

ENTWICKLUNG EINES PARAMETRISCHEN ANSATZES ZUR AUSLEGUNG UND ANALYSE DES WATER-/WASTE-SYSTEMS VON FLUGZEUGKABINEN IM VORENTWURF INNERHALB EINER DURCHGÄNGIGEN DIGITALEN ENTWURFSKETTE

B. Rüter*, V. Keilacker*, M. Fuchs*, J. Biedermann*, B. Nagel*

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

Zusammenfassung

Die Arbeit untersucht die frühzeitige Integration von Kabinensystemen in den Flugzeugentwurf. Aufgrund komplexer Wechselwirkungen zwischen Komponenten und Disziplinen sind Abhängigkeiten in frühen Entwicklungsphasen häufig nur eingeschränkt erkennbar. Die Berücksichtigung von Kabine und Kabinensystemen im Vorentwurf bietet daher weiteres Potenzial, da detaillierte Systemauslegungen oftmals erst in späteren Entwicklungsphasen und unter bereits weitgehend festgelegten Randbedingungen erfolgen. Dadurch können Freiheitsgrade für innovative Systemlösungen eingeschränkt und nachträgliche Integrationsaufwände erhöht werden.

Um Systemauslegung und -bewertung bereits in frühen Phasen des Flugzeugentwurfs zu ermöglichen, wird ein parametrischer Modellierungsansatz verfolgt. Dieser verbindet definierte Eingangsparameter mit automatisierten Berechnungsmethoden und der geometrischen Integration der Systemkomponenten. Änderungen relevanter Randbedingungen können dadurch in die Systemauslegung einfließen und deren Auswirkungen auf unterschiedliche Bewertungsgrößen untersucht werden. Auf diese Weise lassen sich neue oder veränderte Systeme frühzeitig in den Entwicklungsprozess integrieren, Varianten automatisiert erzeugen und deren Wechselwirkungen mit anderen Komponenten untersuchen. Die gewonnenen Ergebnisse können anschließend in den Vorentwurf zurückgeführt werden. Damit unterstützt die Methodik den Aufbau eines durchgängigen digitalen End-to-End-Prozesses, der Informationen zwischen Systemauslegung, geometrischer Integration und Gesamtentwurf verknüpft und eine frühzeitige sowie kosteneffiziente Untersuchung innovativer Lösungen ermöglicht.

Der parametrische Aufbau reduziert zugleich die erforderliche manuelle Interaktion mit den zugrunde liegenden Berechnungsmethoden. Anwender können über Eingangsparameter unterschiedliche Konfigurationen untersuchen, ohne sämtliche fachlichen Zusammenhänge der implementierten Modelle im Detail zu kennen. Ergänzend dient eine parametrische 3D-Darstellung der Kabine als Schnittstelle zur interdisziplinären Kommunikation. Berechnungsergebnisse werden mit ihrer geometrischen Darstellung verknüpft, sodass räumliche Abhängigkeiten und Auswirkungen von Systemänderungen auch für nicht an der jeweiligen Systementwicklung beteiligte Personen nachvollziehbar werden. Dadurch können unterschiedliche Fachdisziplinen frühzeitig in die Bewertung einbezogen und deren Anforderungen und Erkenntnisse in den Entwicklungsprozess zurückgeführt werden.

Die entwickelte Methodik wird am Beispiel des Water/Waste-Systems demonstriert. Ein parametrisches MATLAB-Modell ermöglicht die automatisierte Konfiguration und Positionierung der Systemkomponenten innerhalb der Kabine. Neben der räumlichen Integration werden auf Basis definierter Eingangsparameter, wie Passagierzahl oder Flugzeit, relevante Kenngrößen wie Ressourcenbedarf, Emissionen und Kosten bestimmt. Die Verknüpfung von parametrischer Systemauslegung, automatisierter Berechnung und geometrischer Darstellung innerhalb eines digitalen End-to-End-Prozesses ermöglicht somit eine konsistente Datennutzung und schafft die Grundlage für eine frühzeitige interdisziplinäre Bewertung von Kabinensystemen im Flugzeugvorentwurf.

Keywords

Kabinenentwurf, Parametrische Modellierung, Simulationsmodell, funktionale Analyse, virtueller Entwicklungsprozess, Lavatory

1. EINLEITUNG

Laut Prognosen internationaler Organisationen wie der International Civil Aviation Organization (ICAO) oder der International Air Transport Association (IATA) wird der weltweite Luftverkehr in den kommenden Jahrzehnten zunehmen [1] [2]. Trotz technologischer Fortschritte und Effizienzsteigerungen sorgen steigende Passagierzahlen sowie die wachsende Nachfrage nach Mobilität in der Luftfahrt weiterhin für einen hohen Bedarf an Ressourcen und Energie [3]. Die Luftfahrtindustrie steht zudem vor neuen Herausforderungen, bedingt durch alternative Antriebskonzepte, die Erreichung von Klimazielen und wachsende Anforderungen an Nachhaltigkeit, die sich aus veränderten Passagierbedürfnissen ergeben [4] [5]. Mithilfe tiefgreifender technologischer Innovationen möchte das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) einen Beitrag leisten, um diesen Herausforderungen zu entsprechen [6].

Um solche Konzepte bereits in einem frühen Entwicklungsstadium bewerten zu können, ist es erforderlich, nicht nur unterschiedliche Toolketten, sondern auch die zugrunde liegenden Fachdisziplinen miteinander zu verknüpfen, um eine durchgängige digitale Prozesskette zu gewährleisten [7].

Ein zentraler Ansatz dafür ist die vollständige Digitalisierung des Entwicklungs- und Betriebsprozesses. Das DLR verfolgt das Konzept einer durchgängig digital unterstützten Luftfahrtsystementwicklung, bei der alle Phasen virtuell abgebildet, analysiert und kontinuierlich optimiert werden [8]. Während digitale Methoden bisher vor allem bei Strukturen, Triebwerken und Aerodynamik eingesetzt wurden, gewinnt die Kabine als technisches Gesamtsystem zunehmend an Bedeutung [9] [10].

Die Flugzeugkabine besteht aus zahlreichen stark vernetzten Bauteilen und Systemen, deren komplexes Zusammenspiel die Gestaltung erschwert. Anforderungen an die Platzierung einzelner Komponenten sind oft nicht sofort erkennbar, da Modelle fehlen, Informationen verstreut vorliegen und die Kommunikation zwischen Fachexperten unzureichend ist [11]. Im klassischen Entwicklungsprozess wird die Kabine zunächst nur grob berücksichtigt, während eine detaillierte Auslegung erst in späteren Phasen erfolgt. Dadurch muss sich die Kabine bestehenden räumlichen und technischen Restriktionen anpassen, was Innovationen hemmt, den Integrationsaufwand erhöht und individuelle Anpassungen erschwert. Die virtuelle Integration auf Systemebene bietet hierbei die Möglichkeit, Systemanforderungen bereits vor dem Aufbau physischer Prototypen zu bewerten [12]. Ein zukunftsfähiger Ansatz erfordert die frühzeitige, integrierte und datenbasierte Abbildung komplexer Systeme [7]. Parametrische Modellierungsansätze ermöglichen die automatisierte Erstellung und Bewertung zahlreicher Varianten auf Basis definierter Eingaben [13]. In Kombination mit kontinuierlichem Datenmanagement können technische, betriebliche und kundenspezifische Anforderungen bereits

im Vorentwurf berücksichtigt werden [7], wodurch Integrationsrisiken reduziert und innovative Kabinenlösungen erleichtert werden.

Eine virtuelle Kabinendarstellung schafft dabei Transparenz, da Informationen direkt mit der Geometrie verknüpft werden und Ergebnisse auch für fachfremde Personen verständlich sind [14]. Durch den parametrischen Aufbau können zudem hinterlegte Berechnungs- und Auslegungsmethoden automatisiert auf Basis der vom Anwender hinterlegten Eingangsparameter ausgeführt werden, ohne dass dieser über detailliertes Fachwissen zu den zugrunde liegenden Berechnungsverfahren verfügen muss. Die Ergebnisse werden anschließend überführt und ermöglichen es, Zusammenhänge zwischen Systemkomponenten anschaulich darzustellen. Dadurch wird ein ganzheitlicher Überblick geschaffen, der eine interdisziplinäre Betrachtung unterstützt und die frühzeitige Entwicklung, Bewertung und Optimierung neuer Kabinendesigns ermöglicht.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur parametrischen Modellierung des Water/Waste-Systems in der digitalen Entwicklung von Flugzeugkabinen vorgestellt. Der Fokus liegt darauf, das System zu entwickeln, im Datenmodell zu verankern und so auszugestalten, dass es sich automatisch an unterschiedliche Layoutanforderungen anpasst. Zu diesem Zweck wird ein methodischer Ansatz entwickelt, der die Modellgenerierung, die Geometrieaufbereitung in Blender sowie die visuelle Darstellung in Unity miteinander verbindet und für Single-Aisle-Konfigurationen angewendet wird. Ausgangspunkt sind bestehende, etablierte, parametrisierte Entwurfsalgorithmen und Workflows im DLR. Der Ansatz umfasst dabei nicht nur geometrische Aspekte, sondern analysiert in einer nachfolgenden Simulation Größen wie Energiebedarf, Wasserverbrauch, anfallender Abfall und Emissionen.

Mithilfe solcher wissensbasierten Methoden und dem parametrischen Ansatz können Systementscheidungen beeinflusst werden. Durch die Integration in einen durchgehenden digitalen Entwicklungsprozess können verschiedene Varianten eines Water/Waste-Systems frühzeitig generiert, bewertet und auf ihren Einfluss auf das Kabinenlayout hin untersucht werden. Diese Arbeit leistet somit einen Beitrag zur nachhaltigen, datengetriebenen Gestaltung zukünftiger Flugzeugkabinen.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik befasst sich mit drei eng miteinander verknüpften Problemstellungen. Zum einen wird die Integration einer heterogenen Toolkette behandelt, indem die parametrische Auslegung in MATLAB, die Aufbereitung in Blender sowie der Import in Unity zu einem konsistenten und durchgängigen Workflow zusammengeführt werden. Dabei bleiben Objekt-IDs sowie die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten über alle eingesetzten Werkzeuge hinweg erhalten. Zum anderen werden Daten zur funktionalen Analyse erhoben, die

Auswirkungen von Flugzeit und Nutzungsverhalten auf Masse, Energiebedarf und CO₂-Emissionen des Systems mithilfe eines simulationsbasierten Ansatzes liefern sollen. Die dritte Problemstellung betrifft die Verknüpfung von Geometrie- und Systeminformationen. Die entwickelte Wasserarchitektur dient hierbei als Demonstrator dafür, wie wissensbasierte Regeln in parametrische Modelle überführt und innerhalb der virtuellen Darstellung nachvollziehbar überprüft werden können.

Um eine frühzeitige und interdisziplinäre Bewertung der Systemkonzepten zu ermöglichen, wird ein zweistufiger methodischer Ansatz verfolgt. Im ersten Schritt werden die Systemkonfigurationen parametrisch in einer virtuellen 3D-Umgebung abgebildet, um geometrische Zusammenhänge und Systeminformationen für alle beteiligten Disziplinen verständlich und zugänglich aufzubereiten. Darauf aufbauend erfolgt im zweiten Schritt die simulationsgestützte funktionale Analyse, bei der die jeweilige Konfiguration anhand definierter Eingangsparameter automatisiert berechnet und durch quantitative Kenngrößen ergänzt wird. Hierzu wird ein parametrisches Simulationsmodell in MATLAB eingesetzt, das Änderungen der Konfiguration und ihrer Randbedingungen aufgreift und deren Auswirkungen auf das System analysiert. Durch die Verknüpfung von visueller Repräsentation und funktionaler Simulation werden Systemkonzepte somit nicht nur anschaulich dargestellt, sondern bereits in frühen Entwicklungsphasen quantitativ analysier- und vergleichbar [12].

Die Zielsetzung dieser Arbeit orientiert sich an der strategischen Ausrichtung des DLR [15] sowie dem European Green Deal [4]. Beide verfolgen das Ziel einer klimafreundlichen Transformation der Luftfahrt, verkürzter Entwicklungsprozesse sowie eines konsequenten Einsatzes digitaler und modellbasierter Methoden.

Im Kontext des DLR liegt der Fokus insbesondere auf einer durchgängigen und transparenten Prozesskette, die von der parametrischen Modellerstellung bis hin zur auswertbaren virtuellen Darstellung reicht [8].

Im zweiten Kapitel wird der Stand der Technik und das methodische Vorgehen beschrieben. Anschließend wird auf die Simulation, sowie die entstandenen Ergebnisse eingegangen. Zum Schluss werden Grenzen und nächste Schritte skizziert, etwa die mögliche Weiterentwicklung, sowie zukünftige Forschungsrichtungen.

2. STAND DER TECHNIK UND THEORETISCHER RAHMEN

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Dabei werden aktuelle Entwicklungen in der Kabine und bestehende Methoden zur parametrischen Systemauslegung zusammengefasst

und in den aktuellen Forschungskontext eingeordnet. Zudem wird der Aufbau des Water/Waste-Systems mit seinen Funktionen grundlegend erläutert.

2.1. Das Water/Waste-System

Das Water/Waste-System wird gemäß ATA 100 klassifiziert. Kapitel 38 dieser Norm befasst sich speziell mit dem Water/Waste-System, ein System, das alle fest installierten Bauteile und Komponenten zur Frisch- und Abwasserverarbeitung umfasst [17]. Zum System gehören unter anderem Waschbecken, Toilettenkomponenten, Tanks sowie Ventile. Insgesamt beschreibt das Water/Waste-System somit die komplette Wasserver- und -entsorgung an Bord eines Flugzeugs.

Aus dieser Definition lässt sich der grundlegende Aufbau des Water/Waste-Systems ableiten. Es setzt sich im Wesentlichen aus drei Teilbereichen zusammen: dem Frischwassersystem, dem Abwassersystem und dem Grauwassersystem [18] (Bild 1).

Das Frischwassersystem (pink) stellt Trinkwasser bereit, das einerseits in der Bordküche zur Zubereitung von Heißgetränken und für Reinigungszwecke genutzt wird und andererseits in den Lavatorys für die Spülung sowie zum Händewaschen dient. Das Wasser wird in einem entsprechenden Tank gespeichert und bei Bedarf über Rohrleitungen zu den jeweiligen Entnahmestellen, wie den Waschbecken, geleitet. Das Grauwasser (lila) entsteht in den Waschbecken der Lavatorys, sowie der Bordküche und wird über Rohrleitungen zu speziellen Ablauföffnungen geführt, durch die es aus dem Flugzeug über Bord abgeleitet wird. Das für die Toilettenspülung verwendete Wasser wird als Schwarzwasser bezeichnet und von der Abwasseranlage (orange) über separate Leitungen in einen eigenen Abwassertank geleitet und dort bis zum Ende des Fluges gespeichert. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Systems sind Ventile, die mithilfe von Druckunterschieden den Systembetrieb regulieren [18].

2.2. Stand der aktuellen Kabinenentwicklungen

Die Gestaltung moderner Flugzeugkabinen befindet sich im Wandel. Neben klassischen Zielen wie Gewichtsreduktion und hoher Passagierkapazität rücken zunehmend Komfort, Personalisierung, digitale Vernetzung und Nachhaltigkeit in den Fokus. Die Kabine wird dabei als integrierter Teil des Gesamtsystems Flugzeug verstanden, in dem Passagiere, Crew und Technik eng zusammenwirken.

Ein zentrales Entwicklungsprinzip ist die Modularität. Sie ermöglicht flexible Anpassungen an unterschiedliche Anforderungen und verbessert sowohl Komfort als auch betriebliche Effizienz. Beispiele sind größere Gepäckfächer, anpassbare Beleuchtung und geräuschreduzierende Technologien. Konzepte wie Airspace (Airbus) [19], Allegris (Lufthansa) [20] oder Space³ (Diehl Aviation) [21] zeigen, wie individualisierte Sitzkonfigurationen, barrierefreie Lösungen

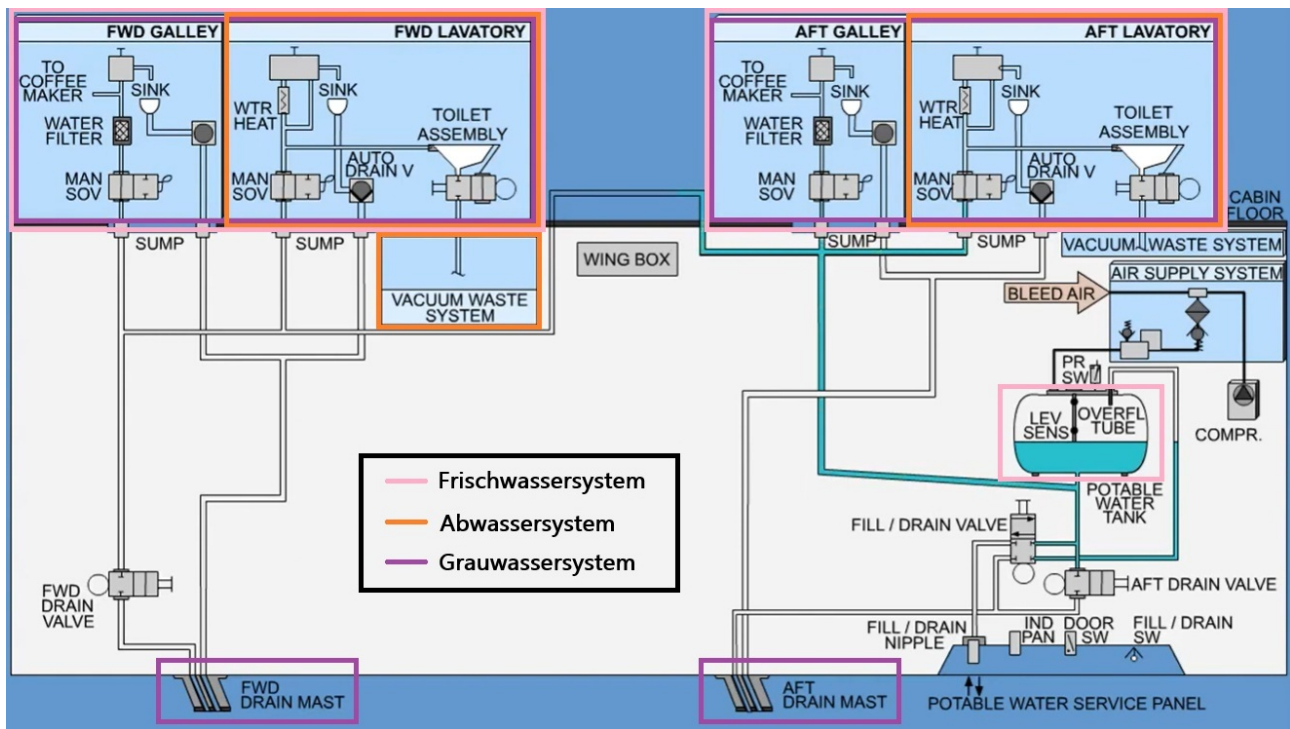


BILD 1. Schaubild des Water/Waste-Systems [16]

und platzsparende Module umgesetzt werden können.

Parallel zur Modularität gewinnt die Digitalisierung an Bedeutung. Vernetzte Kabinensysteme erfassen und optimieren Abläufe automatisch, ermöglichen prädiktive Wartung und verbessern den Ressourceneinsatz. Lösungen wie die „Future Cabin“ (Diehl Aviation) [21] oder Airbus' „Cabin Vision 2035+“ [19] verdeutlichen die zunehmende digitale Vernetzung von Innenraum, Cockpit und Bodenpersonal.

Auch Nachhaltigkeit ist ein zentraler Treiber. Leichtbau, recycelbare Materialien, bionische Strukturen und eine ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung sollen den CO₂-Ausstoß reduzieren. Innovative Komponenten wie ECO-Bin oder ECO Sidewall stehen exemplarisch für diesen Ansatz (Diehl Aviation) [22]. Langfristig zielt die Entwicklung auf eine „zirkuläre Kabine“, die ökologische Vorteile mit wirtschaftlicher Effizienz durch modulare, reparaturfreundliche Systeme verbindet.

Kabinenänderungen dieser Art wirken sich auf verschiedene technische Systeme aus und können dabei auch direkte oder indirekte Auswirkungen auf das Water-/Waste-System sowie dessen Anpassung und Integration haben, die berücksichtigt werden müssen.

2.3. Werkzeuge und Ansätze zur parametrischen Gestaltung von Kabinensystemen

Parametrische Entwurfswerkzeuge dienen in der frühen Entwicklungsphase von Flugzeugen als Grundlage zur systematischen Erzeugung unterschiedlicher Varianten. Einheitliche Schnittstellen gewährleisten dabei konsistente Datenstrukturen und eine nahtlose

Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Anwendungen. Das Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) stellt ein XML-basiertes Austauschformat dar, mit dem sich Konfigurationen von Lufttransportsystemen strukturiert, eindeutig und disziplinübergreifend beschreiben und austauschen lassen [23]. Es wird ein besonderer Schwerpunkt auf systemspezifische Entwurfsparameter gelegt, sodass Entscheidungen zur Systemarchitektur bereits in frühen Phasen in den Gesamtentwurf einfließen können [24].

Verschiedene Forschungsarbeiten und Entwicklungsprojekte der letzten Jahre zeigen, wie eine modellbasierte Herangehensweise in der Kabinenauslegung konkret umgesetzt werden kann. Im Folgenden werden ausgewählte Methoden vorgestellt, die parametrische Modellierungskonzepte auf unterschiedliche Kabinenmodule anwenden und dabei jeweils unterschiedliche methodische Schwerpunkte setzen.

Hanna (2020) [25] beschreibt einen methodischen Ansatz zur Modularisierung und Variantenkontrolle von Kabinenkomponenten. Hierbei wird der parametrische Ansatz über „Design Structure Matrices“ (DSM) umgesetzt, um funktionale Abhängigkeiten zwischen Modulen zu identifizieren und gezielt zu variieren. Ergänzend werden Werkzeuge wie der „Variety Tree“ und der „Module Interface Graph“ (MIG) genutzt, um Variantenräume strukturiert zu erfassen. Der Fokus dieser Methodik liegt auf der Reduzierung interner Komplexität bei gleichzeitiger Berücksichtigung einer wachsenden äußeren Variantenvielfalt.

Rajendran (2021) [26] stellt ein Multi-Fidelity-Framework zur parametrischen Modellierung von Kabinenmodulen vor, das eine durchgehende Kette vom CPACS-Datenmodell über MATLAB bis hin zur VR-Visualisierung abbildet. Abhängig vom gewünschten Detaillierungsgrad können Sitzreihen, Stauräume oder Galley-Konfigurationen automatisiert erzeugt und untersucht werden. Durch die Verknüpfung verschiedener Modellierungsebenen lassen sich sowohl geometrische als auch funktionale Variantenstudien bereits in frühen Entwurfsphasen durchführen.

Walther (2024) [27] präsentiert mit dem Fuselage Geometry Assembler (FUGA) eine wissensbasierte Entwurfsmethodik (KBE) zur konsistenten Generierung multidisziplinärer Analysemodelle im Rahmen von MDAO-Prozessen. Der Ansatz basiert auf dem zentralen Datenmodell CPACS und verknüpft Parameter sowie Regeln in einem Wissensgraphen. Die Methodik umfasst sowohl Geometrie- als auch Entwurfsregeln zur automatisierten Erstellung von Rumpf-, Struktur- und Kabinenmodellen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Darüber hinaus ermöglicht sie die Integration neuartiger Produktarchitekturen, beispielsweise von Wasserstofftanksystemen.

2.4. Potentiale, Anwendungsbereiche und Grenzen der Ansätze

Hanna stellt mit DSM und dem Variety Tree methodische Werkzeuge bereit, um Varianten in modularen Kabinenarchitekturen systematisch zu steuern. Der Fokus liegt auf der Strukturierung technischer Systeme und deren Schnittstellen unter Gesichtspunkten von Komplexität und Effizienz. Aspekte wie das funktionale Systemverhalten, die automatisierte Modellgenerierung oder die betriebliche Auswertung werden in diesem Ansatz jedoch nicht abgebildet.

Rajendran kombiniert parametrische CPACS-Datenmodelle mit geometrischer Auslegung und VR-basierter Visualisierung zu einem durchgängigen Multi-Fidelity-Ansatz. Durch die Verbindung unterschiedlicher Detaillierungsebenen kann das Modell flexibel in frühen Entwurfsphasen für Layout- und Designvarianten genutzt werden. Funktionale Bewertungen oder Analysen auf Ressourcenbasis sind in diesem Rahmen bisher nicht integriert.

Walther entwickelt einen Rahmen zur Generierung und Erweiterung von Flugzeugarchitekturen im Kontext multidisziplinärer Entwurfsprozesse. Der graphenbasierte Ansatz ermöglicht die transparente Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Entwurfsparametern, die modulare Integration neuen Wissens sowie die dynamische Steuerung von Modellgenerierungsprozessen. Der Fokus der Arbeit liegt jedoch auf der Modellierungs- und Integrationsmethodik, sodass Kabinensysteme nicht Gegenstand einer eigenständigen Analyse sind.

2.5. Einordnung und Beitrag der Arbeit im Forschungskontext

Die vorgestellten Arbeiten zeigen, dass parametrische Modellierung in der Kabinenauslegung je nach Zielsetzung und Systemebene mit unterschiedlichen methodischen Werkzeugen auf struktureller, geometrischer oder funktionaler Ebene eingesetzt wird. Insgesamt ergibt sich ein breites Spektrum an Ansätzen zur parametrischen Kabinenmodellierung, wobei sich die einzelnen Arbeiten in ihren Zielrichtungen, Systemgrenzen und Detailtiefen deutlich unterscheiden.

Die Analyse dieser Forschungsarbeiten verdeutlicht, dass der Einsatz parametrischer Methoden bislang vor allem auf die Strukturierung von Kabinen und die Ableitung von Varianten ausgerichtet ist. Der Fokus liegt häufig auf konzeptionellen Überlegungen oder geometrischen Aspekten, während eine tiefgehende systemtechnische Betrachtung einzelner Kabinenmodule weitgehend ausbleibt. Wichtige Faktoren wie funktionale Ausstattung, Leistungsaufnahme oder ressourcenbezogene Auswirkungen werden in den meisten Arbeiten nur am Rande berücksichtigt.

KPI-basierte Bewertungen werden, sofern sie überhaupt erfolgen, überwiegend für übergreifende Layout- oder Konzeptfragestellungen eingesetzt und berücksichtigen Kabinensubsysteme wie das Water/Waste-System nur selten als eigenständige, betrieblich relevante Systeme. Die bestehenden Modellierungsansätze dienen daher häufig der visuellen oder strukturellen Generierung von Kabinenlayouts, lassen jedoch die operative Komplexität einzelner Teilsysteme weitgehend unberücksichtigt.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Sie entwickelt eine parametrische Modellierungsumgebung, die den Aufbau und die Ausstattung des Water/Waste-Systems automatisch anhand definierter Eingabeparameter generiert und auf Basis technischer sowie betrieblich relevanter Leistungskennzahlen analysiert. Auf diese Weise wird eine methodische Lücke geschlossen und ein konkreter Beitrag zur datenbasierten Bewertung, Systemintegration und Variantenabsicherung innerhalb virtueller Kabinenentwicklungsprozesse geleistet.

3. DER DIGITALE ENTWICKLUNGSPROZESS

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau des digitalen Entwicklungsprozesses der Kabine am DLR. Dabei wird ein grober Überblick über das Vorgehen zur Systemauslegung von Kabinenkonzepten gegeben, sowie auf den Anwendungsfall des Water/Waste-Systems im Detail eingegangen.

3.1. Methodisches Vorgehen

Die Prozesskette der Kabinenmodellierung (Bild 2) wird im Folgenden beschrieben. Die Arbeit baut auf bereits am DLR etablierten Ansätzen auf. Als methodische Grundlage dient dabei die von Fuchs et

al. beschriebene Vorgehensweise [9].

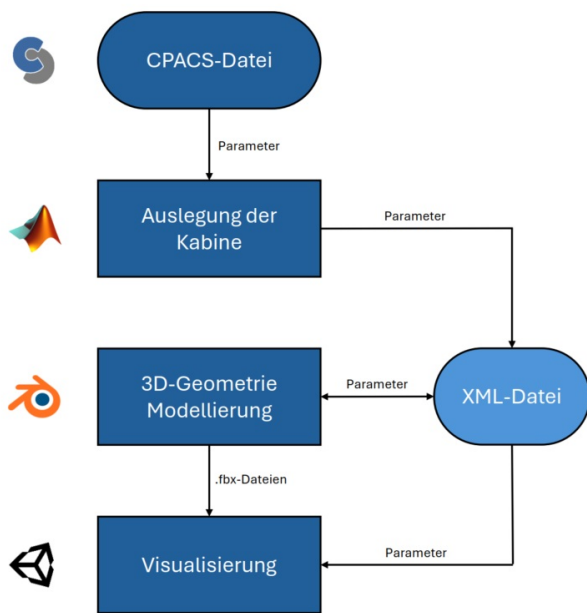


BILD 2. Schematische Darstellung der Prozesskette zur Kabinenmodellierung

Die Datenbasis bildet CPACS, das als Schnittstelle und Informationsquelle aus dem Flugzeugvorentwurf dient. Das Format wurde am DLR entwickelt, um den fachübergreifenden Austausch im Flugzeugentwurf zu vereinheitlichen und zu standardisieren [23]. Ziel dieses Datenmodells ist es, eine konsistente und durchgängige Darstellung komplexer Flugzeugsysteme bereitzustellen, die sowohl von Konzeptentwurfswerkzeugen als auch von detaillierten Analyseprogrammen genutzt werden kann. CPACS basiert auf XML und verwendet eine textbasierte, hierarchische Struktur, die flexible Erweiterungen sowie die disziplinübergreifende Integration unterschiedlicher Entwurfswerkzeuge ermöglicht [28]. Sie umfasst grundlegende Informationen zur Flugzeug- und Kabinengestaltung, wie beispielsweise Rumpfabmessungen, Deckhöhen, Sitzanordnungen oder die Positionierung von Kabinenkomponenten und fungiert dabei als Austauschformat, das Konfigurationen des Flugzeugs sowohl semantisch als auch hierarchisch beschreibt. Zusätzlich ermöglicht die Datei den Austausch zwischen unterschiedlichen Disziplin-Tools, sowie die spätere funktionale Auslegung der Kabinensysteme [29]. Für den hier betrachteten Anwendungsfall ist insbesondere die parametrische Beschreibung von Kabinenobjekten sowie Rumpfinformationen wie beispielsweise der Spanten relevant, da diese die Grundlage für die Systemauslegung in MATLAB bilden.

In MATLAB erfolgt eine regelbasierte Auslegung der Kabinensysteme, bei der auf Grundlage definierter Parameter virtuelle Systemkomponenten generiert, räumlich angeordnet und mit Eigenschaften wie

Bezeichnung, Material oder Systemzugehörigkeit (z. B. nach ATA-Kapiteln) versehen werden. Ergänzend wird eine Bauraumanalyse durchgeführt, bei der jede Komponente durch eine vereinfachte Hüllengeometrie (Bounding Box) dargestellt wird. Diese abstrahierte Repräsentation ermöglicht eine automatisierte Bewertung von Platzanforderungen sowie die Identifikation möglicher Interferenzen bereits im Vorentwurf. Das Resultat ist eine erste konsistente funktionale und geometrische Beschreibung der Kabine.

Die Ergebnisse dieser Auslegung werden anschließend in eine strukturierte XML-Datei überführt, die als Eingabe für die Modellierungssoftware Blender dient. Dort werden die Bounding Boxen gezielt durch detaillierte 3D-Modelle ersetzt, die zuvor erstellt und in einer FBX-Bibliothek abgelegt wurden. Diese werden automatisiert anhand der in der XML-Datei hinterlegten Informationen zu Position, Skalierung und Identifikation geladen und im virtuellen Raum platziert. Die eindeutige Zuordnung zwischen Systembeschreibung und Geometrie erfolgt über sogenannte Identifikatoren (IDs) [28].

Anschließend wird das vollständige 3D-Kabinenmodell aus Blender im FBX-Format exportiert und zusammen mit der zugehörigen XML-Datei in die Unity-Umgebung übertragen. Dort entsteht eine interaktive, virtuell begehbare Kabine, in der sowohl geometrische Eigenschaften als auch systembezogene Aspekte, wie etwa Leitungsverläufe oder Verknüpfungspunkte, analysiert und visualisiert werden können. Unity dient somit nicht nur der Darstellung, sondern auch der Bewertung und der Rückkopplung von Entwurfsentscheidungen [30].

Der gesamte Ablauf ist durch einen hohen Grad an Automatisierung und Modularität gekennzeichnet. Alle Schnittstellen zwischen den eingesetzten Tools basieren auf automatisierten Datenübergaben, etwa durch XML-Verarbeitung und ID-basierte Zuordnungen, wodurch manuelle Eingriffe entfallen. Durch den konsistenten und bidirektionalen Informationsfluss über sämtliche Entwicklungsphasen hinweg bildet dieser virtuelle Entwicklungsprozess die methodische Grundlage für eine datengetriebene Auslegung, Analyse und Visualisierung komplexer Kabinensysteme in frühen Phasen der Entwicklung.

3.2. Parametrischer Aufbau im Detail

In CPACS sind Kabinen- und Rumpfbjekte in einer strukturierten Form hinterlegt und mit geometrischen Maßen versehen. Um die Kabinensysteme in MATLAB auszulegen, werden zusätzliche Parameter definiert und mit den Positions- und Transformationsinformationen aus CPACS verknüpft. Darauf aufbauend erstellt der Entwurfsalgorithmus die Bounding-Boxen, welche als Platzhalter für die weitere Systemplanung dienen (Bild 3). Diese Boxen erlauben Abschätzun-

gen des Bauraums, prüfen auf mögliche Kollisionen und bieten verlässliche Ankerpunkte für die gezielte Platzierung neuer Kabinensysteme.

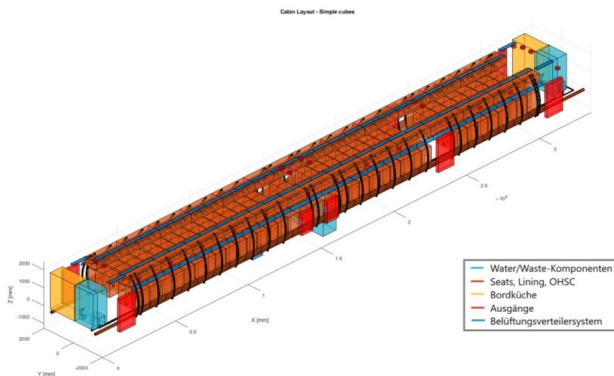


BILD 3. Kabinenlayout eines A320 als Boxmodell

Sämtliche Komponenten werden als farblich codierte Boxen modelliert, um funktionale Bereiche klar voneinander abzugrenzen. Sitze, Wandverkleidungen und Stauräume sind orange gekennzeichnet und bilden das Grundgerüst der Kabine. Das Water/Waste-System erscheint in hellblau und ist überwiegend im vorderen und hinteren Kabinenbereich angeordnet. Das Belüftungssystem ist in dunkelblau entlang des Rumpfes dargestellt, während die Bordküchen gelb und die Notausgänge rot markiert sind.

Aktuell enthält CPACS keine Daten zu Kabinensubsystemen wie Belüftung, Elektrik oder dem Wasser- und Abwassersystem. Aufgrund der veränderbaren Bauraumkonfiguration (bspw. dem Wechsel von einem A320 auf die längere A321 Version) eines Kabinenkonzepts wird eine neue parametrische Wasserarchitektur entwickelt. Sie legt die Positionen der Komponenten automatisch fest, damit unterschiedliche Varianten derselben Grundkonfiguration konsistent erstellt und miteinander verglichen werden können.

Die Komponenten des Systems sind innerhalb des Kabinenraums entsprechend ihrer realen Einbauposition angeordnet. Durch das Ausblenden aller übrigen Systeme wird der Aufbau des Water/Waste-Systems ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass in dieser Darstellung (Bild 4) lediglich die Frisch- und Schwarzwasseranbindung der Architektur betrachtet wurde. Anbindungen zu den Galleys oder die Entsorgung des Grauwassers über Bord, sowie die damit verbundenen Leitungssysteme sind aktuell nicht vorhanden.

Im vorderen Bereich des Flugzeugs befindet sich der erste Sanitärbereich. Der dort dargestellte hellblaue Quader repräsentiert die Lavatory-Einheit (1) und ist in zwei Zonen unterteilt. Einen kleineren Bereich für das Waschbeckenmodul sowie einen größeren Abschnitt, der den Bauraum der gesamten Sanitäranlage abbildet. Im Waschbereich sind unterhalb des Beckens ein Wasserheizer sowie verschiedene Ventile integriert. Direkt angrenzend sind die Toiletten-

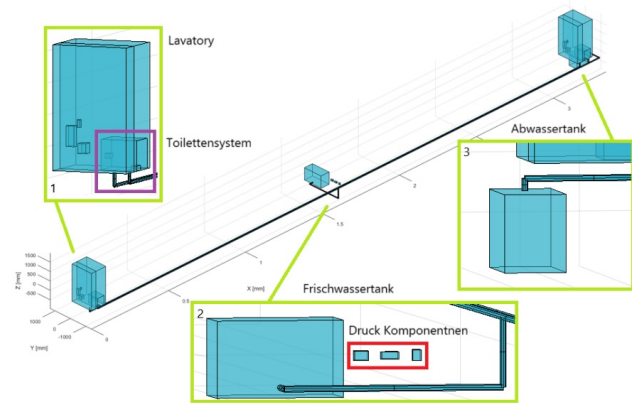


BILD 4. Water/Waste-System als Boxmodell

schüssel und die zugehörigen Ventilsysteme angeordnet (lila).

Ein baugleicher Sanitärbereich ist im hinteren Teil des Flugzeugs installiert und enthält identische Komponenten. Beide Lavatorys sind über ein Rohrleitungssystem mit dem zentralen Abfalltank verbunden, der sich im Heck des Flugzeugs befindet (3). Die Entsorgung erfolgt über ein Vakuumsystem, das die Abwässer von den Toiletten zum Tank transportiert. Der Frischwassertank zur Versorgung des gesamten Systems ist zentral im Rumpf in der Nähe der Tragflächenwurzel positioniert (2). Ein druckbeaufschlagtes System fördert das Wasser zu den jeweiligen Verbrauchsstellen, beispielsweise zu den Lavatorys oder Galleys. Die hierfür erforderlichen Komponenten zur Druckregulierung sind rot markiert.

Alle vom MATLAB-Entwurfsalgorithmus erzeugten Objekte einschließlich ihrer Informationen (Typ, ID, Transformation etc.) werden in einer XML-Datei strukturiert gespeichert. Dieses Vorgehen bewahrt die Hierarchie der Daten, macht sie maschinenlesbar und schafft ein standardisiertes Austauschformat im Sinne von CPACS für nachfolgende Werkzeuge.

3.3. Darstellung der Kabine in Blender

Im Folgenden findet ein Austausch der zuvor verwendeten Quader (Bounding Boxen) durch detaillierte 3D-Modelle statt. Ein Python-Skript öffnet hierfür Blender im Batch-Modus, importiert die erzeugte XML-Datei und extrahiert aus jedem Eintrag die Informationen zu Objekttyp und Transformation. Daraufhin wird das entsprechende 3D-Modell aus einer FBX-Bibliothek geladen und mit den vordefinierten Grundmaterialien an der richtigen Position in der Szene eingefügt.

Auf diese Weise entsteht eine realitätsnahe Darstellung der Flugzeugkabine, sowie des Water/Waste-Systems (Bild 5)(rot), indem detaillierte 3D-Modelle eingesetzt werden und die Immersion erhöhen. Das resultierende Modell eignet sich sowohl für anschauliche Visualisierungen als auch als Grundlage für weiterführende Simulationen und Analysen.

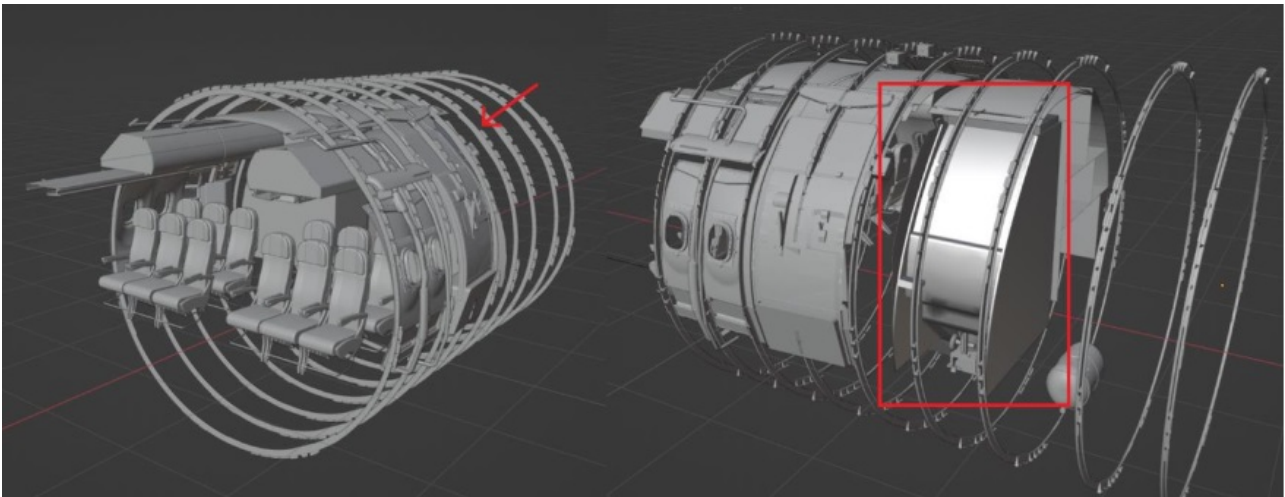


BILD 5. Rumpfausschnitt: Water/Waste-System in Blender

3.4. Interaktion in Unity

Zum Abschluss wird die Darstellung zur interaktiven Erkundung in Unity realisiert. In dieser kann der Nutzer die Kabine erkunden und mit den Komponenten interagieren. Wird ein entsprechendes Event ausgelöst, beispielsweise das Auswählen der Lavatory, so werden die zugehörigen Daten aus der XML-Datei in Echtzeit ausgelesen und dem Nutzer visuell ausgegeben (Bild 6).

Durch dieses Vorgehen können Systemauslegungen bereits in frühen Entwicklungsphasen sowohl unter Einbindung von Experten als auch fachfremder Personen durchgeführt und diskutiert werden. Die geometrische Integration ermöglicht hier bereits eine unmittelbare Bewertung der Systemauslegung hinsichtlich des verfügbaren Bauraums und möglicher Wechselwirkungen mit angrenzenden Komponenten.

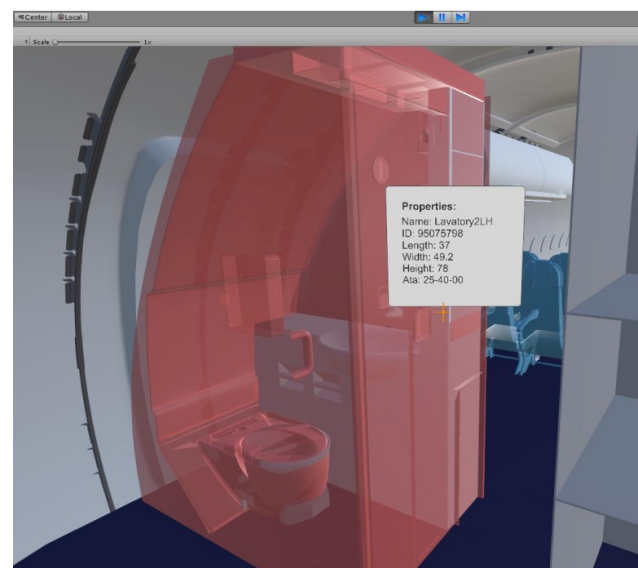


BILD 6. Lavatory in Unity mit Informationsausgabe

Im Folgenden wird eine Simulationethodik für das Water/Waste-System vorgestellt, welche den beschriebenen Entwicklungsprozess um eine funktionale Analyse erweitert und dadurch zusätzliche Informationen für die frühzeitige Auslegung und Bewertung des Systems bereitstellt.

4. SIMULATIONSMETHODIK DES WATER/WASTE-SYSTEMS

Das Simulationsmodell verfolgt das Ziel, den Einfluss von Passagierverhalten, Flugdauer und Systemparametern auf den Wasserverbrauch, den Energiebedarf sowie die daraus resultierenden CO₂-Emissionen und Kosten zu analysieren. Methodisch stützt sich der Ansatz auf ein parametrisches Simulationsmodell, das von nutzungsabhängigen Eingangsgrößen zu physikalischen und energetischen Ausgangsgrößen überführt.

Beim Aufbau des Modells liegt der Fokus darauf, das reale System in funktionale Teilbereiche zu untergliedern, die jeweils klar definierte Ein- und Ausgangs-

größen aufweisen. Das reale Water/Waste-System ist durch mehrere miteinander verknüpfte Einflussfaktoren geprägt. Dazu zählen die Passagiernutzung, das Wasser- und Abfallmanagement, die elektrischen Verbraucher innerhalb des Systems sowie die energetische Anbindung an das Flugzeug. Anstatt das System als Ganzes zu modellieren, wird es in aufeinanderfolgende Berechnungsschritte gegliedert (Bild 7).

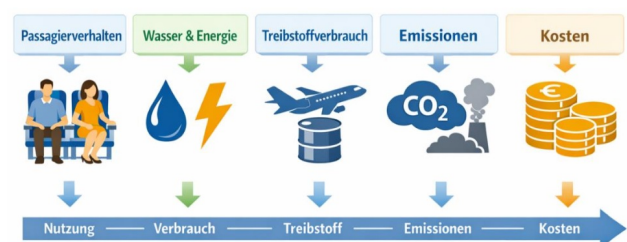


BILD 7. Bewertungskette des Water/Waste-Systems

Methodisch setzt das Modell auf der Ebene der Nutzung an. Die Interaktionen der Passagiere werden

dabei nicht kontinuierlich über die Zeit beschrieben, sondern ereignisbasiert modelliert. Vorgänge wie Toilettennutzung, Händewaschen oder andere Wasserentnahmen werden jeweils als einzelne Ereignisse betrachtet. Dieser Ansatz wurde bewusst gewählt, da die zugrunde liegenden Eingabedaten ebenfalls ereignisorientiert erfasst werden können.

Ausgehend von der Nutzungsebene werden zunächst Zählgrößen bestimmt, beispielsweise die Anzahl der Toilettengänge oder die Häufigkeit der Wasserhahnaktivierungen. Diese Größen wurden mithilfe von Fachexperten aus der Industrie bestimmt [31] und fungieren als Schnittstelle zwischen menschlichem Verhalten und der technischen Reaktion des Systems. Dabei wurden Szenarien von 2 Stunden für Kurzstreckenflüge, 4 Stunden für Mittelstreckenflüge und 8 Stunden für Langstreckenflüge gewählt. Methodisch ist dies bedeutsam, da das unsichere Nutzerverhalten in eindeutig definierte und weiterverarbeitbare Größen überführt wird.

- Kabine: 180 Sitze mit 90% Auslastung (162 Pax)
- Sicherheitspuffer: +10% Aufschlag
- Pro Toilettengang (Void): Spülung 0,150 L belastet Frisch- und Abfalltank, Händewaschen 0,125 L (bei 80% der Nutzung) belastet nur Frischwasser (Abfluss über Bord)
- Urin pro Nutzung:
 - 2 h: 0,26 bis 0,30 L
 - 4 h: 0,28 bis 0,32 L
 - 8 h: 0,30 bis 0,34 L
- Toilettennutzung (low zu high): Passagiere, die überhaupt gehen (U) und Voids pro Nutzer (V):
 - 2 h: U = 15 bis 30%, V = 1,0
 - 4 h: U = 45 bis 60%, V = 1,2 bis 1,8
 - 8 h: U = 75 bis 90%, V = 2,0 bis 2,5
- Anteil mit festem Abfall (einmal pro betroffener Person mit 250 g):
 - 2 h: 5%
 - 4 h: 10%
 - 8 h: 40%
- Tankgrenzen A320: Frisch 200 L, Abfall 180 L

Im darauffolgenden Schritt werden aus diesen Zählgrößen die stofflichen Systemströme abgeleitet. Hierbei werden die konkreten Mengen an Frischwasser und Abwasser berechnet, die durch die jeweilige Nutzung entstehen. Jede Nutzung verursacht einen bestimmten Frischwasserbedarf, wie beispielsweise der Spülvorgang (1) oder das Händewaschen (2), der entweder im Abwassertank gespeichert oder über Bord abgeführt wird. Gleichzeitig fallen Abfallmengen (3)(4) an, die im Tank gesammelt werden.

- (1) $V_{Spl} = N_{voids} \cdot 0,150 \text{ L}$
- (2) $V_{Hand} = N_{voids} \cdot 0,8 \cdot 0,125 \text{ L}$
- (3) $V_{Urin} = N_{voids} \cdot v_{Urin,pro \text{ void}} [L]$
- (4) $V_{Fest} = Pax \cdot p_{Fest}(k) \cdot 0,250 \text{ L}$

Mit

- N_{voids} = Anzahl Spülvorgänge
- $v_{Urin,pro \text{ void}}$ = Menge Urin pro Spülvorgang
- $p_{Fest}(k)$ = Aufkommen von festem Abfall
- Index k : $k = 1$ für 2 Stunden, $k = 2$ für 4 Stunden, $k = 3$ für 8 Stunden

Grundlage hierfür ist eine klassische Bilanzierungsmethode, bei der sämtliche relevanten Stoffströme systematisch erfasst und zu V_{Frisch} (gesamtes Frischwasservolumen) und V_{Abfall} (gesamtes Abfallvolumen) summiert werden. Zusätzlich werden Sicherheitsreserven berücksichtigt, um betriebliche Unsicherheiten realitätsnah abzubilden.

Das Modell ist dabei vollständig parametrisch aufgebaut. Annahmen wie Tankgrößen, Wasserverbrauch je Nutzung, Passagieranzahl oder Sicherheitszuschläge sind nicht fest vorgegeben, sondern als variable Parameter definiert. Dadurch kann das Modell ohne grundlegende strukturelle Anpassungen auf andere Flugzeugtypen übertragen werden. Die Parametrisierung dient somit als methodische Grundlage für Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit.

Auf Basis der ermittelten Wasser- und Abfallmengen erfolgt anschließend die Berechnung des Energiebedarfs. Dieser Modellteil orientiert sich methodisch an einer komponentenbasierten Betrachtungsweise. Jede energieverbrauchende Komponente wird als eigenständiger Verbraucher modelliert (5)(6). Für jede Komponente wird separat bestimmt, wie häufig sie aktiviert wird und welche Leistung sie während der Betriebszeit aufnimmt. Dadurch setzt sich der Gesamtenergiebedarf transparent aus physikalisch nachvollziehbaren Einzelanteilen zusammen.

$$(5) \quad E_{Komponente} = \frac{P [W] \cdot t [h]}{1000} [kWh]$$

$$(6) \quad E_{Ventil} = \frac{N \cdot P [W] \cdot S [s]}{1000 \cdot 3600 [s]} [kWh]$$

Mit

- P = Benötigte Leistung in Watt
- t = Flugzeit in Stunden
- S = Zeit in Sekunden
- N = Aktivierungen

Die elektrische Energie stellt innerhalb des Modells jedoch lediglich eine Zwischenebene dar. Daher wird die Berechnung konsequent bis zur Primärenergieebene weitergeführt. Da die elektrische Energieversorgung im Flugzeug letztlich auf Kerosin basiert, wird der gesamte elektrische Energiebedarf mithilfe von Wirkungsgraden und Heizwerten in einen entsprechenden Kraftstoffverbrauch umgerechnet (7).

$$(7) \quad m_{Kerosin} = \frac{E_{total} [kWh] \cdot 3,6 [MJ/kWh]}{\eta_{APU} \cdot LHV [MJ/kg]} [kg]$$

Mit

- E_{total} = Anfallende elektrische Energie [kWh]
- LHV = Lower Heating Value von Kerosin (Jet-A1) mit 43 [MJ/kg] [32]
- η_{APU} = Wirkungsgrad der Hilfsturbine

Zusätzlich zur elektrischen Energie wird auch die transportierte Masse des Systems berücksichtigt (8). Methodisch wird angenommen, dass zusätzliche Masse proportional zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch führt. Hierfür nutzt das Modell eine vereinfachte lineare Beziehung zwischen transportierter Masse, Flugzeit und zusätzlichem Kerosinbedarf, wie sie in frühen Auslegungsphasen üblich ist (9).

$$(8) \quad \bar{m} = \bar{V}_{\text{Frisch}} + \bar{V}_{\text{Abfall}} [\text{kg}]$$

$$(9) \quad m_{\text{Kerosin}} = \bar{m} \cdot 0,03 \frac{\text{kg Kerosin}}{\text{kg} \cdot \text{t}} \cdot t [\text{kg}]$$

Mit

- $\bar{V}_{\text{Frisch}}$ = Durchschnittsvolumen Frischwasser
- $\bar{V}_{\text{Abfall}}$ = Durchschnittsvolumen Abwasser
- $\bar{m}$ = Durchschnittliche Masse
- m_{Kerosin} = Benötigte Kerosinmasse pro Flugzeit
- t = Flugzeit in Stunden

Die Kombination aus elektrischem Energiebedarf und massenbedingtem Zusatzverbrauch führt schließlich zur Berechnung des CO_2 -Ausstoßes (10). Dabei wird ein direkter Emissionsfaktor verwendet [33], der den Zusammenhang zwischen verbranntem Kerosin und den daraus entstehenden CO_2 -Emissionen beschreibt. Ergänzend werden aus dem berechneten Kraftstoffverbrauch mithilfe des Kerosinpreises [3] die entsprechenden Kraftstoffkosten (11) abgeleitet, wodurch zusätzlich eine wirtschaftliche Bewertung möglich wird.

$$(10) \quad \text{CO}_2 = m_{\text{Kerosin}} [\text{kg}] \cdot 3,15 [\text{kg}]$$

$$(11) \quad \text{Kosten} = m_{\text{Kerosin}} [\text{kg}] \cdot 0,8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} [\text{€}]$$

Der gesamte Aufbau des Modells folgt damit einer klar strukturierten Ursache-Wirkungs-Kette. Jede Berechnungsebene verwendet die Ergebnisse der vorherigen Ebene als Eingangsgröße. Methodisch handelt es sich um ein Simulationsmodell und nicht um ein Optimierungs- oder Regelungssystem.

Zusammenfassend basiert das Simulationsmodell auf den methodischen Prinzipien der Parametrisierung, funktionalen Zerlegung und physikalischen Bilanzierung. Jeder Rechenschritt ist nachvollziehbar begründet und unabhängig überprüfbar. Dadurch eignet sich das Modell sowohl für erste Auslegungsabschätzungen als auch als Grundlage für spätere Erweiterungen, Verfeinerungen und den Vergleich unterschiedlicher Flugzeugkonfigurationen.

4.1. Ergebnisse des Modellierungsansatzes

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen erläutert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Water/Waste-System bewertet. Die Simulation ist dabei auf die drei Flugzeiten ausgelegt worden, kann jedoch individuell angepasst oder erweitert werden für andere Anwendungsfälle. Ebenso wird für jede Zeit eine Bandbreite (Low/High) an Betriebsszenarien betrachtet.

Das Balkendiagramm (Bild 8) stellt das Wasser- und Abfallvolumen für die ausgewählten Flugzeiten sowie die Entwicklung des Verbrauchs dar. Die hellblauen Balken repräsentieren den Frischwasserverbrauch im Low-Case, die dunkelblauen Balken den Frischwasserverbrauch im High-Case. Hellbraune und dunkelbraune Balken stehen entsprechend für das Abfallvolumen im Low- bzw. High-Case.

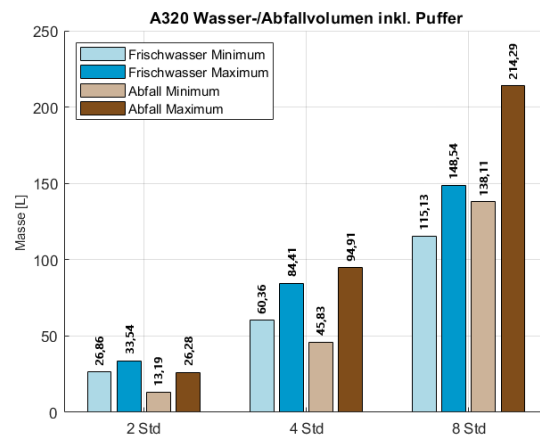


BILD 8. Volumen des Water/Waste-Systems (A320)

Die Ergebnisse zeigen, dass Wasser- und Abfallbedarf mit zunehmender Nutzungsdauer ansteigen. Bei einem zweistündigen Flug ist aufgrund der geringen Nutzung und der niedrigen Abfallmengen die Bilanz gering und es bestehen keine Kapazitätsprobleme. Für einen vierstündigen Flug steigt die Nutzerzahl, dennoch bestehen weiterhin ausreichende Reserven. Bei Langstreckenflügen von acht Stunden mit hoher Nutzung verändert sich die Situation. Der Frischwasserverbrauch nimmt zwar zu, bleibt jedoch innerhalb unkritischer Bereiche. Kritisch wird dagegen der Abfalltank, der im High-Case die typische Kapazität von 180 Litern überschreitet. Die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Überlaufs hängt mit der Definition des High-Cases zusammen. Dieser Fall wurde bewusst konservativ angesetzt und kombiniert mehrere ungünstige Annahmen. Daher repräsentiert er eher ein Worst-Case-Szenario als einen typischen Durchschnittsflug. Es ist zu erwarten, dass ein solcher Fall im normalen Flugbetrieb nur selten eintritt. Dennoch ist er für die Auslegung des Systems relevant, da in der Luftfahrt sichergestellt werden muss, dass Systeme auch unter extremen Belastungen zuverlässig arbeiten und keine kritischen Zustände erreichen. Die

Ergebnisse der drei Szenarien sind in der folgenden Tabelle (Tab. 1) zusammengetragen:

Flugzeit	Frischwasser	Abfall
2 h	26,86 – 33,54 L	13,19 – 26,28 L
4 h	60,36 – 84,41 L	45,83 – 94,91 L
8 h	115,13 – 148,54 L	138,11 – 214,29 L

TAB 1. Wasser- und Abfallmengen des Systems in Abhängigkeit der Flugzeit

Das Balkendiagramm (Bild 9) veranschaulicht den Energiebedarf des Water/Waste-Systems. Dabei sind alle beteiligten Komponenten, sowie Verlustleistungen in der Legende aufgeführt und farblich entsprechend des Szenarios codiert.

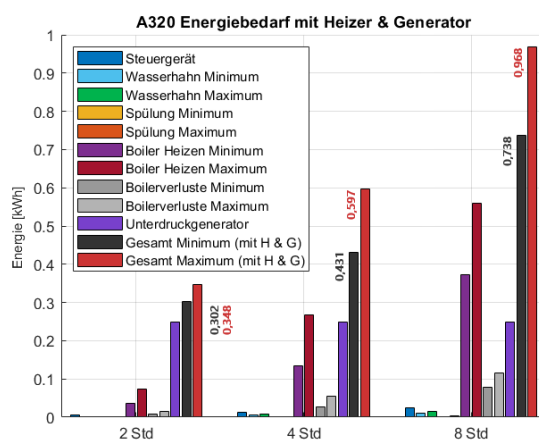


BILD 9. Energiebedarf des Water/Waste-Systems (A320)

Auffällig ist, dass der Unterdruckgenerator zu Beginn den höchsten Energieverbrauch aufweist und deutlich mehr Leistung benötigt als sämtliche anderen Komponenten. Bereits bei einer Flugzeit von zwei Stunden übertrifft sein Energiebedarf die Summe aller übrigen elektrischen Verbraucher. Der zweitgrößte Verbraucher ist der Heizer, dessen Energiebedarf mit zunehmender Flugdauer ansteigt und den des Generators schließlich übersteigt. Somit entsteht der Hauptenergiebedarf nicht durch Bedienvorgänge, wie das Händewaschen oder Steuerfunktionen zur Überwachung, sondern durch die Bereitstellung von warmem Wasser und die Aufrechterhaltung des Unterdrucks in niedrigen Flughöhen. Der Verbrauch der übrigen Komponenten ist dagegen kaum erkennbar, nur der Controller zur Systemsteuerung hebt sich hervor. Der Gesamtbetrag an Energie für die entsprechenden Flugzeiten ist der folgenden Tabelle (Tab. 2) zu entnehmen:

Das Balkendiagramm (Bild 10) stellt die CO₂-Emissionen des Systems für die angenommenen Flugzeiten dar. Die Emissionen werden in drei Kategorien unterteilt: CO₂ aus dem Stromverbrauch (hell- und dunkelblau), CO₂, das durch die Masse verursacht wird (orange und gelb), sowie die CO₂-Gesamtwerte (schwarz und rot).

Flugzeit	Low-Case	High-Case
2 h	0,302 kWh	0,348 kWh
4 h	0,431 kWh	0,597 kWh
8 h	0,738 kWh	0,968 kWh

TAB 2. Energiebedarf des Systems in Abhängigkeit der Flugzeit

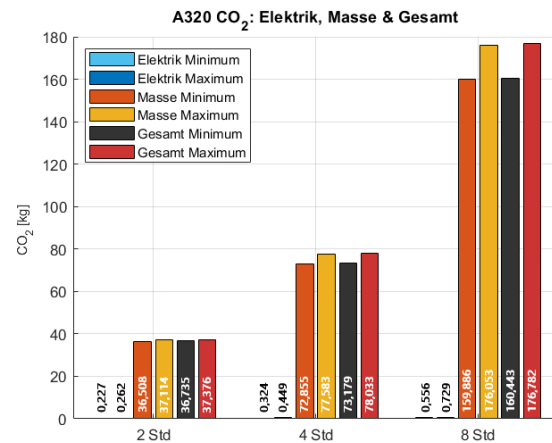


BILD 10. Emissionen des Water/Waste-Systems (A320)

Das Diagramm verdeutlicht, dass die anfallende Masse des Water/Waste-Systems den entscheidende Faktor für die CO₂-Emissionen des Systems darstellt, unabhängig von der Flugzeit. Der elektrische Energiebedarf trägt zwar zu den Emissionen bei, ist jedoch im Vergleich gering. Dieser Effekt wird bei längeren Flügen deutlicher: Während die Unterschiede zwischen Low- und High-Case bei Kurzstreckenflügen noch vergleichsweise klein sind, führt eine längere Flugzeit zu einem deutlich höheren CO₂-Ausstoß. Zusammengefasst sind diese Ergebnisse in der folgenden Tabelle (Tab. 3):

Flugzeit	Low-Case	High-Case
2 h	36,74 kg	37,38 kg
4 h	73,18 kg	78,04 kg
8 h	160,45 kg	176,79 kg

TAB 3. CO₂-Ausstoß des Systems in Abhängigkeit der Flugzeit

Dabei ist zu beachten, dass die Masse bereits an Bord des Flugzeugs vorhanden ist und nicht erst durch das System erzeugt wird. Der gefüllte Frischwassertank und die Abgaben der Passagiere existieren bereits. Ihr anfallendes Gewicht stellt lediglich ungenutzte, aber mitgeführte Masse dar. Die Treibstoffkosten zum Transport der Massen und zum Betrieb des Systems fallen dabei folgendermaßen aus (Tab. 4):

Zusammenfassend beeinflussen die Dimensionierung der Frisch- und Abwassertanks, die Nutzung des Warmwassersystems sowie das Verhältnis von Nutzlast zu Verbrauch den CO₂-Ausstoß stärker als

Flugzeit	Treibstoffkosten
2 h	9,33 – 9,49 €
4 h	18,59 – 19,82 €
8 h	40,75 – 44,90 €

TAB 4. Treibstoffkosten des Water/Waste-Systems für verschiedene Flugzeiten

der elektrische Energieaufwand des Systems.

Durch die Verknüpfung der Darstellung in Unity mit der entwickelten Simulationsmethodik wird die frühe Systemintegration um eine funktionale Bewertung erweitert. Während die virtuelle Darstellung Systemkonzepte und deren räumliche Zusammenhänge anschaulich vermittelt, ermöglicht die Simulation eine automatisierte Bewertung auf Basis definierter Eingangsparameter. Dadurch können fachfremde Personen unterschiedliche Konzepte entwickeln, diskutieren und untersuchen, ohne die zugrunde liegenden mathematischen Berechnungen und systemspezifischen Zusammenhänge kennen zu müssen. Ideen und Systemvarianten lassen sich somit bereits in frühen Entwicklungsphasen durchspielen und hinsichtlich relevanter Kenngrößen bewerten. Die Ergebnisse können anschließend in den Vorentwurf zurückgeführt werden. Auf diese Weise werden Auswirkungen neuer Konzepte frühzeitig abschätzbar und größere Freiheitsgrade früher Entwicklungsphasen können genutzt werden, um neue Lösungsansätze mit vergleichsweise geringem Änderungs- und Kostenaufwand zu untersuchen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, einen zukunftsfähigen Ansatz zur frühzeitigen, modularen und datenbasierten Abbildung von Kabinensystemen zu entwickeln. Mithilfe parametrische Modellierungsansätze, einem kontinuierlichen Datenmanagement und einer virtuellen Kabinendarstellung sollen Varianten frühzeitig entwickelt, bewertet und optimiert, sowie Integrationsrisiken vermieden werden. Die entwickelte Methodik wird dabei exemplarisch am Water/Waste-System der Flugzeugkabine demonstriert. Im Fokus stehen drei Problemstellungen: die Integration einer durchgängigen Toolkette zwischen MATLAB, Blender und Unity unter Erhalt konsistenter Objekt- und Systeminformationen, die funktionale Analyse von Masse, Energiebedarf und CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von Flugzeit und Nutzungsverhalten sowie die Verknüpfung von Geometrie- und Systeminformationen innerhalb der wissensbasierten Wasserarchitektur. Dieses Kapitel fasst die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen.

Die Arbeit demonstriert eine vollständig integrierte und automatisierte Prozesskette, die vom parametrischen Systementwurf bis zur Visualisierung in einer virtuellen Umgebung reicht. Im Mittelpunkt

der entwickelten Methodik steht die Verknüpfung von Entwurfsparametern mit einer konsistenten Geometrieerzeugung sowie eindeutig definierten Informationsschnittstellen zwischen den einzelnen Prozessschritten.

Durch die Verwendung abstrahierter Geometrieprepräsentationen in Form von Bounding-Boxen, sowie die instanzbasierte Objektgenerierung konnte ein methodischer Rahmen geschaffen werden, der sowohl eine hohe Stabilität des Entwurfsprozesses als auch eine flexible Anpassung an unterschiedliche Randbedingungen erlaubt. Auf dieser Grundlage lassen sich effizient verschiedene Varianten erzeugen, optimieren und bewerten.

Die Anwendung dieses Ansatzes wurde exemplarisch am Water/Waste-System der Flugzeugkabine umgesetzt. Dabei wurden nicht nur geometrische Aspekte sondern auch ein Simulationsmodells zur funktionalen Analyse von Leistungsparametern entwickelt. In der Diskussion der Ergebnisse wird deutlich, dass das entwickelte Modell vor allem als Auslegungs- und Bewertungswerkzeug zu verstehen ist.

Ein wesentlicher Vorteil der entwickelten Methode besteht in der Integration des modellierten Water/Waste-Systems in eine immersive Umgebung. Dadurch werden die Systemkomponenten nicht nur theoretisch dargestellt, sondern können räumlich erlebt werden. Vor allem Bauräume, Platzverhältnisse sowie das subjektive Empfinden von Enge lassen sich deutlich besser bewerten als mit herkömmlichen CAD-Darstellungen. Darüber hinaus ermöglicht die immersive Visualisierung die frühzeitige Einbindung fachfremder Probanden sowie interdisziplinärer Entwicklungsteams, etwa aus den Bereichen Design, Kabine, Wartung oder Human Factors.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die Kombination aus parametrischer Modellierung, automatisierter Simulation, geometrischer Integration und immersiver Visualisierung eine geeignete Grundlage für die frühzeitige Untersuchung von Kabinensystemen bildet. Der wesentliche Mehrwert liegt dabei nicht in der isolierten Betrachtung einzelner Methoden oder Werkzeuge, sondern in deren Verknüpfung zu einer durchgängigen digitalen Prozesskette. Informationen können dadurch über verschiedene Modellierungs- und Bewertungsstufen hinweg konsistent genutzt und die Auswirkungen von Änderungen auf unterschiedliche Bewertungsgrößen frühzeitig untersucht werden.

Damit bildet die entwickelte Methodik einen Baustein für den angestrebten End-to-End digitalen Faden im frühen Flugzeugentwurf. Ziel war es, bereits in frühen Entwicklungsphasen Ergebnisse aus der Systemauslegung zu gewinnen und diese für übergeordnete Entwurfsentscheidungen im Vorentwurf nutzbar zu machen. Werden die gewonnenen Informationen zukünftig gezielt in den Vorentwurf einbezogen und mit weiteren Kabinen- und Flugzeugsystemen gekoppelt, können Varianten frühzeitig verglichen, Wechselwirkungen erkannt und neue oder verän-

derte Systemlösungen mit vergleichsweise geringem Aufwand untersucht werden. Auf diese Weise kann der vorgestellte Ansatz dazu beitragen, Entwicklungsentscheidungen zu einem Zeitpunkt zu unterstützen, an dem Änderungen noch mit geringem Aufwand möglich sind, und damit die frühzeitige sowie kosteneffiziente Untersuchung innovativer Lösungen zu fördern.

Potentiale zur Weiterentwicklung

Für die weitere Entwicklung ergeben sich mehrere Perspektiven. Auf Ebene der Systemauslegung bietet sich insbesondere die Erweiterung auf zusätzliche Kabinensysteme an, sodass der in MATLAB implementierte Entwurfsalgorithmus sukzessive um weitere Systemmodelle ergänzt werden kann. Ein Beispiel hierfür wäre die Einbindung des Grauwassersystems zur Abfuhr von Wasser über Bord oder die Rohrstruktur zur Anbindung an die Galleys.

Langfristig strebt das Institut für Systemarchitektur in der Luftfahrt an, Kabinensysteme direkt innerhalb vom Fuselage Geometry Assembler (FUGA) zu entwickeln und den Zwischenschritt über MATLAB in der weiterführenden Systemauslegung zu umgehen. Die entwickelte Methodik soll daher so weiterentwickelt werden, dass sie sich nahtlos in bestehende wissensbasierte Entwurfsumgebungen integrieren lässt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Kabinensysteme im übergeordneten Flugzeugentwurfsprozess und schafft die Grundlage für eine konsistente Gesamtsystembewertung.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik bietet weitere Erweiterungsmöglichkeiten, die ohne grundlegende Anpassungen der Modellarchitektur realisiert werden können. Besonders vielversprechend ist die Integration eines intelligenten Water/Waste-Managements, das auf Echtzeitdaten aus dem Kabinenbetrieb basiert und eine vorausschauende sowie bedarfsgerechte Steuerung des Ressourcenverbrauchs ermöglicht.

Darüber hinaus erlaubt das modulare Systemmodell die Untersuchung von Recycling- und Aufbereitungstechnologien, etwa zur Reduktion des Frischwasserverbrauchs oder des Abwasservolumens. Neue Komponenten können ergänzt und ihre Auswirkungen auf Masse, Energiebedarf und Emissionen bewertet werden, ohne neue Modellstrukturen entwickeln zu müssen.

Ein weiteres Entwicklungspotenzial liegt in der dynamischen Abbildung unterschiedlicher Nutzungs- und Passagierprofile. Variierende Lavatory-Konfigurationen sowie missions- und nutzerabhängige Parameter lassen sich methodisch bereits abbilden, da unterschiedliche Systemausprägungen modelliert und entsprechende Eingangsgrößen in die bestehende Parametrisierung integriert werden können. Dadurch

wird eine realitätsnähere Berücksichtigung von Einsatzprofilen, kulturellen Hygienegewohnheiten und Serviceanforderungen möglich.

Insgesamt zeigt sich, dass das Water/Waste-System als integraler Bestandteil der Kabinen- und Systemarchitektur zu betrachten ist, mit direktem Einfluss auf Emissionen und Betriebskosten. Die entwickelte Methodik stellt hierfür ein belastbares Grundgerüst dar und schafft die Voraussetzungen für eine schrittweise Weiterentwicklung hin zu einem ganzheitlichen, modellbasierten Systementwurf.

Kontaktadresse:

bennet.rueter@dlr.de

Literatur

- [1] ICAO. Long term forecast, 2025. Online verfügbar.
- [2] IATA. Air passenger market analysis – july 2025, 2025. Online verfügbar.
- [3] IATA. Jet fuel price monitor, 2025. Online verfügbar.
- [4] S European Commission et al. The european green deal, 2019.
- [5] Prof. Frank Thielecke, Thimo Bielsky, Vivian Kriewall. Fliegen ohne CO₂-Abdruck, 2024. Online verfügbar.
- [6] DLR. Auf dem weg zu einer klimaverträglichen luftfahrt, 2021. Online verfügbar.
- [7] Nils Kuelper, Andrew K Jeyaraj, Susan Liscouët-Hanke, and Frank Thielecke. Integration of a model-based systems engineering framework with safety assessment for early design phases: A case study for hydrogen-based aircraft fuel system architecting. *Results in Engineering*, 25:104249, 2025.
- [8] Fiete Rauscher, Pia Allebrodt, Mara Fuchs, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. Abstraktion von hochauflösenden 3d ist-daten in einen konsistenten und systemübergreifenden datensatz für die bewertung des dlr forschungsflugzeugs istar. *Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress 2024*, 2024.
- [9] Mara Fuchs, Yassine Ghanjaoui, Jutta Abulawi, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. Erweiterung der virtuellen entwurfsplattform zur abbildung einer funktionalen systemarchitektur komplexer kabinensysteme. 2021.
- [10] Mara Fuchs. *Ein methodischer Ansatz um heterogene und disziplinspezifische Partialmodelle für Produktvarianten und das Customizing im Flugzeugvorentwurf zu koppeln*. PhD thesis,

Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, 2026.

- [11] T Bahns, Nicolas Gebhardt, and Dieter Krause. A modularization approach for aircraft cabin components. In *4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST) Hamburg*, pages 201–210, 2013.
- [12] Tobias Kreitz and Frank Thielecke. Virtual integration of an all-electric flight control system architecture and the aircraft electrical power distribution network. In *SAE 2016 Aerospace Systems and Technology Conference 244723*, 2016.
- [13] Jorge D Camba, Manuel Contero, and Pedro Company. Parametric cad modeling: An analysis of strategies for design reusability. *Computer-aided design*, 74:18–31, 2016.
- [14] Mara Fuchs, Florian Beckert, Mitul Gopani, Alex Gindorf, and Björn Nagel. *Virtuelle Realität im digitalen Designprozess von Flugzeugkabinensystemen*. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2020.
- [15] Dr. Markus Fischer. Strategie und programm unserer luftfahrtforschung, 2025. Online verfügbar.
- [16] Willhelm Lutzer. Labor für kabine und kabinensysteme, 2025.
- [17] Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, Regulatory Support Division, Aviation Data Systems Branch, Mike Monroney Aeronautical Center. Federal aviation administration joint aircraft system/component code table and definitions, 2008. Online verfügbar.
- [18] Dieter Scholz. 14 wasser-/abwasseranlage, 2025. Online verfügbar.
- [19] Airbus. Airspace cabin vision 2035+, 2023. Online verfügbar.
- [20] Lufthansa Group. Lufthansa allegris, 2023. Online verfügbar.
- [21] Diehl Aviation. Diehl aviation auf der aircraft interiors expo 2025: Produkte und konzepte für die kabine der zukunft, 2025. Online verfügbar.
- [22] Diehl Aviation. Crystal cabin award 2025, 2025. Online verfügbar.
- [23] Marko Alder, Erwin Moerland, Jonas Jepsen, and Björn Nagel. Recent advances in establishing a common language for aircraft design with cpacs. 2020.
- [24] Tim Burschky, Marko Alder, Andrea Mancini, Thimo Bielsky, Vivian Kriewall, Frank Thielecke, and Björn Nagel. Introduction of a system definition in the common parametric aircraft configuration schema (cpacs). *Aerospace*, 12(5):373, 2025.
- [25] Michael Hanna, Johann Schwenke, and Dieter Krause. Inconsistency management for product families with many variants through a model-based approach in modular lightweight design. In *Proceedings of the design society: design conference*, volume 1, pages 917–926. Cambridge University Press, 2020.
- [26] Ganesh Vivek Rajendran, Jan-Niclas Walther, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. Multifidelity parametric cabin component modeling approach for application-driven geometry generation. 2021.
- [27] Jan-Niclas Walther. *Knowledge-based engineering to provide aircraft fuselage design details for multidisciplinary and multifidelity analysis model generation*. PhD thesis, 2024.
- [28] Mara Fuchs, Yassine Ghanjaoui, Jutta Abulawi, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. Enhancement of the virtual design platform for modeling a functional system architecture of complex cabin systems. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(4):1101–1117, 2022.
- [29] Florian Beckert. *Automatisierte Kabinendarstellung der CPACS-Flugzeugdefinition in der Virtuellen Realität*. PhD thesis, Technische Universität Hamburg, 2020.
- [30] Mara Fuchs, Florian Beckert, Jörn Biedermann, and Björn Nagel. A collaborative knowledge-based method for the interactive development of cabin systems in virtual reality. *Computers in Industry*, 136:103590, 2022.
- [31] Bennet Rüter. Entwicklung eines simulationsgestützten modells zur systemauslegung vom water/waste-system in der flugzeugkabine im kontext einer end-to-end digitalen entwurfskette, 2026.
- [32] Shell International B.V. Shell aviation, 2021. Online verfügbar.
- [33] EUROCONTROL. Environmental assessment report 2022, 2022. Online abgerufen 10 Juli 2025.