1 zeigt die Regelwerke der Pakete `fuga.cpacs`, `fuga.geometry` und `fuga.design`. FUGA wird ständig weiterentwickelt und die Tabelle spiegelt nicht den aktuellen Entwicklungsstand des Systems wider, sondern basiert auf dem Entwicklungsstand der Dissertation von Walther. Es gibt beispielsweise Erweiterungen bezüglich der Entwurfsprozesse für die Ableitung benutzer-spezifischer Informationen in einem toolspezifischen Knoten des CPACS-Produktdatenformats sowie neue wissensbasierte Methoden zur Wasserstofftankintegration. Darüber hinaus gibt es aktuelle Entwicklungen und Forschungsergebnisse für neue Simulationmethoden, die einen steigenden Detaillierungsgrad für die vibroakustische Vorhersage bereits im frühen Vorentwurf ermöglichen (Hesse et al., 2024). Die in der Tabelle 3.1 dargestellten Regelgruppen der Pakete können je nach Anforderung und gefordertem Genauigkeitsgrad des Entwurfsproblems erweitert

Tabelle 3.1.: Regelgruppen der Subsysteme in FUGA

Paket	Paketumfang	Regelwerk
fuga.cpacs	CPACS-Schnittstelle	base fuselage wing ... util.tree_update views.geometry views.structure
fuga.geometry	Modellgenerierung	loft wing structure ... cabin masses plot_2d
fuga.design	Entwurf	(loft) structure ... cabin (lh2_tanks) (masses)

In Anlehnung an (Walther, 2024, S. 92)

werden. Die Regelsätze in fuga.geometry und in fuga.design sind nach den verschiedenen Entwurfsdisziplinen gegliedert. Die in der Tabelle 3.1 eingeklammerten Regelwerke sind optional und können mit dem Entwurf verknüpft werden.

(Walther, 2024)

Die Inferenzmaschine, die Wissensbasis und der Produktdatenspeicher von FUGA wurden bereits diskutiert, in 3.1 wurden jedoch fünf Merkmale identifiziert. Ergänzend wird an dieser Stelle beispielhaft die in 3.1 erwähnte Schnittstelle und das Modellierungswerkzeug von FUGA erläutert.

Als Oberfläche wird Jupyter Notebook verwendet. Abbildung 3.9 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Benutzeroberfläche. Die Benutzeroberfläche von Jupyter unterstützt Echtzeit-Feedback. Einzelne Entwurfsergebnisse wie parametrische und geometrische Daten können

USER INPUT AREA



Put your settings here:

```
[17]: # Set user inputs for structural augmentation and cabin design:
      param_file = r'FUGAInput.xml'

      # Set CPACS file from Overall Aircraft Design to modify and build models:
      cpacs_file = r'D239_2035_wing_fixed.xml'
```

ANALYSIS AREA

Read CPACS

Read CPACS and plot basic loft to check.

This creates the file `cpacs_base_geometry.vtm` in your working directory. You can view it e.g. using Paraview.

```
[18]: from fuga.geometry.loft import Geometry

      geo = Geometry(cpacs_file, return_dir=".", smooth_fuselage=False)
      geo.write_surfaces("cpacs_base_geometry")
```

Abbildung 3.9.: Grafische Oberfläche in Jupyter

über die einzelnen Knoten des Wissensgraphen einfach abgerufen und visualisiert werden, was die Interaktivität unterstützt. Zur Erweiterung des Wissens kann die Gültigkeit der Regeln über die interaktive Oberfläche von Jupyter überprüft werden. Der modulare Aufbau der einzelnen Entwurfsaufgaben in Jupyter unterstützt zudem die Identifikation von Fehlern und ermöglicht die Durchführung der Entwurfsaufgaben in Teilschritten.

Die regelbasierten Geometrieoperationen in FUGA basieren auf OCCT, wie in Hesse et al. (2023) beschrieben. OCCT ist ein leistungsfähiger und quelloffener CAD-Kern. Mit Hilfe von Geometrie- und Topologiemodellen können Begrenzungsflächenmodelle (englisch: „Boundary Representaion“, BRep) zu Geometrien aggregiert werden (Technology, 2024). Die Topologie kann als Datenstruktur verstanden werden, die geometrische Objekte miteinander verbindet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass FUGA alle wesentlichen Merkmale eines KBE-Systems aufweist. Durch den graphenbasierten Ansatz und den modularen Aufbau kann das Framework leicht um neue Regeln und Regelgruppen erweitert werden. FUGA ermöglicht basierend auf dem gemeinsamen Produktdatenformat CPACS den initialen Rumpf- und Kabinenentwurf von Flugzeugkabinen. Der integrierte MMG erlaubt die Generierung von Geometriemodellen, die auf die Anforderungen anderer Disziplinen zugeschnitten sind und in un-

terschiedlichen Fidelitätsgraden für weitere Analysen verwendet werden können. Damit übernimmt es eine wichtige Rolle im Gesamtentwurfsprozess von Flugzeugen.

3.6. Stand des Wissens und der Technik

Die Diskussion in diesem Abschnitt gibt einen Überblick über KBE-Systeme aus der Sicht der Forschung und der Industrie. Es gibt bereits weitere Ansätze und Programme aus unterschiedlichen Disziplinen für die automatisierte Generierung von Flugzeugvorentwurfsdaten basierend auf KBE. Zusätzlich werden die in Abschnitt 3.1 aufgeführten Ansätze für KBE-Systeme aus der Forschung sowie weitere Prototypen und Trends genauer betrachtet.

In einigen wissenschaftlichen Abhandlungen taucht oft der Begriff Multimodellgenerator auf. Die MMGs sind KBE-Anwendungen für die automatisierte Generierung von Geometriemodellen spezifischer Produktfamilien. Diese Geometriemodelle werden auf verschiedenen Abstraktionsgraden den Disziplinen zur Verfügung gestellt. In den Vorentwurfsprozessen von Flugzeugen werden zwischen den Disziplinen konsistente Daten ausgetauscht, mit dem Ziel einer ganzheitlichen Entwurfsmethodik. Diese Entwurfsmethodik wird unter dem Begriff der multidisziplinären Entwurfsoptimierung (englisch: multidisciplinary design optimization, MDO) beschrieben und ist mit ihrer komplexen Disziplinbeteiligungen stark iterativ getrieben. KBE-Systeme spielen aufgrund ihrer Fähigkeiten wie hoher Automatisierungsgrad, Modellintegration und Schnittstellenmanagement eine wichtige Rolle im MDO.

La Rocca (2012, S. 170)

La Rocca gibt einen Überblick über die Entwicklung und Trends von KBE-Technologien. Er beschreibt die Gründe für den mangelnden Erfolg von KBE-Systemen gegenüber CAD-Systemen. Darüber hinaus gibt er einen kleinen Überblick der Marktführer für PLM-Lösungen (Product Lifecycle Management) und ihren CAD-Produkten inklusive deren KBE-Fähigkeiten. PLM-Lösungen können als Softwareplattform verstanden werden, die alle Daten, Prozesse, Dokumente und Änderungen rund um ein Produkt und deren gesamten Lebenszyklus hinweg verwaltet. Nach La Rocca waren die Gründe für den mangelnden Erfolg der KBE-Systeme folgende:

- Hohe Kosten der Softwarelizenzen
- Ein Mangel an Literatur
- Fehlende Methodiken zur Entwicklung der Systeme

- Schlechte Zugänglichkeit
- Schlechte Marktstrategien der KBE-System-Anbieter

(La Rocca, 2012)

Im Folgenden werden die technischen Entwicklungen und strategischen Veränderungen nach LaRocca beschrieben, die eine Etablierung von KBE-Systemen in der Industrie und Forschung begünstigt haben. Die Kosten für Hardware sind gesunken. Es gibt mittlerweile eine Vielzahl an Open-Source-Technologien mit ausführlichen Dokumentationen. Die Komplexität der Produkte erforderte auch eine steigende Komplexität an CAD-Systemen, was den relativen Abstand bezüglich des Komplexitätsgrades zu KBE-Systemen verringert hat. Darüber hinaus gibt es mittlerweile unterschiedliche Methoden, die die Entwicklung von KBE-Systemen unterstützen. Eine dieser Methoden ist die Methodologie und Werkzeuge, die auf KBE-Anwendungen ausgerichtet ist (englisch: Methodology and tools Oriented to KBE Applications, MOKA). Kurz vor der Jahrtausendwende begannen führende PLM-Unternehmen den Mehrwert von KBE-Ansätzen zu erkennen und erweiterten ihre Produkte um KBE-Fähigkeiten. LaRocca stellt dazu einige relevante Unternehmen vor:

- **1999** führte PTC das Behavioral Modelling Toolkit für Pro/ENGINEER 2000i ein, um die CAD-Engine mittels Methoden und deren Regeln zu steuern
- **2001** erwarb UGS die KBE-Sprache Intent! von Heide Corporation und integrierte sie in Unigraphics (2007 wurde UGS von Siemens aufgekauft).
- **2002** kaufte Dassault Systemes (DS) KTI und damit deren Produkt ICAD. ICAD wurde von DS nicht weiter genutzt, stattdessen nutzt DS das Know-how von KTI zur Entwicklung von KBE-Zusatzmodulen für CATIA
- **2005** übernahm Autodesk die Engineering Intent Corporation und verbindet deren KBE-System mit Autodesk

(La Rocca, 2012)

Die Studie von McGoe, P. J. (La Rocca (2012)) zeigt in Abbildung 3.10 den Fortschritt der kommerziellen KBE-Entwicklungen in Abhängigkeit von der Zeit. La Rocca (2012) betont außerdem, das GDL (Generative Design Language) und AML (Adaptive Modeling Language) möglicherweise die einzigen vollwertigen KBE-Systeme auf dem Markt sind und alle anderen Unternehmen ihre CAD-Systeme lediglich um KBE-Fähigkeiten erweitert haben. GDL ist eine

3.6. STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

objektorientierte Programmiersprache, die für den regelbasierten und parametrischen Entwurf in der Bau- und Architekturindustrie Anwendung findet. AML ist ein von US-Firma TechnoSoft Inc. entwickelte KBE-Plattform, diese wird im Maschinen- und Flugzeugbau verwendet. In der Arbeit von Kügler et al. (2023) wird die Entwicklung der KBE-Systeme sowie die ungelösten Probleme von 2012 bis 2021 erörtert. Demnach haben KBE-Systeme es bis heute nicht geschafft, sich breit in der Industrie zu etablieren und finden hauptsächlich Anwendung in der Luftfahrt- und Automobilindustrie. Die meisten der von LaRocca angesprochenen Gründe für den mangelnden Erfolg von KBE-Systemen bestehen auch heute noch. Es fehlen weiterhin standardisierten Methoden, Transparenz und Wiederverwendbarkeit, aber die Relevanz für die Automatisierung repetitiver Aufgaben besteht immer noch. KBE-Systeme können durch die Nutzung von Open-Source-Software, kollaborativer Plattformen und künstlicher Intelligenz weiter gefördert werden.

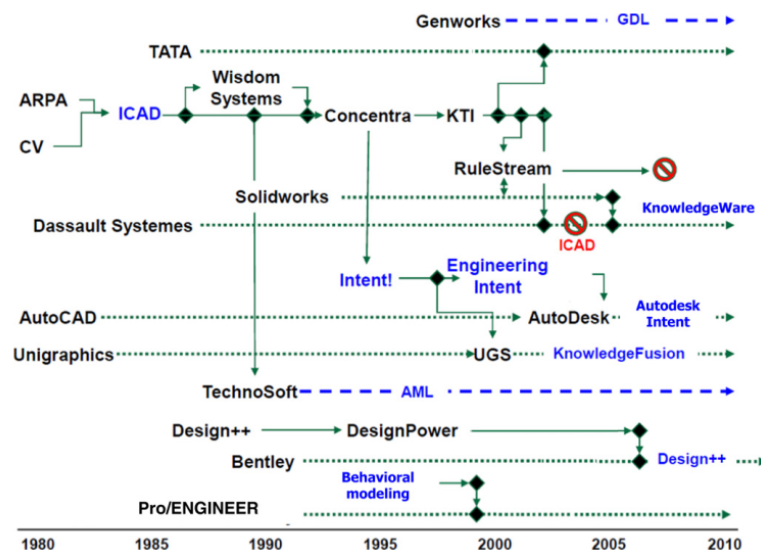


Abbildung 3.10.: Marktübersicht Kommerzieller KBE-Systeme McGoe, P. J. (zitiert nach LaRocca, 2012)

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. In FUGA wird die Instanzie-

rung für Rumpf, Struktur oder darunter liegender Kompetenzen über den graphenbasierten Ansatz gesteuert. 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. Die Modelle können mit Simulationswerkzeugen wie NASTRAN und MATLAB für weitere Analysen genutzt werden. Mit diesem KBE-System zeigt La Rocca, wie ein ganzheitlicher Flugzeugentwurf im Kontext des MDO unterstützt werden kann. Moderne KBE-Systeme können den gesamten Prozess abbilden, dazu zählt die Instanziierung des Produktmodells, die Übermittlung der Anfragen sowie die Ausführung und Generierung der Ergebnisse. Der gezeigte Ansatz von La Rocca ist ganzheitlich für das Produktmodell Flugzeug und modular ausgerichtet. La Rocca zeigt mit seinem erfolgreich implementierten Ansatz eines MMG für BWB, dass KBE-Systeme die Entwicklungszeiten deutlich reduzieren und das die generierten Modelle für weitere Analysen in den Gesamtentwurfsprozess von Flugzeugen zurückgeführt werden können.

(La Rocca, 2012)

Basierend auf den Auslegungen von Chapman wird ein KBE-System aus der Automobilindustrie für die strukturelle Rohkarosserie von Fahrzeugen (englisch: body-in-white, BIW) erläutert. Chapman beschreibt eine Architektur zur Implementierung und automatisierten Generierung verschiedener Entwurfsergebnisse, die die Optimierung der strukturell schwersten Fahrzeugkomponente, der Karosserie, ermöglicht. Das System nennt Chapman Entwurfs-Analyse-Antwort-Werkzeug (englisch: design analysis response tool, DART) und basiert auf OOP mit einer Programmiersprache von TechnoSoft. In diesem System definiert der Benutzer das Konstruktionsproblem und gibt die grundlegenden Anforderungen sowie Entwurfparameter in das System ein. Daraufhin erzeugt das System Schlüsselobjekte sowie eine Teilbibliothek, wobei jedes Objekt eine reale Komponente des Fahrzeugs widerspiegelt. Diese Objekte werden dann in einem parametrischen Modell für anschließende Analysen und Bewertungen zusammengeführt. Chapman beschreibt in seinem Ansatz die Integration von externen CAD-Objekten, FEA-Analysetools sowie einer externen Datenbasis. Im Vergleich zu La Roccas MMG 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. Auch Chapman zeigt mit seinem KBE-System für Fahrzeugkarosserien, dass die Entwicklungszeiten verkürzt und Projektkosten reduziert werden können.

(Chapman & Pinfeld, 2001)

Ein weiterer noch sehr junger Ansatz eines KBE-Systems wird in diesem Absatz kurz erläutert. Der Ansatz dieses wissensbasierten Systems kommt aus dem Bauingenieurwesen und befasst sich mit der Planung von Eisenbahninfrastruktur. Ziel ist die Automatisierung der Planung für die Eisenbahninfrastruktur unter Verwendung von BIM (Building Information Modeling), BPMN (Business Process Model and Notation), DMN (Decision Model and Notation) und MO-KA. Mittels dieses Ansatzes konnte die Zeitersparnis für die Planung der Eisenbahninfrastruktur um bis zu 97.5 % verbessert werden.

(Häußler & Borrmann, 2021)

Walther hat sich in seiner Dissertation für die Entwicklung des wissensbasierten Werkzeugs FUGA detailliert mit dem Stand der Forschung auseinandergesetzt. Er beschreibt, dass kein Ansatz eines KBE-Systems für einen Rumpfantwurf die Zusammenhänge vom äußeren Formlinien-Entwurf (englisch: Outer Mold Line, OML), Strukturentwurf und Kabinenentwurf ganzheitlich integriert. Außerdem betont Walther, dass in der Literatur kein Hinweis auf einen solchen rumpfspezifischen MMG existiert und dass die vorhandenen generalisierten Finite-Elemente-Methoden (GFEM)-Generatoren prozedural sind und nicht an ein KBE-System angebunden sind. Demnach entwickelt Walther mit der Methode FUGA einen disruptiven Ansatz für ein KBE-System mit einem integrierten MMG für den automatisierten Kabinenentwurf unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Faktoren. Ein großer Mehrwert dieses KBE-Systems ist die modulare Architektur in Kombination mit den oben genannten Systemeigenschaften und dem integrierten graphenbasierten Ansatz, der die Integration weiterer Subsysteme und Produktarchitekturen in das bestehende KBE-System unter Verwendung vorhandener Methoden wie Formlinien- und Strukturentwurf ermöglicht.

(Walther, 2024, S. 76)

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass KBE-Systeme aufgrund verschiedener Faktoren anfangs keine große Akzeptanz in Industrie und Forschung fanden und dass sich dies seit der Jahrtausendwende sukzessive geändert hat. Es wurde auch beschrieben, dass einige Herausforderungen für die Entwicklung und Etablierung von KBE-Systemen heute noch ungelöst sind und dass sie hauptsächlich in der Luftfahrt und der Automobilindustrie Anwendung finden. Darüber hinaus wurden einige Ansätze von KBE-Systemen aus Industrie und Forschung präsentiert. Die Beispiele zeigen, dass KBE-Systeme sowohl Entwicklungszeiten als auch -kosten reduzieren und für disziplinübergreifende Aktivitäten gute Schnittstellenanbindungen ermöglichen. Festzuhalten ist, dass KBE-Systeme das Potenzial haben, in der Luftfahrtindustrie eine wichtige Rolle in der Produktentwicklung und somit auch im MDO einzunehmen. Mit ihren Fähigkei-

ten begünstigen sie einen ganzheitlichen Entwurfsprozess. Darüber hinaus wurde der MMG als Anwendung des KBE-Systems eingeführt, sodass die vom MMG generierten Modelle von anderen Disziplinen für einen Gesamtentwurfsprozess weiterverarbeitet werden können. Die in FUGA integrierte Methode bietet einen neuen, ganzheitlichen Ansatz für die Integration von OML, Flugzeugstruktur und Flugzeugkabine. Durch ihre Architektur stellt sie eine Möglichkeit zur Integration neuer Produktarchitekturen zur Verfügung. Es konnte keine Literaturquelle gefunden werden, die einen wissensbasierten Ansatz für den Entwurf von Frachtflugzeugmodellen beschreibt. Daraus lässt sich schließen, dass ein solcher Ansatz den Gesamtflugzeugentwurf um einen disruptiven Baustein erweitert. Dies ermöglicht nicht nur die frühzeitige Berücksichtigung von umbaufähigen Passagierkabinen, sondern verfolgt auch das Ziel eines durchgängigen digitalen Entwurfsprozesses.

4. Begründung des wissensbasierten Entwurfsansatzes

In diesem Abschnitt wird erörtert, warum der wissensbasierte Ansatz und die gewählten Werkzeuge zur Auseinandersetzung mit den eingangs formulierten Hypothesen geeignet sind und somit einen vielversprechenden Ansatz zur Unterstützung des Gesamtentwurfs ausbaufähiger Passagierkabinen durch neuartige Methoden bieten können.

4.1. Wirtschaftliche und ökologische Motivation

Wie Abschnitt 1.1 dargelegt, verzeichnet der globale Markt für Frachtflugzeuge einen stetigen Anstieg. In Abschnitt 2.3 wird außerdem diskutiert, dass für die meisten Fluggesellschaften der Umbau von Passagierflugzeugen in Frachtflugzeuge den wirtschaftlichen Nutzen steigert und gleichzeitig die Nachhaltigkeit fördert. Ferner ist der Umbau von Passagier- zu Frachtflugzeugen, wie in Abschnitt 2.3 dargelegt, die kostengünstigere Variante gegenüber der Anschaffung eines reinen Frachtflugzeugs. Diese zunehmende wirtschaftliche Relevanz des Luftfahrtsektors ist ein wichtiger Treiber, um den noch unerforschten Bereich der KBE-Entwurfsmethoden für Frachtflugzeuge anzugehen. Die Recherchen aus Abschnitt 3.6 haben gezeigt, dass neue KBE-Entwurfsmethoden für Frachtkabinen in den Flugzeugvorentwurfsprozessen eine disruptive und vielversprechende Grundlage liefern und zusätzlich einen wichtigen Grundbaustein für weitere Anknüpfungspunkte in der Forschung setzen.

4.2. Potenziale wissensbasierter Entwurfsmethoden

In den Abschnitten 3.5 und 3.6 wurde die wissensbasierte Methode in FUGA für den Entwurf von Passagierflugzeugen mit dem Stand der Technik verglichen. Die Beispiele für KBE-Systeme aus der Wirtschaft und der Forschung zeigen, dass wissensbasierte Systeme die Produktentwicklungen in domänenspezifischen Umgebungen unterstützen und disziplinübergreifende Zusammenarbeit und Analysen ermöglichen. Zudem zeigen die KBE-Ansätze in Abschnitt 3.6, dass so

4.3. SYSTEMINTEGRATION VON FUGA IN DEN DISZIPLINÜBERGREIFENDEN VORENTWURFSPROZESS

Entwicklungszeiten reduziert und Kosten minimiert werden können. Abschnitt 3.6 führt zusätzlich auf, dass die relative Komplexität zwischen KBE-Systemen und CAD-Systemen sich aufeinander zu bewegt und technische Hürden, wie die Nutzung von KBE-Systemen durch den technologischen Fortschritt der letzten 20 Jahre geringer geworden sind. Dennoch liegt die Anwendung der Systeme immer noch in spezialisierten Branchen. Außerdem bestehen bis heute noch die gleichen offenen Fragen bei der Verwendung und Entwicklung von KBE-Systemen wie 2012. KBE-Systeme bieten dennoch viele Möglichkeiten, um als Zukunftstechnologie Forschung und Industrie voranzutreiben. Ihre Fähigkeiten für disziplinübergreifende, domänenspezifische und beschleunigende Entwurfsprozesse für neuartige Ansätze zeigen, dass KBE-Systeme für die Erforschung neuer Entwurfsmethoden, wie sie bei Flugzeugkabinen zum Einsatz kommen, vielversprechend sind.

4.3. Systemintegration von FUGA in den disziplinübergreifenden Vorentwurfsprozess

FUGA ist für den Passagierflugzeugentwurf entwickelt worden, unter Berücksichtigung der äußeren Geometrie und des Rumpf- und Kabinenentwurfs. Die modulare Architektur in FUGA bietet eine geeignete Grundlage, um ein Entwurfssystem für Frachtflugzeuge in das bestehende KBE-System zu integrieren. Das DLR verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz für den Flugzeugentwurf, sodass im Optimum alle Disziplinen in einem durchgängigen Prozess zur Produktentwicklung des Flugzeugs mit ihren digitalen Methoden verbunden sind. Das Ziel ist möglichst viele Entwurfsparameter zu berücksichtigen. Umbaufähige Flugzeuge auch mit ihren Frachtvarianten in den Vorentwurfsprozess zu integrieren würde das Ziel unterstützen und den Entwurfsraum der Flugzeuge erweitern. Sowohl FUGA als auch das Vorentwurfswerkzeug openAD nutzen CPACS als gemeinsames Produktdatenformat. Dies bietet einen großen Vorteil aufgrund der gemeinsamen Datengrundlage für das Ziel, den Einfluss des wissensbasierten Entwurfs auf den Vorentwurf zu untersuchen. RCE stellt für CPACS-basierte Werkzeuge eine ideale Integrationsumgebung zur Verfügung, um disziplinübergreifende Analysen in einem automatisierten Optimierungsprozess zu ermöglichen. Der Entwurfsprozess für die Passagier- und Frachtkabinen basiert auf den gleichen Formlinienentwurf, sodass die äußere Geometrie gleich bleibt. Es werden nur Veränderungen für die primäre und sekundäre Struktur der Kabine umgesetzt.

4.4. Zusammenfassung der Problemstellung und methodische Einordnung

Die Analyse der Problemsituation zeigt, dass der Umbau von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen kostengünstiger und nachhaltiger ist. Vor allem der Forschungsbereich für KBE-Methoden bezüglich umbaufähiger Passagierkabinen bietet einen vielversprechenden Ansatz. Die innovative Technologie der KBE-Systeme beschleunigt die Entwurfsprozesse und unterstützt so die Erforschung neuer Methoden zur Verbesserung der Flugzeugumrüstung, was den wachsenden Markt für Frachtflugzeuge unterstützt. FUGA bietet durch seine modulare Architektur und den bereits integrierten initialen Rumpfantwurf einen geeigneten Ausgangspunkt, um das System auf einen Frachtkabinenentwurf zu erweitern. Der graphenbasierte Ansatz in FUGA ermöglicht außerdem bereits vorhandenen Methoden und Regeln in ein neues Entwurfssystem einzubinden, was den Entwicklungsaufwand enorm reduziert. Die Erweiterung des wissensbasierten Ansatzes auf Frachtflugzeugkabinen ermöglicht die Betrachtung der Passagierkabine als Frachtkabine bereits im frühen Vorentwurf. Das ermöglicht eine Bewertung der umgebauten Passagierkabine als Frachtvariante basierend auf unterschiedlichen Nutzlastszenarien. Dieser Ansatz wird derzeit noch nicht in den Vorentwurfsprozessen der Flugzeuge berücksichtigt. Dadurch kann einerseits eine wichtige Forschungslücke geschlossen und andererseits eine Grundlage für weitere Anknüpfungspunkte und weitere Forschungsansätze ermöglicht werden. Zudem ermöglicht der wissensbasierte Ansatz, das in kurzer Zeit möglichst viele unterschiedliche Entwurfsvarianten generiert und untersucht werden können. Die Verknüpfung von FUGA mit openAD in der RCE-Integrationsumgebung stellt aufgrund der gemeinsamen Datengrundlage beider Entwurfswerkzeuge einen passenden methodischen Ansatz dar, um die angestrebten Forschungsziele dieser Arbeit zur Untersuchung der Einflüsse des wissensbasierten Entwurfs auf den Gesamtentwurf unter Berücksichtigung der umgerüsteten Passagierkabinen zu untersuchen. Wird die wissensbasierte Entwurfsmethode in FUGA in einem gemeinsamen digitalen Entwurfsprozess mit openAD verknüpft, können die empirischen und semiempirischen Annahmen aus den Vorentwurfsprozessen durch detailliertere Ergebnisse aus dem wissensbasierten Entwurf ersetzt werden. Das erhöht nicht nur die Entwurfsgenauigkeit des Gesamtflugzeugentwurfs, sondern fördert auch einen durchgängigen digitalen Entwurfsprozess, der zudem gute Anknüpfungspunkte für weitere Disziplinen ermöglicht. Um die Ziele des disziplinübergreifenden iterativen Entwurfsprozesses zu realisieren, muss der wissensbasierte Ansatz sowohl für den Fracht- als auch den Passagierkabinenentwurf als Tool in RCE eingebettet werden. Darauf aufbauend kann dann ein geeigneter disziplinübergreifender Entwurfsprozess aufgebaut werden, um die Rückführung der wissensbasierten Entwurfsergebnisse in den Flugzeugvorent-

4.4. ZUSAMMENFASSUNG DER PROBLEMSTELLUNG UND METHODISCHE EINORDNUNG

wurf im Hinblick auf den Gesamtflugzeugentwurf zu ermöglichen und bewerten zu können. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Ist-Analyse und mit dem Wissen, welche Werkzeuge zur Lösung der Problemstellung geeignet sind, wird eine grundlegende methodische Herangehensweise im nächsten Kapitel hergeleitet.

5. Wissensbasierte Entwurfsmethodik zur Rumpfintegration von Frachtflugzeugen

Aufbauend auf den in Kapitel 4 vorgestellten Herausforderungen für den Entwurfsprozess wird in diesem Kapitel der erste Teil der Methodik zur Beantwortung der eingangs formulierten ersten Hypothese erarbeitet. Dazu wird das KBE-Werkzeug FUGA für den initialen Rumpf- und Kabinenentwurf von Frachtflugzeugkabinen weiterentwickelt. 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 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 Massentwurf 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.

5.1. Strukturelle und konzeptionelle Überlegungen zur Systementwicklung

In diesem Abschnitt werden die Vorüberlegungen zur Erweiterung des FUGA-Frameworks auf den Entwurf von Frachtflugzeugkabinen getroffen. Ziel ist die Festlegung einer übergeordneten Systemstruktur, die auf den Anforderungen zur Modellierung der Frachtkabinen umgesetzt wird. Zudem wird ermittelt, welche Anpassungen und Erweiterungen im bestehenden System umgesetzt werden müssen. Die Vorüberlegungen ermöglichen anschließend eine strukturierte Herangehensweise für die Entwicklung des neuen Entwurfssystems.

Die Grundlagen von FUGA wurden bereits Kapitel in 3.5 erarbeitet, demzufolge unterstützt das Framework eine modulare Architektur und wurde ursprünglich für Passagierflugzeugkonfigurationen entwickelt. Frachtflugzeugkonfigurationen erfordern einen anderen Ansatz, sowohl für die Struktur- als auch die Systemkomponenten der Kabine. Um eine passende Systemstruktur zu finden, muss zwischen der primären und der sekundären Struktur des Flugzeugs unterschieden werden. Zu den primären Strukturen, die sich auf tragende Strukturen des Flugzeugs beziehen, gehören der Loft, die Tragflächen, Spanten, Stringer, Holme, Leitwerke, einige Türen und Teile der Triebwerke. Zu den sekundären Strukturen, die hauptsächlich funktionalen oder ästhetischen Zwecken dienen, gehören die Passagierausstattungen wie Sitze, Verkleidungen, Gepäckablagen, Toiletten, Küchen und Trennwände sowie einige Türen. Abbildung 5.1 zeigt schematisch die Sekundärstruktur der D239, alle rot markierten Komponenten, die auf dem oberen Deck installiert sind, werden für das neue Entwurfssystem entfernt. Für das untere Frachtdeck können die Container sowie die Verkleidungen beibehalten werden.

In der modularen Architektur von FUGA sind die Regelwerke der primären und sekundären Strukturen, wie in Tabelle 3.1 gezeigt, getrennt. Es ist daher nicht sinnvoll, das Entwurfssystem für Frachtflugzeuge in den Kabinenentwurf zu integrieren. Beide Entwurfssysteme in einem Regelwerk erhöhen die Unübersichtlichkeit und die Fehleranfälligkeit des Kabinenentwurfs, was die Wartung des Systems erschwert. Da der überwiegende Teil der Sekundärstruktur des Kabinenentwurfs für Passagierflugzeuge, wie in Abbildung 5.1 gezeigt, nicht benötigt wird und FUGA durch seine Plug-in-basierte Architektur eine geeignete Ausgangsbasis schafft, kann der Entwurf von Frachtflugzeugen getrennt vom Entwurf von Passagierflugzeugen implementiert werden. Der gleiche Ansatz zur Trennung der Entwurfssysteme wird auch für das Massenentwurfssystem der Frachtkabinen umgesetzt. Ein großer Vorteil, den FUGA an dieser Stelle bietet, ist die klare Trennung zwischen Struktur- und Kabinenentwurf. Für den Entwurf

5.1. STRUKTURELLE UND KONZEPTIONELLE ÜBERLEGUNGEN ZUR SYSTEMENTWICKLUNG

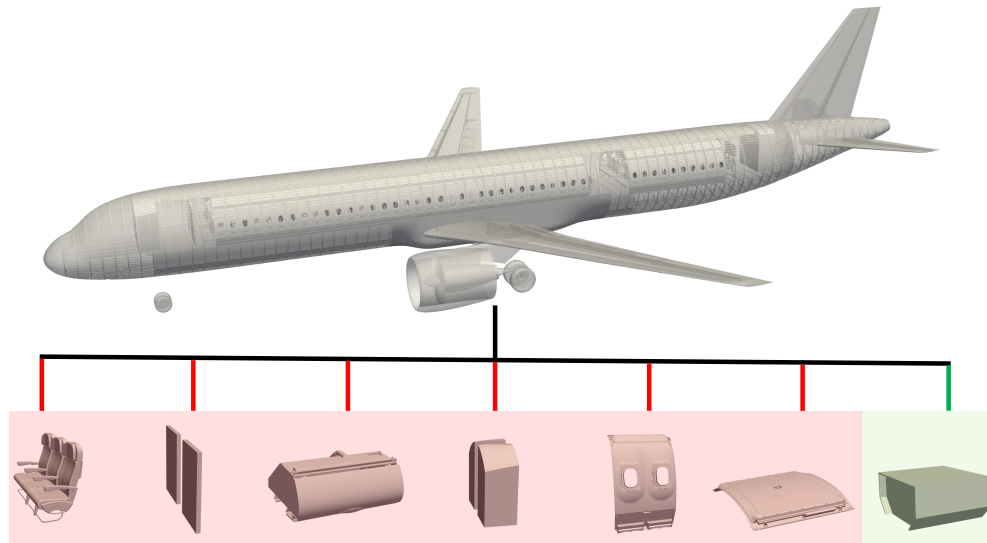


Abbildung 5.1.: D240 - Schematische Darstellung der zu entfernenden und verbleibenden Elemente für die Sekundärstruktur des oberen und unteren Kabinendecks

der Frachtkabinen können somit die bereits komplexen Entwurfs- und Modellierungsmethoden für die primären Strukturen übernommen und den jeweiligen Anforderungen entsprechend erweitert werden.

Wie in Tabelle A.4 dargestellt, sind für den Strukturentwurf der Passagierkabinen benutzerdefinierte Eingaben zu Fenstern und Türen erforderlich. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, werden die Fenster mit sogenannten Plugs verdichtet und es gibt nur noch eine Tür für das Flugzeugpersonal sowie Frachttüren und gegebenenfalls Wartungsluken. Sowohl der Kabinen- als auch der Frachtentwurf verwenden das gleiche Entwurfssystem zur Auslegung der Rumpfstruktur. Das erfordert eine Anpassung des Strukturentwurfs. Außerdem müssen zusätzliche Regeln für die Auslegung der MDCD innerhalb des Strukturentwurfs hinzugefügt werden. Für die Erstellung der Kabinenlayouts bietet das FUGA-Regelwerk `plot_2d` im Submodul `fuga.geometry` bereits umfassende Methoden für die Layoutdarstellung der Kabinen und ihrer Strukturen. Diese Methoden können um weitere Methoden für die Frachtkabinen ergänzt werden. Da Passagierkabinen ebenfalls Frachtdecks haben, lassen sich diese Methoden auch für die Layouts der Frachtkabinen verwenden. Damit können die Methoden für die Layouts der Frachtkabinen anwendungsspezifisch in das vorhandene Regelwerk `plot_2d` integriert werden. Auch für die CPACS-Schnittstelle nutzen der Passagier- und der Frachtentwurf die gleichen Regelwerke. Hierfür stellt FUGA ebenfalls bereits umfassende Methoden für das Schnittstellenmanagement

5.1. STRUKTURELLE UND KONZEPTIONELLE ÜBERLEGUNGEN ZUR SYSTEMENTWICKLUNG

der jeweiligen Produktdaten mit dem Wissensrepositorium bereit.

Tabelle 5.1.: Regelwerke die im FUGA-Framework erweitert und hinzugefügt werden zur Rumpfintegration der Frachtflugzeuge (In Anlehnung an Walther (2024, S. 92))

Paket	Paketumfang	Konfigurationsdateien	Regelwerk
fuga.cpac	CPACS-Schnittstelle	analysis ... toolspecific	base fuselage wing ... tree_update views.geometry views.structure
fuga.geometry	Modellgenerierung	loft wing structure ... cargo cargo_masses cabin masses	loft wing structure ... cargo cargo_masses cabin masses plot_2d
fuga.design	Entwurf	structure ... cargo cargo_masses cargo_structure cabin lh2_tanks masses	(loft) structure ... cargo cargo_masses cabin (lh2_tanks) (masses) lh2_tanks

Auf Basis der modularen Systemarchitektur von FUGA können das Entwurfssystem und das Multifidelity-Frachtmodell sowie deren Regelwerke unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen der Frachtkabinen entwickelt werden. Entsprechend werden auch das Massentwurfssystem und das Multifidelity-Massenmodell für die Frachtkabinen sowie deren Regelwerke erstellt. Die Vererbungsmechanismen zwischen den Regelwerken sowie die Kommunikation mit dem Datenrepositorium werden über die jeweiligen Konfigurationsdateien

umgesetzt, die auch als Entwurfs- und Modellierungssysteme verstanden werden können. Zusätzlich wird ein Strukturentwurfssystem hinzugefügt, das die Vererbung der Regeln zwischen dem Frachtkabinenentwurf und allen anderen Systemmodulen ermöglicht. Die Entwurfs- und Modellierungssysteme für den Passagier- und Frachtkabinen können so gemeinsam auf die vorhandenen Regeln des Strukturentwurfs und der Strukturmodellierung zugreifen. Dieser Aufbau stellt sicher, dass die Entwurfs- und Modellierungsprozesse von Passagier- und Frachtkabinen getrennt bleiben.

Aufbauend auf den in diesem Abschnitt diskutierten Vorüberlegungen kann die Tabelle 3.1 um die identifizierten Rahmenbedingungen erweitert werden. Die Tabelle 5.1 zeigt die um die Entwurfs- und Modellierungssysteme sowie die Regelwerke aus den Vorüberlegungen ergänzte neue Tabelle. Dabei sind alle hinzuzufügenden Systemkomponenten grün und alle zu erweiternden blau markiert. Mithilfe der erarbeiteten Systemstruktur kann eine Entwurfsbasis für den Frachtkabinenentwurf entwickelt werden.

5.2. Systembasis des Frachtkabinenentwurfs

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung der im vorherigen Abschnitt 5.1 definierten neuen Entwurfs- und Modellierungssysteme erarbeitet. Die Entwicklung des Massenentwurfssystems und das Multifidelity-Massenmodells für die Frachtkabinen wird in Kapitel 5.7 behandelt. Darüber hinaus werden die Regelwerke für die Struktur im Paketumfang Modellierung und Entwurf 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 und ohne die MDCCD. Die noch fehlenden Sekundärstrukturen sind die Container für das obere Deck sowie die 9g-Barriere, die methodische Integration dieser Elemente zusammen mit der MDCCD wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. So wird anfangs eine sehr rudimentäre, aber solide Basis für den Frachtflugzeugentwurf erstellt, die anschließend sukzessive um neue Regeln erweitert wird.

Das neue Entwurfs- und Modellierungssystem `cargo` in `fuga.design` und `fuga.-geometry`, die in Tabelle 5.1 in Grün markiert sind, können äquivalent zur Struktur des

5.2. SYSTEMBASIS DES FRACHTKABINENENTWURFS

Passagierentwurfssysteme aufgebaut werden. 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 5.2 veranschaulicht das erstellte Fracht- und Strukturentwurfssystem sowie das Multifidelity-Frachtmodell 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 Subsysteme bei der Initialisierung der Entwurfssysteme. Jedes Subsystem stellt

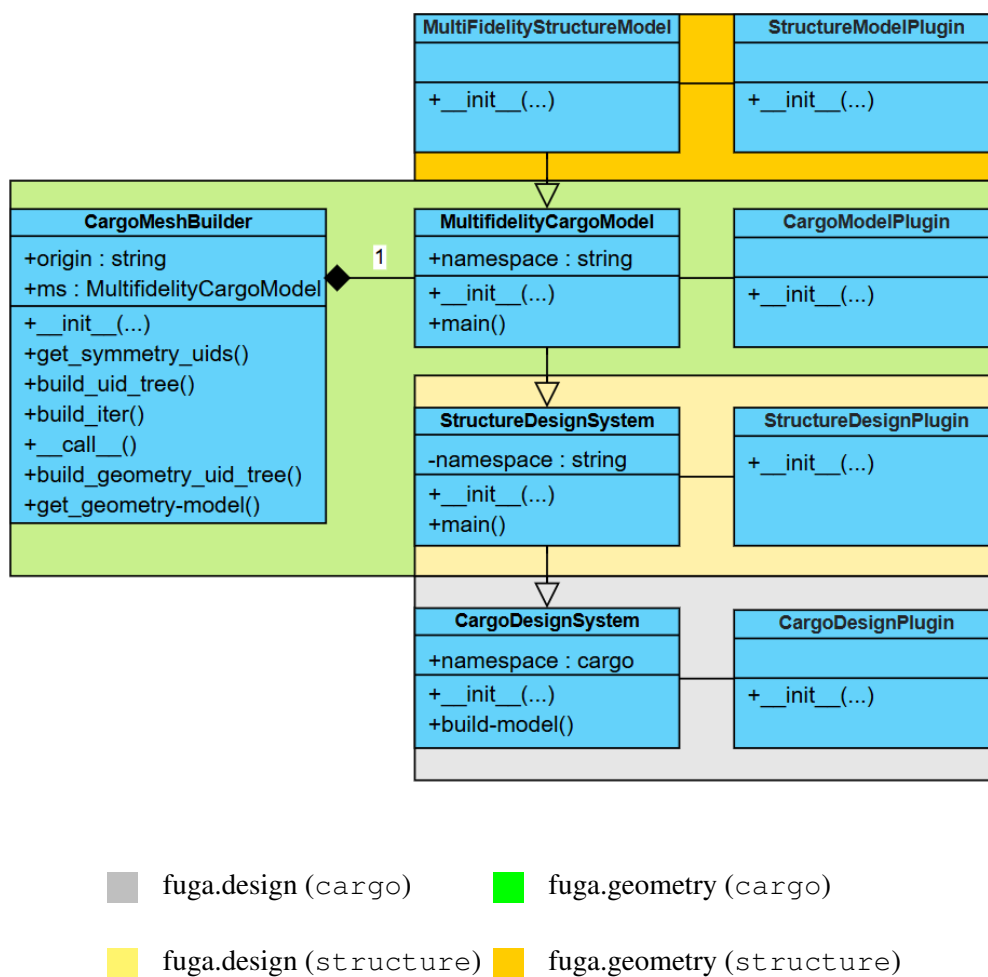


Abbildung 5.2.: Partielle Systemdarstellung des FUGA-Framework als UML-Klassendiagramm für die Entwurfs- oder Modellierungssysteme im Struktur- und Kabinenentwurf

seine Regeln mit den dazugehörigen URIs über Listen bereit. Ferner organisiert die Plugin-Architektur die jeweiligen Regelwerke der Subsysteme für das Wissensrepositorium. Wie in Abschnitt 3.5 bereits erläutert, wird so die Erweiterbarkeit und Flexibilität sichergestellt und es können für jedes Subsystem dedizierte MCGs generiert werden. Gemäß Abbildung 5.2 besteht die Systemstruktur für die Modellgenerierung der Frachtkabinen aus drei Klassen, diese sind das `MultifidelityCargoModel`, der `CargoMeshbuilder` und das `CargoModelPlugin`. Das `MultifidelityCargoModel` repräsentiert den MMG der Frachtkabinen. Mit dem `CargoMeshbuilder` und dessen Methoden, der genau eine Instanz des `MultifidelityCargoModel` verwaltet, werden basierend auf den Entwurfsregeln die Geometrien für die Frachtkabine erzeugt. Aufbauend auf dem neuen Entwurfs- und Modellierungssystem der Frachtkabinen können die zugehörigen Regelwerke entwickelt werden.

Im nächsten Schritt werden die beiden Regelwerke `cargo` für die Modellgenerierung und Entwurf gemäß den konzeptionellen Vorüberlegungen in Tabelle 5.1 erstellt. 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. Somit können diese Regeln in die neuen Regelwerke übernommen werden. Darüber hinaus werden die Methoden aus dem Passagierentwurf zum Parsen der XML-Daten aus dem Datenrepositorium für den Spenderdatensatz und die benutzerdefinierten Parameter übernommen. Die neuen Regelwerke können später um zusätzliche Regeln für weitere Kabinenelemente erweitert werden.

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. Abbildung 5.3 gibt einen Überblick über die drei obersten Ebenen der benutzerdefinierten Eingabeparameter. Die obere Deckdefinition wurde als `upperCargoDeck` definiert und unterscheidet sich somit von der Deckbezeichnung der Passagierkabine. In den Wissensregeln im Regelwerk `cargo` werden in den Paketumfängen Modellgenerierung und Entwurf zur Extraktion und Transformation der Daten auf Basis der neuen Deckbezeichnung Anpassungen vorgenommen. Zudem wurde die Regel `Floors` im Paketumfang Entwurf für das Regelwerk `structure` erweitert, um eine Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Deckbezeichnungen zu ermöglichen und Fehler beim Einlesen der Parameter auszuschließen.

Der Strukturentwurf erwartet Informationen zur Modellierung der Türen, die aus den produkts-

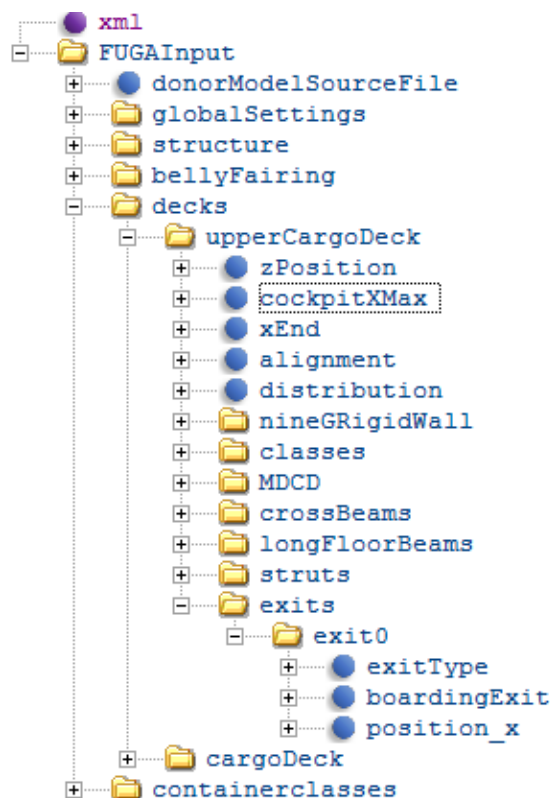


Abbildung 5.3.: Ausschnitt der benutzerdefinierten Parameter für die obere Deckdefinition

spezifischen Entwurfssystemen bereitgestellt werden. Da die Wissenslogik für den Entwurf der Türen aus dem Passagierentwurfssystem die Anzahl der Passagiere und eine optimale Verteilung der Ausgänge über die Flugzeuglängen und Sitzklassen verwendet, muss eine neue Wissenslogik zur Platzierung der Tür entwickelt werden. Diese muss unabhängig von bereits existierenden Sekundärelementen funktionieren. Die notwendigen Parameter für die Struktur und Platzierung der Tür werden über den Typ, den Ausgang und die X-Position bestimmt. Abbildung 5.3 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt der verwendeten Parameter für die Positionierung und Modellierung der Tür. Über das Datenrepositorium werden zusätzliche Informationen an die Entwurfsregel `ExitDimensionData` zur Parametrisierung der Tür und der Klassifizierung der Türtypen übergeben. Alle Daten werden anschließend in einem Dataframe, in der Regel `Exitlayout` über die `compute`-Methode als eindeutiger Eintrag an das Datenrepositorium übergeben. Entsprechend der Abbildung 5.4, erfolgt die Positionierung der Tür in X-Richtung durch den Parameter `position_x` basierend auf den Deckkoordinaten, sodass die Addition der Cockpitlänge und dem daraus resultierenden Ursprungs des Decks berücksichtigt werden

muss.

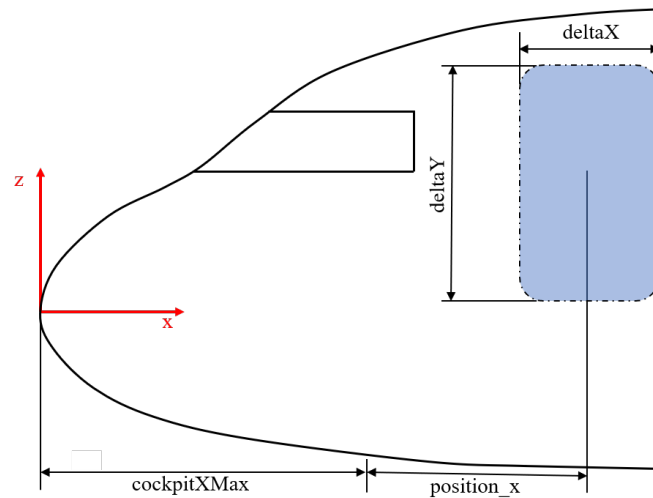


Abbildung 5.4.: Positionierung der Ausgänge (In Anlehnung an Walther (2024, S. 121))

Im Regelwerk `structure` des Paketumfangs Entwurf werden alle Daten für die in der Struktur definierten Rumpfausschnitte in der Entwurfsregel `element` für alle Ausschnittelemente gesammelt. Die Ausschnitte sind über Vektoren positioniert, mit eindeutigen UUIDs versehen und enthalten weitere geometrische Informationen zur Modellierung und Beschreibungen zur Einordnung der Ausschnitttypen. Dadurch ist eine gemeinsame Handhabung aller Geometrieoperationen für die Rumpfausschnitte möglich.

FUGA stellt über NetworkX eine Schnittstelle zum Export des MCG im Format GraphML zur Verfügung. Alle Wissensgraphen im methodischen Teil der Arbeit werden mithilfe von Diagrammeditoren entsprechend den jeweiligen Anwendungsfällen aufbereitet und visualisiert. In Abschnitt 3.5 sind die Graphen detailliert beschrieben, die Knoten im Graphen repräsentieren die Wissensregeln und die Kanten die Abhängigkeiten zwischen den Regeln. Der FPG für die Regel `element` mit den jeweiligen Vorfahren ist in Abbildung A.6 visualisiert. Demnach stellt FUGA für die geometrischen Operationen aller Nachfahren des Knotens `element` bereits eine umfassende Methodik zur Verfügung, die die Erstellung aller angeforderten Geometrieoperationen in die Kabinenstruktur integriert.

Wie in den konzeptionellen Vorüberlegungen erarbeitet, verlangt das Regelwerk für den Strukturentwurf zusätzliche Informationen zu den Fenstergeometrien. Daher muss der Regelentwurf

für die Flugzeugstruktur so angepasst werden, dass er leere Eingaben für Fenstergeometrien akzeptiert. Zu diesem Zweck werden die Regelsätze für die Fensterausschnitte im Regelwerk `structure` des Paketumfangs Entwurf in der Abfragelogik so erweitert, dass die Knoten aus den benutzerdefinierten Eingabeparametern für die Fensterausschnitte als leere Werte übergeben werden können.

Nach dem Entfernen der Fensterausschnitte sind die Türgeometrien fehlerhaft, da die Füllelemente fehlen. Die Entwurfsregel `DoorFillings` (siehe Abbildung A.6) erwartet in einer geometrischen Operation die Fensterausschnitte als Variable. Dies führte zu einer Rückgabe von None-Werten. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Entwurfsregel `DoorFillings` um eine IF-Abfrage zur Existenz der Fenster aus der Entwurfsregel `cutouts` erweitert. Dabei wird die Variable der Fensterausschnitte nur berücksichtigt, wenn sie nicht als None-Wert übergeben wird.

Anschließend wurde die fertig implementierte Systembasis für den Entwurf der Frachtkabinen getestet, da eine fehlerfreie Entwurfslogik die Grundlage für zusätzliche Systemerweiterungen ist. Abbildung 5.5 zeigt den auf CPACS-Daten basierenden Rumpf der D239. Dieser wurde mit der in diesem Abschnitt entwickelten Entwurfsmethodik basierend auf der neuen Deckstruktur für die benutzerdefinierten Daten sowie beispielhaften initialen Entwurfsparametern für die Struktur und die Sekundärelemente des unteren Frachtdecks ausgelegt.

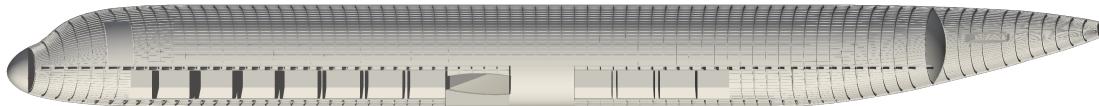


Abbildung 5.5.: Flugzeugrumpf der D239 ohne Sekundärstrukturen des oberen Decks aus dem initialen Testlauf des Frachtkabinenentwurfs

Das Ergebnis der in diesem Abschnitt beschriebenen Methode ist eine Systembasis für den Entwurf von Kabinen für Frachtflugzeuge. Mittels Reverse Engineering wurde das Entwurfs- und Modellierungssystem für die Frachtkabinen und deren Regelwerke in das vorhandene Framework von FUGA integriert. Dabei wurden alle Entwurfsdiskrepanzen bezüglich der Fenster- und Türgeometrien für die Strukturmodellierung der Passagier- und Frachtkabinen behoben. Das Ergebnis ist ein Entwurfs- und Modellierungssystem für Frachtflugzeuge. Es erzeugt auf Basis der

neuen Struktur der XML-Datei für die benutzerdefinierten Parameter die Geometriemodelle ohne Sekundärstrukturen des oberen Decks und ermöglicht sowohl die Strukturauslegung als auch die Auslegung des unteren Frachtdecks. Auf dieser Basis kann das neue Entwurfssystem mittels weiterer Entwurfsregeln um zusätzliche Frachtkabinenelemente für das obere Frachtdeck ergänzt werden.

5.3. Erweiterung der Entwurfsmethode für Frachtcontainer

Im Folgenden wird die Erweiterung der Entwurfsmethodik für die Frachtcontainer erläutert. Dies ermöglicht dann die Verteilung unterschiedlicher ULDs sowie neuer ULD-Typen auf den Decks der Frachtkabinen, was gleichzeitig die Voraussetzung für die späteren Untersuchungen ist. Zunächst wird die bestehende Methode zur Platzierung und Generierung der Container so modifiziert, dass unterschiedliche Containertypen auf einem Deck platziert werden können. Anschließend werden weitere Regeln entwickelt, um die Platzierung der ULDs auf dem oberen Deck zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen im Geometrieentwurf zusätzliche Wissensregeln für spätere Analysen der Flugzeugkonfigurationen eingebunden werden, die die Platzierung neuer Containertypen ermöglichen. In einem letzten Schritt werden die Eigenschaften der

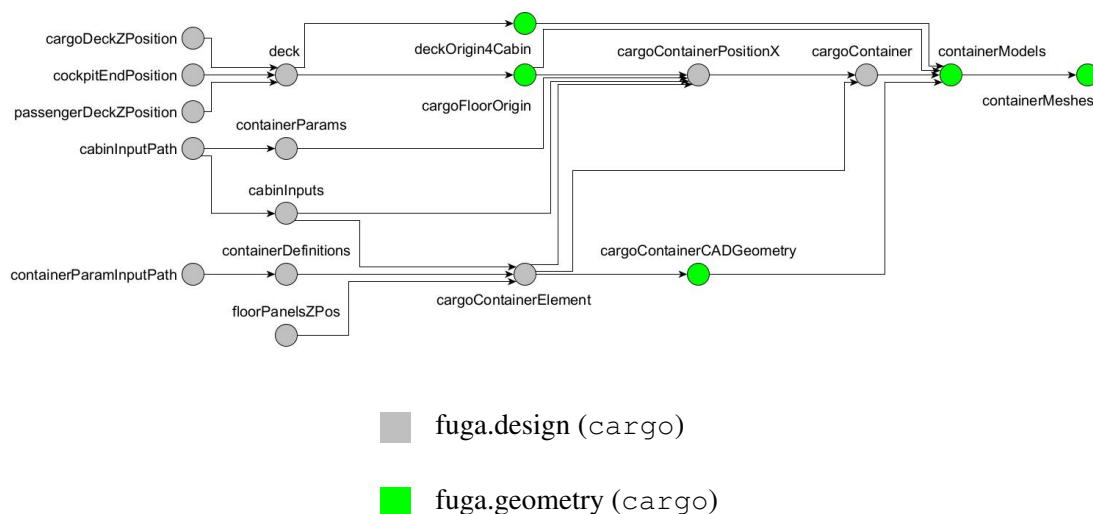


Abbildung 5.6.: FPG für den Entwurf der Containergeometrien

Containermodelle um eine Eigenschaft für die Beladungsdichte erweitert, was die Simulation unterschiedlicher Beladungsszenarien möglich macht. Abbildung 5.6 zeigt den im Diagrammeditor YED erstellten FPG für den Entwurf der Containergeometrien des unteren Frachtdecks

im aktuellen Stand des Frachtflugzeugentwurfssystems. Dies ermöglicht eine bessere Nachvollziehbarkeit der in diesem Abschnitt aufgeführten Methoden. Abschließend wird der Graph um alle neuen Entwurfsknoten ergänzt und die angepassten Regeln werden markiert.

Wissenserweiterung zur Platzierung der Container und unterschiedlicher Containertypen auf den oberen und unteren Frachtdecks

Um die Platzierung verschiedener Containertypen auf einem Deck zu ermöglichen, müssen zunächst die benutzerdefinierten Eingabeparameter um zusätzliche Knoten für verschiedene Containerklassen pro Deckdefinition erweitert werden. Abbildung 5.7 zeigt einen Ausschnitt des Knotens für das untere Frachtdeck mit den dort hinterlegten Containerklassen und deren Eigenschaften. Im Knoten `classes` der benutzerdefinierten Parameter werden der Typ und die

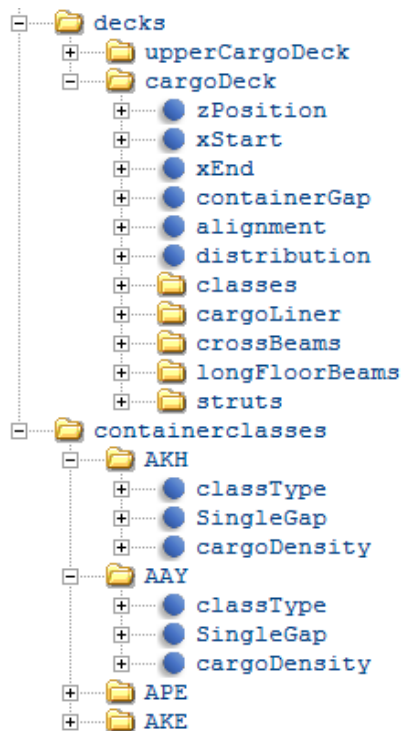


Abbildung 5.7.: Ausschnitt der benutzerdefinierten Parameter für das obere Frachtdeck und die Containerklassen

Anzahl der Container festgelegt, die für den Entwurf berücksichtigt und platziert werden. Dabei gibt die Reihenfolge der Containertypen in `classes` auch die spätere Reihenfolge für die Platzierung der Geometrien vor. In `containerclasses` werden zusätzlich alle relevanten

Eigenschaften definiert, darunter die Abstände zwischen den Containern in X- und Y-Richtung sowie die Beladungsdichte. Tabelle A.3 zeigt einen Ausschnitt der für diese Arbeit relevanten Container und ihrer Eigenschaften. Diese werden über das Datenrepositorium von der Regel `cargoContainerElement` für den weiteren Entwurf bereitgestellt.

Um die neuen Informationen über die Platzierung der verschiedenen Containertypen an die Regel `cargoContainerElement` zu übergeben, wurden drei zusätzliche Regeln erstellt. Mit `classes` und `classesUpperDeck` werden die Informationen über die Anzahl und die Typen der Container für die Platzierung auf den verschiedenen Decks übergeben. Die Regel `containerClasses` übergibt die notwendigen Eigenschaften der zu platzierenden Containerklassen. Anhand der in `cargoContainerElement` gesammelten Informationen und der Deckgrenzen aus der Regel `cabinInputs` kann in `cargoContainerPositionX` die X-Position der Container auf den verschiedenen Decks bestimmt werden.

Zur Berücksichtigung der Platzierung verschiedener Containertypen auf den unterschiedlichen Decks muss die Regel `cargoContainerPositionX` durch eine komplexere Berechnungslogik ersetzt werden. Die neue Logik berücksichtigt sowohl die Platzierung der Container auf dem oberen als auch auf dem unteren Deck. Das untere Deck erfordert aufgrund der Wingbox eine andere Entwurfslogik und die Platzierung der Container erfolgt in zwei getrennten Bereichen. Die X-Positionen der Container für beide Decks werden anschließend in separaten Spalten eines Dataframes an das Datenrepositorium übergeben.

Zudem musste die Entwurfsregel `cargoCompartment` modifiziert werden. Diese Regel erstellt auf Basis der äußeren Grenzen für das untere Frachtdeck alle Informationen zur Modellierung der Cargo-Liner. Abbildung 5.8 veranschaulicht einen Querschnitt des Flugzeugrumpfs der D239, die Cargo-Liner sind in Grün dargestellt. Cargo-Liner sind eine dünne, leichte Innenverkleidung des Frachtraums, meist aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Die Funktionen der Cargo-Liner sind Brandschutz, Schutz der Flugzeugstruktur vor Fracht und thermische Isolation. Cargo-Liner werden auf Basis der Containerabmessungen ausgelegt, sodass die Entwurfslogik nach der Modifikation der Regel bei der Platzierung mehrerer Containertypen die jeweils größte ULD-Geometrie auswählt. Im Knoten `cargoConatiner` werden die Container für das untere Deck in einem Dataframe mit den jeweiligen Daten zur Positionierung und einer UID gespeichert, hier musste die Extraktion der Daten aus der Entwurfsregel `cargoContainerPositionX` angepasst werden. Zusätzlich wurde eine Regel `cargoConatinerUpperDeck` erstellt, die analog zu `cargoConatiner` die

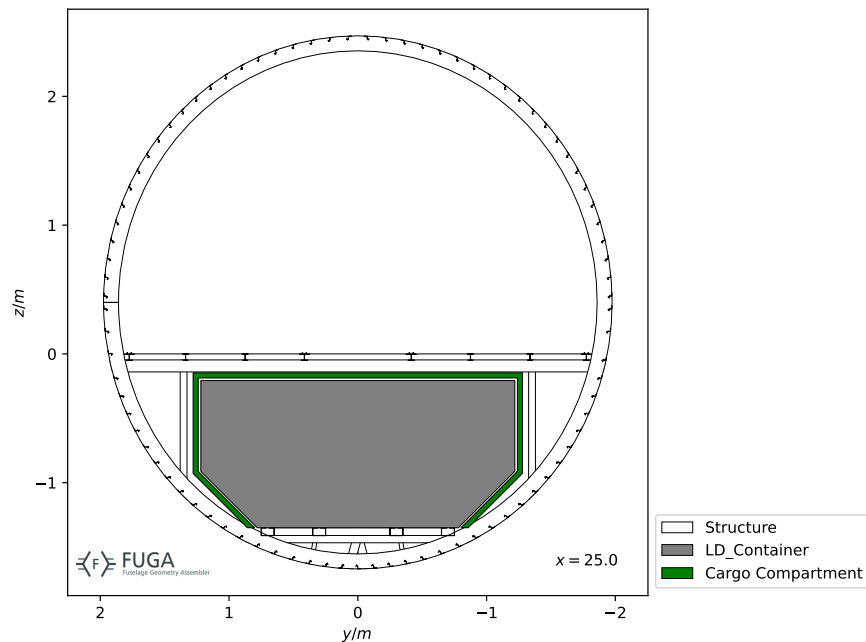


Abbildung 5.8.: Exemplarischer Rumpfquerschnitt der D239 mit primärer Struktur und sekundären Strukturelementen des unteren Frachtdecks

Informationen und UUIDs des oberen Decks speichert.

Basierend auf den Informationen aus `cargoContainerElement` werden in der Regel `cargoContainerCADGeometry` die CAD-Modelle der Container als Begrenzungsflächenmodelle erzeugt, hierzu musste lediglich die Datenselektion aus dem Dataframe des Knotens `cargoContainerElement` angepasst werden, sodass beim Auslesen der Informationen zwischen den Daten der verschiedenen Frachtdecks unterschieden wird. Im Knoten `containerModels` wird eine Translation der Container mit den entsprechenden X- und Y-Positionen der Container durchgeführt. Anschließend werden die CAD-Geometrien mit den Positionen und UUIDs in einem Dictionary gespeichert und über das Datenrepositorium an das `MultiFidelityCargoModel` übermittelt, wobei der Deckursprung bei der Generierung der Geometrien berücksichtigt werden muss. Aufbauend auf den Modelldaten in `containerModels` werden im Knoten `containerMeshes` die CAD-Modelle als Meshes gespeichert und anschließend ebenfalls an das `MultiFidelityCargoModel` übergeben. Die Diskretisierung der CAD-Modelle in Dreiecksnetze ermöglicht die spätere Visualisierung der Modelle in Paraview, bildet aber auch die Basis für weitere Anwendungs-

szenarien wie Simulationen oder Kompatibilitäten mit anderer Software, wie beispielsweise Blender. Für die Generierung der Containergeometrien auf dem oberen Deck wurden analog zum unteren Deck die Regeln `cargoContainerCADGeometryUpperDeck`, `containerModelsUpperDeck` und `containerMeshesUpperDeck` implementiert. Die neuen Geometriemodelle für das obere Deck müssen ebenfalls vom Datenrepositorium an die Klasse `MultiFidelityCargoModel` übergeben werden, um sie in der späteren Modellgenerierung mitzubetrachten.

Methodenerweiterung für neuen Containertypen

Wie oben beschrieben, basieren alle Geometriemodelle der ULDs auf den von `cargoContainerElement` generierten Begrenzungsflächenmodellen. In A.2 sind die Geometrien verschiedener Containertypen abgebildet, derzeit werden bis auf den Container mit der IATA-Bezeichnung AAY alle abgebildeten ULDs für den Geometrieentwurf berücksichtigt. Der AKE-Container ist ein halbhohes Frachtcontainer und wird standardmäßig im unteren Frachtdeck eingesetzt. Er ist für Schmalrumpfflugzeuge konzipiert, da diese einen schmalen Frachtraum haben. Der AAY-Container ist ein Universalcontainer, der vorrangig für Lang- und Großraumflüge eingesetzt wird, für mehr Platz und einem höheren Gewichtslimit. Für die später zu analysierenden Frachtflugzeugkonfigurationen D239 und D180 muss der Container vom Typ AAY im Geometrieentwurf mit berücksichtigt werden.

Dazu wird die Regel `cargoContainerCADGeometry` um eine zusätzliche Berechnungslogik für den Frachtcontainertyp AAY erweitert werden. Als Basisgeometrie werden die Container in ihren Grundmaßen als Begrenzungsrahmen erzeugt und durch die anforderungsspezifischen geometrischen Operationen bearbeitet. FUGA verfügt über eigene Hilfsbibliotheken, die sowohl Funktionen aus externen Python-Paketen als auch selbst entwickelte Algorithmen und Wissenssammlungen enthalten. Bisher wurden die Begrenzungsrahmen der Container an den Kanten mit der Funktion `make_chamfer` abgeschnitten, sodass die Kanten der Begrenzungsrahmen mit einer vorgegebenen Länge abgeschnitten werden können. Der Container AAY hat eine geometrisch komplexere Form, die eine andere Vorgehensweise erfordert. In Abbildung A.2 ist der AAY-ULD dargestellt, um die gewünschte geometrische Form zu erzeugen, muss die Ausgangsgeometrie, ein Begrenzungsrahmen, an mindestens vier Stellen geschnitten werden. Die Schnitoperation wird mithilfe einer Schnittebene durchgeführt. Die Normalenform einer Ebene (siehe Gleichung 5.1) beschreibt eine Ebene durch einen Stützvektor $\vec{r}_1$ und einen Normalenvektor $\vec{n}$.

$$e: \vec{n} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_1) = 0 \quad (5.1)$$

Der Normalenvektor kann durch das Kreuzprodukt zweier Vektoren bestimmt werden. Abbildung 5.9 veranschaulicht die Schnittebene, die mit dem Begrenzungsrahmen verschnitten wird. Der Stützvektor $\vec{r}_1$ wird direkt aus den Dimensionen der Container abgeleitet. Mittels zweier Stützvektoren wird der Richtungsvektor der Ebene gebildet. Das Kreuzprodukt des Richtungsvektors mit dem Einheitsvektor in X-Richtung ergibt den zugehörigen Normalenvektor $\vec{n}$. Zur Erzeugung der Schnittebene stellt die Hilfsbibliothek `occhelpers` die Funktion `from_point_and_vector()` zur Verfügung. Anschließend wird die Schnittoperation mit der Funktion `split_shapes()` aus derselben Hilfsbibliothek durchgeführt. Um die Schnitte auf beiden Seiten des Begrenzungsrahmens zu erzeugen, wird der gleiche Vorgang mit gespiegelten Richtungsvektoren wiederholt.

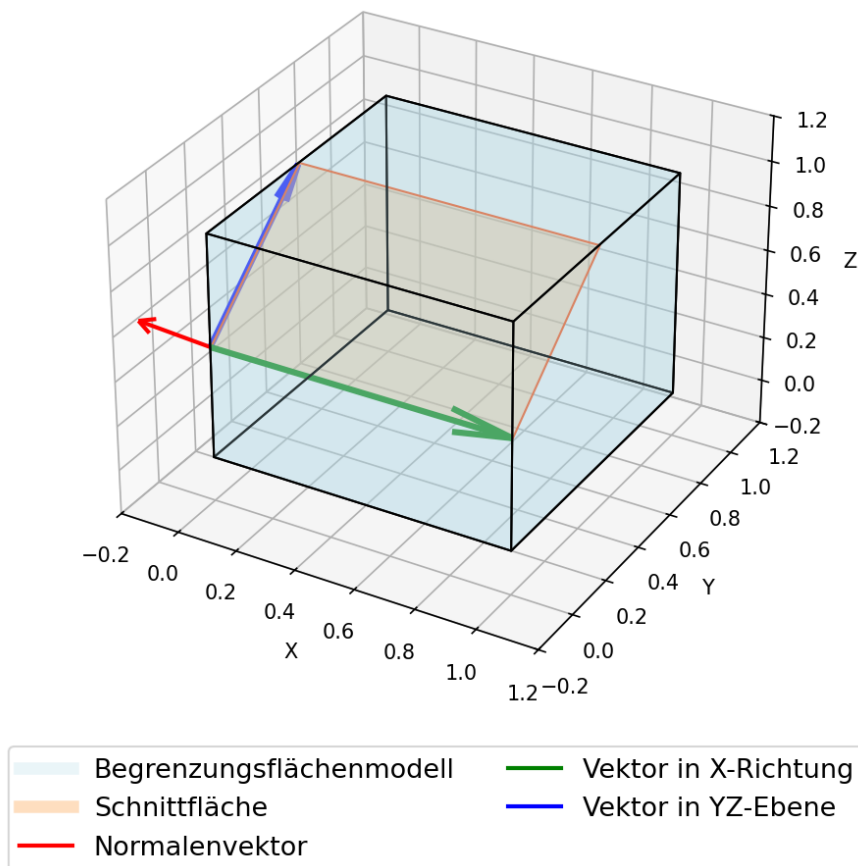


Abbildung 5.9.: Ebenenverschnitt des Begrenzungsrahmens für die Modellierung der ULDs

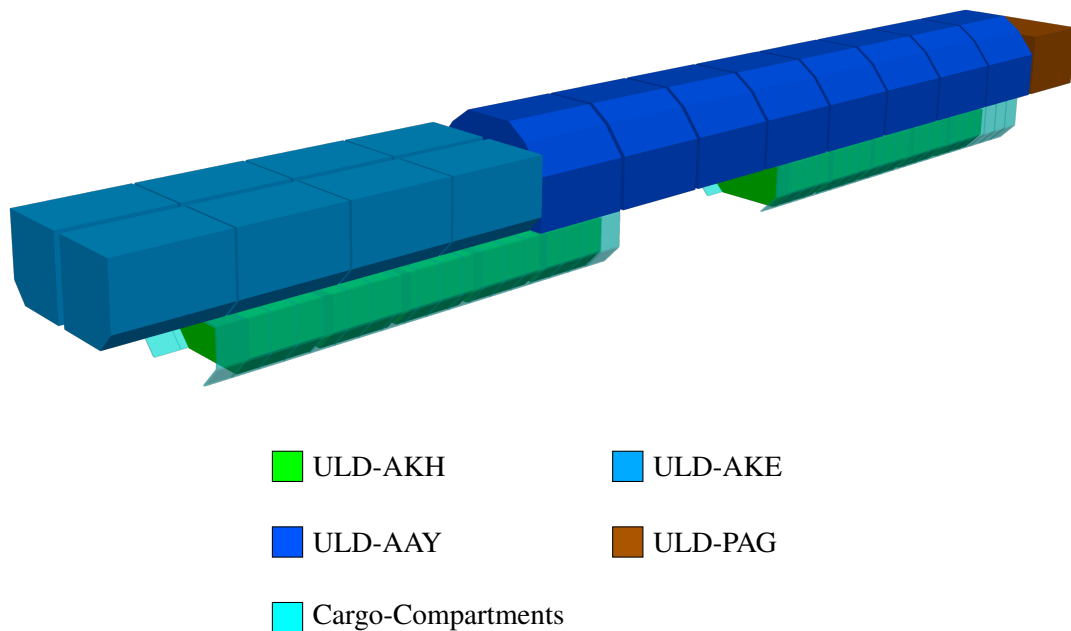


Abbildung 5.10.: Testmodellierung der Kabine für 4 unterschiedliche Containertypen inklusive der Cargoliner in Paraview

Erweiterung der Containereigenschaften um die Beladungsdichte

Um unterschiedliche Nutzlastfälle abbilden zu können, müssen die Container um eine zusätzliche Eigenschaft für die Dichte der Frachtladung ergänzt werden. Dafür wurde die Regel `cargoConatinerElement` um eine weitere Logik für die Eigenschaft einer Beladungsdichte für die verschiedenen Containertypen erweitert. Dafür wird das Volumen der Container in m^3 mit der Dichteigenschaft aus den Eingabeparametern (siehe Abbildung 5.7) in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ multipliziert und als Masse in kg in derselben Regel gespeichert. Eine zusätzliche Prüffunktion stellt sicher, dass bei Überschreiten der zulässigen Gesamtcontainermasse eine Warnmeldung ausgegeben wird.

Zur Sicherstellung der mathematischen und logischen Konsistenz der in diesen Abschnitt hinzugefügten Methoden wird ein Testlauf zur Erzeugung des Kabinen-Meshes durchgeführt. Dazu wurden für das obere Frachtdeck 8 ULDs AAY, 4 ULDs AKE und 1 ULD PAG und auf für das untere Frachtdeck 10 ULDs AKH platziert. Der Testlauf veranschaulicht in Abbildung 5.10 das Kabinenmesh in ParaView und bestätigt, dass alle zuvor entwickelten und erweiterten Methoden fehlerfrei ausgeführt werden und ihre Funktionalität korrekt abbilden. Die Sicher-

5.3. ERWEITERUNG DER ENTWURFSMETHODE FÜR FRACHTCONTAINER

stellung der logischen Konsistenz aller zuvor entwickelten Methoden dient der Vermeidung von Folgefehlern und ist eine wichtige Grundlage für die Implementierung zusätzlicher Regeln. Abbildung 5.11 veranschaulicht zusammenfassend den aktualisierten FPG für den Entwurf der Containergeometrien für das obere und untere Frachtdeck. Alle neu implementierten Knoten sind rot und alle modifizierten Knoten blau markiert.

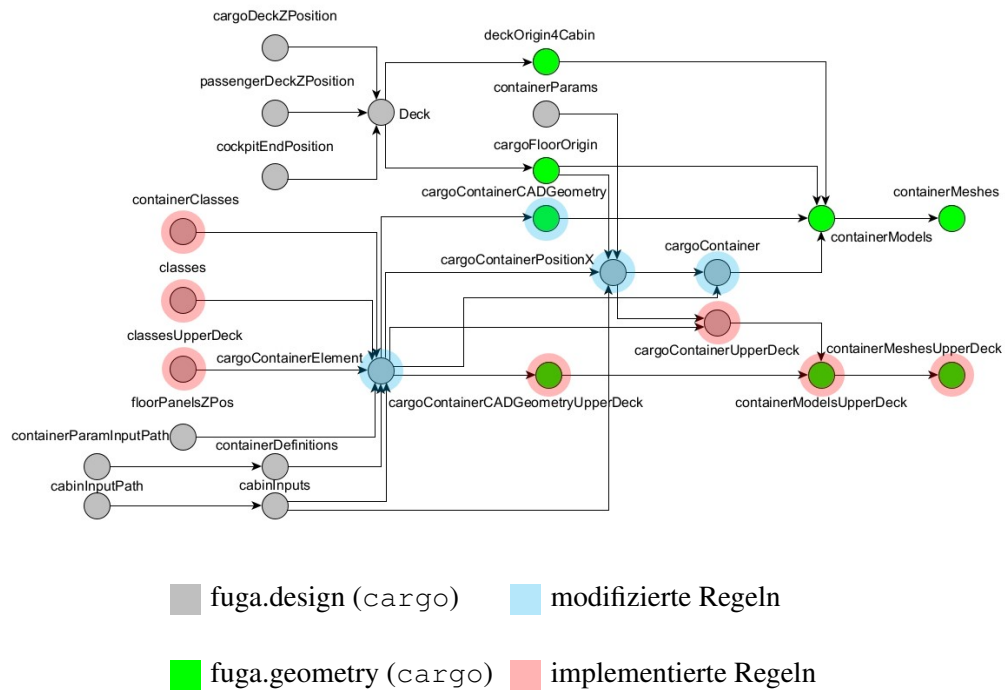


Abbildung 5.11.: Aktualisierter FPG für den Entwurf der Containergeometrien nach der Erweiterung und Implementierung aller Methoden für den Frachtcontainerentwurf

Die Ergebnisse der in diesem Abschnitt umgesetzten Methoden umfassen die Platzierung von Containern, neue Containertypen sowie Eigenschaften dieser Typen für das obere und untere Frachtdeck. Die neu hinzugefügten Regeln ermöglichen die Platzierung unterschiedlicher Containertypen auf einem Deck und die Platzierung von ULDs auf dem oberen Frachtdeck. Zusätzlich wurde die Wissenslogik so erweitert, dass der neue Containertyp AAY automatisch generiert und platziert wird, wenn er durch die Eingabeparameter im jeweiligen Deck definiert ist. Die Eigenschaften für die Containertypen wurde zudem um eine Beladungsdichte erweitert, die eine detailliertere Massendefinition für unterschiedliche Lastenverteilungen einzelner Containertypen ermöglicht. Damit wurden alle methodischen Ziele realisiert, die für die späteren Analysen

zur Beantwortung der Hypothesen notwendig sind. Alle in diesem Abschnitt vorgenommenen Anpassungen und Erweiterungen müssen später im Massenentwurfs- und Modellierungssystem mit integriert werden.

5.4. MDCD - Erweiterung und Anpassung der wissensbasierten Methoden

Gemäß der festgelegten Abgrenzungen aus dem methodischen Kapitel 5 beschäftigt sich dieser Abschnitt mit dem Entwurf und der Modellierung der Frachttür auf dem Hauptdeck. Dabei wird die Vorgehensweise zur Implementierung neuer sowie zur Modifikation bestehender Regeln beschrieben. Das Ziel besteht in der automatisierten Generierung der MDCD auf Basis benutzerdefinierter Eingaben.

Die geometrischen Eigenschaften für die Generierung und Platzierung der MDCD für das obere Frachtdeck werden über die benutzerdefinierten Eingabeparameter definiert. Tabelle 5.2 listet die Parameter für die MDCD auf. Diese werden zunächst während des Entwurfsprozesses im Datenrepositorium gespeichert und anschließend über die Regel mit dem Kurzlabel `cabinInputs` bereitgestellt. Die Positionierung der Tür in X-Richtung beginnt an der Nase des Flugzeugs. Abbildung 5.12 veranschaulicht die Ausschnitt-Definitionen für die Frachttür, die in blau markierten Volumenkörper werden mit Hilfe boolescher Geometrieoperationen von der Rumpfschale subtrahiert. In Abschnitt 5.2 wurde bereits erklärt, dass FUGA für die Geometrien im Strukturentwurf der Ausschnitte eine umfassende Methodik bereitstellt. Abbildung A.5 veranschaulicht den FPG der MDCD mit einem Nachfahren. Gemäß dieser Abbildung werden die folgenden Methoden für die Modifikationen und Implementierungen der Regeln beschrieben. Zunächst wurde das Regelwerk für den Frachtkabinenentwurf um die beiden Regeln `mainDeckCargoDoorDefinitions` und `mainDeckCargoDoorCutouts`

Tabelle 5.2.: Initiale Parameter für den Entwurf der MDCD

Parameter	Wert
MDCDWidth [m]	3.6
MDCDHeight [m]	2.16
MDCDDoorFilet [m]	0.01
MDCDDoorXPos [m]	9

5.4. MDCD - ERWEITERUNG UND ANPASSUNG DER WISSENSBASIERTEN METHODEN

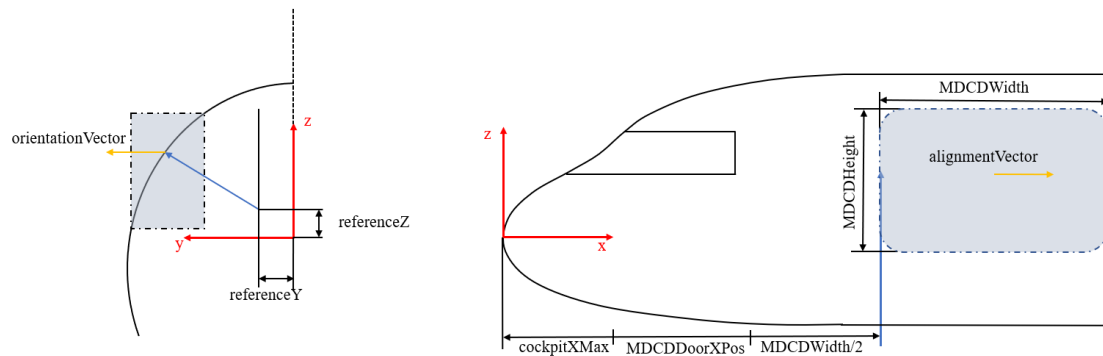


Abbildung 5.12.: Ausschnitt-Definition der MDCD (In Anlehnung an Walther (2024, S. 121))

erweitert. Die Regel `mainDeckCargoDoorDefinitions` stellt alle notwendigen parametrischen Informationen zur Modellierung und Positionierung der Tür bereit, indem sie unterschiedliche Knoten abfragt. Die benutzerdefinierten parametrischen Eingaben werden über die Regel `cabinInputs` geparkt (siehe Tabelle 5.2). Anschließend werden die Regeln `frame` und `frameExtrusion` aufgerufen. Basierend auf der in den benutzerdefinierten Eingaben festgelegten X-Position der Tür wird der nächstgelegene Frame mit Hilfe der Entwurfsergebnisse aus `frame` bestimmt, dessen X-Position berechnet und um die Breite des Spants und der halben Tür aufaddiert. Türausschnitte werden nicht willkürlich in die Rumpfstruktur eingefügt, die Platzierung der MDCD erfolgt daher nach der Platzierung der Frames an der nächstliegenden vorher definierten Frame-Position. In der Regel werden Ausschnitte so gesetzt, dass bereits verstärkte Strukturen genutzt werden, um Materialeinsparungen zu ermöglichen und die strukturelle Integrität des Rumpfes sicherzustellen. Außerdem haben Türen im Flugzeugrumpf Main-Frames um die Strukturschwächung durch die Tür auszugleichen. Diese können als strukturverstärkte Rahmen um die Tür verstanden werden, wie verstärkte Spanten und Stringer und zusätzliche Haltestrukturen für Mechaniken. Anschließend werden die Daten aus der Regel `mainDeckCargoDoorDefinitions` als eindeutiger Eintrag mit allen Informationen in einem Dataframe an das Datenrepositorium übergeben. In der Regel `mainDeckCargoDoorCutouts` werden alle zuvor gespeicherten Informationen aus `mainDeckCargoDoorDefinitions` angefragt und in einem abschließenden Dataframe zusammengeführt. Dieser enthält die für die oben beschriebene Boolesche Operation erforderlichen Daten, einschließlich Referenzwerte, Vektoren, geometrische Informationen und zugehörige Beschreibungen. Bei der Implementierung der neuen Regeln wurde darauf geachtet, dass bei fehlendem Knoten `mdcd` in den benutzerdefinierten Eingabeparametern lediglich ein

5.4. MDCD - ERWEITERUNG UND ANPASSUNG DER WISSENSBASIERTEN METHODEN

leerer Dataframe an das Datenrepositorium übermittelt wird, dadurch werden Fehler in der Berechnungslogik für fehlende Informationen vermieden.

In einem letzten Schritt müssen alle Informationen aus `mainDeckCargoDoorCutouts` an den Strukturentwurf übergeben werden. Zu diesem Zweck wird in der Regel `elements` die zusätzliche Regel `mdcdCutouts` aus dem Repositorium des Frachtentwurfssystems angefordert. An dieser Stelle des Strukturentwurfs ist es entscheidend, dass der angeforderte Knoten `mdcdCutouts` aus dem Frachtentwurfssystem als optionale Anfrage an das Datenrepositorium gesendet wird. Dies ist wichtig, da der Knoten im Passagierentwurfssystem nicht existiert und daher als leerer Wert behandelt werden muss. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Entscheidungslogik der zu berechneten Ausschnitte, indem die Methode `assemble_cutouts` im Knoten `elements` die Frachttüren nur berücksichtigt, wenn die Daten in `mdcd_df` aus dem Repositorium nicht `None` sind. Damit wird sichergestellt, dass die Verarbeitung der `cutouts` je nach Verfügbarkeit der `mdcd_df`-Daten variiert. Wenn `mdcd_df` nicht definiert ist, entscheidet das System automatisch und die Verarbeitung der Ausschnitte erfolgt ohne

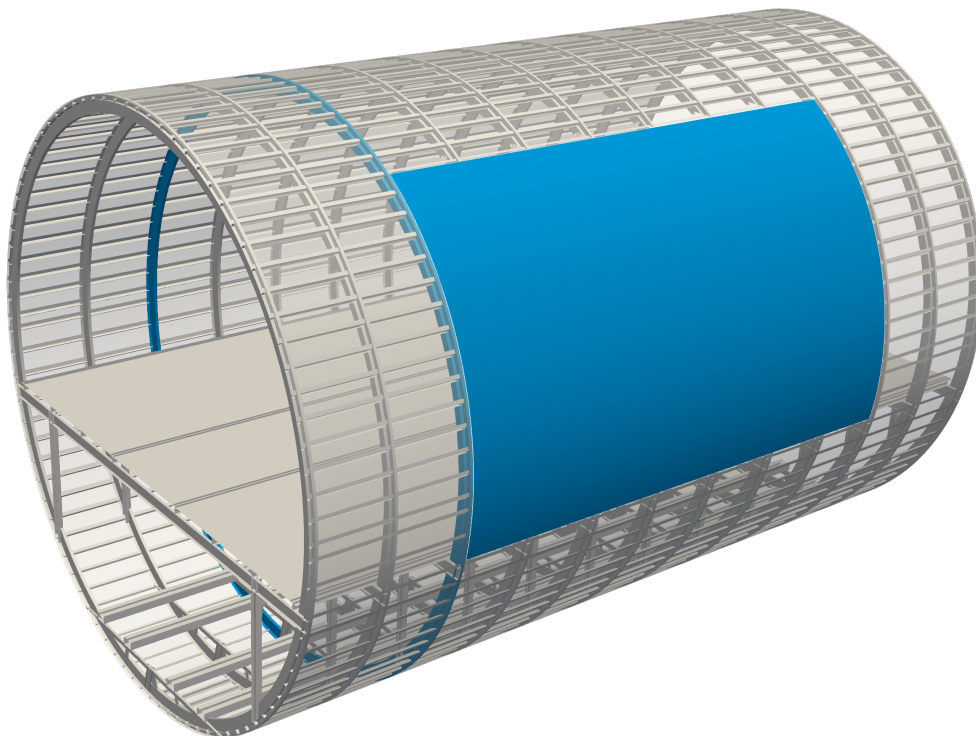


Abbildung 5.13.: Illustration MDCD

Berücksichtigung der Frachttüren (`mdcd_cargo=False`). Wenn `mdcd_df` vorhanden ist, wird `md_cargo=True` gesetzt, sodass die entsprechenden Frachttürausschnitte in die Verarbeitung einbezogen werden. Abbildung 5.13 illustriert einen Ausschnitt des Kabinenmeshes in ParaView, einschließlich der Primärstruktur und der neu integrierten MDCD.

In diesem Abschnitt wurden alle notwendigen Regeln zur Modellierung der MDCD implementiert und angepasst, was einen automatisierten Entwurf der Frachttür basierend auf den benutzerdefinierten Eingabeparametern ermöglicht. Bei der Implementierung wurde darauf geachtet, dass der Kabinenentwurf für Passagier- und Frachtflugzeuge an seiner Schnittstelle zum Strukturentwurf für die Ausschnitte der MDCD mit leeren Einträgen aus dem Datenrepositorium umgehen kann. Die Berechnungslogik funktioniert fehlerfrei, sodass auf dieser Basis weitere Regeln hinzugefügt werden können.

5.5. Wissensintegration zur Modellierung der 9g-Barriere

Im Folgenden wird die Entwicklung von Wissensregeln beschrieben, die die automatisierte Platzierung und Massenbestimmung der 9g-Barriere für den Entwurf der Frachtkabine berücksichtigen. Aufgrund des Mangels an Informationen über die Konstruktion und Platzierung dieses Elements werden vereinfachte Annahmen getroffen. Der Hauptfokus der Methode liegt auf die Positionierung der Wand sowie der Definition ihrer Masse. In Berlowitz (2018) wird beschrieben, dass die 9g-Barriere als Netz oder als feste Wand in die Kabine integriert werden kann. Zur Vereinfachung der Methode wird die Wand als Festkörper modelliert. Die 9g-Barriere wird so platziert, dass die vorhandene Struktur der Kabine genutzt wird, um die auftretenden Kräfte möglichst gleichmäßig auf die Spanten und Querträger zu verteilen.

Für die Modellierung und Platzierung wird ein minimaler Satz von benutzerdefinierten Ein-

Tabelle 5.3.: Initiale Entwurfsparameter für die 9g-Barriere

Parameter	Wert
<code>positionXOnFrame [Anz.]</code>	7
<code>positionZ [m]</code>	-0.088
<code>thickness [m]</code>	0.07
<code>material</code>	Aluminium 2024
<code>cutoutsOffsetY [m]</code>	0.001

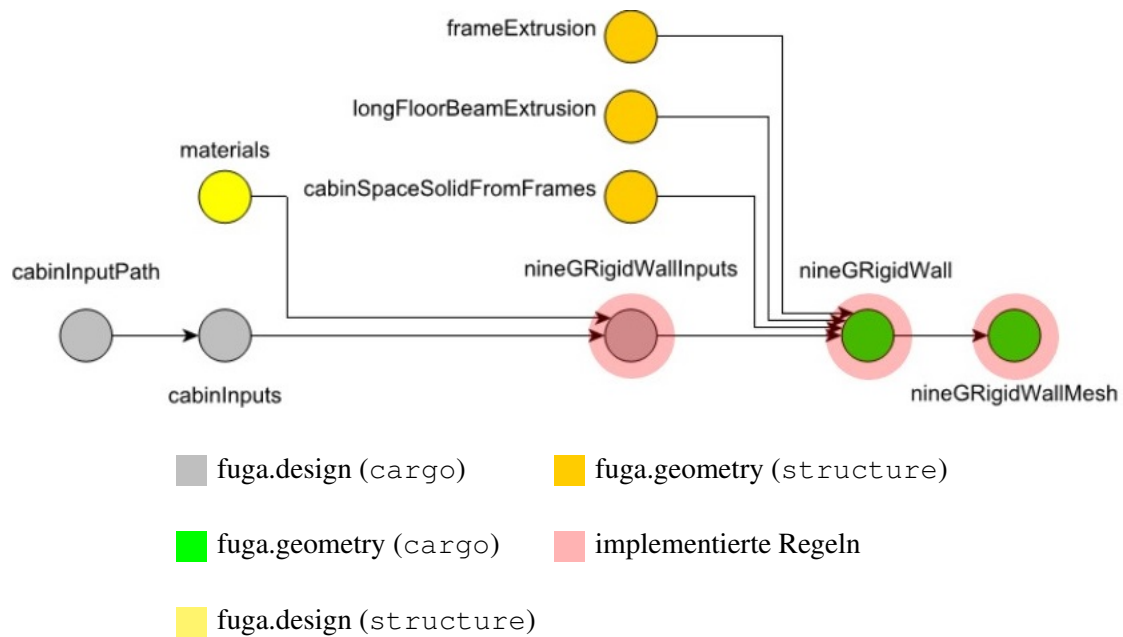


Abbildung 5.14.: Dedizierter FPG der 9g-Barriere

gabeparametern festgelegt. Ein beispielhafter Datensatz ist in Tabelle 5.3 aufgeführt. Abbildung 5.14 zeigt zur besseren Nachvollziehbarkeit der Modellierungsmethode den dedizierten FPG für das `nineGRigidWallMesh` und alle neu implementierten Regeln zur Positionierung und Modellierung der Wand. Die benutzerdefinierten Eingabeparameter werden über die Regel `nineGRigidWallInputs` bereitgestellt. Zusätzlich wird die Dichteigenschaft ρ des ausgewählten Materials, basierend auf der zuvor definierten UID für das Material aus der Regel `material`, an die Regel `nineGRigidWallInputs` übergeben. Alle Informationen werden dann in einem Pandas DataFrame gespeichert. Die Materialien und ihre Eigenschaften werden über den Spenderdatensatz im Datenrepositorium bereitgestellt. Die Dichteigenschaft des Materials wird für spätere Berechnungen zur Massenauslegung benötigt.

Die automatisierte Positionierung in X-Richtung erfolgt an dem vorher festgelegten Spant über `positionXOnFrame`. Die Informationen zu den Positionen der Spanten werden aus dem Knoten `frameExtrusion` extrahiert. Über den Eingabeparameter `thickness` wird die Dicke der Wand festgelegt. Alle geometrischen Operationen zur Positionierung und Modellierung der Wand werden in der Regel `nineGRigidWall` im Regelwerk `cargo fuga.geometry` durchgeführt. Als Grundkörper wird ein quadratischer Begrenzungsrahmen mit der jeweiligen Dicke erstellt und am vorher definierten Spant positioniert. Der Grundkörper wird anschließend

mit einer einfachen Schnittebene auf Höhe des Decks abgetrennt. Über den Eingabeparameter `positionZ` kann ein zusätzlicher Überhang der Wand festgelegt werden, sodass die Wand zur Kraftübertragung am Querbalken anliegt. Abbildung 5.15 veranschaulicht die modellierte Wand. Zuletzt müssen noch die Ausschnitte mit den Longitudinalträgern modelliert werden.

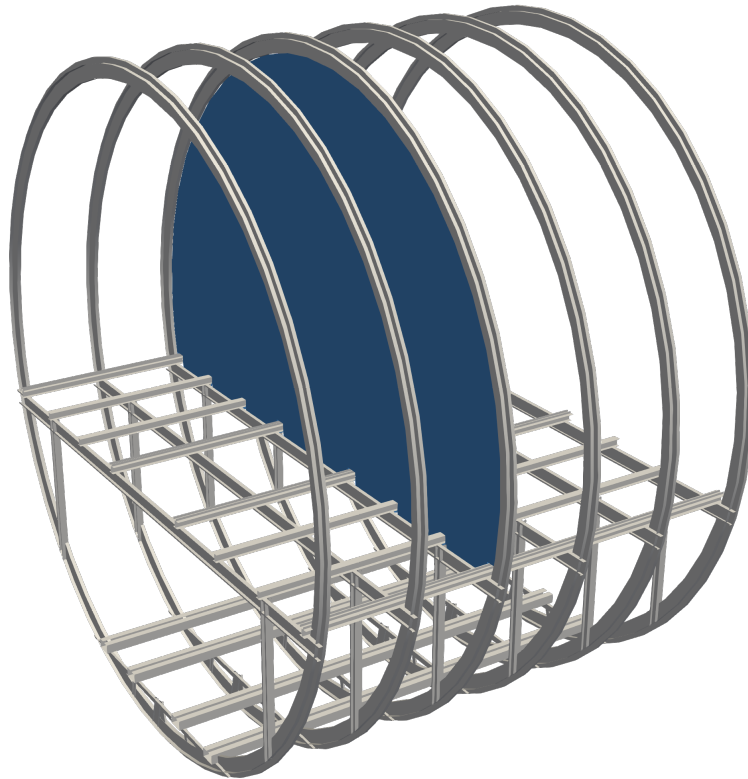


Abbildung 5.15.: Illustration der 9g-Barriere

Die Ausschnitte der Wand mit den Longitudinalträgern werden durch eine Boolesche Differenzoperation erzeugt, wobei die Volumenkörper der Längsträger durch die Regel `longFloorBeamExtrusion` bereitgestellt werden. Mit dem Parameter `cutoutsOffsetY` kann ein Versatz in Y-Richtung definiert werden, um eine Toleranz zwischen den Bauteilen zu berücksichtigen. Zusätzlich wird über die Regel `cabinSpaceSolidFromFrames` ein Volumenkörper erzeugt (siehe Abbildung A.1), der den Bauraum der Kabine basierend auf den Spanten definiert. Dieser Volumenkörper wird über eine weitere Boolesche Operation mittels Vereinigung mit der 9g-Barriere verbunden,

5.6. MODIFIZIERUNG UND ERWEITERUNG VON WISSEN FÜR MASSANALYSEN DER SCHNITTDARSTELLUNGEN

um die Geometrie der Wand mit dem Kabinenbauraum abzugrenzen. Nach Abschluss dieser Schritte wird das fertige CAD-Modell in einem Dictionary an das Datenrepository übergeben und in der Regel `nineGRigidWallMesh` in ein VTK-Format konvertiert, um es für weitere Berechnungen und Visualisierungen verwenden zu können.

In diesem Abschnitt wurde das methodische Vorgehen zur Modellierung der 9g-Barriere erläutert. Diese Implementierung bietet zusätzliche Detailtiefe für die spätere Bauraumbetrachtung und Massenauslegung der Frachtkabinenmodellierung.

5.6. Modifizierung und Erweiterung von Wissen für Maßanalysen der Schnittdarstellungen

Im Folgenden wird die Erweiterung der Wissensabis für die Schnittdarstellung und Kabinenlayouts der Frachtkabinen beschrieben (englisch: Layout of Passenger Accommodations, LOPA). Dafür wird das Regelwerk `plot_2d` um zusätzliche Methoden ergänzt, um die erzeugten Frachtkonfigurationen für beide Frachtdecks abbilden zu können. Zusätzlich werden neue Methoden hinzugefügt, die die MDCD und die 9g-Barriere im Kabinenlayout berücksichtigen. Die Kabinenlayouts für die Frachtkabinen unterstützten bei den Bewertungen der generierten Konfigurationen und ermöglichen eine schnelle Visualisierung der generierten Frachtkabinen auch ohne Erstellung der 3D-Modelle.

Alle Darstellungen der Kabine in `plot_2d` werden mithilfe der Python-Bibliothek Matplotlib erstellt. Die `PatchCollections` von Matplotlib ermöglichen das Zeichnen und Gruppieren geometrischer Formen wie Rechtecke, Polygone oder komplexere Geometrien. Das Regelwerk `plot_2d` besteht aus mehreren Klassen, die unterschiedliche funktionale Aspekte haben. Für die methodische Umsetzung sind die Klassen `MPLCargoPlotter`, `MPLCabinPlotter` und `MPLCabinSectionPlotter` relevant. Da die Methodiken für die Schnittdarstellungen in einem zentralen Regelwerk gebündelt und modular aufgebaut sind und die Darstellungen der Layouts für Frachtflugzeuge weniger komplex sind als für Passagierflugzeuge, werden alle Erweiterungen für die Layouts und Schnitte von Frachtflugzeugkabinen in das bestehende Regelwerk `plot_2d` integriert. Des Weiteren verwenden beide Entwurfssysteme den Strukturentwurf und haben die gleichen Methoden zur Erstellung der Schnittdarstellungen für das untere Frachtdeck. Die vorhandenen wissensbasierten Methoden können daher für die Layouts der Frachtkabine verwendet und neue in die modulare Struktur eingebunden werden.

5.6. MODIFIZIERUNG UND ERWEITERUNG VON WISSEN FÜR MASSANALYSEN DER SCHNITTDARSTELLUNGEN

Zunächst wurde die Klasse `MPLCabinSectionPlotter` um das Argument `MD_Cargo` erweitert, um die Querschnittsdarstellung für verschiedene Entwurfssysteme zu steuern. Für die Darstellung der Querschnitte der ULDs vom Typ AAY wird eine zusätzliche Funktion `get_container_poly_aay` entwickelt, die die Berechnung der Polygonpunkte auf Basis der Containergeometrie ermöglicht. In einem weiteren Schritt wird die Methode `get_container_patch` so angepasst, dass sie den neuen Containertyp AAY modelliert und Container mit spezifischen Kontureigenschaften korrekt platziert und gespiegelt werden. Eine zusätzliche Funktion zur Bestimmung der X-Position ermöglicht die Schnittdarstellung des entsprechenden Containerelements an der jeweiligen Schnittebene.

Darüber hinaus wird die Klasse `MPLCargoPlotter` um zusätzliche Methoden erweitert, damit gespiegelte oder doppelt zu platzierende Container wie z.B. ULD-AKE (siehe Abbildung A.2) dargestellt werden können. Die bereits existierende Methode

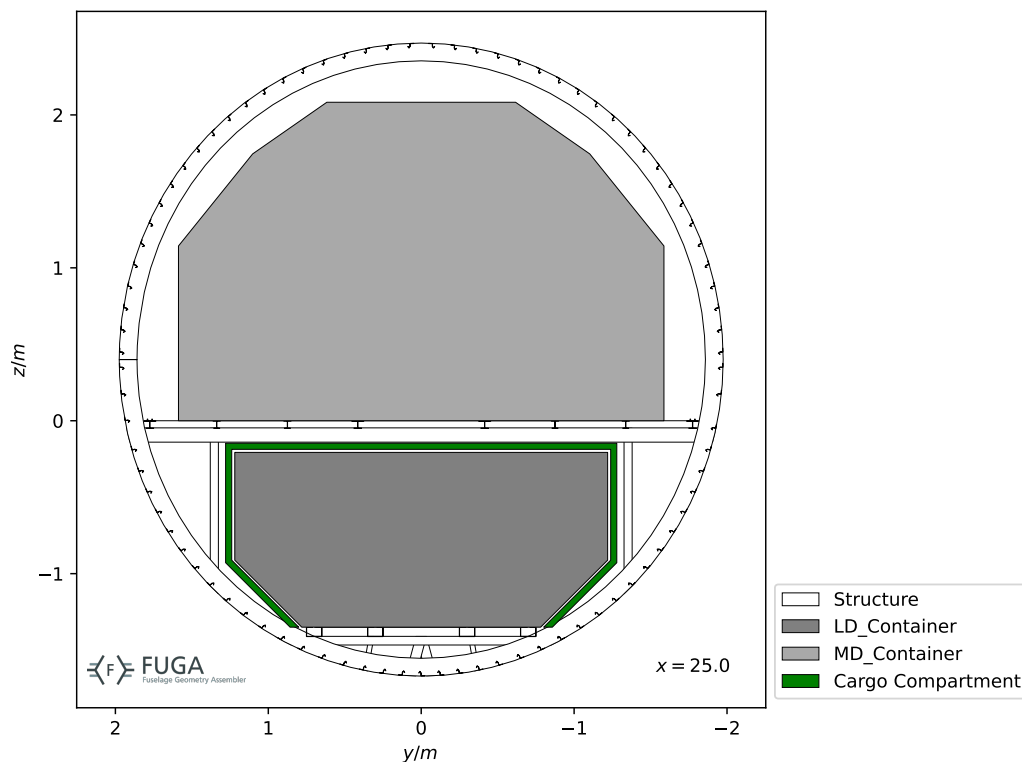


Abbildung 5.16.: Exemplarischer Kabinenquerschnitt der D239

5.6. MODIFIZIERUNG UND ERWEITERUNG VON WISSEN FÜR MASSANALYSEN DER SCHNITTDARSTELLUNGEN

`get_container_patches` erzeugt dazu einen gemeinsamen Dataframe auf Basis der Regeln `cargoContainer` und aus `cargoContainerElement` (siehe Abbildung 5.11). Abschließend werden mithilfe der Methode `get_container` und der Klasse `CPACSMPLPlotterMeta` die Containerpolygone aus den zusammengeführten Daten erzeugt. Dazu wird die Methode `get_container` um einige Logikregeln erweitert, wodurch eine Platzierung der gespiegelten Container durch Abfrage der Kontureigenschaften umgesetzt werden kann. Abschließend wird die Schnittdarstellung getestet, Abbildung 5.16 zeigt dazu einen beispielhaften Querschnitt der D239 mit einem ULD des Typs AAY auf dem Hauptdeck und einem ULD des Typs AKH im Frachtraum des Rumpfes.

Die letzte angepasste Klasse des Regelwerks `plot_2d` ist der `MPLCabinPlotter`. Diese wurde um eine Methode `build_cargo_md` erweitert, hier werden alle Funktionen gesammelt, die später für die Zeichnungen des oberen Frachtdecks erforderlich sind. Für die Türen und Strukturelemente werden die vorhandenen Methoden verwendet. Um die Schnittelemente für die 9g-Barriere und die MDCD zu zeichnen, werden zwei neue Methoden `get_9g_rigid_wall` und `get_mdcd` erstellt.

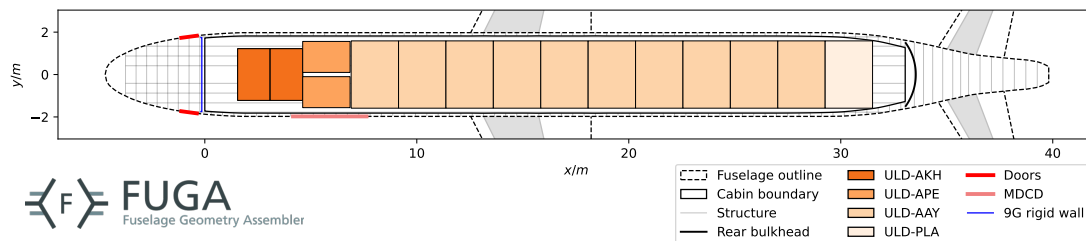


Abbildung 5.17.: Exemplarisches Kabinenlayout des Hauptdecks der D239 Frachtkabine

Ein Testdurchlauf zeigt in Abbildung 5.17 ein exemplarisches Kabinenlayout der D239 mit der dazugehörigen Legende und den jeweiligen primären und sekundären Kabinenelementen.

Die in diesem Abschnitt erarbeiteten Methoden umfassen alle erforderlichen Erweiterungen und Anpassungen, um die Schnittdarstellungen und Kabinenlayouts für spezifische Flugzeugkonfigurationen aus den Ergebnissen des Frachtkabinenentwurfs zu erstellen. Zu diesem Zweck wurde das Regelwerk `plot_2d` um zusätzliche Methoden ergänzt. Somit können alle primären und sekundären Elemente des Frachtkabinenlayouts und deren Schnittdarstellungen, einschließlich der neu implementierten Elemente, als Zeichnung erzeugt werden. Auf Basis der Entwurfsergebnisse können die Kabinenlayouts und Schnittdarstellungen für verschiedene Konfigurationen

automatisiert erzeugt werden. Sie ermöglichen Bauraumanalysen und technische Dokumentationen sowie den Vergleich von unterschiedlicher Flugzeugkonfigurationen.

5.7. Entwicklung von Massenentwurfssystem und Multifidelity-Massenmodell

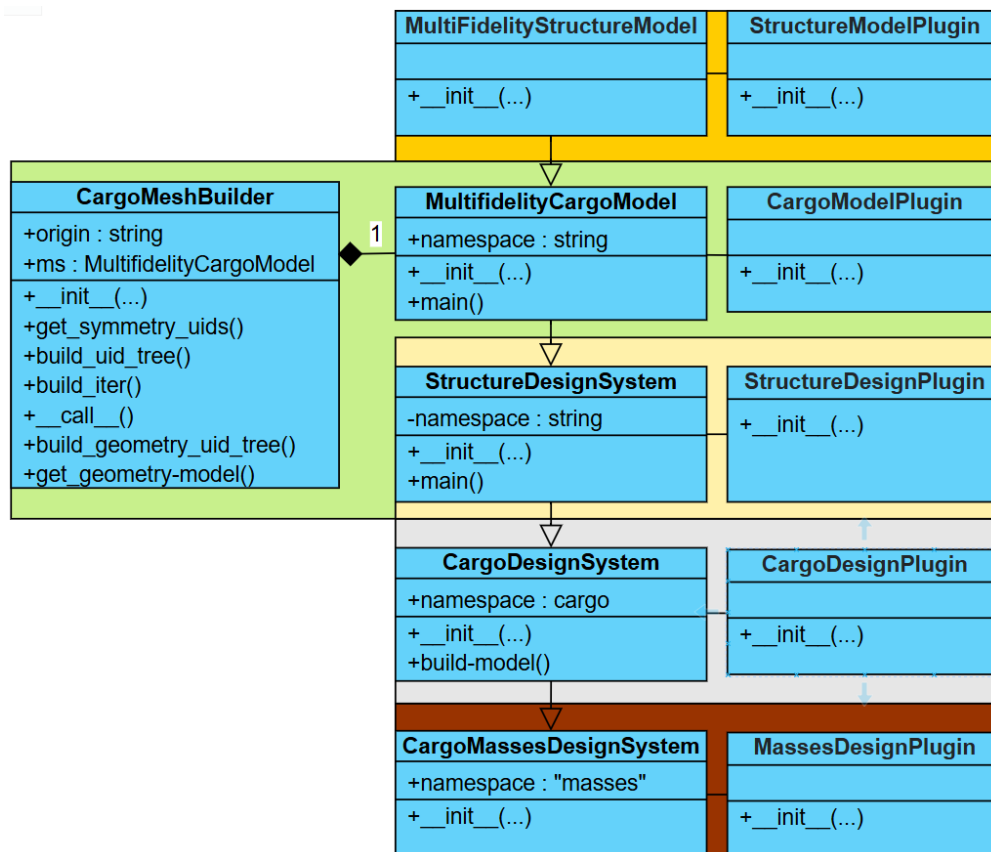
Die nachfolgenden Inhalte beschreiben die Entwicklung des Massenentwurfssystems und des Multifidelity-Massenmodells sowie deren Regelwerke. Das Ziel besteht darin, die Entwurfsergebnisse aus den bisher erarbeiteten Methoden des Frachtflugzeugentwurfssystems in detaillierte Masseninformationen zu überführen und die Möglichkeit zur Visualisierung der generierten Massen relativ zu ihrem Gewicht zu schaffen. Die berechneten Massen, ihre Modelle und deren Rückführung in den Vorentwurf bilden die Grundlage für die multidisziplinäre Analyse, die in Kapitel 6 entwickelt wird.

In Abschnitt 5.1 wird in Tabelle 3.1 die zuvor erarbeitete konzeptionelle Entwurfsstruktur des Frachtkabinenentwurfs dargestellt. Zur Vollständigkeit dieser Entwurfsstruktur fehlen demnach noch das Multifidelity-Massenmodell im Paketumfang Geometrie und das Massenentwurfssystem im Paketumfang Entwurf sowie deren Regelwerke. Die Herangehensweise bei der Entwicklung der Entwurfssysteme und der Regelwerke kann analog zum Frachtkabinenentwurf basierend auf dem Prozess des Reverse Engineering umgesetzt werden. Dabei wird sich an der Architektur der Massenentwurfsmethodik der Passagierkabinen orientiert. Auch hier stellte die Wissensbasis in FUGA bereits umfassende Methoden zur Berechnung und Positionierung der Massen bereit, die für den Massenentwurf der Frachtkabinen übernommen werden können. Abbildung 5.18 veranschaulicht das aus Abbildung 5.2 erarbeitete UML-Klassendiagramm der Entwurfssysteme für den Frachtkabinenentwurf, das um das Entwurfssystem für die Massen erweitert wurde. Das `CargoMassesDesignSystem` erbt vom `CargoDesignSystem` und bildet so die Schnittstelle zu den Entwurfsergebnissen. Über die Pluginarchitektur des `MassesDesignPlugin` werden die angefragten Knoten des Graphen und externe Informationen zu spezifischen Massenkomponenten organisiert.

Für das neue Regelwerk `cargo_masses` im Paketumfang Entwurf können alle Regeln aus dem Massenentwurf der Passagierflugzeuge für das untere Deck übernommen werden, da die Entwurfsmethoden für die Sekundärstrukturen beider Entwurfssysteme im unteren Deck identisch sind. Die Ergebnisse sämtlicher Regeln für den Massenentwurf, die als eindeutiger

5.7. ENTWICKLUNG VON MASSENENTWURFSSYSTEM UND MULTIFIDELITY-MASSENMODELL

Eintrag an das Datenrepositorium übermittelt werden, werden als Dataframe mit einem schematisch gleichbleibenden Aufbau strukturiert. Tabelle 5.4 zeigt die schematische Struktur der Entwurfsergebnisse der einzelnen Regeln. Jedem Element ist eine eindeutige UID zugeordnet. Außerdem sind die zugehörigen numerischen Werte für eine Position im dreidimensionalen Raum als Liste von Koordinaten sowie die Masse in Kilogramm aufgeführt. Eine einheitliche Struktur der Entwurfsergebnisse ermöglicht die Weiterverarbeitung der Informationen und



fuga.design (cargo)
 fuga.geometry (cargo)
 fuga.design (masses)

fuga.design (structure)
 fuga.geometry (structure)

Abbildung 5.18.: Partielle Systemdarstellung des FUGA-Framework als UML-Klassendiagramm für die Entwurfs- oder Modellierungssysteme im Struktur-, Kabinen- und Massenentwurf

Tabelle 5.4.: Schematische Struktur zur Speicherung der Massenentwurfsergebnisse als Basis für einheitliche Methodenverarbeitung der Informationen

uID	location	mass
uid ₁	[x ₁ , y ₁ , z ₁]	mass ₁
uid ₂	[x ₂ , y ₂ , z ₂]	mass ₂
uid ₃	[x ₃ , y ₃ , z ₃]	mass ₃
⋮	⋮	⋮
uid _n	[x _n , y _n , z _n]	mass _n

deren Überführung in die CPACS-Datei sowie in das Multifidelity-Massenmodell durch den Einsatz gemeinsamer Methoden. Alle neuen Regeln müssen demselben Schema für die Rückgabe ihrer Werte folgen.

Zu Vergleichszwecken wird der MCG des Massenentwurfssystems für die Passagierkabinen in Abbildung A.7 dem MCG des Massenentwurfssystems für die Frachtkabine in Abbildung 5.19 gegenübergestellt. Die Untergliederung aller Massenkomponenten erfolgt CPACS-konform in drei übergeordnete Knoten, die Nutzlast, die Betreibergegenstände sowie die Ausstattungselemente. Der überwiegende Teil der Sekundärstrukturen der Passagierkabine ist für die Frachtflugzeugkabine nicht relevant. Der Vergleich der Eingangsknoten beider MCG hinsichtlich der Nutzlast, der Betreibergegenstände sowie der Ausstattungselemente der unterschiedlichen Entwurfssysteme verdeutlicht, welche Sekundärstrukturen nicht in das neue Massenentwurfssystem für Frachtflugzeuge übernommen werden. Es werden für den Frachtflugzeugentwurf sämtliche Massenberechnungen für die Sekundärstrukturen des oberen Decks entfernt, mit Ausnahme der Knoten `mExitLighting`, `mCockpitLighting` und `mDocumentsTools`. Abschließend wird für das obere Deck die detaillierte Massenbestimmung um die Containergeometrien sowie für die 9g-Barriere durch zusätzliche Regeln erweitert. Alle berechneten Massen werden als homogene Massen betrachtet. Der Schwerpunkt der Komponenten `mpayload`, `mFurnishing` und `mOperatorItems` wird nach Gleichung 5.2 berechnet.

$$r_S(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i r_i(t) \quad (5.2)$$

Zur Bestimmung der Komponenten werden die darin enthaltenen Einzelmassen als Punktmassen aufaddiert und mittels ihrer Positionen gewichtet gemittelt. OpenAD erwartet später die Ge-

5.7. ENTWICKLUNG VON MASSENENTWURFSSYSTEM UND MULTIFIDELITY-MASSENMODELL

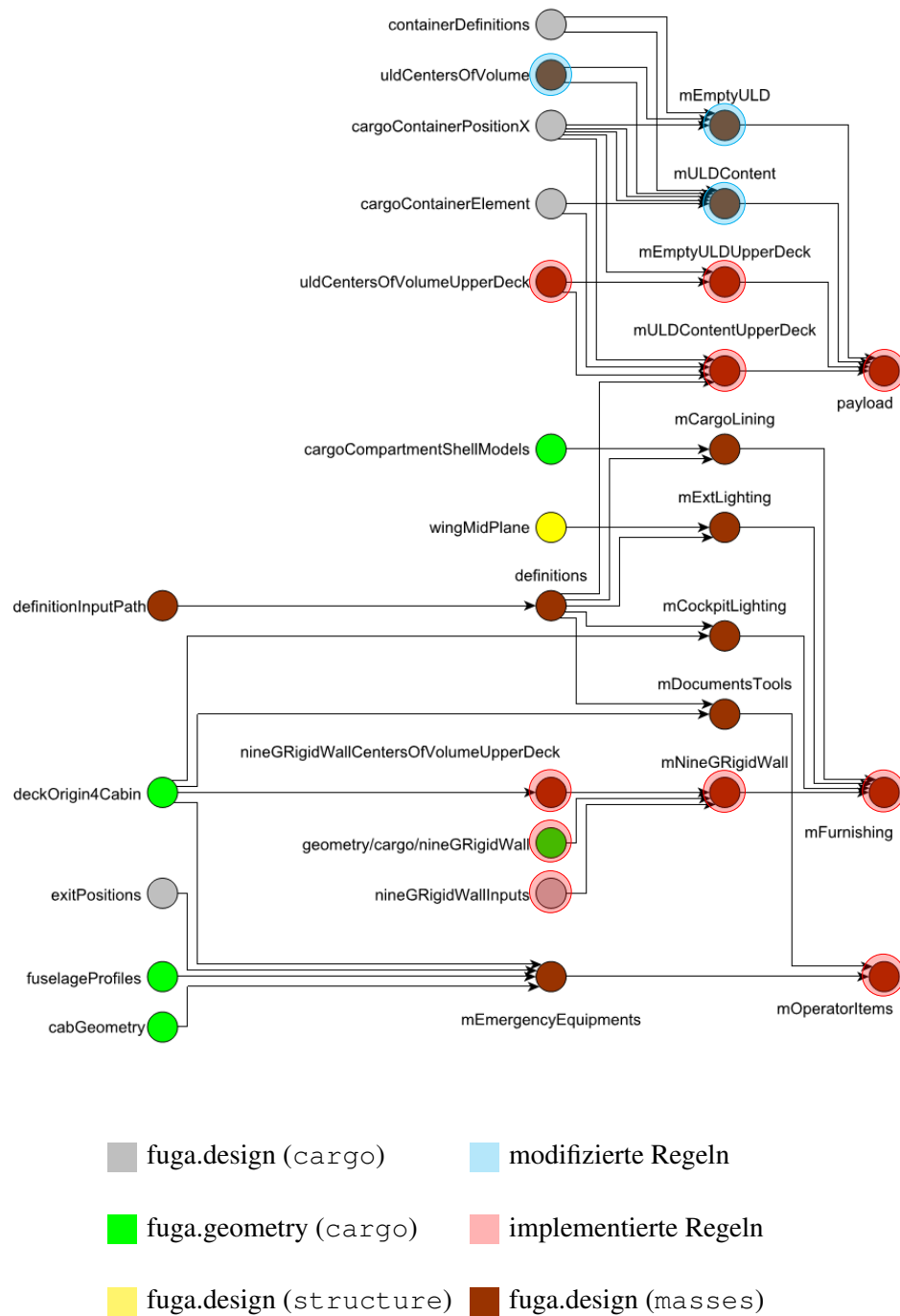


Abbildung 5.19.: MCG des Massenwurfs für das Frachtflugzeugentwurfssystem

5.8. WISSENSINTEGRATION ZUR ABLEITUNG CPACS-KONFORMER XML-DATEN DER ENTWURFSERGEBNISSE

samtmassen und deren Positionen für `mpayload`, `mFurnishing` und `mOperatoritems` als Entwurfparameter, dies wird durch die hier beschriebene Methode ermöglicht.

Abschließend wird das neue Regelwerk `cargo_masses` im Packetumfang Modellgenerierung um alle entfernten und hinzugefügten Regeln aktualisiert, was eine Visualisierung der Massen als VTK-Modelle ermöglicht. Zuletzt erfolgt ein Test des `CargoMassesDesignSystem` und `MultiFidelityCargoMassModel`, die fehlerfreie Funktionalität der Methode ist Voraussetzung für die Implementierung weiterer Methoden im nächsten Abschnitt. Das Testergebnis ist Abbildung A.8 dargestellt und zeigt ein exemplarisches Multifidelity-Massenmodell der D239 als Frachtkabine.

Der vorgestellte methodische Abschnitt beschreibt aufbauend auf dem Entwurfssystem der Frachtflugzeugkabinen die Entwicklung des Massenentwurfssystems und des Multifidelity-Massenmodells für die Frachtkabinen auf Grundlage der bestehenden Entwurfsmethodik in FUGA. Die Vorgehensweise wurde ausführlich beschrieben und anhand des entwickelten MCG des Massenentwurfssystems für Frachtkabinen wurden die berücksichtigten Massenelemente denen des Passagierentwurfssystems gegenübergestellt. Ferner wurde dargestellt, welche Knoten entfernt, modifiziert und hinzugefügt wurden. Der Massenentwurf für die Frachtkabine bildet die Grundlage für die anschließende multidisziplinäre Entwurfsoptimierung. Die implementierten Methoden wurden in einem Testlauf geprüft. Die fehlerfreie Funktionalität der neuen Systemerweiterungen ist Voraussetzung für den nächsten Abschnitt. Dort werden alle Entwurfsergebnisse der bisher entwickelten Methoden mittels zusätzlicher Wissensintegration in CPACS-konforme Daten überführt, die dann für weitere Analysen disziplinübergreifend verwendet werden können.

5.8. Wissensintegration zur Ableitung CPACS-konformer XML-Daten der Entwurfsergebnisse

Dieser Abschnitt befasst sich mit den notwendigen Erweiterungen zur Ableitung CPACS-konformer XML-Daten der Entwurfsergebnisse aus dem neuen Frachtflugzeugentwurfssystem. Zusätzlich werden neue Methoden hinzugefügt, die die Ergebnisse des Massentwurfssystems in die CPACS-Datenstruktur überführen. Die persistente Speicherung der Entwurfsergebnisse im CPACS-Produktdatenformat bildet die Grundlage für weitere Analysen im zweiten methodischen Kapitel dieser Arbeit. Zudem ist sie Voraussetzung für die disziplinübergreifende Zusammenarbeit, da die Ergebnisse so in die Methoden anderer Experten zurückgeführt werden

5.8. WISSENSINTEGRATION ZUR ABLEITUNG CPACS-KONFORMER XML-DATEN DER ENTWURFSERGEBNISSE

können und CPACS den konsistenten Datenaustausch auf dem gemeinsamen Produktdatenformat ermöglicht.

Der Systemteil zur Ableitung CPACS-konformer Ergebnisse in FUGA befindet sich im Paketumfang der CPACS-Schnittstelle innerhalb des Regelwerks `tree_update` (siehe Tabelle 3.1). Das Regelwerk ist modular über drei Klassen aufgebaut. Die Klasse `CpacsTreeUpdater` stellt die übergeordnete Struktur und grundlegende Methoden zur Bearbeitung und Aktualisierung der CPACS-Daten zur Verfügung. Über das Argument `cpacs` wird auf die CPACS-Datenstruktur der aktuellen Entwurfskonfiguration des Datenrepositoriums zugegriffen, was die Anreicherung der CPACS-Daten mit Entwurfsergebnissen aus FUGA ermöglicht. In der Klasse `CpacsTreeUpdater` wird die Klassenmethode `update()` aus der zweiten Klasse `CpacsFuselageUpdater` instanziiert, die alle im Entwurfssystem vorhandenen Ergebnisse des Kabinenentwurfs für die Primär- und Sekundärstrukturen CPACS-konform in eine aktualisierte CPACS-Datei überführt. Die dritte Klasse `CpacsMassUpdater` ermöglicht in einem optionalen Schritt die zusätzliche Einbettung der detaillierteren Massenberechnung in die CPACS-Datenstruktur. Die oben beschriebene Struktur des Regelwerks `tree_update` bietet somit einen idealen Ausgangspunkt, um die Entwurfsergebnisse des Frachtkabinenentwurfs in die bestehende Methodik zu integrieren.

Um die Ergebnisse der wissensbasierten Modellierung von Frachtflugzeugen CPACS-konform zu speichern, werden die bestehenden Klassen um neue Methoden ergänzt. Dadurch ist eine automatisierte Überführung der Entwurfsergebnisse für Frachtdecks, Containerelemente und deren Masseninformationen in die CPACS-Struktur möglich. Ein boolescher Parameter steuert innerhalb der Hauptklasse `CpacsTreeUpdater` den Ablauf zwischen Passagier- und Frachtflugzeugkonfiguration. Die Entwurfsdaten der Frachtdecks und Containerelemente werden so CPACS-konform und automatisiert im entsprechenden CPACS-Knoten abgelegt. Abbildung 5.20 veranschaulicht einen exemplarischen, aufgeklappten Deckknoten für die Entwurfsdaten des oberen Decks einschließlich aller untergeordneten CPACS-Knoten und der Frachtcontainer. Jedem Container wird die spezifische UID des dazugehörigen Frachtcontainerelements zugewiesen. Ein exemplarischer CPACS-Knoten für Containerelemente ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Dieser speichert alle Informationen, die zur Modellierung der Container verwendet werden. Zusätzlich wurde eine neue Klasse entwickelt, die die Masseninformationen der Frachtkabinenelemente berücksichtigt. In dieser werden die Ergebnisse aus dem Massenentwurf konform in das CPACS-Format geparkt. Die Struktur zur Speicherung der Entwurfsergebnisse ist modular aufgebaut und ermöglicht eine unkomplizierte Einbettung

5.8. WISSENSINTEGRATION ZUR ABLEITUNG CPACS-KONFORMER XML-DATEN DER ENTWURFSERGEBNISSE

weiterer Sekundärstrukturen.



Abbildung 5.20.: Deckknoten der Entwurfsergebnisse in CPACS

In diesem Abschnitt wurden alle erforderlichen Anpassungen zur Überführung von CPACS-konformen XML-Daten aus den Entwurfsergebnissen des neuen Frachtflugzeugentwurfssystems umgesetzt. Dazu wurden die Klassen und Methoden im Regelwerk `tree_update` im Pake-tumfang der CPACS-Schnittstelle innerhalb des Regelwerks erweitert und angepasst, um alle Ergebnisse für die Primär- und Sekundärstrukturen des Frachtkabinenentwurfs sowie die werk-zeugspezifischen Entwurfsinformationen in die CPACS-Datei zu schreiben. Zusätzlich wurde eine neue Klasse erstellt, die die Ergebnisse des Massenentwurfssystems für Frachtflugzeuge CPACS-konform in die bereits mit den Entwurfsergebnissen der Primär- und Sekundärstrukturen aktualisierte CPACS-Datei mit weiteren Informationen anreichert. Die aktualisierten CPACS-Daten der wissensbasierten Entwurfsmethodik bilden die Grundlage für weitere Analysen. Ba-sierend auf den in Kapitel 5 erarbeiteten Methoden steht nun ein System für den automatisierten wissensbasierten Entwurf von Frachtkabinen zur Verfügung, das alle Entwurfsergebnisse in das

5.8. WISSENSINTEGRATION ZUR ABLEITUNG CPACS-KONFORMER XML-DATEN DER ENTWURFSERGEBNISSE

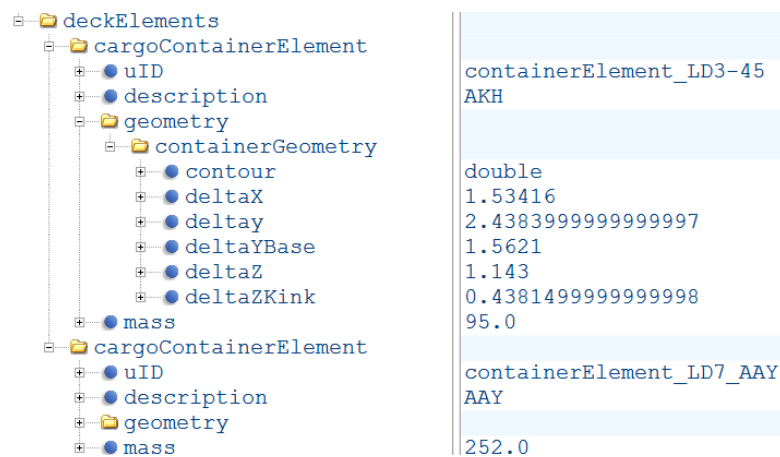


Abbildung 5.21.: Deckelementknoten für den Frachtkabinenentwurf in CPACS

CPACS-Produktdatenformat überführt. Auf der Grundlage der neuen Entwurfsmethoden kann das neue Frachtflugzeugentwurfssystem in die RCE-Integrationsumgebung eingebettet werden, wodurch eine Schnittstelle für disziplinübergreifende Analysen geschaffen wird.

6. Iterative 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 Passagierflugzeugentwurfs und des Frachtflugzeugentwurfs für weiterführende Analysen mit anderen Disziplinen. Die methodische Umsetzung zur Integration der KBE-Entwurfsmethoden in die RCE-Integrationsumgebung wird anhand des Frachtflugzeugentwurfssystems vorgestellt, für das Passagierentwurfssystem kann analog vorgegangen werden.

6.1. RCE-Integration des wissensbasierten Frachtkabinenentwurfs

Nachfolgend wird die Integration des Frachtkabinenentwurfs einschließlich des Massenentwurfs als Werkzeug in die RCE-Integrationsumgebung beschrieben. Das Konzept der Werkzeugintegration wurde bereits im Abschnitt 3.2 erläutert (siehe Abbildung 3.2). 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

6.1. RCE-INTEGRATION DES WISSENSBASIERTEN FRACHTKABINENENTWURFS

Dictionary-Struktur mit eindeutigen Schlüsseln gespeichert. Zu den Entwurfsergebnissen zählen die CPACS-Daten für den Kabinen- und Strukturentwurf und den Massentwurf sowie die Kabinenlayouts. Im nachgeschalteten Prozessschritt werden alle Ergebnisse aus dem Dictionary extrahiert. Die CPACS-Datei wird direkt als XML-Datei und alle Layouts werden über einen Rückgabepfad ausgegeben. Jeder dieser drei Hauptprozesse wird durch eine eigene Python-Klasse abgebildet und anschließend in einem Kernprozess der `core.py` zusammengeführt.

Abbildung 6.1 zeigt ein Minimalbeispiel der oben beschriebenen Integration des neuen Werkzeugs. 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 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. Um den Prozess über die grafische Benutzeroberfläche von RCE zu starten, wird die dort hinterlegte Python-Umgebung auf Basis der Konfigurationen in `configurations.json` aktiviert und die `run.py` Anwendung automatisch gestartet. Über die Benutzeroberfläche von RCE können die Dateipfade der initialen CPACS-Datei sowie der Ergebnisdateien festgelegt werden.

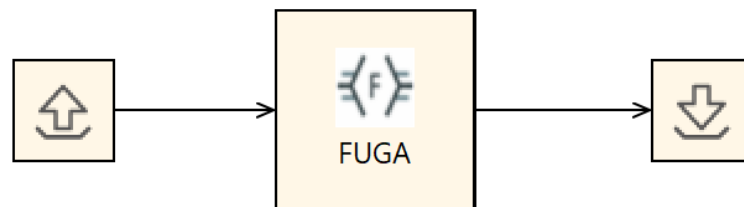


Abbildung 6.1.: Darstellung für ein Minimalbeispiel der FUGA-RCE-Integration mit Input- und Output-Provider für das CPACS-Produktdatenformat

In diesem Abschnitt wurden die relevantesten Arbeitsschritte zur Einbettung der wissensbasierten Entwurfsmethodik für Frachtflugzeugkabinen, einschließlich des Massentwurfs, in die RCE-Integrationsumgebung erläutert. Auf dieser Grundlage kann ein multidisziplinärer Entwurfsprozess entwickelt werden, der das Flugzeugvorentwurfswerkzeug `openAD` mit dem wissensbasierten und automatisierten Kabinenentwurf von FUGA in einem multidisziplinären Workflow verbindet.

6.2. Iterativer multidisziplinärer Flugzeugvorentwurf

Die nachfolgende Methodik beschreibt die Entwicklung eines Ansatzes zur Rückführung der Ergebnisse der detaillierten Massenauslegung aus dem wissensbasierten Entwurf von Passagier- und Frachtflugzeugkabinen in den Vorentwurfsprozess. 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 A.3 zeigt das Schema in Form eines Flowcharts für den Entwurfsprozess von openAD. Der hier vorgestellte methodische Ansatz bildet die Phasen L0 und L1 ab. Der in RCE entwickelte methodische Ansatz für den disziplinübergreifenden Entwurfsprozess ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Den einzelnen Prozessschritten dieses Workflows können die jeweiligen Phasen des Entwurfsprozesses für openAD zugeordnet werden. Die Initialisierung des Workflows stellt die Phase L0 dar. Phase L1 umfasst den openAD-Vorprozess, den FUGA-Vorprozess, den Struktur- und Kabinenentwurf sowie den FUGA-Nachprozess. Die Missionsanalyse mit AMC gehört zum Nachprozess des openAD-Entwurfsmodells.

Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte kurz erläutert, eine ausführliche Beschreibung der separaten Prozessphasen befindet sich in Anhang A.14. Der Workflow startet mit der Initialisierung, bei der die initiale CPACS-Datei geladen und Konvergenzkriterien über XPath-Ausdrücke festgelegt werden. Der `Converger` prüft die Konvergenzkriterien und übergibt die CPACS-Daten an openAD zur ersten Flugzeugauslegung basierend auf TLARs und spezifischen Parametern (Phase L0). OpenAD generiert dann die neue CPACS-Konfiguration für die Phase L1, in der multidisziplinäre Methoden den Gesamtentwurfsprozess mit detaillierteren Informationen anreichern. Das erste Python-Skript extrahiert die Entwurfsparameter aus den Initialdaten und ergänzt die CPACS-Daten von openAD um diese Informationen. Im Anschluss wird die CPACS-Datei zur Missionsanalyse an AMC weitergeleitet. Im FUGA-Vorprozess

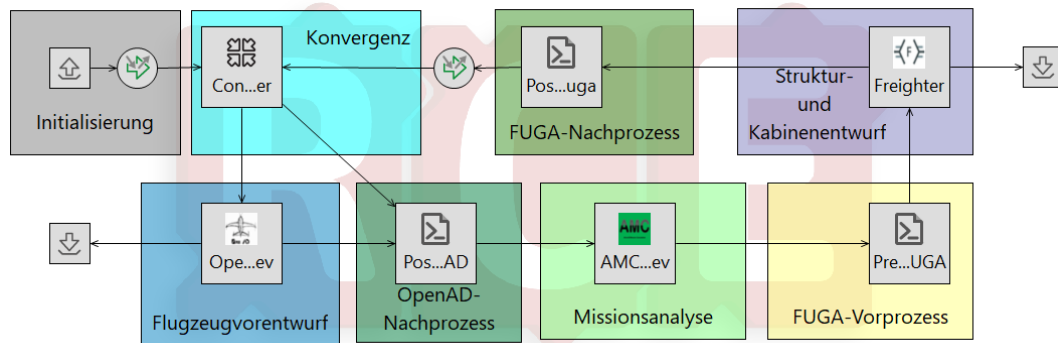


Abbildung 6.2.: Multidisziplinäre Entwurfsoptimierung innerhalb von RCE, basierend auf der Rückführung der Entwurfsergebnisse für Nutzlast, Betriebsmittel und Ausstattung aus dem initialen Struktur- und Kabinenentwurf mit FUGA in den Flugzeugvorentwurf zur Neuauslegung von Flugzeugen mit openAD

wird die CPACS-Datei um benutzerdefinierte Eingabeparameter ergänzt, um den Struktur- und Kabinenentwurf mithilfe von FUGA vorzubereiten. FUGA verarbeitet die aufbereiteten Daten im initialen Struktur- und Kabinenentwurf der Flugzeuge und speichert die Ergebnisse in der CPACS-Datei. Im FUGA-Nachprozess werden die Ergebnisse aus dem wissensbasierten Entwurfsprozess in den toolspezifischen components-Knoten von openAD geschrieben, damit sie in der nächsten Entwurfsiteration als neue Entwurfsparameter berücksichtigt werden. Abschließend erfolgt eine Konvergenzprüfung mit dem Converger, bei Nichterfüllung des Kriteriums wird automatisch eine neue Iteration durchlaufen.

Der in diesem methodischen Teil entwickelte Ansatz ermöglicht die Durchführung eines multidisziplinären Entwurfsprozesses. Dies wurde durch die Integration und Verknüpfung von FUGA mit openAD in die 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 innerhalb der Flugzeugvorentwurfsprozesse. Dies ermöglicht zusätzliche Analysen und kann neue Grundlagen für verbesserte Entwurfs- und Umbauprozesse in der Zukunft legen.

7. Anwendung und Auswertung wissensbasierter, iterativer Entwurfsprozesse

Dieses Kapitel gliedert sich in drei Abschnitte. Nach der Implementierung der in Kapitel 5 beschriebenen Methoden in das FUGA-Framework können zusätzlich zu den Passagierkabinen nun auch Frachtkabinen mit unterschiedlichen Containerverteilungen mittels der wissensbasierten Methoden generiert werden. Im ersten Abschnitt wird das neue Frachtflugzeugentwurfssystem einschließlich des Massenentwurfssystems an zwei verschiedenen Flugzeugtypen getestet, indem die Testflugzeuge mit Referenzmodellen aus der Industrie verglichen werden. Zudem werden die Massenentwürfe der Testflugzeuge visuell und mathematisch überprüft. Dadurch wird belegt, dass die resultierenden Entwürfe des Frachtflugzeugentwurfssystems die zu erwartenden Ergebnisse liefern. Der zweite Abschnitt befasst sich mit der Auswertung der Ergebnisse der iterativen und multidisziplinären Entwurfsoptimierung 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 Kapitel 6.2 hergeleitet wird, an das Flugzeugvorentwurfswerkzeug openAD zurückgeben und die Flugzeuge neu ausgelegt. Anschließend werden die neu ausgelegten Flugzeuge mit dem Referenzmodell verglichen und bewertet. Der dritte Abschnitt befasst sich mit den eingangs formulierten Hypothesen, die dort reflektiert und abschließend bewertet werden.

7.1. Plausibilität des Entwurfssystems

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 berechnet werden. Dafür werden ausgewählte Sekundärelemente anhand bestimmter Kriterien überprüft. Hierzu werden folgende Entwurfsaspekte betrachtet:

- Testkonfigurationen mit Referenzmodellen aus Wissenschaft und Industrie vergleichen
- Platzierung der 9g starren Wand
- Positionierung der Türen
- Positionierung der MD CD
- Überprüfung der Ergebnisse aus dem Massenentwurfssystem

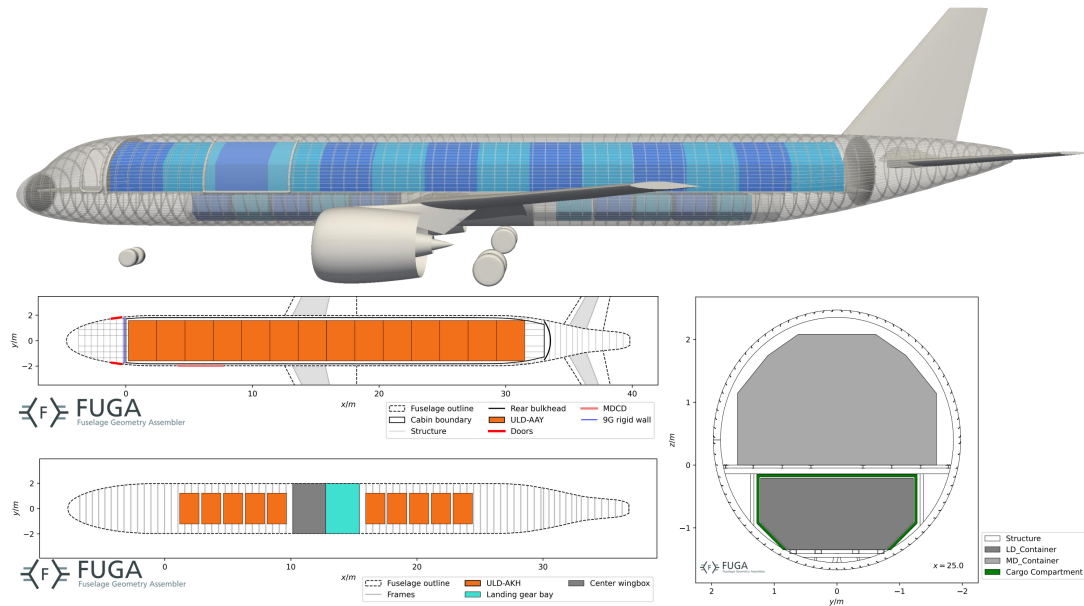
Alle Tests werden anhand der zuvor in Tabelle A.4 definierten benutzerdefinierten Parameter für die Flugzeugtypen D180 und D239 durchgeführt. Mithilfe dieser Tests wird geprüft, ob das entwickelte KBE-System die praktischen Anforderungen für den Rumpf- und Kabinenentwurf von Frachtflugzeugkabinen erfüllt. So wird sichergestellt, dass alle Methoden korrekt implementiert werden und in den Berechnungen der Regeln keine Fehler auftreten. Die Plausibilität des Entwurfs ist an dieser Stelle besonders wichtig, damit die darauf aufbauenden Massenrückführungen und Analysen aussagekräftig sind. Liefert das neue Entwurfssystem für Frachtflugzeugkabinen plausible Ergebnisse, kann eine Diskussion mit der ersten Hypothese stattfinden.

Die Flugzeugkonfigurationen D180 und D239 sind an den Airbus-Modellen A320 und A321 angelehnt. Da es beide Flugzeugtypen sowohl in der Passagier- als auch in der umgerüsteten Frachtversion gibt, bieten diese Konfigurationen eine geeignete Grundlage, um die Ergebnisse des Frachtflugzeugentwurfssystems nachvollziehbar zu überprüfen. Wesentliche TLARs wie Reichweite, Nutzlast, Passagierkapazität und strukturelle Leistungswerte wie Machzahl und Flughöhe sind in Tabelle A.6 dargestellt. Die D239 hat eine Entwurfsreichweite von 2500 nautischen Meilen und kann 239 Passagiere befördern, während die D180 eine Entwurfsreichweite von 2640 nautischen Meilen und eine Kapazität von 180 Passagieren hat.

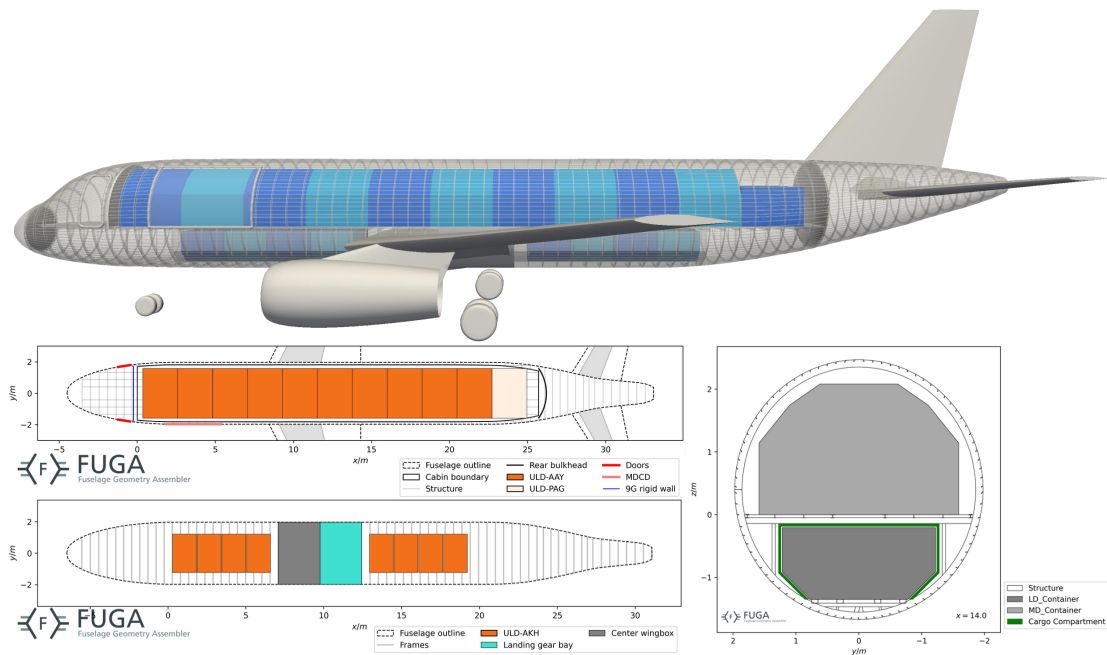
Zur Überprüfung der neuen Entwurfsmethodiken wurden auf Basis der CPACS-Vorentwurfsdaten der D180- und D239-Flugzeugkonfigurationen sowie der benutzerdefinierten Entwurfssparameter für die primäre und sekundäre Struktur die Kabinen mit dem neuen Frachtflugzeugentwurfssystem ausgelegt. Tabelle A.4 zeigt die relevantesten voreingestellten Entwurfssparameter beider Flugzeugkonfigurationen. Die Entwurfssparameter für die primären Strukturen, exklusive der Türausschnitte, wurden hierbei nicht berücksichtigt und sind nicht in der Tabelle aufgeführt. Der Fokus der Tests liegt auf den Parametern für den Kabinenentwurf der neu implementierten Entwurfsmethoden.

Die Auslegung der Frachtflugzeugkabinen erfolgt basierend auf den in Kapitel 5 erarbeiteten Methoden für den Struktur- und Kabinenentwurf der Frachtflugzeugkabinen. Zur Initialisierung des Entwurfssystems werden die CPACS-Daten und die benutzerdefinierten Parameter an das Datenrepositorium von FUGA übergeben. Aus den Ergebnissen des CargoDesignSystem, des StructureDesignSystem und des MultifidelityCargoModel werden die Kabinenlayouts einschließlich der Querschnitte und Sektionen sowie die Geometriemodelle für die Kabinen erstellt. Die Layouts beinhalten sowohl das obere als auch das untere Deck der Frachtkabine. Mit dem MMG des MultifidelityCargoModel werden die 3D-Modelle für die D180 und die D239 generiert, die zur Visualisierung der Massenauslegung und für die Bauraumuntersuchungen hinsichtlich der Testaspekte verwendet werden. Die generierten Frachtkabinen der Modelle D239 und D180 sind in den Abbildungen 7.1 dargestellt. Basierend auf den in Tabelle A.4 aufgelisteten benutzerdefinierten Parametern zeigen die Abbildungen den Flugzeugrumpf als 3D-Modell mit den jeweiligen Kabinenlayouts. Die beiden Kabinenkonfigurationen für die Beladungsszenarien mit den ULDs für das obere und untere Frachtdeck wurden möglichst nah an die in Abbildung 2.2 und Abbildung A.9 dargestellten umgebauten Passagierflugzeuge modelliert. Damit kann gezeigt werden, dass die Platzierung und Modellierung der Container für die neuen Entwurfsmethoden plausibel ist. Zu diesem Zweck werden die Konfigurationen der beiden Flugzeugtypen für eine vorgegebene Anzahl von ULDs für das obere und untere Frachtdeck erstellt. Eine detaillierte Übersicht über die verwendeten Containertypen und ihrer Eigenschaften ist in Tabelle A.3 und Abbildung A.2 zu finden. Die D239 Frachtflugzeugvariante wurde auf dem oberen Deck mit jeweils 11 ULDs des Typs AAY bestückt und auf dem unteren Deck mit 10 ULDs des Typs AKH. Die D180 ist auf dem Oberdeck mit jeweils 11 ULDs konfiguriert, wobei die ersten 10 ULDs vom Typ AAY sind und der letzte ULD eine Palette vom Typ PAG ist. Das untere Deck der D180 wurde mit 8 ULDs des Typs AKH ausgestattet. Die Gegenüberstellung der Kabinen in Abbildung 7.1 aus dem wissensbasierten Entwurf mit den Referenzmodellen in Abbildung 2.2 und Abbildung A.9

7.1. PLAUSIBILITÄT DES ENTWURFSSYSTEMS



a) D239 Frachtkabine



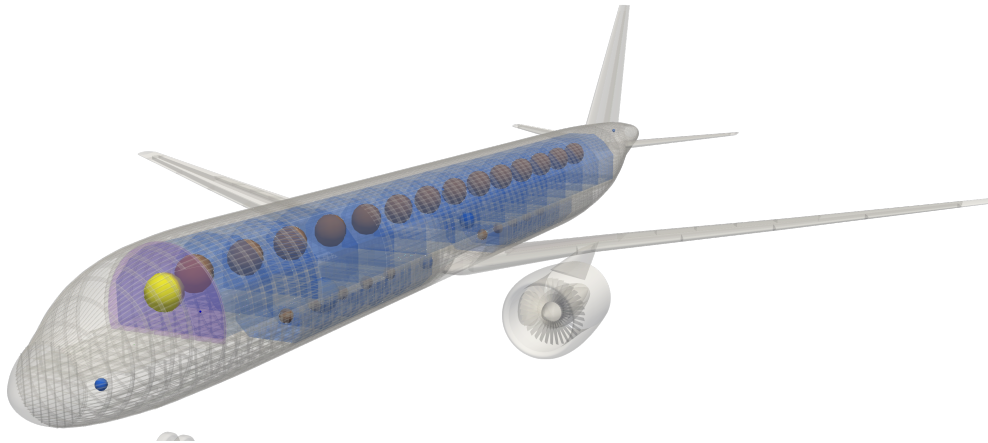
b) D180 Frachtkabine

Abbildung 7.1.: D239 und D180 mit FUGA modellierten Frachtkabinenmodelle für die Plausibilitätsprüfung der neuen Methoden

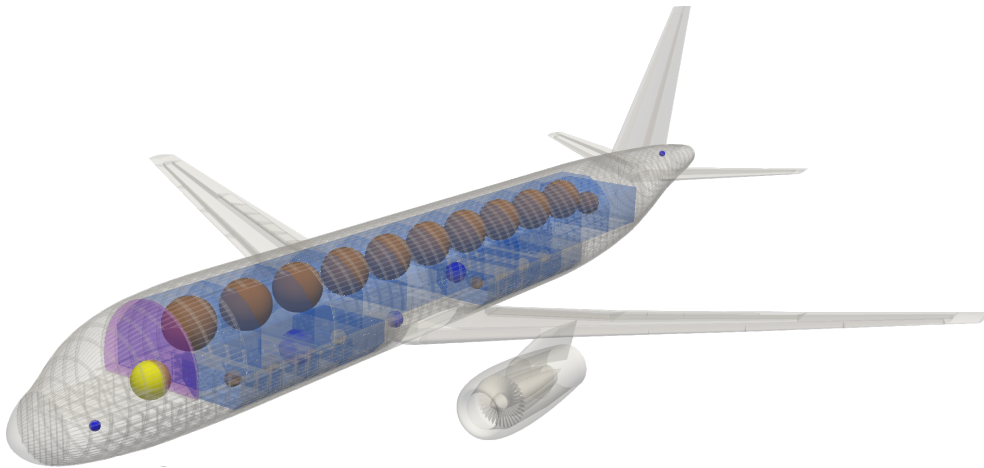
zeigt eine Übereinstimmung für die Layoutstruktur. Daraus kann geschlossen werden, dass die neuen wissensbasierten Entwurfsmethoden in der Lage sind, reale Kabinenkonfigurationen für anforderungsspezifische Fälle abzubilden. Das bestätigt die Plausibilität des automatisierten und wissensbasierten Kabinenentwurfs für die Modellierung und Platzierung der Container auf dem oberen und unteren Deck der Frachtflugzeuge. Weitere Beschreibungen zu zusätzlichen erfolgreichen Überprüfungen für die Kabinentüren und die 9g-Barriere befinden sich in Anhang A.16.

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, können die Massen des `MultiFidelityCargo_MassModel` relativ zu ihrem Gewicht als Sphären im Geometriemodell des Flugzeugs platziert werden. Abbildung 7.2 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. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse des Massenentwurfs für die Schwerpunktskoordinaten und die Massengrößen die erforderliche Genauigkeit liefern, wird die visuelle Überprüfung der Geometrie- und Massenmodelle durch eine mathematische Überprüfung der zuletzt platzierten ULDs auf dem oberen und unteren Frachtdeck mittels separater Berechnungen ergänzt. Alle Berechnungen sowie die ausführliche Vorgehensweise zur Überprüfung einschließlich der verwendeten Entwurfssparameter und aufgestellten Formeln sind im Anhang A.16 aufgeführt. Die Ergebnisse der rechnerischen Nachweise sind in den Tabellen 7.1 und 7.2 aufgelistet. Die Abweichungen für die Massen der beiden ULDs sowie für die Schwerpunkte in X-Richtung und in Z-Richtung zwischen den Ergebnissen aus den Entwurfssystemen und den rechnerischen Nachweisen betragen 0.00 %.

Für die Untersuchungen in diesem Abschnitt wurden die Flugzeugtypen D180 und D239 als Frachtflugzeugkabinen für ein spezifisches Beladungsszenario ausgelegt. Die Auslegung der Kabinen erfolgte in Anlehnung an ihre Referenzkabinen mit standardisierter Frachtcontainerbestückung. Ein Vergleich dieser Kabinenkonfigurationen mit den Referenzmodellen zeigt, dass die Ergebnisse in der Praxis umsetzbar und plausibel sind. Darüber hinaus bestätigt die Auslegung der beiden Flugzeugtypen die Allgemeingültigkeit des entwickelten Frachtflugzeugentwurfs, sodass dieser auf beliebige CPACS-Modelle übertragbar ist. Auf Basis der Entwurfsergebnisse, der Geometriemodelle und der generierten Layouts wurden die wich-



a) Geometriemodell der Frachtvariante D239 mit integriertem Multifidelity-Massenmodell



b) Geometriemodell der Frachtvariante D180 mit integriertem Multifidelity-Massenmodell

- Masse Systemkomponenten ● Masse Innenausstattung
- Masse ULD-Inhalt

Abbildung 7.2.: Geometriemodelle der D239 und der D180 Frachtvarianten mit integriertem Multifidelity-Massenmodell zur visuellen Plausibilitätsprüfung des Massenentwurfs der Frachtkabine und ihrer Elemente

Tabelle 7.1.: Vergleich der Schwerpunktskoordinaten zwischen den Ergebnissen des wissensbasierten Massenentwurfs und den mathematisch nachgerechneten Werten für den zuletzt platzierten ULD der D239-Testkonfiguration auf beiden Decks

Schwerpunktkenngröße	ULD-uID	
	uld_content_0010 LD3-45	uld_content_0014 LD7_AAY
XYZ _{SP} aus Entwurfssystem [m]	[31.33, 3,08 · 10 ⁻¹⁷ , -1,22]	[35.08, 9,37 · 10 ⁻¹⁷ , 0,84]
Berechneter X _{SP} [m]	31.33	35.08
Berechneter Z _{SP} [m]	-1.22	0.84
Abweichung X _{SP} [%]	0.00	0.00
Abweichung Z _{SP} [%]	0.00	0.00

Tabelle 7.2.: Vergleich der Massen zwischen den Ergebnissen des wissensbasierten Massenentwurfs und den mathematisch nachgerechneten Werten für den zuletzt platzierten ULD der D239-Testkonfiguration auf beiden Decks

Massenkenngröße	ULD-uID	
	uld_content_0010 LD3-45	uld_content_0014 LD7_AAY
Masse aus Entwurfssystem [kg]	519.33	1369.40
Berechnete Masse [kg]	519.33	1369.40
Abweichung [%]	0.00	0.00

tigsten Entwurfparameter wie Türposition, MDCD, 9g-Barriere und Container überprüft. Dies zeigt die korrekte Umsetzung der neuen Methoden. Zusätzlich wurden die Ergebnisse des Cargo_MassesDesignSystem und des MultiFidelityCargo_MassModel auf Plausibilität geprüft. Dazu wurden die Massenmodelle der D180 und D239 in ParaView als modellierte Kugeln relativ zu ihrer Masse in den jeweiligen Geometriemodellen platziert. Die korrekte Positionierung dieser Kugeln relativ zu ihren Kabinenelementen bestätigt die korrekte Umsetzung der Methoden bezüglich Massen und Massenschwerpunkten. Zudem wurden die beiden letzten Frachtcontainer auf dem oberen und unteren Deck der D239-Testkonfigurationen durch separate Rechnungen für deren Massen und Schwerpunkte überprüft. Für spätere Analysen liefern alle relevanten Entwurfparameter, wie die Schwerpunkte in X- und Z-Richtung sowie die Massen der Kabinenelemente, zuverlässige Ergebnisse. Insgesamt zeigt sich, dass so-

wohl das neue Frachtflugzeugentwurfssystem als auch das Massenentwurfssystem konsistente und nachvollziehbare Ergebnisse liefern. Darauf aufbauend können weitere Analysen für die iterative Entwurfsoptimierung durchgeführt werden.

7.2. 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 entwickelte multidisziplinäre Entwurfsprozess, der exemplarisch auf die DLR-F25 angewendet wird. Ziel ist die Untersuchung des Einflusses der Rückführung der Entwurfsergebnisse aus dem wissensbasierten Entwurf in den Flugzeugvorentwurf für Passagierflugzeugkabinen und deren Frachtflugzeugvarianten.

7.2.1. Anwendung der Multidisziplinären Analyse zur Entwurfsbewertung

Die DLR F25 ist ein konzeptionelles Referenzflugzeug im Kurz- bis Mittelstreckenbereich. Sie wurde als Weiterentwicklung der D239 auf Basis öffentlich zugänglicher Daten des Airbus A321neo kalibriert. Mit einer Reichweite von 2500 nm und einer Kapazität von 239 Passagieren stellt die F25 eine realitätsnahe sowie zukunftsorientierte Konfiguration dar, die zur Bewertung der Auswirkungen innovativer Entwurfsentscheidungen im multidisziplinären Flugzeugentwurf eingesetzt werden kann. Die DLR-F25 dient als Grundlage für die Untersuchung des Einflusses der wissensbasierten Modellierung im frühen Entwurfsstadium, es wird kein vollständig auskonvergierter Entwurf erzeugt. Zur Vereinfachung werden Annahmen einzelner Entwurfsparameter getroffen.

Ziel ist es, in der frühen Vorentwurfsphase den Einfluss unterschiedlicher Masseverteilungen zu untersuchen. Die Ergebnisse aus der multidisziplinären Analyse werden dann für die Reflexion der zweiten und dritten Forschungshypothese herangezogen.

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. Die Abbildungen 5.19 und A.7 zeigen die MCGs der Massenentwurfssysteme für die Passagier- sowie Frachtflugzeugkabinen und welche Massen für die Neuauslegung berücksichtigt werden. Durch die Anbindung von FUGA an openAD in der RCE-Integrationsumgebung werden die Disziplinen Geometrie, Massenverteilung und Struktur miteinander verbunden. So entsteht ein automatisierter, iterativ optimierter und erweiterbarer Entwurfsprozess, der in Abschnitt 6.2 detailliert beschrieben ist.

Die Tabelle A.5 fasst die relevantesten Entwurfsparameter für die Initiierung des wissensbasierten Entwurfs der zu untersuchenden Passagier- und Frachtkabinenkonfigurationen zusammen. Ausgehend von diesen Parametern werden drei Kabinenkonfigurationen untersucht, um den Einfluss unterschiedlicher Massenverteilungen auf den konzeptionellen Flugzeugentwurf zu analysieren:

- **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 7.3).
- **Frachtkonfiguration 1:** Maximale Ausnutzung des Laderaums durch zehn mittig platzierte AKH-Container im unteren Deck sowie zehn AAY-Container im oberen Deck (siehe Abbildung 7.4).
- **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 7.5).

Tabelle 7.3 zeigt die Massenverteilung der Gesamtstartmasse für die iterierten Flugzeugentwürfe im Vergleich zu der Ausgangskonfiguration, welche auf empirische und semi-empirische Methoden des Vorentwurfs basiert. Alle Massenkomponenten die für die Flugzeugkonfigurationen nach der Neuauslegung konstant geblieben sind, können als vereinfachte Annahmen betrachtet werden. Tabelle 7.4 zeigt die X-Positionen der Schwerpunkte verschiedener Massenelemente des DLR-F25-Referenzmodells sowie der drei untersuchten Kabinenkonfigurationen nach der Entwurfsoptimierung. Die aufgeführten Werte verdeutlichen den Einfluss unterschiedlicher Kabinenauslegungen auf die Gesamtschwerpunktlage im konzeptionellen Entwurf. Dabei resultieren die veränderten Schwerpunkte für Nutzlast, Betriebsmittel und Ausstattung der

7.2. ITERATIVE ENTWURFSOPTIMIERUNG

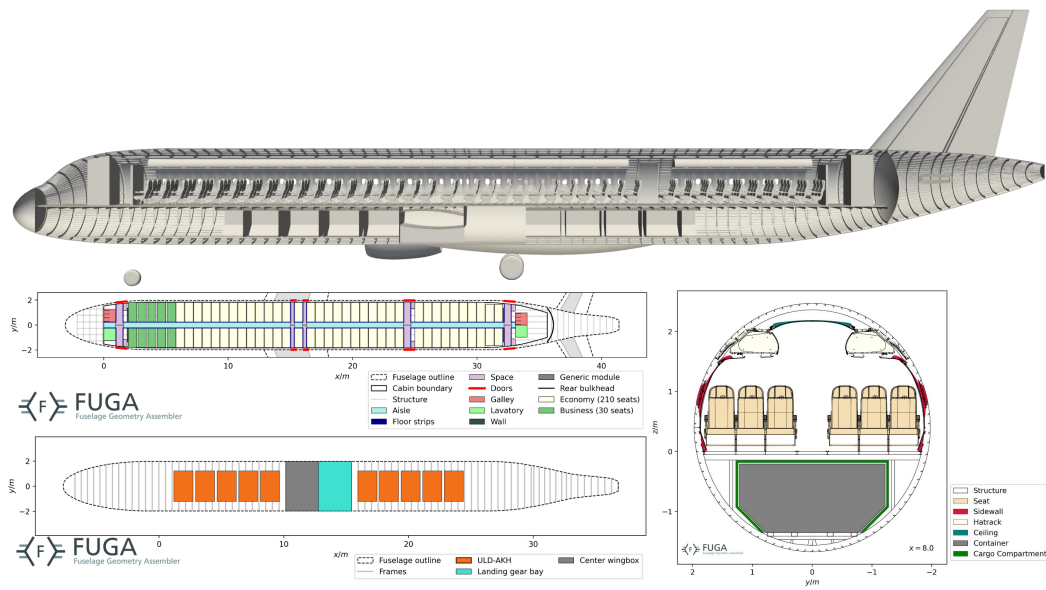


Abbildung 7.3.: DLR-F25 Passagierkonfiguration aus der iterativen Entwurfsoptimierung

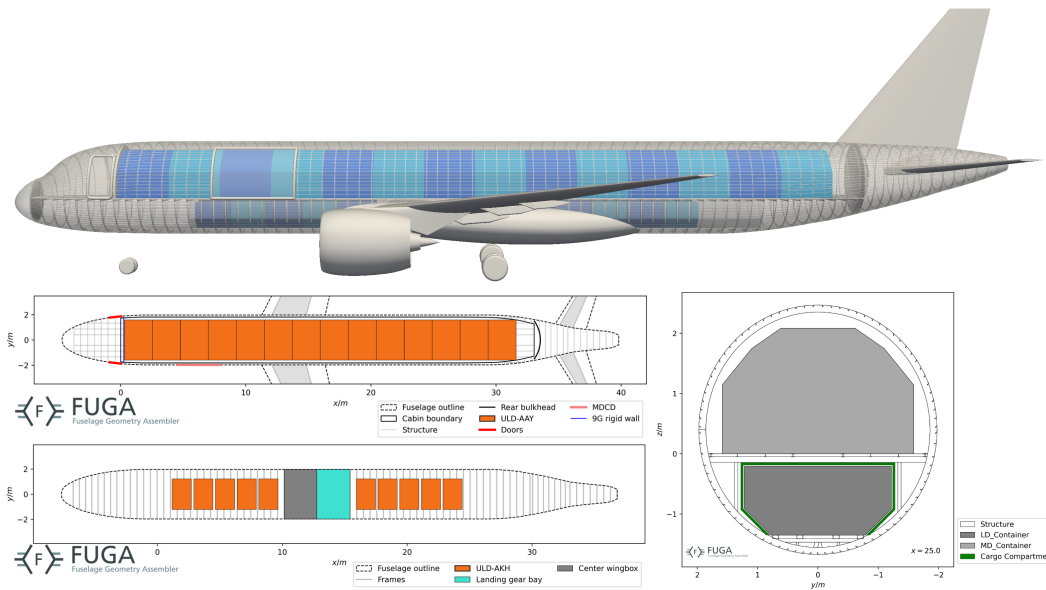


Abbildung 7.4.: DLR-F25 Frachtkonfiguration 1 aus der iterativen Entwurfsoptimierung

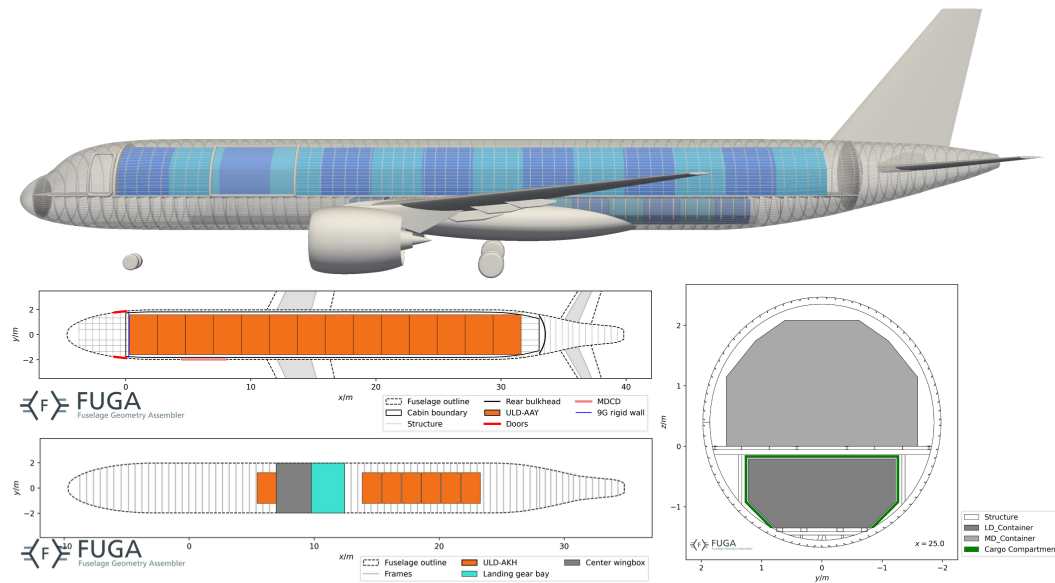


Abbildung 7.5.: DLR-F25 Frachtkonfiguration 2 aus der iterativen Entwurfsoptimierung

Tabelle 7.3.: Massenverteilung der Startmasse für alle Kabinenkonfigurationen aus der iterativen Entwurfsoptimierung, inklusive Referenzmodell. Die prozentualen Abweichungen Δm der neuen Entwürfe gegenüber dem Referenzmodell sind in Klammern angegeben. Bei grün nimmt die Masse zu, bei rot ab und bei schwarz bleibt sie gleich.

Komponente	DLR-F25 Referenzmodell	Passagier- kabine	Fracht- kabine 1	Fracht- kabine 2
	Masse [kg] und Abweichung Δm [%]			
Flügel	7866	7866 ($\pm 0.00\%$)	7532 (-4.25%)	7362 (-6.42%)
Rumpfstruktur	11261	11261 ($\pm 0.00\%$)	11261 ($\pm 0.00\%$)	11261 ($\pm 0.00\%$)
Höhenleitwerk	480	468 (-2.50%)	454 (-5.42%)	477 (-0.63%)
Seitenleitwerk	498	485 (-2.61%)	469 (-5.82%)	495 (-0.60%)
Pylone	920	920 ($\pm 0.00\%$)	920 ($\pm 0.00\%$)	920 ($\pm 0.00\%$)
Triebwerke	7591	7591 ($\pm 0.00\%$)	7549 (-0.55%)	7548 (-0.57%)
Hauptfahrwerk	1842	1874 (+1.74%)	1815 (-1.47%)	1683 (-8.63%)
Bugfahrwerk	370	376 (+1.62%)	396 (+7.03%)	347 (-6.22%)
Systeme	4910	4910 ($\pm 0.00\%$)	4910 ($\pm 0.00\%$)	4910 ($\pm 0.00\%$)
Treibstoffblock	12061	12061 ($\pm 0.00\%$)	12061 ($\pm 0.00\%$)	12061 ($\pm 0.00\%$)
Treibstoffreserve	2531	2531 ($\pm 0.00\%$)	2531 ($\pm 0.00\%$)	2531 ($\pm 0.00\%$)
Kabinenausstattung	3600	2762 (-23.28%)	1562 (-56.61%)	1547 (-57.03%)
Betriebsmittel	6934	7717 (+11.30%)	103 (-98.51%)	99 (-98.57%)
Nutzlast	25000	25000 ($\pm 0.00\%$)	29585 (+18.34%)	27519 (+10.08%)
MTOW	85688	85684 (-0.00%)	80995 (-5.47%)	78639 (-8.25%)

Tabelle 7.4.: Schwerpunkte relevanter Massenelemente der neuen Kabinenkonfigurationen aus der iterativen Entwurfsoptimierung in X-Richtung, inklusive Referenzmodell. Die prozentualen Abweichungen Δs der neuen Entwürfe gegenüber dem Referenzmodell sind in Klammern angegeben. Die grüne Farbe steht für eine Verschiebung des Schwerpunkts zum Heck, die rote Farbe für eine Verschiebung zum Bug und Schwarz für einen unveränderten Schwerpunkt.

Massenelement	DLR-F25 Referenzmodell	Passagier- kabine	Fracht- kabine 1	Fracht- kabine 2
	Schwerpunkt X-Richtung [m] und Abweichung Δs [%]			
Hauptfahrwerk	21.48	21.13 (-1.63%)	20.57 (-4.23%)	21.48 ($\pm 0.00\%$)
Flügel	21.07	20.61 (-2.18%)	19.99 (-5.12%)	20.98 (-0.43%)
Höhenleitwerk	41.027	41.01 (-0.04%)	40.95 (-0.19%)	41.05 (+0.06%)
Seitenleitwerk	41.11	41.03 (-0.19%)	41.02 (-0.22%)	41.10 (-0.02%)
Betriebsgegenstände	19.71	19.50 (-1.07%)	18.21 (-7.60%)	18.79 (-4.67%)
Ausstattung	20.75	20.78 (+0.14%)	6.83 (-67.09%)	7.03 (-66.12%)
Nutzlast	20.89	19.97 (-4.40%)	20.10 (-3.78%)	21.67 (+3.73%)
MTOW	19.94	19.48 (-2.31%)	18.86 (-5.42%)	19.82 (-0.60%)

Flugzeugkonfigurationen gegenüber dem Referenzmodell aus den Entwurfsergebnissen der wissensbasierten Modellierung mit FUGA für die unterschiedlichen Flugzeugkonfigurationen. Die angepassten Schwerpunkte für Flügel, Höhenleitwerk, Seitenleitwerk und Fahrwerke sind das Resultat der veränderten Schwerpunkte für Nutzlast, Betriebsmittel und Ausstattung und die daraus resultierende Verschiebung des Gesamtschwerpunkts.

Auswertung der Passagierkonfiguration

Die Passagierkabine wurde mit FUGA analog zum Referenzmodell mit einer Nutzlast von 25 t ausgelegt. Die Massen für Betriebsmittel und Ausstattung weichen um mehrere 100 kg voneinander ab, in der Summe beider Massenelemente ist die Differenz zum Referenzmodell mit 55 kg relative gering, was unterschiedlichen Gruppierungen der Massenelemente für Betriebslast und Ausstattung beider Entwurfswerkzeuge vermuten lässt. Besonders auffällig sind die Massenunterschiede der Höhen- und Seitenleitwerke der Passagierkabine gegenüber dem Referenzmodell, diese Änderungen resultieren aus der veränderten Schwerpunktlage der Nutzlast. Tabelle 7.4 stellt die relevanten Massenelemente der Passagierkabine und des

Referenzmodells samt ihrer Schwerpunkte dar. Der Vergleich in der Tabelle zeigt, dass die Nutzlast von 25 t und der neue Schwerpunkt, der sich um 0,92 m in Richtung des Bugs verschiebt, die Gesamtschwerpunktlage des Flugzeugs deutlich nach vorne verlagert.

Der vergrößerte Hebelarm zwischen Gesamtschwerpunkt und den Leitwerken führt infolge der notwendigen Trimmanpassung zu einer Reduzierung der geometrischen Größe sowohl für die horizontalen als auch die vertikalen Leitwerke, da der aufzubringende Kraftaufwand durch den längeren Hebelarm kleiner ist. Die geometrischen Veränderungen der Leitwerke zwischen der Passagierkabine und dem Referenzmodell sind in Abbildung A.14 und Abbildung A.15 veranschaulicht. Ebenfalls signifikant ist die veränderte Position des Flügelschwerpunkts, die Verschiebung der Flügel zwischen dem Passierflugzeug und dem Referenzmodell sind in Abbildung A.13 dargestellt. Durch die Verschiebung des Gesamtschwerpunkts um 0.92 m in Richtung des Bugs wird die Position des Flügelschwerpunkts um 0.42 m in dieselbe Richtung verlagert. Dies liegt daran, dass der Flügelauftrieb in einem stabilen Entwurf stets in einem definierten Abstand hinter dem Gesamtschwerpunkt liegen muss.

Die detaillierten Massenbestimmungen der Passagierkabine, die auf dem wissensbasierten Kabinenentwurf mit FUGA basieren, zeigen somit einen erhöhten Sensitivitätsgrad für die Auslegung der Flugzeuge im Flugzeugvorentwurf. Das unterstreicht die Relevanz der detaillierten Kabinenauslegung für den Vorentwurf. Dies gilt speziell für die dargestellte Flugzeugkonfiguration. Veränderungen in der Frachtanordnung oder der Konfiguration der sekundären Elemente würden den Gesamtschwerpunkt erneut beeinflussen. Beispielsweise könnte der Gesamtschwerpunkt durch die Verteilung der Frachtcontainer in Richtung Heck verändert werden, um ihn näher an den des Referenzmodells zu bringen. Eine Frage, die an dieser Stelle noch offen bleibt, ist der große Unterschied zwischen dem Masseschwerpunkt für die Nutzlast aus FUGA und den Annahmen aus openAD. Um die Ergebnisse einer so hohen Sensitivität besser verstehen zu können, müssen in weiteren Untersuchungen die Annahmen aus openAD und die Methoden aus FUGA gegenübergestellt und tiefergehend betrachtet werden.

Erste Frachtkonfiguration mit optimaler Kabinenauslastung

Abbildung 7.4 zeigt die erste Frachtkonfiguration für eine optimale Kabinenauslastung. Die Kabine wurde in FUGA basierend auf den initialen Entwurfsparametern (siehe Tabelle A.5) mit einer Nutzlast von 29.59 t ausgelegt. Dabei orientierte sich die Auslegung für die Positionierung und Masse der Fracht näherungsweise an der umgebauten Frachtversion der A321P2F der

Elbe Flugzeugwerke. Die Kabinenauslegung dieser Referenzkonfiguration ist in Abbildung A.9 dargestellt, während relevante technische Daten in Tabelle A.7 zusammengefasst sind. Die Massen und ihre Schwerpunkte werden für die Nutzlast, die Betriebsmittel und die Ausstattung zur Neuauslegung des Flugzeugs in den Vorentwurf zurückgeführt.

Die erhöhte Nutzlast der Frachtkonfiguration führt zu ähnlichen, jedoch verstärkten Effekten wie bei der Passagierkabine. Die geringen Massen von Betriebsmitteln und Ausstattung haben für diese Konfiguration einen nahezu vernachlässigbaren Einfluss auf die Schwerpunktlage des Flugzeugs. Der Gesamtschwerpunkt des Flugzeugs verschiebt sich dabei um 1,08 m in Richtung Flugzeugnase. Diese Verschiebung hat, ähnlich wie bei der Passagierkabinenkonfiguration, deutliche Auswirkungen auf andere Flugzeugkomponenten. So verschiebt sich der Schwerpunkt des Flügels um 0,54 m nach vorne (siehe Abbildung A.13). Der vergrößerte Hebelarm des Gesamtschwerpunkts zu den Leitwerken reduziert den Kraftaufwand für die Trimm-Anpassung. Dies führt zu einer kleineren Geometrie der Leitwerke, was wiederum die Massen dieser Komponenten reduziert. Abbildung A.14 und Abbildung A.15 illustrieren die Veränderungen der Leitwerksgeometrien im Vergleich zum Referenzmodell. Darüber hinaus wird der Schwerpunkt der Hauptfahrwerke durch den neuen Gesamtschwerpunkt beeinflusst, da dieser aus Gründen der Stabilität und Lastenverteilung nahe am Gesamtschwerpunkt liegt.

Die Ergebnisse dieser Frachtkonfiguration zeigen, dass die detaillierte Massenberechnung durch FUGA unter Berücksichtigung der Nutzlast aussagekräftige Ergebnisse für den Vorentwurfsprozess liefert. Durch die Rückführung dieser Masseninformationen in den Entwurfsprozess ist es möglich, die Passagierkabine als Frachtkabine zu untersuchen. Dieser Ansatz ermöglicht es, den Einfluss der Frachtkabinenkonfiguration auf den gesamten Flugzeugentwurf umbaufähiger Passagierflugzeuge bereits in einer frühen Phase zu untersuchen und zu bewerten. Zu beachten ist jedoch, dass die Ergebnisse primär den Einfluss der Nutzlast auf den Vorentwurf widerspiegeln. Um den Entwurf von Frachtflugzeugkabinen detaillierter zu gestalten, müssen weitere Einflussfaktoren wie die Position und Masse der MDCD sowie zusätzliche Sekundärelemente im Bereich der Betriebsmittel und Ausstattung berücksichtigt werden. Außerdem variieren die Systeme der Frachtkabinen im Vergleich zu den Passagierkabinen, was eine präzisere Auslegung der Kabinensysteme erfordert. Abbildung 5.19 zeigt den MCG des Massenentwurfs für die Frachtflugzeugkabinen und verdeutlicht, dass der Massenentwurf überwiegend durch die Nutzlast bestimmt wird. Der modulare Aufbau von FUGA bietet jedoch eine geeignete Grundlage, um den wissensbasierten Entwurf von Frachtflugzeugkabinen künftig um zusätzliche Elemente zu erweitern und so den Detaillierungsgrad der Entwurfsprozesse zu steigern. Zudem können die

detaillierten Massen der Nutzlast verwendet werden, um bessere Strukturmassen zu bestimmen.

Zweite Frachtkonfiguration mit Schwerpunktausgleich

Abbildung 7.5 zeigt die zweite Frachtkonfiguration, bei der die Anzahl und Anordnung der ULDs im unteren Deck so angepasst wurde, dass der Gesamtschwerpunkt des Flugzeugs möglichst nahe an dem der Referenzkonfiguration liegt. Diese Variante wurde mittels der neuen wissensbasierten Entwurfsmethode einer Nutzlast von 27,5 t ausgelegt.

Im Vergleich zum Referenzmodell liegt der resultierende Gesamtschwerpunkt lediglich 0,12 m weiter vorne. Auch die Position des Flügels musste nur um 0,09 m nach vorne verschoben werden (siehe Abbildung A.13). Dies hatte wiederum nur sehr geringe Auswirkungen auf die Geometrien der Leitwerke (vgl. Abbildung A.14). Die Positionen des Fahrwerks dieser Flugzeugkonfiguration sind gegenüber dem Referenzmodell nahezu identisch. Die minimalen Änderungen in der Schwerpunktlage der verschiedenen Komponenten zeigen, dass diese Frachtkonfiguration der Passagierkonfiguration strukturell sehr ähnlich ist. Die Möglichkeit, die Passagierkabine als Frachtkabine mit nahezu identischem Schwerpunkt zu gestalten, erlaubt die Untersuchung des Umrüstungspotenzials und der betrieblichen Flexibilität bereits im frühen Entwurfsprozess. Ein weiterer Vorteil dieses Entwurfsansatzes liegt in der Integration der von FUGA bereitgestellten Methode. Diese ermöglicht es, die Passagierkabine als Frachtkabine zu betrachten und eine optimale Frachtauslastung unter Berücksichtigung eines festen Schwerpunkts zu ermitteln. Auf dieser Grundlage können zukünftig weitere Analysen durchgeführt werden, beispielsweise zur optimierten Umrüstbarkeit von Passagier- zu Frachtflugzeugen im frühen Entwurfsstadium. Dabei werden die strukturellen und betrieblichen Anforderungen beider Kabinenkonfigurationen berücksichtigt.

Zusammengefasst zeigt diese Frachtkonfiguration, dass der wissensbasierte Entwurfsansatz nicht nur bei der detaillierten Massenrückführung und Bauraumuntersuchung, sondern auch bei der Verbesserung der Vorhersage der Umrüstbarkeit und betrieblichen Flexibilität von Passagierflugzeugen erfolgreich eingesetzt werden kann. Die Möglichkeit, den Schwerpunkt der Frachtflugzeugkabinen durch unterschiedliche Kabinenkonfigurationen an die Passagierkabine anzunähern und dabei eine optimale Frachtauslastung zu berücksichtigen, ist ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes. Ein zukünftiger Fokus könnte darauf liegen, aufbauend auf dem wissensbasierten Entwurf, mittels hochfidelen Methoden die Berechnungen für die Struktur zu ergänzen. So könnten noch präzisere und tiefere Einblicke in die Auswirkungen von Frachtkonfiguratio-

nen auf den gesamten Flugzeugentwurf von Passagierflugzeugen gewonnen werden. Denn eine höhere Nutzlast der Frachtflugzeugkabinen geht immer mit einer verstärkten Kabinenstruktur einher, was wiederum Einfluss auf die Massen und deren Schwerpunkte hat und somit den Gesamtentwurf weiter beeinflusst.

7.3. Reflexion der Hypothesen

7.3.1. Hypothese 1

Die erste Hypothese postuliert, dass sich das ursprünglich für die Rumpf-Kabinen-Integration von Passagierflugzeugen entwickelte KBE-Framework FUGA auch auf die Entwicklung von Frachtflugzeugkabinen mit ihren spezifischen Anforderungen übertragen lässt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Modifikationen und Erweiterungen vorgenommen, die im Folgenden aufgeführt und diskutiert werden.

Insgesamt gibt es fünf neue Konfigurationsdateien und vier neue Regelwerke. Diese sind in der Tabelle 5.1 grün hervorgehoben. Darüber hinaus wurden weitere Regelwerke für den Struktur-entwurf, die Kabinenlayouts und das Parsen CPACS-konformer Entwurfsergebnisse angepasst. In den Konfigurationsdateien instanziiert jede Klasse eine zugehörige Plug-in-Klasse. Diese nimmt spezifische Parameter in Form von Konfigurationswerten und Pfadangaben entgegen und organisiert anschließend die jeweilige Subsystemstruktur. Die Plug-in-Architektur dient außerdem der systematischen Verwaltung der regelbasierten Logik innerhalb der Subsysteme und deren Wissensverwaltung für das zentrale Datenrepositorium. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, gewährleistet dieser modulare Aufbau die Erweiterbarkeit und Flexibilität des KBE-Systems. Zudem ermöglichen der modulare Aufbau und der graphenbasierte Ansatz der Inferenzmaschine die Generierung subsystemspezifischer MCGs und unterstützen Verfahren wie verzögerte Auswertung (Lazy Evaluation), Zwischenspeicherung (Caching) und automatische Ungültigkeitserklärung (Invalidation) während der Regelverarbeitung. Damit lassen sich dedizierte MCGs zu Auswertungs- und Dokumentationszwecken für den Entwurf von Frachtflugzeugkabinen und den Massenentwurf erstellen.

Die zur Laufzeit der Entwurfssysteme erzeugten GraphML-Dateien werden mit dem Grapheneditor yEd visualisiert. In Abbildung 7.6 ist der MCG des Frachtkabinenentwurfs dargestellt. Dabei sind neu entwickelte Regeln in Rot, modifizierte Regeln aus dem Passagiersystem in Blau und übernommene Regeln aus dem Passagierflugzeugentwurf ohne Farbmarkierung

gekennzeichnet. Abbildung 5.19 zeigt den entsprechenden MCG für die Massenauslegung. Auch hier kennzeichnen rote Knoten neue Entwurfsregeln zur Berücksichtigung von ULDs auf dem oberen Deck und der starren 9g-Wand, während blaue Knoten modifizierte Regeln aus dem Passagierentwurfssystem repräsentieren.

Abbildung A.6 demonstriert den FPG für die Rumpfausschnittelemente und verdeutlicht, welche Regeln für die Strukturentwurfsregelwerke in `fuga.design` und `fuga.geometry` modifiziert werden mussten (blau markiert). Alle methodischen Erweiterungen und Anpassungen des in Abbildung A.6 dargestellten FPGs der Rumpfausschnittelemente sind ausführlich in Abschnitt 5.2 sowie in Abschnitt 5.4 beschrieben. Darüber hinaus wurden zusätzliche Funktionen in das Regelwerk `plot_2d` integriert, um Querschnittsdarstellungen und Maßanalysen für Frachtkabinen zu ermöglichen. Weiterhin wurde das Regelwerk `util.tree_update` im Paket `fuga.cpacs` erweitert, sodass alle Entwurfsergebnisse CPACS-konform gespeichert und in disziplinübergreifenden Prozessen weiterverwendet werden können (siehe Abschnitt 5.8).

Der modulare Aufbau des FUGA-Frameworks ermöglichte eine einfache Integration der neuen Produktarchitektur für Frachtflugzeuge in das bestehende wissensbasierte System. Dabei wurde der vorhandene Struktur- und Formlinienentwurf mit dem Entwurf der Frachtkabinen verknüpft. Die Wiederverwendung bestehender Wissensregeln und Methoden auf Basis des modularen Aufbaus war der größte Erfolgsfaktor bei der Implementierung, da sich dadurch der Entwicklungsaufwand und die Entwicklungszeit stark reduzierten. Eine der größten Herausforderungen bestand darin, den Strukturentwurf des Frachtflugzeugentwurfssystems klar vom Passagierflugzeugentwurfssystem zu trennen. Dies konnte durch Abfragen in den jeweiligen Regeln und die im FUGA-Framework integrierte Möglichkeit, Wissensregeln optional in das System zu integrieren, erfolgreich umgesetzt werden (siehe Abschnitt 5.2). Die in dieser Arbeit umgesetzte wissensbasierte Entwurfsmethode für Frachtflugzeugkabinen deckt sich mit den in Abschnitt 3.6 erarbeiteten Stand der Wissenschaft. In diesem hebt Walther (2024) nicht nur den disruptiven Ansatz zwischen der Integration von OML, Struktur- und Kabinenentwurf hervor, sondern zeigt auch den großen Mehrwert des KBE-Systems auf. Durch den modularen und graphenbasierten Ansatz ermöglicht es die Implementierung neuer Produktarchitekturen in das bestehende System bei gleichzeitiger Verwendung vorhandener Subsysteme wie dem Formlinien- und Strukturentwurf. Obwohl sich die Umsetzung auf eine reduzierte Anzahl an Kabinenelementen beschränkte, konnte durch die entwickelten methodischen Erweiterungen ein automatisierter und wissensbasierter Entwurfsprozess für Frachtflugzeugkabinen realisiert werden. Zudem zeigt die Literaturrecherche und die Analyse in Abschnitt 3.6, dass der

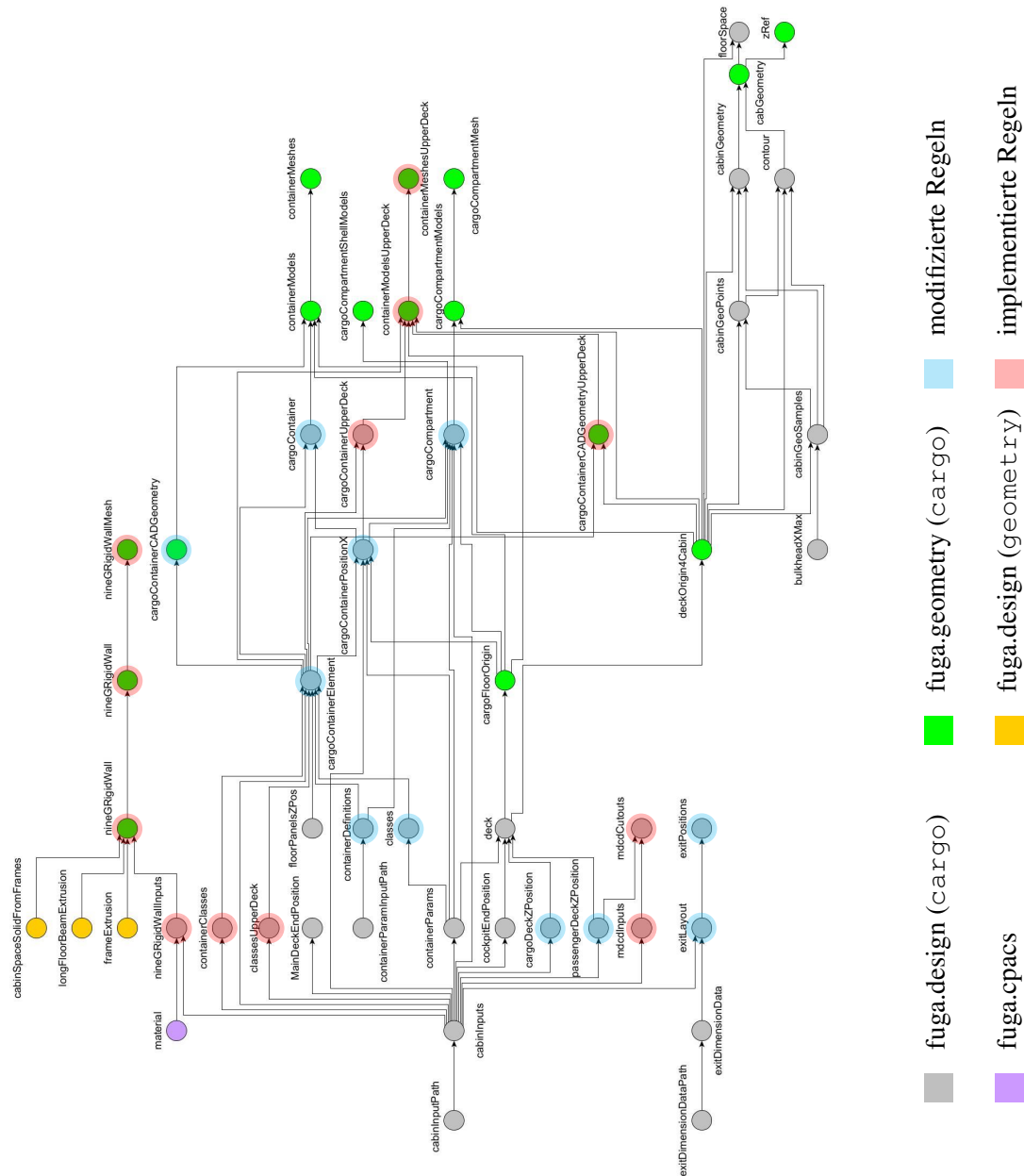


Abbildung 7.6.: MCG für den Kabinenentwurf der Frachtflugzeuge, der alle Wissensregeln des Frachtflugzeugentwurfs repräsentiert

wissensbasierte Entwurf von Frachtflugzeugen disruptiv ist und der hier vorgestellte Ansatz damit einen wichtigen Baustein für den Gesamtflugzeugentwurf darstellt. Dies ermöglicht die Bewertung von Frachtkonfigurationen in den frühen Entwurfsphasen umbaufähiger Flugzeuge und die Rückführung der Entwurfsparameter wie Massen und deren Positionen in den konzeptionellen Gesamtentwurf. Die Ergebnisse der umgesetzten wissensbasierten Methoden zur Rumpfindegration der Frachtflugzeugkabinen zeigen, dass die erste Hypothese eindeutig belegt werden kann.

Die in dieser Arbeit umgesetzten Methoden für den Entwurf der Frachtflugzeugkabinen im FUGA-Framework bieten einen validen Ausgangspunkt für vertiefende Forschungsarbeiten und Analysen. Dazu zählen die Integration zusätzlicher Kabinenelemente wie Seitenwandpaneele oder Aufenthaltsbereiche für die Flugzeugbesatzung, die Berücksichtigung der Massen der MD-CD sowie die Anbindung primärer und sekundärer Systeme. Die disziplinübergreifende Anbindung an Analysewerkzeuge anderer Experten, etwa zur FEM- oder Crash-Simulation, erhöht den Detaillierungsgrad der Entwurfsprozesse. Ein höherer Detaillierungsgrad für den Entwurf der Frachtflugzeugkabinen ermöglicht zusätzliche Analysen. Dadurch kann eine genaue Untersuchung zur Umrüstung von Passagier- zu Frachtflugzeugen vorgenommen werden. Aufbauend auf den aktuellen Stand der neuen Entwurfsmethoden kann in einem multidisziplinären Entwurfsprozess die Anbindung des automatisierten und wissensbasierten initialen Rumpf- und Kabinenentwurfs für Passagier- und Frachtflugzeuge an den konzeptionellen Flugzeugentwurf vertiefend untersucht werden.

7.3.2. Hypothese 2

Die zweite Hypothese postuliert, dass die entwickelte Entwurfsmethodik und Wissensbasis für Frachtflugzeugkabinen eingesetzt werden kann, um den multidisziplinären Entwurfsprozess im Rahmen der Produktentwicklung von Flugzeugen zu unterstützen. Zur Orchestrierung der Analysen wurde die von FUGA bereitgestellte wissensbasierte Entwurfsmethodik in die integrative Umgebung von RCE eingebunden und mit dem Vorentwurfswerkzeug openAD in einem gemeinsamen, multidisziplinären Entwurfsprozess verknüpft. Anschließend wurde analysiert, mit welcher Sensitivität die zurückgeführten Masseninformationen aus dem wissensbasierten Entwurf und die daraus gewonnenen Erkenntnisse den Gesamtentwurfsprozess beeinflussen.

Die aus FUGA resultierenden Entwurfsergebnisse und Geometriemodelle der Passagier- und Frachtkabinen liefern genaue Massen- und Schwerpunktdaten. Die multidisziplinäre Analyse in

Abschnitt 7.2.1 hat ergeben, dass die Rückführung dieser Masseninformatioren unterschiedlicher Kabinenkonfigurationen den konzeptionellen Flugzeugvorentwurf durch eine höhere Detailltiefe unterstützt. Die zurückgeführten Massen und deren Einfluss auf unterschiedliche Strukturkomponenten verdeutlichen, wie zusätzliche Entwurfparameter mittels wissensbasierter Modellierung den Gesamtflugzeugentwurf durch eine höhere Detailltiefe verbessern. Auf Basis des Frachtflugzeugentwurfssystems konnten die umbaufähigen Passagierkabinen als Frachtkabinen ausgelegt und mittels multidisziplinärer Analyse an den Gesamtentwurfsprozess der Flugzeuge gekoppelt werden. Dadurch ist die Berücksichtigung weiterer Entwurfparameter für umbaufähige Passagierkabinen möglich, was Potenzial und Schnittstellen für zukünftige Synthesen zwischen Passagier- und Frachtkabine bietet. Die Einbettung des wissensbasierten Entwurfs in eine integrative Umgebung und die Anbindung an andere Disziplinen ermöglichen zudem einen hohen Automatisierungsgrad und minimieren den Zeitaufwand für den gesamten iterativen Entwurfsprozess. Der Ansatz ist zudem leicht erweiterbar, sodass weitere Disziplinen in die multidisziplinäre Analyse integriert werden können. Der gezeigte iterative Entwurfsprozess erlaubt darüber hinaus, dass neue Entwurfsentscheidungen schnell integriert und kontinuierlich verbessert werden können. Basierend auf den Ergebnissen und Analysen des multidisziplinären Entwurfsansatzes ist auch die zweite Hypothese eindeutig belegt.

7.3.3. Hypothese 3

Die letzte Hypothese postuliert, dass sich mit der praktischen Anwendung wissensbasierter und multidisziplinärer Entwurfsprozesse und den daraus abgeleiteten Ergebnissen die Herausforderungen des global wachsenden Marktes für Frachtflugzeuge im Bereich P2F konstruktiv angehen lassen. Um diese Hypothese zu beantworten, reicht es nicht aus, die Umbauprozesse aus nur einer Perspektive zu betrachten. Auch die frühen Phasen des Flugzeugentwurfs in Kombination mit innovativen Methoden zur Optimierung des gesamten Entwurfs müssen berücksichtigt werden. Eine besondere Herausforderung besteht darin, die spätere Umrüstung der Passagierkabinen in Frachtkabinen mit minimalem Aufwand für strukturelle Anpassungen umzusetzen, wobei das Passagierflugzeug seine Effizienz beibehält und diese nicht durch zusätzliche strukturelle Massen verliert.

Die frühzeitige Berücksichtigung der umbaufähigen Passagierkabinen und ihrer Frachtvarianten ist die Grundlage zur Minimierung der Komplexität späterer Umbauprozesse. Bereits in den frühen Entwurfsphasen werden unterschiedliche Nutzlastszenarien und deren Massenschwerpunkte berücksichtigt. Diese Annahmen helfen dabei, die strukturellen Anforderungen des

Frachtflugzeugs in den Entwurfsprozess zu integrieren, ohne dass eine Neuentwicklung erforderlich ist. Unterschiedliche Frachtkonfigurationen und die Verteilung der Massen beeinflussen den Gesamtschwerpunkt und somit die strukturelle Auslegung des Flugzeugs. Eine frühzeitige Modellierung dieser Szenarien ermöglicht die Untersuchung und Auslegung der strukturellen Anforderungen der Passagier- und der Frachtkonfiguration mit dem Ziel verbesserter Umbauprozesse.

Im Anwendungsfall der DLR-F25, die als Grundlage für die Untersuchung diente, wurden unterschiedliche Kabinenkonfigurationen mit spezifischen Nutzlasten analysiert. Diese Szenarien halfen dabei, die Auswirkungen auf den Schwerpunkt und Flugzeuggeometrie bereits im frühen Stadium zu bewerten. Alle Untersuchungen wurden auf Grundlage eines multidisziplinären Entwurfsprozesses durchgeführt. In einer integrativen Umgebung, wie sie durch die Anbindung des wissensbasierten Entwurfsansatzes von FUGA an openAD innerhalb des RCE-Systems ermöglicht wird, können alle relevanten Disziplinen miteinander verknüpft und der Entwurfsprozess der Flugzeuge iterativ optimiert werden. Diese Verbindung von Geometrie, Massenverteilung, Struktur und Nutzlast ermöglicht eine detaillierte und frühzeitige Betrachtung der Auswirkungen unterschiedlicher Frachtkonfigurationen auf den Gesamtentwurf des umbaufähigen Flugzeugs. Durch die Verknüpfung von verschiedenen Disziplinen kann die Auswirkungen von Änderungen in der Frachtkabinenkonfiguration auf die strukturellen Komponenten des Flugzeugs schnell bewertet werden.

Einer weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von Frachtflugzeugen im P2F-Bereich ist die strukturelle Untersuchung der Flugzeugkabine. Bisher lag der Fokus der Analyse primär auf der Nutzlast, der Kabinenausstattung und den Betriebsmitteln sowie der Einfluss dieser Größen auf bestimmte strukturelle Bauteile des Flugzeugs mit der Annahme einer gleichbleibenden Kabinenstruktur. Für eine Optimierung des Umbauprozesses die eine Zeit- und Kostenersparnis ermöglicht, ist es wichtig, die strukturellen Elemente der Kabinen und deren Wechselwirkungen mit den restlichen Flugzeugkomponenten zu untersuchen. Die strukturellen Anforderungen für Passagier- und Frachtkabinen unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzlasten die während des Fluges auf das Flugzeug wirken. Wenn Passagierkabinen in Frachtkabinen umgebaut werden, müssen die Trägerstrukturen und Böden neu ausgelegt werden, sodass diese die höheren Belastungen einer Frachtkabine tragen können. Diese strukturellen Änderungen müssen jedoch so entworfen werden, dass sie die Komplexität aus den Umbauprozessen verringern. Dieses Ziel kann durch zusätzliche Entwurfstiefe erreicht werden. Basierend auf den multidisziplinären Entwurf können zusätzliche Disziplinen mit hochfideliten Methoden zur

Strukturauslegung mit in den Entwurfsprozess eingebunden werden, um basierend auf den Nutzlastszenarien der Passagier- und Frachtkabinen eine geeignete Synthese zur Auslegung der Struktur durchzuführen, was dann eine Bewertung der Umbauprozesse ermöglichen würde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Möglichkeit zur Verbesserung der Umrüstung von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen in der frühen Vorentwurfsphase liegt. Ein wissenschaftlicher und multidisziplinärer Ansatz, der die strukturellen Anforderungen der Kabine in Kombination mit den Nutzlastszenarien berücksichtigt, bietet Potenzial, die Umbauprozesse zu vereinfachen. Eine Synthese im Vorentwurfsprozess der Passagierkabinen und ihrer umgebauten Frachtvarianten kann zu einer optimierten strukturellen Auslegung beitragen. Damit kann die Komplexität der Umbauprozesse verringert werden, was einen positiven Einfluss auf den wachsenden P2F-Markt hat, indem Zeit und Kosten bei der Umwandlung der Flugzeuge reduziert wird. Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass die dritte Hypothese nur teilweise beantwortet werden kann, um detaillierte Aussagen über die Umbauprozesse von Passagier- und deren Frachtkabinen machen zu können, fehlt die Einbindung detaillierter Strukturauslegungen der Frachtkabinen.

8. Fazit und Ausblick

In diesem letzten Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der in dieser Forschungsarbeit entwickelten wissensbasierten Entwurfsmethoden für Frachtflugzeugkabinen sowie der darauf aufbauenden iterativen Entwurfsoptimierung zusammengefasst. Zunächst werden die wichtigsten Auswertungen der Plausibilitätsprüfung des neuen Frachtflugzeugentwurfssystems für die Flugzeugtypen D189 und D240 sowie die daraus resultierende Diskussion der ersten Hypothese rückblickend betrachtet. Anschließend werden die relevantesten Erkenntnisse aus der iterativen Entwurfsoptimierung zusammengetragen, was zur Diskussion der beiden letzten Hypothesen führt. Dazu wurde die Anwendung aller neu entwickelten Methoden für den wissensbasierten Entwurf und die iterative Entwurfsoptimierung am Flugzeugtyp DLR-F25 unter verschiedenen Konfigurationen für Passagier- und Frachtkabinen erprobt und im Kontext des Gesamtflugzeugentwurfs bewertet. Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten gegeben.

8.1. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

In dieser Arbeit wurde auf Basis des KBE-Frameworks FUGA ein Entwurfssystem für Frachtflugzeugkabinen entwickelt. Das Ziel bestand darin, den initialen, automatisierten Rumpf- und Kabinenentwurf auf die neue, CPACS-datenbasierte Produktarchitektur von Frachtflugzeugkabinen zu erweitern. Ausgehend vom wissensbasierten Passagier- und Frachtkabinenentwurf wurden die neuen Methoden zur multidisziplinären Entwurfsoptimierung in der Praxis angewandt. Zu diesem Zweck wurden die wissensbasierten Methoden für den Passagier- und Frachtkabinenentwurf zunächst in die RCE-Integrationsumgebung als Werkzeug eingebettet und in einem disziplinübergreifenden Workflow mit dem Vorentwurfswerkzeug openAD verknüpft. Dadurch war ein automatisierter und gemeinsamer Entwurfsprozess beider Werkzeuge und ihrer enthaltenen Methoden möglich. Dies schaffte die Voraussetzung für eine automatisierte Rückführung von Informationen aus dem detaillierten, wissensbasierten Entwurfsprozess in den Vorentwurfsprozess der Flugzeuge, was eine disziplinübergreifende Bewertung der neuen Methoden erlaubte. Die methodische Herangehensweise bildet die Grundlage zur Reflexion und

Bewertung der in Kapitel 1 formulierten Hypothesen. Dabei ging es um die notwendigen methodischen Erweiterungen im KBE-Framework für die Rumpfindegration von Frachtflugzeugen und darum, dass diese innerhalb multidisziplinärer Entwurfsprozesse eingesetzt werden können, um einen ganzheitlichen Flugzeugentwurf zu unterstützen. Ein weiteres Ziel besteht darin, die Herausforderungen des global wachsenden Frachtflugzeugmarktes mit den neuen methodischen Ansätzen anzugehen.

Im ersten Teil des Ergebniskapitels in Abschnitt 7.1 wurden alle Regelanpassungen und -erweiterungen im FUGA-Framework auf Plausibilität überprüft, womit eine korrekte Umsetzung der neuen wissensbasierten Entwurfsmethoden für anforderungsspezifische Frachtflugzeugkonfigurationen gezeigt wurde. Die Plausibilitätsprüfung des neuen Entwurfssystems für Frachtflugzeugkabinen erfolgte anhand der beiden Flugzeugtypen D180 und D239. Diese wurden zunächst mit FUGA anhand ausgewählter benutzerdefinierter Entwurfssparameter ausgelegt. Die auf diese Weise erstellten praxisbezogenen Kabinenlayouts wurden ihren jeweiligen Referenzmodellen aus Industrie und Forschung gegenübergestellt. Dabei wiesen die Entwurfsergebnisse eine hohe Übereinstimmung mit den Referenzkonfigurationen des A320 und A321 bezüglich der Platzierung der Container in der Kabinenkonfiguration auf. Zusätzlich wurde die korrekte Umsetzung der neuen Entwurfsregeln für die Sekundärelemente 9g-Barriere, MD CD und Tür erfolgreich überprüft. Zur Überprüfung des neuen Massentwurfssystems wurden die berechneten Massen der jeweiligen Flugzeugmodelle in Form von Sphärenmodellen mit den Geometriemodellen der Flugzeugkonfiguration in einem Modell zusammengeführt. Die anschließende visuelle Analyse bestätigte eine korrekte Umsetzung der Massenberechnungen, indem die jeweiligen Massenkomponenten Positionsgenau ihren Kabinenelementen zugeordnet waren. Abschließend wurden die korrekte Berechnungen und Positionierungen der Massen für das neue Massentwurfssystem der Frachtkabinen durch zusätzliche manuelle Rechnungen anhand des Typs D239 für die beiden letzten Container auf dem oberen und unteren Frachtdeck bestätigt. Alle Überprüfungen stellen sicher, dass die Ergebnisse für die iterative Entwurfsoptimierung zuverlässige und aussagekräftige Informationen für weitere Analysen liefern.

Die durch FUGA bereitgestellte modulare Plugin-Architektur ermöglichte eine vergleichsweise unkomplizierte Implementierung des neuen Entwurfssystems in das bestehende wissensbasierte Framework. Dafür wurden die vorhandene Subsysteme für den Formlinien- und Strukturentwurf mit dem neuen Frachtflugzeugentwurfssystem verknüpft. Dies zeigt eine der einzigartigen Eigenschaften des FUGA-Frameworks in Kombination mit dem graphenbasierte. Dadurch konnten Komplexität und Zeitaufwand um ein Vielfaches minimiert werden.

So war die Integration einer neuen Produktarchitektur innerhalb kurzer Zeit möglich, indem auf vorhandenes domänenspezifisches Expertenwissen für anforderungsspezifische Anwendungen im Bereich des Rumpf- und Kabinenentwurfs zugegriffen werden konnte. Außerdem wurde aufgezeigt, welche methodischen Erweiterungen erforderlich waren, um ein erstes Entwurfssystem für Frachtflugzeugkabinen zu realisieren. Das neue Entwurfssystem liefert konsistente und nachvollziehbare Ergebnisse und stellt diese in CPACS-Produktdatenformat für weitere Analysen und andere Disziplinen zur Verfügung. Durch die Anwendung der wissensbasierten Entwurfsmethodik auf unterschiedliche Flugzeugtypen wurde zudem gezeigt, dass sie auf alle CPACS-konformen Flugzeugmodelle anwendbar ist. Die in Kapitel 5 vorgestellte Rumpfintegration von Frachtflugzeugen stellt somit einen disruptiven Ansatz für den wissensbasierten Entwurf dieser Produktarchitektur dar. Dies ist ein wichtiger Baustein für das Konzept des digitalen Fadens und unterstützt einen ganzheitlichen Entwurfsprozess von Flugzeugen, da er die Bewertung von Passagierkabinen und umgebauten Frachtkabinen im frühen Entwurfsprozess ermöglicht. Die generierten Frachtkabinen der D189 und D240 zeigen zudem eine weitere starke Eigenschaft der wissensbasierten Modellierung von KBE-Systemen, die die schnelle Modellierung und Untersuchung unterschiedlicher Frachtkonfigurationen in kurzer Zeit ermöglicht, was die Forschungs- und Entwicklungszeiten reduziert. Die Modularität des Frameworks und der regelbasierte Entwurfssatz erlauben eine einfache Erweiterung der Entwurfsmethodik für Frachtflugzeugkabinen und bieten somit einen guten Ausgangspunkt für weitere Anknüpfungspunkte in der Forschung. Aufbauend auf den Resultaten des ersten Ergebnisteils konnte die erste Hypothese diskutiert und eindeutig belegt werden.

Im zweiten Teil des Ergebniskapitels des Abschnitts 7.2 wurde die Rückführung der Entwurfsergebnisse der von FUGA generierten Kabinenkonfigurationen für Passagier- und Frachtkabinen in den konzeptionellen Flugzeugvorentwurf innerhalb eines multidisziplinären Entwurfsprozesses untersucht. Anhand von drei unterschiedlichen Kabinenkonfigurationen der DLR-F25 (Passagierkabine, Frachtkonfiguration mit maximaler Beladung und Frachtkonfiguration mit Schwerpunktannäherung zum Referenzmodell) wurde gezeigt, wie sich verschiedene Kabinenauslegungen auf den frühen Vorentwurf von Flugzeugen auswirken. Für die Untersuchungen wurden vereinfachte Entwurfsannahmen getroffen, sodass die Rumpfstruktur-, System- und Treibstoffmassen für alle Konfigurationen gegenüber dem Referenzmodell konstant gehalten wurden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Berücksichtigung der Informationen aus den detaillierten, wissensbasierten Entwurfsprozessen insbesondere für die Nutzlastverteilung einen signifikanten Einfluss auf den Entwurfsraum des frühen Flugzeugvorentwurfs hat. Dies wird durch die Veränderung der Schwerpunktlage für die ausgelegte Passagierkabine und die

maximal beladene Frachtkabine deutlich. Der neue Gesamtschwerpunkt des Flugzeugs führte zu deutlichen Anpassungen der Flügelpositionen, Leitwerksgeometrien und Fahrwerkspositionen gegenüber dem Referenzmodell und beeinflusst somit die aerodynamischen und strukturellen Parameter in der konzeptionellen Entwurfsphase durch einen höheren Detaillierungsgrad für den gesamten Entwurfsprozess. Demgegenüber konnte die zweite Frachtkonfiguration durch eine angepasste Containeranordnung auf dem unteren Frachtdeck eine nahezu identische Schwerpunktlage gegenüber dem Referenzmodell erreichen. Dies hat nur einen minimalen Einfluss auf den Vorentwurfsprozess. Das zeigt, dass das Entwurfssystem eingesetzt werden kann, um eine optimale Nutzlastverteilung der Frachtkabine zu ermitteln, bei der auch die Nutzlastverteilung der Passagierkabine berücksichtigt wird. Die Möglichkeit, unterschiedliche Passagierkabinen und deren Frachtvarianten im konzeptionellen Vorentwurf zu untersuchen, zeigt das Potenzial des Frachtflugzeugentwurfssystems, Umrüstungsentscheidungen in der frühen Entwurfsphase von Flugzeugen zu unterstützen und eine optimale Frachtausnutzung zu berücksichtigen. Um jedoch präzisere Aussagen zur Umrüstung der Passagierkabinen treffen zu können, muss die detaillierte Auslegung der Kabinenstruktur basierend auf den Lastfällen der Nutzlastszenarien in den Entwurfsprozessen berücksichtigt werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse und Analyse der iterativen Entwurfsoptimierung ermöglichen die Reflexion zur zweiten Forschungshypothese, die damit ebenfalls eindeutig belegt werden kann.

Die Einbettung der wissensbasierten Entwurfsmethoden in die RCE-Integrationsumgebung als disziplinübergreifendes Werkzeug bildet die Grundlage für vertiefende Analysen innerhalb des gesamten Entwurfsprozesses. Durch die kombinierte Anwendung des wissensbasierten Entwurfs von Passagier- und Frachtkabinen und des multidisziplinären Analyseprozesses können detaillierte Kabinenkonfigurationen in den Flugzeugvorentwurfsprozess integriert werden. Dies erhöht die Aussagekraft und Genauigkeit des Gesamtentwurfs, da die umbaufähigen Passagierkabinen bereits in einem frühen Stadium als Frachtkabinen bewertet werden können. Die multidisziplinäre Analyse zur Auslegung von Passagier- und Frachtkabinen zeigt, dass die frühzeitige Betrachtung umbaufähiger Passagierkabinen als Frachtkabinen Potenziale und Schnittstellen für zukünftige Synthesen beider Produktarchitekturen bietet. Damit können künftig in einem gemeinsamen Entwurfsprozess die besten Entwurfsparameter zwischen Passagier- und Frachtkabinen identifiziert werden. Zudem ermöglicht die integrative, disziplinübergreifende Anbindung der wissensbasierten Entwurfssysteme in RCE einen leicht erweiterbaren Ansatz mit Schnittstellen zu anderen Disziplinen und hohem Automatisierungsgrad.

Die dritte Hypothese befasst sich mit der Eignung des wissensbasierten Entwurfs für Fracht-

flugzeugkabinen in Kombination mit multidisziplinären Analysen zur Optimierung der P2F-Umbauprozesse. Im Hinblick auf die vorliegenden Ergebnisse und Analysen aus der exemplarischen Anwendung an der DLR-F25 kann die letzte Hypothese nur teilweise belegt werden. Im aktuellen Stadium dieser Forschung gibt es Restriktionen für eine ganzheitliche Bewertung der Umbauprozesse, da hochfidele Methoden im Bereich der Strukturauslegung fehlen. Die Möglichkeit, Passagier- und Frachtkabinen gemeinsam im multidisziplinären Entwurf zu betrachten und verschiedene Konfigurationen auf ihre Auswirkungen zu prüfen, macht den praktischen Nutzen des wissensbasierten Ansatzes deutlich. Zudem können in kurzer Zeit viele unterschiedliche Entwurfsannahmen untersucht werden. Die wissensbasierte Modellierung und Analyse von Passagier- und Frachtkabinen innerhalb des Flugzeugvorentwurfs in einem disziplinübergreifenden, automatisierten, multidisziplinären Workflow bietet zudem einen geeigneten Anknüpfungspunkt für weitere Disziplinen und Methoden der detaillierten Struktur- und Systemauslegung. Aufbauend auf den wissensbasierten Kabinenauslegungen kann eine hochgenaue Auslegung der Struktur des Flugzeugrumpfes erfolgen. Derzeit basiert die strukturelle Auslegung der Kabinen im Flugzeugvorentwurf auf Annahmen für Passagierkabinen. Demzufolge müssen die strukturellen Änderungen der Umbauprozesse für Frachtkabinen ebenfalls zurückgeführt und für den Gesamtentwurf berücksichtigt werden. Dies ermöglicht eine fundierte Bewertung der Umbauprozesse von Passagierflugzeugen und ihren Frachtvarianten unter Anwendung unterschiedlicher Nutzlastszenarien. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die wissensbasierte Modellierung für Frachtflugzeugkabinen durchaus Anwendungspotenzial für zukünftige Entwicklungen im Bereich P2F zeigt. Durch die Integration hochfideler Methoden für die Struktur- und Systemauslegung kann dieses Potenzial deutlich gesteigert werden.

8.2. Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Die in Abschnitt 8.1 zusammengefassten Ergebnisse verdeutlichen, dass die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze lediglich einen Einblick in den Gesamtflugzeugentwurf geben. Zudem steht die Betrachtung von Passagierkabinen als Frachtflugzeugkabinen mittels wissensbasierter Modellierung noch am Anfang. Dennoch zeigen die Ergebnisse in Abschnitt 8.1, dass der wissensbasierte Entwurfsansatz für Frachtflugzeugkabinen den Gesamtentwurfsprozess der Flugzeuge unterstützt und großes Potenzial für die Verbesserung der Umbauprozesse von Passagierkabinen mit sich bringt. Mit hochgenauen Analysen umbaufähiger Passagierkabinen kann der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz zukünftig erweitert werden. Diese Bewertungen können dann in die Vorentwurfsphase der Flugzeuge einfließen und die Entscheidungsgrundlage im Vorentwurf verbessern, womit dann die Umbauprozesse der Frachtkabinen nachhaltiger und

kostengünstiger gestaltet werden können.

So kann der wissensbasierte Entwurf von Frachtkabinen durch weitere Sekundärelemente zukünftig detaillierter gestaltet werden. Dadurch würde sich der Detaillierungsgrad und somit die Aussagekraft der Rückführung von Informationen aus der wissensbasierten Kabinenauslegung in den Vorentwurfsprozessen erhöhen. Gerade im Bereich der strukturellen Veränderungen von Frachtflugzeugkabinen fehlen derzeit geeignete Methoden, um die strukturelle Belastung zu ermitteln und die Auslegung vorzunehmen. Bei strukturellen Veränderungen von Frachtkabinen müssen die neuen Nutzlastszenarien und die daraus resultierenden strukturellen Anpassungen sowie die MD CD, verdeckte Fenster und Türen für den detaillierten Strukturentwurf berücksichtigt werden. Durch die Integration der Flugzeugsysteme kann der Detaillierungsgrad der Frachtkabine weiter erhöht werden.

Angesichts des noch frühen Entwicklungsstadiums bietet der Ansatz der wissensbasierten Modellierung für Frachtflugzeugkabinen viel Potenzial für weitere Forschungen und Entwicklungen. Die bislang fehlende Einbindung von Passagierflugzeugen und deren Frachtflugzeugvarianten in die frühen Vorentwurfsphasen eröffnet damit ein zukunftsweisendes Innovationsfeld, was nicht nur einen ganzheitlicheren und nachhaltigeren Flugzeugentwurf durch verbesserte Umbauprozesse möglich macht, sondern auch den wachsenden Frachtflugzeugmarkt mit geeigneten Methoden unterstützt.

Literatur

- Agency, E. U. A. S. (2019). Certification Specifications for Large Aeroplanes (CS 25) [Initial Issue]. <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS%2025%20%28Initial%20issue%29.pdf>
- Airbus. (2024). *Freighter Family* [Zuletzt abgerufen am 07. Oktober 2024]. Verfügbar 2024 unter <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/freighter-family>
- AirportsCouncil. (2020). Air Freight – Historical perspective, industry background and key trends. <https://airportsCouncil.org/wp-content/uploads/2020/03/CHAPTER-1-AIR-FREIGHT-%E2%80%93-HISTORICAL-PERSPECTIVE-INDUSTRY-BACKGROUND-AND-KEY-TRENDS.pdf>
- Alder, M., & Skopnik, A. (2022). Development of a Software Library for Performant and Consistent CPACS Data Processing. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022*. <https://elib.dlr.de/190021/>
- Alder, M., Liersch, C., Hepperle, M., Maierl, R., Deinert, S., Kleinert, J., Siggel, M., Kohlgrüber, D., Moerland, E., & Nagel, B. (2024). 20 years of CPACS: A Brief History and Future Vision of Establishing a Common Language for Aircraft Design. *Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress (DLRK) 2024*. <https://elib.dlr.de/208791/>
- Ammar-Khodja, S., Perry, N., & Bernard, A. (2008). Processing Knowledge to Support Knowledge-based Engineering Systems Specification. *Concurrent Engineering*, 16(1), 89–101. <https://doi.org/10.1177/1063293X07084642>
- Aviation, N. (2024). Nordisk Aviation Products [Abgerufen am 3. November 2024]. <https://www.nordisk-aviation.com/>
- Baerlocher, D., Blättler, P., Bollinger, U., Brühwiler, A., Canevascini, F., Colbach, P., Helg, R., Kim, E., Kisseleff, R., Kleidt, M., Mettler, M., Nilles, P., Oblozinska, Z., Pauling, A., Reuter, C., Rietmann, P., Schläfli, M., & Zimmerli, T. (2024). Pioniere des Verkehrs - Band II: Eine Auswahl von Kurzbiographien zur Einführung in die Verkehrsgeschichte [IVT Schriftenreihe, 109]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000047976>

- Berlowitz, I. (2018). Narrow-Body B737NG Passenger Conversion to Freighter. *Proceedings of the 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0003_paper.pdf
- Boden, B., Flink, J., Först, N., Mischke, R., Schaffert, K., Weinert, A., Wohlan, A., & Schreiber, A. (2021). RCE: An Integration Environment for Engineering and Science [Preprint verfügbar unter <https://arxiv.org/abs/1908.03461>]. *SoftwareX*, 15. <https://elib.dlr.de/131958/>
- Boeing. (2012). Cargo pallets and containers [Abgerufen am 3. November 2024]. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/CargoPalletsContainers.pdf
- Boeing. (2021). *Commercial Market Outlook*. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/market/assets/downloads/CMO-2021-Report_13Sept21-A.pdf
- Chapman, C. B., & Pinfold, M. (2001). 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. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(01\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(01)00041-2)
- Containers, U. S. (2024). Cargo Air ULD Containers [Abgerufen am 3. November 2024]. <https://www.universalstoragecontainers.com/products-cargo-air-uld-containers/>
- Flugzeugwerke, E. (2024). Airbus Freighter Conversion [Zugriff am: 2025-04-04]. https://www.elbeflugzeugwerke.com/fileadmin/user_upload/pdf/solutions/freighter-conversion/EFW-Broch-AirbusFreighterConvert-07-Screen-EN.pdf
- Flugzeugwerke, E. (2025). A320/A321P2F – Die neue Frachter Generation [Zugriff am: 2025-04-21]. <https://www.elbeflugzeugwerke.com/de/leistungen/umruestung-zu-frachtflugzeugen/a320/a321p2f/>
- Häußler, M., & Borrmann, A. (2021). 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. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.012>
- Helmold, M. (2023). *Total Revenue Management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29773-1>
- Hesse, C., Walther, J.-N., Allebrodt, P., Wandel, M., Algermissen, S., & Dewald, R. D. (2023). Wissensbasierte Modellgenerierung für die Vorhersage von Kabinenlärm im Kontext des Flugzeugvorentwurfs. 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA). <https://elib.dlr.de/194485/>

- Hesse, C., Allebrodt, P., Teschner, M., & Biedermann, J. (2024). Knowledge-based model generation for aircraft cabin noise prediction from pre-design data. *CEAS Aeronautical Journal*. <https://elib.dlr.de/207450/>
- Kahn, A. B. (1962). Topological sorting of large networks. *Commun. ACM*, 5(11), 558–562. <https://doi.org/10.1145/368996.369025>
- Kügler, P., Dworschak, F., Schleich, B., & Wartzack, S. (2023). The evolution of knowledge-based engineering from a design research perspective: Literature review 2012–2021. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101892>
- La Rocca, G. (2012). Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 159–179. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.02.002>
- Meyer, H., Zimdahl, J., Kamtsiuris, A., Meissner, R., Raddatz, F., Haufe, S., & Bäßler, M. (2020). DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN FOR AVIATION RESEARCH. *Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress*. <https://elib.dlr.de/136848/>
- Mlynarčík, M., & Janovec, M. (2022). Conversion of Passenger Aircraft to Cargo Versions. *Proceedings of the Air Transport Department, University of Žilina*, 140–146. <https://doi.org/10.26552/pas.Z.2022.1.23>
- Sanya, I. O., & Shehab, E. M. (2014). An ontology framework for developing platform-independent knowledge-based engineering systems in the aerospace industry. *International Journal of Production Research*, 52(20), 6192–6215. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.919422>
- Schäfer, J. G. (2020). *Luftfracht*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-15192-8>
- Singer, D. (2014, November). *Entwicklung eines Prototyps für den Einsatz von Knowledge-based Engineering in frühen Phasen des Brückenentwurfs* [Magisterarb., Technische Universität München].
- Technology, O. C. (2024). Technical Overview [Accessed: 2024-11-29]. <https://dev.opencascade.org/>
- Tripathi, K. (2011). A Review on Knowledge-based Expert System. *International Journal of Computer Applications*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=19f89f1b19b558389e9c70b75403063376cb8e3d>
- Walther, J.-N. (2024). *Knowledge-based Engineering to provide Aircraft Fuselage Design Details for Multidisciplinary and Multifidelity Analysis Model Generation* (Techn. Ber.). Technische Universität Berlin. <https://elib.dlr.de/208032/>

- Walther, J.-N., Hesse, C., Alder, M., Biedermann, J., & Nagel, B. (2022a). Expansion of the cabin description within the CPACS air vehicle data schema to support detailed analyses. *CEAS Aeronautical Journal*. <https://elib.dlr.de/189457/>
- Walther, J.-N., Hesse, C., Biedermann, J., & Nagel, B. (2022b). Extensible aircraft fuselage model generation for a multidisciplinary, multi-fidelity context. *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. <https://elib.dlr.de/189459/>
- Woehler, S., Atanasov, G., Silberhorn, D., Fröhler, B., & Zill, T. (2020). Preliminary Aircraft Design within a Multidisciplinary and Multifidelity Design Environment. *Aerospace Europe Conference 2020*. <https://elib.dlr.de/185515/>
- Wöhler, S., Häßy, J., & Kriewall, V. (2024). Establishing the DLR-F25 as a Research Baseline Aircraft For the Short-Medium Range Market in 2035. *34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. <https://elib.dlr.de/208273/>
- Zhang, L., Bardell, N. S., & Baxter, G. S. (2018). The significance of the Chinese domestic market for narrow-body passenger-to-freighter (P2F) jet aircraft conversions. *Australasian Transport Research Forum 2018 Proceedings*. https://australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/03/ATRF2018_paper_12.pdf

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Stellen und Hinweise verwandt.

Alle Quellen, die dem World Wide Web entnommen oder in einer sonstigen digitalen Form verwendet wurden, sind der Arbeit beigelegt. Der Durchführung einer elektronischen Plagiatsprüfung stimme ich hiermit zu. Die eingereichte Datei entspricht der eingereichten Druckfassung.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hamburg, 30. September 2025

.....

(Unterschrift)

A. Anhänge

A.1. Gliederung nach Form des Flugzeugrumpfes

Tabelle A.1.: Übersicht einiger Frachtflugzeuge von Boeing und Airbus. Die Anzahl der 2017 in Betrieb befindlichen Flugzeuge sind in den Klammern dargestellt

Narrowbodies (bis 5 m Breite)	Mittelgroße Widebodies (5 m bis 6 m Breite)	Große Widebodies (über 6 m Breite)
A320-200F (geplant)	A300-600F (170) A310-200F/300F (11) A330-200F (36)	
MD-80 B737-300F/300F/400F B757-200F	B767-200F/300F (224) DC/MD10-10F (26)	B747F (262) B777F (129) MD-11F (116) DC/MD 10-30F (17)

Quelle: (Schäfer, 2020, S. 165)

A.2. Kabinenraum basierend auf Spantendefinitionen

Abbildung A.1 zeigt den Kabinenraum auf Grundlage der Spantendefinitionen. Diese Geometrie dient als Schnittkörper für die boolesche Operation zur Erzeugung der Begrenzungsstruktur der 9g-Barriere.

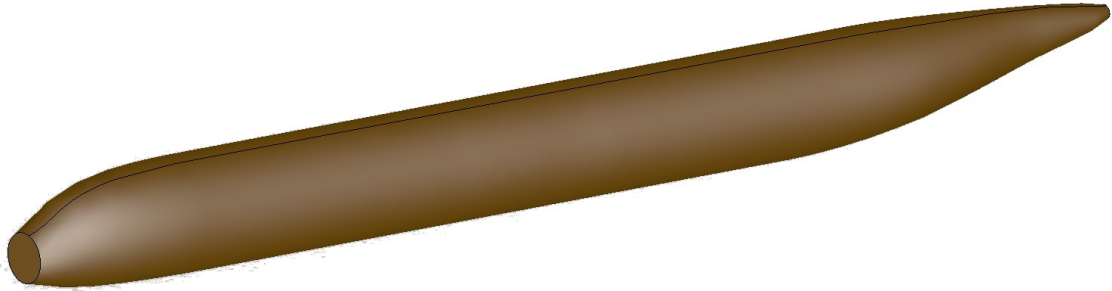


Abbildung A.1.: Kabinenraum basierend auf Spantendefinitionen

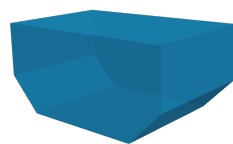
A.3. Übersicht relevanter ULDs

Die Tabelle A.3 gibt eine Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten ULDs und deren Eigenschaften. Die dargestellten Parameter wie Volumen, Abmessungen, Kontur und Leermasse werden für die Auslegung der Frachtkonfigurationen in den entsprechenden Entwurfsregeln verwendet. Ergänzend zur Tabelle sind in Abbildung A.2 alle ULDs und die jeweiligen Geometriemodelle dargestellt.

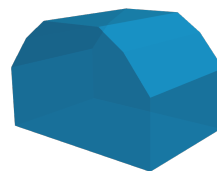
Tabelle A.2.: Übersicht verwendeter ULDs und ihrer Eigenschaften

IATA	Inneres Vol. [ft ³]	Höhe [in]	Tiefe [in]	Basisbreite [in]	Gesamtbreite [in]	Kontur	Leermasse [kg]
AKH	131	45	60.4	61.5	96	Doppelt	80
AAY	403	79.9	88	48.6	125	Doppelt	252
PAG	370	64	88	125	125	Alleine	110
AKE	159	64	88	61.5	78	Keine	71

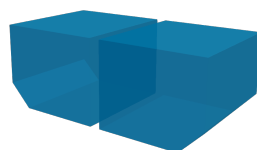
Quellen: (Containers, 2024), (Aviation, 2024), (Boeing, 2012)



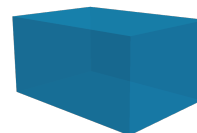
ULD-AKH



ULD-AAY



ULD-AKE



ULD-PAG

Abbildung A.2.: Abbildungen der ULD-Typen

A.4. Erforderliche Entwurfsdaten für den Strukturentwurf

Tabelle A.3.: Erforderliche initiale Entwurfsdaten für den Strukturentwurf

Component	Parameter/Data Item	Symbol	Source
Frames	Nominal frame pitch	$\Delta x_{fr,nom}$	User input deck
	Main/regular frame structural element	uID	User input deck
	Main/regular frame structural element	-	Donor model
Stringers	Number of stringers	$n_{stringers}$	User input deck
	Stringer structural element	uID	User input deck
	Stringer structural element	-	Donor model
Floors	Crossbeam z-position	z_{cb}	User input deck
	Crossbeam profile	uID	User input deck
	Crossbeam structural element	-	Donor model
	Crossbeam strut y-positions	y_{strut}	User input deck
	Crossbeam strut angles	ϕ_{strut}	User input deck
	Crossbeam strut structural element	uID	User input deck
	Crossbeam strut structural element	-	Donor model
	Longitudinal beam y-positions	y_{long}	Decks
	Longitudinal beam structural element	uID	Decks
	Longitudinal beam structural element	-	Donor model
	Floor panel number of frame	$n_{frames,panel}$	User input deck
	Floor panel thickness	t_{panel}	User input deck
	Floor panel material	uID	User input deck
	Floor panel material definition	-	Donor model
	Floor panel material definition	-	Donor model
Bulkheads	Number of bulkheads	n_{bulk}	User input deck
	Outer bulkhead x-positions	$x_{bulk,i}$	User input deck
	Spherical bulkhead radius at frame	r_{frame}	User input deck
	Spherical bulkhead depth	t_{dome}	User input deck
	Number of radial reinforcements	$n_{rein,f,r}$	User input deck
	Number of horizontal reinforcements	$n_{rein,f,h}$	User input deck
	Number of vertical reinforcements	$n_{rein,f,v}$	User input deck
	Bulkhead sheet thickness	$t_{sheet,bulk}$	User input deck
	Bulkhead sheet material	uID	User input deck
	Bulkhead sheet material definition	-	Donor model
	Bulkhead reinforcement structural element	uID	User input deck
	Bulkhead reinforcement structural element	-	Donor model
	Bulkhead reinforcement structural element	-	Donor model
Skin segments	Circumferential skin thicknesses	t_{skin}	User input deck
	Material	uID list	User input deck
	Material definitions	-	Donor model
	Start at zero degree switch	-	User input deck
Cutouts	Door widths	w_{door}	Decks
	Door heights	h_{door}	Decks
	Door corner radii	r_{door}	Decks
	Door positions	$x_{ref,door}, y_{ref,door}$	Decks
	Window width	w_{window}	User input deck
	Window height	h_{window}	User input deck
	Window corner radius	r_{window}	User input deck
	Window height above cabin floor	$z_{cab>window}$	User input deck

Quelle: (Walther, 2024, S. 149)

A.5. Flowchart des Entwurfsprozesses in openAD

Die Abbildung A.3 veranschaulicht die Struktur und den Ablauf des Workflows für den multi-disziplinären und multifidelen Entwurfsprozess eines Flugzeugs. Dieser ist in drei Hauptphasen unterteilt, L0 (konzeptionelle Phase), L1 (detaillierte Disziplinintegration) und L2 (hochdetaillierte Studien). Mit jeder Phase steigt der Detailgrad der Analyse durch den Einsatz spezifischer Tools und ihrer Methoden.

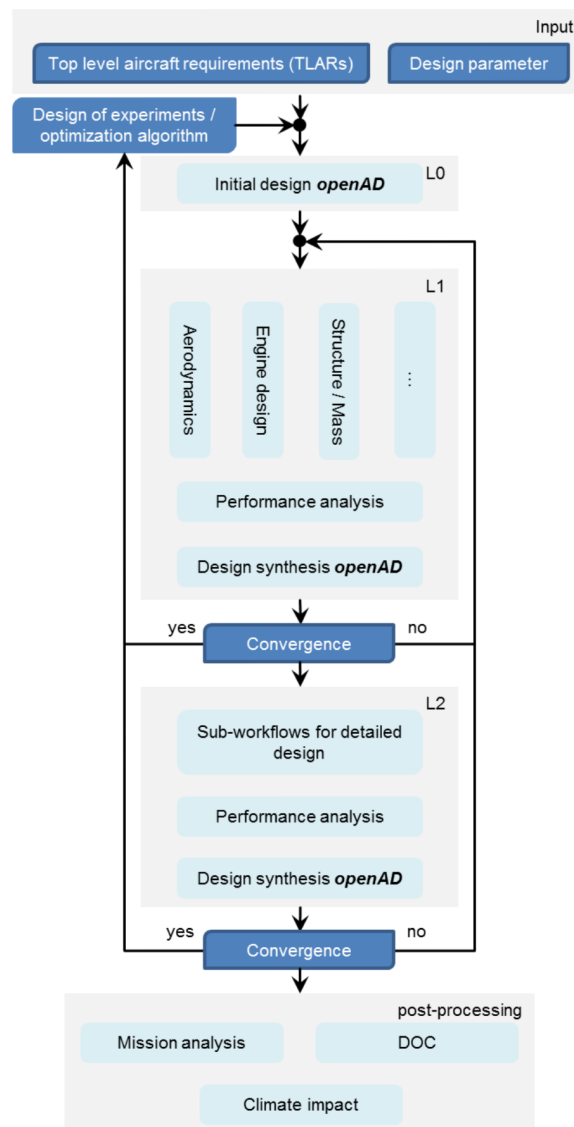


Abbildung A.3.: Flowchart des Entwurfsprozesses in openAD (Woehler et al., 2020)

A.6. FPG der Türausschnitte

Die Abbildung A.4 veranschaulicht den fundamentalen Problemlösungsgraphen für die Türausschnitte.

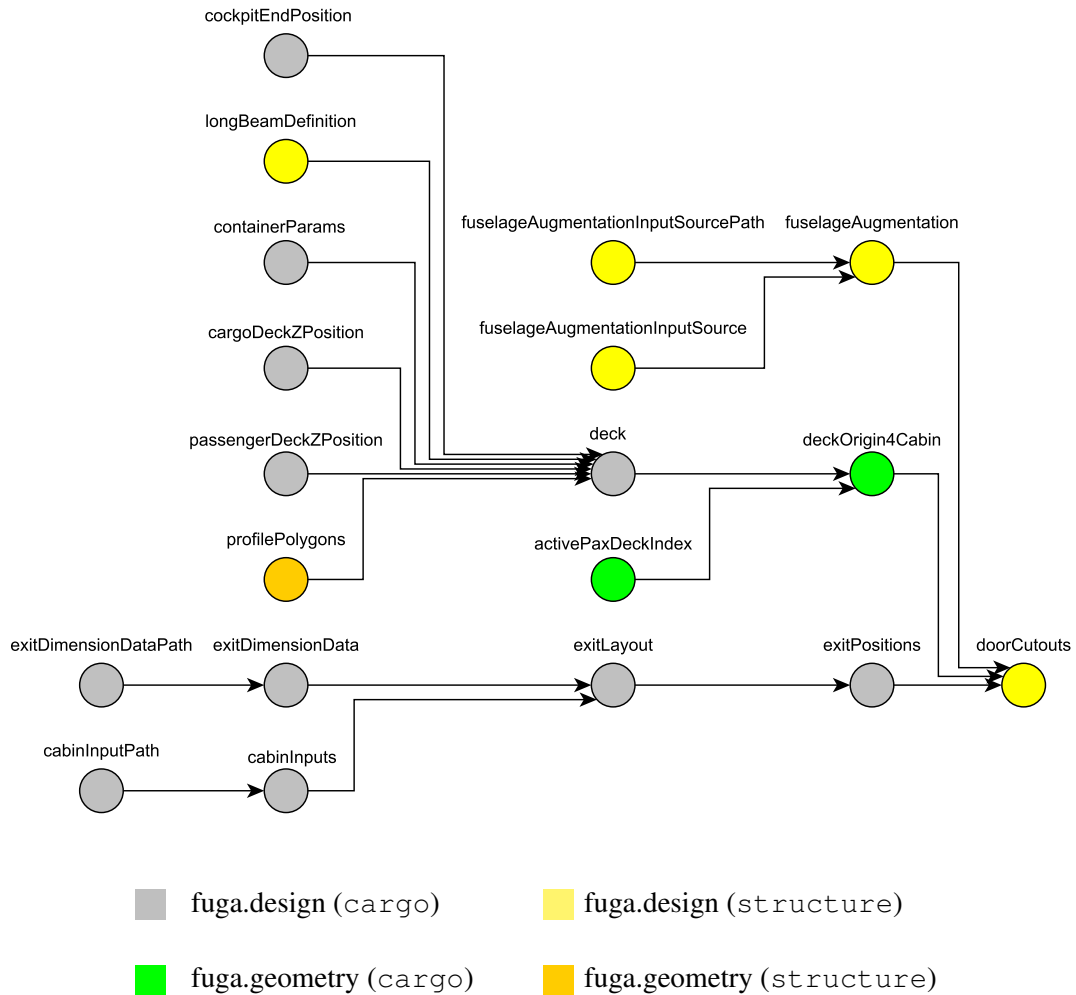


Abbildung A.4.: FPG der Türausschnitte

A.7. FPG MDCD

A.5 zeigt den fundamentalen Problemlösungsgraphen zur Berechnung des Regelknotens für die Frachttür des Hauptdecks. Außerdem wurde der direkte Nachfahre des Knotens mainDeckCargoDoorCutouts mit in den Graphen aufgenommen, an dem die Entwurfsinformationen der MDCD für den Strukturentwurf übergeben werden.

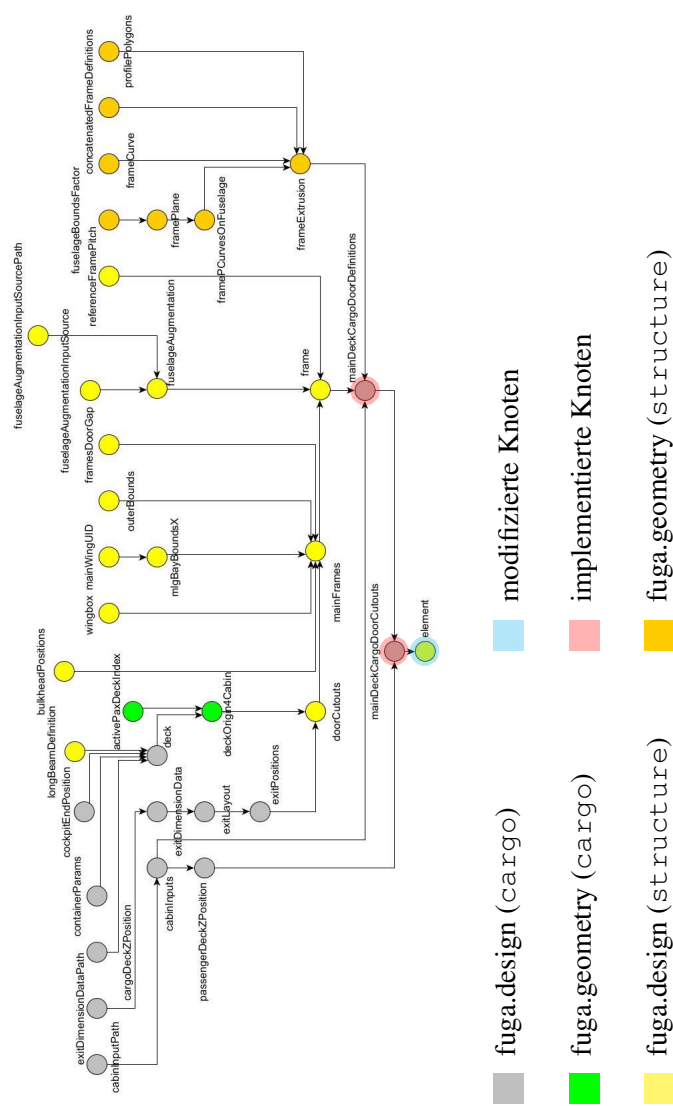


Abbildung A.5.: FPG der MDCD mit einem Nachfahren, der alle angeforderten Knoten für den Entwurf der Frachttür aufzeigt

A.8. FPG der Rumpfausschnittelemente mit Vorfahren

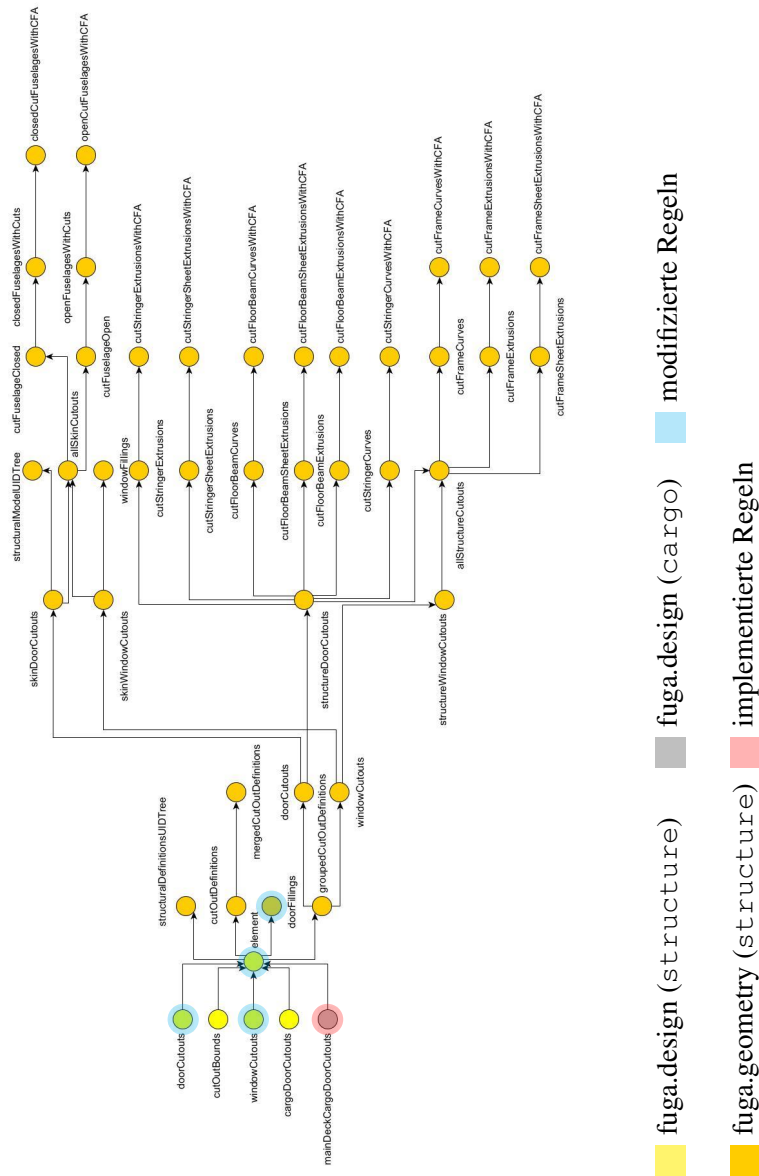


Abbildung A.6.: Dedizierter FPG der Rumpfausschnittelemente mit Nachfahren

A.9. FPG des Massenentwurfs für Passagierflugzeugkabinen



Abbildung A.7.: MCG des Massenentwurfs für Passagierflugzeugkabinen mit allen Strukturelementen zur Auslegung der Massen für Betrieb, Ausstattung und Nutzlast

A.10. Exemplarisches Multifidelity-Massenmodell der D239

Die Abbildung A.8 zeigt ein exemplarisches Multifidelity-Massenmodell der D239. Die Massen der Kabinenelemente sind hier relativ zu ihrem Gewicht als Sphären dargestellt.

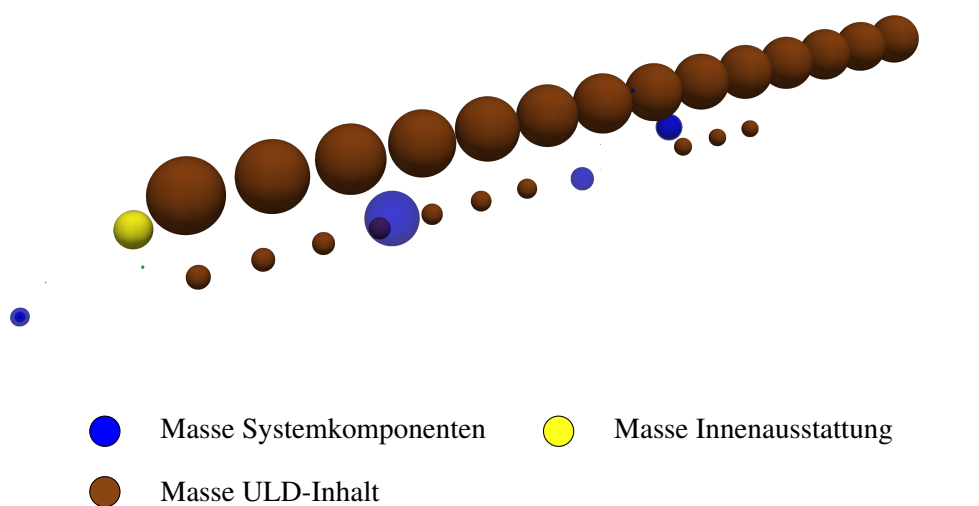


Abbildung A.8.: Exemplarisches Multifidelity-Massenmodell der D239 Frachtvariante als Sphärenmodell, die Massensphären werden in ihrer Größe relativ zum Gewicht visualisiert

A.11. Benutzerdefinierte Parameter des Frachtkabinenentwurfs

Tabelle A.4.: Ausschnitt aus den initialen Entwurfsparametern zur wissensbasierten Modellierung für die Frachtflugzeugkabinen der D239 und D180

Parameter	D239	D180
Oberes Cargo Deck		
z-Position [m]	-0.4	-0.4
Cockpit x-Max [m]	4.0	4.0
x-Ende [m]	36.4	36.4
Ausrichtung	links	links
Verteilung	hinten	hinten
ULD		
Container-Typ 1	AAY	AAY
Container-Typ 2	PAG	PAG
Container-Typ 1 [Anz.]	14	10
Container-Typ 2 [Anz.]	0	1
Dichte [kg/m ³]	160	160
9G Rigid Wall		
Position X an Frame	7	7
Position Z [m]	-0.088	-0.088
Dicke [m]	0.07	0.07
MaterialID	aluminium 2024	aluminium 2024
Ausschnitt-Versatz-Y	0.001	0.001
Exits		
Exit Typ	C+	C+
Boarding Exit	True	True
Position X [m]	-1.2	-1.3
MDCD		
Breite [m]	3.65	3.65
Höhe [m]	2.16	2.16
Türradius [m]	0.01	0.01
Tür X-Position [m]	9	6
Unteres Cargo Deck		
z-Position [m]	-1.75	-1.75
x-Start [m]	7.7	6.5
x-Ende [m]	34	26
Container-Abstand [m]	0.05	0.05
Ausrichtung	Flugzeugmitte	Flugzeugmitte
Verteilung	Mitte	Mitte
ULD		
Container-Typ	AKH	AKH
Container [Anz.]	10	8
Dichte [kg/m ³]	140	140
Cargo Liner		
Breite [m]	0.04	0.04
Abstand [m]	0.02	0.02
y-Basis [m]	1.66	1.66
y-Top [m]	2.46	2.46
z-Knick [m]	0.4	0.4
z-Top [m]	1.16	1.16

A.12. DLR-F25 Kabinenentwurf - Charakteristische Eingabegrößen

Die Tabelle zeigt die verwendeten initialen Entwurfsparameter für den Passagier- und Frachtkabinenentwurf der DLR-F25. Aufgelistet werden einige relevante Eingabegrößen für das obere und untere Deck der verschiedenen Kabinenkonfigurationen, die zur Initialisierung des Entwurfs mit FUGA verwendet werden.

Tabelle A.5.: Relevante initiale Entwurfsparameter für die wissensbasierte Modellierung der Passagier- und Frachtkabinen für die DLR-F25

Parameter	Passagier-Kabine	Frachtkabine 1	Frachtkabine 2
Oberes Deck			
z-Position [m]	-0.4	-0.4	-0.4
Cockpit x-Max [m]	3.1	4.7	4.7
x-Ende [m]	-	36.3	36.3
Ausrichtung	-	links	links
Verteilung	-	hinten	hinten
Typ 1	-	AAY	AAY
Typ 1 [Anz.]	-	10	10
Exits			
Exit Typ 1	C+	C+	C+
Exit Typ 2	III	-	-
Sitzklassenplätze			
Business [Anz.]	30	-	-
Economy [Anz.]	210	-	-
Unteres Deck			
z-Position [m]	-1.75	-1.75	-1.75
x-Start [m]	8.7	7.7	7.7
x-Ende [m]	30.1	33.6	33.6
Ausrichtung	Flugzeugmitte	Flugzeugmitte	Links
Verteilung	Mitte	Mitte	Hinten
Container-Typ	AKH	AKH	AKH
Container [Anz.]	8	10	7

A.13. TLARs der D239, D180 und der DLR-F25

Die Tabelle zeigt die Top Level Aircraft Requirements der Referenzmodelle D239/DLR-F25 und D180. Abgebildet werden wesentliche Parameter wie Reichweite, Passagierkapazität, Nutzlast sowie flugbetriebsrelevante Leistungsdaten. Diese Anforderungen geben einen grundlegenden Entwurfsrahmen für den Gesamtflugzeugentwurf mit openAD vor.

Tabelle A.6.: Top Level Aircraft Requirements der D239/DLR-F25 und D180

Parameter	Einheit	D239/DLR-F25	D180
Designreichweite	[nm]	2500	2640
Design-Passagiere (Ein-Klassen)	[-]	239	180
Masse pro Passagier	[kg]	95	95
Design-Nutzlast	[kg]	25000	19700.0
Maximale Nutzlast	[kg]	25000	19700.0
Reise-Machzahl	[-]	0.78	0.78
Maximale Machzahl	[-]	0.82	0.82
Maximale Flughöhe	[ft]	40000	37057
Startstrecke (ISA +0K SL)	[m]	2200	-

A.14. Detaillierte Prozessschritte der Entwurfsoptimierung

Dieser Teil des Anhangs beschreibt detailliert die einzelnen Prozessschritte der disziplinübergreifenden Entwurfsoptimierung zwischen FUGA und openAD innerhalb der RCE-Integrationsumgebung.

Der erste Prozessschritt Initialisierung verwendet die von RCE bereitgestellten Funktionen `Input Provider` und `XML Values`. Der `Input Provider` ermöglicht das Laden der initialen CPACS-Datei, die alle Informationen für den Flugzeugvorentwurf enthält. Mit der Funktion `XML Values` können ein oder mehrere Werte als Konvergenzkriterium für die Entwurfsiteration über einen `xpath`-Ausdruck der initialen CPACS-Datei definiert werden. Die initialen CPACS-Daten und die Konvergenzkriterien werden schließlich über die Funktion `XML Values` an den `Converger` übergeben.

Für den zweiten Prozessschritt, die Konvergenzprüfung, wird die in RCE integrierte Funktion `Converger` eingesetzt. Der Startwert für die Konvergenz wird durch die Initialisierung bereitgestellt. Der `Converger` vergleicht die vorhandenen Konvergenzwerte mit den neu eingehenden Werten. Sind die hier definierten absoluten und relativen Grenzen zwischen den zu vergleichenden Konvergenzwerten erreicht, wird der Workflow beendet, andernfalls übergibt der `Converger` die CPACS-Daten an das Flugzeugvorentwurfswerkzeug openAD.

Im dritten Prozessschritt des entwickelten Workflows erfolgt die Auslegung einer ersten Flugzeugkonfiguration auf Basis der Top-Level Aircraft Requirements (TLARs) sowie spezifischer Entwurfsparameter aus der Initialisierung. Zu den TLARs gehören Reichweite, Reiseflughöhe, Machzahl, Nutzlast, Start- und Landebahnlänge sowie die Reserve-Missionsspezifikation. Außerdem müssen konstruktionsspezifische Entscheidungen über Tragflächen, Triebwerke, Leitwerksauslegung und Fahrwerkskonfiguration getroffen werden. Werden keine spezifischen Vorgaben gemacht, wird eine konventionelle Flugzeugkonfiguration verwendet. Gemäß Abbildung A.3 ist dies die initiale Entwurfsphase L0. In dieser Phase liefern empirische, semiempirische und analytische Methoden eine erste Abschätzung, ohne auf komplexere Werkzeuge zuzugreifen. Nach Abschluss des Entwurfsprozesses in openAD wird die neue Flugzeugkonfiguration als CPACS-Datenformat in die nächste Phase überführt. Diese Phase entspricht der Entwurfsphase L1, in der multidisziplinäre Methoden hinzugefügt werden, um durch die Integration spezialisierter Werkzeuge in den Entwurfsprozess eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, eine bereits konvergierte

Flugzeugkonfiguration mit angepassten Entwurfsanforderungen durch openAD neu auszulegen, um den Einfluss neuer Entwurfparameter aus den höher fidelen Methoden mit vordefinierten Annahmen auf bestehende Parameter zu untersuchen.

OpenAD Nachprozess ist der vierte Arbeitsschritt, hierfür stellt RCE eine pythonbasierte Skriptfunktion innerhalb der Integrationsumgebung zur Verfügung. Für den openAD-Nachprozess wurde ein Skript entwickelt, das alle Entwurfparameter aus der initialen CPACS-Datei nach dem Flugzeugentwurf mit openAD basierend auf dem Python-Modul `xml.etree.ElementTree` in die neu ausgelegte Flugzeugkonfiguration parst. Alle Entwurfsanforderungen die zur Auslegung der Flugzeuge in openAD verwendet werden, liegen im toolspezifischen Knoten `components`, diese werden von openAD am Ende des Entwurfsprozesses nicht in die CPACS-Datei geschrieben, sie sind aber für die nächste Entwurfsiteration notwendig. Nach Abschluss des openAD-Nachprozesses wird der erweiterte CPACS-Datensatz an AMC übergeben.

Der fünfte Prozessschritt des Workflows stellt die in Abbildung A.3 dargestellte Missionsanalyse dar, die mit AMC durchgeführt wird. AMC wurde am DLR-Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt entwickelt und liefert die Abschätzung der 2D-Missionsleistung. Für die Missionsanalyse der Flugzeugkonfigurationen wird das Nutzlast-Reichweiten-Diagramm mit einer beliebigen Anzahl von Bereichen auf Basis von AMC berechnet. Nach Abschluss der Missionsanalyse wird der CPACS-Datensatz an den FUGA-Vorprozess übergeben.

Dazu werden die CPACS-Daten innerhalb des bestehenden `Toolspecific`-Knotens der CPACS-Datei um die benutzerdefinierten Eingabeparameter für den wissensbasierten Entwurf ergänzt, um den Struktur- und Kabinenentwurf in FUGA vorzubereiten. Beim späteren Parsen der Daten für den wissensbasierten Entwurf prüft FUGA, ob werkzeugspezifische Knoten mit den benutzerdefinierten Eingabeparametern in der CPACS-Datei vorhanden sind. Diese werden dann an das Datenrepositorium für den weiteren Rumpf- und Kabinenentwurf übergeben. Nach Abschluss des FUGA-Vorprozesses wird der um die benutzerdefinierten Eingabeparameter erweiterte CPACS-Datensatz an den Prozessschritt für den Struktur- und Kabinenentwurf übergeben.

In der Prozessebene des Struktur- und Kabinenentwurfs erfolgt basierend auf der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Integration des wissensbasierten Entwurfs in RCE, die Struktur- und Kabinenauslegung mit FUGA für die jeweilige Flugzeugkonfiguration. Darüber hinaus werden

die Massen für die Sekundärelemente des oberen und unteren Decks berechnet. Abschließend werden alle Entwurfsergebnisse von FUGA in den CPACS-Datensatz überführt. Dieser wird anschließend zum nächsten Prozessschritt weitergeleitet.

Der vorletzte Prozessschritt basiert auf einem zusätzlich entwickelten, Python-basierten Skript für den FUGA-Nachprozess und stellt sicher, dass die Entwurfsergebnisse aus FUGA für die Massenauslegung in den toolspezifischen openAD-Knoten `components` der CPACS-Datei geparkt werden. Dadurch können die von FUGA berechneten Massen und ihre Positionen als neue Entwurfsanforderungen für die nächste openAD-Iteration berücksichtigt werden. Dieser Teil des Prozesses stellt den in Abbildung 6.2 dargestellten Arbeitsschritt der Entwurfssynthese in der Phase L1 dar. Ist die Flugzeugkonfiguration bereits durch openAD ausgelegt und durchläuft den Entwurfsprozess in einem zusätzlichen Iterationsschritt, wird der toolspezifischen Knoten `components` von openAD mit den angepassten Konfigurationsparametern für die Neuauslegung des Flugzeugs berücksichtigt. Im Skript kann definiert werden, ob die neu berechneten Massenwerte für die nächste Entwurfsiteration als `fix` oder `calc` deklariert werden. Wird die Option `fix` gewählt, so bleiben die Massenwerte einschließlich ihrer Schwerpunkte für den nächsten Iterationsschritt unverändert und werden für die Neuauslegung berücksichtigt. Am Ende übergibt das Skript die angepasste Flugzeugkonfiguration aus der Entwurfssynthese als CPACS-Datei an den letzten Prozessschritt.

Der letzte Prozessschritt endet beim bereits oben beschriebenen zweiten Prozessschritt. Dazu liefert die in RCE integrierte und vorgeschaltete Funktion `XML Values` aus der synthetisierten CPACS-Datei das neue Konvergenzkriterium. Ist das vorher definierte Konvergenzkriterium erfüllt, wird der Workflow beendet. Andernfalls erfolgt eine weitere Iteration des Entwurfsprozesses.

A.15. EFW - Airbus P2F Frachter

In diesem Anhang sind in der Abbildung A.9 die standardmäßigen Beladungskonfiguration der umgebauten Frachtflugzeuge A321P2F und A320P2F der Elbe Flugzeugwerke GmbH zu sehen. Sie dienen als Referenzkonfigurationen für die Plausibilitätsprüfung des neuen Entwurfssystems in FUGA sowie der daraus resultierenden Frachtkabinen.

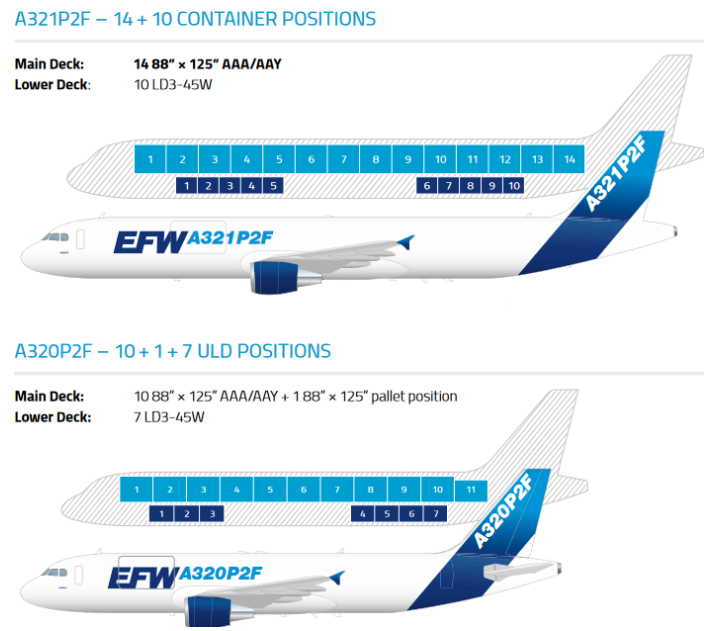


Abbildung A.9.: Airbus 320/321 Frachtversionen der Elbe Flugzeugwerke GmbH mit standardmäßiger Containerverteilung auf beiden Frachtdecks (Quelle: (Flugzeugwerke, 2024))

Eigenschaft	A321P2F
Vollständige Beladbarkeit durch Container	208 m ³ (7.348 ft ³)
Nutzlast	bis zu 28 t (61.750 lbs)
Reichweite	bis zu 2.050 nm
Maximales Abfluggewicht (MTOW)	93,5 t
Maximales Landegewicht (MLW)	77,8 t
Maximales Leergewicht ohne Treibstoff (MZFW)	73,8 t

Tabelle A.7.: Technische Daten der A321P2F (Quelle: (Flugzeugwerke, 2025))

A.16. Überprüfung der Entwurfsmethoden

In diesem Anhang wird anhand der beiden zuletzt platzierten ULDs auf dem oberen und unteren Frachtdeck der D239-Testkonfiguration (siehe Tabelle A.4 und Abbildung 7.1) die Berechnung der Massen und ihrer Schwerpunkte überprüft. Zudem wird die Überprüfung für die Kabinentüren und der 9g-Barriere anhand der benutzerdefinierten Parameter und der resultierenden Entwurfsergebnisse beschrieben.

Die Positionierung der Türen kann anhand des Kabinenlayouts überprüft werden. Wie im methodischen Abschnitt 5.2 beschrieben, erfolgt die Positionierung der Tür in X-Richtung auf der Basis des Parameters `position_x`, wobei zusätzlich die Länge des Cockpits berücksichtigt wird. Für die Entwürfe D180 und D239 wurden entsprechend der in Tabelle A.4 angegebenen Werte Positionen von -1.3 m bzw. -1.2 m in X-Richtung gewählt. Der Vergleich mit den jeweiligen Kabinenlayouts zeigt, dass die Platzierung der Tür bei beiden Flugzeugtypen plausibel umgesetzt wird.

Eine weitere Überprüfung wurde für die Platzierung der 9g-Barriere durchgeführt. Wie in Tabelle A.4 dargestellt, wurden die Wände für den D180 und den D239 jeweils am siebten Spant, ausgehend von der Nase des Flugzeugs, platziert. Die Betrachtung der beiden 3D-Modelle in Abbildung 7.1 zeigt, dass die Platzierung am jeweils richtigen Spant umgesetzt wird. Somit ist die Platzierung dieses Kabinenelements korrekt.

Analog zur Überprüfung der Türposition kann auch die Positionierung der MDCD in X-Richtung überprüft werden. Wie im Abschnitt 5.4 erläutert, erfolgt die Positionierung der MDCD über den Parameter `MDCDDoorXPos`. Für eine exakte Positionierung wird zusätzlich die halbe Türbreite berücksichtigt, sodass die MDCD am nächstgelegenen Spant positioniert werden kann. Für die Entwürfe D180 und D239 wurden Positionen von 6 m bzw. 9 m in X-Richtung gemäß den Werten in Tabelle A.4 gewählt. Der Vergleich mit den Kabinenlayouts in Abbildung 7.1 zeigt, dass die Positionierung der MDCD für beide Flugzeugtypen plausibel im Entwurfssystem umgesetzt wird.

Für den rechnerischen Nachweis der Methoden des Massenentwurfssystems werden die notwendigen initialen Entwurfs- und Geometrieparameter für die Überprüfung der beiden ULDs aus den zugehörigen Regeln des Entwurfsprozesses extrahiert und in Tabelle A.9 zusammengefasst. Die detailliert berechneten Massen und ihre Schwerpunkte aus dem Massenentwurfs-

system für beide ULDs sind in der Tabelle A.9 aufgelistet und werden anschließend durch eine zusätzliche Rechnung überprüft. Die Schwerpunkte und Flächenhalte werden mit den Formeln A.1 bis A.4 bestimmt. Die Massen werden über die Formel A.5 berechnet. Der ULD vom Typ AKH wird zur Schwerpunktberechnung in Z-Richtung über sechs Punkte als Polygon aufgespannt (siehe A.10). In X-Richtung ergibt sich der Schwerpunkt aus einem Quader mit $\Delta X/2$. Um den Schwerpunkt im globalen Koordinatensystem des Flugzeugs zu ermitteln, werden die lokalen Schwerpunktkoordinaten um die jeweilige Deckhöhe sowie die X-Position des Containers verschoben. Zur Bestimmung des Schwerpunkts des ULDs vom Typ AAY in Z-Richtung wird dieser als Polygon bestehend aus 8 Punkten aufgespannt (siehe A.11). In X-Richtung ergibt sich der Schwerpunkt ebenfalls aus einem Quader mit $\Delta X/2$. Nach dem Aufstellen aller notwendigen Formeln können mithilfe der Parameter aus Tabelle A.9 alle Berechnungen durchgeführt werden. Die Berechnungen und die Ergebnisse sind in den Gleichungen A.6 bis A.11 zusammengestellt. Ein Vergleich der nachgerechneten Massen der beiden Container mit den aus FUGA errechneten Massen zeigt übereinstimmende Ergebnisse, gleiches gilt für die Schwerpunkte in X-Richtung und in Z-Richtung.

Tabelle A.8.: Geometrie- und initiale Entwurfparameter der zuletzt platzierten Containerelemente der D239-Testkonfigurationen für das obere und untere Frachtdeck

Parameter	containerElement_LD3-45	containerElement_LD7_AAY
ΔX [m]	1.53416	2.23520
ΔY [m]	2.4384	3.1750
ΔZ [m]	1.1430	2.0828
ΔY_{Base} [m]	1.56210	1.23444
ΔZ_{Base} [m]	—	1.7449
ΔZ_{Middle} [m]	—	1.143
$X_{\text{Deckursprung_MD}}$ [m]	4.7	4.7
$Z_{\text{Deckursprung_MD}}$ [m]	-0.4	-0.4
$X_{\text{Deckursprung_UD}}$ [m]	7.7	7.7
$Z_{\text{Deckursprung_UD}}$ [m]	-1.75	-1.75
Frachtdichte [kg/m ³]	140	120
Volumen [ft ³]	131	403
X-Position [m]	22.862	29.264

Tabelle A.9.: Position und Masse der zuletzt platzierten Containerelemente auf dem oberen und unteren Frachtdeck der D239-Testkonfiguration aus den Ergebnissen des Massene Entwurfssystems

Schwerpunkt- und Massenkenngröße	ULD-uID	
	uld_content_0010 LD3-45	uld_content_0014 LD7_AAY
XYZ _{SP} aus Entwurfssystem [m]	[31.33, 3,08 · 10 ⁻¹⁷ , -1,22]	[35.08, 9,37 · 10 ⁻¹⁷ , 0,84]
Masse aus Entwurfssystem [kg]	519.33	1369.40

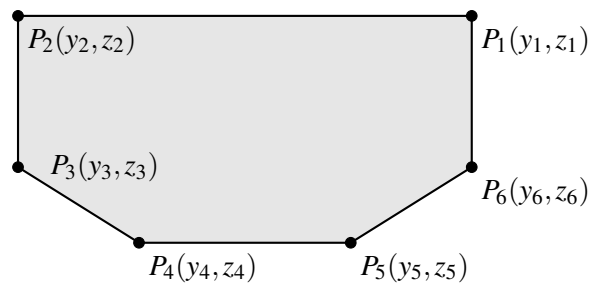


Abbildung A.10.: 2D-Polygonquerschnitt eines AKH-Containers mit sechs Punkten $P_i(y_i, z_i)$

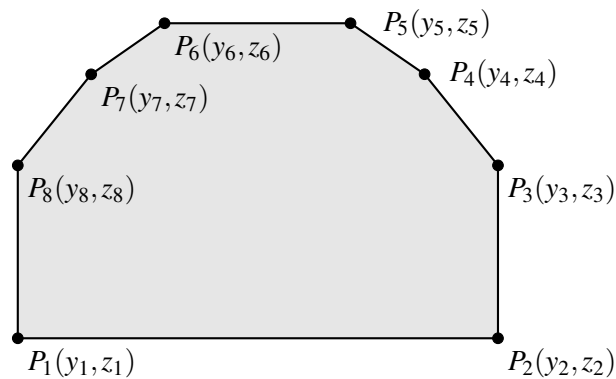


Abbildung A.11.: 2D-Polygonquerschnitt eines AAY-Containers mit acht Punkten $P_i(y_i, z_i)$

Formeln:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i z_{i+1} - y_{i+1} z_i) \quad \text{Flächeninhalt Polygon} \quad (\text{A.1})$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(y_i z_{i+1} - y_{i+1} z_i) \quad \text{Y-Schwerpunkt Polygon} \quad (\text{A.2})$$

$$C_z = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (z_i + z_{i+1})(y_i z_{i+1} - y_{i+1} z_i) \quad \text{Z-Schwerpunkt Polygon} \quad (\text{A.3})$$

$$\bar{z}_q = \frac{h_q}{2} \quad \text{Schwerpunkt Rechteck} \quad (\text{A.4})$$

$$m = \rho \cdot V \quad \text{Masse} \quad (\text{A.5})$$

Schwerpunkt- und Massenberechnung:

$$\bar{z}_{AKH} = -1,75 \text{ m} + \frac{8,202 \text{ m}^3}{6 \cdot 2,594 \text{ m}^2} = -\mathbf{1,223 \text{ m}} \quad (\text{A.6})$$

$$\bar{z}_{AAY} = -0,4 \text{ m} + \frac{43,38 \text{ m}^3}{6 \cdot 5,818 \text{ m}^2} = \mathbf{0,84 \text{ m}} \quad (\text{A.7})$$

$$\bar{x}_{AKH} = 7,7 \text{ m} + 22,862 \text{ m} + \frac{1,534 \text{ m}}{2} = \mathbf{31,33 \text{ m}} \quad (\text{A.8})$$

$$\bar{x}_{AAY} = 4,7 \text{ m} + 29,264 \text{ m} + \frac{2,235 \text{ m}}{2} = \mathbf{35,08 \text{ m}} \quad (\text{A.9})$$

$$m_{AAY} = 120 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(403 \text{ ft}^3 \cdot 0,0283168 \frac{\text{m}^3}{\text{ft}^3} \right) = \mathbf{1369,40 \text{ kg}} \quad (\text{A.10})$$

$$m_{AKH} = 140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(131 \text{ ft}^3 \cdot 0,0283168 \frac{\text{m}^3}{\text{ft}^3} \right) = \mathbf{519,33 \text{ kg}} \quad (\text{A.11})$$

A.17. DLR-F25

Die DLR F25 ist ein konzeptionelles Kurz- bis Mittelstreckenflugzeug mit 239 Sitzplätzen und einer Reichweite von 2500 nm. Sie basiert auf dem Airbus A321neo, wurde jedoch mit fortschrittlichen Technologien für das Jahr 2035 weiterentwickelt. Sie hat eine Rumpflänge von 44.51 m und eine Flügelspannweite von 45 m. Auf Basis der DLR-F25 werden mithilfe des wissensbasierten Entwurfswerkzeugs FUGA eine Passagier- und zwei Frachtkabinenkonfigurationen erstellt. Die detaillierten Masseninformationen der Kabinen dienen dann als Grundlage für weitere Analysen.

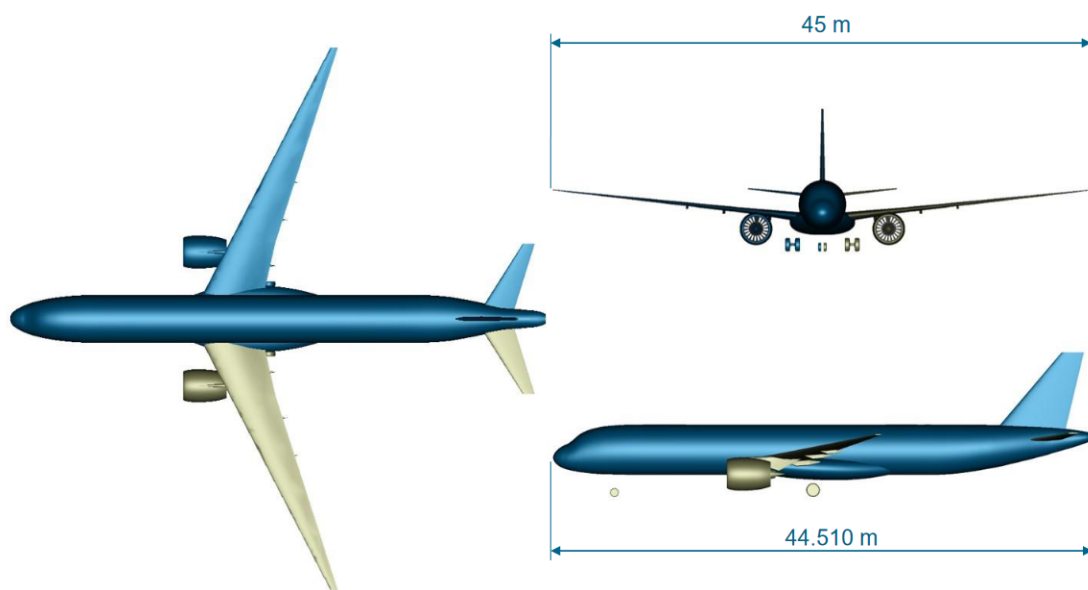


Abbildung A.12.: Drei Ansichten der DLR-F25 (Quelle: (Wöhler et al., 2024))

A.18. Flügelgeometrien der Flugzeugkonfigurationen

Die Abbildung A.13 zeigt die Flügelgeometrien des Referenzmodells sowie der drei neu ausgelegten Flugzeugkonfigurationen. Die Flügelposition werden durch openAD jeweils an den resultierenden Gesamtschwerpunkt angepasst. Verschiebt sich dieser, folgt die Flügelposition entsprechend, um die aerodynamische Stabilität zu gewährleisten. In der Passagierkonfiguration sowie in der ersten Frachtvariante, die auf maximale Auslastung mit Fracht optimiert wurde, ist eine deutliche Verschiebung der Flügel in Richtung des neuen Schwerpunkts erkennbar. Bei der zweiten Frachtversion, deren Nutzlastverteilung gezielt, an die des Referenzmodells angeglichen wurde, bleibt die Verschiebung der Flügelposition hingegen vergleichsweise gering.

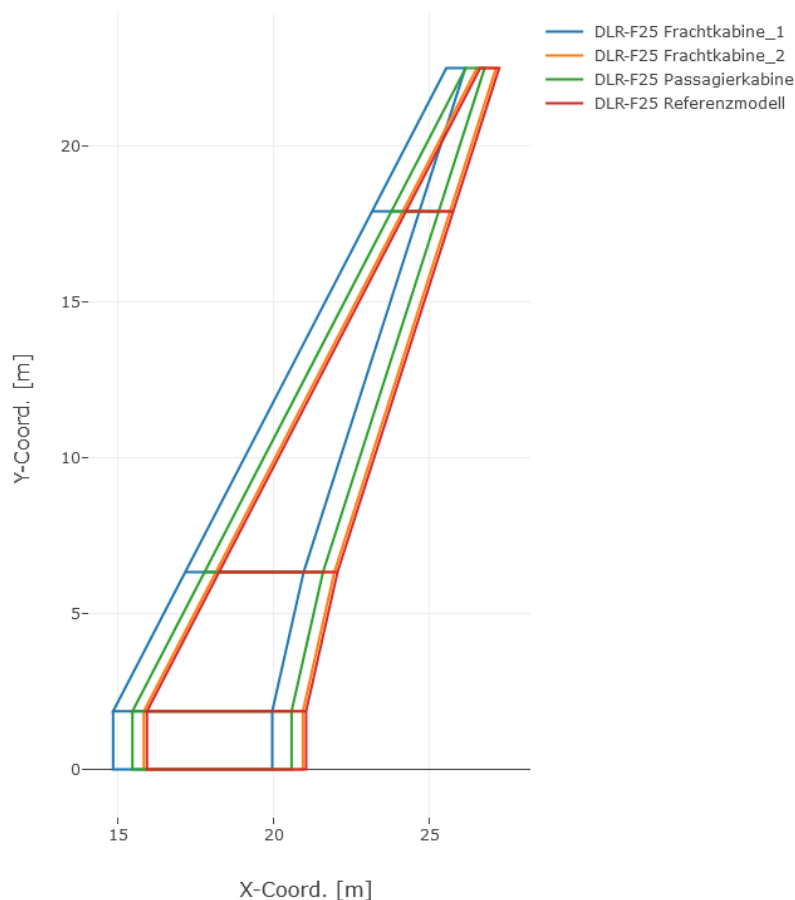


Abbildung A.13.: Flügelgeometrien der generierten Flugzeugkonfigurationen inklusive Referenzmodell

A.19. Geometrien der Höhenleitwerke

Die Abbildung A.14 zeigt die Höhenleitwerksgeometrien in der XY-Ebene der Komponenten der verschiedenen Flugzeugkonfigurationen im Vergleich zur Referenzkonfiguration. Dies verdeutlicht, dass die Leitwerksgeometrien aufgrund der Trimmanpassung mit zunehmender Entfernung des Schwerpunktes von den Leitwerken kleiner werden.

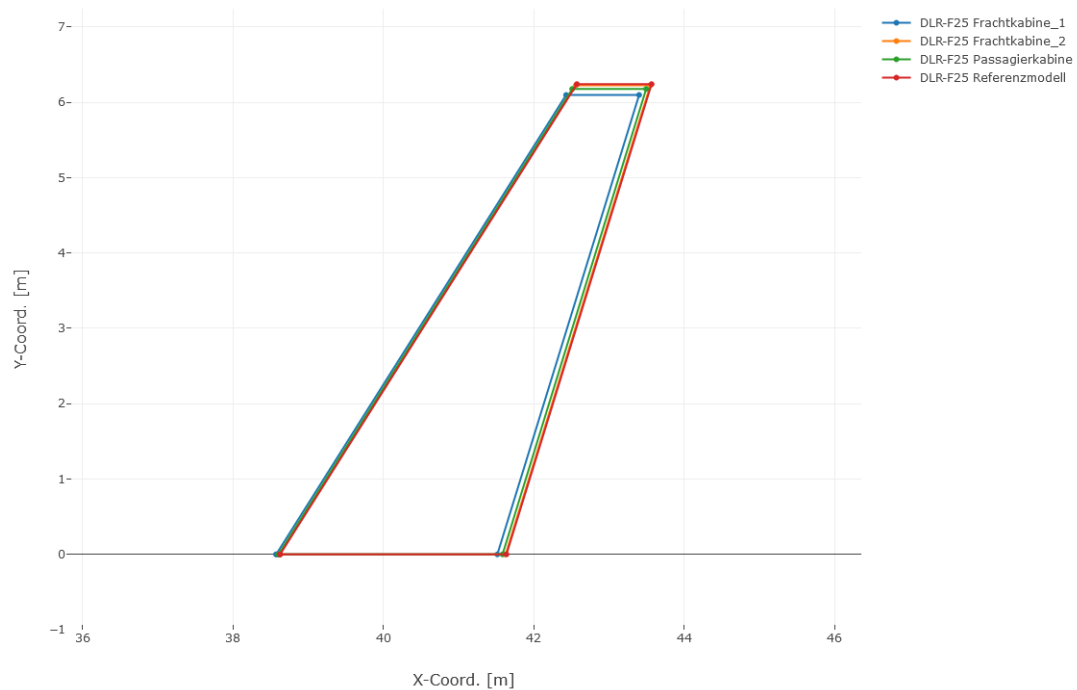


Abbildung A.14.: Geometrien für die Höhenleitwerke der generierten Flugzeugkonfigurationen inklusive Referenzmodell

A.20. Geometrien der Seitenleitwerke

Die Abbildung A.15 zeigt die Seitenleitwerksgeometrien in der XY-Ebene der Komponenten der verschiedenen Flugzeugkonfigurationen im Vergleich zur Referenzkonfiguration. Analog zu den Höhenleitwerken wird hier ebenfalls deutlich, dass die Geometrien aufgrund der Trimmanpassung mit zunehmender Entfernung des Schwerpunktes von den Leitwerken kleiner werden.

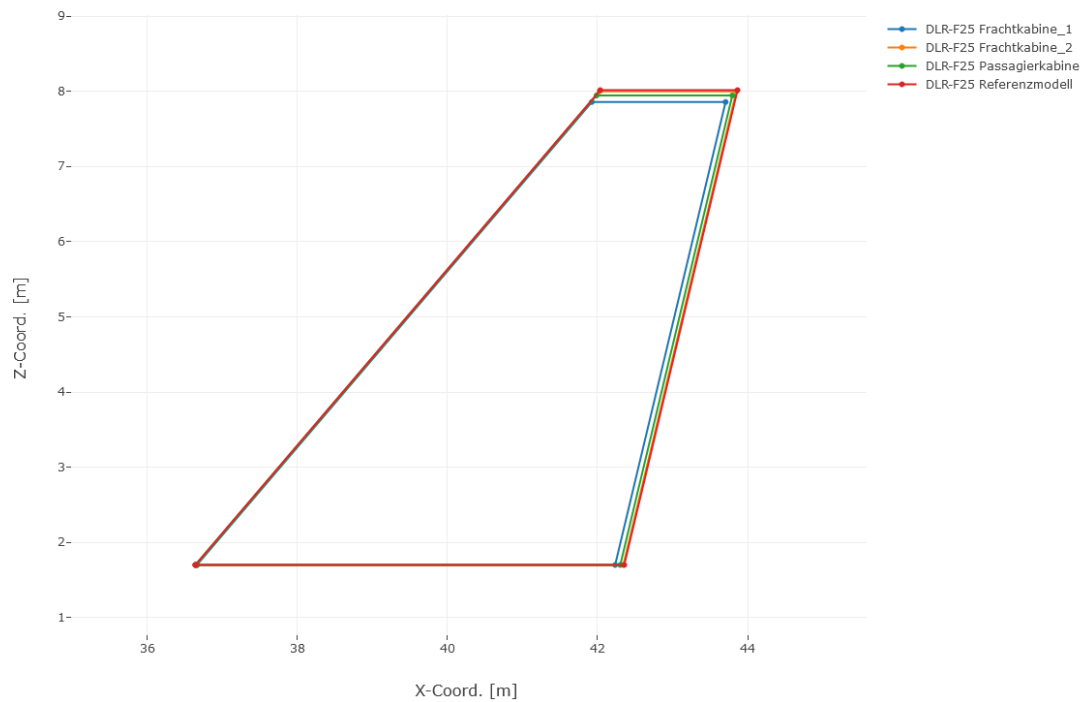


Abbildung A.15.: Geometrien für die Seitenleitwerke der generierten Flugzeugkonfigurationen inklusive Referenzmodell