DLR-IB-SL-HF-2025-100

Parametrische Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess einer Flugzeugkabine

Masterarbeit

Timur Topal

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Dokumenteigenschaften

Titel	Parametrische Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess einer Flugzeugkabine
Betreff	Masterarbeit
Institut	Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt (SL)
Erstellt von	Timur Topal
Beteiligte	
Geprüft von	M.Sc. Mara Fuchs (DLR-SL)
Freigabe von	Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi (HAW Hamburg)
Datum	01.07.2025
Version	1.0
Dateipfad	

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Timur Topal

Parametrische Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess einer Flugzeugkabine

Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and Aeronautical Engineering

Timur Topal

Parametrische Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess einer Flugzeugkabine

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Flugzeugbau in der Fachrichtung Entwurf und Leichtbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt
Hein-Saß-Weg 22
21129 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi
Zweitprüfer/in: M.Sc. Mara Fuchs

Abgabedatum: 13.06.2025

Zusammenfassung

Timur Topal

Thema der Masterthesis

Parametrische Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess einer Flugzeugkabine

Stichworte

Parametrische Modellierung, Galley-Konfiguration, Kabinenentwurf, Energie- und Ressourcenanalyse, virtueller Entwicklungsprozess, Servicekonzept, KPI

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit entwickelt eine Methodik zur parametrischen Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess von Flugzeugkabinen. Ziel ist es, Galley-Systeme flexibel und automatisiert an unterschiedliche Servicekonzepte und Airline-Anforderungen anzupassen. Das entwickelte MATLAB-Modell ermöglicht eine regelbasierte Platzierung und Bestückung von Galley-Komponenten in Single-Aisle-Kabinen wie der A320-Familie. Neben geometrischen und funktionalen Aspekten werden auch Masse, Energiebedarf, Wasserverbrauch und Abfallaufkommen systematisch analysiert. Die Integration der Methode in einen digitalen End-to-End-Prozess unterstützt die frühe Bewertung von Designvarianten. Zudem werden die Auswirkungen auf das Kabinenlayout sowie relevante Leistungskennzahlen (KPIs) erhoben. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur nachhaltigen, datenbasierten Kabinenentwicklung in der zivilen Luftfahrt.

Timur Topal

Title of the paper

Parametric modeling of Galleys in the Virtual Development Process of an Aircraft Cabin

Keywords

Parametric modeling, galley configuration, cabin design, energy and resource analysis, virtual development process, service concept, KPI

Abstract

This master’s thesis presents a methodology for the parametric modeling of galleys within the virtual development process of aircraft cabins. The aim is to enable flexible and automated adaptation of galley systems to various service concepts and airline-specific requirements. The developed MATLAB model facilitates rule-based placement and configuration of galley components in single-aisle cabins such as those of the A320 family. In addition to geometric and functional aspects, mass, energy consumption, water usage, and waste generation are systematically analyzed. The integration of this method into a digital end-to-end process supports the early evaluation of design variants. Furthermore, the effects on cabin layout and relevant key performance indicators (KPIs) are assessed. The thesis contributes to a more sustainable and data-driven approach to cabin development in civil aviation.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich auf meinem Weg begleitet, unterstützt und inspiriert haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Tante und meinem Onkel. Als Schwester meiner verstorbenen Mutter hat meine Tante stets eine besondere Rolle in meinem Leben eingenommen. Gemeinsam mit meinem Onkel standen sie mir in vielen Lebenssituationen verlässlich zur Seite, haben mir Rückhalt gegeben, mich ermutigt, meinen eigenen Weg weiterzugehen, und mich sowohl in herausfordernden Phasen als auch im Alltag meines Studiums kontinuierlich unterstützt. Für ihr Vertrauen, ihre bestärkende Begleitung und ihre uneingeschränkte Zuwendung danke ich ihnen von Herzen.

Ebenso gilt mein herzlicher Dank Frau Prof. Jutta Abulawi, die mich bereits seit meiner Bachelorarbeit auf meinem akademischen Weg begleitet. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts wie auch während der Entstehung dieser Masterarbeit stand sie mir mit großer fachlicher Expertise und stets offenem Ohr zur Seite. Sie hat mich nicht nur gefordert und gefördert, sondern mir auch persönlich prägende Impulse gegeben. Für ihre kontinuierliche Unterstützung und die wertschätzende Betreuung dieser Arbeit bin ich ihr zutiefst dankbar.

Mein besonderer Dank richtet sich zudem an meine Betreuerin Frau Mara Fuchs. Bereits während unseres zweijährigen gemeinsamen Forschungsprojekts durfte ich eine enge, vertrauensvolle Zusammenarbeit mit ihr erleben. Umso mehr erfüllt es mich mit Dankbarkeit und großem Stolz, dass sie auch die Betreuung meiner Masterarbeit übernommen hat. Ihre fachliche Brillanz, ihre klare und zugleich motivierende Art sowie ihre hohe Verlässlichkeit haben die Entstehung dieser Arbeit maßgeblich geprägt. Trotz großer zeitlicher Herausforderungen nahm sie sich immer wieder die Zeit, meine Anliegen sorgfältig zu reflektieren und mich mit wertvoller Expertise zu unterstützen. Für dieses Engagement danke ich ihr von Herzen und empfinde es als großes Glück, diesen letzten Schritt meines Studiums an ihrer Seite gegangen zu sein.

In liebevoller Erinnerung widme ich diese Arbeit meiner verstorbenen Mutter Katharina Topal.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung III

Inhaltsverzeichnis IV

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis X

Abkürzungsverzeichnis XI

1 Einleitung und Ziele der Arbeit 1

1.1 Motivation und Relevanz 1

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen 4

1.3 Aufbau der Arbeit 5

2 Methoden und Trends in der Entwicklung von Flugzeugkabinen 7

2.1 Kabinenentwicklung – Trends und Innovation 7

2.1.1 Modularität und Komfort 7

2.1.2 Digitalisierung der Kabine 8

2.1.3 Nachhaltigkeit und Effizienz 8

Fazit: Kabine als ganzheitliches System 9

2.2 Galley-Entwicklung – Technologien und Konzepte 9

2.2.1 Vernetzte und KI-basierte Systeme 10

2.2.2 Modulare und multifunktionale Konzepte 11

2.2.3 Leichtbau durch generatives Design 12

Fazit: Synergien durch Digitalisierung und Bionik 13

2.3 Galley als multifunktionales Kabinenelement 13

2.3.1 Technischer Aufbau und Komponenten 13

2.3.2 Variantenvielfalt und Customizing 14

2.3.3 Energiebedarf und ökologische Auswirkungen 15

2.3.4 Einfluss auf Passagiererlebnis und Markenprofilierung 15

2.4 Technische Standards und Schnittstellen 16

2.4.1 ATA-Klassifikation 16

2.4.2 Normen und Zulassungsvorgaben 17

2.4.3 Schnittstellen der Galley 18

2.5 Herausforderungen bei der Integration von Galleys 19

2.5.1 Raum- und Gewichtsoptimierung 20

2.5.2 Montage und Wartung 20

2.5.3 Ergonomie und Arbeitsbedingungen 21

2.5.4 Nachhaltigkeit und Lebenszyklus 22

2.5.5 Systemintegration und Digitalisierung 23

2.5.6 Retrofit und Lebenszyklusmanagement 24
2.6 Forschungsstand zur parametrischen Modellierung 25
2.6.1 Einführung in die parametrische Modellierung 25
2.6.2 Der Flugzeugentwurf und die Rolle der Kabine 26
2.6.3 Parametrische Modellierungsansätze 27
2.6.4 Potentiale, Grenzen und Anwendungsbereiche 29
FAZIT: Einordnung und Beitrag der Arbeit im Forschungskontext 29
3 Virtueller Entwicklungsprozess der Kabine 31
3.1 Überblick über den digitalen Entwicklungsprozess 31
3.2 CPACS als standardisierte Datenbasis 33
3.2.1 Grundlagen und Struktur 33
3.2.2 Anwendung im Prozess und Datenimport 34
3.3 MATLAB – Funktionale Auslegung und Bauraumanalyse 35
3.3.1 Grundlagen der objektorientierten Programmierung 35
3.3.2 Anwendung der objektorientierten Programmierung im Prozess 39
3.3.3 Struktur des Auslegungsprozesses 42
3.3.4 XML-Export der Entwurfsparameter 43
3.4 Blender als Modellierungsumgebung 44
3.4.1 Rolle im Entwicklungsprozess 44
3.4.2 Technischer Ablauf der Modellintegration 45
3.4.3 Export aus Blender für Unity 46
3.5 Unity – Interaktive Visualisierung 46
3.5.1 Rolle im Entwicklungsprozess 46
3.5.2 Benötigte Hardware für die immersive Anwendung 47
4 Entwicklungsmethodik zur Galley-Parametrisierung 49
4.1 Betrachtungsumfang und Detailtiefe 49
4.2 Anforderungen an die Methode 52
4.2.1 Anforderungen aus den Forschungsfragen 52
4.2.2 Anforderungen aus dem virtuellen Entwicklungsprozess 53
4.2.3 Eigene methodisch-praktische Anforderungen 53
4.3 Methodisches Grundprinzip 54
4.4 Eingabeparameter der Modellierung 55
4.5 Klassenstruktur – benötigte Klassen 57
4.6 Funktionsstruktur 58
4.6.1 Überblick der benötigten Funktionen 59
4.6.2 Funktionsablauf und Datenfluss 60
4.7 Leistungskennzahlen 61
5 Umsetzung des parametrischen Galley-Modells im digitalen Entwicklungsprozess 63
5.1 Vorbereitung für die Erstellung der Modellstruktur 63
5.1.1 Einlesen und Verarbeiten der CPACS-Daten 63

5.1.2 Erweiterung der Parameterstruktur 64
5.1.3 Erstellung der benötigten Klassen 65
5.2 Das parametrische Galley-Modell 66
5.2.1 Initialisieren der Hilfs- und Auslegungsfunktion 66
5.2.2 Eingabeparameter und regelbasierte Typenzuweisung 67
5.2.3 Positionierung und Instanziierung der Galley-Typen 68
5.2.4 Regelbasierte Platzierung der Komponenten 69
5.3 Integration der Servicekonzepte 72
5.3.1 Eingabeparameter und Nutzersteuerung 72
5.3.2 Konzeptabhängige Anpassung der Geräte 73
5.3.3 Modifikation der Platzierungslogik für Full-Galley nach Serviceprofil 75
5.4 Leistungskennzahlen im Modell 78
5.4.1 Initialisieren der Analysefunktion 78
5.4.2 Massen- und Schwerpunktberechnung 79
5.4.3 Energiebedarf, Kerosinverbrauch und CO_2-Emission 80
5.4.4 Ausgabe- und Exportstruktur 83
5.5 Erweiterte Analyse der Servicekonzepte 85
5.5.1 Initialisieren der Berechnungsfunktion 85
5.5.2 Eingabeparameter und Nutzersteuerung 86
5.5.3 Verbrauchsberechnung für Frischwasser, Speisen- und Getränke 88
5.5.4 Prüfung der Galley-Auslastung 91
5.5.5 Prozessanalyse der Be- und Entladezeiten an den Türen 93
5.6 Abschluss der Modellierung und Datenübergabe 95
5.7 Zusammenfassung der technischen Umsetzung 95
6 Umfrage zur Akzeptanz von Selbstbedienungskonzepten 97
6.1 Zielsetzung und Fragen 97
6.2 Methodik und Zielgruppe 98
6.3 Abgrenzung und Ausblick 99
7 Ergebnisdarstellung 100
7.1 Anwendungsbeispiel im Modell 100
7.2 Ergebnisse aus dem parametrischen Galley-Modell 101
7.3 Ergebnisse der Integration von Servicekonzepten 102
7.4 Auswertung zentraler Leistungskennzahlen 103
7.5 Auswertung der erweiterten Analyse 105
7.6 Visualisierung der Galley-Modelle in 3D und Virtual Reality 106
7.7 Umfrageergebnisse 110
7.7.1 Stichprobe 110
7.7.2 Flugverhalten und Serviceerwartung 111
7.7.3 Einschätzung zu Serviceprofilen 112
7.7.4 Haltung zu Self-Service-Konzepten 113
7.7.5 Nachhaltigkeitsbewertung 114
7.7.6 Qualitative Anmerkungen 115

8 Reflexion der Arbeit 116
8.1 Diskussion der Methodik und Umsetzung 116
8.2 Validität und Aussagekraft der Ergebnisse 118
8.3 Diskussion der Umfrageergebnisse 120
9 Potential zur Weiterentwicklung 122
9.1 Erweiterung der Modelllogik 122
9.2 Anpassung von Serviceprofilen an Missionsprofile und kulturelle Kontexte 123
9.3 Vertiefung der Analyse- und Bewertungsebene 124
10 Schlussbetrachtung 125
10.1 Zusammenfassung der Arbeit 125
10.2 Ausblick 126
Literaturverzeichnis 127
Digitaler Anhang 132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Digitalisierung der Luftfahrt entlang des Flugzeuglebenszyklus 2

Abbildung 2-1: Intelligente Galley mit sensorbasierter Überwachung 10

Abbildung 2-2: Modulares Smart Galley-Konzept mit Plug-and-Play- Funktionalität 11

Abbildung 2-3: Bionisch optimierte Trennwandstruktur von Airbus, ... 12

Abbildung 2-4: Übersicht der ATA-Kapitel relevanter Schnittstellen einer Galley 17

Abbildung 2-5: Einflussfaktoren und Schnittstellen einer Galley im Flugzeugsystemumfeld 19

Abbildung 2-6: Beispielhafte Darstellung eines parametrischen CAD-Modells 26

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der gesamten Prozesskette zur Kabinenmodellierung . 31

Abbildung 3-2: Galley-Objekt mit uID und Positionsdaten in CPACS 34

Abbildung 3-3: Bestehende Klassenstruktur der objektorientierten Kabinenmodellierung 40

Abbildung 3-4: Benötigte VR-Hardware für die immersive Darstellung (Beckert, 2020) 48

Abbildung 4-1: Beispielhafte Visualisierung der Ausgangsproblematik der Modellierung 49

Abbildung 4-2: Beispielhafte vordere Galley 50

Abbildung 4-3: Beispielhafte hintere Galley 50

Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren 51

Abbildung 4-5: Anwendung des EVA-Prinzips auf mehreren Ebenen der Galley-Modellierung 55

Abbildung 4-6: Schematischer Ablauf der Funktionen 61

Abbildung 5-1: Einordnung der Hilfs- und Auslegungs in der Funktionstruktur im Modell 66

Abbildung 5-2: Einordnung der Hilfsfunktion in der Funktionsstruktur im Modell 70

Abbildung 5-3: Einordnung der Analysefunktion in der Funktionsstruktur des Modells 79

Abbildung 5-4: Einordnung der Berechnungsfunktion in der Funktionsstruktur des Modells 86

Abbildung 7-1: Bounding-Boxen der Komponenten der vorderen Galley im MATLAB-Modell 101

Abbildung 7-2: Bounding-Box-Darstellung der hinteren Galley im MATLAB-Modell. 101

Abbildung 7-3: Vordere Galley im Getränkeservice ohne Öfen 103

Abbildung 7-4: Hintere Galley mit erweiterter Platzierungslogik und 12 Standard-Containern 103

Abbildung 7-5: Vergleich der Gesamtmasse der Galley-Konfigurationen 104

Abbildung 7-6: Vergleich des elektrischen Gesamtleistungsbedarfs der Galley-Systeme 104

Abbildung 7-7: Kerosinbedarf zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs 104

Abbildung 7-8: Kerosinmehrverbrauch in Kosten 104

Abbildung 7-9: Vergleich der CO_2-Emissionen 105
Abbildung 7-10: Vergleich des anfallenden Abfalls 106
Abbildung 7-11: Vergleich des Frischwasserbedarfs 106
Abbildung 7-12: Modell der vorderen Galley in Blender 107
Abbildung 7-13: Modell der hinteren Galley in Blender 107
Abbildung 7-14: Darstellung der vorderen Galley in Unity 108
Abbildung 7-15: Darstellung der hinteren Galley in Unity 108
Abbildung 7-16:Validierung des MATLAB-Modells mit realer Galley 109
Abbildung 7-17: Altersverteilung der Befragten 110
Abbildung 7-18: Geschlechtsverteilung der Befragten 110
Abbildung 7-19: Reisehäufigkeit der Befragten 111
Abbildung 7-20: Typische Flugdauer der Befragten 111
Abbildung 7-21: Hintergrund der Passagiere für Flugreisen 111
Abbildung 7-22: Bedeutung der Bordverpflegung in Abhängigkeit der Flugzeit 111
Abbildung 7-23: Bedeutung von Bordservice während des Fluges 112
Abbildung 7-24: Erwartungen an die Bordverpflegung 112
Abbildung 7-25: Akzeptanz von Self-Service-Konzept während des Fluges 113
Abbildung 7-26: Bereitschaft zur Online-Vorbestellung 113
Abbildung 7-27: Self-Service vs. klassischer Service 114
Abbildung 7-28: Preisabhängige Akzeptanz von Self-Service-Konzept 114
Abbildung 7-29: Stellenwert von Nachhaltigkeit in der Luftfahrt aus Sicht der Passagiere 114
Abbildung 8-1: Durchgängiger Entwicklungsprozess zur modellbasierten Galley-Auslegung 119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Einteilung des Missionsprofils nach Flugdauer 56

Tabelle 4-2: Übersicht der Eingabeparameter für die Galley-Parametrisierung 57

Tabelle 4-3: Übersicht der Klassenobjekte und ihrer Funktion 58

Tabelle 5-1: Überblick der verwendeten Maße der Komponenten 64

Tabelle 5-2: Übersicht der erstellten Klassen und spezifischen Eigenschaften..... 65

Tabelle 7-1: Eingesetzte Softwaretools und Versionen zur parametrischen Galley-Modellierung 101

Abkürzungsverzeichnis

APU ..... Auxiliary Power Unit
ATA ..... Air Transport Association
ATLAS ..... Allied Transports Lightweight Airborne Standard
CAD ..... Computer Aided Design
CMS ..... Cabin Management System
CO_2 ..... Kohlenstoffdioxid
CPACS ..... Common Parametric Aircraft Configuration Schema
CS-25 ..... Certification Specifications for Large Aeroplanes
DSM ..... Design Structure Matrix
DLR ..... Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EMV ..... Elektromagnetische Verträglichkeit
FBX ..... Filmbox-Dateiformat
FST ..... Fire, Smoke and Toxicity
ICAO ..... International Civil Aviation Organization
ID ..... Identifier
IoT ..... Internet of Things
ISO ..... International Organization for Standardization
KPI ..... Key Performance Indicator
KSSU ..... KLM, Swissair, SAS, UTA
LCA ..... Life Cycle Assessment
MBSE ..... Model-Based Systems Engineering
MIG ..... Module Interface Graph
OAD ..... Overall Aircraft Design
RTCA ..... Radio Technical Commission for Aeronautics
SysML ..... Systems Modeling Language
TLAR ..... Top Level Aircraft Requirements
UI/uID ..... Unique Identifier
VR ..... Virtual Reality
XML ..... Extensible Markup Language
XLR ..... Extra Long Range

1 Einleitung und Ziele der Arbeit

1.1 Motivation und Relevanz

Prognosen internationaler Organisationen wie der International Civil Aviation Organization (ICAO) sowie aktuellen Studien des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zufolge wird der weltweite Luftverkehr in den kommenden Jahrzehnten weiterwachsen (IATA, 2025b). Steigende Passagierzahlen und eine zunehmende Nachfrage nach Mobilität führen trotz technologischer Effizienzsteigerungen zu einem anhaltend hohen Ressourcen- und Energiebedarf in der Luftfahrt (IATA, 2025b).

Gleichzeitig stehen die Branche und ihre Akteure vor der dringenden Notwendigkeit, einen nachhaltigen Wandel zu vollziehen. Der fortschreitende Klimawandel, regulatorische Vorgaben wie der European Green Deal sowie der gesellschaftliche Druck zur Reduktion von CO_2-Emissionen verlangen nach klimaneutralen und energieeffizienten Luftfahrtsystemen (Kommission, 2019). Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, sind neue Konzepte, Technologien und Entwicklungsprozesse erforderlich, die weit über inkrementelle Optimierungen hinausgehen (DLR, 2021).

Einen zentralen Hebel für diese Transformation bildet die Digitalisierung. Das DLR verfolgt die Forschungsstrategie, die auf der vollständigen Digitalisierung des Lebenszyklus von Flugzeugen basiert (Rauscher, et al., 2024). Ziel ist es, den gesamten End-to-End-Prozess von der Konzeptentwicklung über Produktion und Betrieb bis hin zur Außerdienststellung durchgängig virtuell abzubilden, zu analysieren und zu optimieren.

Kern dieses digitalen End-to-End-Ansatzes ist der sogenannte Digitale Faden (Abbildung 1-1). Er beschreibt den durchgängigen Datenfluss über alle Phasen des Lebenszyklus eines Flugzeugs hinweg. Dabei werden sämtliche Informationen aus Entwurf, Produktion, Betrieb, Wartung und Außerdienststellung intelligent verknüpft und bidirektional nutzbar gemacht. Ziel ist es dabei, eine konsistente, versionssichere und disziplinübergreifende Informationsbasis zu schaffen, um das hochkomplexe Gesamtsystem Flugzeug effizienter zu entwickeln, zu betreiben und weiterzuentwickeln (Rauscher, et al., 2024).

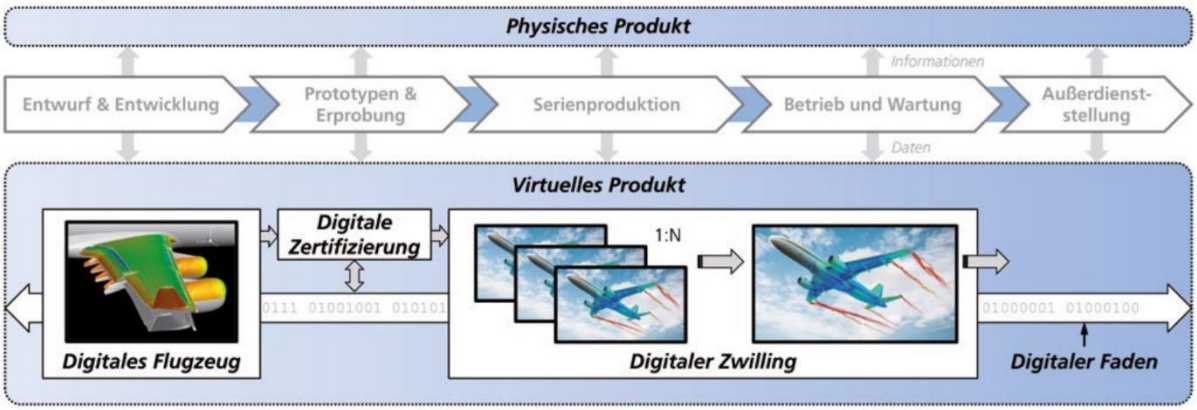

Abbildung 1-1: Digitalisierung der Luftfahrt entlang des Flugzeuglebenszyklus (Risse, 2018)

Während sich viele Digitalisierungsinitiativen traditionell auf Strukturbauteile oder Antriebssysteme konzentrieren, rücken zunehmend auch Kabinenkomponenten in den Fokus. Bordküchen, im Folgenden wird der englische Begriff „Galley“ verwendet, nehmen als technische Kernsysteme und Serviceeinheiten eine zentrale Rolle im Bordbetrieb ein. Sie sind maßgeblich für den Ressourcen- und Energieverbrauch in der Kabine verantwortlich und gleichzeitig eng mit betrieblichen Abläufen der Crew verknüpft (Fuchs, et al., 2021b). Neue airline-spezifische Servicekonzepte sowie sich wandelnde Passagiererwartungen erhöhen zusätzlich die Anforderungen an ihre Flexibilität, Modularität und Integrationsfähigkeit. Damit geht auch eine steigende Variantenvielfalt einher, die sich nicht nur auf die Kabinenausstattung, sondern auf die gesamte Konfiguration der Kabine erstreckt. Durch die Kombination verschiedenster Materialien, modularer Einbausysteme, flugzeugspezifischer Rahmenbedingungen sowie cateringbezogener Serviceprofile ergeben sich zahlreiche Auslegungskombinationen. Eine Airline kann allein durch unterschiedliche Ausprägungen einzelner Elemente mehrere hundert Varianten generieren. Die Fähigkeit, diese Vielfalt systematisch zu modellieren und ökonomisch zu bewerten, gewinnt im Kontext des gezielten Customizings zunehmend an strategischer Relevanz.

Trotz dieser Relevanz wird die Flugzeugkabine im konventionellen Entwicklungsprozess bislang nur begrenzt berücksichtigt. Im Rahmen der Vorentwurfsphase beschränkt sich die Betrachtung meist auf eine grobe Platzierung von Kabinenmonumenten wie Sitzen, Galleys und Lavatories, basierend auf den sogenannten Top Level Aircraft Requirements (TLARs). Eine detaillierte funktionale und systemtechnische Auslegung der Kabine findet hingegen erst in späten Entwurfsphasen statt und damit zu einem Zeitpunkt, an dem strukturelle und sicherheitsrelevante Bereiche des Flugzeugs bereits weitgehend festgelegt sind. Die Kabine muss sich infolgedessen

oftmals an verbleibende Einbauräume „anpassen“, wodurch eine gleichwertige Integration als Subsystem erheblich erschwert wird.

Diese Herangehensweise führt dazu, dass technologische Neuerungen nur schwer integrierbar sind. Jeder Versuch, neue Komponenten oder innovative Servicekonzepte in ein bereits weitgehend festgelegtes System zu überführen, ist daher mit erheblichem Aufwand verbunden. Anpassungen wirken sich unmittelbar auf Struktur, Energieversorgung und andere Subsysteme aus und erfordern komplexe Nachweise hinsichtlich Sicherheit und Zulassung. Gerade in der hochregulierten Luftfahrt bedeutet das einen beträchtlichen Planungs- und Validierungsaufwand. Ein solcher Entwicklungsablauf hemmt nicht nur den technischen Fortschritt, sondern erschwert auch die Umsetzung individueller Anpassungen. Dies ist ein wesentlicher Aspekt, der für Fluggesellschaften im Sinne eines gezielten Customizings zunehmend an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnt.

Für eine zukunftsorientierte Kabinenentwicklung braucht es daher neue Ansätze. Eine modular aufgebaute, flexibel anpassbare Entwurfskette, die kabinenrelevante Anforderungen bereits in frühen Phasen berücksichtigt, ist essenziell. Parametrische Modellierungsverfahren bieten dafür eine geeignete methodische Grundlage: Sie ermöglichen die automatisierte Erzeugung und Bewertung vielfältiger Konfigurationsvarianten auf Basis weniger Eingabeparameter. In Kombination mit dem Digitalen Faden, also einem konsistenten, durchgängigen Datenfluss über alle Phasen des Lebenszyklus hinweg, lassen sich technische Integrationsaspekte effizient abbilden. Gleichzeitig können auch spezifische Kundenwünsche frühzeitig berücksichtigt werden.

Die vorliegende Masterarbeit greift diesen Bedarf auf. Hierfür soll eine Methodik zur parametrischen Modellierung von Galleys entwickelt werden, die eine virtuelle, frühzeitige Auslegung ihrer strukturellen, energetischen und funktionalen Eigenschaften ermöglicht. Dadurch soll nicht nur die Integration ins Gesamtsystem verbessert, sondern auch das Potenzial zur individuellen Anpassung von Kabinenkonfigurationen gezielt gefördert werden. Die effiziente Variantenbildung, die Bewertung technischer Alternativen sowie die Optimierung von Bauraum, Masse und Energiebedarf bilden zentrale Bestandteile dieses Ansatzes. Durch die Verknüpfung mit dem digitalen Entwicklungsprozess leistet diese Arbeit somit einen Beitrag zu einer nachhaltigeren, flexibleren und datenbasierten Kabinenentwicklung, im Einklang mit den strategischen Zielen einer klimaneutralen Luftfahrt (Rauscher, et al., 2024).

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine Methodik zur Parametrisierung von Galleys zu entwickeln und diese in ein bestehendes digitales Kabinenmodell zu integrieren. Diese Methodik soll es ermöglichen, Galleys an unterschiedliche Airline-Anforderungen und Servicekonzepte im Rahmen des Customizings schnell und effizient anzupassen. Die Auswirkungen verschiedener Konfigurationen auf das Gesamtsystem Kabine werden anhand ausgewählter Leistungsparameter, die im weiteren Verlauf der Arbeit definiert werden, systematisch analysiert. Dabei werden folgende Forschungsfragen adressiert:

- Wie kann ein parametrisches Modell für Galleys gestaltet werden, das unterschiedliche Varianten durch variable Gerätekonfigurationen bei gleichzeitig hoher Modelltreue ermöglicht?
- Wie können unterschiedliche Servicekonzepte in die Galley-Konfiguration eingebunden und innerhalb eines parametrischen Modells realitätsnah abgebildet werden?
- Anhand welcher Leistungsparameter können Galley-Konfigurationen systematisch bewertet und miteinander verglichen werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wird ein Modell in MATLAB entwickelt, das auf Basis weniger Eingabeparameter die Konfiguration einer Galley sowie die Positionierung ihrer Komponenten bereits im Vorentwurfsprozess ermöglicht. Im Mittelpunkt steht dabei die Untersuchung, wie sich durch die Auswahl vordefinierter Catering-Konzepte gezielt Einfluss auf die Ausstattung und Bestückung der Galley nehmen lässt. Ergänzend werden die Ergebnisse einer Umfrage zur Akzeptanz von Self-Service-Konzepten ausgewertet, um die entwickelten technischen Lösungen besser an den Bedürfnissen der Passagiere auszurichten. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Modellierung und Analyse eines Galley-Systems innerhalb einer Single-Aisle-Kabine, wie sie typischerweise in Flugzeugen (zum Beispiel dem Airbus A320 oder A321) zu finden ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in zehn Hauptkapitel, die systematisch aufeinander aufbauen. In diesen Kapiteln wird schrittweise eine Methodik zur parametrischen Modellierung von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess der Flugzeugkabine entwickelt und umgesetzt. In der Folge können anhand geeigneter Kennzahlen mögliche Varianten bewertet werden.

In Kapitel 1 werden die Motivation, Zielsetzung und die zugrunde liegenden Forschungsfragen dieser Arbeit dargelegt. Dabei werden die Herausforderungen der Kabinenentwicklung im Kontext wachsender Anforderungen an Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Customizing herausgearbeitet und die Relevanz der Galley als zentrales Kabinenelement begründet.

Kapitel 2 analysiert aktuelle Methoden und Trends in der Kabinenentwicklung. Neben allgemeinen Innovationsfeldern wie Modularisierung, Digitalisierung und Nachhaltigkeit liegt der Schwerpunkt auf der technologischen Entwicklung von Galleys. Das Kapitel beleuchtet zudem die technischen Standards, Schnittstellen und Herausforderungen bei der Integration sowie den Stand der Forschung zur parametrischen Modellierung im Kabinenkontext.

In Kapitel 3 wird der virtuelle Entwicklungsprozess vorgestellt, wie er am DLR als digitaler End-to-End-Prozess umgesetzt wird. Die eingesetzten Tools CPACS, MATLAB, Blender und Unity werden in ihrer Rolle und Funktion erläutert und in den Gesamtprozess eingeordnet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der objektorientierten Programmierung in MATLAB als methodischer Grundlage.

Kapitel 4 beschreibt die methodische Entwicklung der Galley-Parametrisierung. Es werden die Anforderungen aus Forschung, Prozess und Praxis systematisch hergeleitet, das methodische Grundprinzip formuliert und die benötigten Eingaben, Klassen, Funktionen und Werkzeuge beschrieben. Damit wird die methodische Basis für die spätere technische Umsetzung gelegt.

In Kapitel 5 erfolgt die technische Implementierung des entwickelten Konzepts. Der Fokus liegt auf der regelbasierten Instanziierung und Platzierung der Galley-Typen sowie der Integration von Servicekonzepten. Zusätzlich werden die Analyse- und Bewertungsfunktionen erläutert, die zur Ermittlung technischer und ökologischer Leistungskennzahlen eingesetzt werden.

Kapitel 6 ergänzt die Modellierung um eine explorative Umfrage zur Akzeptanz von Self-Service-Konzepten bei Passagieren. Ziel ist es, ein qualitatives Meinungsbild zu erheben, das Rückschlüsse auf zukünftige Servicekonzepte und deren technische Implikationen zulässt.

Die Ergebnisse der technischen Umsetzung und der Umfrage werden in Kapitel 7 zusammengeführt. Es erfolgt eine strukturierte Darstellung typischer Konfigurationen, Kennzahlen und Visualisierungen aus dem Modell.

In Kapitel 8 werden die entwickelten Methoden kritisch reflektiert. Es erfolgt eine Diskussion der methodischen Stärken, Grenzen und Validität der Ergebnisse sowie eine Rückkopplung zu den Forschungsfragen.

Kapitel 9 zeigt Potenziale für die Weiterentwicklung des Modells auf, etwa durch eine detailliertere Integration dynamischer Betriebsprozesse oder eine stärkere Automatisierung.

Den Abschluss bildet Kapitel 10 mit einer kompakten Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in der digitalen Kabinenmodellierung.

2 Methoden und Trends in der Entwicklung von Flugzeugkabinen

Die Auslegung moderner Galleys ist untrennbar mit den übergeordneten Entwicklungen in der Flugzeugkabine verbunden. Kapitel 2 beschreibt zentrale Innovationsfelder, technische Standards und integrative Herausforderungen, die bei der Konzeption moderner Bordküchen zu berücksichtigen sind. Ergänzend wird der aktuelle Forschungsstand zur parametrischen Modellierung dargestellt. Diese Zusammenhänge sind entscheidend für die methodische Herleitung des digitalen Galley-Modells im weiteren Verlauf der Arbeit.

2.1 Kabinenentwicklung – Trends und Innovation

Die Entwicklung moderner Flugzeugkabinen ist durch einen tiefgreifenden Wandel gekennzeichnet, der sowohl technologisch als auch funktional neue Maßstäbe setzt. Der Fokus liegt nicht mehr allein auf der Optimierung von Sitzplatzkapazitäten und Gewicht, sondern zunehmend auf Aspekten wie Komfort, Individualisierung, digitaler Konnektivität und Nachhaltigkeit. Die Flugzeugkabine wird dabei nicht nur als passiver Raum betrachtet, sondern als aktives Interface zwischen Passagier, Besatzung und Technik. Globale Luftfahrtakteure treiben diese Entwicklung voran und setzen dabei auf modulare Plattformstrategien, digitale Integrationskonzepte sowie KI-gestützte Systeme.

Ein aktuelles Bild dieser Entwicklungen bot die Aircraft Interiors Expo (AIX) 2025 in Hamburg. Die Messe gilt als eine der wichtigsten internationalen Plattformen für Kabinenausstattung, Bordunterhaltung und Flugzeuginnenraumtechnologie. Zahlreiche Hersteller präsentieren dort ihre neuesten Konzepte und Produktinnovationen. Die im Folgenden beschriebenen Entwicklungen basieren daher auch auf Erkenntnissen und Eindrücken von der AIX 2025.

2.1.1 Modularität und Komfort

Ein zentrales Ziel aktueller Kabinenentwicklung ist die Verwirklichung eines durchgängigen Komforterlebnisses für den Passagier. Modularität ist dabei ein zentrales Prinzip dieser Entwicklung. Airbus verfolgt mit der Airspace-Kabine einen plattformübergreifenden Ansatz, der auf den Modellfamilien A320, A330neo und A350 basiert. Komfortsteigerungen erfolgen durch modulare Elemente wie XL-Gepäckfächer, LED-Ambientebeleuchtung und geräuschoptimierte Strukturen (Airbus, 2023). Im Rahmen der Cabin Vision 2035 plant Airbus langfristig noch stärker anpassbare Kabinen, die sich flexibel an Fluglänge, Auslastung oder Zielgruppe anpassen lassen. Auch Lufthansa adressiert mit dem Allegris-Kabinensystem den Wunsch nach Individualisierung, z. B. durch sieben unterschiedliche Sitztypen in der Business Class und

modulare Servicezonen (Lufthansa Group, 2023). Diehl Aviation ergänzt mit dem barrierefreien Space³-Modul ein leichtgewichtiges, platzsparendes Lavatory-System, das Inklusion, Gewichtsersparnis und Integration zusätzlicher Sitzplätze ermöglicht (Diehl Aviation, 2025b). Eine modulare Raumgestaltung bildet wie zuvor dargestellt nicht nur die Basis für Komfort und Differenzierung, sondern auch für neue betriebliche Flexibilität und ökologische Effizienz.

2.1.2 Digitalisierung der Kabine

Anknüpfend an die Modularisierung zeigt sich auch im Bereich der Digitalisierung eine zunehmende Systemintegration, bei der Komfort, Effizienz und Wartbarkeit gleichermaßen verbessert werden sollen. Ziel ist die Entwicklung intelligenter, vernetzter Kabinenkomponenten, die betriebliche Abläufe automatisiert erfassen und optimieren.

Diehl Aviation strebt mit der Future Cabin eine intelligente Vernetzung von Lichtsystemen, Galleys, Anzeigen und Sensorik über ein einheitliches Kommunikationsprotokoll an. Dies ermöglicht prädiktive Wartung und eine betriebsoptimierte Ressourcennutzung. Airbus verfolgt mit Cabin Vision 2035+ (Airbus, 2023) eine digitale Vernetzung von Innenraum, Cockpit und Bodenpersonal. Safran Cabin bietet mit Connected Interiors (Safran Group, 2025f) eine retrofit-fähige Lösung zur Zustandsüberwachung mittels IoT-Technologien.

Die Digitalisierung eröffnet somit nicht nur neue Komfort- und Wartungsoptionen, sondern leistet auch einen wesentlichen Beitrag zur datenbasierten Optimierung von Energie- und Ressourceneinsatz.

2.1.3 Nachhaltigkeit und Effizienz

Nachhaltigkeit ist zu einem weiteren zentralen Gestaltungsprinzip in der Luftfahrtentwicklung geworden. Insbesondere in der Kabine stehen Materialwahl, Gewichtsoptimierung, Lebenszyklusbewertung und Recyclingfähigkeit im Fokus aktueller Innovationsstrategien. Hierdurch soll der CO_2-Ausstoß über die gesamte Betriebsdauer eines Flugzeugs hinweg reduziert werden, ohne dabei jedoch Komfort, Funktionalität oder Wartungsfähigkeit einzuschränken.

Diehl Aviation zeigt dies u. a. mit der vollständig recycelbaren ECO-Bin und der gewichtsoptimierten ECO Sidewall (Diehl Aviation, 2025a). Letztere kombiniert Komposit-Materialien mit einem Pulverbeschichtungsverfahren zur Reduktion von Masse, CO_2-Fußabdruck und Materialverlust (Flug Revue, 2024). Weitere Innovationen umfassen bionisch inspirierte Strukturen wie ECO Brackets sowie visuelle Kabinenelemente mit Displaytechnologie zur Gewichtseinsparung. Airbus greift ebenfalls viele dieser Entwicklungen in der Cabin Vision 2035+

auf und überführt sie in eine strategische Gesamtperspektive. Zentrale Themen sind hier Gewichtsreduktion durch Bionic-Design, die Integration kreislauffähiger Materialien, eine vollständige Lebenszyklusbewertung (Life Cycle Assessment) sowie neue Catering- und Stauraumkonzepte, zur Minimierung von Abfall und Masse an Bord. Der Paradigmenwechsel hin zur zirkulären Kabine soll nicht nur ökologische Vorteile mit sich bringen, sondern durch vereinfachte Reparaturfähigkeit und modulare Komponenten auch wirtschaftliche Effizienzgewinne ermöglichen (Airbus, 2023).

Fazit: Kabine als ganzheitliches System

Die Kabine entwickelt sich zunehmend von einem passiven Passagierraum zu einem aktiven, hochvernetzten und strategisch bedeutsamen System innerhalb der Flugzeugarchitektur. Im Zentrum dieser Entwicklung stehen Anforderungen an Flexibilität, Digitalisierung und Nachhaltigkeit, die nicht mehr isoliert betrachtet, sondern systemisch verknüpft werden. Modularisierung ermöglicht eine bedarfsgerechte Anpassung an Passagierbedürfnisse und Streckenprofile, während digitale Systeme eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung betrieblicher Daten erlauben, die sich mit positiven Effekten für Wartung, Betrieb und Ressourcennutzung auswirken.

Parallel dazu vollzieht sich ein grundlegender Wandel in der Material- und Strukturentwicklung. Recyclebare Werkstoffe, energieeffiziente Fertigungsverfahren und bionisch inspirierter Leichtbau tragen dazu bei, ökologische Ziele mit wirtschaftlicher Realisierbarkeit zu vereinen. Die dargestellten Konzepte führender Hersteller belegen, dass solche Lösungen auch in hochregulierten und sicherheitskritischen Bereichen wie der Kabine technisch umsetzbar sind. Insgesamt wird deutlich, dass die Kabine als intelligentes, ressourcenschonendes und adaptives System zu einem entscheidenden Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit zukünftiger Flugzeuge an Bedeutung gewinnt und damit eine wesentliche Rolle für die methodische Auslegung und Bewertung einzelner Kabinenkomponenten wie der Galley einnimmt.

2.2 Galley-Entwicklung – Technologien und Konzepte

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Galley-Systemen wird zunehmend durch technologische Innovationen in der Luftfahrt bestimmt. Dabei stehen drei zentrale Entwicklungsrichtungen im Vordergrund: Die Digitalisierung und Vernetzung von Serviceprozessen, modulare und multifunktionale Galley-Konzepte sowie die Anwendung bionischer Prinzipien und generativen Designs zur Struktur- und Gewichtsoptimierung. Im Folgenden werden diese drei Innovationsbereiche exemplarisch vorgestellt und analysiert.

2.2.1 Vernetzte und KI-basierte Systeme

Ein innovatives Beispiel für die Digitalisierung in der Galley-Entwicklung ist das Galley.AI-System, das 2025 mit dem Crystal Cabin Award in der Kategorie Cabin Technologies ausgezeichnet wurde. Dieses System kombiniert fortschrittliche künstliche Intelligenz (KI) mit Sensorik, um sowohl den Bordservice als auch die Wartungsplanung signifikant zu optimieren.

Galley.AI ist darauf ausgelegt, die Effizienz der Crew zu steigern und die Kommunikation mit Passagieren zu verbessern. Über das sogenannte Electronic Flight Bag werden Statusmeldungen automatisiert an die Crew übermittelt, während Serviceinformationen in Echtzeit auch auf die Endgeräte der Passagiere übertragen werden können. Dies erhöht die Transparenz des Bordservices und führt zu einem individualisierten, kontinuierlichen Informationsfluss während des Fluges (Collins Aerospace, 2025).

Ein zentrales Element des Systems ist die sensorbasierte Überwachung der Galley-Einbauten sowie die Integration von intelligenten Geräteeinsätzen (smart inserts). Diese ermöglichen eine prädiktive Wartung bevor Störungen auftreten. Dadurch lassen sich Standzeiten reduzieren und Wartungsprozesse optimieren. Zudem erlaubt die KI-basierte Steuerung eine dynamische Verfolgung von Serviceanfragen, Bestellungen und Inventarständen in Echtzeit. In Stoßzeiten unterstützt das System die Crew mit situationsgerechten Empfehlungen zur Arbeitsorganisation (Collins Aerospace, 2025).

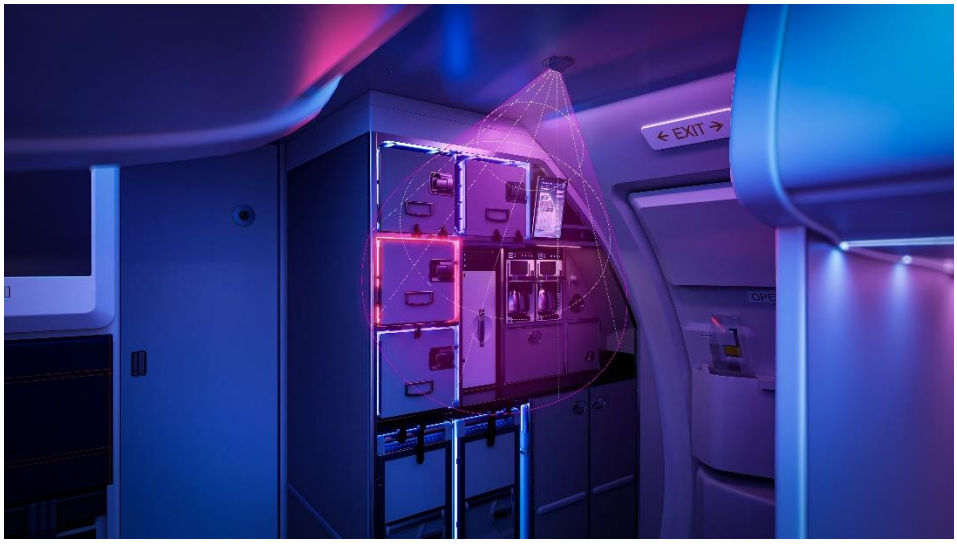

Abbildung 2-1: Intelligente Galley mit sensorbasierter Überwachung
(Collins Aerospace, 2025)

Durch die ganzheitliche Systemarchitektur wird eine Vielzahl bisher getrennter Elemente wie Galley-Komponenten, Crew-Werkzeuge und Passagier-Schnittstellen zu einem integrierten Netzwerk zusammengeführt. Dies schafft nicht nur Effizienz in der Kabinenlogistik, sondern steigert auch die Kundenzufriedenheit (RTX, 2025).

2.2.2 Modulare und multifunktionale Konzepte

Ein weiterer Trend in der Galley-Entwicklung ist die zunehmende Modularisierung und Multifunktionalität von Galley-Systemen. Der verfügbare Kabinenraum soll dadurch möglichst flexibel und bedarfsorientiert genutzt werden.

Ein Beispiel dafür ist das Konzept der Smart Galley, das durch ein modulares Plug-and-Play-Prinzip die einfache Anpassung der Galley an unterschiedliche Flugprofile ermöglicht. Einzelne Module lassen sich schnell und ohne aufwendige Umbauten austauschen. Ein integriertes Steuersystem erkennt die neue Konfiguration automatisch und reguliert das Energiemanagement effizient, was zu reduziertem Schulungsbedarf und einer optimierten Ressourcennutzung führt (Diehl Aviation, 2018).

Abbildung 2-2: Modulares Smart Galley-Konzept mit Plug-and-Play- Funktionalität
(Diehl Aviation, 2018)

Ergänzt wird dieses Konzept durch das Galley Bar Module, das eine konventionelle Doppeltrolley-Position in eine multifunktionale Fläche umwandelt. Diese kann als Selbstbedienungsbereich für Passagiere, zusätzliche Arbeitsfläche für die Crew oder Präsentationsfläche für Produkte dienen. Die Integration erfolgt ohne Kabinenraumverlust und ist sowohl für neue als auch bestehende Flugzeuge geeignet. Der modulare Einsatzbereich fördert soziale Interaktion an Bord und eröffnet Fluggesellschaften zusätzliche Service- und Umsatzpotenziale (Diehl Aviation, 2025c).

2.2.3 Leichtbau durch generatives Design

Neben der Digitalisierung und Modularisierung rückt auch die strukturelle Optimierung von Galley-Bauteilen zunehmend in den Fokus. Hervorzuheben ist hierbei der Einsatz von generativem Design und bionischer Formgebung zur Gewichtseinsparung.

Ein bedeutendes Beispiel liefert die bionische Trennwand, die Airbus in Zusammenarbeit mit Autodesk und dem Designstudio The Living entwickelt hat. Sie dient als Schnittstelle zwischen Passagierbereich und Galley und erfüllt sicherheitsrelevante Anforderungen wie die Integration eines Klappsitzes sowie eine Aussparung für Tragen in Notfällen. Mithilfe generativen Designs, das auf natürlichen Wachstumsprozessen basiert, wurde eine sehr leichte und zugleich stabile Struktur realisiert. Das Gewicht der Trennwand konnte dadurch um 54 % von 65 kg auf rund 30 kg reduziert werden (Airbus, 2016). Die Struktur wurde aus Scalmalloy® gefertigt, einer hochfesten Aluminium-Magnesium-Scandium-Legierung, die speziell für den 3D-Druck entwickelt wurde. Insgesamt besteht die Trennwand aus 122 Bauteilen, die in sieben Druckvorgängen produziert und montiert wurden (Airbus, 2017).

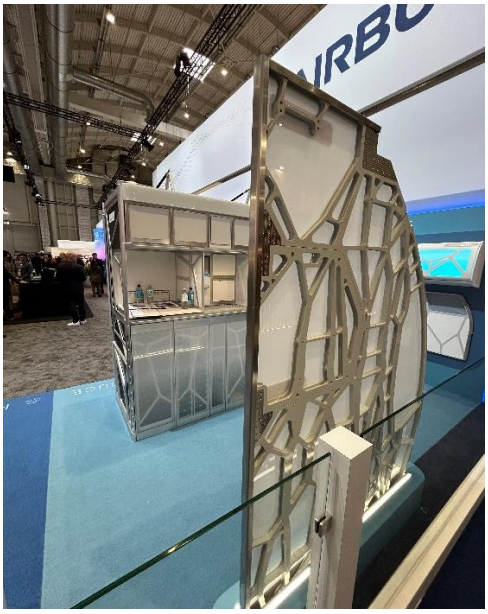

Abbildung 2-3: Bionisch optimierte Trennwandstruktur von Airbus,
aufgenommen auf der Aircraft Interiors Expo 2025 (eigene Aufnahme)

Neben der funktionalen Leichtbauweise bietet diese Entwicklung auch ökologische Vorteile: Die Implementierung in die A320-Flotte könnte laut Airbus jährlich bis zu 465.000 Tonnen CO_2 einsparen. Das Projekt wurde mit dem Bundespreis Eco-Design ausgezeichnet und gilt als Paradebeispiel für nachhaltige Flugzeugarchitektur (Airbus, 2016).

Fazit: Synergien durch Digitalisierung und Bionik

Die aktuellen Entwicklungen in der Galley-Technologie zeigen drei zentrale Innovationspfade auf: die digitale Vernetzung mit KI-gestützten Assistenzsystemen, die flexible Modularisierung für eine effiziente Kabinennutzung sowie die strukturelle Optimierung durch generatives Design.

Während Systeme wie Galley.AI auf Echtzeitdaten und Automatisierung zur Verbesserung des Bordservices setzen, ermöglichen modulare Lösungen eine anpassbare Raumnutzung und neue Geschäftsmodelle. Die bionische Trennwand wiederum verdeutlicht das Potenzial von Leichtbau und ressourcenschonendem Design im Kontext ökologischer Anforderungen.

Insgesamt wird deutlich, dass moderne Galley-Systeme nicht mehr ausschließlich logistische Einrichtungen darstellen, sondern zu intelligenten, integrierten und nachhaltigen Systemkomponenten der Flugzeugkabine avancieren.

2.3 Galley als multifunktionales Kabinenelement

Die Galley ist ein zentrales Kabinenelement mit hoher technischer, logistischer und gestalterischer Relevanz. Ihre modulare Struktur und vielfältige Auslegung machen sie zum Schlüsselbereich für Funktionalität, Energieeffizienz und kundenindividuelle Anpassung. In diesem Kapitel wird die Galley systematisch in ihrer technischen Architektur, betrieblichen Funktion und gestalterischen Wirkung im Kabinenkontext beschrieben.

2.3.1 Technischer Aufbau und Komponenten

Die Galley hat in einem Flugzeug eine zentrale Versorgungsfunktion und bildet das logistische Rückgrat des Bordservice. Sie dient der Lagerung, Zubereitung und Bereitstellung von Speisen, Getränken und Verbrauchsmaterialien und stellt gleichzeitig eine technische Schnittstelle zu den Energie-, Wasser- und Abfallsystemen dar. Integriert in die Kabinenstruktur ist sie ein funktionales Raumelement, das sowohl in die Arbeitsabläufe des Kabinenpersonals als auch in die übergreifende Flugzeuginfrastruktur eingebunden ist.

Typische Hauptkomponenten einer Galley umfassen unter anderem sogenannte Trolleys, rollbare Behälter, in denen Mahlzeiten, Getränke oder Verbrauchsmaterialien verstaut und während des Bordservices durch die Kabine bewegt werden. Weiterhin kann eine Galley Heizeinheiten wie Heißluft- oder Dampföfen, elektrisch betriebene Kühleinheiten, Frischwasserbehälter, integrierte Abfallmodule (Waste Units) sowie verschiedene Staufächer für Besteck, Verpackungen oder Vorräte enthalten. Je nach Flugzeugtyp, Flugprofil und Servicekonzept kann die Anzahl und Anordnung dieser Elemente erheblich variieren.

Zur strukturellen Organisation dieser Komponenten werden standardisierte Einschubmaße verwendet. Zwei international etablierte Systeme sind ATLAS (Allied Transports Lightweight Airborne Standard) und KSSU (KLM, Swissair, SAS, UTA – ein von vier Airlines entwickelter Standard). Beide Systeme definieren Maße und Schnittstellen für Einbauelemente wie Trolleys, Öfen oder Staufächer, um eine modulare und austauschbare Verwendung in unterschiedlichen Galleymodulen zu ermöglichen. Diese Standardisierung erlaubt eine hohe Flexibilität in der Galley-Konfiguration, erleichtert die Wartung und unterstützt eine wirtschaftlich effiziente Flottenausstattung.

2.3.2 Variantenvielfalt und Customizing

Eine hohe Flexibilität in der Konfiguration beschreibt den Kern des Begriffs Variantenvielfalt. Diese Variantenvielfalt beschreibt die große Bandbreite an möglichen Ausprägungen eines Galleymoduls, die sich durch Flugzeugtyp, Streckenprofil, Servicekonzept und Airline-Strategie ergibt. Während auf Kurzstrecken eine reduzierte Ausstattung mit geringem Energiebedarf genügt, da in der Regel lediglich kalte Snacks und Getränke bereitgestellt werden, erfordern Langstreckenflüge eine umfassend ausgestattete Galley mit mehreren Heiz-, Kühl- und Lagereinheiten, um den deutlich umfangreicheren Servicebetrieb, einschließlich der Zubereitung und Bereitstellung warmer Mahlzeiten, energie- und prozessseitig sicherzustellen.

Customizing bezeichnet in diesem Zusammenhang die gezielte Anpassung standardisierter Module an die spezifischen Anforderungen einer Fluggesellschaft. Dabei spielen neben operativen Aspekten wie etwa dem Flugprofil oder den kulturellen Servicepräferenzen auch strategische Überlegungen eine Rolle. Airlines entscheiden sich je nach Marktpositionierung bewusst für unterschiedliche Serviceumfänge: vom rein funktionalen Minimalservice mit hoher Sitzplatzdichte bis hin zu umfangreichen Premiumkonzepten mit Bar- oder Loungebereichen. Diese Entscheidungen beeinflussen so direkt die Auswahl und Anordnung der Galleyelemente und wirken sich folglich auf Energieverbrauch, Gewicht, Abfallmanagement und verfügbare Kabinenfläche aus.

Die Galley wird damit zu einem hochgradig missionsabhängigen Funktionsbereich, dessen Auslegung individuell auf die Philosophie der jeweiligen Airline und den Einsatzkontext zugeschnitten sein muss. Die daraus resultierende Variantenvielfalt stellt nicht nur eine Herausforderung für die physische Integration dar, sondern bildet zugleich eine wesentliche Grundlage für die parametrische Modellierung in der Kabinenauslegung, wie sie in Kapitel 2.6 näher betrachtet wird.

2.3.3 Energiebedarf und ökologische Auswirkungen

Ein oft unterschätzter Aspekt der Galley ist ihr hoher Strombedarf, denn tatsächlich stellt sie mit einer möglichen maximalen Nennleistung von 75 Kilowatt (Schabe, 2015), den größten elektrischen Verbraucher innerhalb der Kabine dar. Geräte wie Backöfen, Heißwasserbereiter, Kühlaggregate und Beleuchtungssysteme erfordern eine kontinuierliche Energieversorgung, insbesondere auf Mittel- und Langstreckenflügen mit umfangreichem Serviceangebot.

Der Stromverbrauch der Galley ist dabei nicht nur aus technischer Sicht relevant, sondern hat auch direkte Auswirkungen auf den Kerosinbedarf des Flugzeugs. Die elektrische Energie wird primär über die Triebwerksgeneratoren oder die Auxiliary Power Unit (APU) bereitgestellt, deren zusätzlicher Leistungsabruf wiederum den Treibstoffverbrauch erhöht. In der Praxis bedeutet dies, dass jede eingesparte Kilowattstunde innerhalb der Galley zu einer messbaren Reduktion von CO_2-Emissionen beiträgt.

Gerade vor dem Hintergrund der ökologischen Transformation der Luftfahrtbranche kommt dem Energieeinsatz in der Galley daher eine besondere Bedeutung zu. Fortschritte in der Geräteeffizienz, der Einsatz energieoptimierter Betriebsmodi oder die gezielte Abschaltung ungenutzter Verbraucher können hier unmittelbar zur Erreichung der Emissionsziele beitragen. Gleichzeitig verdeutlicht dieser Zusammenhang, dass die Galley nicht isoliert betrachtet werden darf, sondern integraler Bestandteil der kabinenweiten Energiebilanz ist, mit entsprechenden Implikationen für die Flugplanung, das Ladegewicht und das Energiemanagement an Bord.

2.3.4 Einfluss auf Passagiererlebnis und Markenprofilierung

Neben ihrer funktionalen und energetischen Bedeutung hat die Galley zunehmend auch eine gestalterische und markenstrategische Relevanz. Während sie traditionell als rein technisches Servicemodul konzipiert war, entwickeln sich moderne Galleys zunehmend zu sichtbaren, aktiv gestalteten Raumelementen innerhalb der Kabine. Vor allem in Premiumklassen spielt die optische und funktionale Gestaltung der Galley eine zentrale Rolle für das subjektive Passagiererlebnis und die Differenzierung im Wettbewerb.

Durch neue Konzepte wie integrierte Barbereiche oder Social Spaces wird die Galley teilweise in den öffentlichen Kabinenbereich hinein erweitert. Beispiele dafür finden sich etwa in den Lounge-Konzepten des Airbus A350 oder A380, bei denen vormals rein funktionale Flächen zur sozialen Interaktion und Aufwertung des Markenauftritts genutzt werden. Die damit verbundene Neugestaltung macht die Galley zu einem sichtbaren Bestandteil des Bordprodukts und eröffnet zusätzliche Möglichkeiten zur Markeninszenierung.

Designmerkmale wie Materialwahl, Farbgebung, Lichtführung oder formale Gestaltung können dabei gezielt eingesetzt werden, um die Markenidentität einer Airline räumlich erfahrbar zu machen. Dadurch wird die Galley nicht nur als logistische Infrastruktur erfahrbar, sondern auch als Ausdruck von Qualität, Stil und Serviceversprechen wahrgenommen. In der strategischen Kabinenplanung gewinnt sie damit sowohl als funktionaler Knotenpunkt als auch als Instrument zur emotionalen Kundenbindung an Bedeutung.

2.4 Technische Standards und Schnittstellen

Die Integration von Galley-Systemen in moderne Verkehrsflugzeuge stellt eine komplexe ingenieurtechnische Aufgabe dar, die weit über den physischen Einbau hinausgeht. Als multifunktionale Komponenten innerhalb der Kabine müssen Galleys mit verschiedenen Flugzeugsystemen abgestimmt werden, insbesondere im Hinblick auf elektrische Versorgung, Wasserführung, digitale Steuerung und strukturelle Verankerung. Dabei sind zahlreiche luftfahrtspezifische Normen, Schnittstellendefinitionen und Zertifizierungsanforderungen zu beachten. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die systematische Einordnung dieser technischen Rahmenbedingungen, gegliedert nach ihrer funktionalen Rolle.

2.4.1 ATA-Klassifikation

Zur strukturierten Einordnung dieser Komponenten wird in der Luftfahrt das international standardisierte ATA-Klassifikationssystem (Air Transport Association) verwendet. Dieses Regelwerk unterteilt das Flugzeug in klar definierte Themenfelder (ATA-Chapters) und bildet die Grundlage für Wartung, Systemintegration und technische Dokumentation.

Die Abbildung 2 4 veranschaulicht die relevanten Schnittstellen der Galley zu verschiedenen ATA-Kapiteln wie z.B. zur Systemgruppe Licht (ATA33) oder zur elektrischen Versorgung (ATA 24). Die primäre Systemverortung erfolgt gemäß ATA Chapter 25 – Equipment / Furnishings, das sämtliche nicht-strukturellen Kabineneinbauten umfasst. Zu den zentralen Kabinenkomponenten zählen unter anderem Sitze, Trennwände, Stauräume sowie die Galley als wesentliche Funktionseinheit für die Bordverpflegung. Abhängig vom Flugzeugmuster und der betreiberspezifischen Kabinenauslegung kommen unterschiedliche Galley-Layouts zum Einsatz. Eine typische Ausführung ist die Half-Galley (vgl. Abbildung 2-4), eine kompakte Variante mit reduzierter Geräteanzahl. Ergänzend dazu steht die Full-Galley als großdimensionierte Ausführung zur Verfügung, die in der Regel im hinteren Kabinenbereich verbaut ist und erweiterten Stauraum und weitere Geräte bereitstellt. Zur Erhöhung der betrieblichen Flexibilität kommen zunehmend modulare Systeme zum Einsatz, die eine bedarfsgerechte Anpassung an

airline-spezifische Servicekonzepte, unterschiedliche Fluglängen und variierende Kabinenkonfigurationen ermöglichen.

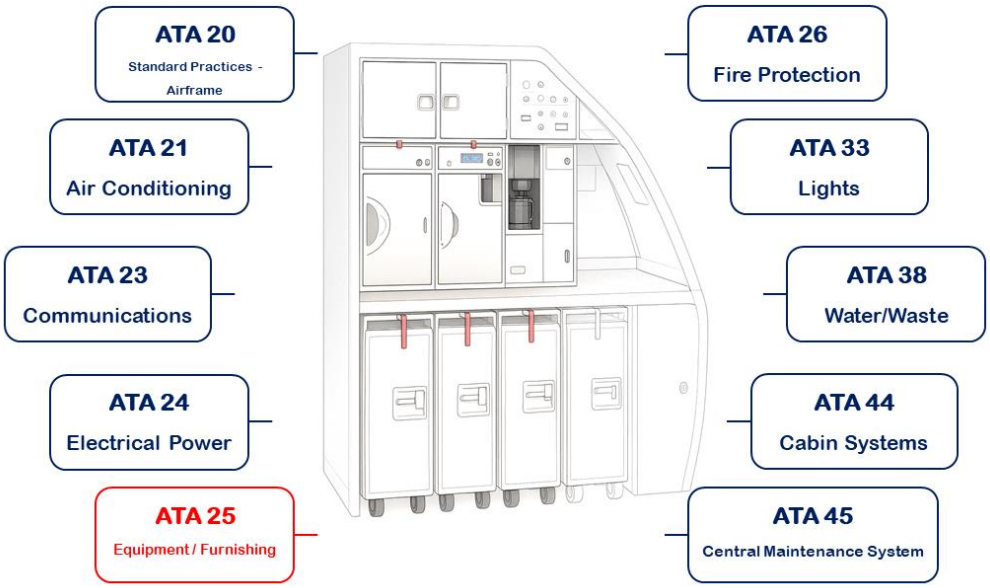

Abbildung 2-4: Übersicht der ATA-Kapitel relevanter Schnittstellen einer Galley

Die Vielzahl dieser Schnittstellen verdeutlicht, dass die Galley weit mehr als eine Bordküche ist. Die korrekte Klassifikation ist damit nicht nur für den technischen Betrieb relevant, sondern auch für Wartung, Zulassung und lebenszyklusbezogene Systempflege.

2.4.2 Normen und Zulassungsvorgaben

Die technische Auslegung und Zulassung von Galley-Systemen basiert auf international anerkannten Normen und Vorschriften. Eine zentrale Rolle spielt hierbei die CS-25 (Certification Specification for Large Aeroplanes), ein Regelwerk der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA), dass die lufttüchtigkeitsrelevanten Anforderungen für die Zulassung großer Flugzeuge definiert. Relevant ist hierbei die Vorschrift CS 25.853, die das Brand-, Rauch- und Toxizitätsverhalten (engl. Fire, Smoke and Toxicity – FST) von Kabinenmaterialien regelt. Sämtliche in der Galley eingesetzten Materialien für Verkleidungen bis hin zu Gerätegehäusen müssen demnach flammenhemmend wirken und dürfen im Brandfall keine toxischen Emissionen freisetzen.

Ein weiterer zentraler Standard ist RTCA DO-160 (Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment), ein Prüfprotokoll der Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). Es beschreibt die Umgebungsbedingungen und Testverfahren, denen elektrische und elektronische Geräte in der Luftfahrt unterzogen werden müssen. Galley-

Komponenten wie Öfen, Steuergeräte oder Displays müssen dabei eine Vielzahl von Tests bestehen, darunter Vibration, Temperaturwechsel, Luftdruck, Feuchtigkeit sowie elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Diese Prüfungen stellen sicher, dass die Geräte auch unter realen Flugbedingungen dauerhaft funktionsfähig und sicher sind.

Die Qualitätssicherung auf Systemebene orientiert sich in der Luftfahrt an den branchenspezifischen Normen AS9100 / EN9100, die über die Anforderungen der ISO 9001 hinausgehen. Diese Regelwerke ergänzen den allgemeinen Qualitätsstandard um luftfahrtspezifische Vorgaben in den Bereichen Dokumentation, Rückverfolgbarkeit, Änderungsmanagement und Risikoanalyse. Hersteller und Zulieferer von Galley-Komponenten müssen im Rahmen der Zulassung nachweisen, dass ihre Fertigungs- und Prüfprozesse diesen erweiterten Anforderungen genügen.

Für die digitale Kommunikation gelten zusätzlich ARINC-Spezifikationen (Aeronautical Radio, Incorporated), ein Standardisierungssystem für Luftfahrtkommunikation. Während ARINC 810 die mechanischen und elektrischen Standards von Galley-Einbauten beschreibt, legt ARINC 812 die Protokolle für die vernetzte Steuerung und Überwachung dieser Geräte fest. Diese Regelwerke bilden gemeinsam den technischen Rahmen, innerhalb dessen Galley-Systeme entwickelt, geprüft, zugelassen und gewartet werden müssen.

2.4.3 Schnittstellen der Galley

Die technische Komplexität von Galley-Systemen zeigt sich insbesondere in der Vielzahl systemischer Schnittstellen, die im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden müssen. Als einer der größten elektrischen Verbraucher in der Kabine ist die Galley fest in das Bordstromnetz eingebunden. Die Versorgung energieintensiver Komponenten wie Backöfen, Kühlschränke, Heißwasserbereiter und Beleuchtungselemente erfordert dabei eine präzise Lastverteilung sowie den Einsatz zertifizierter Leitungen und Schutzsysteme. Abbildung 2-5 verdeutlicht die Vielzahl relevanter Schnittstellen in Form einer schematischen Übersicht. Neben klassischen Versorgungsanschlüssen wie Strom, Wasser, Frischluft, Abwasser und Kühlung treten strukturelle, betriebliche und nutzerbezogene Anforderungen hinzu: von ergonomischen Aspekten und Wartungszugänglichkeit über Nachhaltigkeitskriterien und Zulassungsstandards bis hin zu Airline-spezifischen Konfigurationen und Anforderungen an die Bodenabfertigung.

Gerade diese Vielschichtigkeit macht die Galley zu einem komplexen Subsystem innerhalb der Flugzeugkabine. Im Gegensatz zu standardisierten, rein strukturellen Komponenten (z. B. Sitzreihen) verlangt die Galley eine enge Abstimmung zwischen technischen Gewerken, Betriebslogik und Nutzerbedürfnissen. Entsprechend hoch ist auch das Potenzial für Zielkonflikte.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die Galley nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern als hochvernetztes Subsystem im Spannungsfeld zwischen Technik, Betrieb und Nutzererlebnis verstanden werden muss. Genau diese Komplexität bildet den Ausgangspunkt für

Abbildung 2-5: Einflussfaktoren und Schnittstellen einer Galley im Flugzeugsystemumfeld

die im folgenden Kapitel dargestellten Herausforderungen bei der Integration von Galleys in Flugzeugkabinen.

2.5 Herausforderungen bei der Integration von Galleys

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Galley als technisch anspruchsvolles und multifunktionales Teilsystem im Flugzeug vorgestellt. Ihre Einbindung in elektrische, wasserführende und digitale Systeme sowie die Vielzahl an geltenden Normen und Zulassungsvorgaben verdeutlichen ihre Systemkomplexität. Gleichzeitig zeigt sich, dass moderne Galleys zunehmend durch Entwicklungen wie Digitalisierung, Modularisierung und Nachhaltigkeitsanforderungen geprägt sind.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche konkreten Herausforderungen bei der Integration von Galleys in der Kabine sowohl im Entwicklungsprozess als auch im praktischen Betrieb entstehen. Die folgenden Abschnitte fassen zentrale Problemfelder zusammen, die in Forschung und Industrie betrachtet werden.

2.5.1 Raum- und Gewichtsoptimierung

Im Rahmen des Vorentwurfsprozesses (Overall Aircraft Design, OAD) wird die Kabinenfläche primär für Passagiersitze optimiert, während Funktionsbereiche wie Galleys nachrangig berücksichtigt werden. Vor allem bei Single-Aisle-Flugzeugen, in denen jeder Zentimeter Kabinenvolumen wirtschaftlich genutzt werden muss, konkurrieren Galleys mit Sitzen, Gepäckfächern, Lavatories und sonstigen Ausstattungen um den verbleibenden Bauraum. Der daraus resultierende Zielkonflikt zwischen einer möglichst kompakten Bauweise und der gleichzeitigen Gewährleistung vollständiger Funktionalität sowie sicherheitsrelevanter Anforderungen ist planerisch schwer aufzulösen (Bahns, et al., 2014).

Zusätzlich beeinflusst das Gewicht der Galley direkt den Treibstoffverbrauch und die Reichweite des Flugzeugs. Als das schwerste Kabinenmonument steht sie im Fokus ressourcenschonender Auslegung. Die Anforderungen an strukturelle Belastbarkeit, thermische und feuchtigkeitsbezogene Beständigkeit sowie Crashverhalten lassen eine einfache Gewichtsreduktion nicht zu.

Die konzeptuelle Verbindung von Gewichtsreduktion und Variantenflexibilität erschwert die Systemauslegung zusätzlich. Bei multinationalen Flugzeugprogrammen oder Flotten mit hoher Individualisierungsrate besteht die Anforderung, Galley-Komponenten modular und anpassbar zu gestalten, ohne dabei strukturelle Redundanzen oder ineffiziente Mehrgewichtslösungen zu erzeugen (Hanna, et al., 2020). In der Praxis bedeutet dies, dass Entwicklungsprozesse durch eine Vielzahl widersprüchlicher Anforderungen geprägt sind: maximale Anpassbarkeit auf der einen Seite, aber auch minimale Masse gepaar mit maximaler Stabilität auf der anderen Seite.

Basierend auf der Literaturrecherche zur Entwicklung von Galley-Konzepten zeigt sich, dass diese Zielkonflikte nur durch interdisziplinäre Ansätze beherrschbar sind, wobei gerade die Integration von Leichtbau- und Modularisierungsstrategien als Antwort auf diese komplexen Rahmenbedingungen verstanden wird (Hanna, et al., 2021). Doch auch diese Lösungen bringen ihrerseits neue Herausforderungen mit sich, etwa in Form von Schnittstellenproblemen, Montageaufwand oder Zulassungsbarrieren. Damit bleibt die raum- und gewichtseffiziente Integration der Galley ein zentrales, nicht abschließend gelöstes Spannungsfeld der Kabinenentwicklung.

2.5.2 Montage und Wartung

Die Montage von Galley-Systemen ist durch die begrenzten physischen Zugangsmöglichkeiten zum Rumpfinneren deutlich erschwert. Insbesondere die Einbringung über Passagiertüren schränkt die Möglichkeit vormontierter Großbauteile ein. In der Praxis führt dies häufig dazu, dass Galleys in Einzelkomponenten angeliefert und erst innerhalb des Flugzeugrumpfs

zusammengebaut werden müssen, was einen Prozess darstellt, der nicht nur zeit-, sondern auch kostenintensiv ist (Bahns, et al., 2014).

Ein weiteres Problem ergibt sich aus dem eingeschränkten Zugang zu installierten Systemen bei Wartungs- oder Reparatureingriffen. Ohne modulare Demontagemöglichkeiten kann der Austausch defekter Komponenten unverhältnismäßig aufwendig werden, insbesondere bei eingebauten Geräten oder Leitungsführungen. Die Herausforderung besteht dabei nicht nur in der baulichen Erreichbarkeit, sondern auch in der Vielzahl unterschiedlicher Varianten und kundenspezifischer Konfigurationen, die den standardisierten Austausch zusätzlich erschweren (Hanna, et al., 2020).

Auch aus Retrofit-Sicht sind eine digitale Dokumentation und Änderungsverfolgung entscheidend, da Galley-Komponenten oft kürzere Lebenszyklen aufweisen als das Flugzeug selbst (Laukotka, et al., 2021). Eine standardisierte Modulstruktur erleichtert also den Austausch und die Aufrüstung im Betrieb.

2.5.3 Ergonomie und Arbeitsbedingungen

Die Galley stellt den primären Arbeitsbereich des Kabinenpersonals dar, insbesondere während der Reiseflugphase. Die Gestaltung dieser Zone hat daher unmittelbaren Einfluss auf die Arbeitsbelastung, die Effizienz und die Sicherheit der Crew. Beengte Raumverhältnisse, stehende Tätigkeiten unter Turbulenzbedingungen und das Hantieren mit heißen, schweren oder sperrigen Gegenständen stellen hohe physische und koordinative Anforderungen an das Personal. Studien zeigen, dass diese Arbeitsbedingungen besonders im unteren Rücken, in den Schultern und im Nackenbereich zu langfristigen gesundheitlichen Beschwerden führen können (Chen, et al., 2021).

Eine nichtergonomische Auslegung kann also sowohl das Risiko für Arbeitsunfälle als auch die Belastung durch repetitive Bewegungen und ungünstige Körperhaltungen erhöhen. Glitsch (Glitsch, et al., 2007) wies in einer Untersuchung zur physischen Beanspruchung beim Bewegen von Trolleys nach, dass insbesondere das Ziehen unter instabilen Bedingungen mit ungünstigen Rumpfhaltungen und erhöhter muskulärer Belastung einhergeht. Faktoren wie schwer zugängliche Arbeitsflächen oder ungeeignete Griffhöhen verstärken diese Problematik außerdem.

Demgegenüber haben Untersuchungen gezeigt, dass leicht zugängliche Arbeitsbereiche, logisch angeordnete Geräte und ergonomisch gestaltete Griffelemente einen messbaren Einfluss auf die Servicequalität sowie auf das Wohlbefinden und die langfristige Gesundheit des Bordpersonals haben. Besondere Bedeutung kommt dabei auch der vertikalen Strukturierung zu, etwa durch

klare Trennung von Arbeits-, Lager- und Gerätebereichen auf verschiedenen Ebenen, um Bewegungsabläufe zu vereinfachen und Überlastungen zu vermeiden (Bauch, 2001).

Ein modernes Galley-Design muss somit nicht nur technische oder platzbezogene Faktoren in den Blick nehmen, sondern es muss auch arbeitsmedizinische Erkenntnisse und prozessuale Abläufe berücksichtigen. Ergonomische Effizienz wird zunehmend als Gestaltungsparameter zur Sicherung sowohl des Wohlbefindens der Crew als auch der operativen Zuverlässigkeit verstanden.

2.5.4 Nachhaltigkeit und Lebenszyklus

Neben technischen und ergonomischen Anforderungen rückt zunehmend auch die ökologische Perspektive in den Fokus der Galley-Entwicklung. Fluggesellschaften, Hersteller und Zulieferer sehen sich mit steigenden Erwartungen an die Nachhaltigkeit von Kabinenkomponenten konfrontiert, sowohl aus regulatorischer Sicht als auch im Rahmen ihrer eigenen Umweltstrategien. Die Galley wirkt sich durch ihre Materialwahl, ihren Energieverbrauch und ihre Austauschzyklen auf die ökologische Gesamtbilanz des Flugzeugs aus (BDLI, 2023).

Ein zentrales Gestaltungsziel zur Minimierung des CO_2-Fußabdrucks über den Lebenszyklus hinweg ist die Verwendung von recycelbaren, schadstoffarmen und gewichtsreduzierten Materialien. Der gezielte Einsatz biobasierter Werkstoffe, strukturintegrierter Funktionen oder optimierter Baugruppen trägt zur Reduktion von Produktionsabfällen und Ressourcenverbrauch bei. Besonders effektiv erweist sich der Leichtbau auch bei thermisch aktiven Komponenten wie Heißwasserbereitern oder Öfen, da hier zusätzlich der Energiebedarf während des Betriebs gesenkt werden kann (ATI, 2022).

Darüber hinaus gewinnt die frühzeitige ökologische Bewertung im Designprozess an Bedeutung. Ansätze wie Life Cycle Assessment (LCA) oder Environmental Product Declarations (EPDs) ermöglichen eine strukturierte Berücksichtigung von Umweltwirkungen in der Entwurfs- und Zulassungsphase. Die Herausforderung besteht jedoch darin, ökologische und wirtschaftliche Zielsetzungen, etwa Lebensdauer, Servicefreundlichkeit und Modulfähigkeit, so miteinander zu verknüpfen, dass nachhaltige Lösungen nicht nur technisch, sondern auch betriebswirtschaftlich tragfähig sind (Keiser, et al., 2024).

Dass bereits die Auslegung einzelner Kabinenkomponenten wie der Galley einen messbaren Einfluss auf Emissionen haben kann, zeigt die von Keiser (Keiser, et al., 2023) entwickelte Methode zur modellhaften Umweltbewertung von Kabinenlayouts. Die Studie verdeutlicht, dass unterschiedliche Galley-Konfigurationen während der Betriebsphase zu signifikanten

Unterschieden im Kraftstoffverbrauch führen. Dieses Ergebnis ist insbesondere für Retrofit-Entscheidungen und den Vergleich alternativer Ausstattungsvarianten von Bedeutung.

Zusätzlich wird die Herausforderung deutlich, dass vielen Komponenten insbesondere im Kabinenbereich die notwendige Rückverfolgbarkeit von Materialien und Lebenszyklusdaten fehlt. Gerade Galleys zählen laut Keiser (Keiser, et al., 2025) zu den „low-value components“, für die sich Recycling bislang kaum lohnt, nicht zuletzt aufgrund unzureichender digitaler Dokumentation. Erst durch die systematische Erfassung und digitale Rückverfolgung über den gesamten Lebenszyklus hinweg können diese Bauteile in Kreislaufsysteme integriert werden.

Auch der Umgang mit anfallenden Abfällen im Betrieb bleibt ein ungelöstes Problem: Laut IATA zählt Catering Waste zu den größten Abfallkategorien in der Kabine, wobei Trenn- und Recyclingsysteme bisher kaum standardisiert umgesetzt sind (IATA, 2023).

Nachhaltigkeit wird daher nicht mehr als nachgelagertes Ziel betrachtet, sondern als integraler Bestandteil der Systemgestaltung verstanden. Denn nur wenn ökologische Auswirkungen bereits in frühen Entwicklungsphasen systematisch berücksichtigt werden, lassen sich ressourcenintensive Fehlentwicklungen vermeiden und die Umsetzbarkeit nachhaltiger Lösungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg sicherstellen.

2.5.5 Systemintegration und Digitalisierung

Mit der zunehmenden Digitalisierung von Kabinensystemen verändert sich auch die Rolle der Galley: Aus einer rein funktionalen Versorgungsstation wird ein vernetztes Subsystem, das in Echtzeit mit dem Cabin Management System und anderen Bordkomponenten kommuniziert. Über digitale Schnittstellen wie ARINC 429 oder Ethernet-basierte Busse können Betriebszustände, Energieverbräuche oder Wartungsdaten automatisiert erfasst und verarbeitet werden. Insbesondere der ARINC 812-Standard schafft hier eine einheitliche Grundlage für die Kommunikation zwischen Galley-Inserts und dem Bordnetzwerk.

Die Umsetzung digital vernetzter Galley-Systeme bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich. So erfordert die Integration in das Bordnetzwerk eine hohe Systemkompatibilität über unterschiedliche Flugzeugtypen, Flottenstrukturen und Zulieferersysteme hinweg. Unterschiedliche CMS-Architekturen, proprietäre Schnittstellen und wechselnde Softwarestände erschweren dabei die standardisierte Anbindung (vgl. (Moenck, et al., 2024)). Hinzu kommt, dass Galley-Komponenten häufig über einen Zeitraum von 15 bis 20 Jahren im Einsatz bleiben und in dieser Zeit nicht nur mechanisch, sondern auch softwareseitig zuverlässig funktionieren müssen. Die langfristige Wartungsfähigkeit und Kompatibilität mit zukünftigen Systemgenerationen stellen somit eine weitere Anforderung dar. Darüber hinaus ist der Zertifizierungsaufwand für digital

vernetzte Galleys deutlich höher als bei konventionellen Einbauten: Digitale Funktionen, Kommunikationsprotokolle und systemübergreifende Steuerungen müssen umfassend dokumentiert, geprüft und regulatorisch freigegeben werden. Dieser Prozess bindet zusätzliche Entwicklungsressourcen und erfordert eine enge Abstimmung mit Zulassungsbehörden. Insgesamt zeigt sich, dass die digitale Einbindung der Galley erhebliche Potenziale für Effizienz, Wartungsplanung und Energieoptimierung bietet, gleichzeitig aber auch ein erhöhtes Maß an systemischer Komplexität und Entwicklungsaufwand mit sich bringt (Moenck, et al., 2024).

2.5.6 Retrofit und Lebenszyklusmanagement

Das Retrofit von Galley-Systemen stellt eine weitere Herausforderung dar. Unter Retrofit wird die nachträgliche Anpassung bestehender Systeme an neue technische, funktionale oder gesetzliche Anforderungen beispielsweise durch den Austausch, die Umrüstung oder Erweiterung von Komponenten in bereits betriebenen Flugzeugen verstanden. Während Verkehrsflugzeuge häufig über mehrere Jahrzehnte im Einsatz sind, müssen Kabinenkomponenten wie Galleys aufgrund technischer oder betrieblicher Anforderungen deutlich häufiger überarbeitet oder ersetzt werden. Gerade im Kontext eines verlängerten Lebenszyklus von Flugzeugen ergeben sich dabei Hürden in Bezug auf Dokumentation, Kompatibilität und regulatorische Anforderungen.

Eine der Schwierigkeiten liegt in der mangelnden technischen Rückverfolgbarkeit bestehender Konfigurationen. Insbesondere bei älteren Flugzeugen sind Kabinenpläne und Einbaudokumentationen oft nur in analoger Form oder in nicht aktualisierten digitalen Formaten verfügbar. Diese fehlende Transparenz erschwert nicht nur die Planung von Umbauten, sondern birgt auch Risiken in Bezug auf sicherheitsrelevante Nachweise und Zulassungsprozesse. Der Zustand vieler verbauter Komponenten ist zudem nur eingeschränkt erfassbar, was zu kostspieligen Voruntersuchungen und Verzögerungen im Umbau führt (Christiansen, et al., 2024).

Ein weiteres Problem stellt die mangelnde Standardisierung von Kabinenkomponenten dar: Variierende Bauformen, proprietäre Schnittstellen und herstellerspezifische Anpassungen erschweren die Austauschbarkeit erheblich. Besonders ausgeprägt ist diese Problematik bei Galleys, deren Konstruktion in hohem Maße auf spezifische Flugzeugtypen und die individuellen Anforderungen der jeweiligen Airline zugeschnitten ist. Retrofit-Vorhaben erfordern daher häufig eine vollständige Neuanpassung der betroffenen Komponenten und gehen mit erheblichem Planungs-, Dokumentations- und Zertifizierungsaufwand einher. Jede Retrofit-Maßnahme wird so zu einem individuellen Engineering-Projekt mit hohem personellem und zeitlichem Aufwand (Christiansen, et al., 2024).

Trotz neuer methodischer Ansätze, wie sie in der Arbeit von Christiansen et al. (Christiansen, et al., 2024) vorgestellt werden, bleibt die flächendeckende Umsetzung modellbasierter Dokumentationssysteme in bestehenden Flottenstrukturen eine erhebliche Herausforderung. Die hierfür erforderliche Initialerfassung des Kabinenbestands, die Integration in bestehende IT- und Betriebsstrukturen sowie die kontinuierliche Pflege und Validierung der Daten verlangen hohe technologische und organisatorische Ressourcen. Besonders in heterogenen Flotten mit unterschiedlichen Flugzeuggenerationen, Kabinenlayouts und Ausstattungsvarianten gestaltet sich die Implementierung komplex, nicht zuletzt aufgrund hoher Anforderungen an Datenkonsistenz, Interoperabilität und regulatorische Nachweisführung.

Insgesamt zeigt sich, dass Retrofit von Galley-Systemen nicht nur ein technischer, sondern vor allem ein datenlogistischer und prozessualer Engpass im Lebenszyklusmanagement moderner Flugzeuge ist. Nur durch frühzeitig strukturierte, digital verfügbare Systeminformationen lassen sich Kosten, Aufwand und regulatorische Risiken in akzeptablem Rahmen halten.

2.6 Forschungsstand zur parametrischen Modellierung

Vor dem Hintergrund wachsender Variantenvielfalt und komplexer Entwicklungsprozesse bieten parametrische Modellierungsansätze das Potential, Effizienz und Interdisziplinarität in der Entwicklung von Flugzeugkabinen zu unterstützen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über grundlegende Prinzipien, eingesetzte Softwarelösungen sowie methodische Umsetzungen und deren Potenziale.

2.6.1 Einführung in die parametrische Modellierung

Der Begriff der „parametrischen Modellierung“ stammt ursprünglich aus dem Bereich der Computer-aided Design-Systeme (CAD) und bezeichnet dort die Möglichkeit, geometrische Modelle über veränderbare Eingabeparameter zu steuern (Camba, et al., 2016). Ein klassisches Beispiel ist ein digitaler Quader, bei dem die Seitenlängen a, b und c als Parameter definiert sind. Diese Maße sind nicht durch feste numerische Werte vorgegeben, sondern lassen sich flexibel anpassen, wodurch eine hohe Wiederverwendbarkeit und ein hoher Automatisierungsgrad im Modell erreicht werden (Camba, et al., 2016). Änderungen dieser Parameter führen unmittelbar zu einer Anpassung der Geometrie und beispielsweise des berechneten Volumens. Die geometrische Darstellung ist somit direkt an die zugrunde liegenden Parameter gebunden. Das Modell gilt als „parametrisch“ (Vilgertshofer, 2022).

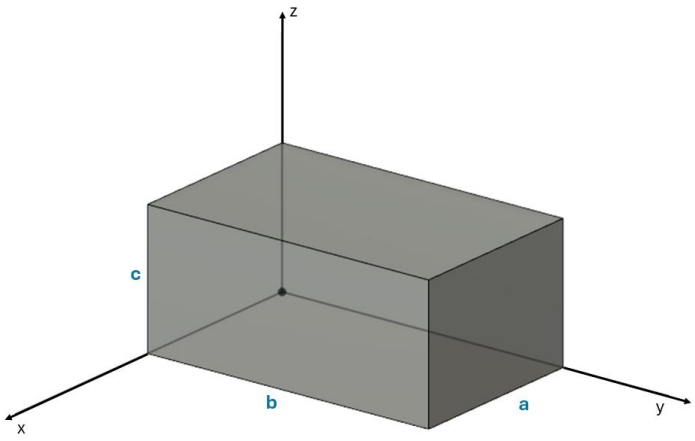

Abbildung 2-6: Beispielhafte Darstellung eines parametrischen CAD-Modells

In der Luftfahrttechnik wird dieses Prinzip über die rein geometrische Beschreibung hinaus erweitert. Parametrisch gesteuert werden hier nicht nur Formelemente, sondern auch funktionale und konfigurationsrelevante Eigenschaften technischer Systeme. In der Flugzeugkabine dienen Parameter wie Kabinenlänge, Sitzreihenanzahl oder Einbaupositionen von Kabinenmonumenten als Eingangsgrößen zur automatisierten Generierung von Layout-Varianten. Diese erweiterten Modelle ermöglichen es, technische Anforderungen, betriebliche Rahmenbedingungen und kundenindividuelle Wünsche effizient in konfigurierbare Produktvarianten zu überführen, ohne für jede Ausprägung ein separates Modell aufbauen zu müssen. Die parametrische Modellierung bildet damit eine zentrale Grundlage für die systematische Auslegung komplexer Kabinenkonfigurationen im virtuellen Entwicklungsprozess. Zur Einordnung ihrer Rolle im Gesamtkontext ist im nächsten Schritt ein Überblick über den Flugzeugentwurf und die Einbettung der Kabine in diesen Prozess erforderlich.

2.6.2 Der Flugzeugentwurf und die Rolle der Kabine

Der Entwurf eines Verkehrsflugzeugs erfolgt typischerweise in mehreren Entwicklungsphasen, die sich entlang technischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen orientieren. Ausgangspunkt bilden die sogenannten Top Level Aircraft Requirements (TLARs), aus denen im Rahmen des Vorentwurfs erste konzeptionelle Auslegungen abgeleitet werden. In dieser Phase werden grundlegende Parameter wie Reichweite, Nutzlast oder Reisegeschwindigkeit bestimmt und ein erstes Konzept generiert. Die darauffolgende Entwurfsphase dient der präziseren Auslegung der Hauptsysteme sowie der aerodynamischen, strukturellen und antriebstechnischen Integration. Abschließend erfolgt die Detaillierung einzelner Komponenten bis zur fertigungsgerechten Umsetzung.

Da die verschiedenen Phasen des Flugzeugentwurfs unterschiedliche Entwicklungsziele verfolgen, kommen jeweils spezifische Modellarten zum Einsatz. Analytische Modelle dienen zur Formulierung mathematischer Abhängigkeiten und Näherungen beispielsweise bei der Gewichtsschätzung oder bei aerodynamischen Grundberechnungen. Deskriptive Modelle, etwa in Form von CAD, beschreiben die Geometrie einzelner Bauteile oder ganzer Baugruppen. Stochastische Modelle ermöglichen die Untersuchung von Unsicherheiten, z.B. im Betriebsverhalten oder in Lastannahmen. Simulative Modelle bilden komplexe, dynamische Zusammenhänge ab, etwa Strömungsprozesse, Temperaturverteilungen oder Evakuierungsszenarien. Ergänzend hinzu kommen parametrische Modelle zum Einsatz, die geometrische, funktionale und strukturelle Eigenschaften über veränderbare Eingangsgrößen systematisch variierbar machen und so eine effiziente Variantenbildung ermöglichen.

Obwohl die Kabine im frühen Entwurf eines Flugzeugs strukturell berücksichtigt wird, erfolgt ihre detaillierte Ausgestaltung typischerweise erst in den späteren Phasen des Entwicklungsprozesses. In der Vorentwurfsphase werden meist nur globale Parameter wie Kabinenlänge oder Gangbreite berücksichtigt, während konkrete Layoutentscheidungen stark von später spezifizierten Randbedingungen abhängen. Trotz dieser späten Integration wirkt sich die Kabine signifikant auf Masseverteilung, Schwerpunktlage, Energieverbrauch und betriebliche Abläufe aus. Gleichzeitig besteht ein hoher Anpassungsbedarf durch kundenindividuelle Layouts, insbesondere im Hinblick auf Servicekonzepte, Kabinenmonumente und Markenidentität. Die Kombination aus funktionaler Relevanz und hoher Variantenvielfalt erfordert eine flexible, modellbasierte Beschreibung bereits in frühen Entwurfsphasen.

2.6.3 Parametrische Modellierungsansätze

Wie eine modellbasierte Beschreibung in der Kabinenauslegung konkret ausgestaltet werden kann, zeigen verschiedene Forschungsarbeiten und Entwicklungsprojekte der letzten Jahre. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, die parametrische Modellierungskonzepte auf unterschiedliche Kabinenmodule anwenden und dabei jeweils eigene methodische Schwerpunkte setzen.

Die Arbeit von Jonas (Jonas, et al., 2019) präsentiert mit dem FlexGalley-Konzept eine parametrisierte Produktstruktur für Galleys, die unterschiedliche Konfigurationen über modulare Bausteine systematisch abbildet. Der Modellierungsansatz basiert auf der Verwendung eines „Tree of Variety“ zur Variantenstrukturierung sowie eines „Module Interface Graph“ (MIG) zur Erfassung funktionaler Schnittstellen. Der Fokus liegt auf der flexiblen Positionierung und Kombination von Galley-Modulen im Flugzeugrumpf, insbesondere in der Mitte des

Kabinenraums. Die Modellbildung erfolgt konzeptionell und unabhängig von spezifischen Softwarewerkzeugen.

In der Publikation von Hanna (Hanna, et al., 2020) wird ein methodischer Rahmen zur Modularisierung und Variantenbeherrschung von Kabinenkomponenten beschrieben. Der parametrische Ansatz erfolgt über die Anwendung von „Design Structure Matrices“ (DSM), um funktionale Abhängigkeiten zwischen Modulen zu identifizieren und gezielt zu variieren. Zur strukturierten Erfassung von Variantenräumen kommen ergänzend Werkzeuge wie der „Variety Tree“ und der „Module Interface Graph“ zum Einsatz. Die Methodik ist insbesondere auf die Reduktion interner Komplexität bei wachsender äußerer Variantenvielfalt ausgelegt.

Eine weitere Veröffentlichung von Hanna (Hanna, et al., 2021) beschreibt die modellbasierte Entwicklung modularer Kabinenkomponenten wie Galleys, Lavatories und weiteren Monumenten. Im Mittelpunkt steht die Nutzung von SysML-Modellen (System Modeling Language) im Cameo Systems Modeler zur Darstellung von Funktionsflüssen (z. B. Energie, Wasser, Abfall) und zur Standardisierung technischer Schnittstellen. Der Ansatz kombiniert modulare Produktarchitekturen mit einer MBSE-basierten Systembeschreibung. Modellierung und Analyse erfolgen toolgestützt unter Einbindung von Modultreibern und MIG-Strukturen.

Rajendran (Rajendran, et al., 2021) stellen ein Multi-Fidelity-Framework zur parametrischen Modellierung von Kabinenmodulen vor, das eine durchgängige Kette vom CPACS-Datenmodell über MATLAB bis hin zur VR-Visualisierung realisiert. Je nach Detaillierungsgrad können Sitzreihen, Stowages oder Galley-Konfigurationen automatisiert erzeugt und analysiert werden. Die Kopplung unterschiedlicher Modellierungsebenen ermöglicht sowohl geometrische als auch funktionale Variantenstudien in frühen Entwurfsphasen. Die Datenhaltung und Systembeschreibung erfolgen auf Basis von CPACS und XML-Strukturen (Extensible Markup Language).

Die Publikation von Fuchs (Fuchs, et al., 2023b) beschreibt die föderierte modellbasierte Variantenanalyse von Kabinenlayouts im Kontext alternativer Antriebssysteme. Die Kabine wird dabei als Teilmodell in einem übergeordneten Systemkontext (z. B. Brennstoffzellensystem, H_2-Tank) eingebettet und über standardisierte XML-Schnittstellen mit anderen Disziplinmodellen gekoppelt. Der parametrische Ansatz nutzt objektorientierte Vererbungsstrukturen in SysML und verbindet diese mit MATLAB-gestützten Berechnungen zur KPI-Auswertung. Zum Einsatz kommt eine Kombination aus Cameo Systems Modeler, Python und MATLAB.

2.6.4 Potentiale, Grenzen und Anwendungsbereiche

Jonas (Jonas, et al., 2019) stellen mit dem FlexGalley-Konzept einen konzeptionell klar strukturierten, modular-parametrischen Ansatz zur Galley-Variantenbildung vor. Die Modelllogik basiert auf der Kombination aus Tree of Variety und Module Interface Graph und ermöglicht eine nachvollziehbare Systemstrukturierung. Die Arbeit bleibt jedoch ohne funktionale Implementierung oder tiefergehende Bewertungslogik auf einer theoretisch-konstruktiven Ebene.

Hanna et al. (Hanna, et al., 2020) liefern mit DSM und Variety Tree methodische Werkzeuge zur systematischen Beherrschung von Varianten in modularen Kabinenarchitekturen. Der Ansatz konzentriert sich auf die Strukturierung technischer Systeme und deren Schnittstellen unter Komplexitäts- und Effizienzaspekten. Funktionale Systemverhalten, automatisierte Modellgenerierung oder betriebliche Auswertung sind jedoch nicht Teil des Modells.

In einer weiteren Veröffentlichung vertiefen Hanna (Hanna, et al., 2021) ihren methodischen Ansatz, indem sie eine MBSE-basierte Modellierung modularer Kabinenkomponenten wie Galley, Lavatory und weitere Monumente mithilfe von SysML vorstellen. Die strukturierte Beschreibung von Energie-, Wasser- und Abfallflüssen sowie die Nutzung von Cameo unterstützen eine technische Standardisierung von Schnittstellen. Eine automatisierte Variantenbildung oder quantitative Analyse erfolgen allerdings nicht.

Rajendran (Rajendran, et al., 2021) kombinieren parametrische CPACS-Datenmodelle mit geometrischer Auslegung und VR-basierter Visualisierung in einem durchgängigen Multi-Fidelity-Ansatz. Die Kopplung verschiedener Detaillierungsebenen ermöglicht eine flexible Nutzung in frühen Entwurfsphasen, insbesondere für Layout und Designalternativen. Funktionale oder ressourcenbezogene Bewertungen sind in diesem Modell bisher nicht vorgesehen.

Fuchs (Fuchs, et al., 2023b) integrieren die Kabine als Teilsystem in ein föderiertes MBSE-Modell, das mehrere Disziplinmodelle über XML-Schnittstellen koppelt und mit KPI-Auswertungen verknüpft. Der modellierte Ansatz nutzt objektorientierte Vererbungslogik, um Varianten abzuleiten und deren Auswirkungen zu quantifizieren. Da der Schwerpunkt auf alternativen Antriebskonzepten liegt, bleibt die Kabine jedoch methodisch eingebettet und ist nicht Gegenstand einer detaillierten Einzelanalyse.

FAZIT: Einordnung und Beitrag der Arbeit im Forschungskontext

Die dargestellten Arbeiten verdeutlichen je nach Zielsetzung und Systemebene mit unterschiedlichen methodischen Werkzeugen, dass parametrische Modellierung in der Kabine sowohl auf struktureller, geometrischer als auch funktionaler Ebene erfolgt. Insgesamt zeigen die

betrachteten Arbeiten ein breites Spektrum an methodischen Ansätzen zur parametrischen Modellierung in der Kabine, jedoch mit jeweils unterschiedlichen Zielrichtungen, Systemgrenzen und Detailtiefen.

Die Auswertung dieser Forschungsarbeiten zeigt, dass parametrische Modellierung im Kontext der Kabinenauslegung bislang vorrangig zur Strukturierung und Variantenbildung eingesetzt wird. Der Schwerpunkt liegt dabei häufig auf konzeptionellen Überlegungen oder geometrisch basierten Ansätzen, ohne eine tiefgehende systemtechnische Durchdringung einzelner Kabinenmodule zu leisten. Aspekte wie funktionale Ausstattung, Leistungsaufnahme oder ressourcenbezogene Auswirkungen werden trotz ihrer Relevanz in den meisten Arbeiten nicht oder nur am Rande behandelt.

Zudem erfolgen KPI-basierte Bewertungen, sofern sie überhaupt integriert sind, meist auf übergeordneter Layout- oder Konzept-Ebene, ohne die Galley als bewertbares, betrieblich relevantes Subsystem in den Fokus zu rücken. Die vorhandenen Modellierungsansätze dienen damit oft der visuellen oder strukturellen Generierung von Kabinenlayouts, blenden jedoch die operative Komplexität und funktionale Tiefe einzelner Teilsysteme weitgehend aus.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Masterarbeit an. Sie entwickelt eine parametrische Modellierungsumgebung, die den Aufbau und die Ausstattung der Galley automatisiert auf Grundlage weniger Eingabeparameter generiert, systematisch mit Servicekonzepten verknüpft und anhand technischer sowie betrieblich relevanter Leistungskennzahlen analysiert. Damit wird eine methodische Lücke geschlossen und ein konkreter Beitrag zur datenbasierten Bewertung, zur Systemintegration und zur Variantenabsicherung innerhalb virtueller Kabinenentwicklungs-prozesse geleistet.

3 Virtueller Entwicklungsprozess der Kabine

Die in Kapitel 2.6 identifizierten Defizite bestehender Modellierungsansätze, insbesondere hinsichtlich funktionaler Tiefe und Systemintegration, wurden vom DLR methodisch adressiert. Am Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt wurde ein virtueller Entwicklungsprozess entwickelt, der die konzeptuelle Auslegung komplexer Kabinensysteme durchgängig digital abbildet. Dabei werden drei Modellierungsumgebungen miteinander verknüpft und Ergebnisse automatisiert in eine Virtual-Reality-basierte Designplattform überführt. Dies ermöglicht aufgrund sichtbarer technischer Zusammenhänge frühzeitig fundierte Systementscheidungen. Dieser durchgängige, modular aufgebaute Workflow bildet das methodische Fundament für die in dieser Arbeit entwickelte Galley-Modellierung. Die drei beteiligten Modellierungsumgebungen sowie ihre Kopplung im Rahmen des digitalen Entwicklungsprozesses werden im folgenden Kapitel systematisch beschrieben.

3.1 Überblick über den digitalen Entwicklungsprozess

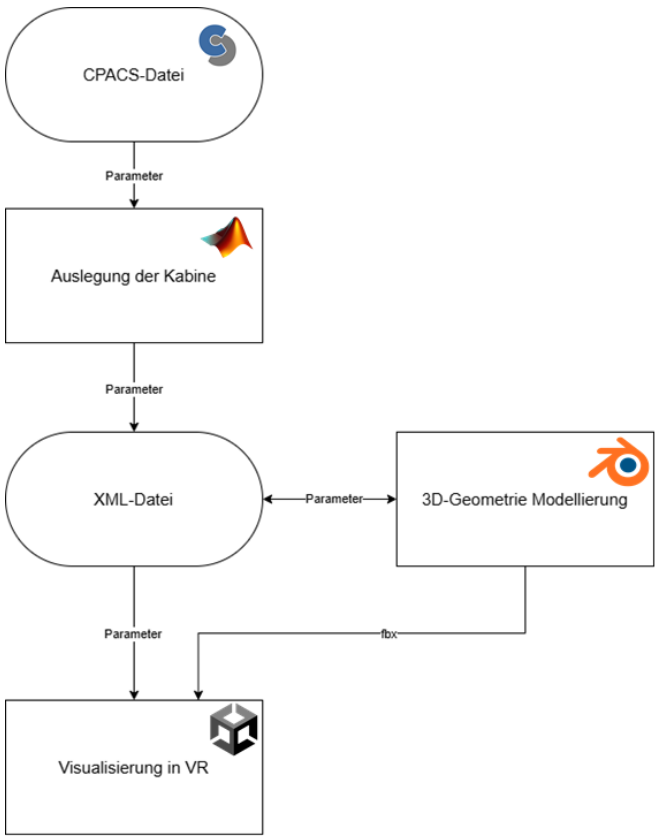

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der gesamten Prozesskette zur Kabinenmodellierung

Die Datenbasis des gesamten Prozesses bildet das Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS). Dabei handelt es sich um eine standardisierte XML-basierte Eingabedatei, die im Rahmen des OAD, dem Flugzeugvorentwurf, erzeugt wird. Sie enthält grundlegende

Informationen zur Flugzeug- und Kabinenkonfiguration, darunter Rumpfabmessungen, Deckhöhen, Sitzreihen oder Platzierungen von Kabinenmonumenten, und dient als Ausgangspunkt für die weitere funktionale Auslegung der Kabinensysteme.

Im ersten Schritt erfolgt der Import dieser Daten in eine MATLAB-Umgebung. Dort werden die Kabinensysteme regelbasiert ausgelegt. Auf Basis definierter Parameter werden virtuelle Systemkomponenten erzeugt, geometrisch positioniert und mit Attributen wie Bezeichnung, Material oder Systemzugehörigkeit (z. B. gemäß ATA-Kapitel) versehen. Zusätzlich erfolgt eine Bauraumanalyse, bei der jede Komponente durch einen einfachen Hüllkörper (Bounding Box) repräsentiert wird. Diese abstrahierte Darstellung ermöglicht die automatisierte Bewertung räumlicher Anforderungen sowie potenzieller Interferenzen in der frühen Entwurfsphase. Das Ergebnis ist eine konsistente funktionale sowie geometrische Beschreibung der Kabine (Fuchs, et al., 2023a).

Die Ergebnisse dieser funktionalen Auslegung werden in eine strukturierte XML-Datei überführt, die als Eingabe für die Modellierungsumgebung Blender dient. Dort erfolgt das gezielte Ersetzen der Bounding Boxes durch hochauflösende 3D-Modelle. Diese werden automatisch anhand der in der XML-Datei definierten Positionierung, Skalierung und Identifikation geladen und im virtuellen Raum platziert. Die eindeutige Verknüpfung zwischen Systembeschreibung und Geometriemodell erfolgt über IDs (engl. Identifier) (Fuchs, et al., 2022).

Das vollständige 3D-Modell der Kabine wird aus Blender im FBX-Format exportiert und gemeinsam mit der zugehörigen XML-Datei in die Unity-Plattform überführt. Dort entsteht eine interaktive, virtuell begehbare Kabinenszene, in der sowohl geometrische Aspekte als auch systemische Eigenschaften (z. B. Leitungsverläufe, Verbindungspunkte) analysiert und dargestellt werden können. Unity fungiert damit nicht nur als Visualisierungsumgebung, sondern auch als Plattform für die explorative Bewertung und Rückführung von Entwurfsentscheidungen (Fuchs, et al., 2021a).

Die erzeugte XML-Datei übernimmt eine zentrale Schnittstellenfunktion im digitalen Prozessfluss. Sie ermöglicht den medienbruchfreien Übergang von der funktionalen Systemauslegung in MATLAB zur geometrischen 3D-Modellierung in Blender und schließlich zur immersiven Visualisierung in Unity (Fuchs, et al., 2021a).

Der gesamte Prozess zeichnet sich durch vollständige Automatisierung und Modularität aus. Sämtliche Schnittstellen zwischen den Tools sind über automatisierte Datenübergaben (z. B. XML-Parsing, ID-Zuweisung) realisiert, sodass eine manuelle Bearbeitung entfällt. Durch das Anwenden eines konsistenten, bidirektionalen Informationsflusses über alle Entwicklungsphasen

hinweg wird das Prinzip des Digitalen Fadens umgesetzt. Damit bildet dieser virtuelle Entwicklungsprozess die methodische Grundlage für die datengetriebene Auslegung, Bewertung und Visualisierung komplexer Kabinensysteme in frühen Entwurfsphasen.

3.2 CPACS als standardisierte Datenbasis

3.2.1 Grundlagen und Struktur

Das CPACS-Format wurde am DLR entwickelt, um den interdisziplinären Austausch im Flugzeugentwurf zu standardisieren und zu vereinheitlichen. Ziel dieses Datenmodells ist es, eine einheitliche, durchgängige Repräsentation komplexer Flugzeugsysteme bereitzustellen, die sowohl von konzeptionellen Entwurfswerkzeugen als auch von detaillierten Analysesystemen verarbeitet werden kann. CPACS basiert auf XML und verwendet eine textbasierte, hierarchische Syntax, die eine flexible Erweiterung sowie eine disziplinübergreifende Kopplung verschiedener Entwurfswerkzeuge ermöglicht (Fuchs, et al., 2022).

Die Struktur von CPACS folgt einem streng hierarchischen Aufbau. Flugzeugkomponenten wie Rumpf, Tragflächen, Kabine oder Triebwerke werden in verschachtelten XML-Blöcken organisiert, wobei jeder Block eindeutig über sogenannte uID-Attribute (unique ID) identifizierbar ist. Für die Kabinensektion lassen sich beispielsweise Sitze, Galleys oder Stauräume als eigene Elemente innerhalb eines übergeordneten Kabinendecks beschreiben. Ihre geometrische Lage wird durch das Element *transformation* definiert, das Translation, Rotation und Skalierung im lokalen Koordinatensystem umfasst. Zusätzlich erlaubt CPACS die systematische Deckzuordnung über Referenzen wie *deckElementUID*. Diese modulare Struktur ermöglicht es, sowohl die logischen als auch die geometrischen Beziehungen zwischen den Bauteilen abzubilden und konsistent über verschiedene Prozessstufen hinweg zu nutzen. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 3-2 einen exemplarischen Ausschnitt einer CPACS-XML-Struktur zur Definition eines Galley-Elements (Beckert, 2020). Die zunehmende Reife und Erweiterbarkeit des CPACS-Schemas machen es zudem möglich, CPACS über rein geometrische Definitionen hinaus als funktionales Bindeglied zwischen Systemarchitekturen und virtuellen Entwurfsplattformen zu nutzen (Fuchs, et al., 2022).

```
<galleys>
  <galley uID="galley_floor_element_0000">
    <name>galley_floor_element_0000</name>
    <deckElementUID>galley_FloorElements_0000</deckElementUID>
    <transformation>
      <translation>
        <x>0.0</x>
        <y>0.8382000143051147</y>
      </translation>
      <rotation>
        <z>0.0</z>
      </rotation>
      <scaling>
        <x>1.0</x>
        <y>1.0</y>
      </scaling>
    </transformation>
  </galley>
```

Abbildung 3-2: Galley-Objekt mit uID und Positionsdaten in CPACS

3.2.2 Anwendung im Prozess und Datenimport

Der strukturierte Import dieser CPACS-Daten erfolgt in MATLAB über eine XML-Parsing-Routine (Beckert, 2020). Dabei werden alle im Rahmen des Flugzeugvorentwurfs enthaltenen Informationen für die Flugzeugkabine aus der Datei ausgelesen, interpretiert und den entsprechenden Attributen der Modellobjekte zugewiesen. Neben geometrischen Parametern, etwa Länge, Breite und Position werden auch systemtechnische Informationen wie Position oder Deckzuordnungen übernommen. Die eindeutige Verwaltung über uID-Attribute gewährleistet eine konsistente Verknüpfung aller Objekte entlang der gesamten Prozesskette von der Auslegung über die Visualisierung bis zur späteren Analyse (Fuchs, et al., 2023a).

Im konkreten MATLAB-Modell wird der Importprozess durch eine klar strukturierte Parameterverwaltung unterstützt. Bereits vor dem eigentlichen Einlesen der CPACS-Datei wird im Hauptskript eine sogenannte *params*-Struktur durch Aufruf der Funktion *initParameters* initialisiert. Diese Struktur enthält sämtliche Basiswerte, die für die systematische Auslegung der Kabine erforderlich sind. Sie umfasst sowohl physikalische Umrechnungsfaktoren als auch geometrische Kenngrößen wie Kabinenlänge, Sitzkonfiguration, Geräteabmessungen und Einbaupositionen. Da die Kabine im konventionellen Vorentwurfsprozess in CPACS typischerweise nur rudimentär berücksichtigt wird, werden in dieser Initialisierung zunächst Standardwerte ergänzt, um die Modellierung auch bei unvollständigen Daten sicherzustellen.

Erst im Anschluss erfolgt mit der Funktion *importCPACS* das gezielte Überschreiben relevanter Parameter auf Basis der in der CPACS-Datei enthaltenen Informationen. Diese Logik ermöglicht eine Kombination aus robuster Grundkonfiguration und datengetriebener Aktualisierung. Die ausgelesenen Werte werden direkt an die vordefinierten Felder der *params*-Struktur übergeben.

Ein exemplarisches Beispiel für die dynamische Anpassung von Modellparametern auf Basis eingelesener CPACS-Daten ist die Definition der Sitzreihenanzahl in der Business-Class. Liegt die aus CPACS importierte Anzahl der Sitzreihen unter einem definierten Schwellenwert, so wird dieser Wert gezielt in der bestehenden *params*-Struktur überschrieben. Dies ermöglicht eine regelbasierte Verfeinerung der Vorinitialisierung in Abhängigkeit von realen Entwurfsdaten. Die Umsetzung erfolgt in MATLAB durch eine einfache Konditionierung:

```
if n < 20
    params.cabin.rowsBC = n;
end
```

In diesem Fall wird *n* als aus der CPACS-Datei extrahierter Wert interpretiert. Durch die Bedingung wird sichergestellt, dass extrem hohe oder fehlerhafte Werte (z. B. durch falsche Einträge oder Fehlinterpretationen) nicht ungefiltert in das Modell übernommen werden. Die Kombination aus initialem Default-Wert und optionaler datenbasierter Überschreibung stellt somit eine robuste Grundlage für die Weiterverarbeitung dar (Fuchs, et al., 2022).

Durch diese standardisierte Datenübernahme ist sichergestellt, dass alle Kabinenkomponenten konsistent auf Basis der Flugzeugdefinition generiert und weiterverarbeitet werden. Anpassungen an der CPACS-Datei, etwa durch Änderungen im Rumpfdesign oder der Kabinenstruktur, können direkt ohne zusätzliche manuelle Eingriffe in die nachfolgenden Auslegungsschritte übernommen werden (Beckert, 2020).

3.3 MATLAB – Funktionale Auslegung und Bauraumanalyse

MATLAB dient im virtuellen Entwicklungsprozess als zentrales Berechnungstool für die funktionale Auslegung und abstrakte Modellierung der Kabinensysteme. Grundlage hierfür ist die objektorientierte Programmierung, die eine strukturierte, wiederverwendbare und erweiterbare Modellierung technischer Systeme ermöglicht. Die Konzepte dieses Programmierparadigmas werden im folgenden Abschnitt als methodisches Fundament der Modellstruktur erläutert.

3.3.1 Grundlagen der objektorientierten Programmierung

Im Mittelpunkt der objektorientierten Programmiersprache (OOP) stehen Objekte, die sowohl Daten (Zustand) als auch Funktionen (Verhalten) in sich vereinen. Dadurch können reale oder technische Einheiten wie Kabinenkomponenten strukturiert und nachvollziehbar im Code abgebildet werden. Die OOP fördert insbesondere die Modularität, Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit komplexer Softwaresysteme (Lahres, et al., 2021).

Im Folgenden werden die erforderlichen Konzepte der OOP schrittweise erklärt, jeweils am Beispiel einer implementierten Klasse *Flugzeug*.

Klasse und Objekt

Ein wichtiger Baustein der OOP ist die Klasse. Eine Klasse definiert die allgemeinen Eigenschaften und Fähigkeiten eines Objekttyps. Sie dient als Bauplan für die Erstellung konkreter Objekte, sogenannter Instanzen, die jeweils eigene Werte, aber identische Strukturen und Verhalten aufweisen. Sie legt fest

- welche Attribute (Eigenschaften) ein Objekt besitzt und
- welche Methoden (Funktionen) das Objekt ausführen kann.

Wird eine Klasse im Programm verwendet, entsteht daraus ein konkretes Objekt, auch Instanz bezeichnet. Eine Instanz ist also ein real existierendes Exemplar einer Klasse mit individuell befüllten Attributen. Während die Klasse eine abstrakte Vorlage darstellt, ist das Objekt die realisierte Ausprägung mit eigenem Zustand. In MATLAB wird eine Klasse als .m-Datei definiert (Stein, 2015).

MATLAB unterscheidet grundsätzlich zwischen sogenannten *value classes* (Standardverhalten) und *handle classes*. Letztere ermöglichen Referenzverhalten, wie es aus Sprachen wie Java bekannt ist. Eine Klasse kann durch Vererbung von der eingebauten Klasse *handle* als Referenztyp deklariert werden. Dadurch wird sichergestellt, dass mehrere Variablen, die auf dasselbe Objekt verweisen, tatsächlich auch dieselbe Instanz referenzieren und Änderungen direkt übernommen werden (Stein, 2015). Das Grundgerüst der Klasse Flugzeug sieht beispielsweise so aus:

```
classdef Flugzeug < handle

end
```

Diese leere Klasse dient als Ausgangspunkt für weitere Strukturierungen.

Attribute

Attribute sind Variablen, die den Zustand eines Objekts beschreiben. Sie umfassen z. B. technische Kenngrößen, Identifikatoren oder geometrische Parameter und werden im `properties`-Block einer Klasse definiert (Stein, 2015). Beispielhafte Attribute der Klasse Flugzeug:

```
classdef Flugzeug < handle
```

```
    properties
        Masse      % Kilogramm [kg]
        Reichweite      % Nautische Meilen [nm]
        Reisegeschwindigkeit      % Knoten[kts]
    end
end
```

Wird im weiteren Verlauf ein Flugzeugobjekt erzeugt, können diese Eigenschaften individuell belegt werden.

Methoden

Methoden definieren das Verhalten eines Objekts. Sie sind Funktionen, die in der Klasse implementiert sind und typischerweise auf die Attribute eines Objekts zugreifen oder mit anderen Objekten interagieren. In der objektorientierten Programmierung übernehmen Methoden somit die Funktionalität, die das Objekt aktiv ausführen kann – etwa Berechnungen, Zustandsänderungen oder Exportprozesse (Stein, 2015).

In MATLAB werden Methoden im methods-Block innerhalb der Klassendefinition festgelegt und können öffentlich (public) oder geschützt (protected, private) definiert sein. Jede Methode erhält als ersten Eingabeparameter standardmäßig das Objekt selbst – in der Regel benannt als obj. Über diesen Objektverweis wird innerhalb der Methode auf die Attribute oder andere Methoden der konkreten Instanz zugegriffen (Stein, 2015). Eine einfache Methode innerhalb der Klasse Flugzeug könnte beispielsweise die Ausgabe der Masse ermöglichen:

```
methods
    function zeigeMasse(obj)
        fprintf('Masse: %.1f kg\n', obj.Masse);
    end
end
```

Konstruktor

Ein Sonderfall der Methoden ist der sogenannte Konstruktor. Dabei handelt es sich um eine spezielle Methode, die beim Erzeugen einer neuen Instanz automatisch ausgeführt wird. Sie dient dazu, Anfangswerte für die Attribute zu setzen oder Initialisierungen vorzunehmen (Hubwieser, et al., 2013).

Der Konstruktor wird über eine Methode mit dem gleichen Namen wie die Klasse definiert. Für die Klasse Flugzeug könnte der Konstruktor wie folgt aussehen:

```
methods
    function obj = Flugzeug(m, r, v)
        obj.Masse = m;
```

```
        obj.Reichweite = r;
        obj.Reisegeschwindigkeit = v;
    end
end
```

Dieser Konstruktor erwartet drei Eingabewerte (Masse, Reichweite, Reisegeschwindigkeit) und weist sie den Attributen des erzeugten Objekts zu.

Kapselung

Ein grundlegendes Prinzip der objektorientierten Programmierung (OOP) ist die Kapselung. Dabei werden die internen Daten eines Objekts gegenüber der Außenwelt abgeschirmt und sind ausschließlich über definierte Schnittstellen zugänglich. Dies schützt den internen Zustand vor unbeabsichtigten Veränderungen durch externe Funktionen oder andere Objekte und erhöht sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Wartbarkeit des Softwarecodes. In MATLAB lassen sich Attribute beispielsweise mit dem Zugriffsmodifikator private kennzeichnen, wodurch ausschließlich Methoden innerhalb der jeweiligen Klasse darauf zugreifen können. Dadurch werden potenzielle Fehlerquellen reduziert und die Pflege sowie Erweiterung des Programms erleichtert (Hubwieser, et al., 2013). In MATLAB geschieht das so:

```
properties (Access = private)
    Seriennummer
end
```

Vererbung

Ein OOP-Konzept ist die Vererbung. Dabei kann eine Klasse (Unterklasse) von einer bestehenden Basisklasse (Oberklasse) abgeleitet werden. Die Unterklasse übernimmt dabei alle Eigenschaften und Methoden der Oberklasse, kann sie aber zusätzlich erweitern oder gezielt überschreiben. Dies ermöglicht die Wiederverwendung des Codes und fördert die strukturierte Erweiterbarkeit von Modellen (Hubwieser, et al., 2013).

Beispiel: Eine Klasse Verkehrsmittel könnte als Oberklasse für Flugzeug dienen. Gemeinsame Attribute wie Länge, Breite, Höhe würden in der Oberklasse definiert. Die Unterklassen ergänzen diese Struktur um spezifische Eigenschaften und Methoden.

```
classdef Flugzeug < Verkehrsmittel
```

Dies reduziert Redundanzen und fördert den strukturierten Entwurf technischer Systeme.

Polymorphie

Polymorphie bedeutet, dass unterschiedliche Klassen die gleiche Methode anbieten, diese aber unterschiedlich implementieren können. Dies erlaubt es, Objekte verschiedener Klassen über

eine gemeinsame Schnittstelle zu behandeln, ohne die konkrete Klasse zu kennen. Dies ist besonders hilfreich, wenn Objekte unterschiedlicher Typen einheitlich angesprochen werden sollen (Lahres, et al., 2021).

Instanziierung

Die Instanziierung beschreibt den Vorgang, bei dem aus einer Klasse ein konkretes Objekt erzeugt wird. Im Fall der Klasse Flugzeug bedeutet dies, dass aus dem allgemeinen Bauplan ein spezifisches Exemplar – beispielsweise ein Airbus A320 – erzeugt wird (Stein, 2015).

Jede Instanz besitzt eine eigene Ausprägung der zuvor definierten Attribute, beispielsweise Masse, Reichweite oder Reisegeschwindigkeit, und kann die in der Klasse implementierten Methoden eigenständig nutzen (Stein, 2015). Die Instanziierung erfolgt über den Aufruf des Konstruktors der Klasse mit den gewünschten Startwerten:

```
% Konstruktor-Aufruf mit Attributwerten für Masse, Reichweite etc.
myA320 = Flugzeug(63000,3300,470);
```

Das erzeugte Objekt myA320 ist eine Instanz der Klasse Flugzeug, ausgestattet mit spezifischen Eigenschaften. Es kann anschließend Methoden wie zeigeMasse() aufrufen und innerhalb des Modells weiterverarbeitet werden. Beim Aufruf myA320.zeigeMasse() durchläuft MATLAB die Methode für das Objekt myA320 und gibt den individuell gespeicherten Wert aus.

3.3.2 Anwendung der objektorientierten Programmierung im Prozess

Im Folgenden wird beschrieben, wie die objektorientierten Prinzipien im bestehenden Modellierungsansatz des Entwicklungsprozesses bereits strukturell umgesetzt sind.

Vererbungsstruktur und funktionale Einordnung

Die objektorientierte Modellierung der Kabinensysteme in MATLAB basiert auf einem modularen Klassensystem. Dieses Klassensystem nutzt zur Abbildung der Vielzahl an Komponenten und deren Zusammenhänge im virtuellen Entwicklungsprozess eine hierarchische Vererbungsstruktur. Grundlage dieser Struktur ist die abstrakte Basisklasse *CabinObject*, die von allen im System instanziierten Objekten geerbt wird. Sie stellt elementare Attribute und Methoden bereit, insbesondere eine eindeutige ID, die die spätere Referenzierbarkeit der Objekte innerhalb der Prozesskette sicherstellt.

Ausgehend von dieser Basisklasse werden drei funktionale Hauptklassen abgeleitet, die unterschiedliche Rollen innerhalb der Kabinenmodellierung übernehmen. Die Klasse *CabinLink* dient der Abbildung gerichteter Verbindungen zwischen Objekten und enthält Attribute wie Start-

und Ziel-ID sowie Informationen zu Richtung und Typ der Verbindung. Die Klasse *Component* fungiert als Oberklasse für physische Kabinenelemente, etwa Sitze oder Beleuchtungskörper, und enthält neben typischen Merkmalen wie *Name, Ata* und *Number* auch Attribute zur späteren Visualisierung, beispielsweise *Material* und *Tag*. Eine dritte Klasse, *Requirement*, erlaubt die modellhafte Abbildung von Anforderungen an bestimmte Systemelemente. Hierzu zählen Angaben wie Status oder Type, die im Verlauf des Entwurfsprozesses herangezogen werden. Abbildung 3-3 zeigt die zugehörige Vererbungsstruktur sowie die funktionale Einordnung der Systemklassen.

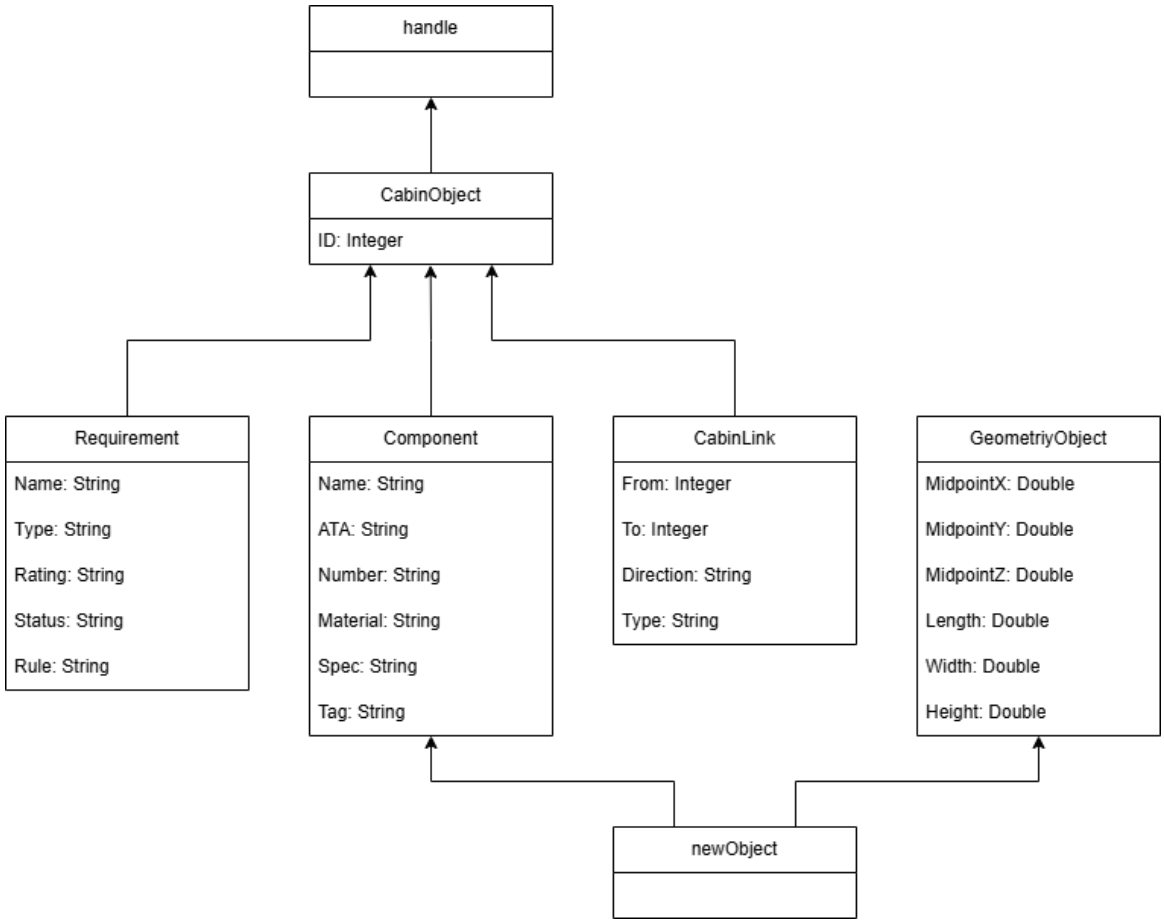

Abbildung 3-3: Bestehende Klassenstruktur der objektorientierten Kabinenmodellierung

Eine ergänzende Rolle übernimmt die Klasse *GeometryObject*, die nicht von *CabinObject* erbt, sondern unabhängig davon existiert und als sogenannte Helferklasse dient. Sie stellt grundlegende geometrische Parameter bereit, etwa Lagekoordinaten (X, Y, Z) und räumliche Ausmaße (Länge, Breite, Höhe). Komponenten, die eine räumliche Repräsentation benötigen, können durch Mehrfachvererbung zusätzlich von dieser Klasse erben. MATLAB erlaubt diesen Mechanismus durch gleichzeitige Angabe mehrerer Basisklassen in der Klassendefinition. Diese Struktur fördert die Trennung zwischen systemfunktionalen und geometrischen Aspekten eines Objekts und unterstützt eine klare Trennung der Zuständigkeiten im Modell (Stein, 2015).

Implementierung neuer Komponentenklassen

Zur Integration einer neuen Kabinenkomponente in den virtuellen Entwicklungsprozess, wird eine eigene MATLAB-Klasse erstellt, die von *Component* erbt. Soll das Element zusätzlich geometrisch dargestellt werden, erfolgt eine Mehrfachvererbung mit *GeometryObject.* Die neue Klasse verfügt dadurch automatisch über die vollständige Funktionalität der Elternklassen. Die Attribute werden bei der Instanziierung entweder aus zuvor eingelesenen CPACS-Daten übernommen oder im Rahmen der Auslegung berechnet. Hierzu zählen insbesondere Parameter wie Position, Masse oder Abmessungen, die für die korrekte Platzierung innerhalb der Kabinengeometrie erforderlich sind. Ein typisches Beispiel für die Implementierung einer neuen Kabinenkomponente zeigt die folgende Klassendefinition in MATLAB:

```
classdef newObject < Component & GeometryObject
    properties
        req
    end

    methods
        function obj = newObject(Length, Width, Height, Midpointx,
                                 Midpointy, Midpointz, Number, Spec)
            obj.Height = Height;
            obj.Width = Width;
            obj.Length = Length;
            obj.Spec = Spec;
            obj.Number = Number;
            obj.Midpoint_x = Midpointx;
            obj.Midpoint_y = Midpointy;
            obj.Midpoint_z = Midpointz;
            obj.Name = strcat('newObject', num2str(Number), Spec);
            obj.Connections = {};
            obj.Color = [0.8500, 0.3250, 0.0980];
            obj.Ata = '25-21-00';
            obj.Material = 'Material';
            obj.Tag = 'newObject';
            obj.Mass = 1;
            obj.req = GeometryReq();
        end
    end
end
```

Im Konstruktor der Klasse *newObject* werden die wesentlichen Eigenschaften der Instanz initialisiert. Die Parameter *Length, Width, Height* sowie *Midpoint_x, Midpoint_y* und *Midpoint_z* beschreiben die geometrischen Merkmale des Objekts und legen dessen Lage und Ausdehnung im virtuellen Raum fest. Diese Informationen sind insbesondere für die spätere Darstellung in der

Virtual-Reality-Umgebung relevant, da sie die Erzeugung der Bounding Box bestimmen (Beckert, 2020).

Die Attribute *Number* und *Spec* dienen der spezifischen Instanzidentifikation: Während *Number* einen numerischen Index vergibt (z. B. Sitznummer), enthält *Spec* ergänzende Informationen wie die Sitzreihe oder Seitenlage. Daraus wird mit *Name = strcat('newObject', num2str(Number), Spec)* ein eindeutiger Objektname generiert, z. B. „Seat14A“.

Das Attribut *Color* definiert die Darstellungsfarbe der Bounding Box in der grafischen Umgebung, während *Mass* die Masse des Objekts spezifiziert. Die Felder *ATA, Material, Tag* und *req* stellen strukturierende Metainformationen dar:

- ATA verweist auf das zugehörige Kapitel im ATA-Standard (z. B. 25-21-00 für Sitzgruppen),
- Material dokumentiert das verwendete Material,
- Tag dient der systematischen Kategorisierung im Modell,
- req ist ein Objekt vom Typ *GeometryReq*, das eine geometriebezogene Anforderung repräsentiert, die das Objekt erfüllen muss oder erfüllt.

Das Attribut *Connections* beschreibt eine optionale Verknüpfung mit weiteren Systemkomponenten, die z. B. im Kontext eines elektrisch ausgestatteten Sitzes vorkommen. Typische zugeordnete Subsysteme sind hier u. a. *OxygenMask, ReadingLights* oder *PassengerControlUnit*, die als Einträge gespeichert werden. Diese Information erlaubt es, aus einem zentralen Objekttyp eine funktional vernetzte Systemstruktur abzuleiten, wie sie in der Kabinenmodellierung erforderlich ist.

Die daraus resultierende Instanz des Objekts besitzt damit nicht nur alle geerbten Attribute, sondern ist auch durch eigene Parameter und Methoden erweiterbar. Darüber hinaus lässt sich das Element direkt in die bestehende Auslegungslogik einbinden und anschließend in der Visualisierungsumgebung (z. B. Unity) darstellen (Beckert, 2020). Durch die Nutzung objektorientierter Prinzipien wie Kapselung, Vererbung und Modularisierung lässt sich eine klare und wartbare Systemarchitektur realisieren, die sowohl die Erweiterbarkeit als auch die Wiederverwendbarkeit einzelner Komponenten im digitalen Entwicklungsprozess unterstützt.

3.3.3 Struktur des Auslegungsprozesses

Die Auslegung der Kabinensysteme umfasst im digitalen Entwicklungsprozess zahlreiche Berechnungsschritte, etwa das Einlesen externer Daten, die Erzeugung und Platzierung von Komponenten sowie deren funktionale Verknüpfung. Diese Aufgaben in einem einzigen Skript zu bündeln, würde schnell zu Unübersichtlichkeit führen und die Wartbarkeit erschweren. Darüber

hinaus wäre es für Nutzende schwierig, gezielte Anpassungen vorzunehmen, ohne unbeabsichtigt andere Berechnungslogiken zu verändern (Fuchs, et al., 2022).

Aus diesem Grund folgt der Prozess einem modularen Aufbau. Alle wesentlichen Berechnungsschritte sind als separate Funktionen ausgelagert, die jeweils klar definierte Aufgaben erfüllen. Diese Funktionsmodule werden über ein Hauptskript (*main.m*) in strukturierter Reihenfolge aufgerufen.

Das Hauptskript beginnt mit der Initialisierung der Umgebung, dem Setzen von Parametern und der Definition globaler Datenstrukturen. Anschließend werden die CPACS-Daten eingelesen und Objekte erzeugt. In den darauffolgenden Schritten werden alle weiteren Funktionen nacheinander aufgerufen, darunter z. B. Platzierungsalgorithmen, Anforderungszuweisungen oder Bauraumprüfungen. Am Ende des Skripts erfolgt der Export aller Ergebnisse (Beckert, 2020).

Durch diese top-down organisierte Steuerung bietet *main.m* einen Einstiegspunkt, über den der gesamte Prozess nachvollziehbar kontrolliert wird. Gleichzeitig bleiben die Rechenbausteine modular, erweiterbar und wiederverwendbar. Alle erzeugten Objekte und Zwischenergebnisse stehen im MATLAB-Workspace zur Verfügung und können dort direkt weiterverarbeitet oder analysiert werden (Fuchs, et al., 2022).

Die abschließende Überführung der erzeugten Objektdaten in ein standardisiertes Austauschformat erfolgt über den Aufruf der Funktion *exportNew*, deren Aufbau und Funktionsweise im folgenden Abschnitt erläutert wird.

3.3.4 XML-Export der Entwurfsparameter

Im Anschluss an die funktionale Auslegung und Bauraumanalyse wird eine strukturierte XML-Datei erzeugt, die als zentrale Schnittstelle für die nachfolgenden Schritte der 3D-Modellierung und Visualisierung dient. Die Daten dieser Datei basieren direkt auf den zuvor instanziierten Komponentenobjekten, die während des Auslegungsprozesses in einer übergeordneten Sammlung zusammengeführt wurden.

Der Exportprozess beginnt mit der Initialisierung des XML-Dokuments und der Festlegung einer einheitlichen Grundstruktur. Diese umfasst unter anderem das Hauptelement für die Kabinenkomponenten sowie globale Konfigurations- und Verknüpfungsbereiche. Darauf aufbauend wird über alle vorhandenen Objektinstanzen iteriert, deren Eigenschaften automatisiert in die XML-Datei überführt werden. Erfasst werden dabei unter anderem Identifikationsmerkmale, geometrische Parameter, Lageinformationen sowie systemische Attribute wie Material oder ATA-Zugehörigkeit (Beckert, 2020).

Die resultierende Datei bildet eine vollständige und konsistente Repräsentation des aktuellen Entwurfsstands der Kabine. Sie enthält sämtliche zur Weiterverarbeitung erforderlichen Informationen und stellt sicher, dass die Modellierung in Blender sowie die Visualisierung in Unity auf einem gemeinsamen, verlustfreien Datenfundament aufbauen.

3.4 Blender als Modellierungsumgebung

Blender ist eine leistungsfähige 3D-Grafiksoftware, die sich durch eine breite Funktionsvielfalt und eine aktive Entwickler-Community auszeichnet. Neben der klassischen Modellierung bietet Blender Funktionen für Texturierung, Animation, Rendering und sogar physikalische Simulationen (Fuchs, et al., 2021b). Die Software ermöglicht es, komplexe Modelle mit detaillierten Oberflächenstrukturen zu erstellen und diese für den späteren Einsatz in einer virtuellen Umgebung aufzubereiten.

3.4.1 Rolle im Entwicklungsprozess

Blender übernimmt im virtuellen Entwicklungsprozess des DLR eine Schnittstellenfunktion zwischen der funktional-abstrakten Auslegung in MATLAB und der interaktiven Visualisierung in Unity. Während in MATLAB primär technische Parameter, Positionen und Hüllgeometrien berechnet werden, ermöglicht Blender die Überführung dieser Daten in eine visuell hochwertige 3D-Modellrepräsentation.

Ein direkter Export der erzeugten Objekte nach Unity ist nicht möglich, da MATLAB keine native Unterstützung für gängige 3D-Austauschformate wie FBX bietet. Zudem sind die geometrischen Darstellungen in MATLAB stark abstrahiert und genügen nicht den visuellen Anforderungen, die für eine immersive Darstellung in Unity notwendig sind. Aus diesem Grund fungiert Blender als intermediäres Modellierungswerkzeug, das sowohl die geometrischen als auch die visuellen Informationen aufbereitet und für Unity kompatibel macht (Fuchs, et al., 2022).

Die Nutzung von Blender ermöglicht es, die in MATLAB erzeugten Bounding Boxes automatisiert durch hochaufgelöste 3D-Modelle zu ersetzen. Diese Modelle fungieren als visuelle Referenzmodelle, die auf Basis der zuvor definierten Systemattribute und Positionierungsdaten geladen und präzise im virtuellen Raum platziert werden. Dies erfolgt auf Grundlage einer XML-Datei, in der sämtliche relevanten Objektinformationen enthalten sind. Über ein in Python implementiertes Skript werden die Modelle anhand ihrer eindeutigen IDs korrekt positioniert, skaliert und gruppiert. Zusätzlich lassen sich Materialien, Layerstrukturen und weitere visuelle Attribute zuweisen, die für die spätere Darstellung in Unity essenziell sind (Beckert, 2020).

Blender erfüllt damit eine doppelte Funktion: Einerseits ermöglicht es die geometrisch korrekte Darstellung komplexer Kabinensysteme, andererseits bildet es durch den Export im FBX-Format die technische Brücke zur Game-Engine Unity. Diese klar getrennte Aufgabenverteilung innerhalb der Toolkette, MATLAB für Auslegung, Blender für Modellierung, Unity für Interaktion, erhöht nicht nur die Transparenz und Wartbarkeit des Prozesses, sondern erlaubt auch eine disziplinübergreifende Optimierung der jeweiligen Entwicklungsanteile (Fuchs, et al., 2021b).

3.4.2 Technischer Ablauf der Modellintegration

Die Übergabe der XML-Datei in die 3D-Umgebung von Blender erfolgt automatisiert über ein in Python implementiertes Importskript. Blender selbst bietet keine native Möglichkeit, XML-Dateien, wie sie im vorangegangenen MATLAB-Prozess erzeugt werden, direkt zu interpretieren oder zu verarbeiten. Aus diesem Grund wird ein Python-Skript verwendet, das über die Blender-eigene Programmierschnittstelle mit der virtuellen 3D-Umgebung interagiert (Beckert, 2020).

Dieses Importskript liest die in MATLAB erzeugte XML-Datei sowie eine begleitende JSON-Struktur ein, die die Pfade zu den entsprechenden 3D-Modellen enthält. Auf Basis der in der XML-Datei hinterlegten eindeutigen IDs werden die passenden Modelle geladen, an den vorgesehenen Positionen platziert, skaliert und bei Bedarf gruppiert. Die Geometrien werden dabei direkt in die Blender-Szene eingebettet und bilden die visuelle Repräsentation der zuvor funktional ausgelegten Komponenten. Diese Modellzuweisung entspricht dem Prinzip der automatisierten Modellgenerierung auf Basis von Konfigurationsdateien, wie sie in vergleichbaren VR-Anwendungen etabliert wurden (Fuchs, et al., 2022).

Sollte für eine bestimmte Objekt-ID kein zugeordnetes 3D-Modell gefunden werden, wird ein generischer Platzhalter verwendet, um die Vollständigkeit der Kabine in der 3D-Umgebung zu gewährleisten. Auch in Fällen mehrfach vorkommender Komponenten (z.B. Trolleys) erfolgt eine korrekte Vervielfältigung und Ausrichtung auf Grundlage der übergebenen Attributdaten. Dadurch bleibt die Visualisierung robust gegenüber Lücken im Modellbestand und flexibel anpassbar (Fuchs, et al., 2021b).

Python dient dabei nicht nur zur Datenextraktion und Modellzuweisung, sondern ermöglicht eine vollautomatische, wiederholbare und skalierbare Erstellung komplexer Kabinenszenen. Ohne diese Automatisierung wäre eine manuelle Platzierung und Zuordnung der Komponenten bei jeder Modellvariante erforderlich, was einen erheblicher Zeit- und Fehlerfaktor im Entwicklungsprozess darstellt (Beckert, 2020).

3.4.3 Export aus Blender für Unity

Nach erfolgreicher Platzierung und visueller Aufbereitung aller Komponenten erfolgt der Export der Kabinenszene aus Blender zur Überführung in die Unity-Umgebung. Dazu wird das vollständige 3D-Modell im FBX-Format (Filmbox) gespeichert, einem weit verbreiteten Austauschformat, das von Unity nativ unterstützt wird und sich durch hohe Kompatibilität bei Geometrie, Materialdefinitionen und Objektstrukturen auszeichnet (Beckert, 2020). Beim Export wird darauf geachtet, dass die im Python-Skript erzeugte Szenenstruktur erhalten bleibt. Dazu zählen insbesondere

- die eindeutigen Objektbezeichnungen (z. B. über IDs),
- korrekte Pivotpunkte und Skalierungsinformationen
- sowie die logische Gruppierung von Komponenten innerhalb der Kabinenstruktur.

Zusätzlich wird die ursprüngliche XML-Datei, aus der die Modellinformationen hervorgehen, gemeinsam mit der FBX-Datei an Unity übergeben. Diese Kombination aus geometrischer Szene und zugehörigen Attributdaten ermöglicht es, im nächsten Prozessschritt nicht nur die Geometrie zu visualisieren, sondern auch systemische Eigenschaften wie Energiebedarf, Verbindungsbeziehungen oder Funktionszustände interaktiv darzustellen (Beckert, 2020).

Durch die saubere Trennung von Visualisierung (Geometrie in FBX) und logischen Systemdaten (XML) wird eine hohe Flexibilität in der Darstellung und Analyse innerhalb der Unity-Plattform erreicht. Gleichzeitig bleibt die Modelllogik jederzeit rückverfolgbar und revisionssicher mit der technischen Auslegung aus MATLAB verknüpft (Fuchs, et al., 2022).

3.5 Unity – Interaktive Visualisierung

Unity ist eine plattformunabhängige Entwicklungsumgebung zur Erstellung von Echtzeit-3D-Anwendungen. Sie wird ursprünglich in der Spieleentwicklung eingesetzt, hat sich aber zunehmend auch in der Industrie, Luftfahrt, Architektur und Wissenschaft etabliert. Die Engine erlaubt es, 3D-Modelle mit dynamischer Benutzerinteraktion, physikalischer Logik und immersiver Visualisierung zu kombinieren. Durch die Unterstützung moderner Schnittstellen, VR-Systeme und Datenquellen eignet sich Unity besonders für die Darstellung komplexer technischer Systeme in explorativen Analyseumgebungen.

3.5.1 Rolle im Entwicklungsprozess

Im digitalen Entwicklungsprozess des DLR übernimmt Unity die Funktion einer interaktiven, immersiven Bewertungsumgebung. Während MATLAB für die technische Auslegung und Blender

für die geometrische Modellierung zuständig sind, dient Unity als Plattform zur Analyse, Präsentation und Entscheidungsunterstützung. Hier werden die exportierten 3D-Modelle (im FBX-Format) mit den zugehörigen XML-basierten Systeminformationen verknüpft, um nicht nur die Geometrie darzustellen, sondern auch zugrundeliegende Parameter sichtbar und erfahrbar zu machen (Fuchs, et al., 2022).

Unity wird eingesetzt, weil es eine Vielzahl technischer Anforderungen vereint: Die Engine ermöglicht eine begehbare Darstellung der Kabine, bietet Funktionen zur Objektselektion, zur Visualisierung von Eigenschaften (z. B. Energieverbrauch, Position, Systemzugehörigkeit) und erlaubt es, verschiedene Varianten und Konfigurationen in Echtzeit zu vergleichen. Die Integration externer Datenquellen über Skripting (z. B. C#) ermöglicht zudem die dynamische Erweiterung des Funktionsumfangs, etwa durch Filterfunktionen, interaktive Layer oder Informationsfenster (Beckert, 2020).

Die in Unity verwendeten Systeminformationen werden über eine im Vorfeld erzeugte XML-Datei eingebunden, die die Attribute und Verknüpfungen der Komponenten beschreibt. Die konkrete Verarbeitung dieser Daten erfolgt über Skripting-Mechanismen innerhalb der Unity-Engine (z. B. C#). Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der funktionalen Modellierung und nicht auf der Softwareentwicklung liegt, wird an dieser Stelle nicht im Detail auf die technische Umsetzung des Imports eingegangen. Für weiterführende Informationen wird auf (Fuchs, et al., 2023a) verwiesen.

Im Gesamtprozess dient Unity somit als Schnittstelle zwischen Technik, Design und Entscheidungsträgern. Durch die immersive Darstellung wird ein intuitives Systemverständnis gefördert, das auch nicht-technischen Beteiligten den Zugang zu komplexen Konfigurationen erleichtert. Gleichzeitig unterstützt Unity die frühzeitige Identifikation von Planungsfehlern und erlaubt eine Rückführung der Erkenntnisse in die vorhergehenden Prozessschritte, etwa zur Optimierung der Komponentenplatzierung oder zur Anpassung von Anforderungen in MATLAB.

3.5.2 Benötigte Hardware für die immersive Anwendung

Für die Darstellung und Nutzung der interaktiven Kabinenszene in Unity ist neben der Software auch eine geeignete Hardwareausstattung erforderlich. Insbesondere bei immersiven Anwendungen wie der virtuellen Begehung komplexer Kabinenkonfigurationen müssen sowohl Rechenleistung als auch grafische Performance entsprechend ausgelegt sein.

Zum Einsatz kommt ein leistungsstarker Rechner für Grafikanwendungen, ausgestattet mit einer aktuellen dedizierten GPU, ausreichendem Arbeitsspeicher und VR-tauglicher Peripherie. Ergänzt wird das System durch ein Virtual-Reality-Headset (z. B. HTC Vive oder Meta Quest),

das eine vollständig immersive Darstellung der Kabine ermöglicht. Mit einer solchen Hardware als physischer Grundlage können die in Unity implementierten Funktionen flüssig, stabil und benutzergerecht erlebbar dargestellt werden.

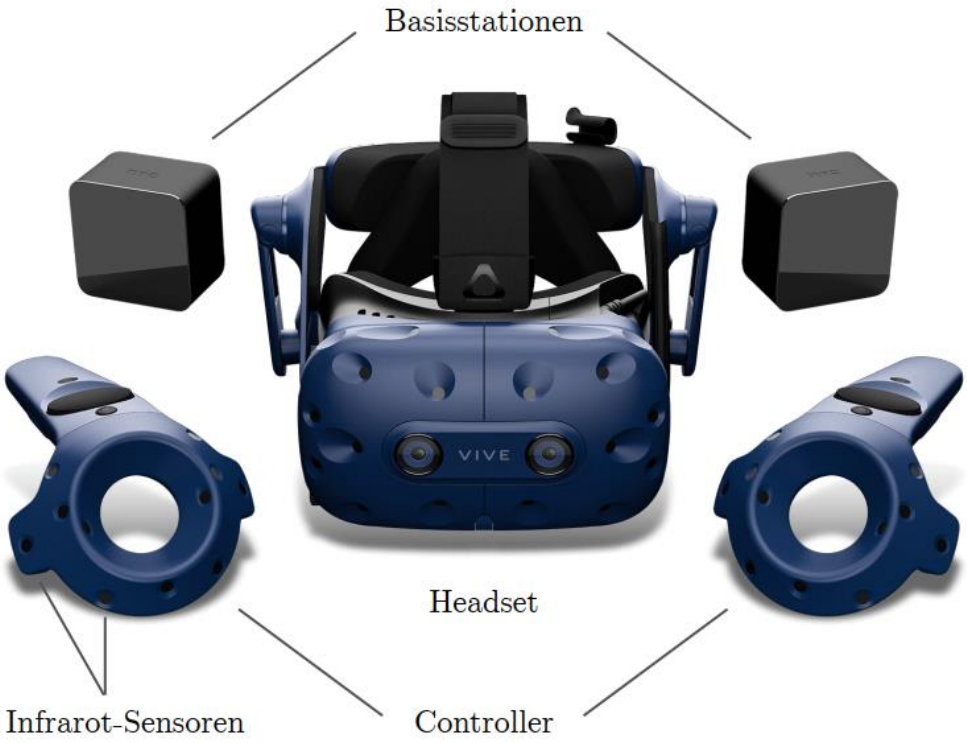

Abbildung 3-4: Benötigte VR-Hardware für die immersive Darstellung (Beckert, 2020)

Abbildung 3.4 zeigt das für die immersive Darstellung erforderliche VR-Visualisierungssetup, bestehend aus Headset, Controllern und Basisstationen. Das Headset (z. B. HTC Vive) dient als zentrales Ausgabegerät und ermöglicht die visuelle und sensorische Wahrnehmung der virtuellen Kabinenszene in Unity. Die beiden Controller fungieren als interaktive Eingabegeräte, mit denen der Nutzer gezielt mit virtuellen Objekten und Funktionen interagieren kann.

Zur präzisen Erfassung von Position und Bewegung im Raum kommen Basisstationen (Lighthouse-System) zum Einsatz, die Infrarotsignale aussenden und damit die exakte Orientierung von Headset und Controllern ermöglichen. Dieses optische Tracking bildet die technische Grundlage für ein stabiles, echtzeitfähiges Bewegungserlebnis und eine realitätsnahe Nutzerinteraktion im virtuellen Raum.

4 Entwicklungsmethodik zur Galley-Parametrisierung

Trotz bestehender Workflows zur funktionalen Auslegung komplexer Kabinensysteme bleibt die geometrische Repräsentation der Galley im virtuellen Entwicklungsprozess bisher auf eine abstrahierte Volumenbeschreibung beschränkt. Im Rahmen des DLR-Prozess wird die Galley in MATLAB lediglich als Bounding Box dargestellt, ein technisch definierter Bauraum, der weder Struktur, Funktion noch Detailgrad abbildet. Diese Begrenzung ist in Abbildung 4-1 veranschaulicht.

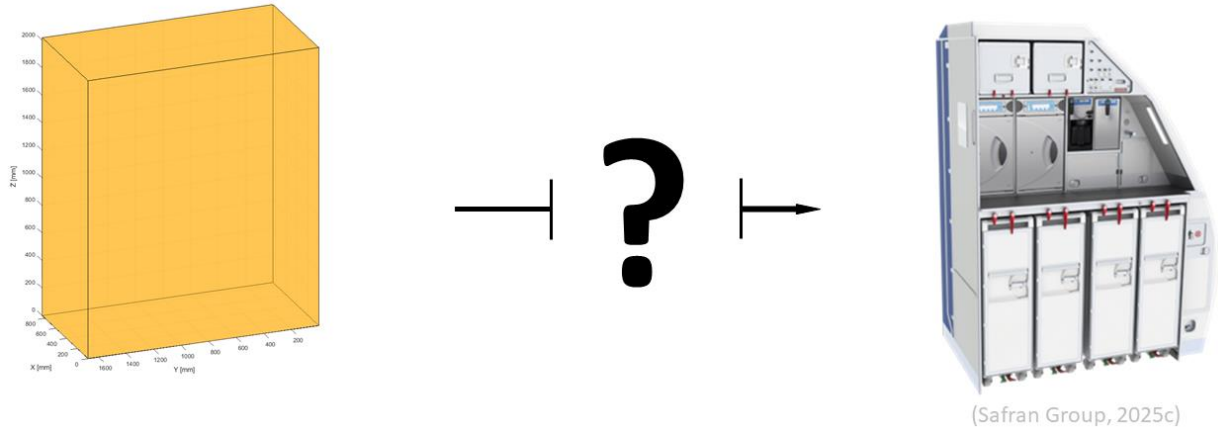

Abbildung 4-1: Beispielhafte Visualisierung der Ausgangsproblematik der Modellierung

Links ist die generierte Bounding Box zu sehen, wie sie im Rahmen der MATLAB-Modellierung erzeugt wird. Sie enthält keine Information über die tatsächliche Geräteausstattung oder funktionale Gliederung. Rechts hingegen steht eine reale Galley, wie sie in modernen Kabinen tatsächlich verbaut wird, mit sichtbaren Inserts, Funktionsbereichen und Bauteilstruktur. Die zentrale Herausforderung besteht darin, aus dieser abstrahierten Geometrie ein konfiguriertes Galley-Modell abzuleiten, das sowohl den funktionalen Anforderungen des Kabinenbetriebs als auch den technischen Standards der Flugzeugsystemarchitektur gerecht wird.

In den folgenden Abschnitten wird eine Methode beschrieben, mit der sich auf Basis weniger Eingabeparameter ein vollständiges, regelbasiertes Galley-Modell generieren lässt, das in nachfolgende Simulations- und Visualisierungsprozesse überführt werden kann.

4.1 Betrachtungsumfang und Detailtiefe

Grundsätzlich strebt die in diesem Kapitel beschriebene Methode, und damit die in Abschnitt 5 umgesetzte Modellierung, einen hohen Detaillierungsgrad und einen klaren Wiedererkennungswert gegenüber realen Kabinenkonfigurationen an. Im Zentrum steht die

Abbildung typischer Galley-Konfigurationen des Airbus A320, bestehend aus einer vorderen Galley (G1/FWD Galley) und einer hinteren Galley (G3/AFT Galley). Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 zeigen eine beispielhafte Darstellung. Die gewählte Modellarchitektur ist so aufgebaut, dass sie perspektivisch auch auf Twin-Aisle-Kabinen (z.B. A 350) anwendbar bleibt.

Abbildung 4-2: Beispielhafte vordere Galley (Safran Group, 2025c)

Abbildung 4-3: Beispielhafte hintere Galley (Safran Group, 2025d)

Hersteller von Galley-Komponenten bieten inzwischen ein breites Spektrum spezialisierter Geräte an, darunter Mikrowellen, Espressomaschinen, Dampfgarer oder spezielle Kühlgeräte. Für den modellbasierten Ansatz wird der Fokus bewusst auf eine begrenzte, aber praxisrelevante Auswahl wie Trolleys, Standard-Container, Ofen, Wasserkocher und Kaffeemaschine gelegt. Diese Auswahl ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung typischer Galley-Komponenten.

Ein wesentlicher Bestandteil des Modells ist die Einbindung von Servicekonzepten in einem Zwei-Klassen-Layout. Ziel ist es dabei, unterschiedliche Ausstattungsvarianten energetisch zu bewerten. Hierzu werden zwei grundlegende Serviceprofile modelliert: Dies ist zum einen ein umfassendes Verpflegungskonzept mit heißen und kalten Speisen sowie Getränken und zum anderen ein reduziertes Konzept, das ausschließlich Heiß- und Kaltgetränke vorsieht. Letzteres führt aufgrund der Nichtverwendung von Öfen zu einem deutlich geringeren Energiebedarf.

Zur Bewertung der jeweiligen Konfigurationen werden in den weiteren Abschnitten geeignete Leistungskennzahlen definiert und berechnet. Die Ausgabestruktur des Modells erlaubt es, diese Kennzahlen unabhängig von der Entwicklungsumgebung weiterzuverarbeiten und extern zu analysieren, sodass auf dieser Grundlage die in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen systematisch beantwortet werden können. Zur Verdeutlichung der Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Galley und deren Zusammenwirken im Modell, bietet Abbildung 4-4 eine übersichtliche Darstellung der betrachteten Themenfelder.

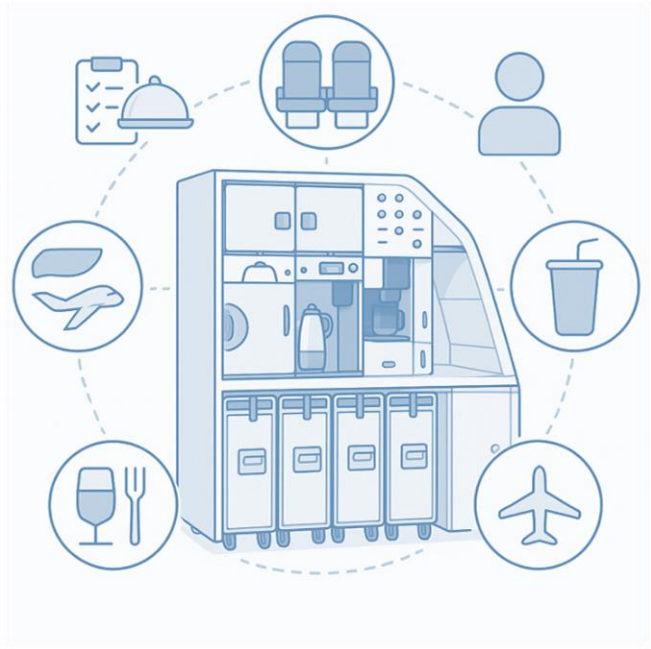

Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren

Ergänzend werden in dieser Arbeit auch Fragestellungen berücksichtigt, die über den unmittelbaren Forschungsrahmen hinausgehen, aber für eine spätere Erweiterung der Bewertungslogik von Bedeutung sein können. Wird innerhalb eines Servicekonzepts beispielsweise die Ausgabe von Heiß- und Kaltgetränken vorgesehen, ergibt sich daraus die Anforderung, den notwendigen Frischwasserbedarf für die Zubereitung heißer Getränke systematisch im Blick zu behalten. Parallel dazu entsteht durch den Einsatz von Einwegbechern für Kaltgetränke ein messbares Abfallaufkommen, das ebenfalls in die Bewertung mit einbezogen werden kann.

Zur Verständnisvertiefung für die operative Belastung der Galley werden diese Zusammenhänge in der Methodik als ergänzende Einflussgrößen betrachtet. Insbesondere der Einfluss der Flugdauer spielt dabei eine zentrale Rolle: Während auf Kurzstrecken in der Regel weniger Müll und geringerer Ressourcenverbrauch zu erwarten sind, steigt der Bedarf auf Mittel- und Langstreckenflügen deutlich an. Durch diesen erweiterten Zusammenhang kann bereits im Vorfeld überprüft werden, ob die gewählte Galley-Konfiguration für das geplante Serviceangebot vollständig und ohne Engpässe ausreicht. Die Auslastung der Galley wird daher bereits im Rahmen der Methode berücksichtigt, wodurch eine fundierte Grundlage für eine spätere operative Analyse geschaffen wird.

Ein weiterer Aspekt betrifft die logistischen Abläufe am Boden. Basierend auf Herstellerangaben, insbesondere aus den Unterlagen von Airbus (Airbus S.A.S, 2024), wird analysiert, wie sich Be- und Entladezeiten von Trolleys an den jeweiligen Türen zumindest näherungsweise modellieren

lassen. Diese Informationen können künftig dazu beitragen, Ladeprozesse zeitlich effizienter zu gestalten und in ganzheitliche Kabinenmodelle zu integrieren.

4.2 Anforderungen an die Methode

Die Entwicklung der Methode erfolgt nicht beliebig, sondern ist an spezifische Anforderungen gebunden, die sich aus den Zielstellungen dieser Arbeit sowie aus den Rahmenbedingungen des virtuellen Entwicklungsprozesses ergeben. In diesem Abschnitt werden diese Anforderungen systematisch identifiziert und inhaltlich eingeordnet.

4.2.1 Anforderungen aus den Forschungsfragen

Die in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen bilden den methodischen Rahmen für die Entwicklung der Parametrisierungsmethodik. Aus ihnen lassen sich drei zentrale Anforderungen ableiten, die das Konzept systematisch erfüllen muss:

Variantenfähigkeit bei begrenztem Eingabeaufwand

Die Methode muss in der Lage sein, unterschiedliche Galley-Konfigurationen auf Basis weniger Eingabeparameter zu erzeugen. Dabei muss gewährleistet sein, dass funktionale, geometrische und logistische Zusammenhänge mit ausreichender Tiefe und technischer Präzision abgebildet werden.

Regelbasierte Abbildung serviceabhängiger Auslegungen

Weiterhin muss die Methode in der Lage sein, verschiedene Servicekonzepte systematisch zu berücksichtigen, da sich der Geräteeinsatz und die Anordnung der Komponenten je nach Serviceprofil unterscheiden. Die Auswirkungen auf Gerätezuweisung, Ressourcennutzung und Energiebedarf sind durch klare Regeln abzubilden.

Ermittlung und strukturelle Bereitstellung von Kennzahlen

Zur späteren Bewertung der erzeugten Galley-Konfigurationen muss die Methode geeignete Kennzahlen berechnen und in strukturierter Form bereitstellen. Hierfür sollen passende Berechnungsmechanismen sowie einheitliche Ausgabestrukturen vorgesehen werden, die sowohl eine interne Weiterverarbeitung im MATLAB-Umfeld als auch eine externe Analyse und den Vergleich unterschiedlicher Varianten ermöglichen.

4.2.2 Anforderungen aus dem virtuellen Entwicklungsprozess

Neben den inhaltlichen Anforderungen aus den Forschungsfragen ergeben sich methodische Vorgaben auch aus der Systemarchitektur des virtuellen Entwicklungsprozesses, wie er am DLR verfolgt wird. Dieser ist geprägt durch eine stark strukturierte, modular aufgebaute Prozesslogik mit klar definierten Schnittstellen zwischen Daten, Funktionen und Werkzeugen. Die Methode zur Galley-Parametrisierung muss daher spezifische strukturelle und technische Anforderungen erfüllen:

Integration in den digitalen End-to-End-Prozess

Die Methode muss sich nahtlos in bestehende Prozessketten einfügen lassen. Ihre Ausgestaltung hat sich an den Prinzipien der OOP zu orientieren, die im virtuellen Entwicklungsprozess des DLR standardmäßig verwendet werden. Nur so kann die Anschlussfähigkeit an bestehende Schnittstellen sowie an externe Modellierungs- und Visualisierungstools gewährleistet werden.

Automatisierbarkeit der Konfiguration

Ein zentrales Ziel ist die Reduktion manueller Arbeitsschritte. Die Methode muss daher eine vollständig automatisierte Generierung von Galley-Konfigurationen ermöglichen, basierend auf einer strukturierten Eingabe und einem regelbasierten Verarbeitungskern.

Modularität und Wiederverwendbarkeit

Die Methodik soll in modularen Funktionsbausteinen aufgebaut sein, die unabhängig voneinander genutzt, erweitert oder angepasst werden können. Dies erleichtert die Weiterentwicklung sowie die Übertragbarkeit auf andere Kabinenelemente.

Trennung von Methodik und Steuerung:

Innerhalb des virtuellen Entwicklungsrahmens am DLR besteht die Anforderung, die gesamte Methodik in klar strukturierte Funktions- und Klassenbausteine auszulagern. Im Hauptskript soll daher lediglich ein zentraler Funktionsaufruf erfolgen, denn diese Trennung zwischen Steuerlogik und Implementierung verbessert die Wartbarkeit, erleichtert die Integration in bestehende Prozessumgebungen und unterstützt eine saubere Kopplung mit externen Tools.

4.2.3 Eigene methodisch-praktische Anforderungen

Ergänzend zu den fachlichen und systemseitigen Vorgaben ergeben sich methodische Anforderungen, die sich aus der Zielsetzung dieser Arbeit einerseits sowie aus der praktischen

Umsetzbarkeit der Methode andererseits ergeben. Im Zentrum stehen dabei die Handhabbarkeit, die strukturelle Trennung der Komponenten und die Konfigurierbarkeit des Gesamtansatzes:

Minimierung der Eingabeparameter

Die Methode soll mit einer möglichst geringen Anzahl an manuell zu definierenden Eingabegrößen auskommen, um den Charakter eines automatisierten und frühphasentauglichen Auslegungsprozesses zu wahren. Eine zu hohe Eingabekomplexität würde diesem Anspruch widersprechen. Mit wenigen, aber gezielt definierten Parametern muss eine vollständige Konfiguration initialisiert werden können.

Trennung von Funktionslogik und physischen Strukturelementen

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und Wiederverwendbarkeit wird eine konsequente funktionale Kapselung angestrebt. Während Klassen ausschließlich der Abbildung physischer Elemente wie Galleys oder Geräte dienen, sollen Rechen-, Analyse- und Bewertungsfunktionen separat ausgelagert werden. Diese Trennung zwischen Datenstruktur und Funktionslogik fördert die Modularität und erleichtert die Integration der Methode in übergeordnete Systembausteine.

4.3 Methodisches Grundprinzip

Die Konzeption der Galley-Parametrisierung orientiert sich methodisch am EVA-Prinzip, das eine grundlegende Trennung in Eingabe (E), Verarbeitung (V) und Ausgabe (A) vorsieht (Steyer, 2024). Dieses aus der Informationsverarbeitung stammende Modell dient in der Software- und Systementwicklung als Strukturierungsrahmen, um komplexe Abläufe in nachvollziehbare, modular aufgebaute Schritte zu gliedern. Auch im vorliegenden methodischen Ansatz bildet das EVA-Prinzip den organisatorischen Rahmen für die Gestaltung von Funktionen, Eingabestrukturen und Ausgabeschnittstellen. Die zentrale Steuerlogik sowie die untergeordneten Berechnungsfunktionen folgen diesem Schema konsequent: Zunächst werden definierte Eingaben übergeben, anschließend verarbeitet und schließlich in strukturierter Form ausgegeben.

Das EVA-Prinzip wird dabei nicht nur innerhalb dieser Arbeit eingesetzt, sondern ist bereits fester Bestandteil des systemischen Entwicklungsansatzes am DLR. Im dort etablierten digitalen Entwurfsprozess dient es der methodischen Klarheit und der strukturierten Kopplung von Modellen, Schnittstellen und Auswertungen über den gesamten Modellierungsablauf hinweg. Diese Arbeitsweise spiegelt sich auch in der hier entwickelten Galley-Modellierung wider, in der das EVA-Prinzip auf jeder Ebene durchgängig angewendet wird: sowohl beim initialen

Datenimport (z. B. CPACS-Datei), in der Verarbeitung als auch in der Ausgabe (z. B. Visualisierung).

Die Abbildung 4-5 zeigt die Umsetzung dieses Konzepts anhand eines schematischen Überblicks. Sie verdeutlicht, wie Eingabeparameter aus unterschiedlichen Quellen über das parametrische Galley-Modell verarbeitet und anschließend systematisch für Analyse oder Visualisierung ausgegeben werden. Besonders hervorzuheben ist die verschachtelte Anwendung des EVA-Prinzips innerhalb einzelner Funktionsblöcke, also nicht nur im Gesamtprozess, sondern auch in jedem Subprozess.

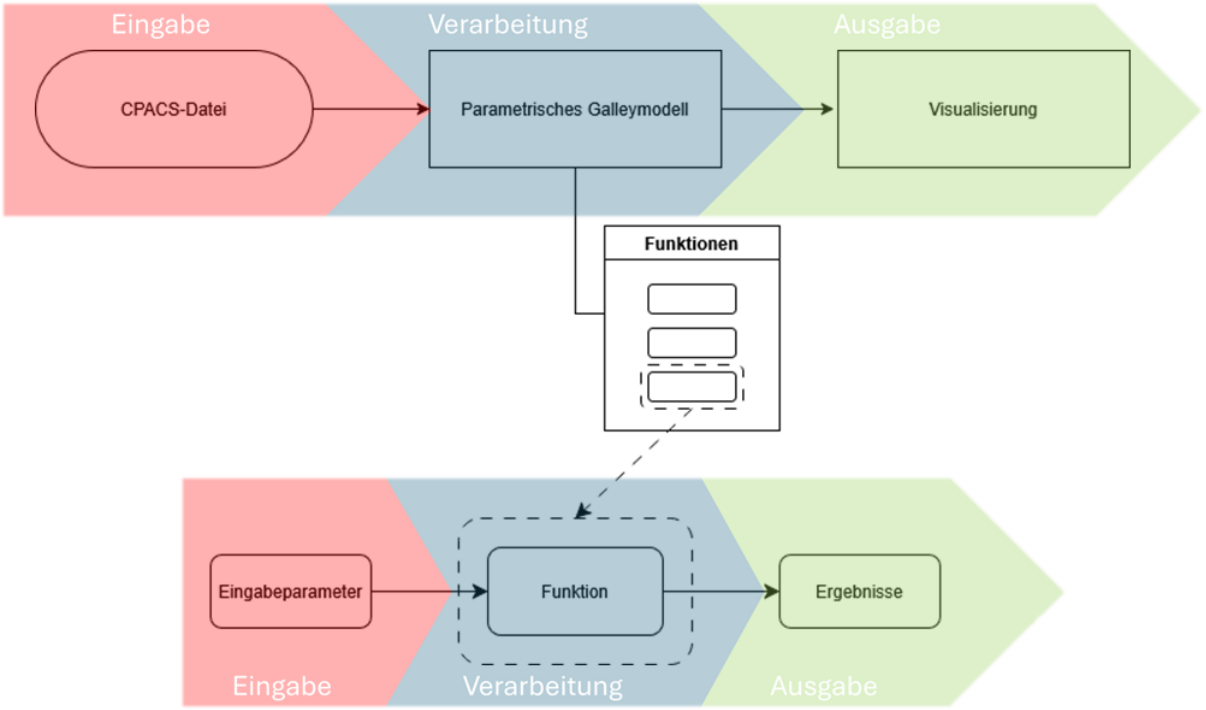

Abbildung 4-5: Anwendung des EVA-Prinzips auf mehreren Ebenen der Galley-Modellierung

4.4 Eingabeparameter der Modellierung

Aus der Beschreibung des Modellkonzepts in Kapitel 4.1 lassen sich zentrale Eingabeparameter ableiten, die für eine vollständige und regelbasierte Galley-Parametrisierung erforderlich sind. Diese Parameter bilden die Grundlage für eine automatisierte Auslegung, eine differenzierte Bewertung und die spätere Vergleichbarkeit unterschiedlicher Konfigurationen.

Bevor die Auslegung der Galley erfolgen kann, müssen die Eingabedaten aus der CPACS-Datei auf Vollständigkeit und technische Verwendbarkeit geprüft werden. Im Rahmen dieser Vorverarbeitung werden die Informationen für die Weiterverarbeitung in MATLAB geeignet aufbereitet. Dazu zählt insbesondere die Konvertierung in nutzbare Datenstrukturen sowie die

Prüfung auf Konsistenz und formale Gültigkeit. Dieser Schritt stellt sicher, dass die anschließende Modellierung stabil, reproduzierbar und regelkonform erfolgen kann.

Die Auslegung der Galley erfolgt im ersten Schritt auf Basis des Flugzeugtyps. Diese Information stammt direkt aus dem Vorentwurf und ist in der CPACS-Datei hinterlegt, sodass sie automatisiert ausgelesen und zur Auswahl geeigneter Galley-Typen herangezogen werden kann.

Ergänzend wird innerhalb des Modells ein spezifisches Servicekonzept ausgewählt, das nicht Bestandteil des Vorentwurfs ist. Diese Auswahl erfolgt manuell durch den Nutzer – etwa über die grafische Benutzeroberfläche oder ein Eingabefeld im Hauptskript.

Zur weiteren Differenzierung wird ein sogenanntes Missionsprofil eingeführt, das die grundlegende Flugdauer abbildet und daher in Kurz-, Mittel- und Langstrecke unterteilt ist. Die Kategorisierung erfolgt auf Basis angenommener Flugzeiten (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Einteilung des Missionsprofils nach Flugdauer

Missionsprofil	**Flugdauer**	**Typische Anwendung**
Kurzstrecke	Bis 3 Stunden	z.B. Inlandsflüge
Mittelstrecke	Bis 6 Stunden	z.B. Südwest-Asien
Langstrecke	Bis 12 Stunden	z.B. interkontinentale Flüge

Die Passagieranzahl stellt eine weitere wichtige Eingangsgröße für die Wahl des Servicekonzepts dar. Sie ist im Vorentwurf definiert, wird automatisiert aus dem CPACS-Modell übernommen und in der Modelllogik weiterverwendet.

Schließlich werden auch die geometrischen Eigenschaften der Türen (Exit Doors) berücksichtigt, da sie im weiteren Verlauf der Methodenumsetzung zur Ermittlung der Be- und Entladezeiten pro Tür herangezogen werden. Diese bereits im Vorentwurf enthaltenen Daten können automatisiert in die entsprechenden Funktionen eingebunden werden und ermöglichen eine spätere prozessorientierte Analyse der Ladeabläufe. Die nachfolgende Tabelle 4-2 zeigt schließlich eine strukturierte Übersicht der zentralen Eingabeparameter der Galley-Parametrisierung inklusive ihrer Herkunft und Art der Eingabe. Sie verdeutlicht, welche Informationen automatisiert aus dem Vorentwurf übernommen werden können und welche manuell durch den Nutzer definiert werden müssen.

Tabelle 4-2: Übersicht der Eingabeparameter für die Galley-Parametrisierung

Parameter	Beschreibung	Quelle	Eingabe
Flugzeugtyp	Grundlage für die Auswahl und Zulässigkeit von Galley-Typen	CPACS / Vorentwurf	Automatisch
Servicekonzept	Definiert Art und Umfang der Geräteausstattung	Annahme	Manuell
Missionsprofil	Kategorisierung nach Flugdauer	Annahme	Manuell
Passagierdaten	Grundlage zur Abschätzung des Ressourcenbedarfs	CPACS / Vorentwurf	Automatisch
exitDoor	Grundlage zur Analyse der Be- und Entladezeiten	CPACS / Vorentwurf	Automatisch

Mit diesen Parametern erfüllt das Modell bereits die in Abschnitt 4.2.3 formulierte Anforderung, mit möglichst wenigen, aber aussagekräftigen Eingaben eine vollständige Galley-Parametrisierung zu ermöglichen.

4.5 Klassenstruktur – benötigte Klassen

Die objektorientierte Umsetzung der Galley-Modellierung basiert auf einer klar strukturierten Klassenarchitektur. Diese bildet ausschließlich reale physische Komponenten der Kabine ab und orientiert sich damit unmittelbar an der funktionalen und geometrischen Realität von Galleys im virtuellen Entwicklungsprozess. Oberklassen zur Verwaltung oder Verschachtelung untergeordneter Objekte werden in dieser Arbeit bewusst nicht eingesetzt. Die Instanziierung erfolgt direkt innerhalb der Auslegungsfunktion (vgl. Abschnitt 4.6), wodurch eine transparente und gezielte Objektverwendung ermöglicht.

Im Zentrum stehen zwei Strukturklassen, die den baulichen Galley-Typen im A320 entsprechen: *HalfGalley* repräsentiert kompakte Galleys wie die vordere G1, während *FullGalley* (G3) das größte Galley-Monument am Ende der Kabine abbildet. Diese beiden Klassen stellen das physische Gerüst dar, in dem anschließend die Ausstattung mit diversen Geräten erfolgt.

Die Geräte selbst werden über spezifische Klassenobjekte abgebildet, die jeweils eigene Parameter wie Masse, geometrische Abmessungen, Energiebedarf oder Platzierungsvorgaben enthalten. Dazu zählen u. a. Trolleys, Standard-Container, Öfen, Wasserkocher (als Boiler) sowie Kaffeemaschinen. Ergänzt werden diese durch strukturelle Verriegelungselemente, die zur Fixierung einzelner Geräteeinheiten innerhalb der Galleystruktur dienen. Auch diese Elemente werden als eigenständige Klassenobjekte modelliert. In dieser Arbeit kommen drei unterschiedliche Latch-Typen (Latch1, Latch2, Latch3) zum Einsatz.

Alle genannten Klassen sind eigenständig instanziierbar und enthalten die jeweils für die physische Auslegung und spätere Analyse relevanten Informationen. Die klare Trennung in Funktionseinheiten und deren objektorientierte Kapselung ermöglichen eine robuste, modular erweiterbare Modellstruktur, beispielsweise zur Integration weiterer Gerätetypen oder komplexerer Einbaulogiken. Eine Übersicht der verwendeten Klassenobjekte sowie ihrer jeweiligen Funktion ist in der folgenden Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Übersicht der Klassenobjekte und ihrer Funktion

Klasse	Funktion / Beschreibung	Zuordnung
HalfGalley	Repräsentiert eine vordere Galley-Einheit	Struktur
FullGalley	Repräsentiert eine hintere Galley-Einheit	
Trolley	Repräsentiert einen Rollcontainer für Serviceeinsätze	Gerät
StandardUnit	Repräsentiert einen Standard-Container	
Oven	Repräsentiert einen Ofen	
Boiler	Repräsentiert einen Wasserkocher für Heißgetränke	
CoffeeMaker	Repräsentiert eine Kaffeemaschine	
Latch 1	Repräsentiert ein strukturelles Verriegelungselement	Verriegelungselement
Latch 2		
Latch 3		

4.6 Funktionsstruktur

Die Umsetzung der parametrischen Galley-Modellierung basiert auf einer modular aufgebauten Funktionsstruktur. Jede Funktion übernimmt dabei eine klar definierte Aufgabe innerhalb des Modellierungs- und Bewertungsprozesses. Die Struktur folgt dem Prinzip der methodischen Trennung von Aufgabenbereichen (vgl. Abschnitt 4.3) und stellt sicher, dass die einzelnen Arbeitsschritte unabhängig voneinander aufgerufen, angepasst oder erweitert werden können. Im Folgenden werden die eingesetzten Hauptfunktionen und ihre jeweiligen Aufgabenbereiche beschrieben.

4.6.1 Überblick der benötigten Funktionen

Hilfsfunktion

Die zentrale Hilfsfunktion bildet das Bindeglied zwischen dem Hauptskript *main.m* des virtuellen Entwicklungsprozesses (DLR-Kontext) und der Galley-spezifischen Modellierungsumgebung. Sie übernimmt die Verwaltung sämtlicher Eingabeparameter, steuert den Ablauf der Auslegungs-, Berechnungs- und Analysefunktionen und dient als Einstiegspunkt für die Ausführung des Gesamtprozesses. Darüber hinaus werden innerhalb dieser Funktion zentrale Datenstrukturen erzeugt, initialisiert und übergeben. Durch die Bündelung der Funktionalitäten in einer übergeordneten Steuerfunktion bleibt die Ausführung reproduzierbar und erweiterbar.

Auslegungsfunktion

Die Auslegungsfunktion übernimmt die zentrale Aufgabe der Galley-Initialisierung. Auf Basis des übergebenen Flugzeugtyps wird geprüft, welche Galleytypen zulässig sind (z. B. keine Center-Galley bei A320) und welche Kombinationen instanziiert werden müssen. Anschließend erfolgt die regelbasierte Platzierung geeigneter Geräte auf den dafür vorgesehenen Ebenen. Diese Platzierungslogik berücksichtigt sowohl geometrische Einschränkungen als auch funktionale Vorgaben, z. B. die Anforderung, dass Kaffeemaschinen nicht am Boden, sondern nur auf höheren Ebenen installiert werden dürfen. Die Funktion verknüpft somit die strukturelle Auslegung mit dem Servicekonzept und bildet die Grundlage für die spätere Analyse.

Analysefunktion

Die Analysefunktion ist für die Ermittlung zentraler Leistungskennzahlen (vgl. Abschnitt 4.7) zuständig. Sie aggregiert die in der Modellierung hinterlegten Geräteeigenschaften (z. B. Masse, Energieverbrauch) und berechnet daraus übergreifende Kenngrößen auf Galley- oder Flugzeugebene. Neben der Berechnung eines Ist-Zustands kann zur Ermittlung von Differenzwerten auch ein Vergleich mit Referenzkonfigurationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden sowohl in Form interner MATLAB-Tabellen als auch über externe Excel-Dateien ausgegeben, um eine Weiterverarbeitung in anderen Analyseumgebungen zu ermöglichen.

Berechnungsfunktion

Die Berechnungsfunktion konzentriert sich auf die detaillierte Betrachtung der Ressourcenverbräuche in Abhängigkeit vom gewählten Servicekonzept. Hierzu zählen insbesondere der Frischwasserbedarf für Heißgetränke, das entstehende Abfallvolumen sowie die Bereitstellungskapazitäten innerhalb der Galley. Die Funktion greift dabei auf vordefinierte

Verbrauchswerte pro Gerät und pro Passagier zurück, die in die modellinterne Bewertung integriert werden. Darüber hinaus ermöglicht die Berechnungsfunktion die Abschätzung weiterer operativer Kenngrößen, z. B. Ladezeiten an Exit-Doors, auf Basis standardisierter Zeitprofile und Flugzeugdaten.

4.6.2 Funktionsablauf und Datenfluss

Der Ablauf der Funktionsstruktur innerhalb der Galley-Modellierung erfolgt sequenziell und modular gesteuert über eine zentrale Hilfsfunktion. Der Prozess beginnt mit dem Aufruf des Hauptskripts *main.m*, das die initialen Eingabeparameter einliest und an die Hilfsfunktion übergibt. Diese fungiert als zentrales Steuerungselement und koordiniert die nachfolgenden Funktionsaufrufe in definierter Reihenfolge.

Zunächst wird die Auslegungsfunktion aufgerufen, in der auf Basis der Eingaben (z. B. Flugzeugtyp, Servicekonzept) die passende Galley-Konfiguration erzeugt und mit Geräten bestückt wird. Die Ergebnisse dieses Schrittes – etwa die platzierten Geräteklassen – werden anschließend an die Hilfsfunktion zurückgegeben.

Daraufhin ruft die Hilfsfunktion die Berechnungsfunktion auf, in der ressourcenbezogene Größen wie Frischwasserbedarf oder Abfallaufkommen abhängig von der Geräteausstattung und dem gewählten Serviceprofil ermittelt werden. Auch diese Ergebnisse fließen nach Abschluss wieder zurück in die Hilfsfunktion.

Abschließend erfolgt der Aufruf der Analysefunktion, die zentrale Leistungskennzahlen (KPIs) wie Masse oder Energiebedarf berechnet. Diese bilden die Grundlage für spätere Vergleiche und Bewertungen. Auch hier werden die Resultate wieder in der Hilfsfunktion gesammelt.

Sobald alle Einzelfunktionen vollständig durchlaufen wurden und deren Ergebnisse vorliegen, gibt die Hilfsfunktion den vollständigen Datensatz zurück an *main.m*. Auf diese Weise bleibt der Ablauf kontrolliert, modular und klar nachvollziehbar strukturiert – eine zentrale Voraussetzung für Wartbarkeit, Erweiterbarkeit und systematische Analyse im Rahmen des virtuellen Entwicklungsprozesses. Eine schematische Darstellung des beschriebenen Ablaufs ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

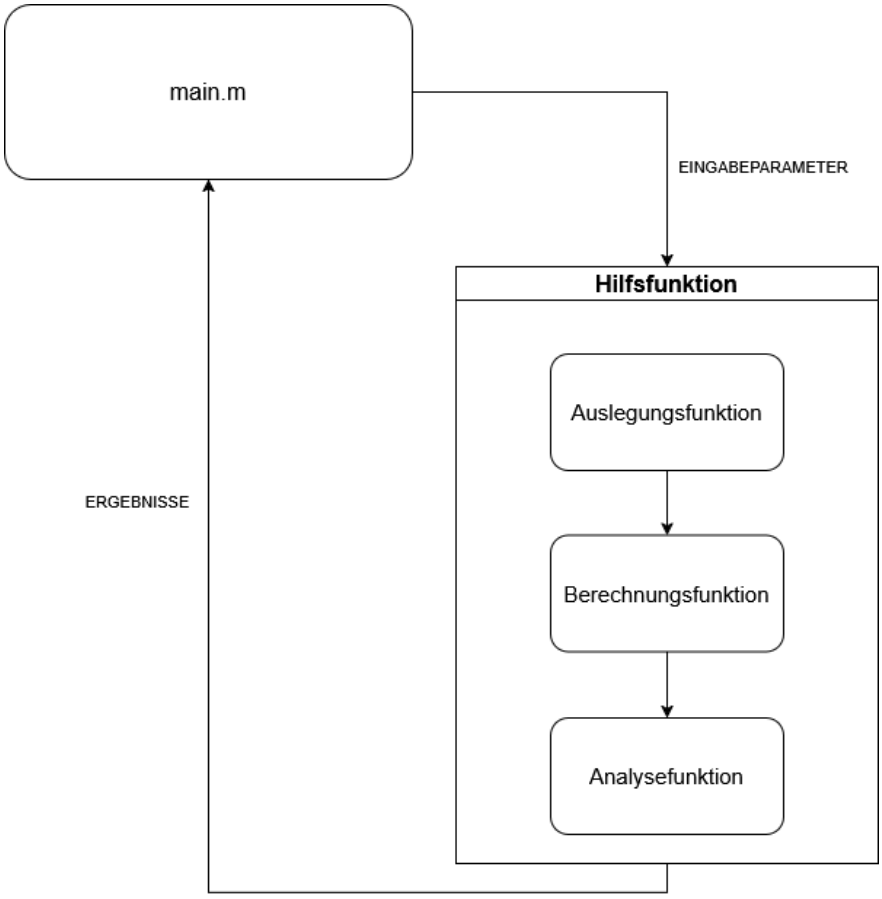

Abbildung 4-6: Schematischer Ablauf der Funktionen

4.7 Leistungskennzahlen

Zur objektiven Bewertung unterschiedlicher Galley-Konfigurationen werden in der Modellierung spezifische Leistungskennzahlen (KPIs) berechnet. Diese Kennzahlen ermöglichen eine quantitative Analyse der Auswirkungen verschiedener Geräte- und Servicekonzepte auf die Kabine und dienen zugleich als Grundlage für den Vergleich von Alternativen. Die Auswahl der KPIs orientiert sich an den Zielen des virtuellen Entwicklungsprozesses sowie an praktischen Anforderungen der Luftfahrtindustrie.

Primäre Leistungskennzahlen

Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen zwei zentrale Kennzahlen: Die Masse und der Energiebedarf. Beide Parameter wirken sich unmittelbar auf den Treibstoffverbrauch und damit auf die CO_2-Emissionen des Flugzeugs aus.

- **Masse:** Die Gesamtmasse einer Galley ergibt sich aus der Summe der Massen aller eingebauten Geräte und strukturellen Komponenten. Sie beeinflusst direkt das Abfluggewicht des Flugzeugs und wirkt sich auf Reichweite, Effizienz und Kosten aus.

- **Energiebedarf:** Der elektrische Energiebedarf ergibt sich aus der Anzahl und Art der eingesetzten Geräte. Da der Strom an Bord überwiegend durch Triebwerksgeneratoren erzeugt wird, führt ein höherer Strombedarf zu einem erhöhten Kerosinverbrauch. Dieser Zusammenhang kann im Modell herangezogen werden, um CO_2-Emissionen und Betriebskosten näherungsweise zu quantifizieren.

Sekundäre Leistungskennzahlen

Neben den primären KPIs werden weitere Größen ermittelt, die insbesondere für die betriebliche Auslegung und Nachhaltigkeitsbewertung von Bedeutung sind:

- **Frischwasserbedarf:** Basierend auf dem gewählten Servicekonzept und der Passagieranzahl wird der Wasserverbrauch für die Zubereitung von Heißgetränken abgeschätzt.

- **Abfallaufkommen:** Durch Verpackungen, Einwegartikel und überschüssige Speisereste ergibt sich ein zu erwartendes Müllvolumen, das für jede Konfiguration berechnet wird.

- **Be- und Entladezeiten:** Die Dauer der Be- und Entladung von Trolleys über die jeweiligen Türen kann auf Basis bekannter Zeitprofile und der Geräteanzahl näherungsweise modelliert werden.

Differenzbewertung

Zum Vergleich verschiedener Konfigurationen wird im Modell ein Referenzdatensatz erzeugt, auf den sich alle nachfolgenden Auswertungen beziehen. So lassen sich Effekte unterschiedlicher Serviceprofile, Gerätebestückungen oder Missionsprofile durch Differenzbildung quantifizieren und nachvollziehbar abbilden. Die genannten Kennzahlen werden automatisiert berechnet und innerhalb der Analysefunktion sowohl als MATLAB-interne Tabellen als auch im Excel-Format ausgegeben. Sie bilden eine zentrale Grundlage für die Beantwortung der Forschungsfragen und können unabhängig von der Entwicklungsumgebung weiterverarbeitet werden.

5 Umsetzung des parametrischen Galley-Modells im digitalen Entwicklungsprozess

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung des in Kapitel 4 entwickelten Konzepts zur parametrischen Modellierung von Galleys beschrieben. Die einzelnen Schritte der Implementierung im MATLAB-Umfeld werden nachvollziehbar und die Verbindung zum virtuellen Entwicklungsprozess des DLR hergestellt. Die Kapitelstruktur orientiert sich dabei explizit an der methodischen Beantwortung der in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen und folgt dem chronologischen Ablauf der Modellentwicklung.

5.1 Vorbereitung für die Erstellung der Modellstruktur

Die Umsetzung der parametrischen Galley-Modellierung erfordert eine sorgfältige Initialisierung aller benötigten Eingangsgrößen und Strukturelemente. Dazu zählen das Einlesen externer Datenquellen (z. B. CPACS), die Definition technischer Parameter sowie der Aufbau objektorientierter Klassenstrukturen, die als Grundlage für die automatisierte Instanziierung und Auslegung der Galley-Komponenten dienen.

5.1.1 Einlesen und Verarbeiten der CPACS-Daten

Ein zentraler Bestandteil der digitalen Modellstruktur ist die Anbindung an die CPACS-Datenstruktur, die im virtuellen Entwicklungsprozess des DLR als standardisierte Schnittstelle zur Beschreibung flugzeugspezifischer Entwurfsdaten dient. Für die Modellierung der Galley werden insbesondere die in der CPACS-Datei enthaltenen Positionsdaten benötigt, die die räumliche Lage und Struktur der Galley-Instanzen definieren. Das Einlesen der CPACS-Daten erfolgt über die bestehende DLR-Importfunktion *importCPACS*. Aus der hierdurch erzeugten Struktur *test.cpacs* werden die relevanten Informationen zum Galley-Modul extrahiert:

```
% Galley-Daten aus der CPACS-Struktur importieren

galley_temp=test.cpacs.vehicles.aircraft.model.fuselages.fuselage{1,1}
                                          .decks.deck.galleys.galley;

% Leeres Array zur Speicherung der Galley-Daten initialisieren
returnArray4 = [];

returnArray4 = [galley_temp];
```

Die Daten werden anschließend im Hauptskript *main.m* in ein separates Array *galleyData* gespeichert. Hierdurch ist eine spätere Nachvollziehbarkeit und Manipulationssicherheit gewährleistet.

In MATLAB bezeichnet ein *Array* eine strukturierte Sammlung von Elementen desselben Typs. Im Kontext dieser Arbeit wird ein Array zur sequenziellen Ablage importierter Galley-Objekte verwendet. Dies erlaubt eine saubere Trennung von Rohdaten und modellspezifischer Verarbeitung.

5.1.2 Erweiterung der Parameterstruktur

Alle für die Galley-Modellierung benötigten Geometriedaten werden in der zentralen Struktur *params* hinterlegt. Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Maße der Gerätekomponenten. Die Werte wurden auf Basis herstellerspezifischer Spezifikationen sowie ARINC-konformer Referenzen definiert. Über diese Parameter erfolgt im Modell die regelbasierte Positionierung und Volumenberechnung der Inserts.

Tabelle 5-1: Überblick der verwendeten Maße der Komponenten

Komponente	**Länge [in]**	**Breite [in]**	**Höhe [in]**	**Quelle**
Full-Galley	33.50	87.20	79.50	Vorgabe DLR
Half-Galley	33.50	66.00	79.50	Vorgabe DLR
Trolley	31.89	11.97	40.55	(Egret Aviation, 2022)
Ofen	21.97	11.22	22.13	(AeroLux Ltd, 2015)
Kaffeemaschine	14.00	6.47	12.03	(Safran Group, 2025a)
Wasserkocher	15.77	6.47	12.03	(Safran Group, 2025a)
Standard-Container - halbe Größe	16.14	11.52	10.98	(Egret Aviation, 2022)
Verriegelungselement - groß	0.59	0.98	6.50	Gemessen
Verriegelungselement - klein	0.59	0.79	1.57	Gemessen
Verriegelungselement - beidseitig	0.59	0.79	3.14	Gemessen

Der Zugriff im Skript erfolgt beispielsweise für die Breite des Trolleys über:

```
trolleyWidth = params.trolley.width
```

5.1.3 Erstellung der benötigten Klassen

Die methodische Entwicklung der objektorientierten Klassen sowie deren Struktur innerhalb von MATLAB wurde bereits in Kapitel 3.3.2 ausführlich beschrieben. An dieser Stelle erfolgt daher kein erneuter Rückgriff auf die technische Implementierung, sondern vielmehr eine inhaltliche Darstellung der spezifischen Eigenschaften, die den einzelnen Klassen im Rahmen des Modells zugewiesen wurden. Für jede in der Galley verbaute Komponente wird eine eigene Klasse definiert. Eine Übersicht aller abgebildeten Komponenten ist in Tabelle 5-2 dargestellt. Die jeweiligen Klassenobjekte enthalten spezifische Kenngrößen wie das Fassungsvermögen, die elektrische Leistungsaufnahme sowie die modellintern vorgesehene Standardanzahl pro Galley-Typ.

Die gewählten Mengen orientieren sich an realen Einbaukonfigurationen in Single-Aisle-Flugzeugen, insbesondere am Airbus A320 (Airbus S.A.S, 2024). Eine exemplarische Grundlage hierfür bilden die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Konfigurationen (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2).

Tabelle 5-2: Übersicht der erstellten Klassen und spezifischen Eigenschaften

Komponente	Klasse	Eigenschaften	Quelle
Hintere Bordküche	FullGalley	Trolleys:7 Öfen: 4 Standard-Containers: 8 Kaffeemaschinen: 1 Wasserkocher: 1	(Dreamstime)
Vordere Bordküche	HalfGalley	Trolleys:4 Öfen: 2 Standard-Containers: 2 Kaffeemaschinen: 1 Wasserkocher: 1	(Safran Group, 2025c)
Trolley	Trolley	-	-
Ofen	Oven	Leistung [W]: 3770 Kapazität [Tablett]: 32	(AeroLux Ltd, 2015)
Kaffeemaschine	CoffeeMaker	Leistung[W]: 2060 Fassungsvermögen [l]: 1.55	(Safran Group, 2025b)
Wasserkocher	Boiler	Leistung[W]: 4000 Fassungsvermögen[l]: 3.2	(Safran Group, 2025e)
Standard-Container - halbe Größe	StandardUnit	-	-
Verriegelungselement - groß	LatchT1	-	-
Verriegelungselement - klein	LatchT2	-	-
Verriegelungselement - beidseitig	LatchT3	-	-

5.2 Das parametrische Galley-Modell

Aufbauend auf den vorbereiteten Datenstrukturen, Klassenobjekten und Eingabeparametern aus Kapitel 5.1 folgt in diesem Abschnitt die systematische Umsetzung der parametrischen Galley-Modellierung. Im Mittelpunkt steht die regelbasierte Erzeugung, Instanziierung und Platzierung von Galley-Typen und Geräteeinheiten im virtuellen Kabinenraum

5.2.1 Initialisieren der Hilfs- und Auslegungsfunktion

Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, bildet die Kombination aus Hilfs- und Auslegungsfunktion den methodischen Einstiegspunkt für die automatisierte Generierung der Galley-Konfigurationen. Die in der Konzeption benannten Funktionsprinzipien werden in Form konkreter MATLAB-Funktionen umgesetzt: Die Funktion *mainGalley.m* übernimmt dabei die Rolle der Hilfsfunktion, während *createGalleysByAircraft.m* die Auslegungslogik realisiert.

Die Funktion *mainGalley* wird direkt im Hauptskript *main.m* aufgerufen und bildet die zentrale Schnittstelle zwischen Eingabeparametern, vorbereiteten Datenstrukturen und den nachgelagerten Funktionsbausteinen. Innerhalb dieser Funktion wird die Auslegungslogik durch den Aufruf von *createGalleysByAircraft* aktiviert, die auf Grundlage des Flugzeugtyps sowie der definierten Strukturparameter geeignete Galley-Typen auswählt, instanziiert und im Modell positioniert.

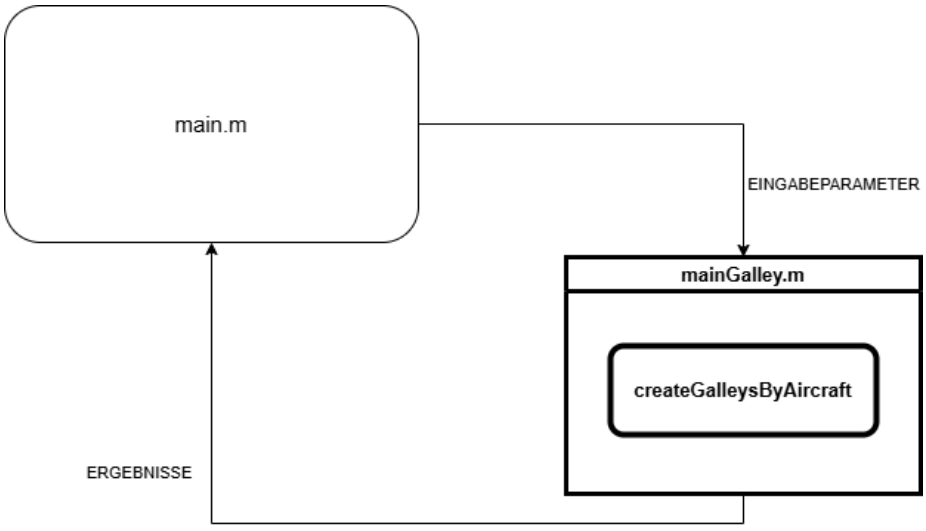

Abbildung 5-1: Einordnung der Hilfs- und Auslegungs in der Funktionstruktur im Modell

Abbildung 5-1 zeigt zur Orientierung die konzeptionelle Funktionsstruktur des Modells. Sie dient nicht der technischen Beschreibung, sondern der Einordnung und Begriffsklärung. Die dort verwendeten Begriffe „Hilfsfunktion“, „Auslegungsfunktion“ und „Analysefunktion“ entsprechen

den tatsächlichen Modulfunktionen *mainGalley* und *createGalleysByAircraft,* auf die in den folgenden Abschnitten detailliert eingegangen wird.

5.2.2 Eingabeparameter und regelbasierte Typenzuweisung

Ein zentrales Steuerkriterium im Modell ist der Flugzeugtyp, welcher in der CPACS-Datei hinterlegt ist und über die Parameterstruktur params in das Modell übergeben wird. Basierend auf diesem Typ erfolgt die Zuweisung der im jeweiligen Flugzeug zulässigen Galley-Typen. Dies geschieht über eine regelbasierte Auswahlstruktur, die sicherstellt, dass nur für das jeweilige Flugzeugmuster vorgesehene Konfigurationen verwendet werden:

```
% Flugzeugtyp aus den Eingabedaten extrahieren
aircraftType = params.aircraft.type;

% Flugzeugtyp aus den Eingabedaten extrahieren
switch aircraftType
    case 'A320'
        galleyTypes = {'HalfGalley', 'FullGalley'};
        trolleyCounts = [4, 7];
        trolleyExchangeTime = 1.2;
    case 'A321neoXLR'
        galleyTypes = {'HalfGalley', 'FullGalley'};
        trolleyCounts = [7, 7];
        trolleyExchangeTime = 1.2;
    case 'A350'
        galleyTypes = {'HalfGalley', 'CENTGalley', 'FullGalley'};
        trolleyCounts = [10, 7, 23];
        trolleyExchangeTime = 1.5;
    otherwise
        error('Unknown aircraft type: %s', aircraftType);
end
```

Die Auswahl erfolgt über eine switch-Struktur, welche für jedes unterstützte Flugzeugmuster eine vordefinierte Kombination von Galley-Typen zulässt. Diese Typen sind zuvor im Modell über eigene Klassen implementiert worden und unterscheiden sich hinsichtlich ihres Aufbaus, Volumens und ihrer Bestückungskapazität.

Mit dieser Vorgehensweise wird sichergestellt, dass das Modell skalierbar bleibt und sich flexibel auf unterschiedliche Flugzeugkonfigurationen anwenden lässt. Gleichzeitig wird durch die Fehlerbehandlung (*otherwise*) verhindert, dass nicht unterstützte oder fehlerhafte Typen unbeabsichtigt verarbeitet werden. Die so erzeugte Modellkonsistenz ist eine Voraussetzung für die nachfolgende Platzierungslogik und Analysefunktion.

5.2.3 Positionierung und Instanziierung der Galley-Typen

Nach Auswahl der zulässigen Galley-Typen erfolgt im nächsten Schritt die regelbasierte Instanziierung und Positionierung der Galleys im virtuellen Kabinenraum. Da die CPACS-Daten lediglich die räumlichen Positionen der Galleys beschreiben, jedoch keine Angabe über deren Typ (z. B. *HalfGalley* oder *FullGalley*) enthalten, wird eine Zuordnungslogik entwickelt, die auf der Auswertung der X-Koordinate basiert.

Die Positionsdaten werden zunächst aus der importierten CPACS-Struktur extrahiert und von Meter in Millimeter umgerechnet. Anschließend erfolgt die Entscheidung über den Galley-Typ anhand eines Schwellwertes der X-Koordinate. Galley-Positionen mit einer X-Koordinate größer als 32.500 mm werden dabei als Full-Galleys, alle übrigen als Half-Galleys interpretiert:

```
x = str2double(galleyData{1, i}.transformation.translation.x.Text) * 1000
y = str2double(galleyData{1, i}.transformation.translation.y.Text) * 1000;

if x > 32500
    galleyObj = FullGalley(...);  % AFT-Galley
else
    galleyObj = HalfGalley(...);  % FWD-Galley, rechts/links je nach y-Wert
```

Die jeweilige Galley-Instanz wird dann über den zugehörigen Klassenkonstruktor erstellt und mit den entsprechenden Attributen befüllt. Dazu zählen neben Länge, Breite und Höhe auch die Lagekoordinaten (*Midpoint_x, Midpoint_y, Midpoint_z*) sowie eine laufende Nummerierung und Seitenkennung (*RH/LH*). Die X-Position wird dabei zusätzlich um den halben Galley-Wert korrigiert, um den geometrischen Mittelpunkt korrekt zu setzen.

Darüber hinaus erfolgt eine weitere Differenzierung der Galley-Orientierung anhand der Y-Koordinate. Galleys mit positiver Y-Lage werden der rechten Kabinenseite (*RH*) zugewiesen, solche mit negativer Y-Lage der linken (*LH*). Die erzeugten Objekte werden anschließend in getrennten Arrays (*halfGalleys*, *fullGalleys*) abgelegt:

```
if y > 0
    side = 'RH';
else
    side = 'LH';
end
galleyObj = HalfGalley(..., side);

% Speicherung
halfGalleys = [halfGalleys, galleyObj];
```

Diese regelbasierte Positionierungs- und Instanziierungslogik ermöglicht eine konsistente und automatisierte Zuordnung der Galley-Objekte im virtuellen Modell, ohne dass zusätzliche

manuelle Eingaben erforderlich sind. Gleichzeitig wird durch die Absicherung über *exist('ClassName','class')* sichergestellt, dass nur verfügbare Klassenobjekte verarbeitet werden.

5.2.4 Regelbasierte Platzierung der Komponenten

Im Anschluss an die Instanziierung der Galley-Objekte erfolgt die regelbasierte Bestückung mit den zugehörigen Geräteeinheiten. Der Fokus liegt in diesem Schritt exemplarisch auf der *HalfGalley*, bei der die Geräte über eine strukturierte Ebenenlogik systematisch im Bauraum platziert werden.

Modularer Aufbau nach Ebenen

Die *HalfGalley* wird vertikal in drei funktionale Ebenen unterteilt:

- Level 0: untere Ebene, ausschließlich für Trolleys
- Level 1: mittlere Ebene für Öfen, Boiler, Kaffeemaschinen und Spülbecken
- Level 2: obere Ebene für Standard Units

Die Zuordnung der Geräte zu den Ebenen erfolgt über vordefinierte Cell Arrays, die die jeweilige Geräteliste speichern:

```
Level0G1 = {'Trolley'};
Level1G1 = {'Oven', 'CoffeeMaker', 'Boiler', 'Sink'};
Level2G1 = {'StandardUnit'};
```

Diese Listen werden über die Variable *levelG1* gruppiert und in einer *for*-Schleife dynamisch abgearbeitet. Damit ist das Modell in der Lage, auch zukünftige Änderungen oder Erweiterungen in der Ebenenstruktur ohne Anpassungen am Schleifenkonstrukt zu verarbeiten, ein wesentliches Merkmal eines parametrischen Modells. Die vertikale Positionierung der Geräte erfolgt anhand einer vordefinierten Liste von Z-Koordinaten (*zlevel*), die aus den Gerätehöhen sowie angenommenen Strukturdicken (Zahlenwerte) und einem Umrechnungsfaktor abgeleitet wird:

```
zLevel0 = 0;
zLevel1 = params.trolley.height * params.i2mm + 50;
zLevel2 = zLevel1 + params.oven.height * params.i2mm + 25;
```

Iteration über Ebenen, Gerätetypen und Anzahl

Für jede Galley-Instanz wird eine vollständige Schleifenstruktur durchlaufen:

1. Zunächst über alle Ebenen (Level 0–2)
2. Innerhalb jeder Ebene über alle Gerätetypen (z. B. Oven, CoffeeMaker)
3. Und abschließend – für jeden Typ – über die konkrete Anzahl der Geräte

Die Anzahl wird dabei nicht manuell definiert, sondern direkt aus den Eigenschaften der jeweiligen Galley-Instanz ausgelesen:

```
deviceCounts = struct( ...
    'Trolley', galley.NumTrolley, ...
    'Oven', galley.NumOven, ...
    'CoffeeMaker', galley.NumCoffeeMaker, ...
    'Boiler', galley.NumBoiler, ...
    'StandardUnit', galley.NumStandardUnit, ...
);
```

Diese Struktur *deviceCounts* erlaubt es, in den nachfolgenden Schleifen über den Punktoperator (z. B. *deviceCounts.Oven*) auf die korrekte Anzahl zuzugreifen, ohne hartkodierte Werte. Dadurch wird das Modell vollständig datengetrieben.

Platzierung und Bauraumbelegung

Die tatsächliche Positionierung erfolgt entlang der y-Achse (Kabinenbreite). Für jedes zu platzierende Gerät wird die benötigte Breite zunächst über eine separate Hilfsfunktion *getDeviceWidth.m* bestimmt, die zentral auf die Parameterstruktur zugreift. Abbildung 5-2 veranschaulicht die funktionale Einbettung dieser Hilfsfunktion innerhalb der Auslegungslogik. Dabei wird deutlich, wie die Funktion *getDeviceWidth* als unterstützendes Element in die übergeordnete Funktion *createGalleysByAircraft* eingebunden ist und im Zusammenspiel mit *mainGalley* die regelbasierte Bestückung der Galley koordiniert.

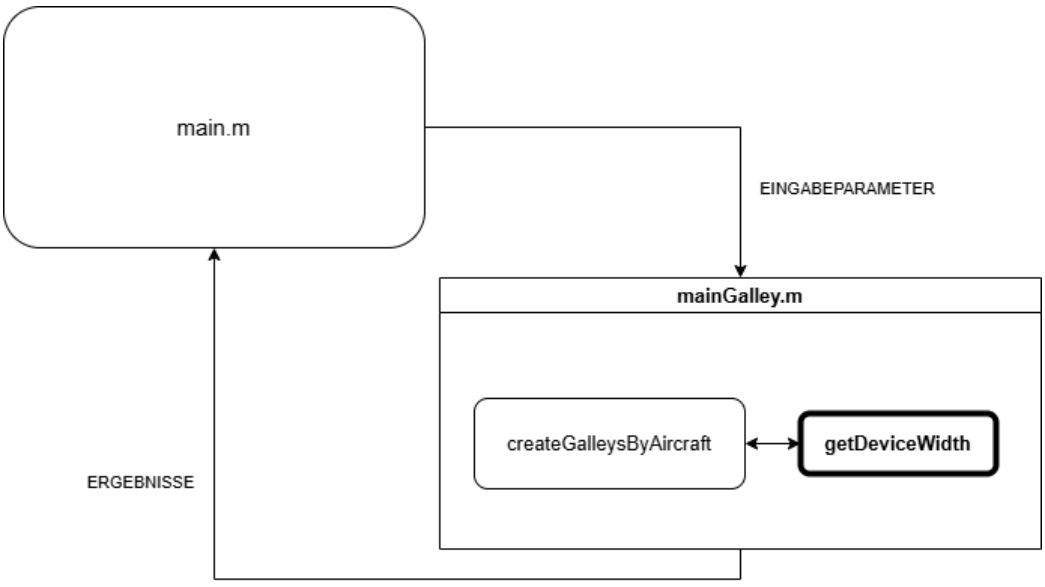

Abbildung 5-2: Einordnung der Hilfsfunktion in der Funktionsstruktur im Modell

Der Funktionsaufruf *getDeviceWidth* übergibt die zentrale Parameterstruktur sowie den zu platzierenden Gerätetyp als Argumente, wodurch eine flexible und typabhängige

Breitenzuweisung ermöglicht wird. Die Rückgabe der exakten Gerätebreite bildet die Grundlage für die fortlaufende y-Positionsberechnung und stellt sicher, dass sich die Geräte im Bauraum ohne Überlappung anordnen lassen.

```
deviceWidth = getDeviceWidth(params, deviceType);
```

Die Funktion selbst verwendet eine strukturierte switch/case-Anweisung, um den passenden Parameterwert auf Basis der zuvor definierten Gerätemaße in *params* zurückzugeben:

```
switch deviceType
    case 'Oven'
        deviceWidth = params.oven.width * params.i2mm;
    ...
```

Diese Entkopplung der Platzierungslogik von konkreten Werten stellt sicher, dass Geräteabmessungen zentral gepflegt und bei Bedarf global angepasst werden können. Die Platzierung erfolgt dann entlang einer fortlaufenden y-Position *currentY*, die nach jedem Gerät um dessen Breite erhöht wird. Zudem wird für jede Instanz eine spezifische Gerätekennung (*SPEC*) vergeben, die abhängig von der x-Position in den Kabinenbereich *FWD* oder *AFT* eingeordnet wird. Auch diese Logik ist generisch und parametergesteuert implementiert.

Mit Abschluss der regelbasierten Auswahl und Platzierung ist der technische Auslegungsprozess vollständig abgeschlossen. Die erzeugten Instanzen – darunter *halfGalleys, fullGalleys, trolleys, ovens, coffeemakers, boilers, standardunits, latchesT1, latchesT2, latchesT3* sowie der Parameter *aircraftType* – werden im Anschluss an die übergeordnete Hilfsfunktion *mainGalley.m* übergeben. Sie bilden die strukturierte Basis für die nachgelagerten Analysefunktionen und werden dort weiterverarbeitet.

Damit ist das Modell in der Lage, aus einer zunächst leeren Hülle eine regelbasiert konfigurierte Galley in der Kabine zu platzieren – vollständig auf der Grundlage von Positionsdaten aus dem Vorentwurf und den strukturiert gepflegten Gerätemaßen. Die resultierende Konfiguration ist typgerecht, konsistent und frei von Fehlbelegungen, da sie ausschließlich auf zulässigen Kombinationen basiert.

Die technische Umsetzung erfolgt dabei vollständig parametrisch. Gerätezahlen und -typen werden aus objektbasierten Klasseneigenschaften ausgelesen, zentral verwaltete Parameter definieren die Geometrie und die regelbasierte Platzierung innerhalb definierter Ebenen erfolgt über die strukturierte Schleifenlogik. Der Zugriff auf Inhalte wie Gerätemaße wird über abstrahierte Funktionen, was eine flexible Wiederverwendbarkeit sicherstellt.

Diese Methode stellt somit dar, wie ein parametrisches Galley-Modell grundsätzlich im digitalen Entwicklungsprozess des DLR aufgebaut und implementiert werden kann. Die erste Forschungsfrage ist an dieser Stelle beantwortet. Die grafische Darstellung des auf diesem Weg erzeugten Modells erfolgt in Kapitel 7.2.

5.3 Integration der Servicekonzepte

Im Anschluss an die regelbasierte Erzeugung und Platzierung der Galley-Typen wird das Modell um die Fähigkeit erweitert, unterschiedliche Servicekonzepte abzubilden. Ziel ist es, die Ausstattung der Galleys nicht nur auf Basis des Flugzeugtyps, sondern auch in Abhängigkeit vom geplanten Bordservice flexibel zu konfigurieren. Damit erweitert sich der Funktionsumfang des Modells von einer rein geometrischen zu einer funktional inhaltsbasierten Auslegung.

```
% Flugzeugtyp aus den Eingabedaten extrahieren
aircraftType = params.aircraft.type;
```

5.3.1 Eingabeparameter und Nutzersteuerung

Die Steuerung der Galley-Bestückung in Abhängigkeit vom gewählten Versorgungskonzept erfolgt über den Eingabeparameter *serviceChoice*. Dieser Parameter stellt die konkrete Implementierung des in Tabelle 4-2 eingeführten Eingabeparameters Servicekonzept dar und wird vom Nutzer zu Beginn des Programmablaufs definiert. Zur Auswahl stehen zwei vordefinierte Konzepte:

- *Fullservice* – umfasst die komplette Versorgung mit Speisen und Getränken
- *Getränkeservice* – beschränkt sich auf die Versorgung mit Getränken

Die Abfrage erfolgt in der Hilfsfunktion *mainGalley.m*, die als erste Schnittstelle des Modells agiert. Damit wird gewährleistet, dass die gewählte Versorgungsstrategie bereits bei der Initialisierung der Galley-Struktur berücksichtigt wird:

```
% Benutzer wählt das Servicekonzept
disp('Bitte wählen Sie das Servicekonzept:');
disp('1: Fullservice');
disp('2: Getraenkeservice');

serviceChoice = input('Geben Sie die Nummer des Servicekonzepts ein: ');
```

Die Eingabe wird unmittelbar an die Auslegungsfunktion *createGalleysByAircraft* weitergereicht, wo sie über eine switch-Anweisung ausgewertet und zur Steuerung der weiteren Modelllogik verwendet wird. Zusätzlich werden dem Nutzer unmittelbar Rückmeldungen über die getroffene

Auswahl gegeben. Dies erfolgt mithilfe der MATLAB-eigenen Funktion *disp*, die Textnachrichten im Command Window, dem zentralen Ein- und Ausgabebereich der MATLAB-Umgebung, ausgibt. Auf diese Weise erhält der Nutzer unmittelbar eine Rückmeldung zum gewählten Modus oder wird bei fehlerhaften Eingaben gezielt zur erneuten Auswahl aufgefordert:

```
switch serviceChoice
    case 1 % Fullservice
        serviceChoice = {'Fullservice'};
        disp('Fullservice wurde ausgewählt.');

    case 2 % Getränkeservice
        serviceChoice = {'Getraenkeservice'};
        disp('Getraenkeservice wurde ausgewählt.');

    otherwise
        disp('Ungültige Auswahl. Bitte wählen Sie entweder 1 oder 2.');
end
```

Diese frühzeitige Verknüpfung des Nutzerinputs mit der zentralen Auslegungsfunktion stellt sicher, dass das gewählte Servicekonzept alle nachgelagerten Prozesse beeinflusst – insbesondere die Geräteanzahl und die Art der Platzierung, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.3.2 Konzeptabhängige Anpassung der Geräte

In Abhängigkeit vom gewählten Servicekonzept muss sich auch die Geräteausstattung der Galleys anpassen. Insbesondere beim reinen Getränkeservice entfällt der Bedarf an Öfen, da keine warmen Speisen an Bord zubereitet werden. Dementsprechend ist es nicht nur aus funktionaler Sicht, sondern auch im Sinne einer reduzierten Modellkomplexität und optimierten Rechenleistung sinnvoll, diese Geräte gar nicht erst zu modellieren.

Die Umsetzung erfolgt durch gezielte Modifikation der Geräteanzahl innerhalb der jeweiligen Galley-Klassen. Konkret betrifft dies die Eigenschaft *NumOven* in den Klassen *HalfGalley* und *FullGalley*. In beiden Klassen werden jeweils zwei Methoden nach dem Prinzip der Kapselung implementiert. Hierdurch wird ein kontrollierter Zugriff auf die Eigenschaft *NumOven* ermöglicht:

```
function obj = setAnzahlOven(obj, value)
    obj.NumOven = value;
end

function value = getAnzahlOven(obj)
    value = obj.NumOven;
end
```

Die Methode *setAnzahlOven* erlaubt es, den Wert der Eigenschaft gezielt zu setzen – in diesem Fall auf null – während *getAnzahlOven* den aktuellen Wert für Auswertungs- oder Kontrollzwecke zurückliefert. Dieses Vorgehen ist insbesondere im Kontext einer objektorientierten Parametrik relevant, da es die Trennung von Daten und Zugriff sicherstellt und die spätere Erweiterbarkeit der Klassenstruktur fördert. Die zentrale Steuerung erfolgt innerhalb der *switch*-Anweisung, mit der das gewählte Servicekonzept interpretiert wird. Für den Fall des Getränkeservices (*case 2*) wird für alle erzeugten Instanzen von *HalfGalley* und *FullGalley* die Anzahl der Öfen auf null gesetzt:

```
case 2 % Getränkeservice
        serviceChoice = {'Getraenkeservice'};
        disp('Getraenkeservice wurde ausgewählt.');

       % Öfen deaktivieren
       for i = 1:length(halfGalleys)
           halfGalleys(i) = setAnzahlOven(halfGalleys(i), 0);
       end
       for i = 1:length(fullGalleys)
           fullGalleys(i) = setAnzahlOven(fullGalleys(i), 0);
      end
…
```

Die Arrays *halfGalleys* und *fullGalleys* enthalten jeweils die erzeugten Instanzen der entsprechenden Galley-Typen. Die Funktion *length()* ermittelt dabei die Anzahl an Einträgen. So können und ermöglicht es so, sämtliche betroffenen Objekte gezielt angesprochen und verändert werden. Dies stellt sicher, dass in der nachgelagerten Platzierungslogik zwar weiterhin die Schleifenstruktur vollständig durchlaufen wird, jedoch keine Ofenobjekte erzeugt werden, da deren Anzahl explizit auf null gesetzt wurde.

Durch diese Implementierung wird die Gerätekonfiguration konzeptabhängig angepasst, ohne dass strukturelle Änderungen an der Platzierungslogik notwendig sind. Die Funktionalität bleibt erhalten, das Modellverhalten wird jedoch zielgerichtet verändert. Dies zeigt exemplarisch, wie sich operative Anforderungen in ein objektbasiertes, parametrisches System überführen lassen.

Obwohl damit bereits die zweite Forschungsfrage, wie Servicekonzepte in das parametrische Modell eingebunden und abgebildet werden können, grundlegend beantwortet ist, hat die gewählte Versorgungsstrategie unmittelbare Auswirkungen auf die nachgelagerte Platzierungslogik, insbesondere im Bereich der hinteren Galley. Diese erforderlichen Modifikationen werden im folgenden Abschnitt behandelt.

5.3.3 Modifikation der Platzierungslogik für Full-Galley nach Serviceprofil

Die Wahl des Servicekonzepts hat nicht nur Auswirkungen auf die Gerätekonfiguration (vgl. Abschnitt 5.3.2), sondern erfordert auch eine gezielte Anpassung der Platzierungslogik, insbesondere für die Full-Galley im hinteren Bereich der Kabine. Diese Anpassung betrifft vor allem die Behandlung der Standard Units, die unter bestimmten Bedingungen effizienter platziert werden können.

Problemstellung

Wird das reduzierte Konzept *Getränkeservice* gewählt, entfallen in der Full-Galley standardmäßig vier Öfen. Diese verbleibende Lücke im Bauraum wird zwar teilweise durch zusätzliche Kaffeemaschinen und Wasserkocher kompensiert, jedoch bleibt in der mittleren Ebene (*Level 1*) dennoch freier Raum, sowohl in der Breite (y-Richtung) als auch in der Höhe (z-Richtung). Anstatt diesen Raum ungenutzt zu lassen, ist es funktional sinnvoll, die dort eigentlich für Level 2 vorgesehenen Standard Units zunächst in Level 1 zu platzieren und diese Ebene vertikal in zwei Lagen zu nutzen.

Anpassung der Ebenenreihenfolge

Die Reihenfolge der zu durchlaufenden Ebenen innerhalb der Full-Galley ist abhängig vom gewählten Servicekonzept und richtet sich nach der optimalen Ausnutzung des verfügbaren Bauraums. Beim Fullservice-Konzept erfolgt die Abarbeitung der Ebenen in folgender Reihenfolge:

```
% Standardreihenfolge für Fullservice
levelG3 = {'Level0G3', 'Level2G3', 'Level1G3'};
```

Diese Logik ist bewusst so gewählt, da in Level 2 der Full-Galley maximal vier Standard Units nebeneinander platziert werden können. In typischen Konfigurationen jedoch ein größerer Bedarf an Standard-Containern (Standard Units) besteht. Daher wird zunächst Level 2 vollständig belegt. Verbleibende Einheiten werden anschließend in Level 1 platziert, ebenfalls in zwei vertikalen Lagen, sofern dies der verbleibende Bauraum zulässt.

Für das reduzierte Getränkeservice-Konzept ändert sich die Strategie. Da keine Öfen mehr vorhanden sind, bleibt in Level 1 zusätzlicher Platz frei. Dieser soll bevorzugt genutzt werden. Deshalb wird hier die Reihenfolge wie folgt angepasst:

```
% Modifizierte Reihenfolge für Fullservice
levelG3 = {'Level0G3', 'Level1G3', 'Level2G3'};
```

In diesem Fall erfolgt die Priorisierung umgekehrt: Zunächst wird Level 1 vollständig bestückt, wobei auch hier eine vertikale Doppelplatzierung der Standard Units vorgesehen ist. Erst wenn dieser Raum nicht mehr ausreicht, werden verbleibende Standard Units in Level 2 platziert. In beiden Fällen erfolgt eine Rückmeldung an den Nutzer, sobald die Kapazität einer Ebene erschöpft ist. Dies wird in der Modellumgebung mit *disp* oder *fprintf* umgesetzt, beispielsweise:

```
disp('Platz in Level1G3 ist voll. Die restlichen StandardUnits werden in
Level2G3 platziert.');
fprintf('Platz in Level2G3 ist voll. %d StandardUnit(s) konnte(n) nicht
platziert werden.\n', remainingStandardUnits);
```

Diese regelbasierte Anpassung der Platzierungslogik zeigt, wie das Modell nicht nur statisch mit festen Layouts arbeitet, sondern dynamisch auf das gewählte Serviceprofil reagiert, um den vorhandenen Bauraum effizient auszunutzen

Logik der Geräteverteilung

Die Iteration über die Ebenen erfolgt über eine Schleife, die nacheinander Level 0 bis 2 durchläuft. Für jede Ebene wird anhand des Gerätetyps StandardUnit und des gewählten Konzepts eine abweichende Platzierungsstrategie verfolgt:

```
for l = 1:length(levelG3)
    levelName = levelG3{l};
    ...
    if strcmp(deviceType, 'StandardUnit')
        if strcmp(serviceChoice, 'Fullservice')
            % Zuerst Level 2, dann Level 1
            ...
        elseif strcmp(serviceChoice, 'Getraenkeservice')
            % Zuerst Level 1 (mit vertikaler Doppelplatzierung), dann
              Level2
            ...
        end
    end
…
```

Vertikale Doppelplatzierung im Getränkeservice

Bei gewähltem Getränkeservice wird in Level 1 die doppelte vertikale Platzierung der Standard Units aktiviert. Hierbei werden die Container in zwei Lagen übereinander gestapelt. Dies wird über einen *zOffset* innerhalb der Platzierungsschleife realisiert:

```
zOffset = mod(k-1, 2) * params.standardunit.heightHS * params.i2mm
          + mod(k-1, 2) * 20;
```

Die Platzierung jedes zweiten Containers verschiebt sich somit nach oben um die Höhe einer Standard Unit plus Abstand. Ist ein Stapel vollständig, wird die y-Position (Breite) aktualisiert, um mit einem neuen Stapel zu beginnen:

```
if mod(k, 2) == 0
    currentY = currentY + deviceWidth;
end
```

Verbleibende Restplatzierung in Level 2

Sobald Level 1 vollständig belegt ist, werden verbleibende Standard Units in Level 2 platziert. Dabei wird überprüft, wie viele Container noch verbleiben (*remainingStandardUnits*) und ob der verfügbare Raum in Level 2 ausreicht:

```
if strcmp(levelName, 'Level2G3') && remainingStandardUnits > 0
    maxDevices = floor((endPosY2 - startPosY_current) / deviceWidth);
    numDevices = min(remainingStandardUnits, maxDevices);
…
```

Ergänzende Platzierung der Verriegelungselemente Typ „beidseitg“

Da die Standard Units im Getränkeservice-Konzept in zwei Lagen übereinander positioniert werden, ist eine zusätzliche Sicherung notwendig. Zur realitätsnahen Abbildung dieser Konfiguration, werden für jede vertikale Containerpaarung entsprechende Verriegelungselemente der Klasse *LatchT3* beidseitig platziert. Dies erfolgt automatisch innerhalb einer vertikalen Platzierungsschleife.

```
if mod(k, 2) == 0
    offsets = [30, 243.888];
    for i = 1:2
        offset = offsets(i);
        newLatchT3 = LatchT3( ...
            params.latchT3.length, ...
            params.latchT3.width, ...
            params.latchT3.height, ...
            x - params.latchT3.length * 0.5 * params.i2mm, ...
            y + currentY + offset + params.latchT3.width * 0.5 * params.i2mm,
             ...
            z + zOffset + params.latchT3.height * 0.5 * params.i2mm - 50,
             ...
            number, ...
            SPEC ...
        );
        latchesT3 = [latchesT3, newLatchT3];
    end
…
```

Die Positionierung erfolgt dabei symmetrisch zur Containerbreite. Dabei werden zwei feste Offsets in y-Richtung verwendet werden, um die beidseitige Fixierung sicherzustellen.

Die in diesem Abschnitt beschriebene Modifikation der Platzierungslogik zeigt, wie durch einfache Regelanpassungen und gezielte Priorisierung von Ebenen ein effizienterer Bauraum genutzt werden kann. Gleichzeitig wird vermieden, dass potenzieller Platz durch entfallene Geräte ungenutzt bleibt. Diese Flexibilisierung auf Ebene der Platzierungslogik ist ein zentraler Bestandteil der funktionalen Parametrik und demonstriert die Fähigkeit des Modells, auf variierende Anforderungen automatisiert zu reagieren.

5.4 Leistungskennzahlen im Modell

Aufbauend auf der regelbasierten Galley-Erzeugung sowie der konzeptabhängigen Bestückung erfolgt im nächsten Schritt die Analyse der erzeugten Konfigurationen. Ziel ist es, aus den modellierten Galleys bewertbare Kennzahlen abzuleiten, die für eine technische und ökologische Einordnung der Varianten erforderlich sind.

5.4.1 Initialisieren der Analysefunktion

Nach erfolgreicher Erzeugung und Platzierung der Galleys sowie der an das Servicekonzept angepassten Bestückung erfolgt im nächsten Schritt die Bewertung der resultierenden Konfigurationen. Zu diesem Zweck wird die Analysefunktion *analyzeGalleysByAircraft* aufgerufen, welche in der Hilfsfunktion *mainGalley.m* unmittelbar nach dem Abschluss der Auslegungsfunktion *createGalleysByAircraf*t integriert ist. Damit ist gewährleistet, dass ausschließlich vollständig modellierte Galleys in die nachgelagerte Analyse einfließen.

Die Analysefunktion ist zentraler Bestandteil der in Kapitel 4 beschriebenen Funktionsstruktur und bildet das methodische Bindeglied zwischen Modellierung und Bewertung. Sie erlaubt es, aus den strukturellen Eigenschaften der Galleys belastbare Leistungskennzahlen zu extrahieren und stellt damit die funktionale Umsetzung der dritten Forschungsfrage dar. Eine schematische Einordnung der Funktion innerhalb des Modells ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

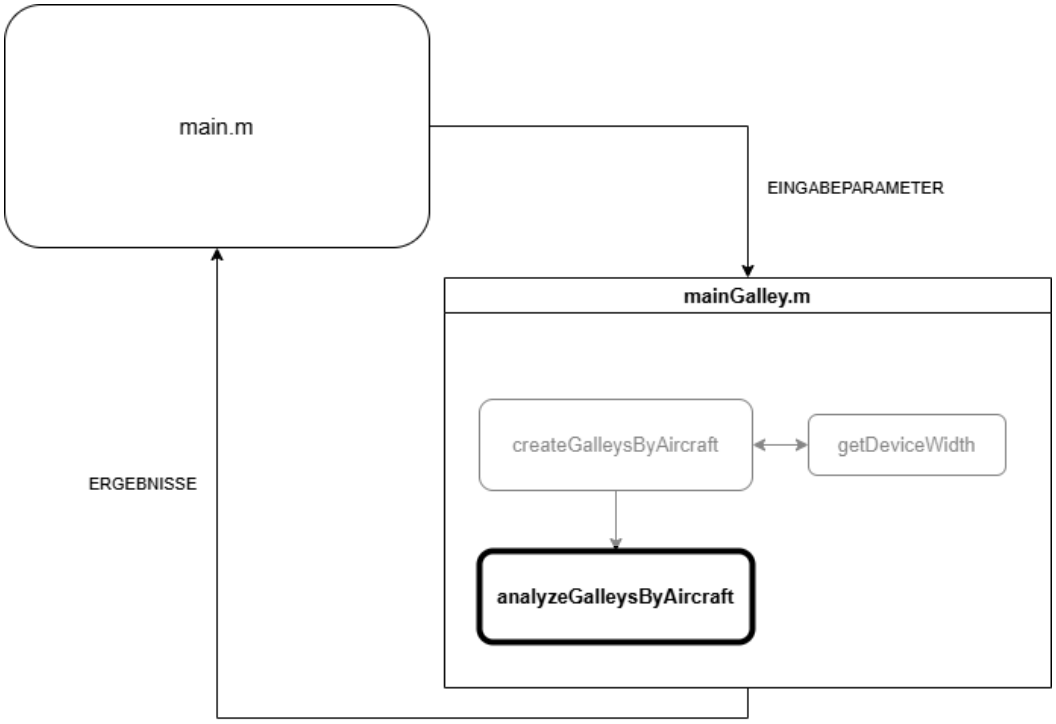

Abbildung 5-3: Einordnung der Analysefunktion in der Funktionsstruktur des Modells

Zur Vorbereitung der Analyse werden alle erzeugten Instanzen in der folgenden Struktur zusammengefasst:

```
deviceGroup = {trolleys, ovens, coffeemakers, boilers, standardunits, ...
               latchesT1, latchesT2, latchesT3, halfGalleys, fullGalleys};

groupNames = {'Trolleys', 'Ovens', 'CoffeeMakers', 'Boilers', ...
              'StandardUnits', 'latchesT1', 'latchesT2', 'latchesT3', ...
              'HalfGalleys', 'FullGalleys'};
```

Die Cell Arrays *deviceGroup* und *groupNames* dienen der systematischen Auswertung. Während *deviceGroup* alle im Modell erzeugten Objekte in Form strukturierter Arrays enthält, stellt *groupNames* die zugehörigen Bezeichnungen bereit. Entscheidend ist hierbei die positionsgleiche Zuordnung: Der Name an Stelle *n* beschreibt die Komponentengruppe im Array an Stelle *n*. Diese strukturierte Kopplung ermöglicht es, die Analysefunktionen generisch zu gestalten, ohne auf manuelle oder typabhängige Einzelabfragen zurückgreifen zu müssen.

5.4.2 Massen- und Schwerpunktberechnung

Ein zentrales Ergebnis der Analysefunktion ist die Ermittlung der Gesamtmasse sowie des räumlichen Schwerpunkts der modellierten Galley-Konfiguration. Dieses Verfahren orientiert sich methodisch an den Grundlagen der Technischen Mechanik, bei denen die Lage des Schwerpunkts über die gewichtete Mittelung der Einzelmassen berechnet wird.

Für die Berechnung werden sämtliche zuvor erzeugten Geräteinstanzen aus der *deviceGroup* durchlaufen. Jedes Objekt, das über gültige und numerisch auswertbare Eigenschaften für Masse (*Mass*) und Position (*Midpoint_x, Midpoint_y, Midpoint_z*) verfügt, wird in die Bilanz einbezogen. Dabei erfolgt zunächst die Bildung der gewichteten Summen der jeweiligen Koordinatenachsen:

```
totalMass = totalMass + mass;
totalX = totalX + mass * x;
totalY = totalY + mass * y;
totalZ = totalZ + mass * z;
```

Im Anschluss wird der räumliche Gesamtschwerpunkt des Systems als Massenmittelpunkt berechnet:

```
centroidX = totalX / totalMass;
centroidY = totalY / totalMass;
centroidZ = totalZ / totalMass;
```

Die Ausgabe erfolgt über das MATLAB-Command Window in Form eines dreidimensionalen Schwerpunktvektors (in Millimeter) sowie der Gesamtmasse in Kilogramm:

```
fprintf('Gesamtschwerpunkt: X = %.2f mm, Y = %.2f mm, Z = %.2f mm\n',
        centroidX, centroidY, centroidZ);
fprintf('Gesamtmasse: %.2f kg\n', totalMass);
```

5.4.3 Energiebedarf, Kerosinverbrauch und CO_2-Emission

Neben den strukturellen Kennwerten wie Masse und Schwerpunkt ist die energetische Bewertung ein zentrales Element zur quantitativen Beurteilung von Galley-Konfigurationen. Zu diesem Zweck wird im Modell eine zweistufige Analyse durchgeführt. Zunächst wird der elektrische Energiebedarf der Geräte bestimmt, anschließend werden daraus der zusätzliche Kerosinbedarf sowie die verursachten Emissionen berechnet.

Elektrischer Energiebedarf

Alle in der *deviceGroup* enthaltenen Instanzen werden auf das Vorhandensein einer *Power*-Eigenschaft geprüft. Die Leistungen der Geräte werden aufsummiert und am Ende in Kilowatt umgerechnet. Die Ermittlung des Gesamtleistungsbedarfs erfolgt über eine verschachtelte Schleifenstruktur, in der alle erzeugten Geräteinstanzen geprüft und aufsummiert werden:

```
for i = 1:length(deviceGroup)
    currentGroup = deviceGroup{i};
    groupPower = 0;
```

```
    for j = 1:length(currentGroup)
        device = currentGroup(j);
        if isprop(device, 'Power') && isnumeric(device.Power)
            groupPower = groupPower + device.Power;
        end
```

Die äußere Schleife iteriert über alle Komponentengruppen (z. B. Öfen, Boiler, Trolleys), die in *deviceGroup* gespeichert sind. Jede dieser Gruppen entspricht einem Gerätetyp (*Index i*). Die innere Schleife verarbeitet dann alle Instanzen innerhalb dieser Gruppe (*currentGroup*), also z. B. mehrere Öfen oder Trolleys.

Durch die Prüfung mittels *isprop(device, 'Power')* wird sichergestellt, dass ausschließlich Objekte mit einer definierten und numerisch auswertbaren Leistungsangabe berücksichtigt werden. Auf diese Weise werden alle gültigen Verbraucher automatisch erkannt und einbezogen, ohne dass ein Gerätetyp vergessen werden kann. Sollte eine Komponentengruppe keine gültige Leistungsangabe enthalten, wird eine Warnung ausgegeben. Dies erhöht die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Analyse:

```
warning('%s enthält keine gültigen power-Werte.', groupNames{i});
```

Diese Systematik erlaubt eine vollständig generische Auswertung aller elektrischen Verbraucher, unabhängig vom konkreten Gerätetyp. Gleichzeitig bietet die Verwendung der groupNames eine interpretierbare Rückverfolgbarkeit im Fehlerfall. Der Gesamtleistungsbedarf stellt die Grundlage für alle nachfolgenden ökologischen Berechnungen dar.

Umrechnung in Kerosinverbrauch

Auf Basis des zuvor ermittelten elektrischen Leistungsbedarfs wird im nächsten Schritt der Kerosinbedarf zur Stromerzeugung abgeschätzt. Dabei werden ein Generator-Wirkungsgrad von 35 % sowie ein Heizwert von 43 MJ/kg für das Kerosin Jet A-1 (Shell Aviation, 2021) angenommen. Die elektrische Energie des Flugzeugs wird über die am Triebwerk gekoppelten Generatoren erzeugt, sodass der Energiebedarf der Kabinensysteme direkt mit dem Treibstoffverbrauch verknüpft ist. Die benötigte elektrische Energie wird zunächst in thermische Energie umgerechnet und anschließend in die dafür erforderliche Kerosinmasse überführt.

Die Berechnungsgrundlage basiert auf dem Energieerhaltungssatz. Die elektrische Energie $E_{electric}$, die während der Flugzeit t_{flight} benötigt wird, errechnet sich aus dem Produkt der Gesamtleistung der Galleys $P_{electric.Galley}$ und der Zeit. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades $\eta_{Generator}$ und des Heizwertes HV ergibt sich die benötigte Kerosinmasse für die Stromerzeugung wie folgt:

$$m_{Fuel,eletric.Galley} = \frac{P_{electric.Galley} * t_{flight}}{\eta_{Generator} * HV} \quad (1)$$

Parallel dazu wird auch der zusätzliche Kerosinverbrauch durch die transportierte Galleymasse berechnet. Hierzu wird ein typischer Verbrauchswert von 0,03 kg Kraftstoff pro Kilogramm Zuladung und Flugstunde (EUROCONTROL, 2022) verwendet, um den Einfluss des zusätzlichen Gewichts auf den Flugtreibstoffverbrauch abzubilden. Die entsprechende Näherungsformel lautet:

$$m_{Fuel,mass.Galley} = m_{mass.Galley} * f_{burn} * t_{flight} \quad (2)$$

Die hierfür erforderliche Flugzeit *(flightTime*) ist ein externer Eingabeparameter, der an das in Kapitel 4 beschriebene Missionsprofil gekoppelt ist. In der praktischen Umsetzung wird dieser Parameter erst im Rahmen der erweiterten Analysefunktion eingeführt, die im Zuge der Servicekonzept-Bewertung entwickelt wird. Somit erfolgt die Kerosinberechnung in Abhängigkeit von der Flugzeit, die wiederum auf den gewählten Missionsparametern basiert und das Ergebnis realitätsnah an unterschiedliche Fluglängen anpasst. Der gesamte für den Betrieb der Galleys benötigte Kerosinbedarf setzt sich somit aus zwei Einflussgrößen zusammen: dem Gewicht der mitzuführenden Systemmasse sowie der zur Versorgung der Geräte erforderlichen elektrischen Energie. Die resultierende Gesamtkerosinmenge ergibt sich als Summe beider Teilverbräuche und berechnet sich nach Gleichung (3):

$$m_{Fuel,Total} = m_{Fuel,mass.Galley} + m_{Fuel,eletric.Galley} \quad (3)$$

Die konkrete Berechnungsschleife zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und der emissionsrelevanten Kenngrößen ist innerhalb der Funktion *analyzeGalleysByAircraft* implementiert und im digitalen Anhang dieser Arbeit vollständig dokumentiert.

CO_2-Emissionen und Treibstoffkosten

Auf Grundlage des zuvor berechneten Gesamtkerosinverbrauchs findet im Anschluss die ökologische und wirtschaftliche Bewertung der Galleykonfigurationen statt. Dabei werden sowohl der CO_2-Ausstoß als auch die damit verbundenen Treibstoffkosten bestimmt. Der CO_2-Ausstoß wird mithilfe eines standardisierten Emissionsfaktors berechnet. Laut IPCC entstehen bei der Verbrennung von 1 kg Kerosin durchschnittlich 3,15 kg CO_2 (IPCC, 2016). Daraus ergibt sich:

$$m_{CO2} = m_{fuel} * f_{CO2} \quad (4)$$

Die Treibstoffkosten berechnen sich entsprechend als Produkt des Gesamtverbrauchs mit dem aktuellen Marktpreis für Jet A-1. Der Referenzwert liegt umgerechnet bei 0,80 €/kg (IATA, 2025a):

$$cost_{fuel} = m_{fuel} * p_{Kerosine} \quad (5)$$

Diese beiden Berechnungen ermöglichen eine erste Einordnung der Galley-Konfiguration hinsichtlich CO_2-Relevanz und betrieblichen Zusatzkosten. Sie bieten damit einen entscheidenden Beitrag zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage nach geeigneten Leistungskennzahlen. Die Berechnung ist innerhalb der Funktion *analyzeGalleysByAircraft* vollständig umgesetzt und im digitalen Anhang dokumentiert.

5.4.4 Ausgabe- und Exportstruktur

Nach der Berechnung aller Leistungskennzahlen wird das Ergebnis in strukturierter Form gespeichert und exportiert. Die Resultate jeder Modelliteration sollen sowohl für die interne Analyse als auch für eine externe Weiterverarbeitung verfügbar gemacht werden und gleichzeitig eine Vergleichsbasis für zukünftige Auslegungen schaffen.

Zunächst werden alle relevanten Ergebnisgrößen gesammelt, darunter die Anzahl erzeugter Komponenten (z. B. Galleys, Trolleys, Öfen), die berechneten Schwerpunktkoordinaten sowie der elektrische Leistungsbedarf, die Masse, der Kraftstoffverbrauch, die Kraftstoffkosten und der CO_2-Ausstoß. Alle Werte stammen direkt aus den vorhergehenden Analysefunktionen. Zusätzlich werden Metadaten wie der gewählte Flugzeugtyp, das Servicekonzept, das Missionsprofil sowie der Zeitstempel des Durchlaufs festgehalten.

Referenzbildung und Differenzanalyse

Ein wesentlicher Aspekt dieses Modells ist die automatische Referenzbildung. Beim ersten Durchlauf der Simulation werden die Ergebnisse in einer separaten .mat-Datei (*firstRunResults.mat*) gespeichert. Bei allen weiteren Ausführungen prüft das System, ob diese Referenz bereits existiert. Ist dies der Fall, werden die aktuellen Ergebnisse mit den zuvor gespeicherten Werten verglichen und die Differenzen zu Masse, Leistung, Kraftstoffverbrauch, Kosten und Emissionen ausgewiesen:

```
massDiff       = totalMass  - firstRunResults.TotalMass;
powerDiff      = totalPower - firstRunResults.TotalPower;
fuelMassDiff   = massFuel   - firstRunResults.massFuel;
fuelCostDiff   = costFuel   - firstRunResults.costFuel;
co2Diff        = massCO2    - firstRunResults.massCO2;
```

Diese Differenzen erlauben eine automatisierte Bewertung neuer Konzepte gegenüber einem Referenzstandard – ohne zusätzlichen manuellen Aufwand. Fehlt die Referenzdatei, wird der aktuelle Durchlauf automatisch als erster Referenzlauf gespeichert.

Tabellenbasierte Ergebniserfassung

Alle Daten werden abschließend in einem standardisierten Tabellenformat (*resultEntry*) gesammelt. Die Struktur umfasst sowohl technische Kennzahlen als auch alle Differenzwerte. Jede Zeile dieser Tabelle repräsentiert einen vollständigen Simulationsdurchlauf. Zur Speicherung werden zwei parallele Exportpfade verwendet:

- *GalleyServiceAnalysis.xlsx* – für die externe Auswertung mit Excel
- *GalleyServiceAnalysis.mat* – für die interne Weiterverarbeitung innerhalb von MATLAB

Wenn eine dieser Dateien bereits existiert, wird der neue Eintrag automatisch an die bestehende Ergebnistabelle *allResults* angehängt. Die Datenstruktur bleibt somit konsistent und erlaubt eine chronologische Nachverfolgbarkeit aller Konfigurationen und deren Auswirkung auf die Leistungskennzahlen.

Die strukturierte Erfassung und versionierte Speicherung der Konfigurationsergebnisse bildet einen wesentlichen Bestandteil der modellbasierten Konzeptbewertung. In Verbindung mit den zuvor ermittelten Leistungskennzahlen, die sich aus praxisnahen technischen Angaben, wie der elektrischen Leistungsaufnahme einzelner Verbraucher (z. B. Öfen, Wasserboiler), sowie aus praxisbezogenen Systemkennwerten (z. B. Kraftstoffverbrauch pro Kilogramm Zuladung) ableiten, ermöglicht dieses Vorgehen eine zielgerichtete und automatisierte Auswertung sämtlicher Galley-Konfigurationen.

Die Differenzierung zwischen Referenz- und Vergleichskonfigurationen sowie die vollständige tabellarische Erfassung aller Ergebnisgrößen – einschließlich des parallelen Exports in standardisierte Dateiformate – schafft eine belastbare Grundlage für technische, ökologische und ökonomische Bewertungen. Zu beachten ist, dass innerhalb der Analysefunktion keine Daten an die vorgelagerte Hilfsfunktion *mainGalley.m* zurückgegeben werden. Die in diesem Schritt ermittelten Kennzahlen und Differenzwerte dienen ausschließlich der Ergebnisbewertung und Auswertung und fließen somit nicht in den Konfigurationsprozess zurück. Die Analyse ist damit rein lesend und bewertend ausgestaltet und ergänzt die systematische Auslegung durch eine objektivierte Ergebnisinterpretation. Damit leistet dieser Abschnitt einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage: Anhand welcher Leistungskennzahlen können die erstellten Galley-Konfigurationen bewertet und verglichen werden?

Das gewählte Vorgehen erfüllt die methodischen Anforderungen an eine reproduzierbare, datenbasierte und variantensichere Analyse, wie sie im Kontext des virtuellen Systementwurfs gefordert ist. Die klare Struktur der Ergebnisaufbereitung unterstützt dabei sowohl die Nachvollziehbarkeit einzelner Simulationsergebnisse als auch deren vergleichende Auswertung im Rahmen von Optimierungsschleifen oder Variantenstudien.

5.5 Erweiterte Analyse der Servicekonzepte

Über die rein technische Auslegung der Galley hinaus werden im folgenden Abschnitt ergänzende Fragestellungen betrachtet, die im Kontext der Servicekonzepte eine wichtige Rolle für den operativen Einsatz spielen. Aufbauend auf den in Kapitel 4.1 beschriebenen Erweiterungen fließen nun zusätzliche Eingabeparameter wie Passagierzahlen und Flugdauer in die Analyse ein, um reale Ressourcenschwankungen und Auslastungsgrenzen abzubilden. Ziel ist es, die Belastung und Funktionsfähigkeit der Galley auch unter variierenden Missionsbedingungen systematisch zu untersuchen und so die Bewertungsperspektive, mit betriebsrelevanten Aspekten zu erweitern.

5.5.1 Initialisieren der Berechnungsfunktion

Für die erweiterte Betrachtung der Servicekonzepte wird die Berechnungsfunktion *analyzeServiceProcessByGalley.m* in das Modell integriert. Diese Funktion erfasst systematisch operative Parameter wie Ressourcenverbrauch und Galley-Auslastung im Kontext von Passagierzahl und Flugstrecke. Obwohl diese Analyse chronologisch nach der Modellierung und Platzierung der Galleys erfolgt, liefert sie zentrale Erkenntnisse für die spätere Bewertung der Konfiguration.

Aus diesem Grund wird die Funktion im Ablauf vor der Analysefunktion *analyzeGalleysByAircraft.m* aufgerufen. Ihre Ergebnisse, etwa Mengen an benötigtem Frischwasser oder erzeugtem Abfall, werden dort als zusätzliche Eingangsgrößen weiterverwendet. Abbildung 5-4 zeigt die aktualisierte Funktionsstruktur und veranschaulicht die Einordnung der neuen Funktion im Gesamtmodell.

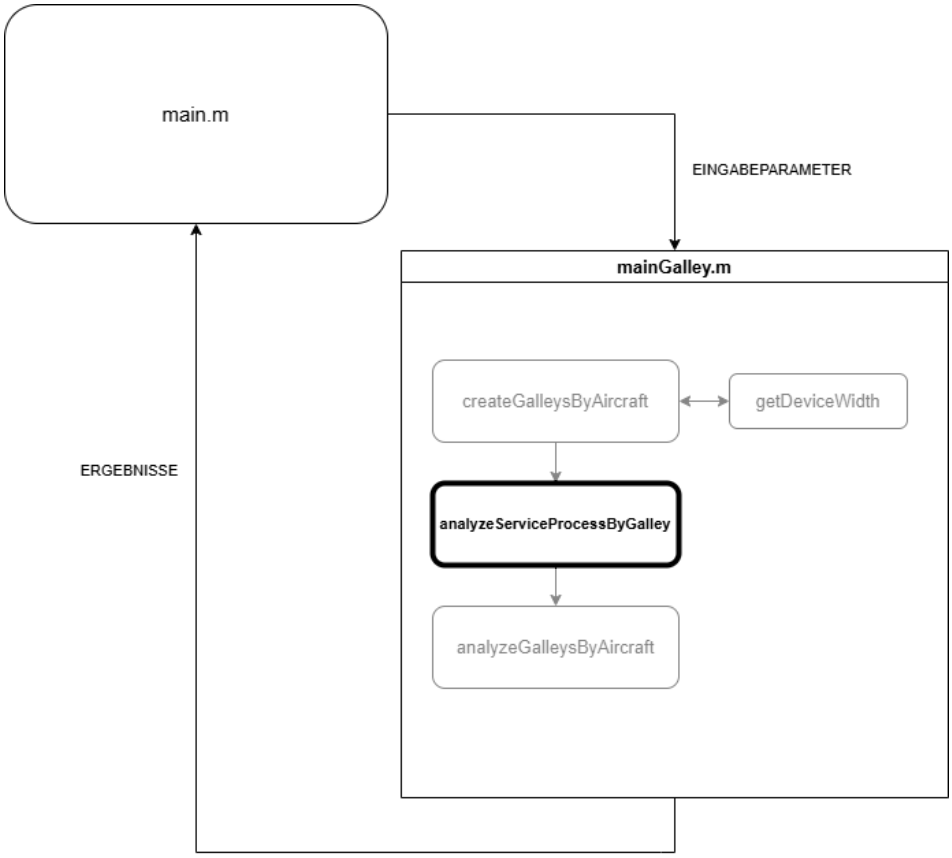

Abbildung 5-4: Einordnung der Berechnungsfunktion in der Funktionsstruktur des Modells

5.5.2 Eingabeparameter und Nutzersteuerung

Für die erweiterte Analyse der Servicekonzepte werden zusätzliche Eingabeparameter berücksichtigt, die über die rein technische Galleyauslegung hinausgehen. Hierzu zählen insbesondere die Passagierzahlen sowie das gewählte Missionsprofil, das die Flugdauer beschreibt. Die im Modell berücksichtigten Passagierzahlen ergeben sich aus den in der Parameterstruktur (*params*) hinterlegten Sitzplatzkapazitäten pro Klasse, die mit typischen, klassenspezifischen Auslastungsfaktoren multipliziert werden.

```
ecoLoadFactor = 0.7;
bizLoadFactor = 0.5;

numPassengersEco = params.cabin.nPaxEc * ecoLoadFactor;
numPassengersBiz = params.cabin.nPaxBc * bizLoadFactor;
```

Durch diese Berücksichtigung der Kabinenbelegung wird ein anwendungsorientiertes Abbild der tatsächlichen Passagierverteilung geschaffen, das als Grundlage für die ressourcenbezogene Berechnung dient. Ein weiterer zentraler Eingabeparameter ist das Missionsprofil, das zu Beginn

des Programmdurchlaufs in *mainGalley.m* vom Nutzer ausgewählt wird. Die Auswahl erfolgt analog zum Konzeptauswahlprozess über eine einfache Konsolenabfrage:

```
disp('Bitte wählen Sie das Missionsprofil:');
disp('1: Short Range');    % 3h Flugzeit
disp('2: Mid Range');      % 6h Flugzeit
disp('3: Long Range');     % 12h Flugzeit
missionChoice = input('Geben Sie die Nummer des Missionsprofils ein:');
```

Die zugehörige Regelstruktur innerhalb der Analysefunktion leitet daraus konkrete Rechenwerte für die Flugzeit und klassenspezifische Abfallmengen ab:

```
switch missionChoice
    case 1
        missionChoice = 'Short Range';
        flightTime = 3;
        wastePerPaxBiz = 0.2;
    case 2
        missionChoice = 'Mid Range';
        flightTime = 6;
        wastePerPaxBiz = 0.4;
    case 3
        missionChoice = 'Long Range';
        flightTime = 12;
        wastePerPaxBiz = 0.6;
end
```

Die in diesem Zusammenhang getroffenen Annahmen zum Abfallaufkommen pro Passagier stützen sich auf mehrere wissenschaftlichen Untersuchungen. Tofalli (Tofalli, et al., 2018) zeigen, dass auf Langstreckenflügen mit kostenlosem Bordservice zwischen 0,6 und 0,9 kg Abfall pro Passagier entsteht, während Kurzstreckenflüge mit kostenpflichtigem Catering lediglich ca. 0,02 kg pro Passagier erzeugen. Eine weitere Studie von Özbay (Özbay, et al., 2022) analysiert das Müllaufkommen am Flughafen Istanbul und ermittelt durchschnittliche Werte zwischen 0,39 und 0,52 kg pro Passagier, abhängig von Flugdistanz und Art des Caterings. Die im Modell verwendeten Werte stellen somit nachvollziehbare Näherungen dar, die sich aus dem Zusammenspiel wissenschaftlicher Quellen und modellpraktischer Umsetzbarkeit ergeben. Diese Struktur gewährleistet, dass alle nachgelagerten Verbrauchs- und Belastungsberechnungen auf einer missionsspezifischen Grundlage erfolgen. Der Einfluss der Flugdauer auf Frischwasserbedarf, Abfallaufkommen und Ressourceneinsatz wird damit systematisch und parametergesteuert erfasst.

5.5.3 Verbrauchsberechnung für Frischwasser, Speisen- und Getränke

Auf Grundlage der in Kapitel 5.5.2 definierten Eingabeparameter erfolgt in diesem Schritt die mengenmäßige Ableitung der benötigten Ressourcen für Getränke, Mahlzeiten und Frischwasser. Die Berechnung unterscheidet dabei zwischen den beiden Serviceprofilen „*Fullservice*“ und „*Getränkeservice*“ sowie zwischen den drei Missionsprofilen „*Short*“, „*Mid*“ und „*Long Range*“. Je nach Kombination dieser Parameter werden pro Passagier unterschiedliche Anzahlen an Getränken und Mahlzeiten zugeordnet, getrennt nach Economy- und Business-Class. Die zugrunde liegende Logik ist dabei regelbasiert und erfolgt innerhalb eines verschachtelten Switch-Blocks.

Berechnungslogik und Beispielwerte

Für einen Mittelstreckenflug wird im Fullservice für Economy-Passagiere von einem Verzehr von zwei Getränken und einer Mahlzeit ausgegangen, während Business-Passagiere mit drei Getränken und zwei Mahlzeiten versorgt werden. Beim Getränkeservice entfällt das Essensangebot vollständig, die Getränkezuteilung wird jedoch erhöht. Zusätzlich wird je nach Serviceprofil ein typischer Anteil heißer Getränke angenommen – 30 % bei *Fullservice* und 50 % bei *Getränkeservice*.

```
switch serviceType
    case 'Fullservice'
        hotDrinkShareEco = 0.3;
        hotDrinkShareBiz = 0.3;
    case 'Getraenkeservice'
        hotDrinkShareEco = 0.5;
        hotDrinkShareBiz = 0.5;
end
```

Letztere Annahme berücksichtigt, dass bei Wegfall fester Mahlzeiten ein kompensatorischer Konsum durch Heißgetränke auftreten kann. Diese Heißgetränke bilden die Grundlage für die spätere Frischwasserbedarfsberechnung. Die konkrete Berechnung erfolgt separat für Economy- und Business-Class und umfasst folgende Teilbereiche:

- **Getränke:** Die Gesamtzahl der Getränke pro Klasse ergibt sich durch Multiplikation der durchschnittlichen Getränkezahl pro Passagier mit der Anzahl der Passagiere je Klasse (berücksichtigt wird hierbei bereits die reale Auslastung der Kabine). Daraus wird unter Berücksichtigung des Anteils heißer Getränke der Frischwasserbedarf bestimmt Die Getränkemenge wird mit einem durchschnittlichen Volumen von 250 ml pro Einheit berechnet, basierend auf der Empfehlung der Aerospace Medical Association (AsMA),

während eines Fluges etwa 0,25 Liter Wasser pro Stunde zu trinken (FINIVIA, 2019). Für die Umrechnung in Masse wird eine Dichte von 1 kg/L angenommen.

- **Mahlzeiten:** Die Anzahl der ausgegebenen Mahlzeiten pro Klasse folgt der oben genannten Zuteilung. Für die Masseberechnung wird ein Durchschnittsgewicht von 0,4 kg pro Economy-Mahlzeit und 0,75 kg pro Mahlzeit (3 Gänge à 0,25 kg) in der Business-Class angenommen.

Berechnung Frischwasserbedarf

Der gesamte Frischwasserbedarf an Bord (Variablenname: *totalFreshWaterNeeded*) setzt sich aus drei Teilkomponenten zusammen und wird differenziert für jede Flugmission und jedes gewählte Servicekonzept berechnet. Die Berechnungsgrundlage ist vollständig parametriert und erfolgt automatisiert innerhalb der Analysefunktion.

1. Frischwasser für Heißgetränke

Ein wesentlicher Bestandteil des Frischwasserbedarfs entfällt auf die Zubereitung von Heißgetränken wie Kaffee oder Tee. Diese werden unmittelbar an Bord unter Verwendung von Frischwasser zubereitet. Grundlage für die Berechnung ist die Annahme, dass ein Getränk ein Volumen von durchschnittlich 250 ml (0,25 l) besitzt. Die Anzahl heißer Getränke ergibt sich aus dem gewählten Serviceprofil und der resultierenden Heißgetränkequote je Passagier und Klasse (vgl. vorheriger Abschnitt). Der resultierende Wasserbedarf berechnet sich wie folgt:

```
volumePerDrink = 0.25;  % Liter pro Getränk
totalHotDrinkVolume = totalHotDrinks * volumePerDrink;  % in Litern
```

2. Frischwasser für Galley-Reinigung

Ein zusätzlicher Anteil des Frischwasserbedarfs wird für die Reinigung der Galley während des Fluges einkalkuliert. Dabei handelt es sich nicht um eine regulatorische Hygieneanforderung, sondern um eine konservative Modellannahme, die auf typischen betrieblichen Erfahrungen basiert. Insbesondere bei längeren Flügen kann es durch Turbulenzen oder Unachtsamkeit zu verschütteten Flüssigkeiten kommen, die von der Crew unmittelbar beseitigt werden müssen. Um für solche Zwischenfälle realistisch vorzusorgen, wird ein Bedarf von 2 Litern pro Galley und Flugstunde angenommen, unabhängig von der Galley-Größe oder Ausstattung.

```
waterPerGalleyPerHour = 2;  % Liter pro Galley und Stunde
totalWaterGalleyCleaning = waterPerGalleyPerHour * numGalleys * flightTime;
```

Diese konservative Annahme soll sicherstellen, dass im Modell auch unvorhergesehene Reinigungsbedarfe während des Fluges praxisnah berücksichtigt werden. Das auf diese Weise

reservierte Wasser steht nicht zwingend zur Verfügung, sondern dient der konservativen Planung.

3. Frischwasser für die Crew

Auch die Bordcrew benötigt Trinkwasser während des Fluges. Für diese Berechnung wird die Besatzungsgröße gemäß den Vorgaben der CS-25.785 ermittelt: ein Crewmitglied pro 50 Passagiere (aufgerundet). Pro Crewmitglied und Flugstunde wird ein zusätzlicher Bedarf von 1 Liter berücksichtigt.

```
crewMembers = ceil(totalPassengers / 50);  % 1 Crew pro 50 Pax
waterPerCrewPerHour = 1;  % Liter pro Crewmitglied und Stunde
totalWaterCrew = waterPerCrewPerHour * crewMembers * flightTime;
```

4. Gesamter Frischwasserbedarf

Zur Ermittlung des Gesamtwertes für den Frischwasserbedarf werden alle drei Teilkomponenten addiert. Dieser Wert wird als zentrale Kenngröße in die Analyse der Galley-Auslegung und Emissionen übernommen:

```
totalFreshWaterNeeded = totalHotDrinkVolume + totalWaterGalleyCleaning + totalWaterCrew
```

Diese systematische Herleitung erlaubt eine nutzungsnahe Modellierung des Frischwasserverbrauchs auf Basis tatsächlicher Serviceanforderungen und betrieblich notwendiger Funktionen.

Berechnung Abfallaufkommen

Der Gesamtabfall setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: dem allgemeinen Passagiermüll pro Flug (basierend auf missionsspezifischen Abfallkennwerten) sowie zusätzlichem Müll durch Essensverpackungen. Diese beiden Komponenten werden getrennt erfasst und anschließend summiert. Hieraus ergibt sich eine möglichst praxisbezogene Einschätzung der Müllmenge pro Flug.

1. Grundabfall pro Passagier

Der allgemeine Müll, der unabhängig von der Anzahl ausgegebener Mahlzeiten entsteht, wird missionsspezifisch berücksichtigt. Grundlage hierfür ist eine Annahme zur durchschnittlichen Abfallmenge pro Passagier in der Business-Class, gestaffelt nach Fluglänge. Diese Werte orientieren sich an verschiedenen Studien zum Bordabfallaufkommen und stellen eine konservative Näherung praxisüblicher Erfahrungswerte dar (z. B. Flughafen Istanbul, (Tofalli, et al., 2018), (Özbay, et al., 2022)). Der Wert für Economy-Passagiere ergibt sich proportional. Hier

wird angenommen, dass ein Economy-Passagier etwa 70 % des Mülls eines Business-Passagiers verursacht:

```
wastePerPaxEco = wastePerPaxBiz * 0.7;
```

2. Verpackungsabfall durch Mahlzeiten

Zusätzlich zum Grundabfall wird für jede ausgegebene Mahlzeit ein spezifischer Verpackungsmüll berücksichtigt. In der Economy-Class wird mit 0,1 kg pro Mahlzeit, in der Business-Class mit 0,2 kg pro Mahlzeit gerechnet. Letzteres berücksichtigt z. B. Mehr-Komponenten-Tabletts, größere Verpackungen und gegebenenfalls hochwertigere Materialien.

```
wastePerMealEco = 0.1; % kg Abfall pro Eco-Mahlzeit
wastePerMealBiz = 0.2; % kg Abfall pro Biz-Mahlzeit
```

Die jeweiligen Abfallmengen pro Klasse ergeben sich wie folgt:

```
totalWasteEco = wastePerPaxEco * numPassengersEco + wastePerMealEco * totalMealsEco;
totalWasteBiz = wastePerPaxBiz * numPassengersBiz + wastePerMealBiz * totalMealsBiz;
```

3. Gesamtmenge

Die Summe aller Komponenten ergibt den gesamten Abfall an Bord:

```
totalWaste = totalWasteEco + totalWasteBiz;
```

Diese detaillierte Abfallberechnung erlaubt eine differenzierte Betrachtung des an Bord entstehenden Müllaufkommens und trägt damit zu einer realitätsnahen ökologischen Bewertung der Galley-Konfiguration bei. Berücksichtigt werden sowohl streckenabhängige Einflussgrößen, etwa die Zunahme des Abfallvolumens mit zunehmender Fluglänge, als auch die Ausprägung des gewählten Serviceprofils, insbesondere der Einsatz von Mahlzeiten. Die zugrundeliegenden Annahmen basieren auf empirischen Studien und praxisnahen Erfahrungswerten aus dem Airline-Betrieb. Durch die Kombination aus personenbezogenem Abfall und verpackungsbedingtem Zusatzmüll entsteht ein belastbares Modell des Gesamtabfallvolumens pro Flug. Die verwendeten Parameter sind vollständig anpassbar, um individuelle Airline-Strategien oder regulatorische Vorgaben flexibel abbilden zu können.

5.5.4 Prüfung der Galley-Auslastung

Ein zentraler Bestandteil der erweiterten Analyse ist die Bewertung der Auslastung der Galley-Komponenten. Hier gilt es, zu prüfen, ob die erzeugte Galley-Konfiguration unter

Berücksichtigung des gewählten Serviceprofils ausreichend Kapazität für die Lagerung und Bereitstellung von Speisen und Getränken bietet.

Mahlzeiten: Ofen- und Trolleykapazitäten

Für die Mahlzeiten wird angenommen, dass ein Ofen bis zu 32 Tabletts fassen kann, wie es aus technischen Daten des Modells *Concert Steam and Convection Oven* (Safran Group, 2025a) hervorgeht. Ist die Gesamtzahl an zu servierenden Mahlzeiten größer als die kombinierte Ofenkapazität, müssen die restlichen Tabletts in Trolleys gelagert werden. Ein Trolley kann dabei 35 Tabletts aufnehmen (Egret Aviation, 2022). Der folgende Codeausschnitt illustriert die Berechnung:

```
trayPerTrolley = 35;  % Tabletts pro Trolley
mealCapacityPerOven = 32;  % Meals pro Ofen
numOven = length(ovens);
totalMealCapacityOven = numOven * mealCapacityPerOven;
totalRestMeal = totalMeals - totalMealCapacityOven;
```

Sollten Restmengen auftreten, wird berechnet, wie viele Trolleys zusätzlich erforderlich sind. Die prozentuale Trolley-Auslastung für Mahlzeiten wird entsprechend dokumentiert.

Getränke: Begrenzung durch Volumen und Gewicht

Neben Speisen sind insbesondere Kaltgetränke ein wesentlicher Treiber der Galley-Auslastung. Diese werden in standardisierten Verpackungseinheiten (PUs) mit einem Volumen von 7×7×24 cm transportiert. Eine Verpackung entspricht dabei einem Liter Flüssigkeit.

Entscheidend ist, dass ein Trolley nicht unbegrenzt befüllt werden kann. In der Realität begrenzen sowohl das Innenvolumen als auch das maximal zulässige Gewicht die Befüllung. Um dies anwendungsbezogen abzubilden, wird ein Maximalgewicht von 60 kg pro Trolley angenommen. Die nutzbare Innenkapazität wird mit einem Effizienzfaktor von 80 % angenommen und berechnet.

```
% Volumen des Trolleys (Umrechnung von mm³ in Liter)
trolleyVolume_mm3 = params.trolley.lengthFS * params.i2mm * ...
                    params.trolley.width  * params.i2mm * ...
                    params.trolley.height * params.i2mm;
trolleyVolume = trolleyVolume_mm3 * 1e-6;
usableVolumeFactor = 0.80;
usableTrolleyVolume = trolleyVolume * usableVolumeFactor;

% Begrenzung durch Volumen und Gewicht
maxPUsByVolume = floor(usableTrolleyVolume / packageVolume);
maxPUsByWeight = floor(maxWeightPerTrolley / packageWeight);
maxPUsPerTrolley = min(maxPUsByVolume, maxPUsByWeight);
```

Diese doppelte Begrenzung ist methodisch wichtig: Je nach Paketdichte oder Transportdauer kann entweder das Volumen oder das Gewicht limitierend sein. Die Berechnung berücksichtigt somit beide Faktoren und liefert ein belastbares Maß zur realitätsnahen Bewertung der Trolley-Auslastung für Getränke.

```
% Gesamtverbrauch der Trolleys bei Fullservice
trolleyUsagePercentMeal = (numTrolleysForMeals / numTrolleysAvailable) * 100;
trolleyUsagePercentDrinks = (numTrolleysForDrinks / numTrolleysAvailable) * 100;
totalTrolleyUsagePercent = trolleyUsagePercentMeal + trolleyUsagePercentDrinks;
```

Diese Analyse liefert entscheidende Hinweise auf potenzielle Kapazitätsengpässe in der Galley-Konfiguration und bildet somit eine fundierte Grundlage für weiterführende operative Bewertungen. Durch die strukturierte Verknüpfung von Kabinenlayout (Sitzplatzanzahl und -klassen), Galleyausstattung (z. B. Anzahl der Öfen und Trolleys) und dem gewählten Servicekonzept entsteht eine methodische Schnittstelle, die die technische Auslegung und die funktionalen Anforderungen des Bordservices erstmals integriert betrachtet.

5.5.5 Prozessanalyse der Be- und Entladezeiten an den Türen

Ein zusätzliches Ziel der erweiterten Analyse ist die modellbasierte Abschätzung der Zeit, die für das Be- und Entladen der Galleys an den Flugzeugtüren benötigt wird. Dies ist insbesondere für die logistische Planung am Boden sowie für die Integration in ganzheitliche Kabinenprozesse von Bedeutung. Im vorliegenden Modell erfolgt die Analyse anhand der Anzahl der Trolleys sowie deren Position im Kabinenlayout. Zur Abbildung einer nutzungsorientierten Zuweisung, wird ein strukturierter Abgleich zwischen den Galley-Positionen und den Positionen der vorderen und hinteren Türen durchgeführt. Die ExitDoor-Instanzen (z. B. *ExitDoor1LH, ExitDoor4LH*) werden dazu als Eingabeparameter übergeben und enthalten die jeweilige x-Koordinate. Diese werden mit den Mittelpunktskoordinaten (*Midpoint_x*) der Galley-Objekte verglichen, um die jeweils nächstgelegene Galley einer Tür zuzuordnen.

Zentrale Logik der Zuweisung

```
% Nächstgelegene Galley zu einer Tür finden
doorX = door.Midpoint_x;  % Position der Tür

for j = 1:length(allGalleys)
    g = allGalleys{j};
    gX = g.Midpoint_x;
    dist = abs(gX - doorX);  % Differenz der Positionen
    if dist < minDist
        minDist = dist;
        nearestGalley = g;
    end
end
```

Die Position der Tür wird ausgelesen und mit jeder Galley verglichen. Die Galley mit der geringsten Distanz wird anschließend der Tür zugeordnet. Dadurch ergibt sich eine dynamische, datenbasierte Verknüpfung zwischen physischem Layout (Positionen) und logistischer Anbindung.

Berechnung der Ladezeit

Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Be- und Entladezeit pro Tür, basierend auf der Anzahl der Trolleys und einer mittleren Tauschzeit:

```
% Anzahl Trolleys in der zugeordneten Galley
numTrolleys = nearestGalley.NumTrolley;

% Berechnung der Ladezeit pro Door
changingTime = numTrolleys * trolleyExchangeTime;
```

Diese Werte werden anschließend je Tür (z. B. *ExitDoor1LH, ExitDoor4LH*) aufsummiert und zusätzlich bei Bedarf durch verbleibende Trolleys in Full-Galleys ergänzt. So wird sichergestellt, dass alle Einheiten realitätsnah verarbeitet werden und die Tür mit der größten Kapazität, typischerweise die hintere Tür, bevorzugt die Full-Galleys bedient.

Ausgabebeispiel

Am Ende der Berechnung erfolgt die Ausgabe

```
fprintf('Ladezeit an der Door1LH: %.1f Minuten\n', changingTime1LH);
fprintf('Ladezeit an der Door4LH: %.1f Minuten\n', changingTime4LH);
fprintf('Gesamtes Be- und Entladen dauert %.1f Minuten\n',
totalChangingTime);
```

Diese Analyse liefert damit konkrete Zeitangaben für beide Türpositionen und kann als Grundlage für die Optimierung von Ladeprozessen in der Bodenabfertigung dienen. Am Ende der erweiterten Serviceprozessanalyse werden alle berechneten Kenngrößen an die Hilfsfunktion *mainGalley.m* zurückgegeben, um sie im weiteren Verlauf in die zentrale Analysefunktion *analyzeGalleysByAircraft* einzubinden. Dazu zählen unter anderem das gewählte Missionsprofil (*missionChoice*), die daraus resultierende Flugzeit (*flightTime*), die Gesamtmassen von Speisen (*totalMealMass*) und Getränken (*massDrinksTotal_kg*), das erzeugte Abfallaufkommen (*totalWaste*), der gesamte Frischwasserbedarf (*totalFreshWaterNeeded*) sowie die Ladezeiten an den Türen (*changingTime1LH, changingTime4LH*). Diese Daten bilden die Grundlage für die abschließende Bewertung der Galley-Konfiguration im Hinblick auf technische, logistische und ökologische Leistungskennzahlen.

5.6 Abschluss der Modellierung und Datenübergabe

Mit der vollständigen Konfiguration der Galley-Typen, der integrierten Servicekonzepte und der erweiterten Verbrauchs- und Prozessanalysen ist der technische Teil der Modellierung abgeschlossen. Die erzeugten Daten stellen das zentrale Ergebnis der vorangegangenen Implementierungs- und Auswertungslogik dar und werden im Anschluss für weiterführende Prozesse bereitgestellt.

Alle erzeugten Geräte- und Galley-Instanzen, darunter *halfGalleys, fullGalleys, trolleys, ovens, coffeemakers, boilers, standardunits, sinks, latchesT1, latchesT2* und *latchesT3* – werden an das Hauptskript *main.m* übergeben und dort über die Funktion *exportNew* aus dem MATLAB-Modell in eine strukturierte XML-Datei exportiert. Diese XML-Ausgabe ist konform zum DLR-Prozess gestaltet und bildet die Datengrundlage für die nachgelagerte Visualisierung in externen Umgebungen wie Blender oder Unity.

Damit endet der Simulationsprozess im technischen Sinne. Der Übergang vom modellbasierten Berechnungsansatz zur digitalen Visualisierung ist klar strukturiert und durch eine robuste Datenschnittstelle abgesichert. Die konsistente Übergabe der Simulationsdaten stellt sicher, dass die erzeugten Galley-Layouts systematisch weiterverarbeitet und in immersive Entwicklungsumgebungen integriert werden können.

5.7 Zusammenfassung der technischen Umsetzung

Die in Kapitel 4.2 formulierten Anforderungen werden im Rahmen der technischen Umsetzung systematisch erfüllt. Die Variantenfähigkeit bei minimalem Eingabeaufwand konnte durch eine schlanke und gezielt parametrische Struktur realisiert werden. Das Modell benötigt nur wenige zentrale Eingaben (Flugzeugtyp, Servicekonzept, Missionsprofil), um daraus automatisiert unterschiedliche Galley-Konfigurationen abzuleiten.

Die regelbasierte Berücksichtigung verschiedener Serviceprofile wurde durch ein modular aufgebautes Steuerungskonzept umgesetzt, das abhängig vom gewählten Konzept die Geräteanzahl und Platzierungslogik gezielt anpasst. Die Ermittlung und strukturierte Bereitstellung von Leistungskennzahlen erfolgt über eine separate Analysefunktion, deren Ausgabestruktur sowohl intern in MATLAB als auch extern (Excel) weiterverwendet werden kann.

Im Sinne der Integration in den DLR-Prozess wird die Methode objektorientiert umgesetzt, sodass sie sich nahtlos in bestehende Toolketten einfügt. Die Trennung zwischen Hauptsteuerung, Funktionsbausteinen und physischen Klassenobjekten sichert dabei eine klare Schnittstellendefinition und fördert Wiederverwendbarkeit sowie Erweiterbarkeit.

Zudem wird die nahezu vollständige Automatisierbarkeit der Konfiguration sichergestellt. Die Kopplung von physischer Modellstruktur, Funktionslogik und kontextsensitiven Eingaben ermöglicht eine durchgängige, strukturierte Systemauslegung, ohne händische Zwischenschritte. Die Minimierung der Eingaben, die Trennung zwischen Struktur- und Logikelementen sowie die Modularität der Methode werden konsequent umgesetzt.

Damit konnten nicht nur alle drei Forschungsfragen beantwortet werden, sondern auch darüber hinausgehende Analysen zur Galley-Auslastung, zum Ressourcenverbrauch und zu logistischen Prozessen durchgeführt werden – stets im Einklang mit dem digitalen End-to-End-Gedanken des DLR-Prozesses.

6 Umfrage zur Akzeptanz von Selbstbedienungskonzepten

Im Rahmen des parametrischen Modells wurden unterschiedliche Servicekonzepte bereits berücksichtigt. Während der Konzeptentwicklung rückte dabei auch das Thema „Selbstbedienung" (Self-Service) verstärkt in den Fokus, ein Ansatz, der in der Luftfahrtbranche kontrovers diskutiert wird. Fragen zur technischen Umsetzbarkeit, zum Umgang mit Abfallmengen oder zur Reduktion des Angebots an Speisen und Getränken werfen grundlegende Überlegungen auf, die sowohl den Platz- und Energiebedarf der Galley als auch das Passagiererlebnis betreffen.

Zur systematischen Untersuchung der Passagierakzeptanz wird daher eine explorative Meinungsumfrage durchgeführt. Ziel ist es, ein Stimmungsbild zur grundsätzlichen Bereitschaft zur Selbstbedienung zu erheben und Einschätzungen zu Komfort, Servicequalität und Nachhaltigkeit einzubeziehen. Die Ergebnisse liefern qualitative Erkenntnisse, die keine konkreten Modellparameter vorgeben, jedoch wertvolle Hinweise für die Weiterentwicklung zukünftiger Kabinen- und Galleykonfigurationen bieten, insbesondere im Hinblick auf deren automatische Auslegung auf Basis von Servicekonzepten.

6.1 Zielsetzung und Fragen

Die Gestaltung moderner Flugzeugkabinen wird zunehmend von individuellen Servicebedürfnissen sowie gesellschaftlichen und ökologischen Entwicklungen geprägt. Während sich die vorliegende Arbeit auf die technische Modellierung der Galley konzentriert, stellt das zugrunde liegende Servicekonzept einen wesentlichen Einflussfaktor für deren Auslegung, Ausstattung und Raumbedarf dar. In diesem Zusammenhang rückt auch das Konzept der Selbstbedienung als potenzielle Alternative zum klassischen Bordservice in den Fokus.

Self-Service-Konzepte werfen in der praktischen Umsetzung zahlreiche Fragestellungen auf: Ist eine entsprechende Galley technisch realisierbar? Bringen Passagiere künftig eigene Verpflegung mit an Bord? Welche Auswirkungen ergeben sich daraus für die Kabinenlogistik, insbesondere hinsichtlich des Abfallvolumens und Energieverbrauchs? Und letztlich: Genügt den Passagieren reduziertes Verpflegungsangebot auf Kurz- und Mittelstrecken, oder bestehen weiterhin klare Erwartungen an einen vollumfänglichen Bordservice?

Solche Überlegungen führen zu grundlegenden Veränderungen in der Kabinenauslegung, insbesondere unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit. Alternative Servicekonzepte wie Self-Service bergen das Potenzial zur Reduktion von Masse, Energiebedarf und Platzbedarf. Diese Parameter

fließen bereits in die Modellierung im Rahmen des virtuellen Entwicklungsprozesses ein. Entscheidend ist jedoch, ob Passagiere bereit sind, klassische Borddienstleistungen zugunsten eigenverantwortlicher Versorgung aufzugeben.

Vor diesem Hintergrund wird eine Umfrage durchgeführt, die ein Stimmungsbild zur grundsätzlichen Akzeptanz von Self-Service-Angeboten erfassen soll. Im Mittelpunkt stehen dabei nicht konkrete Produktlösungen, sondern die generelle Bereitschaft der Passagiere, alternative Serviceformen an Bord zu nutzen. Durch diese Umfrage sollen potenzielle Akzeptanzbarrieren identifiziert und qualitative Erkenntnisse gewonnen werden, die neue Impulse in der Weiterentwicklung zukünftiger Service- und Kabinenkonzepte setzen können.

6.2 Methodik und Zielgruppe

Zur Erhebung eines fundierten Meinungsbildes hinsichtlich der Akzeptanz von Self-Service-Konzepten an Bord wird eine Online-Umfrage konzipiert und durchgeführt. Diese zielt darauf ab, eine möglichst breite Zielgruppe zu erreichen und deren persönliche Einschätzungen zu Komfort, Serviceerwartungen sowie den potenziellen Vor- und Nachteilen eines Self-Service-Angebots im Flugzeug einzuholen. Der Fragebogen ist bewusst allgemeinverständlich formuliert, um sowohl Vielflieger als auch Gelegenheitsreisende ohne technischen Hintergrund anzusprechen.

Die Befragung richtet sich an Flugreisende aus dem privaten und geschäftlichen Umfeld. Die Teilnahme ist anonym und freiwillig. Durch diese Herangehensweise wird sichergestellt, dass die Antworten die Perspektive tatsächlicher Endnutzer widerspiegeln und nicht durch interne Airline-Prozesse oder betriebswirtschaftliche Interessen verzerrt sind.

Im Zentrum der Umfrage stehen Fragen zur allgemeinen Einstellung gegenüber Self-Service-Angeboten, zur Bereitschaft, auf klassische Bordservices zu verzichten, sowie zur Einschätzung möglicher Einflussfaktoren wie Flugzeit, Ticketpreis oder Reiseanlass. Darüber hinaus werden potenzielle Vor- und Nachteile eines solchen Konzepts aus Passagiersicht abgefragt, um erste Anhaltspunkte für die weitere Konzeptentwicklung zu gewinnen.

Die technische Umsetzung der Umfrage erfolgt über Microsoft Forms. Zur Erreichung einer möglichst vielfältigen Zielgruppe wird der Umfragelink über verschiedene Kommunikationswege verbreitet. Dazu zählen soziale Medien im privaten Umfeld, die Verteilung von Informationsflyern sowie der Versand per E-Mail. Durch diese Kombination unterschiedlicher Kanäle soll sichergestellt werden, dass verschiedene Perspektiven aus dem privaten und beruflichen Reisekontext in die Befragung einfließen.

Die methodische Ausgestaltung der Umfrage zielt primär auf eine qualitative Einschätzung der Passagierakzeptanz ab. Eine statistische Repräsentativität wird bewusst nicht angestrebt, da im Rahmen dieser Arbeit vorrangig die Identifikation von Potenzialen und Akzeptanzbarrieren für Self-Service-Konzepte im Vordergrund steht.

Die Ergebnisse dieser Befragung sind nicht nur für die Bewertung alternativer Serviceformen relevant, sondern auch für die funktionale Planung der Galley. Rückmeldungen zur Produktauswahl, Nutzungsfrequenz und wahrgenommenen Servicequalität liefern erste qualitative Hinweise darauf, welche Anforderungen Self-Service-Konzepte künftig an Raumstruktur, Geräteausstattung und Zugänglichkeit stellen könnten. Diese Perspektive ergänzt die technische Modellierung um eine nutzerzentrierte Dimension.

6.3 Abgrenzung und Ausblick

Es ist wichtig zu betonen, dass die Umfrage bewusst als explorativer Ansatz konzipiert wird. Sie erhebt keinen Anspruch auf statistische Repräsentativität, sondern dient der ersten Einschätzung der Akzeptanz eines Self-Service-Konzepts aus Passagiersicht. Detaillösungen, etwa zur technischen Umsetzung oder zu betrieblichen Prozessen, sind nicht Gegenstand der Befragung.

Gleichzeitig bieten die Ergebnisse eine wertvolle Grundlage zur Generierung weiterführender Studien und Ableitung detaillierter Konzeptentwicklungen. Obwohl die gewonnenen Erkenntnisse dieser Umfrage nicht unmittelbar in die vorliegende Modellierung einfließen, liefern sie wichtige Impulse für die zukünftige Weiterentwicklung des digitalen Galley-Modells. Die Ergebnisse dienen als Grundlage, um in nachfolgenden Projektschritten neue Servicevarianten zu bewerten und die Systemauslegung an sich ändernde Passagiererwartungen und Nachhaltigkeitsanforderungen anzupassen. In diesem Sinne versteht sich die Umfrage als ergänzender Bestandteil der vorliegenden Arbeit, der qualitative Impulse für die weitere Modellierung und Auslegung der Galley liefert. Eine vertiefte methodische Einordnung der Umfrageergebnisse sowie deren Implikationen für zukünftige Modellvarianten erfolgt im Rahmen der kritischen Reflexion in Kapitel 8.3.

7 Ergebnisdarstellung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen technischen Umsetzung des parametrischen Galley-Modells (Kapitel 5) sowie ergänzend die Erkenntnisse aus der Umfrage zur Passagierakzeptanz von Self-Service-Konzepten (Kapitel 6) zusammengeführt. Der Schwerpunkt liegt auf der Darstellung und Analyse der modellbasiert generierten Konfigurationen und Kennzahlen.

Alle numerischen Ergebnisse wurden automatisiert im Rahmen des MATLAB-basierten Simulationsmodells erzeugt und sowohl intern als auch in einer Excel-Datei dokumentiert. Diese tabellarisch strukturierten Auswertungen sind im digitalen Anhang enthalten und ermöglichen eine transparente Nachvollziehbarkeit der betrachteten Konfigurationen sowie der resultierenden Leistungskennzahlen.

Die nachfolgenden Abschnitte orientieren sich in ihrer Struktur direkt an den Funktionsbausteinen des entwickelten Modells. Sie spiegeln die modellbasierte Prozesskette wider, von der initialen Grundkonfiguration über die Integration servicekonzeptabhängiger Platzierungslogiken bis hin zur detaillierten Leistungsanalyse. Die methodische Einordnung und kritische Diskussion der dargestellten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.

7.1 Anwendungsbeispiel im Modell

Zur Validierung des entwickelten Modells und zur exemplarischen Ergebnisgenerierung wurde am 20.05.2025 ein definierter Referenzdurchlauf durchgeführt. Dieser Referenzdurchlauf diente dem Nachweis der Funktionalität der regelbasierten Typenzuweisung, der automatisierten Platzierungslogik sowie der anschließenden Leistungsberechnung im Gesamtprozess. Der Fokus lag dabei auf der Anwendung der Methode unter realistischen Randbedingungen im Kontext einer typischen Single-Aisle-Kabine des Flugzeugtyps A320.

Die Konfiguration umfasste eine vordere Half-Galley sowie eine hintere Full-Galley. Die manuell steuerbaren Eingabeparameter beschränkten sich in diesem Fall auf das Missionsprofil sowie das Serviceprofil. Für den Referenzdurchlauf kam ein Mid-Range-Flugprofil mit einem klassischen Full-Service-Konzept zum Einsatz. Zur Bewertung serviceabhängiger Unterschiede erfolgte ergänzend ein zweiter Durchlauf mit identischen Flugzeug- und Galleytypen, jedoch mit reduziertem Getränkeservice-Profil. Die für den Referenzdurchlauf eingesetzten Softwaretools und Versionen sind in folgender Übersicht dokumentiert:

Tabelle 7-1: Eingesetzte Softwaretools und Versionen zur parametrischen Galley-Modellierung

Softwarekomponente	Version	Verwendungszweck
MATLAB	R2024b	Funktionsausführung, Analyse, Export
Blender	3.6 LTS	3D-Modellierung der Galley-Komponenten
Unity	2022.3 LTS	Immersive Visualisierung der Kabine
Excel	Alt	Tabellarische Ergebnisdokumentation

Die Auswahl und Dokumentation der eingesetzten Softwareversionen stellt sicher, dass die Ergebnisse nachvollziehbar und reproduzierbar bleiben.

7.2 Ergebnisse aus dem parametrischen Galley-Modell

Die Abbildungen 7-1 und 7-2 zeigen die komponentenspezifische Platzierung der Galley-Bauteile innerhalb der vorderen Half-Galley sowie der Full-Galley, wie sie im Rahmen der regelbasierten Typenzuweisung und Platzierungsfunktion in Kapitel 5.2 automatisch erzeugt wurden. Zur besseren Übersichtlichkeit erfolgt die Visualisierung auf Basis farblich differenzierter Bounding-Boxen, die in MATLAB jeweils die geometrische Ausdehnung der Komponenten repräsentieren.

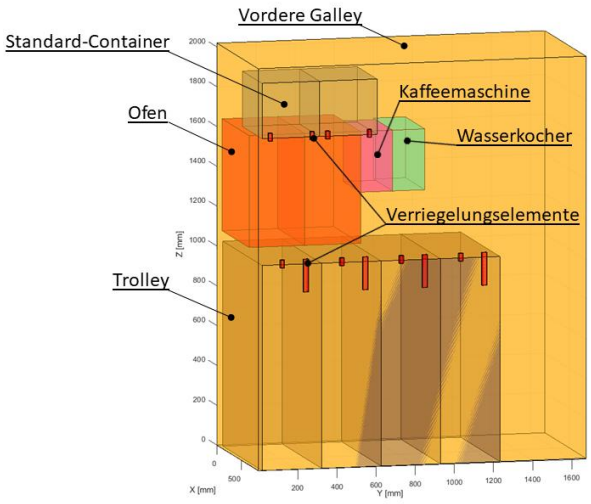

Abbildung 7-1: Bounding-Boxen der Komponenten der vorderen Galley im MATLAB-Modell

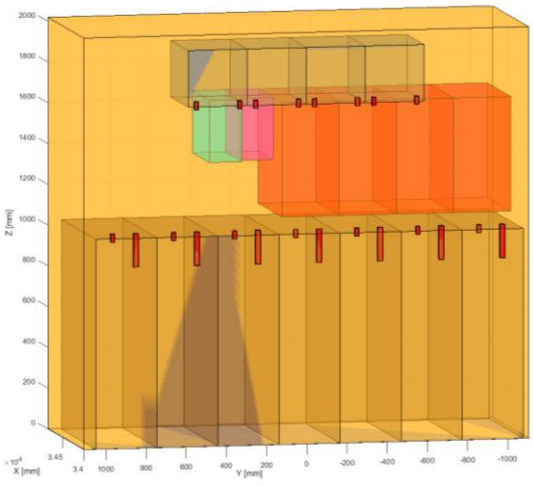

Abbildung 7-2: Bounding-Box-Darstellung der hinteren Galley im MATLAB-Modell.

In der vorderen Galley (Abb. 7-1) befinden sich im unteren Bereich mehrere Trolleys mit zugehörigen Verriegelungselementen (Typ 1 und Typ 2). Darüber folgen zwei Öfen, ein Wasserkocher, eine Kaffeemaschine sowie im oberen Bereich mehrere Standard-Container. Die Full-Galley (Abb. 7-2) bildet eine erweiterte Ausstattungsvariante ab, bei der zusätzliche Trolleys,

Öfen und Container platziert werden. Auch hier erfolgt die Zuweisung automatisch auf Grundlage der standardisierten Platzierungsregeln aus Kapitel 5.2.4.

Auffällig ist, dass in der Darstellung keine charakteristische Rundung der Flugzeugstruktur erkennbar ist. Dies liegt daran, dass das Modell in MATLAB ausschließlich der funktionalen Bauraumanalyse dient. Das Augenmerk liegt hier auf der komponentenbasierten Auslegung und Positionierung im zur Verfügung stehenden Einbauraum, nicht auf der strukturellen Nachbildung der realen Kabinenkontur. Eine detaillierte Rumpfgeometrie wird erst in der nachgelagerten 3D-Modellierung (Kapitel 7.6) integriert.

Die gezeigte Grundkonfiguration bildet die Basis für alle weiteren Modellläufe in Kapitel 7.3 bis 7.5. Sie demonstriert, dass eine regelbasierte und parametergesteuerte Auslegung von Galley-Systemen erfolgreich umgesetzt wurde, inklusive automatisierter Zuweisung, Positionierung und Bestückung der Komponenten.

Damit ist die erste Forschungsfrage dieser Arbeit vollständig beantwortet: Die Integration unterschiedlicher Galley-Typen in ein virtuelles, parametrisches Entwicklungsmodell ist durch eine regelbasierte, funktionsorientierte Struktur methodisch konsistent und technisch vollständig umsetzbar.

7.3 Ergebnisse der Integration von Servicekonzepten

Basierend auf der in Kapitel 5.3 beschriebenen Integration von Servicekonzepten zeigt das Modell in einem weiteren Schritt die Auswirkungen einer reduzierten Servicekonfiguration auf die automatische Galley-Bestückung.

Abbildung 7-3 zeigt die vordere Half-Galley im Getränkeservice. Im Vergleich zur Full-Service-Konfiguration (vgl. Abb. 7-1) wurden hier die beiden Öfen vollständig entfernt. Die verbliebenen Komponenten, darunter Wasserkocher, Kaffeemaschine, Trolleys und Standard-Container, wurden regelbasiert neu verteilt. Die Verriegelungselemente blieben erhalten und passten sich automatisch der veränderten Geräteanzahl an.

Die erweiterte Platzierungslogik, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben, greift insbesondere in der Full-Galley im hinteren Kabinenbereich. Abbildung 7-4 zeigt exemplarisch, wie bei fehlenden beheizten Geräten die nun freigewordenen Einbaupositionen mit zusätzlichen Standard-Containern befüllt wurden. Insgesamt wurden hier zwölf Container gleichmäßig auf zwei Ebenen verteilt und über die bestehende Verriegelungslogik abgesichert. Das Modell nutzt dabei die definierten Platzierungsregeln sowie die verfügbaren Höhenbereiche optimal aus.

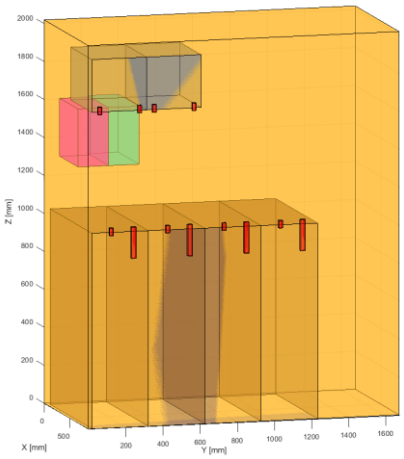

Abbildung 7-3: Vordere Galley im Getränkeservice ohne Öfen

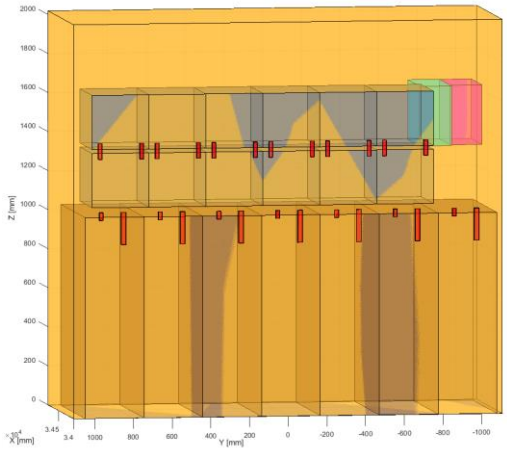

Abbildung 7-4: Hintere Galley mit erweiterter Platzierungslogik und 12 Standard-Containern

Die dargestellten Konfigurationen belegen, dass das Modell in der Lage ist, abhängig vom gewählten Serviceprofil automatisch auf strukturelle Änderungen zu reagieren und eine alternative Ausstattung zu erzeugen, ohne manuelles Eingreifen. Serviceprofile werden damit nicht nur als Einflussfaktor auf die Bestückung verstanden, sondern direkt in eine regelbasierte Systemlogik überführt.

Mit der erfolgreichen Anwendung und Visualisierung der servicekonzeptabhängigen Varianten ist auch die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit vollumfänglich beantwortet. Galley-Konfigurationen lassen sich automatisiert auf Basis vordefinierter Serviceprofile auslegen, wobei sowohl reduzierte als auch komplexe Versorgungslogiken modellseitig abgebildet und strukturiert bewertet werden können.

7.4 Auswertung zentraler Leistungskennzahlen

Die Abbildungen 7-5 und 7-6 zeigen den direkten Vergleich der beiden zentralen technischen Kenngrößen für die betrachteten Galley-Konfigurationen: das Systemgesamtgewicht sowie den elektrischen Leistungsbedarf.

Wie Abbildung 7-5 verdeutlicht, lag die kombinierte Gesamtmasse aus Half-Galley und Full-Galley im Full-Service-Szenario bei 841 kg, während sie im reduzierten Getränkeservice auf 729 kg sank. Die Differenz von über 100 kg ergibt sich primär durch den Wegfall der Öfen sowie aus dem verringerten Bedarf an Vorräten.

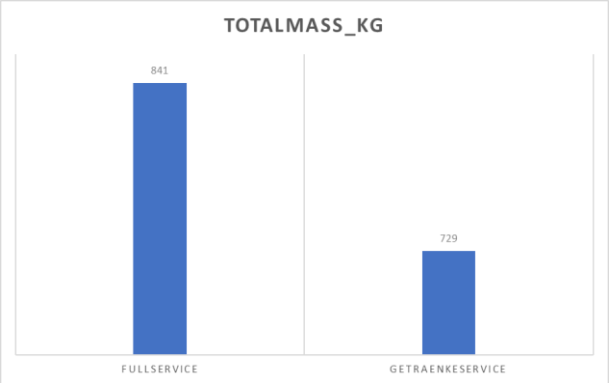

Abbildung 7-5: Vergleich der Gesamtmasse der Galley-Konfigurationen

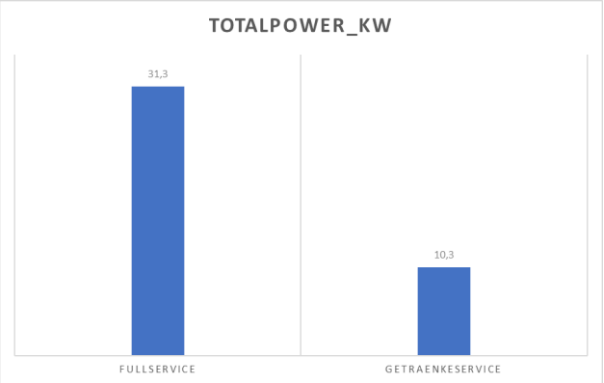

Abbildung 7-6: Vergleich des elektrischen Gesamtleistungsbedarfs der Galley-Systeme

Die Auswirkungen dieser Konfigurationsänderung spiegeln sich unmittelbar im elektrischen Leistungsprofil wider: Abbildung 7-6 zeigt eine Reduktion des kumulierten elektrischen Leistungsbedarfs von 31,3 kW im Full-Service-Fall auf lediglich 10,3 kW im Getränkeservice. Besonders die Reduktion beheizter Einbauten trägt hier maßgeblich zur Einsparung bei.

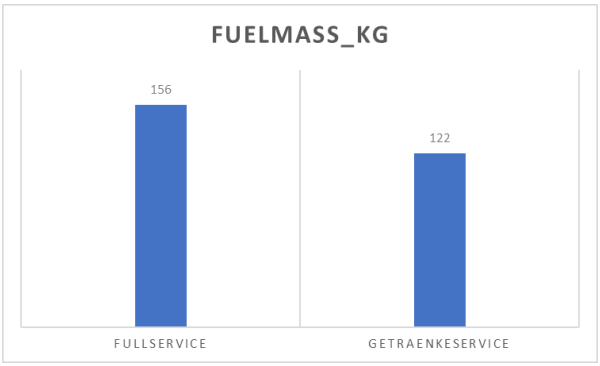

Abbildung 7-7: Kerosinbedarf zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs

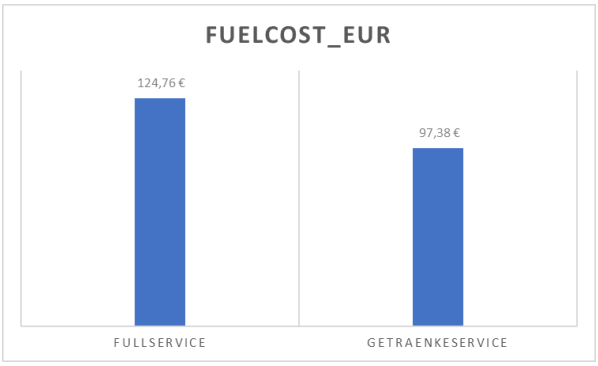

Abbildung 7-8: Kerosinmehrverbrauch in Kosten

Die Reduktion des elektrischen Leistungsbedarfs im Getränkeservice wirkt sich unmittelbar auf den erforderlichen Kerosinverbrauch aus. Wie Abbildung 7-7 zeigt, sank der modellseitig berechnete Kerosinmehrverbrauch zur Deckung des Galley-Strombedarfs und der zu transportierenden Masse von 156 kg im Full-Service-Szenario auf 122 kg im Getränkeservice. Dieser Rückgang ist ebenfalls auf die verminderte Anzahl der Öfen zurückzuführen.

Die wirtschaftliche Konsequenz dieses Unterschieds wird in Abbildung 7-8 dargestellt. Die Kerosinkosten betrugen im Full-Service-Szenario 124,76 €, während sie sich im Getränkeservice auf 97,38 € reduzierten. Die Berechnung basiert auf einem angenommenen durchschnittlichen Kerosinpreis und demonstriert, dass sich auch moderate technische Anpassungen im Kabinenbereich finanziell auswirken können.

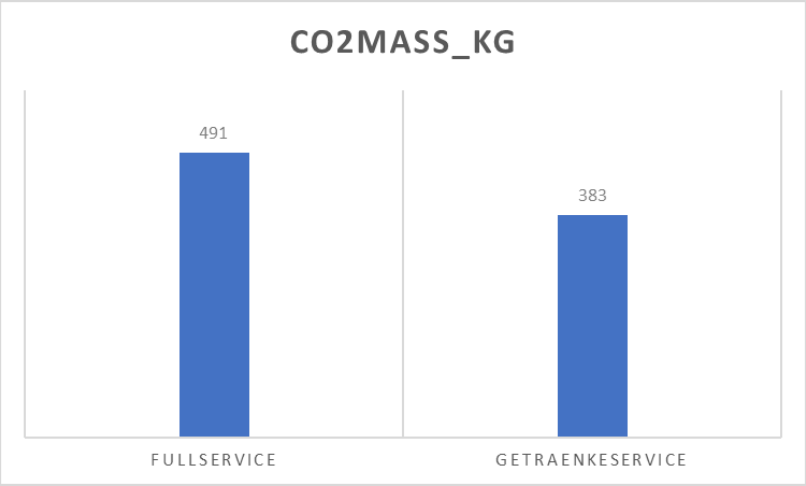

Abbildung 7-9: Vergleich der CO_2-Emissionen

In direkter Folge des verringerten Kerosinverbrauchs zeigt sich auch ein signifikanter Rückgang der CO_2-Emissionen. Wie Abbildung 7-9 verdeutlicht, entstanden im Full-Service-Szenario zusätzliche 491 kg CO_2 durch den Galley-bedingten Energieverbrauch, während das Getränkeservice-Profil mit 383 kg eine deutlich geringere Belastung verursachte.

Die Differenz von 108 kg CO_2 pro Flug macht den Einfluss galleyseitiger Ausstattungsentscheidungen auf die ökologische Gesamtbilanz unmittelbar sichtbar. Damit trägt das entwickelte Modell zur quantifizierbaren Bewertung technischer Alternativen im Kontext emissionsarmer Kabinensysteme bei. Auf eine grafische Darstellung der Schwerpunktlage sowie der relativen Differenzen zwischen den beiden Szenarien wird an dieser Stelle zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Die entsprechenden Auswertungen sind vollständig im digitalen Anhang dokumentiert und können dort zur vertieften Analyse herangezogen werden. Damit ist auch die dritte Forschungsfrage dieser Arbeit beantwortet. Unterschiedliche Galley-Konfigurationen lassen sich modellbasiert bewerten, wobei relevante Kennzahlen wie Masse, Energieverbrauch, Kerosinbedarf und CO_2-Ausstoß systematisch analysiert und verglichen werden können.

7.5 Auswertung der erweiterten Analyse

Ergänzend zu den zuvor betrachteten primären Leistungskennzahlen lieferte das Modell auch erweiterte Kennwerte zur ökologischen und logistischen Bewertung der Galley-Konfigurationen. Im Fokus standen dabei insbesondere der Frischwasserbedarf sowie das anfallende Abfallvolumen, zwei Parameter, die stark vom gewählten Serviceprofil abhängig sind und unmittelbare Auswirkungen auf die Versorgungssysteme und Bodenprozesse haben.

Abbildung 7-10 zeigt die modellseitig berechnete Abfallmenge für beide betrachteten Servicekonfigurationen. Im Full-Service-Szenario fiel mit 46 kg deutlich mehr Abfall an als im reduzierten Getränkeservice (29 kg). Die Differenz lässt sich auf die größere Anzahl verarbeiteter Speisenkomponenten, Verpackungen und Verbrauchsmaterialien zurückführen, die beim klassischen Bordservice typischerweise anfallen. Eine Reduktion des Serviceumfangs verringert somit nicht nur das Gewicht, sondern entlastet auch die Abfalllogistik an Bord und am Boden.

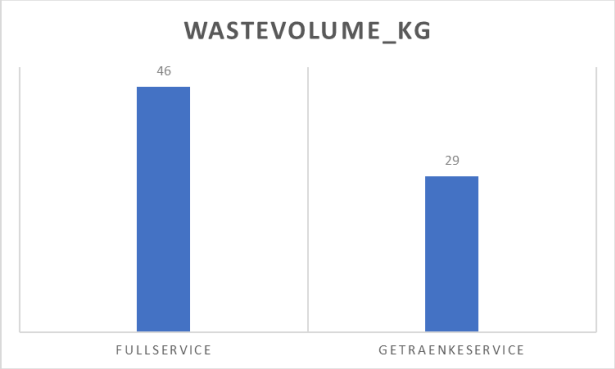

Abbildung 7-10: Vergleich des anfallenden Abfalls

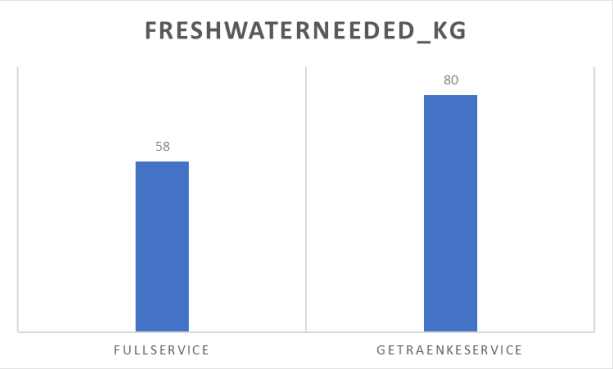

Abbildung 7-11: Vergleich des Frischwasserbedarfs

Gleichzeitig veränderte sich, mit umgekehrtem Effekt, der Bedarf an Frischwasser. Wie Abbildung 7-11 veranschaulicht, stieg der Wasserverbrauch im Getränkeservice von 58 kg auf 80 kg. Dieses Ergebnis beruht auf der verstärkten Nutzung wasserbasierter Heißgetränke im Rahmen des reduzierten Speiseangebots. Der damit verbundene Anstieg kann Auswirkungen auf die Kapazitätsplanung der Frischwassertanks sowie auf die Dimensionierung der wasserführenden Komponenten innerhalb der Galley haben.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass sich Serviceprofile nicht eindimensional bewerten lassen. Während ein reduzierter Service die Masse und den Energiebedarf der Galley signifikant gesenkt haben, stiegen gleichzeitig andere Systemanforderungen wie der Frischwasserbedarf. Für eine ganzheitliche Auslegung sind daher stets mehrere Leistungskennzahlen zu berücksichtigen. Die detaillierten Rechenwerte sowie weitere erweiterte Kennzahlen (z. B. Ladezeiten) sind im digitalen Anhang dokumentiert.

7.6 Visualisierung der Galley-Modelle in 3D und Virtual Reality

Abbildung 7-12 und Abbildung 7-13 zeigen die in Blender erzeugten 3D-Modelle der vorderen und hinteren Galley. In diesem Schritt des DLR-Prozesses wurden die zuvor in MATLAB erzeugten Bounding Boxes (vgl. Kapitel 7.2) automatisiert durch detaillierte 3D-Modelle ersetzt. Dabei wurden nicht nur die grundlegenden Geometrien beibehalten, sondern auch alle spezifischen Galley-Komponenten, wie Trolleys, Standard-Container, Öfen und Kaffeemaschinen, vollständig dreidimensional dargestellt.

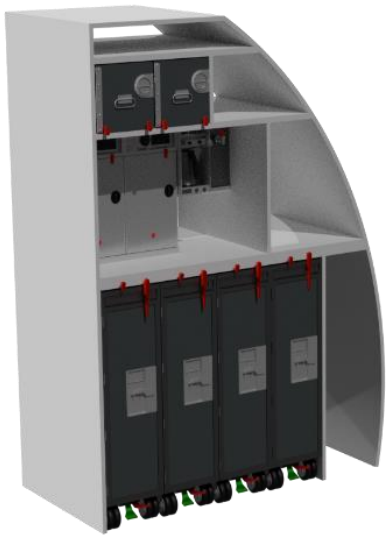

Abbildung 7-12: Modell der vorderen Galley in Blender

Abbildung 7-13: Modell der hinteren Galley in Blender

Während MATLAB lediglich eine bauraumbezogene Analyse mit abstrahierten Quadern ermöglicht, erlaubt die Visualisierung in Blender erstmals eine wirklichkeitsnahe Repräsentation der tatsächlichen Form und Ausstattung. Besonders in Abbildung 7-12 wird dies an der vorderen Galley deutlich, bei der nun die strukturelle Rundung entlang der Rumpfkontur sichtbar wird. Mit diesem Schritt ist die Transformation vom funktional-abstrakten MATLAB-Modell hin zu einem geometrisch detailreichen Galley-Modell abgeschlossen.

Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 zeigen die virtuelle Darstellung der vorderen und hinteren Galley in der VR-Umgebung. Auf Basis der zuvor in Blender erstellten 3D-Geometriemodelle wurden die Galley-Konfigurationen in Unity überführt und dort als begehbare Kabinenszene visualisiert. Wie in Kapitel 3.5.1 beschrieben, erfolgt die Darstellung in einer immersiven Umgebung, die nicht nur eine realitätsnahe Begehung, sondern auch eine interaktive Analyse ermöglicht. Ein zentrales Merkmal der VR-Darstellung ist die Anzeige objektbezogener Eigenschaften: Wird eine Komponente (z. B. ein Ofen oder Trolley) ausgewählt, erscheinen die zugehörigen Informationen wie Name, Abmessungen, Masse oder Systemzugehörigkeit direkt im Sichtfeld. Diese Informationen wurden bereits im Kapitel 3.3.2 anhand der objektorientierten Attributstruktur beschrieben. Die Funktion erlaubt eine kontextuelle Bewertung einzelner Komponenten und stellt sicher, dass auch in der VR-Umgebung die logischen Verknüpfungen des Modells nachvollziehbar bleiben. Mit dieser immersiven Darstellung ist der vollständige Durchlauf des DLR-Prozesses abgeschlossen, von der funktionalen Auslegung in MATLAB über die geometrische Modellierung in Blender bis hin zur interaktiven Visualisierung in Unity. Die Galley-Konfigurationen liegen damit durchgängig digital, objektbasiert und analysierbar vor.

Abbildung 7-14: Darstellung der vorderen Galley in Unity

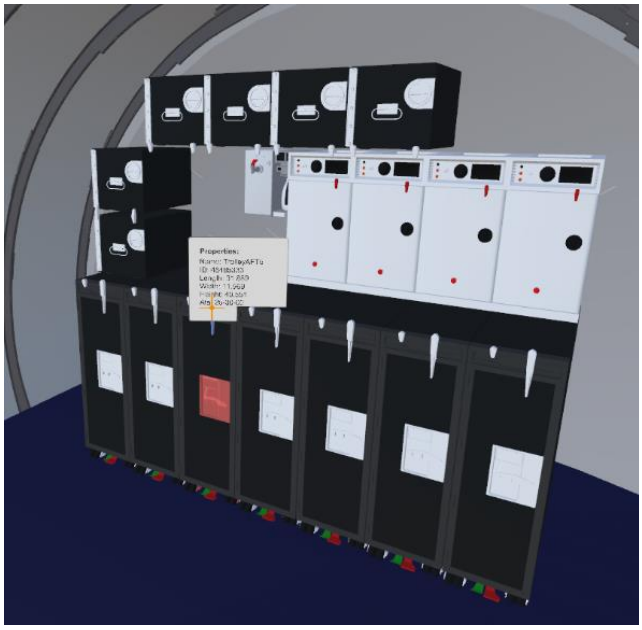

Abbildung 7-15: Darstellung der hinteren Galley in Unity

Abbildung 7-16 vergleicht das in MATLAB erzeugte Bounding-Box-Modell der vorderen Galley mit einem realen Produktbild. Anhand der Dimensionierung und Anordnung typischer Komponenten wird deutlich, dass das parametrische Modell eine hohe strukturelle Übereinstimmung mit realen Einbauten erreicht. Die Abmessungen, Platzierung und Geräteverteilung wurden bewusst an Industrieangaben (hier: Safran Group, 2025) orientiert, um eine praxisnahe Modellbildung sicherzustellen. Diese visuelle Gegenüberstellung dient somit der qualitativen Validierung des entwickelten Modells und unterstreicht dessen Übertragbarkeit auf reale Anwendungen.

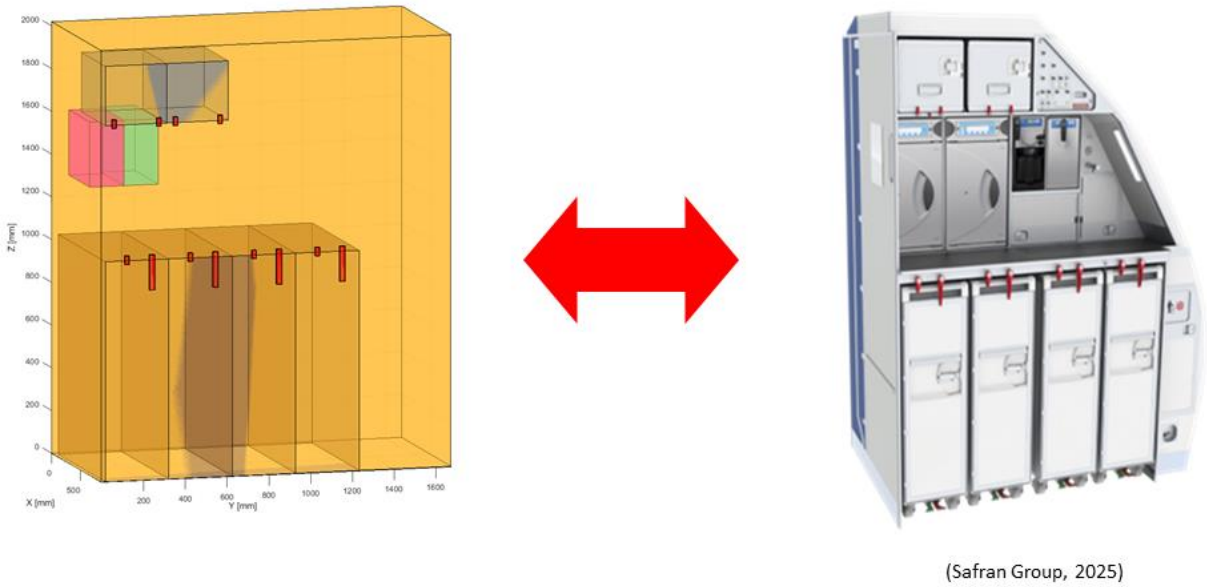

Abbildung 7-16:Validierung des MATLAB-Modells mit realer Galley

7.7 Umfrageergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt die Darstellung der Ergebnisse aus der Online-Umfrage. Insgesamt wurden 167 vollständige Antworten berücksichtigt. Die durchschnittliche Bearbeitungszeit lag bei rund 16 Minuten, der Erhebungszeitraum betrug 204 Tage. Die Umfrage ist nicht repräsentativ im statistischen Sinne, liefert jedoch wertvolle Einblicke in typische Wahrnehmungen und Einschätzungen von Passagierinnen und Passagieren. Eine vertiefende Einordnung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.3.

7.7.1 Stichprobe

Die Altersverteilung der Befragten zeigt einen deutlichen Schwerpunkt bei jüngeren bis mittleren Altersgruppen. Den größten Anteil bildeten Personen im Alter von 16 bis 26 Jahren mit 47 %, gefolgt von der Gruppe der 27- bis 42-Jährigen mit 37 %. Ältere Teilnehmende zwischen 43 und 58 Jahren waren mit 13 % vertreten, während lediglich 3 % der Befragten zur Altersgruppe 59 Jahre und älter zählten. Insgesamt dominieren somit jüngere Zielgruppen, was insbesondere im Hinblick auf Technologieakzeptanz und Nutzungsbereitschaft von Self-Service-Konzepten relevant sein kann (vgl. Abb. 7-17).

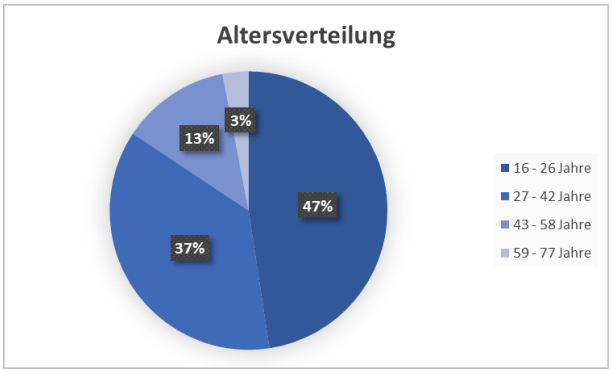

Abbildung 7-17: Altersverteilung der Befragten

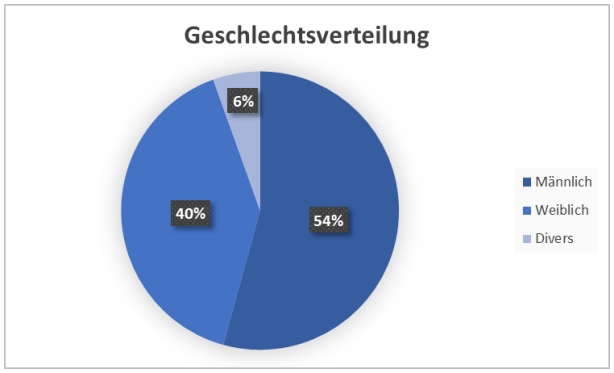

Abbildung 7-18: Geschlechtsverteilung der Befragten

Das Geschlechterverhältnis der Teilnehmenden ist vergleichsweise ausgewogen. Mit einem Anteil von 54 % waren männliche Befragte leicht in der Überzahl, gefolgt von weiblichen mit 40 %. Divers gaben 6 % der Teilnehmenden an. Die Daten spiegeln damit eine gewisse Diversität der Stichprobe wider (vgl. Abb. 7-18), auch wenn keine Repräsentativität im statistischen Sinne angestrebt wurde.

7.7.2 Flugverhalten und Serviceerwartung

Die Mehrheit der Befragten gab an, mehrmals im Jahr mit dem Flugzeug zu reisen. Rund 55 % nutzen das Flugzeug ein- bis zweimal jährlich, während 9 % sogar mehr als fünfmal pro Jahr fliegen. Ein Anteil von 22 % reist drei bis fünfmal pro Jahr, und 14 % gaben an, nie zu fliegen. Daraus ergibt sich ein Bild überwiegend flugerfahrener Teilnehmender mit regelmäßiger Reisetätigkeit (vgl. Abb. 7-19).

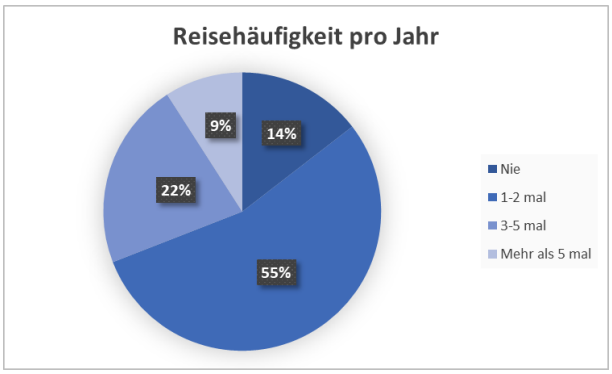

Abbildung 7-19: Reisehäufigkeit der Befragten

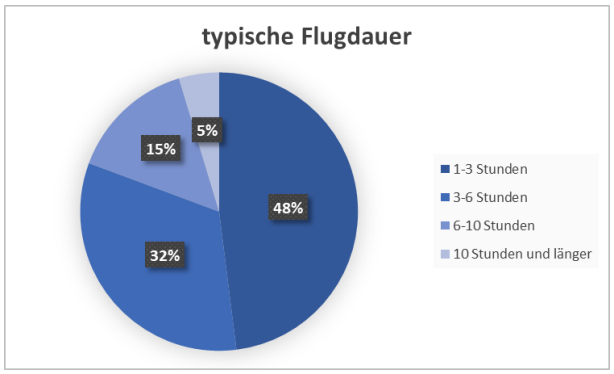

Abbildung 7-20: Typische Flugdauer der Befragten

Auch bei der typischen Flugdauer zeigt sich ein klares Muster: Knapp die Hälfte der Befragten (48 %) fliegt überwiegend auf Kurzstrecken von 1–3 Stunden. 32 % gaben 3–6 Stunden als typische Reisedauer an, 15 % nannten Flüge zwischen 6 und 10 Stunden, und nur 5 % reisen regelmäßig auf Langstrecken über 10 Stunden (vgl. Abb. 7-20). Damit liegt der Schwerpunkt der Reisen im Bereich von Kurz- bis Mittelstreckenflügen.

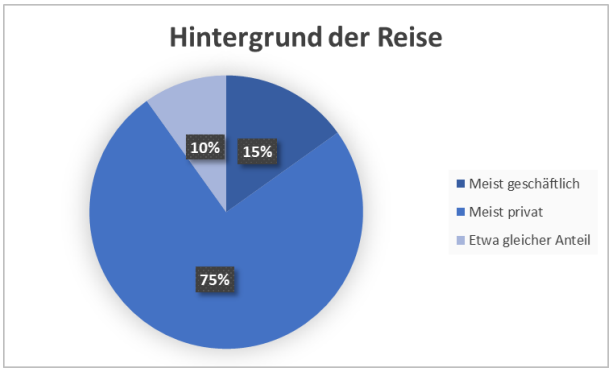

Abbildung 7-21: Hintergrund der Passagiere für Flugreisen

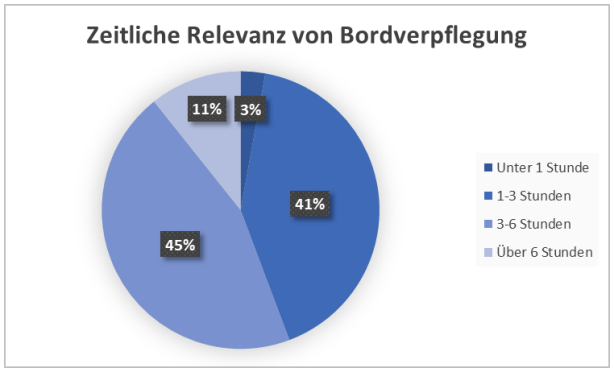

Abbildung 7-22: Bedeutung der Bordverpflegung in Abhängigkeit der Flugzeit

Ein Großteil der Teilnehmenden nutzt das Flugzeug überwiegend für private Zwecke. 75 % gaben an, hauptsächlich privat zu reisen, während 15 % beruflich unterwegs sind. 10 % der Befragten nannten eine ausgeglichene Verteilung zwischen privaten und geschäftlichen Reisen. Dieses Ergebnis legt nahe, dass persönliche Präferenzen und Komfortbedürfnisse im Zusammenhang mit Bordverpflegung besonders stark durch private Nutzungskontexte geprägt sein könnten (vgl. Abb. 7-21).

Die Bewertung der Bordverpflegung zeigt eine klare Abhängigkeit von der Flugdauer. Während nur 3 % der Teilnehmenden Bordverpflegung bereits bei Flügen unter einer Stunde als wichtig empfinden, steigt der Anteil bei längeren Flügen deutlich an: 41 % erwarten ab einer Flugdauer von 1–3 Stunden Verpflegung, 45 % ab 3–6 Stunden. Auf Langstreckenflügen über sechs Stunden sehen 11 % Bordverpflegung als zwingend erforderlich an. Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Bedürfnis nach Verpflegung deutlich mit zunehmender Flugzeit wächst (vgl. Abb. 7-22).

7.7.3 Einschätzung zu Serviceprofilen

Die Ergebnisse zur Bedeutung des Bordservices zeigen ein heterogenes Bild mit leichter Tendenz zur Wertschätzung klassischer Verpflegungsangebote. 29 % der Teilnehmenden stuften Bordservice als „eher wichtig“, weitere 20 % sogar als „sehr wichtig“ ein. Dem gegenüber stehen 21 % mit neutraler Haltung sowie 30 %, die Bordverpflegung als eher oder gar nicht wichtig bewerten. Diese Verteilung lässt erkennen, dass zwar eine signifikante Gruppe dem klassischen Servicekonzept weiterhin Relevanz zuschreibt, jedoch auch ein wachsender Anteil offener oder indifferent gegenüber alternativen Ansätzen ist (vgl. Abb. 7-23).

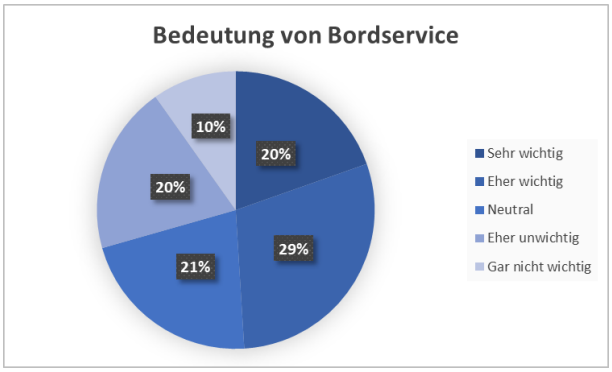

Abbildung 7-23: Bedeutung von Bordservice während des Fluges

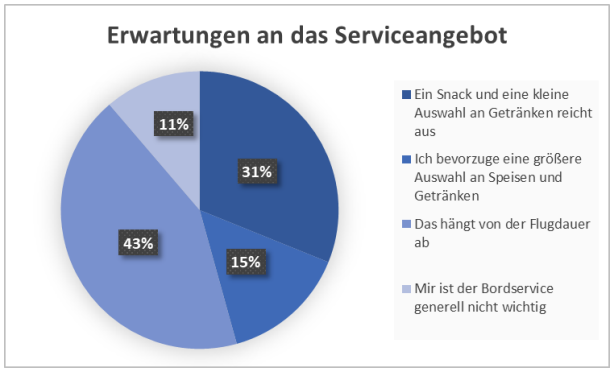

Abbildung 7-24: Erwartungen an die Bordverpflegung

Die konkreten Erwartungen an das Serviceangebot bestätigen diese Beobachtung. Rund 43 % der Befragten äußerten, dass das gewünschte Verpflegungsniveau von der Flugdauer abhängig sei. 31 % gaben sich mit einem Snack und einer kleinen Getränkeauswahl zufrieden, während 15 % eine größere Auswahl an Speisen und Getränken bevorzugen. 11 % messen dem Bordservice grundsätzlich keine Bedeutung bei (vgl. Abb. 7-24). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich Serviceprofile künftig stärker differenzieren und an Flugdauer sowie Passagiererwartung angepasst werden sollten sowohl funktional als auch hinsichtlich des Angebotsumfangs.

7.7.4 Haltung zu Self-Service-Konzepten

Die Mehrheit der Befragten zeigt sich grundsätzlich offen gegenüber einem Self-Service-Konzept während des Fluges. 38 % würden sich „auf jeden Fall“ selbst an einer Station versorgen, weitere 27 % halten dies für „wahrscheinlich“. Lediglich 19 % äußerten sich skeptisch oder ablehnend gegenüber diesem Ansatz. Ein relevanter Anteil (16 %) blieb neutral (vgl. Abb. 7-25). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine eigenständige Versorgung an Bord für viele Passagiere vorstellbar ist, insbesondere dann, wenn das Konzept benutzerfreundlich und gut zugänglich umgesetzt wird.

Auch die Online-Vorbestellung von Snacks und Getränken vor dem Flug findet Zustimmung. 32 % würden dieses Angebot „wahrscheinlich“, 23 % „auf jeden Fall“ nutzen. Zusammen mit den neutralen Stimmen (15 %) ergibt sich ein positives Bild hinsichtlich der Bereitschaft, neue digitale Bestellprozesse anzunehmen. Nur 8 % lehnten diesen Ansatz ab (vgl. Abb. 7-26).

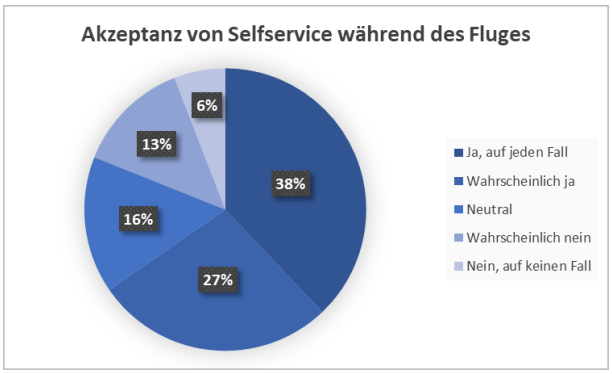

Abbildung 7-25: Akzeptanz von Self-Service-Konzept während des Fluges

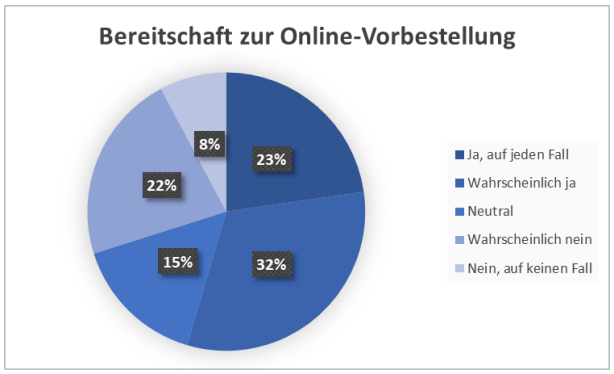

Abbildung 7-26: Bereitschaft zur Online-Vorbestellung

Beim direkten Vergleich von Self-Service und klassischem Bordservice sprachen sich 22 % für eine präferierte Nutzung von Self-Service aus, während 10 % dieser Lösung „definitiv“ zustimmen würden. Neutral verhielten sich 36 %, und lediglich 8 % bevorzugten eindeutig den klassischen Service (vgl. Abb. 7-27). Dies zeigt: Das Self-Service-Konzept trifft auf keine klare Mehrheit potenziell akzeptierender Nutzergruppen.

Doch deutlicher fällt das Bild bei preisabhängiger Betrachtung aus: 47 % der Befragten würden ein Self-Service-Angebot „definitiv“ in Anspruch nehmen, wenn dadurch der Flugpreis sinkt. Weitere 35 % zeigten sich voraussichtlich zustimmend. Insgesamt sprechen sich damit über 80 % der Befragten für Self-Service-Lösungen aus, wenn diese mit einem finanziellen Anreiz verknüpft sind (vgl. Abb. 7-28).

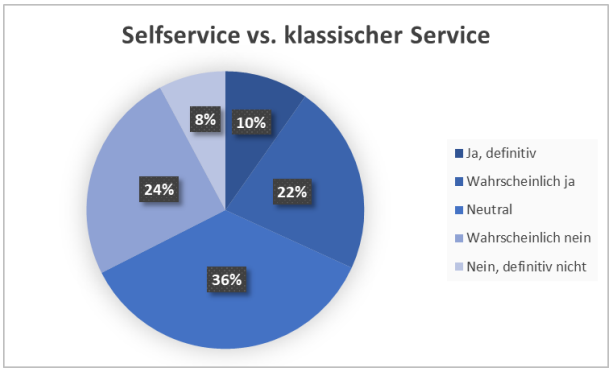

Abbildung 7-27: Self-Service vs. klassischer Service

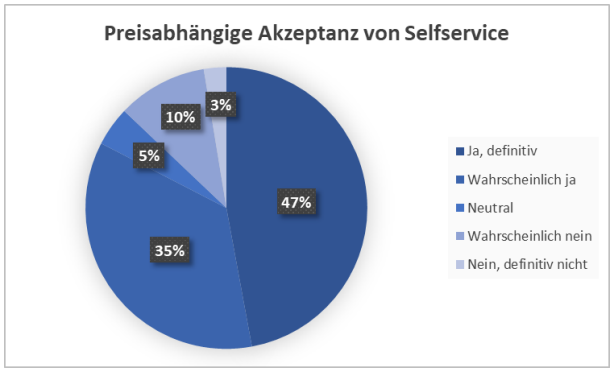

Abbildung 7-28: Preisabhängige Akzeptanz von Self-Service-Konzept

Dieses Ergebnis macht deutlich, dass Preisbewusstsein ein maßgeblicher Treiber für die Akzeptanz alternativer Servicemodelle sein kann.

7.7.5 Nachhaltigkeitsbewertung

Die Auswertung zeigt, dass das Thema Nachhaltigkeit für einen Großteil der Befragten von hoher Relevanz ist. Jeweils 35 % der Teilnehmenden bewerteten Nachhaltigkeit in der Luftfahrt als „sehr wichtig“ bzw. „eher wichtig“. Damit misst mehr als zwei Drittel der Stichprobe ökologischen Aspekten beim Fliegen eine hohe Bedeutung bei. 17 % der Befragten zeigten eine neutrale Haltung, während lediglich 13 % Nachhaltigkeit als „eher unwichtig“ oder „gar nicht wichtig“ einstuften (vgl. Abb. 7-13).

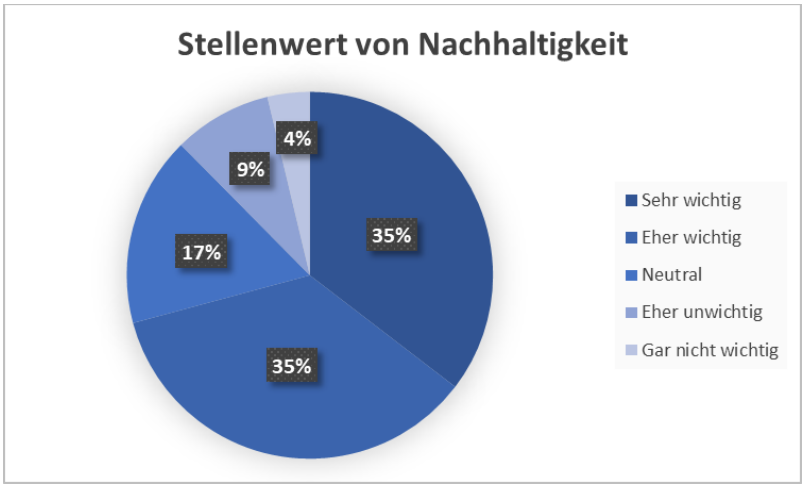

Abbildung 7-29: Stellenwert von Nachhaltigkeit in der Luftfahrt aus Sicht der Passagiere

Diese Verteilung unterstreicht, dass ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein in der Zielgruppe vorhanden ist. Für die Konzeption zukünftiger Kabinenkonzepte, insbesondere im Bereich der Servicegestaltung, bedeutet dies, dass nachhaltige Ansätze nicht nur regulatorisch, sondern auch nutzerseitig zunehmend eingefordert werden. Self-Service-Systeme, die mit Ressourceneinsparung oder Abfallvermeidung verbunden sind, könnten somit nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch attraktiv wirken.

7.7.6 Qualitative Anmerkungen

Im Rahmen der Umfrage bestand die Möglichkeit, über ein Freitextfeld individuelle Anmerkungen, Rückmeldungen oder Ideen zu Self-Service-Konzepten und zum allgemeinen Bordservice zu äußern. Insgesamt nutzten 25 Teilnehmende diese Option. Die Aussagen decken ein breites Meinungsspektrum ab und lassen sich inhaltlich mehreren thematischen Bereichen zuordnen.

Einige Teilnehmende äußerten grundsätzliche Zustimmung zu Self-Service-Ansätzen und bezeichneten diese als interessant oder potenziell sinnvoll. Positiv erwähnt wurden etwa Vorbestellmöglichkeiten per App oder die Aussicht auf Kosteneinsparungen. Gleichzeitig wurden praktische Herausforderungen bei der Umsetzung an Bord thematisiert. Dabei wurden enge Kabinengänge, mögliche Staus, die Erreichbarkeit der Station je nach Sitzplatzlage sowie organisatorische Fragen zur Nutzungshäufigkeit und Fairness angesprochen.

Mehrere Rückmeldungen nahmen Bezug auf den Einfluss des Sitzplatzes sowie auf potenzielle Komforteinschränkungen. Genannt wurde etwa, dass ein Gangplatz die Nutzung von Self-Service begünstigen könne, während Fensterplätze eher hinderlich seien. Auch wurde die potenzielle Störung durch aufstehende Sitznachbarinnen und -nachbarn genannt, etwa bei schlafenden Mitreisenden. Manche äußerten Unklarheit darüber, wie das Konzept konkret funktionieren würde und wie ein geordneter Ablauf im engen Kabinenraum realisierbar sein könnte.

Ein Teil der Antworten betonte die Bedeutung des klassischen Bordservices. Genannt wurde unter anderem der Wunsch nach persönlichem Kontakt zur Crew oder ein generelles Komfortbedürfnis während des Flugs. Darüber hinaus wurden auch Rückmeldungen zur Umfrage selbst gegeben, etwa zur Gestaltung einzelner Fragen oder zur Formatierung. Einige Kommentare zielten zudem auf technische oder gestalterische Vorschläge wie mobile Bestellfunktionen, Snack-Automaten oder flexible Optionen zur Essenswahl während des Flugs.

Mehrere Aussagen nahmen Bezug auf Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Fragen. Hier wurden unter anderem der Ressourcenverbrauch des Bordservice, die Klimawirkung des Fliegens, die Rolle von Subventionen sowie Fragen nach sozialer Gerechtigkeit im Zugang zu Flugreisen angesprochen. Die freien Antworten bieten damit zusätzliche Einblicke in persönliche Sichtweisen, Erwartungen und Bedenken der Teilnehmenden, die im Rahmen der standardisierten Fragen nicht erfasst wurden. In Kapitel 8 werden diese Rückmeldungen zur Reflexion der Nutzungsrealität und methodischen Weiterentwicklung herangezogen.

8 Reflexion der Arbeit

8.1 Diskussion der Methodik und Umsetzung

Die Reflexion der Methodik orientiert sich an den drei zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit. Sie zeigt auf, inwieweit die entwickelten Konzepte zur Umsetzung parametrischer Galley-Modellierung beigetragen haben, welche Stärken das Modell aufweist und wo gezielt abstrahiert oder bewusst begrenzt wurde.

Zur ersten Forschungsfrage, wie sich die parametrische Modellierung von Galleys grundsätzlich umsetzen lässt, wurde ein objektorientiertes, modular aufgebautes Modell in MATLAB realisiert. Es ermöglicht die automatische Instanziierung geeigneter Galley-Typen (z. B. Half- oder Full-Galley) in Abhängigkeit vom Flugzeugtyp. Damit entsteht ein skalierbares Framework, das sich systematisch erweitern lässt. Entscheidend ist, dass mit dieser Arbeit eine methodische Lücke im digitalen Entwicklungsprozess des DLR geschlossen wurde: Die bislang rein geometrische „Bounding Box“ im Kabinenmodell wird nun durch ein logisch strukturiertes, funktionsfähiges Subsystem ersetzt. Die Fähigkeit, Galleys nicht nur geometrisch, sondern funktional und ressourcenbasiert abzubilden, stellt einen signifikanten Fortschritt dar.

Hervorzuheben ist der Grad der Automatisierung. Mithilfe parametrisierter Eingaben, etwa Flugzeugtyp, Servicekonzept und Flugzeit, lassen sich Varianten vollständig regelbasiert und ohne manuelle Modellierungsarbeit generieren. Das schafft Effizienz, insbesondere in frühen Entwurfsphasen mit hoher Variantenvielfalt bei gleichzeitig begrenztem Detaillierungsgrad. Die Integration in eine Virtual-Reality-Umgebung erlaubt zudem schnelle Designiterationen und direkte visuelle Rückmeldung. Damit wird das Modell zu einem praxistauglichen Werkzeug für interaktive Konzeptentwicklung.

Gleichzeitig muss kritisch festgehalten werden, dass die Umsetzung bislang ausschließlich auf Single-Aisle-Flugzeuge (z. B A320) beschränkt ist. Twin-Aisle-Konzepte wie die A350-Familie wurden bisher nicht vollständig integriert. Zwar wurde eine Schnittstelle zur Erweiterung bereits angelegt, jedoch fehlt aktuell noch eine vollständige Einbindung komplexerer Layouts mit mehreren Galley-Zonen und internen Verkehrswegen. Diese Einschränkung begrenzt die direkte Anwendbarkeit auf breitere Flugzeugprogramme, bietet aber eine klare Entwicklungsrichtung für zukünftige Iterationen des Modells.

Die objektorientierte Struktur mit klar definierten Klassen für Galley-Typen, Geräte, Ressourcen und Auswertelogik bildet die methodische Grundlage. Die Trennung von Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe gemäß dem EVA-Prinzip sorgt für Transparenz, Wartbarkeit und eine klare

funktionale Gliederung des Codes. Diese Architektur begünstigt eine langfristige Erweiterbarkeit, etwa für neue Flugzeugmuster oder alternative Kabinenkonzepte. Bauliche Details wie Rahmen, Verkleidungen oder Befestigungen wurden im Sinne der funktionalen Modelllogik bewusst abstrahiert und nicht im Detail berücksichtigt.

Die zweite Forschungsfrage adressierte die Integration verschiedener Servicekonzepte. Das Modell differenziert automatisiert zwischen Profilen wie Getränkeservice und Fullservice. Daraus ergeben sich Unterschiede in Geräteauswahl, Gerätemengen und Ressourcendimensionierung, etwa bei Wasser, Mahlzeiten oder Abfall. Die entwickelte Regelstruktur nutzt den verfügbaren Galley-Raum zielgerichtet und effizient, was die Relevanz des Modells über rein geometrische Platzhalter hinaus deutlich erhöht.

Ein besonderer Mehrwert liegt in der direkten Kopplung an den Customizing-Prozess: Airlines und Hersteller können Varianten in der VR erleben, vergleichen und anhand belastbarer Kennzahlen fundierte Entscheidungen treffen. Die aktuell integrierten Serviceprofile bilden eine praxisnahe Ausgangsbasis. Gleichzeitig ist zu betonen, dass innovative Kabinenelemente wie Barbereiche, Lounge-Zonen oder multifunktionale Self-Service-Module bislang nicht abgebildet werden können. Diese Konzepte, die insbesondere in Langstreckenflugzeugen mit hohem Differenzierungsanspruch zum Einsatz kommen, erfordern komplexe logistische und räumliche Abhängigkeiten, die im aktuellen Modell nicht enthalten sind. Die methodische Grundlage für eine spätere Integration ist zwar vorhanden, die tatsächliche Umsetzung bleibt jedoch ein offener Entwicklungsschritt.

Die dritte Forschungsfrage zielte auf die Bewertung von Konfigurationen anhand geeigneter Leistungskennzahlen (KPIs). Hier bietet das Modell eine durchgängige Lösung: Masse, Schwerpunktlage, Energiebedarf, CO_2-Emissionen, Kerosinverbrauch und Betriebskosten werden automatisiert berechnet und in strukturierter Form exportiert. Neu ist zudem die Möglichkeit, mehrere Varianten inklusive Referenzkonfiguration direkt zu vergleichen – ein bedeutsamer Schritt in Richtung datengetriebener Systembewertung.

Ergänzend wurden erstmals operative Ressourcenkennwerte simuliert, wie etwa Abfallmengen oder Getränkebedarf in Abhängigkeit von Passagierzahl und Flugzeit. Auch wenn reale Airline-Daten derzeit nicht vorliegen, liefert der gewählte Ansatz plausible Referenzwerte. Die fehlende Kalibrierung anhand konkreter Airline-Betriebsdaten stellt eine Einschränkung dar, beeinträchtigt jedoch nicht die grundsätzliche Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Sowohl Hersteller als auch Zulieferer profitieren unmittelbar von dieser Lösung. Bereits in frühen Entwurfsphasen, wenn viele Entscheidungen getroffen, aber wenige Detaildaten verfügbar sind,

erlaubt das Modell belastbare Aussagen zu Energiebedarf, logistischen Anforderungen und Ressourcenauslegung. Modulfertiger können durch die gezielte Parametrierung ihrer Bausteine kundenindividuelle Varianten effizient ableiten.

Auch für Airlines ergibt sich ein klarer Anwendungsnutzen. Die XML-basierte Weitergabe der Konfigurationen ermöglicht eine medienbruchfreie Übertragung in Visualisierungsumgebungen wie Blender oder Unity. Farbkonzepte, Materialien und Layouts können so frühzeitig und interaktiv bewertet werden, ganz ohne physische Mockups. Damit wird die Galley zu einem aktiven Bestandteil der Markeninszenierung in der Kabine, wie in Kapitel 2.3.3 ausgeführt.

Zusammenfassend zeigt dieses Kapitel, dass die entwickelte Methodik weit über ein rein technisches Modell hinausgeht. Sie verbindet logikbasierte Automatisierung, ressourcengestützte Auslegung, digitale Visualisierung und strukturierte Bewertung in einem durchgängigen System. Trotz der genannten Grenzen hinsichtlich struktureller Tiefe und Systemvielfalt stellt die Arbeit in ihrer Gesamtheit ein methodisches Novum dar und leistet einen substantiellen Beitrag zur datengetriebenen, virtuellen Entwicklung kabinenintegrierter Subsysteme in der Luftfahrt.

8.2 Validität und Aussagekraft der Ergebnisse

Die im Rahmen der Methode erzeugten Ergebnisse beruhen auf einer fundierten Kombination aus realen Systemdaten, normierten Literaturwerten und nachvollziehbaren Modellannahmen. Hervorzuheben ist der Einsatz technischer Ist-Daten, etwa der elektrischen Leistungsaufnahmen typischer Galley-Geräte wie Öfen, Kaffeemaschinen und Wasserkocher sowie standardisierter geometrischer Parameter. Diese stammen aus verlässlichen Herstellerangaben und etablierten Luftfahrtstandards und bilden eine belastbare Grundlage für die energetische und massenbezogene Bewertung der Konfigurationen.

In Bereichen, in denen keine spezifischen Airline-Daten vorlagen, insbesondere hinsichtlich ressourcenbezogener Verbrauchswerte innerhalb der Servicekonzepte, wurde mit realitätsnahen Annahmen gearbeitet. Dazu zählen branchenübliche Durchschnittswerte zum Abfallaufkommen pro Passagier und Flugstunde, zum Getränkeverbrauch je Service-Durchgang sowie zur Häufigkeit von Bordservice-Zyklen auf Mittel- und Langstreckenflügen. Diese Annahmen basieren auf publizierten Richtwerten und Erfahrungsdaten aus der Kabinenlogistik. Auch wenn eine Kalibrierung anhand echter Betriebsdaten bislang nicht erfolgen konnte, bieten sie eine konsistente Grundlage zur vergleichenden Bewertung von Konfigurationen.

Die Ergebnisse zeichnen sich durch eine hohe formale Validität aus. Die Modellstruktur ist deterministisch aufgebaut, sämtliche Rechenschritte basieren auf transparent dokumentierten Eingaben und sind reproduzierbar. Die Anwendung eines einheitlichen Bewertungsrasters sowie die Möglichkeit, Konfigurationen systematisch mit Referenzvarianten zu vergleichen, stärken die Aussagekraft zusätzlich. Damit können belastbare Differenzanalysen durchgeführt werden, ohne dass dabei komplexe Simulationsumgebungen erforderlich wären.

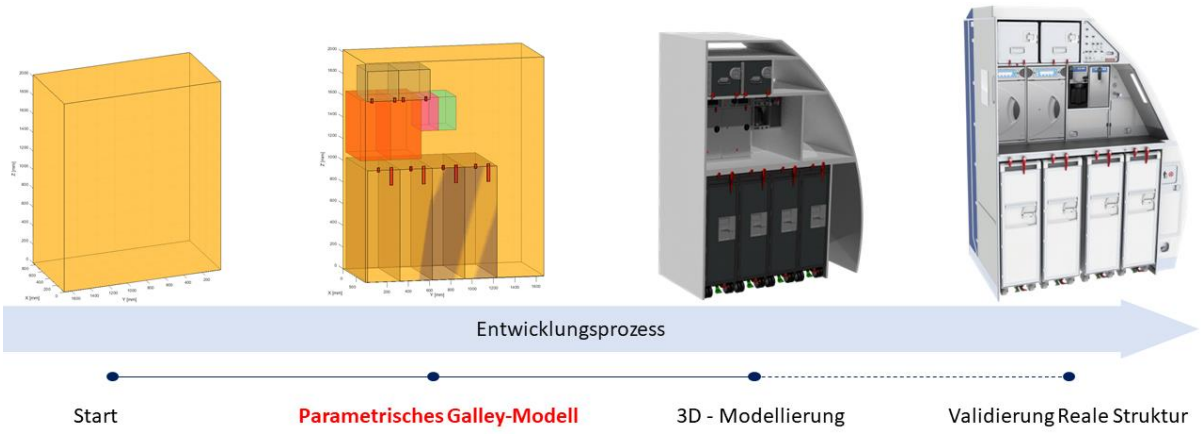

Abbildung 8-1: Durchgängiger Entwicklungsprozess zur modellbasierten Galley-Auslegung

Das entwickelte Modell ermöglicht erstmals die durchgängige Überführung parametrisch erzeugter Galley-Konfigurationen in eine immersive VR-Umgebung. Der Vergleich mit der realen Struktur zeigt eine hohe Übereinstimmung in Bauraumausnutzung und Geräteanordnung und bestätigt die Validität der modellbasierten Auslegung (Abb. 8.1).

Über die rein numerische Bewertung hinaus unterstützt das Modell die Ergebnisinterpretation durch eine medienbruchfreie Visualisierung in gängigen Umgebungen wie Blender oder Unity. Konfigurationen lassen sich damit nicht nur bewerten, sondern auch anschaulich darstellen – ein Aspekt, der insbesondere in interdisziplinären Entwicklungsumgebungen von hoher Bedeutung ist.

Die entwickelte Lösung beweist damit nicht nur technische Funktionalität, sondern auch methodische Anschlussfähigkeit. Durch den datengetriebenen Aufbau lassen sich Analyseergebnisse klar herleiten, vergleichen und dokumentieren. Dies ermöglicht eine objektive Entscheidungsgrundlage für Variantenvergleiche in frühen Phasen der Flugzeug- und Kabinenauslegung, unabhängig davon, ob das System durch Airlines, Hersteller oder Zulieferer genutzt wird.

8.3 Diskussion der Umfrageergebnisse

Die Umfrageergebnisse zeigen eine grundsätzlich hohe Zustimmung zum Konzept von Self-Service-Stationen während des Fluges. Insgesamt 65 Prozent der Teilnehmenden gaben an, sich vorstellen zu können, Snacks und Getränke eigenständig zu entnehmen. Dies weist auf eine grundsätzliche Offenheit gegenüber alternativen Servicemodellen hin. Gleichzeitig werden in den Freitextantworten konkrete Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung thematisiert. Kritisch hinterfragt werden unter anderem die räumlichen Bedingungen in der Kabine (Enge der Gänge, eingeschränkte Bewegungsfreiheit in Abhängigkeit vom Sitzplatz). Auch der Wunsch nach digitalen Vorbestellmöglichkeiten etwa per App wurde mehrfach geäußert. Dabei zeigt sich jedoch eine gewisse Ambivalenz. Während einige Teilnehmende den Vorbestellprozess begrüßen, lehnen andere eine fixe Auswahl vor dem Flug ab, da sich spontane Essenswünsche oder situative Präferenzen während des Fluges ändern könnten. Insgesamt deutet sich an, dass die grundsätzliche Akzeptanz stark vom konkreten Ausgestaltungskonzept und dessen Kommunikation abhängt. Die Unsicherheit über den Ablauf und die Rahmenbedingungen könnte die Einschätzung der Befragten beeinflussen und sollte in frühen Designphasen berücksichtigt werden.

Trotz der grundsätzlich hohen Offenheit gegenüber Self-Service-Angeboten lässt sich eine anhaltende Relevanz des klassischen Bordservices erkennen. Etwa die Hälfte der Befragten stuft die Versorgung mit Speisen und Getränken während des Fluges als wichtig ein. Ergänzend äußerten einige Teilnehmende im Freitext den Wunsch nach persönlichem Kontakt zur Kabinenbesatzung, was auf ein Bedürfnis nach individueller Betreuung und Komfort hindeutet. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse eine klare Differenzierung in der Serviceerwartung in Abhängigkeit von der Flugdauer. Verpflegung wird mehrheitlich erst ab einer Reisedauer von drei Stunden als notwendig angesehen. Dieser Zusammenhang legt nahe, dass klassische Serviceformen nicht generell in Frage gestellt werden, sondern sich an der Fluglänge und dem individuellen Komfortbedürfnis orientieren sollten. Vor diesem Hintergrund erscheint ein hybrides Versorgungskonzept als sinnvoll, das auf Kurzstrecken ein reduziertes Self-Service-Angebot vorsieht und auf längeren Flügen ergänzend klassische Elemente integriert.

Einige Teilnehmende äußerten im Freitext Bedenken hinsichtlich einer potenziellen Benachteiligung durch die Sitzplatzlage, etwa bei Fensterplätzen mit eingeschränkter Bewegungsfreiheit. Die Nutzung von Self-Service-Stationen könne unter diesen Umständen als unkomfortabel oder ungerecht empfunden werden. Eine nähere Betrachtung dieser Argumentation relativiert jedoch diese Wahrnehmung. Auch unabhängig vom Servicekonzept müssen Passagiere mit Fensterplatz bei Bedarf aufstehen, z.B um die Toilette aufzusuchen, bei gesundheitlichen Einschränkungen oder häufigerem Bewegungsbedarf. Ebenso sind potenzielle

Wartezeiten vor der Station kritisch zu betrachten. Es ist davon auszugehen, dass sich der Nutzungsbedarf nicht bei allen Fluggästen gleichzeitig einstellt, sondern sich über einen längeren Zeitraum verteilt. Auch das Argument, dass Mitreisende durch aufstehende Personen gestört würden, relativiert sich, da dies bei anderen Kabinenaktivitäten wie dem Toilettengang im Rahmen der normalen Kabinendynamik ebenfalls unvermeidbar ist. Zur Koordinierung der Nutzungszeiten wäre es zudem denkbar, diese über Ansagen oder Anzeigen in der Kabine gezielt zu steuern. Die befürchteten Nutzungskonflikte lassen sich so durch ein durchdachtes Kabinenmanagement ggf. minimieren.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit zeigt, dass ökologische Aspekte für einen Großteil der Befragten eine hohe Relevanz besitzen. Rund 70 Prozent stuften Nachhaltigkeit beim Fliegen als eher oder sehr wichtig ein. In den Freitextantworten spiegelte sich dieses Bewusstsein auf unterschiedliche Weise wider. Einige Teilnehmende betrachteten Self-Service-Ansätze potenziell positiv, da sie mit einem reduzierten Ressourcenverbrauch verbunden sein könnten. Andere wiederum stellten grundsätzlich die ökologische Legitimität des Fliegens in Frage und forderten eine stärkere gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dessen Auswirkungen. In einzelnen Kommentaren wurde sogar die vollständige Abschaffung von Bordverpflegung vorgeschlagen, um Konsum und Müll zu reduzieren. Diese Rückmeldungen deuten darauf hin, dass die Diskussion um Kabinenservice nicht nur unter funktionalen und komfortbezogenen Gesichtspunkten geführt wird, sondern auch normative und ethische Bewertungen einschließt. Damit eröffnet sich eine Perspektive, in der Self-Service-Konzepte nicht nur als Innovation verstanden werden, sondern auch als potenzieller Beitrag zu einer verantwortungsbewussteren Gestaltung des Luftverkehrs.

In den Rückmeldungen zur Umfrage zeigen sich vereinzelt widersprüchliche Haltungen, die auf eine ambivalente Wahrnehmung des Self-Service-Konzepts hinweisen. Während das Prinzip von einigen als spannend oder zukunftsweisend beschrieben wurde, äußerten dieselben Personen zugleich Zweifel an der praktischen Umsetzbarkeit und an möglichen Nebenwirkungen im Kabinenalltag. Diese Gleichzeitigkeit von Offenheit und Skepsis verweist auf ein Spannungsfeld zwischen Innovationspotenzial und wahrgenommenem Komplexitätszuwachs. Auch die hohe grundsätzliche Zustimmung bei gleichzeitig geäußerter Unsicherheit über konkrete Abläufe und Bedingungen deutet darauf hin, dass eine erfolgreiche Einführung solcher Systeme maßgeblich von der Art der Kommunikation abhängt. Eine transparente Darstellung, klare Funktionsweise und frühzeitige Visualisierung im Entwicklungsprozess könnten helfen, Vorbehalte zu reduzieren und Vertrauen aufzubauen. Die Befunde legen nahe, dass Nutzerakzeptanz nicht allein von technischen Lösungen, sondern in erheblichem Maße auch von deren Verständlichkeit und Einbettung in den Kabinenkontext abhängt.

9 Potential zur Weiterentwicklung

9.1 Erweiterung der Modelllogik

Die entwickelte Modelllogik stellt eine robuste Grundlage für die automatische Konfiguration und Bewertung von Galley-Systemen in Single-Aisle-Flugzeugen dar. Die aktuell implementierte Anwendung auf die A320-Familie erlaubt bereits eine regelbasierte Variantenbildung und dient als methodisches Grundgerüst für die digitale Kabinenauslegung. Für eine breitere Nutzung im industriellen Kontext ist jedoch eine sukzessive Erweiterung der Modelllogik erforderlich.

Ein zentraler nächster Schritt liegt in der Übertragung des Modells auf Twin-Aisle-Flugzeuge wie den Airbus A350. Diese zeichnen sich durch komplexere Kabinenlayouts mit mehreren räumlich getrennten Galley-Zonen aus, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an Geräteausstattung, Versorgungslogistik und Energieinfrastruktur stellen. Die Modelllogik müsste entsprechend angepasst werden, um separate Instanziierungen pro Galley-Bereich zu ermöglichen und deren funktionales Zusammenspiel ganzheitlich abzubilden. Eine A350-Konfiguration könnte beispielsweise einen Fullservice-Bereich im Heck, ein Self-Service-Modul in der Business-Class und eine kleinere Vorbereitungszone im vorderen Kabinensegment umfassen. Für jede dieser Regionen müssten spezifische Versorgungsbedarfe ermittelt und individuelle Platzierungsstrategien entwickelt werden.

Darüber hinaus gewinnt die Frage nach systemischen Randbedingungen zunehmend an Bedeutung. Künftig könnte es erforderlich sein, Konfigurationen unter technischen Restriktionen zu erzeugen, etwa wenn Airlines eine maximale Leistungsaufnahme von 20 kW oder ein zulässiges Systemgewicht von 500 kg nicht überschreiten dürfen. Zur Abbildung solcher Szenarien, müsste die bestehende regelbasierte Konfigurationslogik um constraintbasierte Mechanismen erweitert werden. Das Modell würde dabei innerhalb definierter Parametergrenzen automatisch eine gültige Auslegung erzeugen, die sowohl service- als auch systemspezifischen Anforderungen genügt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Parametrik des Modells nicht nur im Hinblick auf Variabilität, sondern auch auf Zielgrößenoptimierung weiterentwickelt werden kann. Die Schaffung entsprechender Konfigurationsräume eröffnet perspektivisch die Möglichkeit, auch interaktive Optimierungsprozesse zu integrieren – etwa zur Auswahl der leichtesten, energieeffizientesten oder kostengünstigsten Galley-Variante unter mehreren zulässigen Alternativen.

9.2 Anpassung von Serviceprofilen an Missionsprofile und kulturelle Kontexte

Ein zentrales Weiterentwicklungspotenzial der entwickelten Methode liegt in der kontextsensitiven Ausgestaltung von Serviceprofilen. Während die erarbeitete Modelllogik zwischen grundlegenden Konzepten wie Getränkeservice und Fullservice differenziert, erfolgt die Auswahl derzeit unabhängig von realen Flugmissionen, Streckenprofilen oder kulturellen Besonderheiten. Für eine realitätsnähere und airline-spezifische Konfiguration ist es notwendig, diese Einflussgrößen explizit in die Modellierung einzubeziehen.

Ein denkbarer Ansatz besteht darin, Missionsprofile mit konkreten Flugrouten zu verknüpfen. So unterscheiden sich etwa europäische Kurzstreckenflüge mit minimalem Bordservice deutlich von transkontinentalen Verbindungen mit komplexeren Abläufen. Zusätzlich lassen sich kulturelle Konsumgewohnheiten gezielt berücksichtigen – unabhängig von der Fluglänge. So ist beispielsweise das Frühstück in westlich geprägten Regionen oft eine kalte Mahlzeit, während es in asiatischen Kulturräumen typischerweise warm serviert wird. Solche Unterschiede wirken sich direkt auf die Auslegung der Galley aus, etwa in Bezug auf Wärmeeinheiten, Wasservorräte oder Energiebedarf. Die Erweiterung um solche Parameter ermöglicht eine präzisere Auslegung der Geräteanzahl, Ressourcendimensionierung und Ladezyklen und damit eine detailliertere Galley-Konfiguration.

Darüber hinaus bieten kulturelle Anforderungen und Airline-spezifische Servicemodelle weitere Differenzierungsmöglichkeiten. Eine Airline mit gehobenem Serviceanspruch und individualisiertem Mehrklassenangebot stellt andere Anforderungen an das Galley-Layout als eine Airline mit reduziertem Kabinenkomfort und vereinfachtem Einheitsservice. Die Integration solcher Faktoren erlaubt es, Konfigurationen nicht nur funktional und logistikorientiert, sondern auch im Sinne des Markenprofils und der Passagiererwartungen zu gestalten.

Langfristig ließen sich kontextbasierte Serviceprofile mit realen Flugplaninformationen, Zielmärkten und saisonalen Mustern verknüpfen. Dadurch könnten die Serviceanforderungen dynamisch an den jeweiligen Einsatzfall angepasst werden – etwa für bestimmte Tageszeiten, Kulturkreise oder Zielgruppen. Die daraus resultierenden Varianten würden nicht nur als Grundlage für eine genauere Ressourcen- und Energieanalyse dienen, sondern auch den VR-basierten Customizing-Prozess deutlich bereichern.

9.3 Vertiefung der Analyse- und Bewertungsebene

Die bislang in der Methode implementierte Bewertungslogik basiert auf technischen Leistungskennzahlen, die als Mittelwerte über den gesamten Flugverlauf berechnet werden. Dazu zählen unter anderem die Gesamtmasse, der Energiebedarf, der Frischwasserverbrauch und das Abfallaufkommen. Diese Parameter ermöglichen eine grundsätzliche Bewertung und den Vergleich alternativer Galley-Konfigurationen, bilden jedoch das zeitliche Verhalten und die dynamischen Belastungen im Flugbetrieb bislang nicht ab.

Gerade vor dem Hintergrund kontextabhängiger Serviceprofile – wie etwa dem in Kapitel 9.2 genannten Beispiel eines warmen Frühstücks auf asiatischen Flugrouten – zeigt sich, dass einzelne Phasen des Bordservice zu temporären Lastspitzen führen können. Da der gesamte Serviceprozess ausschließlich in der Reiseflughöhe stattfindet, konzentriert sich die Nutzung energieintensiver Geräte wie Öfen oder Wasserkocher auf einen vergleichsweise kurzen Zeitraum. Eine rein mittelorientierte Betrachtung würde diese kurzzeitigen Spitzenbelastungen überdecken und könnte damit zu einer Fehleinschätzung der elektrischen Anforderungen an das Bordnetz führen.

Um diesen Aspekt präziser zu erfassen, bietet sich die Implementierung ereignisbasierter Simulationen an. Dabei werden Serviceprozesse und Crew-Aktivitäten in zeitlich gestaffelten Intervallen modelliert. Die resultierenden Lastprofile könnten genutzt werden, um kritische Phasen der Stromversorgung zu identifizieren. Gleichzeitig ließen sich durch eine Erweiterung des Modells auch logistische Abläufe, etwa Wegezeiten der Crew, Gerätetausch oder Wartezeiten, differenzierter erfassen und bewerten.

Insgesamt würde die Integration dynamischer Analyseebenen die Aussagekraft der Methode erhöhen. Sie eröffnet neue Möglichkeiten für die Auslegung energie- und versorgungstechnischer Systeme und verbessert die Grundlage für systemübergreifende Designentscheidungen im Kontext des digitalen Flugzeugentwicklungsprozesses.

10 Schlussbetrachtung

10.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die Auslegung und Integration von Galley-Systemen stellt im Kontext der modernen Flugzeugkabinenentwicklung eine vielschichtige Herausforderung dar. Neben klassischen Anforderungen wie Bauraumnutzung, Gewicht und logistischen Abläufen gewinnen zunehmend Aspekte wie Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Systemintegration an Bedeutung. In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Modell zur parametrischen Galley-Modellierung entwickelt, das in einen bestehenden virtuellen Entwicklungsprozess des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt eingebettet ist und gleichzeitig die vorgenannten Aspekte berücksichtigt.

Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer skalierbaren Methodik, mit der Galley-Systeme abhängig vom Flugzeugtyp, Serviceprofil und Missionsprofil automatisch konfiguriert und systematisch bewertet werden können. Dadurch wird eine frühzeitige, kontextabhängige Auslegung im Sinne des airline-spezifischen Customizings ermöglicht. Hierzu wurden drei Forschungsfragen adressiert: die Integration von Galleys als digitale Subsysteme, die automatisierte Konfiguration auf Basis von Servicekonzepten und die Bewertung alternativer Konfigurationen anhand geeigneter Leistungskennzahlen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell basiert auf einem objektorientierten MATLAB-Framework, in dem die Galley als modulare Klassenarchitektur mit klar getrennten Komponenten für Struktur, Geräte, Ressourcenlogik und Kennzahlen implementiert ist. Abhängig vom Flugzeugtyp (z. B. A320) werden passende Galley-Instanzen automatisch erzeugt und mit Geräten bestückt. Die Konfiguration erfolgt durch die Auswahl eines Service- und Missionsprofils, auf dessen Basis Ressourcengrößen wie Mahlzeiten, Getränke, Abfall und Frischwasser berechnet sowie die entsprechenden Geräte integriert werden. Die regelbasierte Platzierungslogik berücksichtigt dabei räumliche, ergonomische und technische Rahmenbedingungen.

Ein wesentliches Element des Modells ist die automatisierte Berechnung relevanter KPIs. Dazu zählen unter anderem die Systemmasse, Schwerpunktlage, elektrische Leistungsaufnahme, abgeleiteter Kerosinverbrauch sowie CO_2-Emissionen und Betriebskosten. Die Ergebnisse werden strukturiert im MATLAB- und Excel-Format ausgegeben und stehen für Folgeprozesse wie Visualisierung, Bewertung oder Virtual Reality bereit.

Zur Anwendung und Validierung der entwickelten Methode wurde ein A320-Modell mit einer vorderen Half-Galley und einer Full-Galley simuliert. Zwei unterschiedliche Servicekonzepte (Fullservice und Getränkeservice) wurden automatisiert durchlaufen, parametrisch bestückt und

analysiert. Die Auswertung zeigt signifikante Unterschiede in Masse, Energiebedarf und Ressourcenauslegung und verdeutlicht das Potenzial des Modells zur frühzeitigen Konzeptbewertung.

Das entwickelte Modell demonstriert, wie sich Galleys als hochvernetzte Subsysteme digital abbilden, konfigurieren und bewerten lassen. Sie ermöglicht eine konsistente, nachvollziehbare und automatisierbare Galley-Auslegung, die sowohl technische als auch betriebliche und ökologische Kriterien integriert. Gerade im Hinblick auf steigende Anforderungen an Nachhaltigkeit, Effizienz und Variantenvielfalt in der Luftfahrtindustrie bietet die entwickelte Methode eine praxisnahe und übertragbare Lösung. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Digitalisierung der Kabinenauslegung und unterstützt die Entwicklung effizienter, nachhaltiger Luftfahrtsysteme im Sinne eines modellbasierten Ansatzes.

Die Umfrage liefert wertvolle Einblicke in die Perspektive potenzieller Nutzerinnen und Nutzer und ergänzt die technische Modellierung um eine anwenderorientierte Dimension. Sie macht deutlich, dass innovative Konzepte wie Self-Service nicht isoliert betrachtet, sondern im Zusammenspiel mit Komfort, Praktikabilität und Nachhaltigkeit gestaltet werden müssen. Damit bildet sie eine wichtige Grundlage für die weiterführende Bewertung und Entwicklung zukunftsfähiger Kabinenlösungen.

10.2 Ausblick

Zentrale Weiterentwicklungsmöglichkeiten bestehen insbesondere in zwei Bereichen:

Einerseits lässt sich das Modell auf weitere Flugzeugmuster und Kabinenkonzepte ausweiten, etwa mit integrierten Self-Service-Bereichen oder Socializing Zones. Hierfür wäre eine vertiefte Einbindung angrenzender Systeme wie Stromversorgung, Fire Protection oder struktureller Anbindung erforderlich, damit sich die Galley als vernetztes Subsystem konsistent abbilden lässt.

Andererseits eröffnet die Integration dynamischer Betriebsmodelle die Möglichkeit, zeitliche Energieverläufe, Serviceprozesse und logistische Abläufe detaillierter zu analysieren. Ergänzende Bewertungskriterien wie Lebenszykluskosten, Wartungsaufwand oder ergonomische Belastung würden die Entscheidungsgrundlage verbreitern und die Anwendbarkeit der Methode auf betriebliche Fragestellungen erweitern.

Die Kombination beider Entwicklungspfade stärkt die Aussagekraft des Modells und legt die Grundlage für eine disziplinübergreifende, ökologisch und betrieblich fundierte Auslegung zukünftiger Kabinenlösungen im Rahmen eines ganzheitlichen, digital unterstützten Entwicklungsprozesses.

Literaturverzeichnis

AeroLux Ltd. 2015. *Aerolux Steam & Convection Oven AL-OU50-2000 – Technical Specification.* [Online] 2015. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.aerolux.co.uk/documents/AL-OU50-2000.pdf.

Airbus. 2023. https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/airspace-cabin/airspace-cabin-vision-2035. 2023.

—. 2016. https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-03-pioneering-bionic-3d-printing. *Pioneering bionic 3D printing.* [Online] 03. 03 2016. [Zitat vom: 04. 05 2025.]

—. 2017. https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-02-aviations-material-evolution. *Aviation's material evolution.* [Online] 18. 02 2017. [Zitat vom: 04. 05 2025.]

Airbus S.A.S. 2024. *Aircraft Characteristics – Airport and Maintenance Planning: Airbus A320 Family.* Toulouse: Airbus S.A.S, 2024.

ATI. 2022. *Sustainable Cabin Design – FlyZero Programme Report.* London: Aerospace Technology Institute, 2022.

Bahns, Tammo E., Gebhardt, Nicolas und Krause, Dieter. 2014. *A Modularization Approach for Aircraft Cabin Components.* In: *4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST)*, Hamburg, Deutschland, April 2013.

Bauch, A. 2001. *Ergonomie in der Flugzeugkabine – Passagierprozesse und manuelle Arbeitsabläufe.* München: Lehrstuhl für Luftfahrttechnik; TU München, 2001.

BDLI. 2023. *The Role of Cabin and Cargo for Sustainable Aviation.* Berlin: Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie, 2023.

Beckert, Florian. 2020. *Automatisierte Kabinendarstellung der CPACS-Flugzeugdefinition in der Virtuellen Realität.* Projektarbeit. Hamburg: Technische Universität Hamburg, 2020.

Camba, Jorge D., Contero, Manuel und Company, Pedro. 2016. *Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability.* In: *Computer-Aided Design*, Vol. 74, Mai 2016, pp. 18–31. https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.12.003

Chen, Pin-Hsuan, et al. 2021. *Prevalence of musculoskeletal discomfort among female cabin crew in Taiwan.* Beijing, China: Tsinghua University, 2021.

Christiansen, Finn H., Laukotka, Fabian und Krause, Dieter. 2024. *Modellbasierte Dokumentation der Flugzeugkabine im Kontext des Retrofits.* In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024 (DLRK 2024)*. Hamburg: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V. https://doi.org/10.25967/630535

Collins Aerospace. 2025a. https://www.crystal-cabin-award.com/media-downloads. *Galley.ai system – Crystal Cabin Award Entry Description.* [Online] 2025. [Zitat vom: 04. 05 2025.]

Diehl Aviation. 2018. *Smart Galley – A modular galley concept for maximum flexibility.* [Online] 2018. [Zitat vom: 03. 06 2025.] https://www.diehl.com/aviation/de/innovation/innovative-loesungen/smart-galley/.

—. 2025a. https://www.crystal-cabin-award.com/media-downloads. [Online] 2025. [Zitat vom: 02. 05 2025.]

—. 2025b. https://www.diehl.com/aviation/de/presse-und-medien/presse/diehl-aviation-gewinnt-crystal-cabin-award-2025-fuer-space/. [Online] 2025. [Zitat vom: 02. 05 2025.]

—. 2025c. https://www.diehl.com/aviation/en/innovation/innovative-solutions/galley-bar-module/. *Galley Bar Module.* [Online] 2025. [Zitat vom: 04. 05 2025.]

DLR. 2021. *Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt: Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal.* https://www.dlr.de : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2021.

Dreamstime. *Aircraft galley aft section in an Airbus commercial passenger airplane* [Bild]. [Online] [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.dreamstime.com/ircraft-galley-aft-section-airbus-ircraft-galley-aft-section-airbus-commercial-passenger-airplane-image262006075.

Egret Aviation. 2022. *Aircraft Galley Equipment.* [Online] 2022. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.egret.aero/en/components/media/Full-Brochure_2022-Egret_Aviation-en.pdf.

EUROCONTROL. 2022. *Environmental Assessment Report 2022.* [Online] Brussels: European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2022. https://www.eurocontrol.int/publication/environmental-assessment-report-2022.

FINAVIA. 2019. *How much water should you drink on a flight? Tips from a travel medicine specialist.* [Online] FINAVIA, 05 2019. https://www.finavia.fi/en/newsroom/2019/how-much-water-should-you-drink-flight-tips-travel-medicine-specialist.

Flug Revue. 2024. *Kabine? Leicht und smart! Flug Revue*, 2024, Heft 5/2024.

Fuchs, Mara, et al. 2021a. *A collaborative knowledge-based method for the interactive development of cabin systems in virtual reality.* In: *Computers in Industry*, Vol. 130, 2021, Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103590.

Fuchs, Mara, et al. 2021b. *Experience of Conceptual Designs and System Interactions for the Aircraft Cabin in Virtual Reality.* In: *AIAA AVIATION 2021 Forum*, 2.–6. August 2021, Virtual Event. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). https://doi.org/10.2514/6.2021-2773

Fuchs, Mara, et al. 2022. *Enhancement of the virtual design platform for modeling a functional system architecture of complex cabin systems.* In: *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 13, 2022, pp. 1101–1117. https://doi.org/10.1007/s13272-022-00608-z

Fuchs, Mara, et al. 2023a. *An Approach for Linking Heterogeneous and Domain-Specific Models to Investigate Cabin System Variants.* In: *Proceedings of the 33rd Annual INCOSE International Symposium (IS2023)*. Honolulu, HI, USA, 15.–20. Juli 2023. https://doi.org/10.1002/iis2.13090

Fuchs, Mara, et al. 2023b. *Modellierungsstrategie zur Analyse des Einflusses von alternativen Antriebskonzepten auf Kabinensysteme.* In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023 (DLRK 2023)*. Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V. https://doi.org/10.25967/610104

Glitsch, Ulrich, et al. 2007. *Physical workload of flight attendants when pushing and pulling trolleys aboard aircraft.* Sankt Augustin: Elsevier Ltd., 2007.

Hanna, Michael, et al. 2021. *Model-based application of the methodical process for modular lightweight design of aircraft cabins.* In: *Procedia CIRP*, Vol. 100, 2021, pp. 637–642. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.143

Hanna, Michael, Schwenke, Jonas und Krause, Dieter. 2020. *Inconsistency Management for Product Families with Many Variants through a Model-Based Approach in Modular Lightweight Design.* In: *Proceedings of the International Design Conference – DESIGN 2020*. Cambridge University Press.

Hubwieser, Peter, Mühling, Andreas und Aiglstorfer, Gerd. 2013. *Fundamente der Informatik.* München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2013.

IATA. 2025a. *Jet Fuel Price Monitor.* [Online] International Air Transport Association, 2025. https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor.

—. 2025b. *Air Passenger Market Analysis – March 2025.* s.l.: International Air Transport Association, 2025.

—. 2023. *Cabin Waste Handbook – Strategies for reducing, managing and tracking waste in the aircraft cabin.* s.l.: IATA Publications, 2023.

IPCC. 2016. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2: Energy.* s.l.: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2016.

Jonas, Henry; Krause, Dieter. 2011. *Strategic Planning for Modular Product Families*. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED11)*, Technical University of Denmark, Kopenhagen.

Jonas, Henry, Gumpinger, Thomas und Krause, Dieter. 2019. *FLEXGALLEY – INNOVATIVE APPROACH FOR A MODULAR DESIGN OF AN AIRCRAFT-GALLEY.* Hamburg: Institute for Productdevelopment and Mechanical Engineering Design, 2019.

Keiser, Dennis, Demir, Mehmet und Freitag, Michael. 2024. *Implementation of Life Cycle Assessment into the Customization Process of Aircraft Cabins.* In: *Transportation Research Procedia*, Vol. 81, 25–34. 13th International Conference on Air Transport – INAIR 2024. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.11.004.

Keiser, Dennis, et al. 2025a. *Enabling Aircraft Recycling Through Information Sharing and Digital Assistance Systems.* In: Kohl, H., Seliger, G., Dietrich, F., Mur, S. (Hrsg.): *Sustainable Manufacturing as a Driver for Growth. GCSM 2023.* Bremen: SpringerLinkNature, 2025.

Keiser, Dennis, et al. 2023. *Method to Model the Environmental Impacts of Aircraft Cabin Configurations during the Operational Phase.* Bremen: s.n., 2023.

Kommission, EU. 2019. *The European Green Deal.* Brüssel: s.n., 2019.

Lahres, Bernhard, Raýman, Gregor und Strich, Stefan. 2021. *Objektorientierte Programmierung.* Bonn: Rheinwerk Computing / Rheinwerk Verlag, 2021.

Laukotka, Fabian, Hanna, Michael und Krause, Dieter. 2021. *Digital twins of product families in aviation based on an MBSE-assisted approach.* In: *Procedia CIRP*, Vol. 100, 2021, pp. 684–689. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.144

Lufthansa Group. 2023. https://www.lufthansagroup.com/en/themes/lufthansa-allegris.html. [Online] 2023. [Zitat vom: 02. 05 2025.]

Moenck, Keno, et al. 2024. *Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities.* In: *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 15, 2024, pp. 1051–1067. https://doi.org/10.1007/s13272-024-00740-y

Müller, Heinrich und Weichert, Frank. 2015. *Vorkurs Informatik – Der Einstieg ins Informatikstudium.* Dortmund: Springer Vieweg, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-658-08102-7.

Özbay, Ismail und Gokceviz, Nebil Arda. 2022. *Towards zero-waste airports: a case study of Istanbul Airport.* In: *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 24, 2022, pp. 134–142. Springer Japan KK. https://doi.org/10.1007/s10163-021-01308-2

Rajendran, Ganesh Vivek, et al. 2021. *Multi-fidelity Parametric Cabin Component Modeling Approach for Application-driven Geometry Generation. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2021 (DLRK 2021).* Hamburg: DLR Institute of System Architectures in Aeronautics.

Rauscher, Fiete, et al. 2024. *Abstraktion von hochauflösenden 3D Ist-Daten in einen konsistenten und systemübergreifenden Datensatz für die Bewertung des DLR Forschungsflugzeugs ISTAR.* In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024 (DLRK 2024)*. Hamburg: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. https://doi.org/10.25967/630368.

Risse, Kristof. 2018. *Das virtuelle Flugzeug – Die Digitalisierung der Luftfahrt.* 2018. S. 14–17.

RTX. 2025. https://www.rtx.com/news/news-center/2025/04/09/rtxs-collins-aerospace-wins-crystal-cabin-award-for-its-galley-ai-solution. [Online] 2025. [Zitat vom: 04. 05 2025.]

Safran Group. 2025a. *CONCERT® Steam and Convection Oven – New ergonomic and robust features for best served meals.* [Online] 2025. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.safran-group.com/products-services/concert-steam-and-convection-oven-new-ergonomic-and-robust-features-best-served-meals.

—. 2025b. *CONCERT® Coffee Maker – Expand your beverage selection for your passengers with an all-purpose brewer.* [Online] 2025. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.safran-group.com/products-services/concert-coffee-maker-expand-your-beverage-selection-your-passengers-all-purpose-brewer.

—. 2025c. *INFINITE series – A combination to fit your specific needs in the galley.* [Online] 2025. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.safran-group.com/products-services/offers-infinite-series-combination-fit-your-specific-needs-galley.

—. 2025d. *MAXFlex Line – Popular modular galleys for flexible cabin layouts.* [Online] 2025. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.safran-group.com/products-services/popular-modular-maxflex-line-galleys.

Safran Group. 2025e. *CONCERT® Water Boiler – The most reliable insert to provide hot water inflight.* [Online] 2025. [Zitat vom: 25. 03 2025.] https://www.safran-group.com/products-services/concert-water-boiler-most-reliable-insert-provide-hot-water-inflight.

Safran Group. 2025f. https://www.crystal-cabin-award.com/media-downloads. [Online] 2025. [Zitat vom: 02. 05 2025.]

Schabe, Daniel. 2015. *Modellbasierte Entwicklung von Energiemanagement-Methoden für Flugzeug-Energiesysteme.* Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 2015.

Shell Aviation. 2021. *Aviation Fuels – Technical Review.* [Online] Shell Global Solutions B.V., 2021. https://www.shell.com/business-customers/aviation/aft.html.

Stein, Ulrich. 2015. *Objektorientierte Programmierung mit MATLAB.* Hamburg: Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN: 978-3-446-44536-9.

Steyer, Ralph. 2024. *Programmierung mit Python.* Bodenheim: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2024.

Tofalli, Niki, Loizia, Pantelitsa und Zorpas, Antonis A. 2018. *Passengers waste production during flights.* In: *Environmental Science and Pollution Research*, Springer-Verlag GmbH, 2018. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0800-x.

Vilgertshofer, Simon Felix Franziskus. 2022. *Kopplung von Graphersetzung und parametrischer Modellierung zur Unterstützung des modellbasierten Entwerfens und der Erstellung mehrskaliger Modelle.* Dissertation. München: Technische Universität München, 2022.

Digitaler Anhang

Der Anhang ist ausschließlich in digitaler Form beigefügt und befindet sich auf der beiliegenden CD-ROM. Er enthält sämtliche ergänzenden Materialien, die zur Nachvollziehbarkeit und Vertiefung der in dieser Arbeit dargestellten Inhalte beitragen.

Die CD-Rom umfasst folgende Ordner und Dateien:

- MATLAB:
  - MainGalley.pdf
  - createGalleysByAircraft.pdf,
  - analyzeGalleysByAircraft.pdf
  - analyzeServiceProcessbyGalley.pdf
  - getDeviceWidth.pdf
  - HalfGalley.pdf
  - FullGalley.pdf,
  - Boiler.pdf,
  - CoffeeMaker.pdf,
  - Oven.pdf,
  - SU.pdf,
  - Trolley.pdf
  - LatchT1.pdf,
  - LatchT2.pdf,
  - LatchT3.pdf

- Ergebnisse:
  - GalleyServiceAnalysis.mat
  - GalleyServiceAnalysis.xlsx

- Umfrage:
  - Fragen_SelfService2.0
  - Flyer_SelfService2.0
  - Ergebnisse_SelfService2.0