

# **DLR-IB-SL-HF-2026-20**

**Entwicklung eines  
simulationsgestützten Modells zur  
Systemauslegung vom  
Water/Waste-System in der  
Flugzeugkabine im Kontext einer  
End-to-End digitalen Entwurfskette**

**Masterarbeit**

Bennet Rüter



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**

## Dokumenteigenschaften

**Titel** Entwicklung eines simulationsgestützten Modells zur Systemauslegung vom Water/Waste-System in der Flugzeugkabine im Kontext einer End-to-End digitalen Entwurfskette

---

**Betreff** Masterarbeit

---

**Institut** Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt (SL)

---

**Erstellt von** Bennet Rüter

---

**Beteiligte**

---

**Geprüft von** M.Sc. Mara Fuchs (DLR-SL)

---

**Freigabe von** Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi (HAW Hamburg)

---

**Datum** 20.04.2026

---

**Version** 1.0

---

**Dateipfad**

---



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Technik und Informatik

Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Flugzeugbau - Master of Science (M.Sc.)

### **Masterarbeit**

Student:

Bennet Rüter

2730176

Bennet.rueter@haw-hamburg.de

Bearbeitungszeitraum:

01.07.2025 bis 31.12.2025

Thema:

Entwicklung eines simulationsgestützten Modells zur Systemauslegung vom Water/Waste-System in der Flugzeugkabine im Kontext einer End-to-End digitalen Entwurfskette

Institut:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt (SL)

Prüferin:

Prof. Dr. Jutta Abulawi

Externe Betreuerin:

M.Sc. Mara Fuchs

## I Eigenständigkeitserklärung

Gemäß §8, Abs. 9 AT-BPO/MPO folgt eine Eigenständigkeitserklärung.

„Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne  
Zuhilfenahme anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt  
habe. Die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind  
als solche kenntlich gemacht.“

Hamburg, den 26.12.2025

---



---

Bennet Rüter

## II Zusammenfassung

**Bennet Rüter**

### **Thema der Masterthesis**

Entwicklung eines simulationsgestützten Modells zur Systemauslegung vom Water/Waste-System in der Flugzeugkabine im Kontext einer End-to-End digitalen Entwurfskette

### **Stichworte**

Systemfunktionen und Anforderungen, Parametrische Modellierung, Kabinenentwurf, Simulationsmodells zur funktionalen Analyse, virtueller Entwicklungsprozess, Lavatory-System

### **Kurzzusammenfassung**

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Ansatzes zur parametrischen Modellierung von Lavatories innerhalb der digitalen Flugzeugkabinenentwicklung. Im Mittelpunkt steht die Idee, sanitäre Kabinenbereiche so abzubilden, dass sie sich automatisch auf unterschiedliche Layoutanforderungen anpassen. Dazu wurde eine MATLAB-basierte Simulation programmiert, die die Positionierung von Water/Waste-Komponenten in Single-Aisle-Konfigurationen abbildet.

Die Modellierung geht allerdings über geometrische Aspekte hinaus: Energiebedarf, Wasserverbrauch, anfallender Abfall und die Emissionen werden erfasst und ausgewertet. Durch die Integration in einen durchgängigen digitalen Entwicklungsprozess können somit Varianten der Lavatory frühzeitig beurteilt und auf ihren Einfluss auf das Kabinenlayout untersucht werden. Die Arbeit liefert damit einen Beitrag zu einer nachhaltigen, datengetriebenen Gestaltung zukünftiger Flugzeugkabinen.

**Bennet Rüter****Title of paper**

Development of a simulation-based model for the system design of the water/waste system in the aircraft cabin in the context of an end-to-end digital design chain

**Keywords**

System functions and requirements, parametric modeling, cabin design, simulation model for functional analysis, virtual development process, lavatory system

**Abstract**

This master's thesis deals with the development of an approach for the parametric modeling of lavatories within digital aircraft cabin development. The focus is on the idea of mapping sanitary cabin areas in such a way that they automatically adapt to different layout requirements. For this purpose, a MATLAB-based simulation was programmed that maps the positioning of Water/Waste-Components in single-aisle configurations.

The modeling goes beyond geometric aspects: energy requirements, water consumption, waste generated, and emissions are recorded and evaluated. By integrating this into a continuous digital development process, lavatory variants can be assessed at an early stage and examined for their impact on the cabin layout. The thesis thus contributes to the sustainable, data-driven design of future aircraft cabins.

### **III Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich all den Menschen danken, die mich auf meinem Weg durch das Studium begleitet und unterstützt haben. Ohne die Ermutigung, Geduld und das Vertrauen in meine Fähigkeiten wäre ich jetzt nicht da wo ich stehe.

Ein besonderer Dank gilt meinem Stiefvater Thorsten, der mir mit Rat, Tat und auch finanziell so unter die Arme gegriffen hat, dass ich ohne ihn diesen Karriereweg nie hätte beschreiten können. Das ist für mich nicht selbstverständlich gewesen.

Auch meiner Betreuerin Mara möchte ich danken für die Unterstützung, das Vertrauen und das offene Ohr bei Problemen, Fragen oder Herausforderungen.

Zuletzt einen Dank an meine betreuende Professorin Jutta, für die Begleitung und die Ratschläge während dieser Arbeit und im Studium allgemein.

Diese Arbeit widme ich meiner verstorbenen Mutter Karin Rüter-Franke.

## IV Inhaltsverzeichnis

I	Eigenständigkeitserklärung.....	I
II	Zusammenfassung.....	II
III	Danksagung.....	IV
IV	Inhaltsverzeichnis.....	V
V	Abbildungsverzeichnis.....	VIII
VI	Tabellenverzeichnis.....	X
VII	Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1	Einleitung.....	1
1.1	Aufbau der Arbeit.....	2
1.2	Einführung in die Forschung.....	4
1.3	Wissenschaftliches Interesse und aktueller Stand.....	6
1.4	Ziel und Forschungsfragen dieser Arbeit.....	9
1.5	Grenzen der Arbeit.....	10
2	Basiswissen und Grundlagen.....	12
2.1	Zukünftige Entwicklungsperspektiven der Kabine.....	12
2.1.1	Stand der aktuellen Kabinenentwicklungen.....	12
2.1.2	Digitale Vernetzung von Kabinensystemen.....	13
2.1.3	Nachhaltigkeitsaspekte der Kabine.....	14
2.2	Eingesetzte Software und ihre Anwendungsbereiche.....	15
2.2.1	CPACS - strukturierte Datenbeschreibung.....	15
2.2.2	MATLAB - Simulation und Analyse.....	17
2.2.3	Blender - geometrische Modellierung.....	18
2.2.4	Unity - Darstellung in einer virtuellen Umgebung.....	18
2.3	Grundlagen der parametrischen Modellierung.....	19
2.3.1	Einführung in die Objektorientierte Programmierung.....	20
2.3.2	Anwendungsbeispiel der OOP.....	22
2.4	Entwicklungsprozess von Flugzeugen.....	25
2.4.1	Auslegungsprozess der Kabine.....	26

---

2.5	Überblick über Systemgrenzen und Standards .....	28
2.5.1	Regulatorische Voraussetzungen für die Zulassung .....	28
2.5.2	Überblick über die ATA Klassifikation .....	29
2.5.3	Einflussfaktoren und Schnittstellen der Lavatory.....	30
2.6	Einbindung des Lavatory in die Kabinenstruktur .....	32
2.6.1	Raum- und Gewichtsbeschränkungen .....	32
2.6.2	Montage und Instandhaltung der Lavatory .....	33
2.6.3	Lebenszyklusbetrachtung und Recycling .....	33
2.6.4	Digitale Vernetzung von Kabinensystemen.....	34
2.6.5	Modernisierung der Kabinenkomponente .....	35
2.7	Funktionsweise des Water/Waste-Systems .....	36
2.8	Dreidimensionale Visualisierung .....	40
2.9	Anwendung von Virtual-Reality-Technologie.....	42
3	Aufbau und Parametrisierung des Systems .....	44
3.1	Untersuchungsfall der Arbeit .....	44
3.2	Komponenten des Water/Waste-Systems.....	45
3.3	Arbeitsweise und Umsetzung in MATLAB.....	47
3.4	Positionierung der Kabinenkomponenten.....	53
3.5	Überführung der Komponenten in eine virtuelle Umgebung.....	56
3.5.1	Datenexportprozess aus Matlab.....	56
3.5.2	Datenschnittstelle zu Blender.....	59
3.5.3	Import der Daten in Blender .....	60
3.5.4	Erkundbare Darstellung in Unity.....	64
4	Der Mensch als Einflussfaktor .....	67
4.1	Berücksichtigung menschlicher Faktoren.....	67
4.2	Menschliche Anforderungen an das Water/Waste-System .....	71
4.2.1	Vorbetrachtung der auftretenden Massen.....	73
4.2.2	Vorbetrachtung der benötigten Energie .....	75
4.2.3	Vorbetrachtung zu CO <sub>2</sub> -Emissionen und Betriebskosten.....	76
5	Entwicklung eines simulationsgestützten Modells .....	77

---

5.1	Beschreibung der angewandten Methodik .....	77
5.2	Modellbeschreibung und mathematisches Vorgehen.....	80
5.2.1	Grundaufbau der Methodik.....	80
5.2.2	Methodik zur Abbildung der Toilettennutzung .....	81
5.2.3	Modellierung zusätzlicher Frischwasserverbräuche .....	83
5.2.4	Analyse der Gesamtverbräuche.....	83
5.2.5	Modellierung der elektrischen Energie .....	84
5.2.6	Berechnungsansatz von Kerosinverbrauch und CO <sub>2</sub> -Ausstoß.....	86
5.2.7	Modellierung der Kosten durch Masse und Energie.....	88
5.3	Ergebnisse der Water/Waste-Simulation.....	89
5.3.1	Betrachtungsfall einer Flugzeit von zwei Stunden.....	89
5.3.2	Betrachtungsfall einer Flugzeit von vier Stunden .....	90
5.3.3	Betrachtungsfall einer Flugzeit von acht Stunden .....	92
6	Kritische Betrachtung der Ergebnisse .....	95
6.1	Analyse der anfallenden Systemmassen .....	95
6.2	Analyse des Energieverbrauchs.....	98
6.3	Analyse von Emissionen und Kosten .....	103
6.4	Aussagekraft der Ergebnisse .....	106
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	108
7.1	Zusammenfassung der Arbeit .....	108
7.2	Antwort auf die gestellten Forschungsfragen .....	110
7.3	Praktische Implikationen .....	113
7.4	Weiterführende Forschung.....	113
8	Literaturverzeichnis .....	116
9	Anhang und Anleitung .....	121

## V Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Digitaler Faden (Fuchs, et al., 2021).....	7
Abbildung 2: Kabinenstrukturentwurfsprozess (Fuchs, et al., 2021).....	8
Abbildung 3: Ausschnitt des CPACS-Schemas (Beckert, 2020).....	16
Abbildung 4: Objektorientierten Kabinenmodellierung (Beckert, 2020) .....	23
Abbildung 5: Barrierefreie Space <sup>3</sup> Lavatory (Diehl Aviation AIX, 2025) .....	30
Abbildung 6: Einflussfaktoren und Schnittstellen der Lavatory im Flugzeug.....	31
Abbildung 7: Water/Waste System (Lutzer, 2024).....	37
Abbildung 8: Wasteholding Tank (Airbus, 2018).....	38
Abbildung 9: Nutzeroberfläche von Blender mit Waschbecken (A320) .....	41
Abbildung 10: VR-Ausrüstung der HTC Vive Pro Eye .....	42
Abbildung 11: Lufthansa A320 (Airbus, 2007) .....	44
Abbildung 12: A320 Rumpf Lufthansa Technik, Foto: ZAL GmbH / Daniel Reinhardt .....	46
Abbildung 13: Drainvalve Lavatory/Galley.....	47
Abbildung 14: Portable Watertank (Airbus, 2018).....	49
Abbildung 15: Cabin Layout A320 (MATLAB) als Quader .....	53
Abbildung 16: WWS in MATLAB .....	55
Abbildung 17: Quaderdarstellung der Komponenten in Blender.....	61
Abbildung 18: Detaillierte Modelldarstellung der Komponenten in Blender .....	63
Abbildung 19: Rumpfausschnitt mit eingebauten Water/Waste-Komponenten ....	64
Abbildung 20: Benutzeroberfläche von Unity.....	64
Abbildung 21: Lavatory in der VR mit Informationsausgabe.....	65
Abbildung 22: Anwählen eines Objekts in der VR .....	66
Abbildung 23: Bedürfnispyramiden nach Bubb und Maslow (Konieczny, 2024) ...	67
Abbildung 24: Bedürfnispyramide des WWS.....	68
Abbildung 25: Kano-Modell (Konieczny, 2024).....	69
Abbildung 26: Bewertungskette des WWS .....	77
Abbildung 27: A320 Wasser- und Abfallvolumen des WWS.....	95

---

Abbildung 28: A320 Energiebedarf des WWS ohne Heizer und Generator.....	99
Abbildung 29: A320 Energiebedarf des WWS ohne H & G im Detail .....	101
Abbildung 30: A320 Energiebedarf des WWS mit Heizer & Generator .....	102
Abbildung 31: A320 CO <sub>2</sub> - Emissionen des WWS .....	104
Abbildung 32: A320 CO <sub>2</sub> - Emissionen des WWS im Detail .....	105
Abbildung 33: Funktionsweise des Frischwassersystems (Hoppen, 2014) .....	121
Abbildung 34: Funktionsweise des Grauwassersystems (Hoppen, 2014) .....	123
Abbildung 35: Funktionsweise des Abwassersystems (Hoppen, 2014).....	124
Abbildung 36: Datenblattauszug Pi 3 (Raspberry Pi Foundation, 2025) .....	126
Abbildung 37: Datenblattauszug InnoLite Toilet (Diehl InnoLite, 2018) .....	127
Abbildung 38: Datenblattauszug Watervalve (International Water-Guard Industries Inc., 2018).....	128
Abbildung 39: Datenblattauszug IWG-HE (International Water-Guard Industries Inc., 2014).....	129
Abbildung 40: Inhalt des digitalen Anhangs.....	139
Abbildung 41: Ordner der MATLAB-files .....	140
Abbildung 42: MATLAB main.m-file .....	140
Abbildung 43: MATLAB b_plotAIAA-file.....	141
Abbildung 44: WWS als Quaderdarstellung .....	141
Abbildung 45: Rumpfsektion der Lavatories .....	142
Abbildung 46: Simulationsfile des WWS.....	142

## VI Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Angewendete Software .....	15
Tabelle 2: ATA Kapitel der Lavatory .....	29
Tabelle 3: Komponenten ATA-38 Water/Waste .....	45
Tabelle 4: Flüssigkeitsabgabe nach Faustformel (162 PAX) .....	74
Tabelle 5: Angenommener Anteil an Nutzern und Nutzungen des WWS .....	81
Tabelle 6: Übersicht physikalischer Abhängigkeiten für das WWS .....	88
Tabelle 7: Ergebnisse des Zweistundenfluges .....	89
Tabelle 8: Ergebnisse des Vierstundenfluges .....	91
Tabelle 9: Ergebnisse des Achtstundenfluges .....	92
Tabelle 10: Massenvergleich von 2,4,8 Stunden Flugzeit .....	96
Tabelle 11: Energievergleich des WWS von 2,4,8 Stunden Flugzeit .....	103
Tabelle 12: CO <sub>2</sub> -Emissionen des WWS von 2,4,8 Stunden Flugzeit .....	106
Tabelle 13: Gemessene Leistungswerte eines Pi 3 .....	125

## VII Abkürzungsverzeichnis

3D	Drei-dimensional
APU	Auxiliary Power Unit
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated
ATA	Air Transport Association
CAD	Computer Aided Design
CMS	Cabin Management System
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPACS	Common Parametric Aircraft Configuration Schema
CS-25	Certification Specifications for Large Aeroplanes
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FBX	Filmbox-Dateiformat
FPC	First Person Controller
HMI	Mensch-Maschine-Interaktion
ID	Identifier
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LHV	Lower Heating Value
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MDO	Multidisziplinären Designoptimierung
MTOW	Maximales Startgewicht
OEM	Original Equipment Manufacturer
OHSC	Overhead Stowage Compartment
OOP	Objektorientierte Programmierung
PAX	Passagiere bzw. Fluggäste
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SysML	Systems Modeling Language
TLARs	Top Level Aircraft Requirements

---

VR	Virtual Reality
WWS	Water/Waste System
WWSC	Water/Waste System Controller
XLR	Extra Long Range
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Masterstudiengangs Flugzeugbau an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) ist eine Masterarbeit zu erstellen, die dem Erwerb des akademischen Grades *Master of Science (M.Sc.)* dient. Ziel dieser Arbeit ist es, innerhalb eines Zeitraums von sechs Monaten eine fachlich relevante Problemstellung eigenständig und methodisch belegt zu bearbeiten. Der Bearbeitungsprozess erfolgt größtenteils im Selbststudium, wird jedoch durch regelmäßige Absprachen mit den betreuenden Prüfern unterstützt. Die Arbeit ist im Studiengang M.Sc. Flugzeugbau angesiedelt und behandelt daher ein Thema mit Bezug zur Luftfahrt.

Die Hauptaufgabe eines Flugzeugs besteht im Transport von Nutzlasten wie Passagieren, deren Gepäck und Fracht zwischen verschiedenen Zielen. Dabei spielt die Flugzeugkabine eine wichtige Rolle, da sie den Raum für die Unterbringung bereitstellt. Je nach Art der Nutzlast ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an das Kabinensystem. Besonders anspruchsvoll sind diese Anforderungen bei Passagierflugzeugen: Neben sicherheitsrelevanten Punkten wie der Gewährleistung einer lebensfreundlichen Umgebung und der Versorgung mit Notfallsauerstoff, stehen auch Komfortmerkmale wie eine angenehme Klimatisierung, sowie Beleuchtung oder die Ausstattung mit sanitären Einrichtungen im Fokus.

Die vorliegende Masterarbeit setzt sich mit genau diesen Sanitäreinrichtungen auseinander und behandelt die Entwicklung eines digitalen Modells zur konzeptionellen Auslegung des Systems innerhalb der Flugzeugkabine. Im Mittelpunkt steht die Erfassung, Bewertung und Integration sowohl technischer als auch ergonomischer Anforderungen, mit dem Ziel, ein umfassendes und realitätsnahes Abbild des Systems zu erstellen. Dieses Modell soll anschließend in eine virtuelle Umgebung überführt werden, in der es interaktiv erkundet und auf Umsetzbarkeit sowie Praxistauglichkeit geprüft werden kann. Die Vorgehensweise beinhaltet zum einen die digitale Modellierung sämtlicher Systemkomponenten, einschließlich der räumlichen Anordnung und logischen Verbindungen und zum anderen die Entwicklung eines simulationsbasierten Modells, das das Verhalten des Systems unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen realistisch darstellen soll.

## 1.1 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel gegliedert, die auf einander aufbauen und eine strukturierte Herangehensweise an das Thema ermöglicht.

### **Kapitel 1: Einleitung**

Kapitel 1 führt in das Thema ein, beschreibt den wissenschaftlichen Kontext und die Motivation, benennt die Zielsetzung der Untersuchung sowie die zugehörigen Forschungsfragen und grenzt den Umfang der Arbeit ein.

### **Kapitel 2: Grundlagen**

Kapitel 2 liefert die notwendigen Grundlagen zur Einordnung der Thematik. Dazu gehören die verwendeten Softwarewerkzeuge, deren Rollen im digitalen Entwicklungsprozess, eine Einführung in die parametrische Modellierung sowie die objektorientierte Programmierung als Basis der Umsetzung. Anschließend werden Aspekte des Flugzeugentwicklungsprozesses, insbesondere der Kabinenauslegung, Entwicklungen sowie luftfahrtspezifische Standards, Schnittstellen und Zulassungsanforderungen dargestellt. Darüber hinaus werden die Integration, Funktion und Lebenszyklus der Lavatory beschrieben sowie des Water/Waste-Systems. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung dreidimensionaler Modelle und deren Nutzung.

### **Kapitel 3: Aufbau und Parametrisierung des Systems**

Kapitel 3 widmet sich der praktischen Umsetzung. Es beschreibt den gewählten Untersuchungsfall, die modellierten Systemkomponenten sowie die schrittweise Implementierung in MATLAB. Anschließend wird erläutert, wie die Komponenten im Kabinenraum platziert und anschließend über eine Datenexportstruktur in eine VR-Umgebung überführt werden. Die technischen Schnittstellen der Programme werden dabei detailliert aufgezeigt.

### **Kapitel 4: Faktor Mensch**

Kapitel 4 betrachtet den Menschen als Nutzer des Systems. Mithilfe von Erkenntnissen aus den Human Factors werden daraus Anforderungen an die Lavatory abgeleitet. Ergänzend werden auf Basis erster Abschätzungen die Auswirkungen menschlicher Nutzung auf Ressourcenverbrauch, Energiebedarf und Emissionspotenziale analysiert.

**Kapitel 5: Simulation**

Kapitel 5 beschreibt das Simulationsmodell im Detail und erläutert die zugrunde liegenden Berechnungsansätze. Es umfasst die mathematische Modellierung von Wasserströmen, Energiebedarf, Masseentwicklungen, Emissionsberechnungen und Kosten. Anschließend werden die Simulationsergebnisse für drei Flugzeitprofile dargestellt.

**Kapitel 6: Diskussion und Ausblick**

Kapitel 6 diskutiert die Ergebnisse hinsichtlich Masseentwicklung, Energiebedarf und Emissionswirkung des Systems. Dabei werden die Ergebnisse analysiert und in Bezug zu technischen, betrieblichen und nachhaltigkeitsrelevanten Anforderungen gesetzt.

**Kapitel 7: Fazit**

Kapitel 7 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammen, bewertet die Aussagekraft des Modells, beantwortet die Forschungsfragen und gibt einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen sowie zukünftige Forschungsrichtungen im Bereich der modellbasierten Kabinenentwicklung.

**Kapitel 8: Literaturverzeichnis**

Kapitel 8 beinhaltet das Literaturverzeichnis in welchem alle im Text beschriebenen Quellen aufgelistet werden.

**Kapitel 9: Anhang**

Kapitel 9 enthält ergänzende Materialien, die zur Nachvollziehbarkeit der Arbeit beitragen und eine Anleitung zur Nutzung des digitalen Anhangs.

## 1.2 Einführung in die Forschung

Internationale Analysen, unter anderem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), prognostizieren für die kommenden Jahrzehnte einen anhaltenden Anstieg des globalen Luftverkehrs (IATA, 2025a). Trotz technischer Fortschritte führt dieser Trend zu einem weiter wachsenden Bedarf an Energie und Ressourcen, da mehr Menschen weltweit fliegen wollen und Mobilität zunehmend als Grundbedürfnis betrachtet wird (IATA, 2025a).

Gleichzeitig steht die Luftfahrtbranche vor ökologischen und politischen Herausforderungen. Der Klimawandel, verschärfte gesetzliche Vorgaben wie der European Green Deal sowie ein gesellschaftliches Umdenken im Umgang mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß erzeugen Druck, Lösungen für umweltverträglichere Flugzeuge zu entwickeln (European Commission, 2019). Verbesserungen in kleinen Schritten reichen dabei nicht mehr aus. Zukünftig sind tiefgreifende technologische Innovationen und neue Wege in der Flugzeugentwicklung erforderlich, um den Umwandlungsprozess wirksam zu gestalten (DLR, 2021).

Als Schlüssel zur Erreichung dieser Ziele wird die vollständige Digitalisierung des Entwicklungs- und Betriebsprozesses betrachtet. Das DLR verfolgt hierzu das Konzept einer durchgängig digital unterstützten Luftfahrtsystementwicklung (Rauscher, et al., 2024). Der Ansatz sieht vor, sämtliche Phasen virtuell abzubilden, zu analysieren und kontinuierlich zu verbessern.

Während digitale Methoden in der Luftfahrtentwicklung bislang überwiegend für Strukturen, Triebwerke oder aerodynamische Systeme eingesetzt werden, gewinnt zunehmend auch die Kabine als technisches Gesamtsystem an Bedeutung (Fuchs, et al., 2021). Auch das Water/Waste-System (im Folgenden auch WWS genannt) zur Ver- und Entsorgung von Wasser übernimmt eine zentrale Funktion im Flugbetrieb. Es beeinflusst den Energie- und Ressourcenbedarf und ist direkt für das Wohlbefinden der Passagiere verantwortlich (Konieczny, 2024).

Die Flugzeugkabine ist durch eine Vielzahl von Bauteilen und Systemen gekennzeichnet, deren komplexes Zusammenspiel die Gestaltung anspruchsvoll macht. Die Kabine ist komplex, wegen der wechselseitigen Abhängigkeiten bzw. der starken Vernetzungen untereinander. Die entstehenden Anforderungen, die die Platzierung einzelner Kabinenkomponenten bestimmen, sind oft nicht direkt erkennbar (Bahns, et al., 2013). Das liegt an den Modellen, die entweder nicht existieren oder vom Menschen schwer interpretiert werden können, den Informationen, die in verschiedensten Dokumenten verstreut sind oder der schlechten Kommunikation zwischen den Experten an sich, um mögliche Gründe aufzuzählen.

Im klassischen Entwicklungsprozess wird die Kabine oft nur begrenzt beachtet. In frühen Entwurfsphasen wird sie nur grob anhand grundlegender Kabinenanforderungen dimensioniert. Eine detaillierte Auslegung erfolgt hingegen deutlich später (Koniczny, 2024). Dadurch muss sich die Kabine an bestehende räumliche und technische Restriktionen anpassen, anstatt gleichwertig mit anderen Subsystemen entwickelt zu werden. Dieser Bottom-up-Ansatz erschwert Innovationen, erhöht Nachweis- und Integrationsaufwand und erschwert kundenindividuelle Anpassungen für beispielsweise barrierefreie Sanitärbereiche.

Ein zukunftsfähiger Entwicklungsprozess erfordert daher Methoden, die kabinenbezogene Systeme frühzeitig, modular und datenbasiert abbilden. Parametrische Modellierungsansätze bieten hierfür eine geeignete Grundlage (Camba, et al., 2016). Sie ermöglichen die automatisierte Erzeugung und Bewertung zahlreicher Varianten auf Basis definierter Eingabegrößen. In Kombination mit einem kontinuierlichen Datenmanagement können technische, betriebliche und kundenspezifische Anforderungen bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden. Dadurch lassen sich Integrationsrisiken reduzieren und gleichzeitig personalisierte Kabinenlösungen gestalten.

Zusätzlich ermöglicht eine virtuelle Darstellung der Kabine Transparenz im Entwicklungsprozess. Der Mensch kann verschiedene Modellansichten auswählen und Ergebnisse (Daten, Simulationen, Informationen) direkt mit der Geometrie bzw. dem Bauteil verknüpfen (Fuchs, et al., 2020). Dies macht Ergebnisse interpretierbar sowie greifbar, auch für fachfremde Personen. Menschen können dadurch leichter mit den Informationen arbeiten, da Datenformate wie XML-Dateien oder Datenbanken für sie oft zu komplex sind und daher besser von Computern verarbeitet werden. Damit werden Anforderungen nachvollziehbar und die Verbindungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten lassen sich abbilden. Mithilfe der virtuellen Umgebung erhalten die Nutzer einen Gesamtüberblick der Kabine, der eine ganzheitliche Analyse erlaubt. Auf dieser Grundlage können neue Kabinendesigns entwickelt, bewertet und optimiert werden. Darüber hinaus fördert eine Virtual-Reality (VR)-Plattform die Zusammenarbeit zwischen Forschungspartnern, indem sie eine interaktive Beteiligung am Gestaltungs- und Bewertungsprozess ermöglicht (Fuchs, et al., 2020).

Diese Masterarbeit setzt an diesem Bedarf an. Ziel ist die Entwicklung einer Methodik zur parametrischen Modellierung der Lavatory, die eine frühzeitige digitale Auslegung ihrer technischen, räumlichen und energetischen Eigenschaften unterstützt.

### 1.3 Wissenschaftliches Interesse und aktueller Stand

Die Entwicklung von Flugzeugkabinen stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar, da zahlreiche technische Anforderungen, Systeme und Bauteile zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden müssen. Um damit umzugehen, verfolgt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) das Ziel, den gesamten Produktlebenszyklus der Luftfahrt zu digitalisieren (DLR, 2022). Mithilfe digitaler Werkzeuge und automatisierter Prozesse soll die Entwicklung besser gestaltet und der Aufwand reduziert werden.

Das Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt erforscht in diesem Zusammenhang, wie sich der Kabinenentwurf durch modellbasierte Methoden verbessern lässt. Dafür entsteht eine virtuelle Entwurfsplattform, die Planung, Bewertung und Weiterentwicklung von Kabinensystemen unterstützt. Sie verknüpft verschiedene Softwarewerkzeuge miteinander: Der CAMEO Systems Modeler ermöglicht die systemseitige Modellierung, Blender dient zur 3D Visualisierung, MATLAB unterstützt simulationsbasierte Analysen und Unity schafft eine begehbare Umgebung zur Validierung (Fuchs, et al., 2022). Auf dieser Basis sollen schon in frühen Entwicklungsphasen realitätsnahe Systemarchitekturen entstehen, die auf konsistenten Datengrundlagen beruhen.

Durch virtuelle Prototypen können unterschiedliche Konfigurationen simuliert und bewertet werden, ohne physische Modelle aufzubauen. Dies erleichtert es, Varianten früh zu vergleichen, Entscheidungen abzusichern und Erkenntnisse direkt in den weiteren Entwicklungsprozess zu übernehmen (Rauscher, et al., 2024). Damit können Entwicklungszeiten verkürzt, Kosten reduziert und mehr Flexibilität im Design geschaffen werden.

Dabei wird im Rahmen eines virtuellen Original Equipment Manufacturer (OEM)-Ansatzes eine durchgängige und abgestimmte Systementwicklung von der frühen Konzeptphase bis zur genauen Analyse angestrebt (DLR, 2022). Ein besonderes Element dieses Ansatzes ist der sogenannte „Digitale Faden“ (siehe Abbildung 1, grün dargestellt), der die durchgängige Verknüpfung, Rückverfolgbarkeit und Konsistenz sämtlicher Entwurfsdaten entlang des gesamten Entwicklungsprozesses sicherstellt (Fuchs, et al., 2021). Mit „digitaler Faden“ wird ein durchgängiger Datenfluss bezeichnet, der über alle Phasen eines Produkts hinweg Anwendung findet. Er verknüpft alle relevanten Informationen, Modelle und Entscheidungen miteinander, so dass Änderungen jederzeit rückverfolgbar sind und Daten ohne Medienbruch zwischen Tools, Abteilungen und Prozessschritten genutzt werden können (Rauscher, et al., 2024).

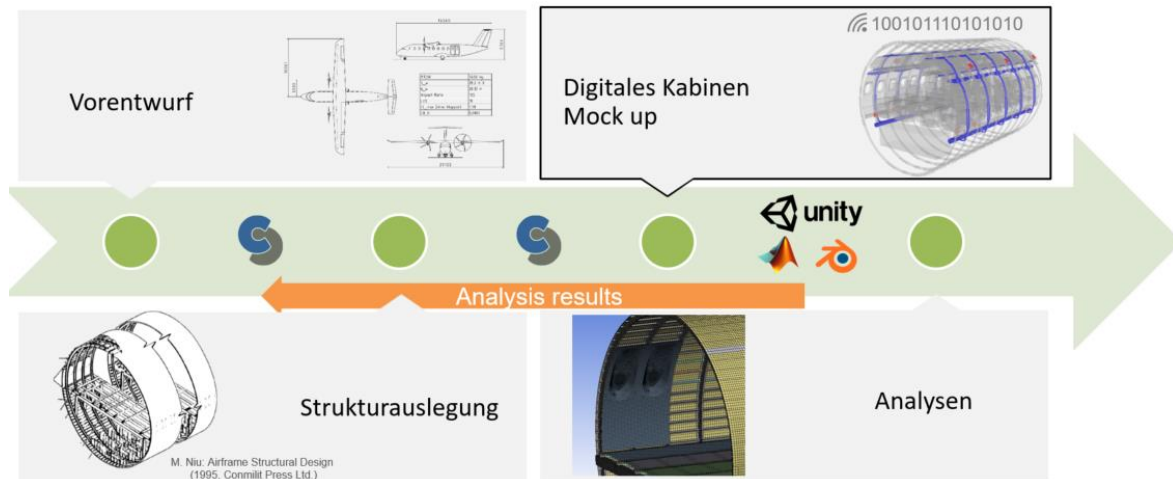


Abbildung 1: Digitaler Faden (Fuchs, et al., 2021)

Das gezeigte Bild visualisiert einen digitalen Faden (grün) im Entwicklungsprozess einer Flugzeugkabine. Es zeigt, wie Daten, Modelle und Erkenntnisse entlang verschiedener Entwicklungsphasen miteinander verbunden werden und sich gegenseitig beeinflussen (Fuchs, et al., 2021). Im ersten Schritt steht der Vorentwurf, in dem grundlegende geometrische und strukturelle Parameter des Flugzeugs festgelegt werden. Hier entsteht eine erste Beschreibung der Kabine. Diese frühen Daten bilden den Ausgangspunkt des digitalen Fadens. Darauf folgt die Strukturauslegung, in der technische Anforderungen erarbeitet werden. Der digitale Faden stellt sicher, dass Anpassungen aus diesem Schritt wieder auf die Entwurfsebene zurückwirken und nicht isoliert betrachtet werden. Als nächstes folgt das digitale Kabinen-Mock-up. Dieses virtuelle Modell verbindet Entwurfs- und Strukturdaten. Hier fließen relevante Merkmale ein wie Geometrie, Materialeigenschaften, Komponenten, Systemintegration und mehr. Der digitale Faden führt von dort aus weiter zu den Analysen. Mithilfe der bereits angesprochenen Software (Unity, MATLAB, Blender) werden beispielsweise Nutzerszenarien oder ergonomische Aspekte untersucht. Die gewonnenen Analyseergebnisse (orange) fließen anschließend zurück in das vorgelagerte Modell, wodurch Optimierungsschritte frühzeitig durchgeführt werden können. Auf diese Weise entsteht ein kontinuierlicher, rückverfolgbarer Informationsfluss, der die Kabinenentwicklung effizienter und transparenter macht (Fuchs, et al., 2021).

Der Kabinensystementwurfsprozess (siehe Abbildung 2) beginnt mit dem Import strukturbezogener Flugzeugparameter über das am DLR entwickelte Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) (CPACS, 2015).

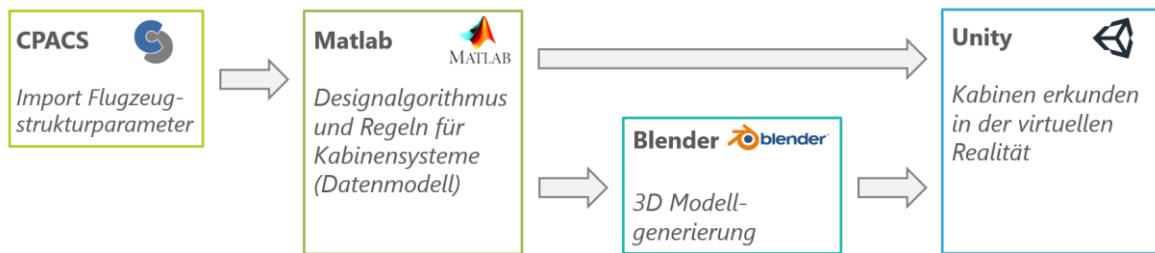


Abbildung 2: Kabinenstrukturentwurfsprozess (Fuchs, et al., 2021)

Dabei können flugzeugspezifische Daten wie die Anzahl und Position von Sitzen, Notausgängen sowie Strukturelementen (z. B. Spanten) eingelesen werden (CPACS, 2015). Auf Grundlage dieser Parameter wird dann ein Bauraum definiert, innerhalb dessen die Kabinensysteme und ihre Komponenten platziert und gestaltet werden.

Die gewonnenen Daten werden anschließend in MATLAB weiterverarbeitet. Mithilfe festgelegter Designregeln und Algorithmen wird eine erste Systemauslegung erstellt. Durch den Import aus CPACS ist eine parametrisierte Modellierung möglich, bei der Änderungen im Flugzeugdesign automatisch in die Entwurfsumgebung übernommen werden können (Fuchs, et al., 2021). Dies gewährleistet eine anpassbare Modellbasis für die virtuelle Entwicklung und Optimierung von Kabinensystemen. Das resultierende Modell entsteht zunächst auf Basis einfacher Quaderblöcke, die als Platzhalter für die zuvor konzipierten und positionierten Komponenten dienen. Diese Grundformen ermöglichen eine schnelle, flexible Anordnung und bilden die Ausgangsbasis für den schrittweisen Übergang zu einem detaillierten 3D-Modell.

Eine automatisierte Datenübergabe an Blender ermöglicht es anschließend, aus diesen Informationen ein komplexes, visuell anspruchsvolles Kabinenmodell mit sämtlichen integrierten Systemen zu erstellen und die Quader durch detaillierte 3D-Modelle zu ersetzen, die den räumlichen Anforderungen der echten Bauteile entsprechen (Fuchs, et al., 2021).

Nach der Modellerstellung in Blender, steht dieses zur Weiterverarbeitung bereit und wird über eine weitere Schnittstelle in die Unity-Engine übertragen. Dort werden sowohl die 3D-Modelle als auch die zugrunde liegenden Entwurfsdaten in eine interaktive, virtuelle Umgebung eingebettet (Fuchs, et al., 2021).

Diese Umgebung erlaubt es, die Kabine virtuell zu begehen, ihre Strukturen und Systeme im Detail zu erkunden und sogar mit ihnen zu interagieren. Der Detailgrad der Modelle nimmt dabei im Verlauf des gesamten Prozesses von den abstrakten Blöcken bis hin zur immersiven Darstellung kontinuierlich zu.

Zusammenfassend ergibt sich die Motivation hinter diesem Ansatz aus den unterschiedlichen Herausforderungen moderner Systementwicklung. Funktionale Eigenschaften von Kabinensystemen sollen möglichst frühzeitig abgebildet und bewertet werden. Zudem treten komplexe und systemübergreifende Wechselwirkungen auf, die erfasst, kontrolliert und dokumentiert werden müssen. Hierzu sind durchgängige und nachvollziehbare Datensätze erforderlich, die eine transparente Rückverfolgbarkeit von Änderungen und eine Verringerung von Fehlerquellen sicherstellen. Die Darstellung soll komplexer Zusammenhänge im Entwurfsprozess vereinfacht und interdisziplinäre Kommunikation fördern.

## 1.4 Ziel und Forschungsfragen dieser Arbeit

Die Entwicklung und Auslegung von Kabinensystemen moderner Verkehrsflugzeuge bewegt sich zunehmend in einem Spannungsfeld aus funktionalen Anforderungen, Kostendruck, Systemkomplexität sowie Nachhaltigkeitszielen. Systeme, zu denen auch das WWS zählt, stehen dabei vor der Herausforderung, einerseits eine hohe Zuverlässigkeit und Nutzerakzeptanz sicherzustellen und andererseits möglichst ressourcen- und energieeffizient ausgelegt zu sein (Lutzer, 2024). Trotz ihrer geringen Sichtbarkeit im Betriebsablauf tragen diese Systeme zur Betriebssicherheit, zum Passagierkomfort und zu den indirekten Emissionen eines Flugzeugs bei (Konieczny, 2024).

Vor diesem Hintergrund gewinnt die frühe, simulationsgestützte Bewertung solcher Systeme im Entwurfsprozess zunehmend an Bedeutung. Klassische Auslegungsansätze, die stark auf Erfahrungswerten, konservativen Annahmen oder späten Systemtests basieren, stoßen an ihre Grenzen, wenn Variantenvielfalt, Retrofit und nachhaltige Optimierung gleichermaßen berücksichtigt werden sollen (Konieczny, 2025). Insbesondere in der Kabine, die durch hohe Konfigurierbarkeit und eine Vielzahl von Akteuren geprägt ist, fehlt eine durchgängige methodische Kette von der funktionalen Systemauslegung über die Bewertung bis hin zur Visualisierung der Ergebnisse (Fuchs, et al., 2021).

Die vorliegende Arbeit entsteht in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und verfolgt das Ziel, einen wissenschaftlich fundierten, simulationsgestützten Ansatz zur parametrischen Modellierung eines WWS zu entwickeln. Dieser Ansatz soll sowohl in den ingenieurwissenschaftlichen Entwurfsprozess integrierbar als auch für eine interdisziplinäre Nutzung geeignet sein. Im Fokus steht die funktionale Analyse relevanter Leistungsparameter in Abhängigkeit von Nutzungsverhalten, Flugprofilen sowie Auslegungsparametern. Das WWS wird so parametrisiert, dass es sich automatisch an unterschiedliche

Flugzeugkonfigurationen anpassen lässt und damit Bestandteil eines dynamischen, modellbasierten Entwicklungsprozesses ist. Ergänzend zur digitalen Modellierung erfolgt eine analytische Untersuchung physikalischer und funktionaler Systemeigenschaften. Auf Basis simulierter Daten werden Aussagen über das dynamische Verhalten, Belastungsgrenzen und betriebliche Anforderungen des Systems abgeleitet, die eine Grundlage für die zukünftige Auslegung und Integration von Sanitäranlagen in Flugzeugkabinen bilden.

Daraus ergeben sich die drei Forschungsfragen dieser Arbeit:

- Wie kann die parametrische Modellierung eines Water/Waste-Systems realisiert werden, sodass sie anschlussfähig an den frühen Entwurfs- und Auslegungsprozess der Kabine bleibt?
- Ist es möglich, mit einem simulationsgestützten Ansatz die Auswirkungen von Flugzeit und Nutzungsverhalten auf Masse, Energiebedarf sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen des Water/Waste-Systems abzubilden und zu bewerten?
- Kann die entwickelte Methode genutzt werden, um Auslegungsgrenzen und kritische Betriebszustände des Water/Waste-Systems frühzeitig zu identifizieren und zu diskutieren?

Damit leistet die Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung moderner Kabinensysteme und unterstützt die Etablierung eines durchgängigen, digitalisierten Entwurfsprozesses innerhalb der Luftfahrttechnik.

## 1.5 Grenzen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit schafft die Grundlage für Designentscheidungen im Hinblick auf das WWS von Flugzeugen. Aufgrund begrenzter Ressourcen und des zeitlich beschränkten Rahmens dieser Arbeit erfolgt die Bearbeitung innerhalb definierter Grenzen, die im Folgenden erläutert werden:

- Da sich das Gesamtprojekt noch in einer frühen Phase befindet, sind viele Projektentscheidungen zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht final getroffen worden. Daher erfolgt im Rahmen dieser Masterarbeit lediglich eine Vorauslegung des Systems.

- 
- Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem WWS. Relevante Grundlagen und Vorkenntnisse angrenzender Bereiche werden im Kapitel *Grundlagen* vorgestellt, jedoch nicht vertiefend behandelt.
  - Da diese Arbeit einen ersten Ansatz zur Untersuchung des WWS darstellt, erfolgen die Analyse in vereinfachter Form. Sie stützt sich daher auf Annahmen und bekannte Ergebnisse.
  - Für die Erstellung des Simulationsmodells zur funktionalen Analyse von Leistungsparametern nutzt diese Arbeit Daten des Unternehmens *Diehl Aviation* vom Airbus A320. Diese Daten wurden nicht eigenständig erhoben und ihr genauer Ursprung unterliegt der Geheimhaltung durch das Unternehmen.

## 2 Basiswissen und Grundlagen

Der Grundlagenteil vermittelt das für die Methodik erforderliche Wissen. Er behandelt aktuelle Entwicklungen in der Flugzeugkabine, die eingesetzten Softwarewerkzeuge sowie grundlegende Konzepte der parametrischen und objektorientierten Modellierung. Darüber hinaus werden der Entwicklungs- und Zulassungshintergrund in der Luftfahrt, die technische Einordnung der Lavatory, die Funktionsweise des WWS sowie die Bedeutung virtueller Darstellungen erläutert.

Das Kapitel geht dabei über eine reine Darstellung technischer Inhalte hinaus und setzt sich mit den relevanten Themenfeldern auseinander. Es ordnet die Arbeit in den aktuellen Stand der Forschung ein, diskutiert bestehende Methoden sowie Prozesse und begründet die gewählten methodischen Ansätze. Gleichzeitig schafft es die theoretischen und technologischen Grundlagen, um den im weiteren Verlauf vorgestellten Modellierungs- und Simulationsansatz nachvollziehen zu können.

### 2.1 Zukünftige Entwicklungsperspektiven der Kabine

Die Gestaltung heutiger Flugzeugkabinen befindet sich in einem Transformationsprozess. Neben klassischen Optimierungszielen wie Gewichtsreduktion und Sitzplatzanzahl rücken zunehmend Komfort, Personalisierung, digitale Vernetzung und ökologische Anforderungen in den Mittelpunkt. Die Kabine wird dabei nicht mehr lediglich als statischer Aufenthaltsraum gesehen, sondern als Bestandteil des Gesamtsystems Flugzeug, in welchem Passagiere, Besatzung und technische Infrastruktur interagieren.

#### 2.1.1 Stand der aktuellen Kabinenentwicklungen

Airbus verfolgt mit der *Airspace*-Kabine einen plattformübergreifenden Ansatz, der auf mehreren Modellfamilien der Flotte basiert. Diese Kabine ist ein innovatives Kabinenkonzept, das den Passagierkomfort, die Betriebseffizienz und die Nachhaltigkeit in den Mittelpunkt stellt. Sie bietet größere Gepäckfächer, anpassbare Beleuchtung, geräuschreduzierende Technologien und verbesserte Luftqualität für eine angenehmere Reise. Mit modularer Gestaltung und flexiblen Anpassungsmöglichkeiten für Fluggesellschaften optimiert sie den Raum und senkt die Betriebskosten. Zudem werden umweltfreundliche Materialien verwendet, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Im Rahmen der *Cabin Vision 2035+* plant Airbus langfristig noch stärker anpassbare Kabinen, die sich flexibel an Fluglänge, Auslastung oder Zielgruppe anpassen lassen (Airbus, 2023).

Diehl Aviation bietet mit dem innovativen Space<sup>3</sup>-Modul eine zukunftsweisende Lösung für Bordtoiletten in Langstreckenflugzeugen an. Dieses System wurde speziell für Passagiere mit eingeschränkter Mobilität entwickelt. Das Modell umfasst ein flexibles, modulares Toilettensystem, das eine verbesserte Barrierefreiheit ermöglicht, indem zwei Bordtoiletten miteinander kombiniert werden können, um ausreichend Platz für Rollstuhlfahrer zu bieten (Diehl Aviation AIX, 2025).

Auch Lufthansa reagiert mit dem *Allegris*-Kabinensystem auf den zunehmenden Wunsch nach Individualisierung. Es wird auf Langstreckenflügen für Business-, First- und Premium Economy-Class eingeführt und bietet in der Business Class direkten Zugang zu jedem Sitz, flache Betten, mehr Stauraum und verstellbare Trennwände für mehr Privatsphäre. Die First Class wird zu Luxus-Suiten mit maximaler Privatsphäre und exklusivem Service. Auch die Premium Economy erhält mehr Beinfreiheit und komfortablere Sitze. Die Economy Class wird mit neuen Sitzen und verbesserten Unterhaltungsangeboten ausgestattet. Das Konzept umfasst außerdem moderne Kabinentechnologie und digitale Services. Ziel von Allegris ist es, den Passagieren eine hochwertige, komfortable Reiseerfahrung zu bieten (Lufthansa Group, 2023).

Eine modulare Raumgestaltung bietet mehr als nur eine Grundlage für erhöhten Komfort und die Möglichkeit zur Differenzierung. Sie eröffnet auch völlig neue Perspektiven in Bezug auf betriebliche Flexibilität und ökologische Effizienz. Durch die anpassungsfähige Struktur können Räume je nach Bedarf angepasst oder neu organisiert werden, was die Ressourcennutzung effektiver gestaltet und die Betriebsabläufe vereinfacht. Diese Flexibilität trägt nicht nur zur Steigerung der Effizienz bei, sondern unterstützt auch eine nachhaltigere Nutzung von Materialien und Energie. Diese Art der Gestaltung verbindet somit Ästhetik und Funktionalität mit einer starken Nachhaltigkeitsorientierung, was sowohl den Betriebskosten als auch dem ökologischen Fußabdruck zugutekommt.

### 2.1.2 Digitale Vernetzung von Kabinensystemen

Im Anschluss an die Modularisierung gewinnt auch die digitale Vernetzung innerhalb der Kabine an Bedeutung. Ziel ist es, Komfort, Betriebseffizienz und Wartbarkeit in einem integrierten Gesamtsystem zusammenzuführen. Dabei gewinnt die Entwicklung intelligenter Kabinenkomponenten, die Betriebszustände kontinuierlich erfassen und anpassbare Optimierungsprozesse ermöglichen, an Bedeutung.

Diehl Aviation verfolgt mit der *Future Cabin* den Ansatz, Beleuchtung, Anzeigen und Sensorik von Kabinensystemen über ein gemeinsames Kommunikationsprotokoll

zu vernetzen (Diehl Aviation AIX, 2025). Durch diese Systemintegration werden Wartungskonzepte sowie eine dynamische Steuerung des Ressourcenverbrauchs möglich.

Airbus verfolgt mit *Cabin Vision 2035+* das Ziel, die Kabine in die digitalen Informationsflüsse zwischen Cockpit und Bodenpersonal einzubinden, sodass relevante Daten über alle Prozessschritte hinweg zur Verfügung stehen (Airbus, 2023).

Diese Entwicklungen zeigen, dass digitale Technologien nicht nur neue Komfortfunktionen mit sich bringen, sondern auch einen Beitrag zu einer datengetriebenen Optimierung des Energie- und Ressourceneinsatzes leisten.

### 2.1.3 Nachhaltigkeitsaspekte der Kabine

Nachhaltigkeit gewinnt zunehmend an Bedeutung in der modernen Kabinenentwicklung. Im Mittelpunkt stehen dabei Werkstoffauswahl, Masseinsparung, Lebenszyklusbetrachtungen und die Recyclingfähigkeit der Komponenten. Ziel ist es, die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Flugzeugs über den gesamten Lebenszyklus zu senken, ohne dabei Nachteile bei Komfort, Funktionalität oder Wartungsfähigkeit hinnehmen zu müssen.

Diehl Aviation präsentiert mit der vollständig recycelbaren *ECO-Bin* und der besonders leichten *ECO Sidewall* zwei Beispiele für nachhaltige Kabinenbauteile (Diehl Aviation AIX, 2025). Die Sidewall nutzt eine Kombination aus Faserverbundmaterialien und einem effizienten Pulverbeschichtungsverfahren, was sowohl Gewicht als auch Emissionen und Materialverschnitt reduziert. Ergänzend werden bionisch gestaltete Strukturen sowie neue Innenverkleidungen vorgestellt, die Masse einsparen und flexibel anpassbar sind.

Airbus greift diese technischen Entwicklungen in der *Cabin Vision 2035+* auf und präsentiert daraus ein umfangreiches Zukunftskonzept. Dazu gehören bionisch optimierte Leichtbaustrukturen, der Einsatz von recycelbaren Materialien, eine vollständige Lebenszyklusanalyse sowie neue Ansätze für Stauraumlösungen, um Gewicht an Bord zu reduzieren (Airbus, 2023).

Die Flugzeugkabine entwickelt sich zunehmend von einem passiven Passagierraum zu einem aktiven und vernetzten System innerhalb des Flugzeugs. Flexibilität, Digitalisierung und Nachhaltigkeit treiben diese Entwicklung und werden zunehmend miteinander verknüpft. Die daraus entstehende Komplexität erfordert Werkzeuge, die diese technischen und funktionalen Zusammenhänge nicht nur abbilden, sondern auch analysierbar machen. Um Modellierungs- und

Bewertungsansätze effizient umzusetzen, ist der Einsatz geeigneter Software notwendig.

## 2.2 Eingesetzte Software und ihre Anwendungsbereiche

Für die Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Modellierungs- und Analyseansätze kommen verschiedene Softwarewerkzeuge zum Einsatz (siehe Tabelle 1). Sie bilden die Grundlage für Datenhaltung, Simulation, Geometriemodellierung und virtuelle Visualisierung. In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Anwendungen, wie CPACS für die strukturierte Datenbeschreibung, MATLAB für Simulation, Blender für die geometrische Modellierung sowie Unity für die interaktive Darstellung in einer virtuellen Umgebung, erläutert.

*Tabelle 1: Angewendete Software*

Software	Hersteller	Version
CPACS	DLR	V3.3
MATLAB	MathWorks	R2024a
Blender	Blender Foundation	3.3
Unity	Unity Technologies	6000.0.29f1

### 2.2.1 CPACS - strukturierte Datenbeschreibung

Mit dem technischen Fortschritt wachsen sowohl die Anforderungen an das Flugzeug als auch die Anzahl der beteiligten Systeme. Moderne Verkehrsflugzeuge bestehen aus mehr Komponenten, stärker integrierten Teilsystemen und deutlich anspruchsvolleren Funktionen als frühere Generationen (Frommann, 2021). Dies manifestiert sich insbesondere in zwei Bereichen: Zum einen sind detaillierte physikalische Analysen von Bauteilen und Systemen erforderlich, zum anderen müssen immer mehr Fachdisziplinen in den Entwicklungsprozess integriert werden.

Seit 2005 untersucht das DLR in Zusammenarbeit mit Partnern, inwiefern und auf welche Weise der multidisziplinäre Entwicklungsprozess von Flugzeugen durch die Einführung einer gemeinsamen, standardisierten Sprache vereinfacht werden kann (Alder, et al., 2020).

Mit CPACS wurde eine einheitliche Sprache geschaffen, die eine standardisierte Beschreibung von Lufttransportsystemen ermöglicht. CPACS basiert auf der *Extensible Markup Language* (XML) und wird in Form einer *XML Schema Definition* (XSD) implementiert (Alder, et al., 2020). Das Schema ist öffentlich zugänglich und kann sowohl über die Plattform GitHub als auch über eine eigens eingerichtete Webseite abgerufen werden. Neben einer ausführlichen technischen Dokumentation finden sich dort weiterführende Informationen zur Anwendung des Standards. Um den sich wandelnden Anforderungen in der Luftfahrtentwicklung gerecht zu werden, wird CPACS kontinuierlich weiterentwickelt und regelmäßig um neue Elemente und Konzepte ergänzt.

CPACS ist streng hierarchisch aufgebaut (siehe Abbildung 3).

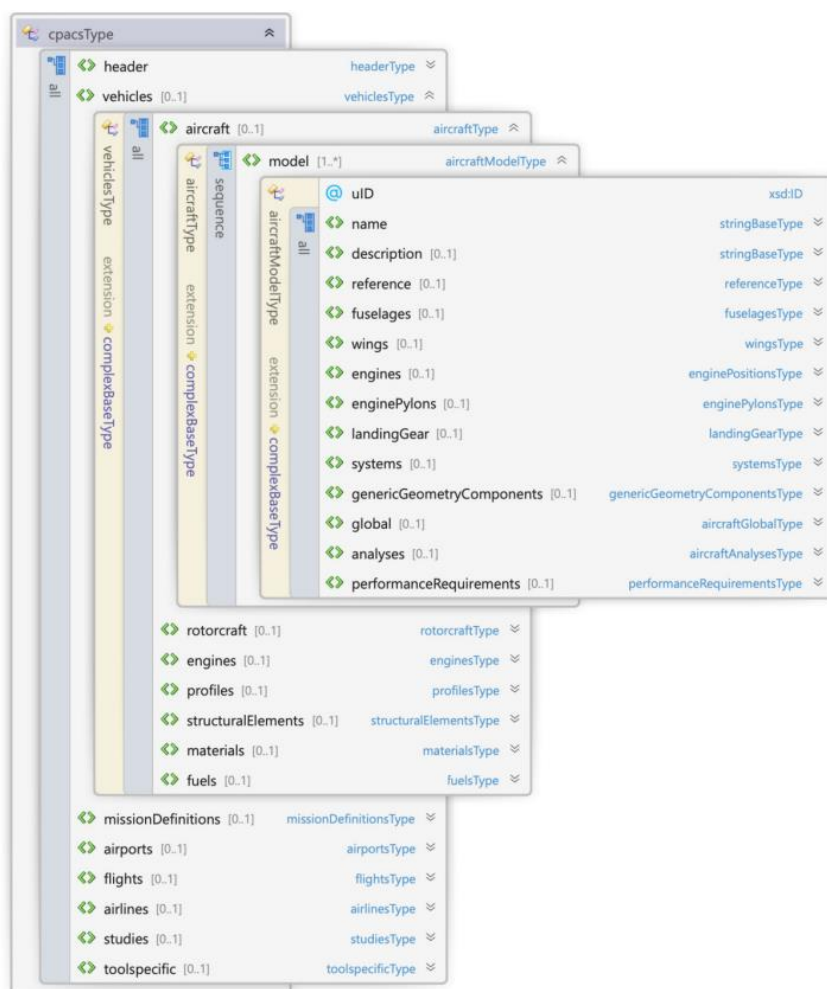


Abbildung 3: Ausschnitt des CPACS-Schemas (Beckert, 2020)

Flugzeugkomponenten wie Rumpf, Tragflächen, Kabine oder Triebwerke werden in ineinander verschachtelten XML-Strukturen organisiert. Jede Typendefinition innerhalb von CPACS verfügt über eine festgelegte Menge an Attributen, die in der

grafischen Darstellung durch ein blaues @-Symbol gekennzeichnet sind. Ein Attribut stellt die uID (unified Identifier number) dar, die der Identifikation und Referenzierung von Elementen dient. Auf diese Weise können beispielsweise definierte Profile mehrfach innerhalb eines Entwurfs wiederverwendet werden. Innerhalb der Kabine lassen sich beispielsweise Sitze, Galleys oder Stauräume als eigene Elemente unterhalb eines übergeordneten Kabinenreiters modellieren (Beckert, 2020). Darüber hinaus unterstützt CPACS eine strukturierte Zuordnung über Referenzen. Durch diesen modularen Aufbau können sowohl logische als auch geometrische Zusammenhänge zwischen den Komponenten präzise dargestellt und über verschiedene Prozessschritte hinweg genutzt werden.

Mit der wachsenden Erweiterungsfähigkeit des Schemas wird es möglich, CPACS nicht nur für rein geometrische Beschreibungen einzusetzen. Vielmehr kann es auch als funktionale Schnittstelle dienen, die Systemarchitekturen mit virtuellen Entwurfsplattformen verbindet (Fuchs, et al., 2022).

Im Rahmen dieser Arbeit wird CPACS verwendet, um die für die Auslegung und Platzierung des WWS relevanten Parameter aus dem Strukturentwurf zur Festlegung des Bauraums und weiterer Randbedingungen auszulesen sowie die zugehörigen Randbedingungen festzulegen.

### 2.2.2 MATLAB - Simulation und Analyse

In MATLAB werden die Auslegungsregeln für das Kabinensystem definiert. Dazu zählt unter anderem das Auslesen relevanter Parameter aus CPACS, um eine Datengrundlage zu erzeugen, in welche die Komponenten der jeweiligen Subsysteme, wie die des WWS, integriert werden können.

MATLAB stellt eine Entwicklungsumgebung dar, die in Forschung, Entwicklung und industriellen Anwendungen weit verbreitet ist. Eine ihrer Stärken liegt in der Durchführung komplexer mathematischer Berechnungen, was den Einsatz insbesondere im Ingenieurwesen und in der Physik fördert. Ein weiterer Vorteil besteht in den umfangreichen Möglichkeiten zur Modellierung und Simulation (Mathworks Inc., 2025). Ingenieurinnen und Ingenieure nutzen MATLAB, um physikalische Systeme, Regelkreise oder dynamische Prozesse realitätsnah abzubilden und zu analysieren, häufig auch mithilfe grafischer Modelle.

Durch die Kombination von numerischer Berechnung, Datenanalyse, Simulation und Programmierung in einer integrierten Umgebung bietet MATLAB Werkzeuge zur Lösung komplexer technischer Problemstellungen.

### 2.2.3 Blender - geometrische Modellierung

Blender ist ein vielseitiges Programm zur Erstellung von 3D-Modellen, das weltweit eingesetzt wird (Blender, 2025). Es handelt sich um eine kostenlose Open-Source-Software, die eine breite Palette von Funktionen bietet.

Mit Blender können 3D-Modelle entworfen, bearbeitet und in hochauflösender Detailgenauigkeit dargestellt werden. Die Software unterstützt das Rendering von Bildern und Animationen, wobei Render-Engines für realistische Lichteffekte und Texturen sorgen können (Blender, 2025).

Blender wird in verschiedenen Bereichen eingesetzt, darunter in der Filmindustrie für visuelle Effekte und Animationen, im Spieldesign für die Erstellung von 3D-Assets, in der Architektur zur Visualisierung von Gebäuden und Räumen, sowie im Produktdesign für die Gestaltung von Prototypen.

### 2.2.4 Unity - Darstellung in einer virtuellen Umgebung

Zur Erstellung eines digitalen Raumes wird Unity benötigt. Es handelt sich dabei um eine Entwicklungsplattform und Game Engine, die zur Erstellung von 2D- und 3D-Inhalten verwendet wird (Unity Technologies, 2025). Sie ist besonders in der Videospielementwicklung, aber auch bei Virtual Reality Anwendungen verbreitet.

Unity ermöglicht die Entwicklung von Anwendungen für verschiedene Plattformen. Mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche und der Programmierung in C# bietet das Programm eine effiziente Umgebung für die Erstellung komplexer, sowie interaktiver Erlebnisse (Unity Technologies, 2025).

In Unity können die erstellten 3D-Modelle aus Blender in einer virtuellen Welt zusammengeführt werden, wodurch es möglich wird, die Kabine virtuell zu begehen und mit den integrierten Systemen zu interagieren.

### Fazit zu den eingesetzten Werkzeugen

Mit CPACS steht ein XML-basierter Standard zur Verfügung, der eine konsistente und wiederverwendbare Beschreibung von Flugzeugsystemen über Fachgrenzen hinweg ermöglicht. Die Nutzung eines solchen Datenformats schafft die notwendige Grundlage, um Systemparameter eindeutig zu definieren, automatisiert auszulesen und in nachgelagerte Analyse- und Simulationsschritte zu überführen.

MATLAB bietet sich als Werkzeug für die Auslegung und Simulation an, da es sowohl die numerische Analyse als auch die Implementierung komplexer Berechnungsmodelle in einer Umgebung ermöglicht. Die Kombination aus

mathematischer Modellierung, Parametrisierung und Simulation unterstützt eine systematische Untersuchung von Abhängigkeiten, wie sie für die Bewertung des WWS erforderlich ist. Gleichzeitig ermöglicht MATLAB eine klare Trennung zwischen Modelllogik, Parametern und Ausgabedaten, was die Erweiterbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ansatzes begünstigt.

Für die geometrische und räumliche Betrachtung der Kabinenkomponenten wird mit Blender ein flexibles und weit verbreitetes 3D-Werkzeug eingesetzt. Die Nutzung eines Open-Source-Programms ermöglicht eine unabhängige und frei zugängliche Modellierung der Geometrien. Aufbauend darauf ermöglicht Unity die Überführung der geometrischen Modelle in eine interaktive, virtuelle Umgebung, in der räumliche Zusammenhänge untersucht werden können.

Der gewählte Ansatz verfolgt eine klare Systematik von der strukturierten Datenbasis über die simulationsgestützte Analyse bis hin zur visuellen und immersiven Darstellung. Diese Vorgehensweise richtet sich an die Herausforderungen moderner Kabinensystementwicklung und begründet die Auswahl der eingesetzten Werkzeuge aus methodischer und aus praktischer Sicht.

## 2.3 Grundlagen der parametrischen Modellierung

Der Begriff „parametrische Modellierung“ hat seinen Ursprung in Computer aided Design (CAD) Systemen, wo er beschreibt, dass sich digitale Geometrien über frei einstellbare Werte steuern lassen (Camba, et al., 2016). Anstatt feste Maße zu vergeben, werden beispielsweise bei einem Quader die Kantenlängen  $a$ ,  $b$  und  $c$  als veränderbare Größen erstellt. Werden diese Werte verändert, ändert sich automatisch die Form des Körpers (Camba, et al., 2016). Die Darstellung der Geometrie ist also direkt an diese Eingabegrößen gekoppelt, weshalb man von einem parametrischen Modell sprechen kann.

In der Luftfahrttechnik wird dieser Ansatz umfangreicher genutzt. Dort geht es nicht ausschließlich darum, geometrische Formen variabel zu halten, sondern ganze Systemeigenschaften steuerbar zu machen (Hennigs, 2021). Für die Gestaltung einer Flugzeugkabine bedeutet das: Größen wie der Energiebedarf des Kabinenraums, die Anzahl der Sitzreihen oder die Nutzungshäufigkeit von Kabinensystemen dienen als Eingangsdaten, um automatisch verschiedene Layoutvarianten abzubilden.

Mit diesen Modellen können technische Vorgaben, betriebliche Anforderungen oder individuelle Kundenwünsche in konfigurierbare Lösungen übertragen werden. Parametrische Modellierung bildet damit eine Grundlage, um komplexe Kabinenkonfigurationen digital zu entwickeln.

### 2.3.1 Einführung in die Objektorientierte Programmierung

Bei der objektorientierten Programmierung (OOP) stehen nicht einzelne Funktionen, sondern Objekte im Mittelpunkt. Sie vereinen Daten und das dazugehörige Verhalten in Form von Funktionen innerhalb einer Einheit. Auf diese Weise lassen sich technische Elemente, wie Kabinenkomponenten, logisch und nachvollziehbar in einer Software abbilden (Lahres, et al., 2021). Durch dieses Prinzip ist es möglich, komplexe Programme modular aufzubauen, wiederzuverwenden und bei Bedarf zu erweitern.

#### Klasse & Objekt

Ein Element der OOP ist die Klasse, welche beschreibt, wie ein bestimmter Objekttyp aufgebaut ist, welche Eigenschaften vorhanden sind und welche Aktionen ausgeführt werden können (Stein, 2015). Die Klasse dient somit als Vorlage. Sobald sie im Programm verwendet wird, entsteht daraus ein konkretes Objekt, die sogenannte Instanz (Stein, 2015). Während die Klasse also das abstrakte Konzept darstellt, bildet die Instanz die reale Ausprägung mit individuellen Attributwerten ab. In MATLAB erfolgt die Definition einer Klasse in einer separaten *.m*-Datei.

MATLAB unterscheidet dabei zwischen zwei Klassenarten: *value classes*, bei denen Objekte wie reguläre Werte behandelt werden und *handle classes*, die Referenzverhalten unterstützen. Wird eine Klasse von *handle* abgeleitet, verweisen mehrere Variablen auf dieselbe Instanz. Änderungen an einer Referenz wirken sich dann unmittelbar auf das ursprüngliche Objekt aus (Stein, 2015).

#### Attribute

Die Eigenschaften eines Objekts werden über Attribute festgelegt. Sie beschreiben den Zustand und können Materialdaten, technische Größen oder geometrische Parameter umfassen. In MATLAB werden diese Variablen im Bereich *properties* definiert (Stein, 2015).

#### Methoden

Das Verhalten eines Objekts wird über Methoden beschrieben, also Funktionen innerhalb der Klasse. Sie greifen auf Attribute zu oder kommunizieren mit anderen Objekten, um Berechnungen durchzuführen, Zustände zu ändern oder Daten zu exportieren. Funktionen haben also *inputs* und *outputs*, auf die zugegriffen werden kann (Stein, 2015).

Methoden beschreiben das Verhalten eines Objekts und können öffentlich oder geschützt sein. In MATLAB erhält jede Methode standardmäßig das Objekt selbst als ersten Parameter (*obj*), sodass innerhalb der Methode auf die Werte der Instanz zugegriffen werden kann (Stein, 2015).

### **Konstruktor**

Eine besondere Form der Methode ist der Konstruktor. Er wird automatisch ausgeführt, sobald ein neues Objekt erstellt wird und legt Anfangswerte fest oder führt notwendige Initialisierungen durch (Hubwieser, et al., 2013). Der Konstruktor wird über eine Methode mit dem gleichen Namen wie die Klasse definiert.

### **Kapselung**

Des Weiteren kommt die Kapselung zum Einsatz. Sie sorgt dafür, dass interne Daten eines Objekts nicht direkt von außen verändert werden können, sondern nur über definierte Schnittstellen. Dadurch bleibt der Zustand geschützt, Fehlerquellen werden reduziert, und Wartung sowie Erweiterung werden erleichtert (Hubwieser, et al., 2013). In MATLAB wird dies durch Zugriffsmodifikatoren umgesetzt.

### **Vererbung**

Ein weiteres Konzept ist die Vererbung. Sie ermöglicht es, auf Basis einer bestehenden Klasse eine spezialisierte Unterklasse zu definieren. Diese übernimmt Eigenschaften und Methoden der Oberklasse, kann jedoch zusätzliche Funktionen ergänzen oder bestehende überschreiben. Dadurch entsteht ein hierarchisches Modell, das Code gemeinsam nutzt und gezielt erweitert (Hubwieser, et al., 2013).

### **Polymorphie**

Polymorphie beschreibt das Konzept, dass verschiedene Klassen dieselbe Methode bereitstellen, diese jedoch jeweils unterschiedlich umsetzen. Dadurch können Objekte unterschiedlicher Klassen über eine gemeinsame Schnittstelle verwendet werden, ohne dass ihre konkrete Zugehörigkeit bekannt sein muss. Besonders vorteilhaft ist dies, wenn unterschiedliche Objekttypen einheitlich angesprochen und verarbeitet werden sollen (Lahres, et al., 2021).

## Instanziierung

Der Vorgang, bei dem aus einer Klasse tatsächlich ein Objekt entsteht, wird als Instanziierung bezeichnet. Bei einer Klasse wie *Flugzeug* kann die Instanz beispielsweise ein konkretes Modell wie der Airbus A320 sein. Sie besitzt dann ihre eigenen Werte für Attribute wie Masse, Reichweite oder Geschwindigkeit und kann alle definierten Methoden selbstständig verwenden (Stein, 2015).

### 2.3.2 Anwendungsbeispiel der OOP

Ein Beispiel zur Verdeutlichung bietet die Modellierung des *WatershutoffValves*, also des Absperrventils zur Trennung des Wassertanks vom restlichen Versorgungssystem:

```
classdef WatershutoffValve < Component & GeometryObject
    properties

    end

    methods
        function obj =
WatershutoffValve(Length,Width,Height,Midpointx,Midpointy,Midpointz,Number,Spec)
            obj.Height = Height;
            obj.Width = Width;
            obj.Length = Length;
            obj.Color = [0.2,0.7,0.8];
            obj.Tag = 'waterWasteSystem';
            obj.Spec = Spec;
            obj.Number = Number;
            obj.Midpoint_x = Midpointx;
            obj.Midpoint_y = Midpointy;
            obj.Midpoint_z = Midpointz;
            obj.Ata = '38-41-00';
            obj.Material = 'aluminium';
            obj.Connections = {'frame',1};
            obj.Name = strcat('WatershutoffValve',num2str(Number),Spec);
        end
    end
end
```

In diesem Beispiel wird eine Klasse namens *WatershutoffValve* definiert, die Eigenschaften (Attribute) abbildet, wie Höhe, Breite, Länge oder die räumliche Position. Beim Aufruf der Funktion *WatershutoffValve(...)* wird automatisch der Konstruktor ausgeführt, der alle definierten Werte, beispielsweise Geometriedaten aus CPACS, in die entsprechenden Eigenschaften der neuen Instanz schreibt.

Er wird ausschließlich beim Anlegen eines neuen Objekts ausgeführt und dient dazu, Anfangswerte zu setzen oder notwendige Initialisierungen vorzunehmen. Eine Instanz entsteht also nur dann, wenn die Klasse selbst aufgerufen wird (*obj = NameDerKlasse*). Normale Methoden (*obj = ichMacheEtwas(obj)*) arbeiten

hingegen mit einer bereits bestehenden Instanz und verändern deren Zustand, ohne ein neues Objekt zu erzeugen.

Da *WatershutoffValve* von den Klassen *Component* und *GeometryObject* erbt, kommt das Konzept der Vererbung zum Einsatz: Eigenschaften wie Materialzuordnung, Schnittstellen oder geometrische Funktionen müssen nicht erneut implementiert werden, sondern werden aus den Oberklassen übernommen. Das Ventil ist somit Teil einer hierarchischen Objektstruktur, in der gemeinsame Merkmale gebündelt und spezialisierte Funktionen nur dort ergänzt werden, wo sie benötigt werden (siehe Abbildung 4). Die Vererbungen sind mit einem Pfeil dargestellt und gehen von der jeweiligen Kindklasse auf die Elternklasse.

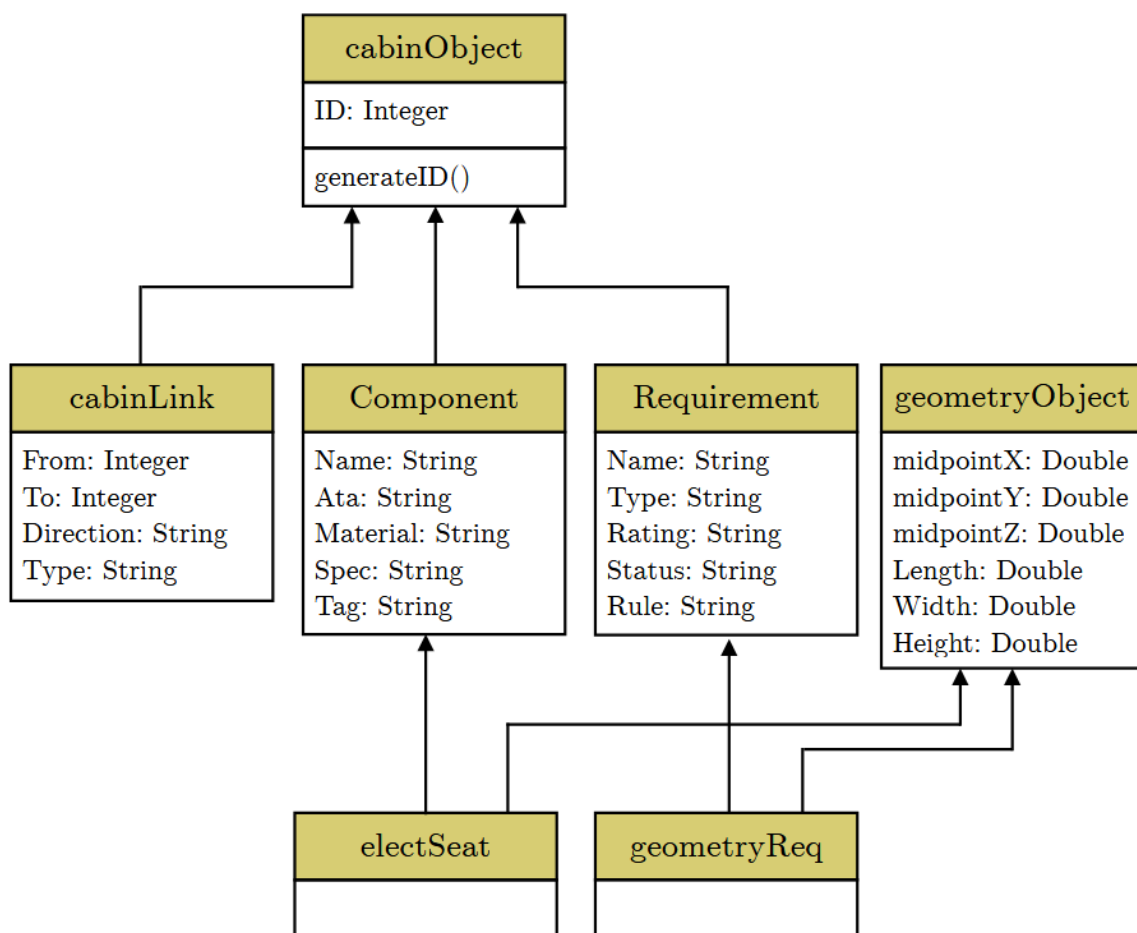


Abbildung 4: Objektorientierten Kabinenmodellierung (Beckert, 2020)

Die erzeugten Instanzen speichern ihren Zustand (geometrische Dimensionen, Positionen, ...) und stellen ihn über Attribute und Methoden der Klasse zur Verfügung. Diese Struktur folgt dem Prinzip der Kapselung: Daten werden in der Instanz verwaltet und sind ausschließlich über definierte Schnittstellen zugänglich, was die Konsistenz der Modellstruktur erhöht.

Auf diese Weise bildet das *WatershutoffValve* nicht nur eine geometrische Einheit, sondern eine funktionale Systemkomponente. Durch zusätzliche Methoden innerhalb der Klasse kann dieses Objektverhalten erweitert werden, ohne die bestehende Klassendefinition zu verändern. Damit zeigt sich ein Prinzip der OOP: Die Funktionalität lässt sich modular ergänzen, während die übergeordnete Systemarchitektur das diese Objekte zu einem Gesamtsystem zusammensetzt, unverändert bleibt. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Wiederverwendbarkeit. In einem Flugzeugmodell können zahlreiche Komponenten wie Galleys, Lavatories, Frames, Leitungen oder eben Ventile als eigene Klassen umgesetzt werden. Jede Klasse beschreibt den Zustand und das Verhalten eines technischen Elements und ermöglicht dadurch eine Repräsentation des Systems.

Die objektorientierte Programmierung beschreibt somit technische Elemente in Form von Klassen, die sowohl ihren Zustand als auch ihr Verhalten definieren (Hubwieser, et al., 2013). Dadurch entsteht eine Repräsentation von Komponenten, die erweitert, kombiniert und wiederverwendet werden kann.

Sie erzeugt jedoch nicht selbst Varianten, sondern stellt lediglich den Rahmen bereit, in dem solche Elemente logisch getrennt, modular aufgebaut und konsistent beschrieben werden. Erst durch ergänzende Funktionen, die auf diese Objekte zugreifen und ihre Attribute verändern, entstehen parametrische Strukturen (Stein, 2015). Während die OOP die Grundlage für eine saubere Modellarchitektur schafft, erfolgt die tatsächliche Parametrisierung durch Mechanismen, die diese Daten verarbeiten und daraus Varianten ableiten.

Durch den Einsatz dieser Prinzipien wird so nicht nur die technische Komplexität beherrschbar gemacht, sondern auch eine erweiterbare Modellarchitektur geschaffen, die sich in einen digitalen Entwicklungsprozess integrieren lässt.

### **Fazit zur parametrischen Modellierung und OOP**

Die Betrachtung der parametrischen Modellierung und der objektorientierten Programmierung zeigt, dass beide eine Grundlage für die strukturierte Abbildung komplexer technischer Systeme darstellen. Während die parametrische Modellierung aus der geometrischen Beschreibung variabler CAD-Modelle hervorgegangen ist, wird sie im Kontext der Kabinenentwicklung erweitert. Hier dient sie nicht allein der Anpassung von Geometrien, sondern der Steuerung funktionaler und betrieblicher Eigenschaften wie Nutzungshäufigkeiten, Energiebedarf oder Massenströmen. Damit ermöglicht sie die Abbildung unterschiedlicher Konfigurations- und Nutzungsszenarien innerhalb eines Modells.

Die OOP ergänzt diesen Ansatz, indem sie eine klare Modellarchitektur bereitstellt. Durch die Kapselung von Zustand und Verhalten in Klassen lassen sich technische Komponenten wie Ventile, Tanks oder Leitungen abgrenzen und beschreiben. Konzepte wie Vererbung und Wiederverwendbarkeit erlauben es, gemeinsame Eigenschaften zu definieren und spezialisierte Funktionen zu erweitern. Dadurch wird die steigende Komplexität kabinentechnischer Systeme beherrschbar, ohne die Nachvollziehbarkeit oder Erweiterbarkeit des Modells einzuschränken. Die OOP gewährleistet dabei eine robuste und erweiterbare Modellstruktur, während die parametrische Modellierung die Grundlage für Variantenbildung, Simulation und Analyse liefert.

Vor diesem Hintergrund ist die Entscheidung für einen objektorientierten, parametrischen Ansatz in MATLAB nachvollziehbar. Er erlaubt eine konsistente Abbildung geometrischer und funktionaler Eigenschaften, unterstützt die Wiederverwendbarkeit einzelner Komponenten und schafft zugleich die Voraussetzung, das WWS flexibel an unterschiedliche Flugzeugkonfigurationen und Nutzungsszenarien anzupassen. Damit bildet dieser Ansatz eine belastbare Grundlage für den im weiteren Verlauf vorgestellten simulationsgestützten Entwurfs- und Analyseprozess.

## 2.4 Entwicklungsprozess von Flugzeugen

Die Entwicklung eines Verkehrsflugzeugs verläuft in mehreren aufeinanderfolgenden Phasen, die sich an technischen Anforderungen und an wirtschaftlichen Zielen orientieren (Konieczny, 2024). Am Anfang stehen die sogenannten Top Level Aircraft Requirements (TLARs). Diese bilden die Grundlage für den Vorentwurf, in dem Ideen entstehen und Leistungsgrößen wie Reichweite, Nutzlast oder Reisegeschwindigkeit festgelegt werden. Auf dieser Basis folgt die eigentliche Entwurfsphase, in der die Systeme präziser ausgearbeitet werden. Den Abschluss bildet die Detailkonstruktion, die einzelne Komponenten so ausarbeitet, dass sie später gefertigt und montiert werden können (Frommann, 2021).

In den verschiedenen Entwurfsphasen kommen unterschiedliche Modellarten zum Einsatz, da jede Phase eigene Fragen behandelt. Analytische Modelle liefern mathematische Näherungen, zur Abschätzung von Massen oder aerodynamischen Größen (Frommann, 2021). Deskriptive Modelle, also reine Flächen oder Volumendarstellung im CAD, dienen dagegen der geometrischen Beschreibung von Bauteilen (Hennigs, 2021). Stochastische Modelle unterstützen die Analyse von Unsicherheiten, etwa bei Lastannahmen. Simulative Modelle erfassen komplexe Vorgänge wie Strömungen oder thermische Effekte (Frommann, 2021). Ergänzend

spielen parametrische Modelle eine wichtige Rolle: Sie erlauben es, geometrische, funktionelle oder strukturelle Eigenschaften über veränderbare Eingangsgrößen zu variieren und auf diese Weise verschiedene Entwurfsalternativen zu erzeugen (Camba, et al., 2016).

Obwohl die Kabine bereits im frühen Flugzeugentwurf eine Rolle spielt, wird sie in dieser Phase nur grob berücksichtigt. Ein Beispiel wäre lediglich die Passagieranzahl mit Standardannahmen für das Gewicht pro Person (Konieczny, 2024). Die konkrete Gestaltung erfolgt erst später im Entwicklungsprozess, wenn detailliertere Anforderungen bekannt sind. Dennoch beeinflusst die Kabine Aspekte des Flugzeugs, wie Schwerpunktlage, Masseverteilung, Energiebedarf und betriebliche Abläufe (Frommann, 2021). Gleichzeitig besteht aufgrund kundenindividueller Layouts eine große Variantenvielfalt, beispielsweise im Hinblick auf Servicekonzepte oder Designanforderungen (Konieczny, 2025).

### 2.4.1 Auslegungsprozess der Kabine

Die Auslegung der Kabinensysteme beinhaltet im digitalen Entwicklungsprozess verschiedene Schritte, wie das Einlesen externer Daten, das Generieren und Positionieren von Komponenten sowie deren Verknüpfung. Würden diese Aufgaben in einem einzigen Skript umgesetzt, entstünde schnell ein unübersichtlicher Code, der schwer zu warten ist. Zudem wäre es für Nutzer kaum möglich, gezielt Anpassungen vorzunehmen, ohne dabei unbeabsichtigt andere Teilfunktionen zu beeinflussen (Fuchs, et al., 2022).

Aus diesem Grund ist der Entwicklungsprozess modular aufgebaut. Die einzelnen Berechnungsaufgaben werden in klar abgegrenzte Funktionen ausgelagert, die jeweils eine definierte Aufgabe übernehmen. Diese Funktionsbausteine werden anschließend über ein zentrales Hauptskript (*Main-File*) in einer festgelegten Reihenfolge ausgeführt.

Das Hauptskript übernimmt zunächst die grundlegende Initialisierung, legt Parameter und globale Datenstrukturen fest und importiert anschließend die CPACS-Daten. Danach folgen schrittweise weitere Funktionsaufrufe, beispielsweise für Platzierungsroutinen, die Zuweisung von Anforderungen oder die Prüfung von verfügbarem Bauraum. Abschließend werden die gesammelten Ergebnisse exportiert (Beckert, 2020).

Mithilfe dieser hierarchischen Steuerung handelt das *Main-File* als Einstiegspunkt, über den der gesamte Ablauf ausgeführt wird. Gleichzeitig bleiben die einzelnen Berechnungsfunktionen eigenständig, erweiterbar und wiederverwendbar. Die

erzeugten Objekte sowie alle Zwischenergebnisse werden in MATLAB abgelegt, wo sie zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stehen (Fuchs, et al., 2022).

Am Ende des Prozesses werden die erstellten Objektdaten über die Funktion *exportNew* in ein Austauschformat übertragen. Dieses Format dient, als Schnittstelle für die anschließende 3D-Modellierung und Visualisierung (Fuchs, et al., 2020). Die darin enthaltenen Daten gehen aus den zuvor instanziierten Komponentenobjekten hervor, die während des Auslegungsprozesses in einer Sammlung zusammengeführt wurden. Die resultierende XML stellt also den aktuellen Entwicklungsstand der Kabine dar und enthält alle Informationen, die für die Weiterverarbeitung benötigt werden. Dadurch wird gewährleistet, dass bei der Weiterverarbeitung dieselbe Datenbasis vorliegt.

Der Export beginnt mit der Initialisierung des XML-Dokuments und der Definition einer einheitlichen Grundstruktur. Dazu gehören ein Hauptelement für alle Kabinenkomponenten sowie übergeordnete Bereiche für globale Konfigurationen und Referenzen. Anschließend wird über sämtliche vorhandenen Objektinstanzen iteriert, deren Eigenschaften automatisiert in die XML-Struktur überführt werden. Dabei werden unter anderem geometrische Parameter oder Positionsinformationen gespeichert (Beckert, 2020).

### **Fazit des Entwicklungsprozesses von Flugzeugen**

Der Entwicklungsprozess von Verkehrsflugzeugen ist durch eine Phasengliederung und den Einsatz unterschiedlicher Modelltypen geprägt. Während frühe Entwurfsphasen von vereinfachten, analytischen Modellen dominiert werden, nimmt der Detaillierungsgrad der Modelle mit fortschreitender Entwicklung zu. Die Kabine wird dabei zunächst nur rudimentär berücksichtigt, obwohl sie Auswirkungen auf Masse, Energiebedarf und Betrieb hat.

Gerade diese zeitliche Entkopplung zwischen früher Systemauslegung und später Kabinendetaillierung macht parametrische und modulare Modellansätze interessant. Sie erlauben es, Kabinensysteme bereits in frühen Phasen strukturiert vorzubereiten, ohne deren konkrete Ausprägung festzulegen. Der beschriebene modulare Aufbau in MATLAB, bestehend aus abgegrenzten Funktionen und einem steuernden *Main-File*, behandelt dieses Problem. Er verhindert Skripte ohne funktionale Trennung, erhöht die Wartbarkeit und ermöglicht es, einzelne Teilaspekte unabhängig weiterzuentwickeln.

Der Export der Ergebnisse in ein einheitliches Austauschformat stellt zudem sicher, dass die im Entwurfsprozess erzeugten Informationen an nachgelagerte Arbeitsschritte weitergegeben werden können. Damit wird eine durchgängige

Datenbasis geschaffen, die den iterativen Prozess des Flugzeugentwurfs unterstützt.

## 2.5 Überblick über Systemgrenzen und Standards

Die Einbindung der Lavatory in Verkehrsflugzeuge ist eine Aufgabe, die mehr umfasst als das reine Einbauen der Module. Als Einrichtungen für Passagierkomfort muss die Lavatory mit unterschiedlichen Bordsystemen interagieren. Dazu zählen vor allem die Wasser- und Abwasserversorgung, elektrische Anschlüsse, Belüftungs- und Absaug- bzw. Unterdrucksysteme, Brandschutzeinrichtungen sowie ein Kontrollsystem. Die Umsetzung erfordert die Berücksichtigung von Zulassungsvorschriften, Luftfahrtstandards und geeigneten Schnittstellen.

### 2.5.1 Regulatorische Voraussetzungen für die Zulassung

Die Auslegung und Zulassung der Lavatory stützt sich auf eine Reihe internationaler Normen und luftfahrtspezifischer Vorschriften. Eine Grundlage bildet die CS-25 (Certification Specification for Large Aeroplanes) der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA), welche die wesentlichen Anforderungen zur Lufttüchtigkeit großer Verkehrsflugzeuge definiert (EASA, 2023).

Für elektrische und elektronische Baugruppen kommt die RTCA DO-160 (Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment) zur Anwendung, ein etabliertes Testprotokoll der Radio Technical Commission for Aeronautics. Lavatorykomponenten wie ein Kontrollsystem, Heizer für Warmwasser und Spülmechanismen müssen unter anderem Prüfungen zu Temperatur- und Druckschwankungen, Vibrationen, Feuchtigkeit sowie elektromagnetischer Verträglichkeit durchlaufen (Wiegmann, 2024). Diese Tests stellen sicher, dass sämtliche Komponenten unter realen Flugbedingungen sicher arbeiten.

Auf Systemebene orientiert sich die Qualitätssicherung an branchentypischen Standards wie AS9100 / EN9100 (Kistler Instrumente AG, 2023). Diese Normen ergänzen die ISO 9001 um luftfahrtspezifische Vorgaben zu Dokumentation, Konfigurations- und Änderungsmanagement, Rückverfolgbarkeit und Risikobewertung. Hersteller von Lavatories bzw. Luftfahrtequipment müssen somit im Zulassungsprozess nachweisen, dass ihr Produkt diesen Anforderungen gerecht wird.

Für die digitale und elektrische Integration kommen zudem ARINC-Spezifikationen zum Einsatz. Während ARINC 810 mechanische, elektrische und ergonomische

Standards für Kabineneinbauten definiert, beschreiben darauf aufbauende Spezifikationen die Schnittstellen für Steuerungs- und Überwachungssysteme (Wiegmann, 2024).

## 2.5.2 Überblick über die ATA Klassifikation

Für die Einordnung von Flugzeugkomponenten wird in der Luftfahrt das ATA-Klassifikationsschema (Air Transport Association) verwendet. Dieses Schema teilt das gesamte Flugzeug in einzelne Themenbereiche (ATA Chapters) ein und dient als Grundlage für die technische Dokumentation, die Instandhaltung sowie die Integration von Systemen (Airbus, 2018).

Die entsprechenden Schnittstellen der Lavatory lassen sich verschiedenen ATA-Kapiteln zuordnen (siehe Tabelle 2):

*Tabelle 2: ATA Kapitel der Lavatory*

<b>ATA Kapitel</b>	<b>Bereich</b>
ATA 5	Scheduled/unscheduled maintenance
ATA 20	Standard practices, Airframe systems
ATA 21	Air Conditioning
ATA 23	Communications
ATA 24	Electrical power
ATA 25	Equipment/furnishings
ATA 26	Fire protection
ATA 33	Lights
ATA 38	Water/Waste
ATA 44	Cabin Systems

Je nach Flugzeugtyp existieren unterschiedliche Lavatory-Konfigurationen. Diese reichen von kompakten Standard-Lavatories bis hin zu vergrößerten oder barrierefreien Varianten (siehe Abbildung 5) (Diehl Aviation AIX, 2025), die beispielsweise in Langstreckenflugzeugen oder Premium-Kabinen zum Einsatz

kommen. Für diese Vielfalt an Möglichkeiten ist eine Lösung bei der Integration und Anbindung zu finden.



Abbildung 5: Barrierefreie Space<sup>3</sup> Lavatory (Diehl Aviation AIX, 2025)

### 2.5.3 Einflussfaktoren und Schnittstellen der Lavatory

Die Komplexität der Lavatory bzw. deren Integration zeigt sich in der Vielzahl an Schnittstellen. Als Einheit in der Kabine mit benötigter Wasser-, Luft- und Stromversorgung sind Lavatories in unterschiedlichste Systeme eingebunden. Die elektrische Anbindung umfasst etwa die Versorgung von Beleuchtung, Sensorik, Türverriegelungen, Spülsystemen sowie optionaler Zusatzfunktionen wie berührungsfreier Armaturen. Gleichzeitig erfordert die Einbindung in die Wasser- und Abwasserversorgung eine Auslegung der Leitungsführung und Druckregelung (Lutzer, 2024).

Neben den Anschlüssen, wie elektrische Energie, Frischwasser, Abwasser und Luftzufuhr, gibt es weitere Anforderungen die zu berücksichtigen sind. Dazu zählen strukturelle Randbedingungen wie Crashesicherheit und Gewichtsbeschränkungen, schnelle Wartungszugänge und hohe Zuverlässigkeit (Konieczny, 2025), sowie nutzerbezogene Aspekte wie Barrierefreiheit, Hygieneanforderungen, Geruchskontrolle und intuitive Bedienbarkeit (Konieczny, 2024). Zudem sind Nachhaltigkeit und Flottenstandards der entsprechenden Airline zu beachten. Diese Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen macht die Lavatory zu einem stark vernetzten Kabinensystem.

Lavatories erfordern somit eine Abstimmung zwischen verschiedenen technischen Disziplinen, betrieblichen Abläufen, dem Passagiererlebnis und weiteren Einflüssen (siehe Abbildung 6). Die Lavatory kann also nicht als isolierte Komponente betrachtet werden. Vielmehr handelt es sich um ein komplexes Subsystem, dass auf Technik, Betrieb und Nutzeranforderungen abgestimmt werden muss.



Abbildung 6: Einflussfaktoren und Schnittstellen der Lavatory im Flugzeug

## Fazit zu den Systemgrenzen und Standards

Die Lavatory und damit verbunden das WWS können nicht isoliert betrachtet werden, da sie tief in eine Vielzahl technischer und regulatorischer Rahmenbedingungen eingebettet sind. Die Schnittstellen zu anderen Systemen verdeutlicht die hohe Systemkomplexität und den interdisziplinären Prozess der Auslegung.

Die dargestellten Zulassungsvorschriften und Standards zeigen, dass technische Lösungen nicht allein nach funktionalen Kriterien bewertet werden können. Vielmehr müssen sie bereits im Entwurf den regulatorischen Anforderungen entsprechen, um spätere Anpassungen und kostenintensive Änderungen zu vermeiden. Die Einordnung der Lavatory in das ATA-Klassifikationsschema

unterstützt dabei eine systematische Strukturierung und erleichtert die technische Dokumentation.

## 2.6 Einbindung des Lavatory in die Kabinenstruktur

Die Anbindung der Lavatory an Wasser- und elektrische Systeme, sowie das Belüftungssystem und die damit verbundene Vielzahl an zu beachtenden Vorschriften und Standards machen die Komplexität der Platzierung deutlich. Zugleich wird sichtbar, dass moderne Flugzeuge mehr und mehr durch Trends wie modulare Bauweisen oder steigende Nachhaltigkeitsanforderungen geprägt sind.

Aus diesem Grund folgen Abschnitte die die Herausforderungen mit Lavatory-Systemen beschreiben, die sowohl in der Forschung als auch in der industriellen Praxis eine Rolle spielen.

### 2.6.1 Raum- und Gewichtsbeschränkungen

Im frühen Flugzeugentwurfsprozess (Overall Aircraft Design) wird die verfügbare Kabinenfläche in erster Linie für die Sitzplatzanzahl ausgelegt. Funktionsbereiche wie Lavatories werden dabei mit Platzhaltern berücksichtigt. Besonders in Single-Aisle-Flugzeugen, in denen das Kabinenvolumen knapp ist, konkurrieren Lavatories mit Sitzen, Galleys, Staufächern und anderen Kabinenelementen um den Bauraum (Bahns, et al., 2013). Der daraus resultierende Bereich zwischen einer möglichst kompakten Gestaltung und der Einhaltung funktionaler sowie sicherheitsrelevanter Vorgaben stellt eine Herausforderung dar.

Das Gewicht der Lavatory hat direkten Einfluss auf Treibstoffverbrauch und Reichweite eines Flugzeugs (Lutzer, 2024). Obwohl Lavatories nicht zu den schwersten Kabinenelementen zählen, wirken Anforderungen wie strukturelle Festigkeit, Brandschutz und Crashlastverträglichkeit einer einfachen Gewichtsreduktion entgegen. Gleichzeitig erhöhen neue Komfort- und Hygienefunktionen, wie automatische Reinigungssysteme oder akustisch dämpfende Materialien die Masse, wodurch zusätzliche trade-offs entstehen.

Hinzu kommt, dass Airlines mit hohem Individualisierungsbedarf modulare und flexible Lavatories erwarten. Diese sollen sich an beispielsweise Markenidentitäten und regulatorische Anforderungen anpassen lassen, ohne dabei Mehrgewicht zu erzeugen (Hanna, et al., 2020). In der Realität entstehen dadurch widersprüchlich Anforderungen: maximale Flexibilität und Variantenvielfalt einerseits, minimale Masse und hohe Robustheit andererseits. Somit bleibt die effiziente Gestaltung und

Integration von Lavatories eine Herausforderung in der Kabinensystementwicklung. Diese Zielkonflikte lassen sich ausschließlich durch interdisziplinäre Ansätze bewältigen, wobei insbesondere die Kombination von Leichtbau- und Modularisierungskonzepten als geeignete Antwort auf diese komplexen Rahmenbedingungen gilt (Hanna, et al., 2021).

### 2.6.2 Montage und Instandhaltung der Lavatory

Die Installation der Lavatory wird durch die Zugangsmöglichkeiten zum Flugzeugrumpf beeinflusst. Da der Einbau meist über Passagier- oder Servicetüren erfolgt, ist der Transport vormontierter Lavatory-Module herausfordernd. In vielen Fällen müssen die Systeme in mehreren Einzelteilen angeliefert und erst im Inneren des Rumpfes montiert werden (Bahns, et al., 2013). Hinzu kommt, dass Wartungs- und Reparaturarbeiten durch den oft engen Einbauraum erschwert werden. Ohne eine definierte Aufteilung der Bauteile kann der Austausch defekter Komponenten sehr komplex werden. Die Schwierigkeit liegt dabei nicht nur in der physischen Erreichbarkeit, sondern auch in der Anzahl von Lavatory-Varianten und Airlinelayouts. Diese reduzieren die Standardisierung und erhöhen die Komplexität der Zugänge, Einbauten und Schnittstellen (Hanna, et al., 2020).

Aus Sicht des Retrofits spielt zudem die digitale Dokumentation eine Rolle, da Bauteile der Lavatory und zugehörige Systeme aufgrund von Updates häufig kürzere Lebenszyklen besitzen als das Flugzeug selbst (Koniczny, 2025). Einige Bauteilpläne aus älteren Flugzeugen sind beispielsweise nicht in digitaler Form vorhanden. Das Retrofit muss somit die bestehende Systemlandschaft einhalten, klare Schnittstellen bieten und servicefreundliche Zugänge gewährleisten.

### 2.6.3 Lebenszyklusbetrachtung und Recycling

Die Erwartungen an Fluggesellschaften, Flugzeughersteller und Zulieferer steigen hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Kabinenkomponenten. Lavatories beeinflussen die ökologische Bilanz eines Flugzeugs durch ihre Materialzusammensetzung, ihren Wasser- und Energieverbrauch und durch ihre Wartungszyklen (BDLI, 2023).

Ein Entwicklungsziel zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes über den Lebenszyklus ist die Verwendung recycelbarer, schadstoffarmer und möglichst leichter Materialien (Koniczny, 2025). Gewichtseinsparungen wirken sich positiv auf den Treibstoffverbrauch aus, da Lavatories zu den festen Kabinenelementen gehören und damit direkt zum Gesamtgewicht der Kabinenausrüstung beitragen.

Zur Bewertung ökologischer Auswirkungen gewinnt die frühe Integration von Methoden wie Life Cycle Assessment (LCA) oder Environmental Product Declarations (EPDs) zunehmend an Bedeutung. Diese Instrumente ermöglichen es, Umweltauswirkungen bereits in der Entwurfsphase zu berücksichtigen (Koniczny, 2025). Die Herausforderung besteht darin, ökologische Ziele mit Faktoren wie Lebensdauer, Wartungsfreundlichkeit und Modularität zu verbinden, sodass nachhaltige Lösungen wirtschaftlich bleiben (Keiser, et al., 2024).

Nachhaltigkeit wird daher zunehmend als Bestandteil der Systemgestaltung verstanden. Nur wenn ökologische Auswirkungen bereits in frühen Entwicklungsphasen systematisch berücksichtigt werden, lassen sich Fehlentwicklungen vermeiden und nachhaltige Lösungen über den Lebenszyklus einer Lavatory realisieren.

#### 2.6.4 Digitale Vernetzung von Kabinensystemen

Mit der zunehmenden Digitalisierung von Kabinensystemen verändert sich auch die Rolle der Lavatory: Aus einem primär mechanisch betriebenen Funktionsmodul wird ein vernetztes Subsystem, das mit dem Cabin Management System (CMS) und weiteren Bordkomponenten interagiert. Über digitale Schnittstellen wie ARINC 429 (Digital Information Transfer System), ARINC 628 (Cabin Equipment Interfaces) oder moderne Ethernet Kabinenbusse können Betriebszustände, Wasser- und Füllstandsensoren, Energieverbräuche sowie Wartungsinformationen erfasst und ausgewertet werden (Wiegmann, 2024). Digitale Meldungen ermöglichen eine verbesserte Überwachung und Integration in das vorhandene Zusammenspiel der Kabinensysteme.

Die Integration in das CMS erfordert allerdings eine hohe Kompatibilität mit unterschiedlichen Systemarchitekturen und Flugzeugkonfigurationen. Hinzu kommt, dass Komponenten der Lavatory häufig über 10 Jahre eingesetzt werden und während dieser Zeit sowohl mechanisch als auch softwaretechnisch funktionieren sollen (Koniczny, 2025). Langfristige Wartbarkeit und die Sicherstellung der Kompatibilität mit zukünftigen CMS-Updates stellen somit eine Herausforderung dar.

Auch der Zertifizierungsaufwand steigt mit zunehmender Digitalisierung. Digitale Funktionen, vernetzte Steuerungen und Datenübertragungen müssen entsprechend dokumentiert, getestet und freigegeben werden (Wiegmann, 2024). Die digitale Vernetzung der Lavatory und allgemein von Kabinensystemen bietet Möglichkeiten für Effizienz, Wartungsplanung und Betriebszuverlässigkeit.

Gleichzeitig steigt jedoch die Komplexität, der Integrationsaufwand und der regulatorische Prüfbedarf.

### 2.6.5 Modernisierung der Kabinenkomponenten

Das Retrofit der Lavatory stellt eine Herausforderung im Lebenszyklusmanagement von Verkehrsflugzeugen dar. Retrofit bezeichnet die nachträgliche Umrüstung, bzw. Modernisierung eines technischen Systems, ohne dieses vollständig zu ersetzen (Konieczny, 2025). Dabei werden neue Komponenten oder Technologien in ein bereits im Betrieb befindliches Produkt integriert, um die Leistungsfähigkeit, Effizienz oder Lebensdauer zu verbessern.

Während Verkehrsflugzeuge häufig über mehrere Jahrzehnte im Einsatz bleiben, müssen verbaute Komponenten der Kabine wegen hygienischer, regulatorischer oder technischer Anforderungen vorher ersetzt werden (Keiser, et al., 2024). Mit zunehmender Lebensdauer von Flugzeugen nehmen Herausforderungen hinsichtlich der Dokumentation, Systemkompatibilität und regulatorischer Zulassung zu.

Eine Schwierigkeit besteht in der begrenzten Rückverfolgbarkeit älterer Kabinenkonfigurationen. Bei vielen älteren Flugzeugen liegen Einbauzeichnungen, Leitungspläne und Komponentendokumentationen nicht digital vor (Christiansen, et al., 2024). Dies erschwert nicht nur die Planung von Umbauten, sondern stellt auch ein Risiko für sicherheitsrelevante Nachweise dar. Der tatsächliche Zustand von verbauten Komponenten ist häufig nur durch zeitaufwändige Untersuchungen herauszufinden.

Dazu kommt die begrenzte Standardisierung von Komponenten der Lavatory. Beispielsweise führen veränderliche Bauformen, Schnittstellen und Leitungsführungen dazu, dass Austauschkomponenten selten ohne konstruktive Änderungen verbaut werden können. Da Lavatories stark an Flugzeugtypen, strukturelle Umgebungsbedingungen und Airlinelayouts gebunden sind, müssen Maßnahmen zum Retrofit häufig als individuelles Projekt ausgeführt werden (Christiansen, et al., 2024).

#### **Fazit zur Einbindung in die Kabinenstruktur**

Die dargestellten Aspekte zu Bauraum- und Gewichtsbeschränkungen zeigen, dass insbesondere in Single-Aisle-Flugzeugen ein permanenter Zielkonflikt zwischen Anforderungen, Passagierkomfort und wirtschaftlicher Nutzung des Kabinenraums

besteht. Diese Herausforderungen begrenzen klassische Optimierungsansätze und erfordern frühzeitige Betrachtungen.

Die Ausführungen zu Montage, Instandhaltung und Retrofit machen deutlich, dass die Komplexität der Lavatory und des WWS über den reinen Betrieb hinausgeht. Im Kontext von Nachhaltigkeit und Digitalisierung wird deutlich, dass das System zunehmend unter erweiterten Zielgrößen entwickelt werden muss. Lebenszyklusbetrachtungen, Materialwahl und Energieeffizienz gewinnen an Bedeutung, während gleichzeitig digitale Vernetzung neue Potenziale für Zustandsüberwachung und Wartungsplanung eröffnet. Diese Entwicklungen erhöhen jedoch auch den Integrations- und Zertifizierungsaufwand.

Insgesamt unterstreicht das Kapitel die Notwendigkeit eines strukturierten, parametrischen und digital gestützten Entwicklungsansatzes, um die Vielzahl an Einflussfaktoren beherrschbar zu machen.

## 2.7 Funktionsweise des Water/Waste-Systems

Das WWS in Flugzeugen (siehe Abbildung 7) stellt die Wasserver- und -entsorgung an Bord dar. Es gewährleistet die Versorgung der Bordküchen einschließlich Spülen und Kaffeemaschinen (gelb), sowie der Waschbecken und Toiletten mit Trinkwasser (lila), das aus einem zentralen Wassertank (grün) bereitgestellt wird. In den Bordküchen ist zusätzlich ein Filtersystem integriert (gelb), das die Qualität des Trinkwassers verbessert und insbesondere den Geschmack des entnommenen Wassers optimiert (Lutzer, 2024).

Eine weiterführende und detaillierte Übersicht zur Struktur und Funktionsweise des Frisch-, Ab- und Grauwassersystems findet sich im Anhang (Anhang A1). Dort werden die technischen Zusammenhänge, Komponenten sowie die Unterscheidung der Wassersysteme (Frischwasser, Abwasser, Grauwasser) ersichtlich.

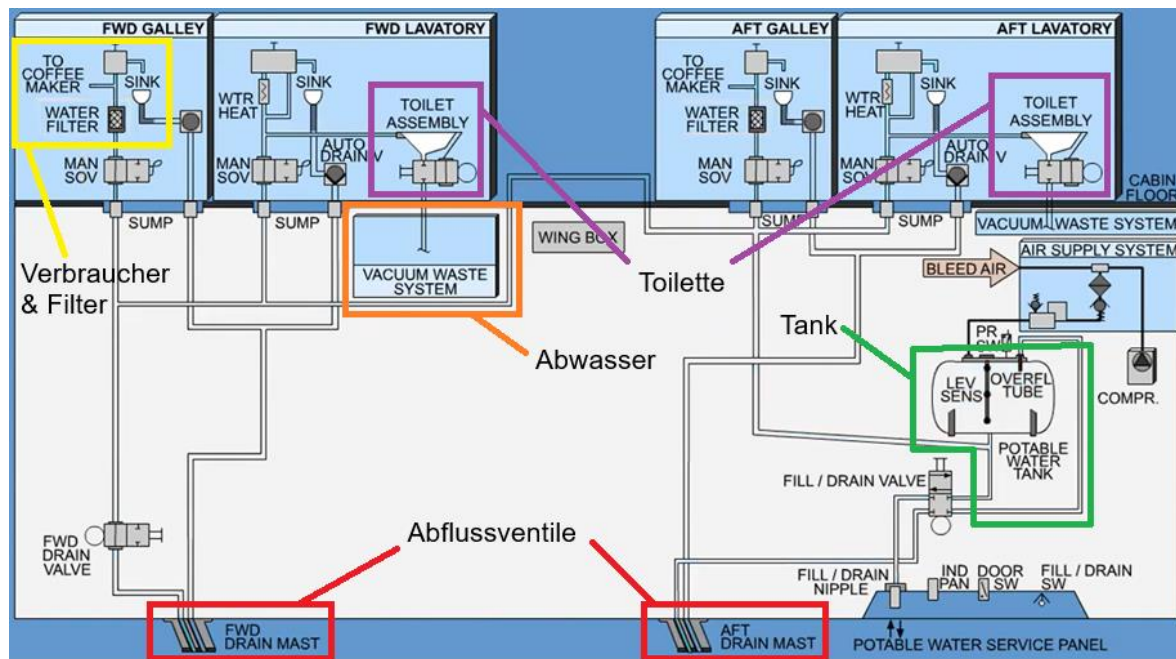


Abbildung 7: Water/Waste System (Lutzer, 2024)

Nach Gebrauch gelangt das entstehende Abwasser (Grauwasser), aus Spülen oder Waschbecken, über spezielle Ablassventile (Drain Masts) an definierten Stellen am vorderen und hinteren Rumpfbereich direkt über Bord (rot) (Hoppen, 2014). Dieser Teil des Systems ist so ausgelegt, dass die Entsorgung während des Fluges unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Standards erfolgen kann.

Im Gegensatz dazu wird das Schwarzwasser (Abwasser aus den Toilettenanlagen) in einem separaten Abwassertank mit einem Volumen von 180 Litern gesammelt (orange), der sich im hinteren Flugzeugbereich befindet (siehe Abbildung 8) (Lutzer, 2024). Dieser Tank ist hermetisch abgeschlossen und verfügt über ein eigenes System zur Druckregelung und Geruchskontrolle.

Nach der Landung übernimmt ein Bodenserviceteam die Entleerung. Dafür wird eine Wartungsklappe am Heck des Flugzeugs geöffnet, an die ein Schlauchsystem angeschlossen werden kann. Nach der Entleerung erfolgt eine gründliche Spülung des Tanks mit Frischwasser, das über eine integrierte Sprühdüse gleichmäßig in das Innere des Tanks eingeleitet wird, um Rückstände zu entfernen und hygienische Bedingungen sicherzustellen (Lutzer, 2024).

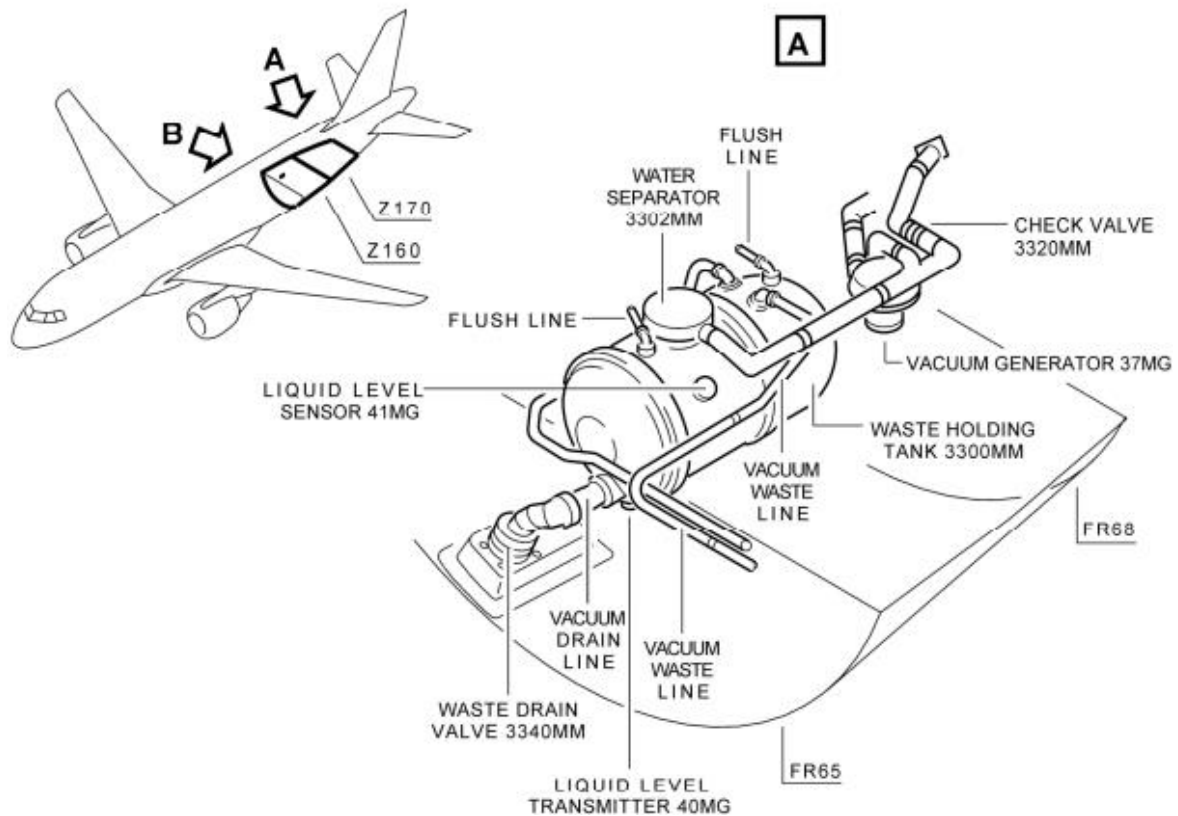


Abbildung 8: Wasteholding Tank (Airbus, 2018)

Das WWS an Bord moderner Verkehrsflugzeuge nutzt Druckluft, um eine Versorgung mit Trinkwasser für die Bordküchen und sanitären Einrichtungen sicherzustellen. Das Herzstück dieser Versorgungseinheit bildet ein zentraler Frischwassertank, der in der Regel ein Volumen von etwa 200 Litern aufweist (Hoppen, 2014). Je nach Kundenanforderung kann diese Kapazität jedoch variieren. Der Tank ist im temperaturgeregelten und druckbeaufschlagten Bereich des Rumpfes, in Flügelnähe, positioniert. Zur Füllstandsüberwachung ist der Tank mit einem Sensor ausgestattet, der kontinuierlich den Wasserstand misst und diesen in abgestuften Intervallen von 0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % anzeigt.

Die gesamte Steuerung und Überwachung des Systems wird zentral über den sogenannten Water/Waste System Controller (WWSC) abgewickelt (Lutzer, 2024). Dieser übernimmt eine Vielzahl an Aufgaben. Er regelt den Betrieb aller beteiligten Komponenten, verarbeitet Fehler- und Statusmeldungen und kommuniziert sowohl mit dem Cockpit als auch mit dem zentralen Wartungsrechner. Darüber hinaus überträgt der WWSC wichtige Systeminformationen an die Kabinencrew, sodass auch das Bordpersonal jederzeit über den Zustand des Systems informiert ist.

Ein weiterer Bestandteil des Systems ist das Vakuumtoilettensystem. Für den Abtransport von Abfällen wird ein Unterdruck erzeugt (Hoppen, 2014). In niedrigen Flughöhen geschieht dies aktiv durch einen Vakuumgenerator, während in höheren

Reiseflughöhen der natürliche Druckunterschied zwischen der Kabinen- und Außenluft effizient genutzt wird. Der Spülvorgang ist dabei zweistufig aufgebaut (Tivig, et al., 2025). Nach Betätigung des Spültasters wird zunächst eine definierte Menge Wasser in die Toilettenschüssel eingelassen. Anschließend öffnet sich das Abfallventil und die Abfälle werden mit hoher Geschwindigkeit in den Abfalltank geleitet, was eine zuverlässige und ressourcenschonende Methode darstellt, die sich im modernen Luftverkehr bewährt hat.

Das Wasserversorgungssystem moderner Verkehrsflugzeuge stellt nicht nur die Versorgung der Waschbecken sicher, sondern beliefert auch Kaffeemaschinen und Spülen mit druckbeaufschlagtem Wasser (Lutzer, 2024). Der hierzu erforderliche Betriebsdruck wird durch komprimierte Luft erzeugt, die entweder von den Triebwerken während des Flugs oder durch die Hilfsturbine (APU) am Boden bzw. bei geringer Triebwerkslast bereitgestellt wird.

Zur Gewährleistung eines sicheren Systembetriebs sind die Tanks mit mehreren Schutzvorrichtungen ausgestattet. Diese umfassen sowohl Sicherheitsmechanismen zur Druckregulierung und Sensoren zur Überfüllvermeidung im Bereich des Abwassertanks, als auch manuell betätigte Absperrventile entlang der Frischwasserleitungen (Tivig, et al., 2025). Letztere ermöglichen eine gezielte Abschaltung einzelner Versorgungsabschnitte, beispielsweise im Rahmen von Wartungsmaßnahmen oder im Falle technischer Störungen ohne dabei das gesamte WWS außer Betrieb nehmen zu müssen. Für Notfallsituationen ist das System mit einer autonomen Notstromversorgung ausgestattet. Diese ermöglicht es, den Betrieb der Wasserversorgung auch bei einem kompletten Stromausfall aufrechtzuerhalten.

Eine weitere sicherheitsrelevante Funktion ist das sogenannte Inflight Drainage System. Dieses erlaubt die vollständige Entleerung des Frischwassertanks während des Flugs (Lutzer, 2024). Die Aktivierung erfolgt über eine Schaltfläche im Cockpit, wodurch sich das Ablassventil im hinteren Bereich des Flugzeugs öffnet. Eine Kontrollanzeige signalisiert den laufenden Entleerungsvorgang. Sobald ein Füllstand von 0 % erreicht ist, wird das gesamte WWS automatisch abgeschaltet, um Schäden zu vermeiden und eine fehlerfreie Rückstellung des Systems zu gewährleisten.

Zum Schutz gegen ungewollte Entleerung oder wetterbedingte Schäden wird das System automatisch deaktiviert, wenn das Fahrwerk ausgefahren ist oder niedrige Außentemperaturen erkannt werden. Dies ist eine vorbeugende Maßnahme gegen das Einfrieren von Wasserleitungen oder Ventilen.

Das gesamte System ist sowohl für den Betrieb am Boden als auch in der Luft ausgelegt und verfügt über sicherheitskritische Komponenten, darunter auch

Temperaturüberwachungen und Überhitzungsschutz für den Luftkompressor (Lutzer, 2024). Diese sorgen für einen zuverlässigen und störungsfreien Betrieb der Wasser- und Abwasserinfrastruktur unabhängig von äußeren Betriebsbedingungen.

## 2.8 Dreidimensionale Visualisierung

Um in einer Entwicklungsumgebung wie Unity eine realitätsnahe Darstellung technischer Objekte zu ermöglichen, ist der Einsatz dreidimensionaler Modelle notwendig. Nur dadurch können weitere Untersuchungen durchgeführt werden, beispielsweise hinsichtlich Zugänglichkeiten oder ergonomischer Aspekte (Dörner, et al., 2019). Je höher der Detailgrad dieser Modelle ausfällt, desto präziser lassen sich mögliche Interaktionen und Systemverhalten analysieren. Gleichzeitig entsteht jedoch ein Konflikt zwischen Aussagekraft und Effizienz. Sehr detailreiche Modelle zeigen zwar eine hohe visuelle Genauigkeit, erfordern jedoch mehr Rechenleistung, längere Ladezeiten und erhöhen die Komplexität in Simulation und Analyse. Vereinfachte Modelle reduzieren hingegen die Datenmenge und ermöglichen schnellere Berechnungen, haben jedoch einem Verlust an möglicherweise relevanten Informationen (Dörner, et al., 2019). Daher muss der Detailgrad auf den jeweiligen Untersuchungszweck angepasst werden, um eine Lösung zwischen Realitätsnähe und Aussagekraft zu erreichen. Je höher dabei der Detailgrad eines Modells ausfällt, desto stärker wird das Gefühl von Immersion und räumlicher Präsenz. Insbesondere dann, wenn zusätzlich realistische Oberflächentexturen eingesetzt werden, die etwa Materialeigenschaften wie Glanz oder Rauheit visuell erfahrbar machen.

Für solche optisch fokussierten 3D-Modelle kommen häufig polygonbasierte Oberflächenmodelle zum Einsatz. Dabei bildet das Dreieck als kleinstmögliche Polygonform die grundlegende Einheit zur Beschreibung komplexer Geometrien. Die Zerlegung von Flächen in Dreiecke, auch als Triangulierung bezeichnet, stellt eine effiziente Methode dar, selbst freiformartige oder gekrümmte Objekte präzise digital abzubilden (Hennigs, 2021).

Allerdings bringt die Modellierung gekrümmter Oberflächen eine gewisse Herausforderung mit sich: Um die Rundung optisch glaubwürdig zu erfassen, sind oftmals sehr viele kleine Dreiecke erforderlich. Dies führt zu einer erhöhten Polygonanzahl und damit zu größerem Speicherbedarf sowie potenziell höherem Rechenaufwand bei der Darstellung. Umgekehrt kann durch gezielte Reduktion der Polygone der Detailgrad verringert und die Datenmenge effizient optimiert werden, was ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von Echtzeitanwendungen wie Simulationen oder Virtual-Reality-Erlebnissen ist (Dörner, et al., 2019).

Triangulierte 3D-Modelle, die für die Integration in Unity vorgesehen sind, können auf unterschiedliche Weise erzeugt werden. Liegt bereits ein digitales Objekt beispielsweise aus einem CAD-System vor, so lässt sich dieses mithilfe geeigneter Software leicht in ein polygonbasiertes Format überführen (Unity Technologies, 2025). Steht kein digitales Ausgangsmodell zur Verfügung, besteht alternativ die Möglichkeit, physische Objekte durch 3D-Scan-Technologien zu digitalisieren und als Modell aufzubereiten (Dörner, et al., 2019).

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Modellierung der Water/Waste-Komponenten die 3D-Grafiksoftware Blender verwendet. Dieses dient als zentrale Plattform zur Erstellung der detaillierten 3D-Geometrien (siehe Abbildung 9).

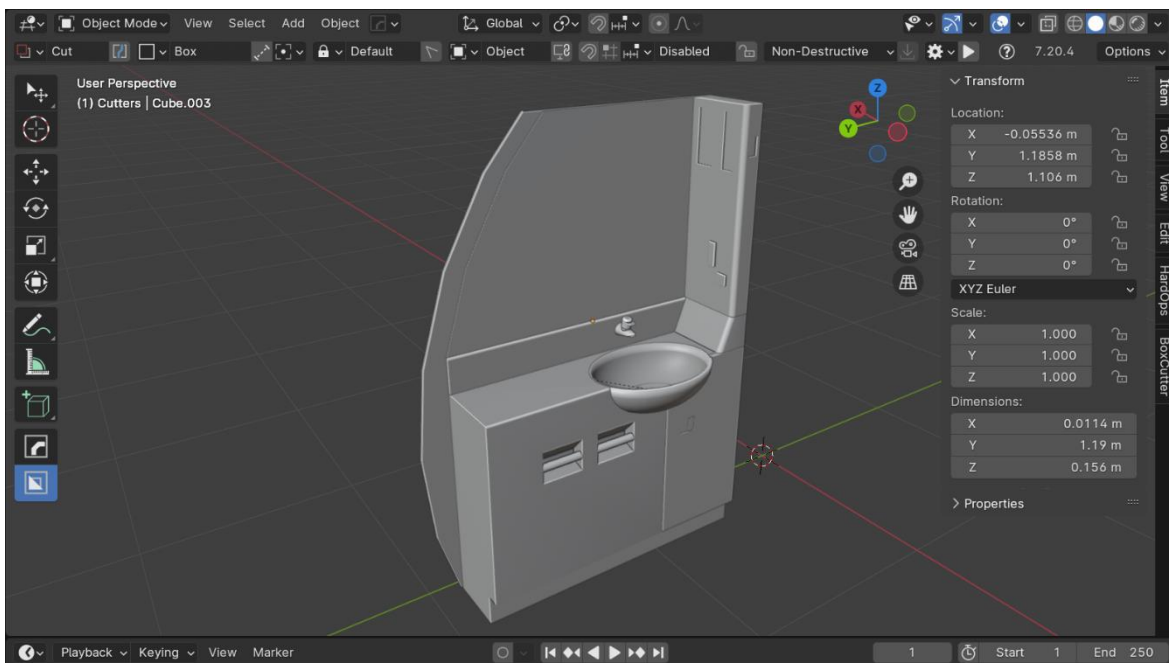


Abbildung 9: Nutzeroberfläche von Blender mit Waschbecken (A320)

## Fazit zur dreidimensionalen Darstellung

Die dreidimensionale Visualisierung stellt ein Bindeglied zwischen der abstrakten Systemmodellierung und der anschaulichen Bewertung technischer Lösungen dar. Sie ermöglicht es, Kabinen- und Systemstrukturen räumlich erfahrbar zu machen und Fragestellungen zu Zugänglichkeit, Ergonomie und Integration bereits in frühen Entwicklungsphasen zu untersuchen. Mit Blender wird ein Werkzeug eingesetzt, das sowohl die Erstellung von Geometrien als auch deren Aufbereitung für VR-Anwendungen unterstützt. Eine Strategie wird verfolgt, die nicht auf maximale Detailtreue abzielt, sondern auf eine Balance zwischen Aussagekraft und immersiver Wahrnehmung.

## 2.9 Anwendung von Virtual-Reality-Technologie

Eine „Virtuelle Realität“ (VR) bezeichnet eine computergenerierte Umgebung, die Menschen mithilfe von Controllern und Headset (siehe Abbildung 10) wahrnehmen und beeinflussen können.



Abbildung 10: VR-Ausrüstung der HTC Vive Pro Eye

Die Technologie dieses Systems wird durch folgende Merkmale definiert:

- **Bildausgabe:** Die computergenerierten Bilder werden über Bildschirme wiedergegeben, die direkt vor den Augen des Nutzers am Kopf befestigt sind.
- **Bewegungserfassung:** Die Position des Kopfes wird kontinuierlich durch Sensoren erfasst, und auf Basis dieser Daten wird in Echtzeit ein Bild generiert, das dem Blickfeld des Nutzers entspricht.
- **Interaktionsmöglichkeiten:** Der Nutzer kann mithilfe von Eingabemedien mit der virtuellen Umgebung interagieren.

Ein VR-System möchte eine hohe Immersion erzeugen, indem es die natürlichen Sinneseindrücke versucht vollständig durch computergenerierte zu ersetzen (Beckert, 2020). Die dargestellten Inhalte unterscheiden sich je nach Anwendungsfall. In Unterhaltungsanwendungen stehen meist kreative Szenarien im Mittelpunkt, während in wissenschaftlichen oder beruflichen Bereichen eher realitätsgetreue Darstellungen verwendet werden. Beispiele können hier virtuelle Begehung von Gebäudeentwürfen, Produktentwicklung und Prototyping oder VR-Fahrsimulationen sein. Exakter Abbilder der Realität, die unabhängig von Zeit und Ort genutzt werden können sind mit VR-Systemen möglich (Dörner, et al., 2019). Solche Darstellungen zeichnen sich durch eine hohe Detailtreue und die Simulation physikalischer Eigenschaften aus.

Wichtig ist die Abgrenzung zur „Erweiterten Realität“ (AR). Diese kombiniert reale und virtuelle Inhalte, indem Kameras oder halbtransparente Displays genutzt werden, um digitale Elemente in die reale Umgebung einzubetten (Dörner, et al., 2019).

### **Fazit zur Anwendung von Virtual-Reality-Technologie**

Die Einführung in die Virtual-Reality-Technologie verdeutlicht deren Potenzial als Analyse- und Bewertungswerkzeug im ingenieurwissenschaftlichen Kontext. VR ermöglicht nicht nur eine visuelle Darstellung, sondern ein räumliches Erleben technischer Systeme, das über klassische Bildschirmdarstellungen hinausgeht. Gerade für komplexe Kabinenbereiche erlaubt dies eine intuitive Bewertung von Platzverhältnissen und Interaktionen, auch durch fachfremde Nutzer. Gleichzeitig wird klar, dass VR keine exakte Kopie der Realität darstellt, sondern ein abstrahiertes Abbild, dessen Aussagekraft stark vom gewählten Detailgrad und Anwendungsfall abhängt. Das Kapitel begründet damit den Einsatz von VR als ergänzendes Werkzeug im Entwicklungsprozess, das in frühen Phasen zur Bewertung von Konzepten und zur interdisziplinären Kommunikation beiträgt.

### 3 Aufbau und Parametrisierung des Systems

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau und Rahmen des Entwicklungsansatzes. Der betrachtete Untersuchungsfall wird erläutert und die relevanten Rahmenbedingungen festgelegt. Darauf aufbauend werden die einzelnen Systemkomponenten vorgestellt, aus denen sich das WWS als funktionale Einheit zusammensetzt. Im Anschluss wird das Vorgehen in MATLAB beschrieben, mit dem die Komponenten erzeugt, parametrisiert und in ein Modell überführt werden. Abschließend wird beschrieben, wie die erzeugten Daten in eine virtuelle Umgebung überführt werden, um das Modell in VR zu visualisieren und weiterführende Analysen zu ermöglichen.

#### 3.1 Untersuchungsfall der Arbeit

Für die Konzeption und Modellierung des WWS wird der Airbus A320 (siehe Abbildung 11) als Referenzmodell herangezogen. Dieses Flugzeug zählt zu den erfolgreichsten Vertretern der zivilen Luftfahrt im Segment der Kurz- und Mittelstrecken. Der Erstflug dieses Flugzeugs fand am 22. Februar 1987 statt (Airbus, 2007).



Abbildung 11: Lufthansa A320 (Airbus, 2007)

Der A320 hat eine Gesamtlänge von 37,57 m und einer Spannweite von 34,10 m (35,80 m mit Winglets). Im Inneren der Kabine stehen den Passagieren 2,26 m Stehhöhe zur Verfügung, während die Kabinenbreite 3,70 m beträgt. In Bezug auf die Leistung weist der A320 ein maximales Startgewicht (maximum take-off weight, MTOW) von etwa 78 bis 79 Tonnen auf. Das Leergewicht beträgt rund 42 Tonnen,

während das maximale zulässige Landegewicht bei ca. 66 Tonnen liegt. Zwei Turbofan-Triebwerke erzeugen jeweils einen Schub von etwa 120 Kilonewton und ermöglichen eine Reisegeschwindigkeit zwischen Mach 0,78 und 0,82 mit einer maximalen Geschwindigkeit von bis zu Mach 0,86. Die Reichweite variiert in Abhängigkeit von der Variante und Ausstattung zwischen 3300 und 3700 km. Der maximale Dienstgipfel liegt bei rund 12000 m (39.000 bis 41.000 Fuß). Mit seiner Kabinenarchitektur bietet der A320 Platz für bis zu 180 Passagiere, wobei die genaue Sitzanordnung je nach Betreiber und Ausstattungsvariante variiert (Airbus, 2007). Im vorderen und hinteren Bereich der Kabine ist jeweils ein Sanitärbereich installiert. Diese Einrichtungen sind über ein Leitungsnetzwerk direkt mit dem Frischwasser- und dem Abwassersystem des Flugzeugs verbunden, was die Grundlage für die Auslegung und Simulation darstellt (Lutzer, 2024).

### 3.2 Komponenten des Water/Waste-Systems

Die Identifikation und Dokumentation der Systemkomponenten des WWS erfolgt in einem ersten Schritt durch die Analyse von Wartungsunterlagen (Airbus, 2018). Die darin enthaltenen Informationen wurden anschließend strukturiert und in tabellarischer Form aufbereitet (siehe Tabelle 3), um eine fundierte Datengrundlage für die weitere Modellierung zu schaffen.

Tabelle 3: Komponenten ATA-38 Water/Waste

Komponente	ATA Nummer	Länge	Breite	Höhe	X [inch]	Y [inch]	Z [inch]	Anzahl	Position
portablewaterTank	38-11-41	108 cm	52 cm	65 cm	20,4	42,5	25,6	1	Links Anfang Flügelwurzel (quer)
airconditioningVents	38-11-41	260 cm	90 cm	140 cm	35,4	102,3	55,0	1	Mitte Anfang Flügelwurzel
airconditioningDucts	38-11-41	68 cm	40 cm	38 cm	15,7	26,7	15,0	2	Direkt an den Vents (L & R)
waterHeater	38-12-00	10,2 cm	13,5 cm	32,8 cm	4,0	5,3	12,9	2	unterhalb des Waschbeckens rechts
watershutoffValve	38-12-00	15 cm	9 cm	8 cm	5,9	3,5	3,2	2	unterhalb Toilette (hinten)
toiletBowl	38-31-00	60 cm	42 cm	48 cm	16,5	23,6	18,9	2	hinten/außen
washholdingTank	38-31-00	80 cm	52 cm	65 cm	31,5	20,4	25,6	1	Mitte Flugzeugende (längs)
drainValve (galleys)	38-32-41							2	unterhalb des Waschbeckens links
drainValve	38-32-41	17 cm	14 cm	16 cm	6,7	5,5	6,3	2	unterhalb des Waschbeckens links
shutoffValve	38-32-42	13 cm	11 cm	7 cm	5,2	3,6	2,8	2	unterhalb Toilette (vorne)
washbasindrainValve	38-32-42	6 cm	8 cm	12,5 cm	2,4	3,2	5,0	2	direkt unter dem Waschbecken
pressurereducingValve	38-41-43	12 cm	7 cm	8 cm	2,8	4,7	3,1	1	rechts neben portablewaterTank
checkvalveairFilter	38-41-41(42)	15 cm	7 cm	6 cm	2,8	5,9	2,4	1	rechts neben pressurereducing Valve
airshuttleValve	38-41-44	5 cm	7 cm	9 cm	2,0	2,8	3,6	1	rechts neben CheckValve/Airfilter
washbasinFaucet	38-12-41	124 cm	31 cm	200 cm	12,2	37,0	78,0	2	hinten/rechts
Lavatory (Kabine)	/	124 cm	31 cm	200 cm	49,2	37,0	78,0	2	2x im Flugzeug (vorne und hinten links)

Die in der Tabelle dargestellten Informationen bieten einen Überblick über die zentralen Komponenten des WWS. Erfasst wurden dabei unter anderem der jeweilige Komponentename, die zugehörige ATA-Nummer, die geometrischen Abmessungen in cm und Zoll, die Stückzahl sowie die ungefähre räumliche Position innerhalb des Flugzeugs.

Die Namen der Komponenten weisen eine ungewöhnliche Schreibweise auf, die auf das Objektnamenbezeichnungsschema von MATLAB zurückzuführen ist und für die spätere Zuordnung, sowie Platzierung benötigt wird.

Da die originalen technischen Zeichnungen und exakten Bauteilmaße aus lizenzrechtlichen Gründen nicht öffentlich zugänglich sind, erfolgte die Erfassung der Dimensionen auf zwei Wegen: Einerseits durch direkte Anfragen bei den jeweiligen Herstellern, andererseits durch eigene Messungen. Letztere wurden am Rumpf eines physischen Airbus A320 vorgenommen, der im Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung (ZAL) in Hamburg durch Lufthansa Technik zur Verfügung gestellt wird (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: A320 Rumpf Lufthansa Technik, Foto: ZAL GmbH / Daniel Reinhardt

Basierend auf diesen Daten konnten sämtliche im ATA-Kapitel 38 verzeichneten Komponenten in Blender digital nachgebildet werden. Dabei wurde Wert auf eine realistische Darstellung gelegt, um die visuelle Genauigkeit der Modelle zu gewährleisten, insbesondere im Hinblick auf die geplante Integration in die Unity-Umgebung, in der das gesamte WWS später interaktiv dargestellt werden soll. Bei den aufgeführten Abmessungen handelt es sich nicht um exakte Nachbildungen der Originalbauteile, sondern vielmehr um angenäherte Werte, die primär der

Umsetzung innerhalb der Virtuellen Realität dienen. Diese Näherungsgrößen ermöglichen eine realitätsnahe, aber zugleich technisch umsetzbare Visualisierung der Komponenten im digitalen Modell ohne Markenrechte zu verletzen.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Modellierung berücksichtigt werden musste, ist die Tatsache, dass bestimmte Bauteile nicht ausschließlich einem einzigen System zugeordnet sind, sondern in mehreren (Sub-)Systemen des Flugzeugs verbaut werden. Ein Beispiel dafür ist das sogenannte *Drain Valve* (siehe Abbildung 13), das sowohl in den Küchenbereichen (Galleys) als auch im WWS integriert ist und in der Tabelle orange markiert wurde.

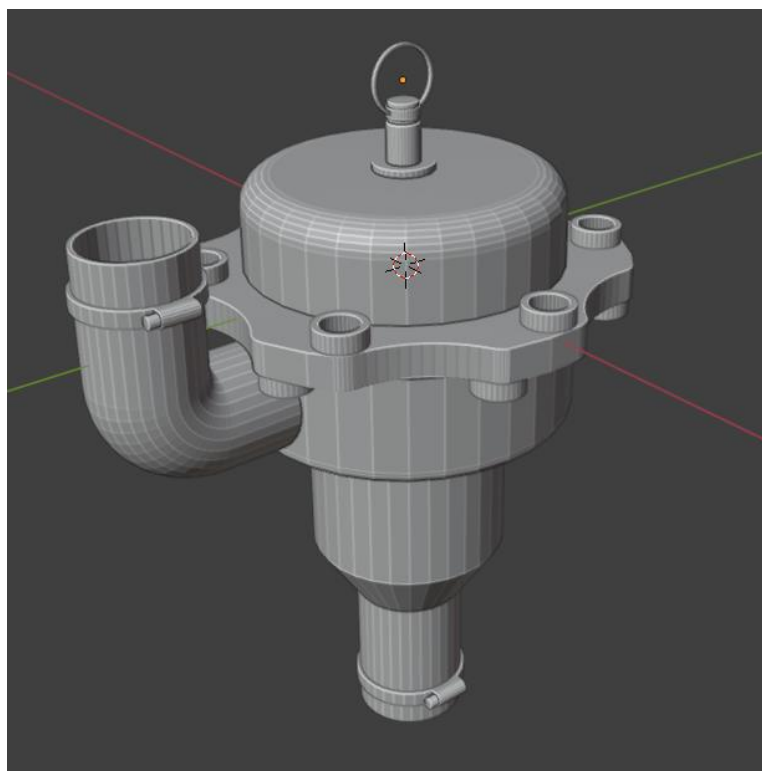


Abbildung 13: Drainvalve Lavatory/Galley

### 3.3 Arbeitsweise und Umsetzung in MATLAB

In MATLAB wurde ein Modell entwickelt, das den Prozess der Platzierung von Kabineninnenraumkomponenten ermöglicht. Als erste Annäherung an die reale Struktur wurden die einzelnen Komponenten geometrisch vereinfacht und in Form von Quadern modelliert. Dieses abstrahierte Modell ermöglicht eine schnelle und flexible Repräsentation der räumlichen Anordnung der Kabinenelemente und dient als Grundlage für die systematische Integration in das digitale Umfeld.

Die Platzierung der Komponenten erfolgt dabei vollständig parametrisch und basiert auf strukturellen Informationen, die aus einer CPACS-Datei extrahiert werden, wie Strukturinformationen, Bauräumen, Abmaße und Geometrien. Nach dem Import werden diese Daten in MATLAB weiterverarbeitet, woraufhin das Modell die räumliche Positionierung der einzelnen Elemente entsprechend den vorliegenden Parametern anpasst.

Durch diese Parametrisierung entsteht ein flexibles Modell. Jegliche Änderung der Eingangsdaten, etwa durch ein modifiziertes CPACS-File, führt automatisch zu einer Neuplatzierung der betroffenen Komponenten. Ein Beispiel ist der Wechsel vom Airbus A320 auf die längere A321-Konfiguration. Aufgrund der erweiterten Rumpflänge werden neue Kabinenbauteile ergänzt und automatisch an die für den neuen Flugzeugtyp vorgesehenen Positionen platziert, ohne dass manuelle Eingriffe erforderlich sind.

Wie bereits in Kapitel 2.3 erläutert, kommt im Rahmen dieser Arbeit die objektorientierte Programmierung zum Einsatz. Die grundlegenden Prinzipien dieser Methodik wurden bereits eingeführt. Im weiteren Verlauf dieses Kapitelabschnitts soll nun das konkrete Vorgehen anhand eines Beispiels aus dem WWS veranschaulicht werden. Zu diesem Zweck wird exemplarisch der *Portable Watertank* ausgewählt (siehe Abbildung 14).

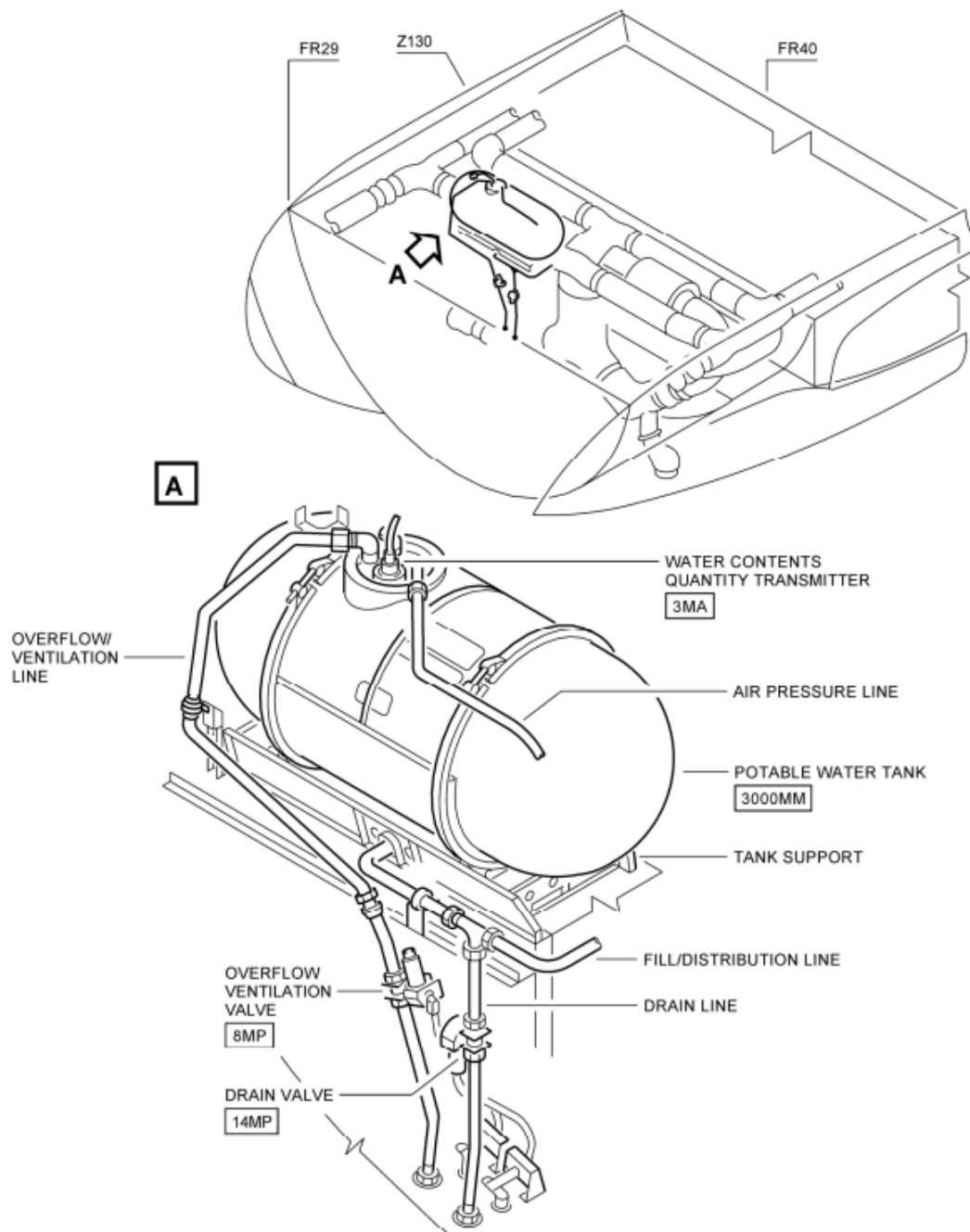


Abbildung 14: Portable Watertank (Airbus, 2018)

Im Hauptskript (*Main-File*) erfolgt zunächst die grundlegende Initialisierung der Arbeitsumgebung. Dazu gehört das Löschen aller Variablen (`clear all`), das Schließen offener Fenster (`close all`) und das Zurücksetzen der Kommandozeile (`clc`). Im Anschluss werden globale Strukturen oder Collections definiert, über die im gesamten Projekt auf zentrale Parameter und Datenstrukturen zugegriffen werden kann, wie etwa *params*, *collection*, *links*, *requirements* und *dataPoints*.

Die für das Projekt relevanten Verzeichnisse werden mit `addpath()` eingebunden, um alle benötigten Funktionen, Objektklassen und Daten zugänglich zu machen.

Dies umfasst Verzeichnisse für geometrische Objekte, Systemverbindungen, Anforderungen und Auswertungsdaten.

Im nächsten Schritt werden mit *initParameters* grundlegende Systemparameter geladen. Durch das Setzen des Parameters *caseParameter* auf 1 wird festgelegt, dass die Daten aus einer CPACS-Datei importiert werden sollen. In diesem Fall handelt es sich um das File *'tool\_output\_new\_style.xml'*. Dabei werden verschiedene Kabinenelemente wie Sitze, Türen, Spanten (Frames), Bordküchen (Galleys) und Lavatories eingelesen.

Nach dem Import der Kabinendaten folgt die Platzierung weiterer Komponenten, darunter der *portable Watertank*. Diese werden durch eine speziell dafür entwickelte Funktion *placePortablewaterTank(frames)* erzeugt. Diese Funktion nutzt Daten aus der globalen *params*-Struktur, um Dimensionen und Platzierungskordinaten zu berechnen. Die Platzierung erfolgt dabei parametrisch und ist direkt an die Struktur des Flugzeugs gekoppelt. In diesem Beispiel orientiert sich die Platzierung an den *frames* (Spanten), die als Referenzobjekte übergeben werden.

```
clear all
close all
clc

global params
global collection
global links
global requirements
global dataPoints

collection = containers.Map;

addpath('functions')
addpath('cabinObjects')
addpath('links')
addpath('geometry')
addpath('requirements')
addpath('evaluationData')

%Parameter setzen
params = initParameters;
ohscType = "regular"; % regular, large, extraLarge
cableArchitecture = "upper_decentral"; %lower_central, upper_central, lower_decentral,
upper_decentral
caseParameter = 1;

%import Kabine CPACS
if caseParameter == 1
    [seats,exitDoors,frames,galleys,lavatories] = importCPACS(@ElectSeat, @ExitDoor, @Frame,
@Galley, @Lavatory, 'tool_output_new_style.xml');
    %   params.aircraft.type = "A320";
    %   params.seat.pitchEC = Seatpitch*1000*params.mm2i;
end

[...]

[portablewaterTank] = placePortablewaterTank(frames);

exportNew
```

Wie bereits zuvor am Beispiel des *WatershutoffValve* gezeigt, wurde auch für den *portable Watertank* eine eigene Klasse erstellt. Diese Klasse basiert auf den übergeordneten Klassen *Component* und *GeometryObject* und definiert die grundlegenden Eigenschaften und Funktionen, die jede Instanz (jedes Objekt) besitzen soll.

Innerhalb des Konstruktors der Klasse werden zentrale Parameter gesetzt, darunter Dimensionen, Material, Farbe, Position im Raum sowie ein eindeutiger Name. Zusätzlich wird die Komponente einer spezifischen ATA-Kategorie (*38-11-41*) zugeordnet und mit einer Verbindungsdefinition (*obj.Connections = {'frame',1};*) verwiesen, die angibt, dass das Bauteil an den *frames* angebracht ist.

```

classdef PortableWaterTank < Component & GeometryObject

    properties

    end

    methods
        function obj =
PortableWaterTank(Length,Width,Height,Midpointx,Midpointy,Midpointz,Number,Spec)
            obj.Height = Height;
            obj.Width = Width;
            obj.Length = Length;
            obj.Color = [0.2,0.7,0.8];
            obj.Tag = 'waterWasteSystem';
            obj.Spec = Spec;
            obj.Number = Number;
            obj.Midpoint_x = Midpointx;
            obj.Midpoint_y = Midpointy;
            obj.Midpoint_z = Midpointz;
            obj.Ata = '38-11-41';
            obj.Material = 'aluminium';
            obj.Connections = {'frame',1};
            obj.Name = strcat('PortableWaterTank',num2str(Number),Spec);
        end
    end
end

```

Anschließend wird eine Funktion namens *placePortableWaterTank(frames)* definiert, die später aus dem zugehörigen *Main-File* aufgerufen wird. Diese Funktion greift auf Parameter aus der globalen Struktur *params* zu, die zuvor aus den CPACS-Daten abgeleitet wurden. Die Parameter dienen dazu, die Platzierung des Objekts im virtuellen Bauraum zu bestimmen.

Die Dimensionen des *portable Watertank* (Länge, Breite, Höhe) sind im Funktionskörper durch den Import von CPACS oder manueller Eingabe vorgegeben. Die Positionierung des Tanks erfolgt über einen berechneten Mittelpunkt im Koordinatensystem. Die Lage entlang der Längsachse des Flugzeugs wird dabei aus der Differenz zwischen Start- und Endpunkt der Kabine berechnet. Zur Umrechnung der Maße von Zoll in mm wird der Skalierungsfaktor

`params.i2mm` verwendet, da in der Luftfahrt zur Angabe von Maßen Inch als Standard gilt.

Im nächsten Schritt wird ein Objekt der Klasse `PortablewaterTank` mit den entsprechenden Abmessungen und Koordinaten erzeugt und anschließend in ein Array eingefügt, das als Rückgabewert der Funktion an das `Main-File` übergeben wird.

Obwohl die Structure `frames` an die Funktion übergeben wird, findet er im aktuellen Code keine Verwendung. Eine explizite Verknüpfung des Tanks mit Strukturpunkten, wie den Spanten (`frames`), ist in der aktuellen Implementierung noch nicht vorhanden. Es besteht jedoch bereits eine indirekte Abhängigkeit, da die Position des Tanks bei der Platzierung anhand der entsprechenden Spantengeometrie bestimmt wird. Das Modell berücksichtigt somit strukturelle Bezugspunkte des Rumpfes, ohne das ein eigenständiges Objekt existiert, welches diese Beziehung dauerhaft speichert. Im Funktionsdesign ist vorgesehen, diese Abhängigkeit künftig zu überführen, um eine eindeutige Referenz zu gewährleisten.

```
function [portablewaterTank] = placePortablewaterTank(frames)

global params

portablewaterTank = [];

% Parameter aus der globalen Struktur 'params' entnehmen
xStart = params.cabin.xStart;
xEnd = params.cabin.length;

% Dimensionen
Length = 35.4;           % Länge in Zoll
Width = 102.3;          % Breite in Zoll
Height = 49.7;          % Höhe in Zoll

% Platzierung
Midpointx = (xEnd-xStart)/2-460; %mm
Midpointy = 0;           %mm
Midpointz = -Height/2*params.i2mm; %mm
Number = 1;
Spec = 'RH';

% Erstellen eines Objekts
a1 = PortablewaterTank(Length,Width,Height,Midpointx,Midpointy,Midpointz,Number,Spec);

% Hinzufügen des neuen Objekts zur Liste
portablewaterTank = [portablewaterTank,a1];

end
```

Im abschließenden Schritt erfolgt die grafische Darstellung der platzierten Komponenten. Dafür wird eine eigene Plot-Funktion in einem separaten File (`b_PlotAIAA.m`) verwendet. Durch einen einfachen Schleifendurchlauf werden alle erstellten Objekte visualisiert:

```
for i=1:size(portablewaterTank,2)
    portablewaterTank(1,i).plot;
end
```

Durch den modularen Aufbau lassen sich dem Hauptskript gezielt Informationen übergeben und Objekte mit definierten Eigenschaften automatisiert im virtuellen Raum platzieren. Die Kombination aus objektorientierter Struktur, parametrischem Aufbau und Visualisierung in MATLAB bildet eine erste Grundlage, um Systemarchitekturen zu untersuchen und zu analysieren. Varianten können modelliert, strukturelle und funktionale Auswirkungen bewertet sowie unterschiedliche Szenarien simuliert werden. Auf diese Weise ermöglicht das Modell eine Bewertung von Designentscheidungen und unterstützt den Entwicklungsprozess.

### 3.4 Positionierung der Kabinenkomponenten

Das in MATLAB entwickelte Modell ermöglicht die visuelle Differenzierung der Kabinenelemente durch eine Farbzweisung. Die Abbildung zeigt eine vereinfachte, dreidimensionale Darstellung des Kabinenlayouts eines A320, wie es im Rahmen eines parametrischen Modells umgesetzt wurde (siehe Abbildung 15).

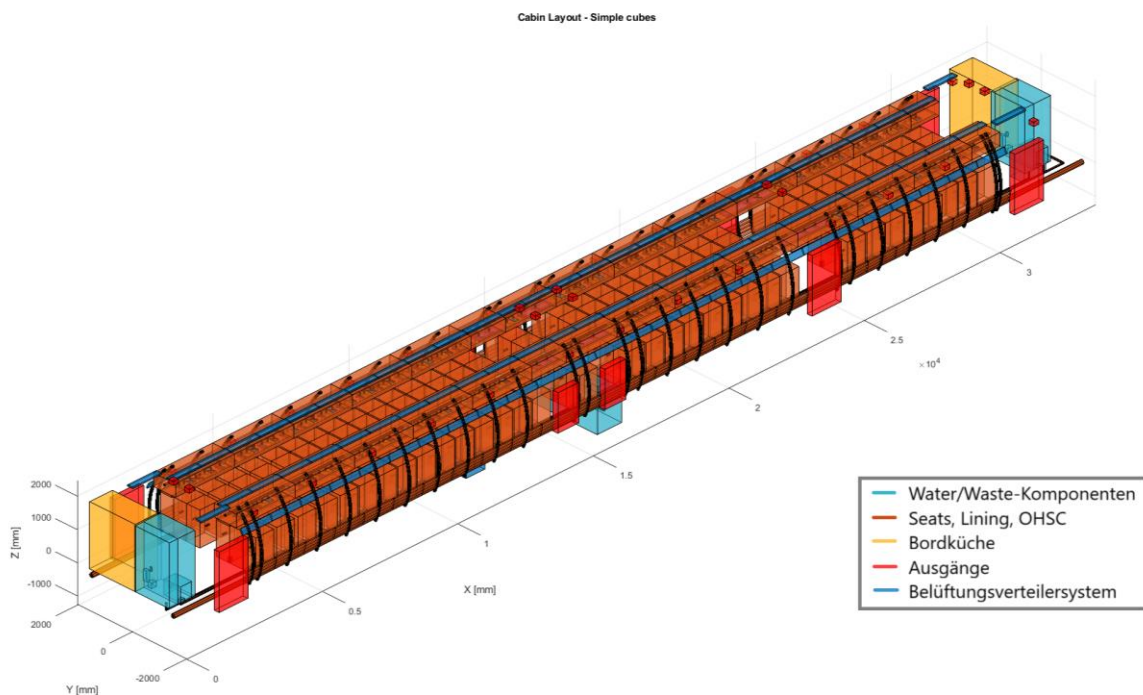


Abbildung 15: Cabin Layout A320 (MATLAB) als Quader

Ziel dieser Visualisierung ist es, die Platzierung und Struktur der verschiedenen Kabinenkomponenten so darzustellen, dass darauf aufbauend Analysen und Bewertungen möglich werden. Sie schafft damit eine Grundlage, um unterschiedliche Konfigurationen zu untersuchen, Varianten zu vergleichen und die Integration in virtuelle Umgebungen oder Simulationsmodelle zu unterstützen.

Die Visualisierung ist in einem kartesischen Koordinatensystem eingebettet, wobei die X-Achse die Längsrichtung des Flugzeugs, die Y-Achse die Querrichtung (Kabinenbreite) und die Z-Achse die Höhe darstellt. Alle Komponenten wurden in Form von farblich codierten Quadern modelliert, um eine klare Abgrenzung der funktionalen Bereiche zu ermöglichen.

Die einzelnen Kabinenelemente sind farblich wie folgt gekennzeichnet:

- Orange: steht für Sitze und Wandverkleidungen, sowie die Stauräume (Seats, OHSC & Lining). Diese Komponenten sind über den gesamten Rumpf gleichmäßig verteilt und bilden das Grundgerüst der Kabine.
- Hellblau: markiert die Komponenten des WWS, also die wasser- und abwasserbezogenen Einrichtungen wie Toiletten, Rohrsysteme, Ab- und Frischwassertanks. Diese befinden sich vorwiegend im vorderen und hinteren Bereich der Kabine.
- Dunkelblau: Das Belüftungssystem ist entlang des Rumpfes zu erkennen und hier mit den Komponenten riserducts, supplyducts und airoutlets dargestellt.
- Gelb: zeigt die Position der Bordküchen (Galley), die ebenfalls am Kabinenanfang und -ende angeordnet sind.
- Rot: kennzeichnet die Notausgänge (Exits), die beidseitig und über die gesamte Kabinenlänge hinweg verteilt sind.

Durch diese farbliche Codierung wird eine bessere Orientierung im Modell ermöglicht. Die Platzierung der Komponenten erfolgt parametrisch auf Basis von Daten aus einer CPACS-Datei. Änderungen an dieser Datei führen automatisch zu einer Anpassung der Anzahl und Anordnung der Systemkomponenten. Dadurch verändert sich die resultierende Systemarchitektur, ohne dass die zugrunde liegende Modelllogik neu aufgebaut werden muss. Dies ermöglicht Flexibilität und erleichtert die Anpassung an unterschiedliche Flugzeugkonfigurationen. Die zugrunde liegende Methodik schafft damit die Grundlage für die Auslegung,

Bewertung und Weiterentwicklung von Kabinensystemen, da sie Variationen erzeugt, deren Auswirkungen erkennbar macht und auf dieser Basis fundierte Designentscheidungen ermöglicht.

Innerhalb dieser Methodik wird das WWS integriert und visuell hervorgehoben. Die zugehörigen Komponenten (in hellblau) sind über Leitungen miteinander verbunden (siehe Abbildung 16). Diese Darstellung orientiert sich direkt an den Datensätzen des ATA-Kapitels 38, wodurch die funktionalen Verbindungen der einzelnen Komponenten, etwa zu Frisch- und Abwassertanks, realitätsnah abgebildet werden können.

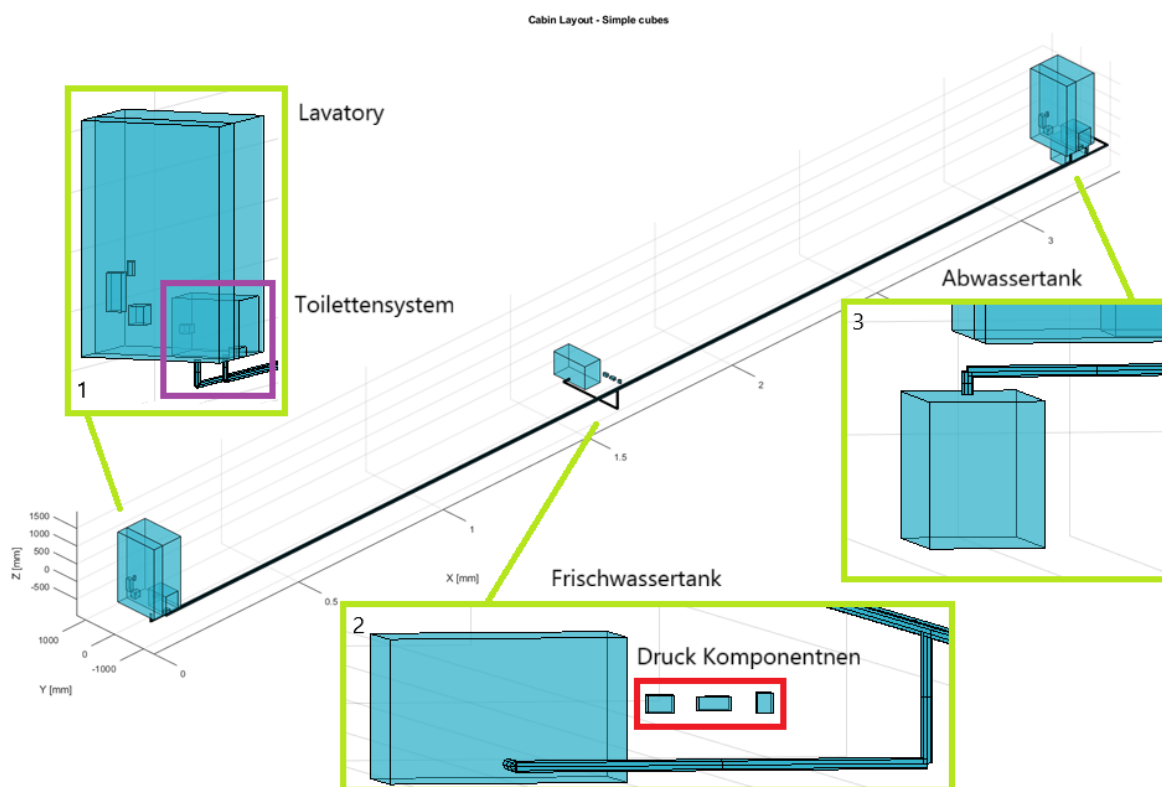


Abbildung 16: WWS in MATLAB

Die Komponenten des WWS sind innerhalb des Kabinenraums entsprechend ihrer realen Positionierung angeordnet. Im vorderen Bereich des Flugzeugs (vgl. Abbildung 16, linke Seite) befindet sich der erste Sanitärbereich (1). Der dort platzierte hellblaue Quader stellt die Lavatory-Einheit dar und ist in zwei Bereiche gegliedert: ein kleinerer Abschnitt, in dem sich das Waschbeckenelement befindet, und ein größerer Bereich, der den Bauraum für die komplette Sanitäranlage umfasst. Im Waschbereich sind unterhalb des Beckens ein Wasserheizer sowie diverse Ventilsysteme integriert. Direkt daneben, in lila markiert, sind die Toilettenschüssel sowie die zugehörigen Ventile angeordnet.

Ein weiterer Toilettenbereich ist im hinteren Flugzeugbereich (Abbildung 16, rechte Seite) untergebracht. Dieser ist baugleich zum vorderen Sanitärbereich und enthält identische Komponenten. Beide Lavatorys sind über ein Rohrsystem mit dem zentralen Abfalltank (3) verbunden, der sich im Heck des Flugzeugs befindet. Die Entsorgung erfolgt durch ein Vakuumsystem, das den Abfall von den Toiletten zum Tank transportiert.

Der Frischwassertank, der die Wasserversorgung für das gesamte System sicherstellt, befindet sich zentral im Flugzeugrumpf in der Nähe der rechten Tragflächenwurzel (siehe Abbildung 16, mittlerer Bereich). Durch ein Druckbeaufschlagungssystem wird das Wasser in die verschiedenen Leitungsabschnitte zu den Verbrauchspunkten (z. B. Lavatorys) gefördert. Die hierfür notwendigen Komponenten zur Druckerzeugung sind rot markiert (2), um ihre zentrale Funktion innerhalb des Systems visuell hervorzuheben.

### 3.5 Überführung der Komponenten in eine virtuelle Umgebung

In diesem Abschnitt werden die zuvor erstellten Kabinenkomponenten in die 3D-Software Blender übertragen. Ziel ist es, eine realitätsnahe Grundlage für die spätere Darstellung in einer virtuellen Realität zu schaffen.

#### 3.5.1 Datenexportprozess aus Matlab

Das bereits in Kapitel 3.3 erläuterte *Main-File* besitzt eine zentrale Rolle, da dieses den gesamten Prozess der Komponentenplatzierung steuert. Am Ende des Skripts wird mit dem Befehl *exportNew* eine Funktion abgerufen, die ein *Output-File* im XML-Format erzeugt. In dieser Datei sind alle gewonnenen Daten, unter anderem die Position der Komponenten, abgelegt.

Diese XML-Datei dient anschließend als Schnittstelle zwischen MATLAB und Blender. Sie ermöglicht es, die im MATLAB-Modell festgelegte Geometrie und Position der Bauteile direkt in Blender zu importieren. Dort können die Komponenten angeordnet und mit weiteren Details versehen werden. Durch diesen Prozess entsteht ein konsistenter Datenfluss von der parametrischen Modellierung über die Visualisierung bis hin zur virtuellen Anwendung. Die Funktion *exportNew()* dient nicht der Speicherung des gesamten Kabinenmodells, sondern exportiert lediglich die relevanten Ergebnisse und ausgewählten Daten, die für nachgelagerte Prozesse oder andere Domänen erforderlich sind. Dadurch wird sichergestellt, dass nur die für weitere Analysen, Modellierungsschritte oder Schnittstellen notwendigen Informationen bereitgestellt werden.

```
function exportNew()

global collection
global requirements
global links
global params
global dataPoints

docNode = com.mathworks.xml.XMLUtils.createDocument('cabin');

root = docNode.getDocumentElement;
root.setAttribute('version','2.0');

parameters = docNode.createElement('parameters');
root.appendChild(parameters);

paramKeys = fieldnames(params);

for i=1:length(paramKeys)
    if(isstruct(params.(string(paramKeys(i))))))
[...]
```

end

```
end

components = docNode.createElement('components');
root.appendChild(components);

collectionKeys = collection.keys;

for i=1:length(collectionKeys)
    tempKey = string(collectionKeys(i));
    tempObj = collection(tempKey);
    % disp(tempObj);
[...]
```

end

```
xmlwrite('output.xml',docNode);

end
```

Die genauen Abschnitte im dargestellten Code sind nur angedeutet und aus Platzgründen nicht vollständig ausgeführt. Entsprechende Stellen sind mit [...] gekennzeichnet.

Innerhalb der Funktion werden verschiedene globale Datenstrukturen verwendet, unter anderem *params*, *collection*, *links* und *requirements*. Diese enthalten jeweils Informationen zu Simulationsparametern, modellierten Komponenten, ihren Verbindungen sowie Systemanforderungen.

Zu Beginn der Funktion wird ein neues XML-Dokument mit dem Wurzelknoten `<cabin>` erstellt. Dieser Knoten erhält zusätzlich das Attribut *version* mit dem Wert „2.0“, um die Version der Datenstruktur zu kennzeichnen.

Nach der Initialisierung des XML-Dokuments wird zunächst der Abschnitt `<parameters>` erzeugt. In diesem Bereich werden alle in der globalen Struktur *params* gespeicherten Eingangsgrößen in XML-Form überführt. Die Funktion unterscheidet dabei zwischen einfachen Parametern und verschachtelten

Unterstrukturen. Enthält ein Feld innerhalb von *params* mehrere logisch zusammengehörige Werte, wird zunächst ein übergeordneter XML-Knoten für diese Gruppe erzeugt, beispielsweise `<cabin>` für kabinenbezogene Parameter. Innerhalb dieses Knotens werden anschließend die einzelnen Unterparameter als eigene XML-Tags mit ihren jeweiligen Werten eingefügt. Auf diese Weise entsteht eine hierarchische XML-Repräsentation, die zusammengehörige Parameter bündelt, anstatt sie als isolierte Einzelwerte zu exportieren.

Im nächsten Schritt wird ein weiterer Abschnitt mit dem Namen `<components>` erzeugt. In diesem werden die instanziierten Kabinenkomponenten aus der globalen Map *collection* erfasst. Diese Map enthält alle Objekte, die zuvor im Modell definiert und erstellt wurden. Die Funktion durchläuft alle Einträge der in der Map gespeicherten Objektinstanzen. Während der aktuellen Phase werden dabei nur die Objekte exportiert, die für die Analyse des WWS relevant sind. Dies geschieht durch eine Einschränkung während der Modellierungs- und Debuggingphase, um nicht benötigte Komponenten vorerst auszuklammern. Das Exportverfahren spiegelt somit den aktuellen Entwicklungsstand und konzentriert sich auf die relevanten Teilsysteme. Das betrifft beispielsweise Heizsysteme, Ventile oder Filtereinheiten. Im angegebenen Code wurde das Beispiel des *WaterTank* zur Veranschaulichung angegeben. Nur Objekte, die als eine dieser spezifischen Klassen instanziiert wurden, werden in die XML-Datei aufgenommen.

Für jedes dieser Objekte wird jeweils ein XML-Knoten `<component>` erzeugt. Darin werden zahlreiche Eigenschaften des Objekts festgehalten, darunter:

- Die ID
- Der Objekttyp (Klassenname)
- Der Name des Objekts
- Die geometrischen Dimensionen: Länge, Breite, Höhe
- Die Position im Raum (X, Y, Z)
- Weitere spezifische Merkmale wie Spezifikation (Spec), ATA-Kategorie, Material und Tag

Am Ende der Funktion wird das gesamte XML-Dokument mit dem Befehl `xmlwrite('output.xml',docNode)` in eine Datei namens *output.xml* geschrieben. Diese Datei enthält somit die gefilterten Parameter einschließlich technischer Informationen.

### 3.5.2 Datenschnittstelle zu Blender

Die Vorgehensweise zur Verarbeitung der zuvor exportierten Daten in Blender wird im Folgenden beschrieben. Ziel ist es, die vereinfachten Quader aus den MATLAB-Exporten durch detaillierte 3D-Modelle zu ersetzen. Hierzu wird ein Python-Skript namens *main.py* verwendet, dessen Aufbau im Folgenden erläutert wird. Es ist dem digitalen Anhang dieser Arbeit beigelegt.

Zu Beginn des Skripts werden alle erforderlichen Bibliotheken importiert. Dazu zählen Funktionen zur Verarbeitung von XML-Daten, die Blender-API, JSON-Funktionen sowie Systemzugriffe. Anschließend werden mögliche Kommandozeilenparameter ausgewertet, zum Beispiel zur Reduzierung der Polygonzahl oder zur Auswahl des Exportformats. Die Parameter werden über die übergebenen Argumente ermittelt, wobei das Ende der Argumentliste durch ein spezielles Trennsymbol gekennzeichnet ist.

Im nächsten Schritt liest das Skript die Konfigurationsdatei *config.json* sowie die aus MATLAB exportierte Datei *output.xml* ein. Die XML-Datei enthält alle positionsbezogenen Komponenteninformationen, während die JSON-Datei Zusatzinformationen bereitstellt, etwa den Geometriety (Cube oder FBX), Quellen für Meshes sowie optionale Transformationsparameter. Bei gesetztem Parameter für den Rumpf werden Kabinengeometrien aus der XML-Struktur ausgelesen und ein extrudierter Kreis als vereinfachter Flugzeugrumpf erzeugt. Abhängig von der XML-Versionsangabe unterscheidet das Skript zwischen unterschiedlichen XML-Strukturen und lädt die jeweils relevanten Einträge.

Für jede Komponente werden Typ, Abmessungen und Position ermittelt. Jedem Typ wird ein Eintrag aus der Konfigurationsdatei zugeordnet. Enthält dieser zusätzliche Bedingungen, werden diese geprüft und angewendet. Die JSON-Datei entscheidet dabei, ob ein Bauteil als Platzhalter oder über ein realistisches 3D-Modell im FBX-Format dargestellt wird. Bei Platzhalterobjekten werden Quader in Blender erzeugt, wobei Position und Dimensionen aus der XML-Datei übernommen und skaliert werden. Alternativ werden realistische 3D-Geometrien importiert und anhand der Positionsdaten korrekt platziert.

Optional können Reduktionsmodifikatoren zur Verringerung der Polygonanzahl aktiviert werden. Darüber hinaus können importierte Bauteile automatisch auf die im MATLAB-Modell berechneten Größen angepasst werden. Zusätzliche Rotationen und Verschiebungen, wie sie in der JSON-Datei hinterlegt sind, dienen dazu, Abweichungen zwischen generischer Geometrie und realem Maßstab auszugleichen.

Neben den Kabinenkomponenten werden auch Anforderungen und technische Datenpunkte visualisiert. Je nach Attribut werden hierfür verschiedene geometrische Grundformen wie Quader, Kugeln oder Kegel erzeugt. Diese Visualisierungen unterstützen die Analyse von Bauraum, Einbauzonen und Funktionspunkten. Abschließend wird die gesamte Szene in einem gängigen Format, entweder als FBX oder OBJ, exportiert, sodass die 3D-Daten für weitere Simulationen, Visualisierungen oder Präsentationen bereitstehen.

### 3.5.3 Import der Daten in Blender

Damit die Komponenten in Blender verwendet werden können, müssen ihre Modelle im Vorfeld als *.fbx*-Dateien bereitgestellt und im Verzeichnis „*fbx*“ abgelegt werden, sodass das *JSON*-Skript sie entsprechend zuordnen und einbinden kann. Das Verzeichnis dient in diesem Fall als eine 3D-Bibliothek aller vorkommenden Komponenten. Eine *.fbx*-Datei (Filmboxdatei) ist ein weit verbreitetes 3D-Dateiformat, das ursprünglich von Autodesk entwickelt wurde. Es ermöglicht den Austausch komplexer 3D-Inhalte wie Geometrien, Materialien, Texturen, Animationen und Kamerainformationen zwischen verschiedenen Softwareumgebungen, darunter insbesondere Programme zur 3D-Modellierung sowie Game-Engines wie Unity oder Unreal Engine (Unity Technologies ADSK, 2025). Aufgrund seiner Vielseitigkeit und Unterstützung zahlreicher Features eignet sich das *.fbx*-Format ideal für den Einsatz in virtuellen Umgebungen.

In dieser Arbeit sollen die *.fbx*-Dateien als detaillierte Repräsentationen der zuvor im *MATLAB*-Modell als vereinfachte Quader dargestellten Komponenten dienen (siehe Abbildung 17). Ziel ist es, den Detailgrad in der Darstellung innerhalb von Blender und später in der Virtuellen Realität zu erhöhen.

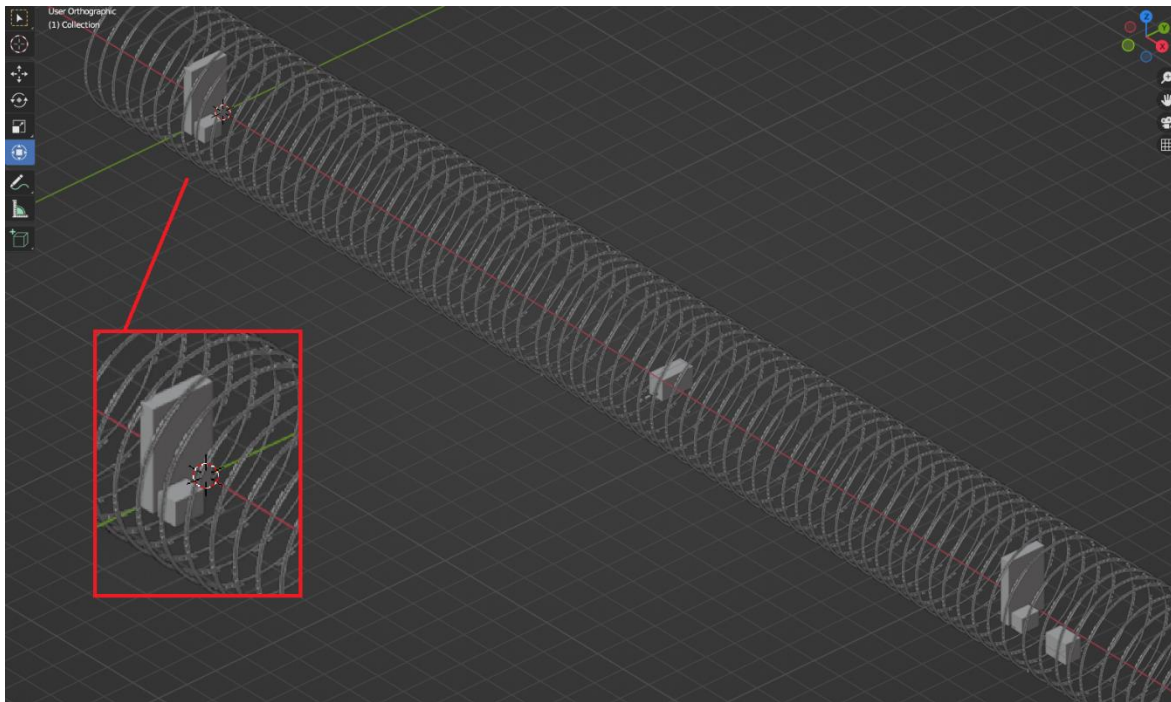


Abbildung 17: Quaderdarstellung der Komponenten in Blender

Für die platzgenaue Zuordnung und Platzierung dieser *.fbx*-Modelle in Blender wird eine separate Konfigurationsdatei mit dem Namen *config.json* verwendet. Diese Datei dient der Zuordnung der in der XML beschriebenen Komponenten zu den entsprechenden 3D-Modellen aus der hinterlegten Bibliothek. Darüber hinaus sind darin feste Anpassungswerte hinterlegt, die genutzt werden können, um aufgrund modellbedingter Abweichungen kleinere, manuelle Verschiebungen vorzunehmen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die importierten Objekte korrekt mit den über MATLAB erzeugten Daten verknüpft und im Modell positioniert werden. In dieser Konfigurationsdatei (*config.json*) findet also das Feintuning der Positionierung statt, hier am Beispiel des *Wassertanks*:

```
"WaterTank": {
  "default": {
    "meshType": "fbx",
    "adjustSize": true,
    "meshSource": "fbx/portablewaterTank.fbx",
    "transform": [
      {
        "transformType": "rotation",
        "rotationAxis": "Z",
        "rotationAngle": 0
      },
      {
        "transformType": "translation",
        "translationX": 0,
        "translationY": 0,
        "translationZ": 0
      }
    ]
  }
},
```

Die Transform-Parameter dienen nicht zur Platzierung der Kabinenkomponente, sondern definieren optionale Korrekturen für Rotation und Verschiebung des importierten Objekts. Somit wird die Anpassung geometrischer Abweichungen oder unterschiedlicher Koordinatenrichtungen der *.fbx*-Dateien ermöglicht, ohne die MATLAB-basierten Positionsdaten zu verändern.

In der Konfigurationsdatei ist der Wassertank als separates Objekt definiert, dessen visuelle Darstellung und Positionierung innerhalb der digitalen Umgebung festgelegt werden. Im vorliegenden Beispiel ist der Wassertank unter dem Eintrag „*WaterTank*“ geführt und mit der Kennzeichnung „*default*“ versehen. Hierbei wird angegeben, dass es sich um ein 3D-Modell im *.fbx*-Format handelt („*meshType: fbx*“). Die Option „*adjustSize: true*“ bewirkt, dass die Größe des Modells automatisch eingestellt wird, um sie an die vorgesehene Zielgröße, die aus der XML und aus der Berechnung in MATLAB kommt, anzupassen. Dies stellt sicher, dass das Modell unabhängig von seiner Ursprungsskala korrekt in die Umgebung eingefügt wird.

Als Quelle für das Modell dient die Datei „*portablewaterTank.fbx*“, die im Verzeichnis „*fbx/*“ abgelegt ist („*meshSource: fbx/portablewaterTank.fbx*“). Diese Datei soll die zuvor im MATLAB-Modell verwendete vereinfachte Quaderdarstellung ersetzen.

Zusätzlich enthält der Konfigurationseintrag zwei Transformationen: eine Rotation und eine Translation. Die Rotation ist um die Z-Achse definiert, wobei der Rotationswinkel für dieses Beispiel auf 0 Grad gesetzt ist („*rotationAxis: Z*“, „*rotationAngle: 0*“). Das bedeutet, dass das Modell in seiner ursprünglichen Orientierung dargestellt wird. In der Bibliothek wird jede Komponente nur einmal hinterlegt. Aufgrund der Spiegelachse bzw. Symmetrie im Flugzeug werden Komponenten, wie der OHSC oder die Lavatory entsprechend gespiegelt bzw. gedreht dargestellt.

Diese Definition ermöglicht bei Bedarf eine spätere Anpassung. Die Translation, also die Verschiebung des Modells im dreidimensionalen Raum, ist ebenfalls definiert, wobei die Werte für die X-, Y- und Z-Achse auf 0 gesetzt sind. Auch hier bleibt das Modell an seiner berechneten Position, kann jedoch bei Bedarf gezielt verschoben werden. Somit wird sichergestellt, dass das *.fbx*-Modell des Wassertanks korrekt geladen, skaliert und an der richtigen Stelle innerhalb der virtuellen Kabine platziert wird.

Anschließend wird über eine *Execute.bat*-Datei das *main.py*-Skript gestartet, das die Grundlage für die Übertragung der zuvor erarbeiteten Daten in die Blender-Umgebung bildet. Dieses Skript nutzt das zuvor erzeugte *output.xml*-File, in dem sämtliche Positions- und Bauraummaße der Kabinenkomponenten enthalten sind. Ergänzend dazu werden die Konfigurationsparameter aus der *config.json*-Datei in

das Skript eingelesen, um spezifische Einstellungen wie Skalierung, Rotation oder die Auswahl der 3D-Modelle zu berücksichtigen.

Die im Konfigurationsfile referenzierten *.fbx*-Dateien enthalten die detaillierten 3D-Geometrien der jeweiligen Komponenten und ersetzen die Quader aus dem MATLAB-Modell (siehe Abbildung 18).

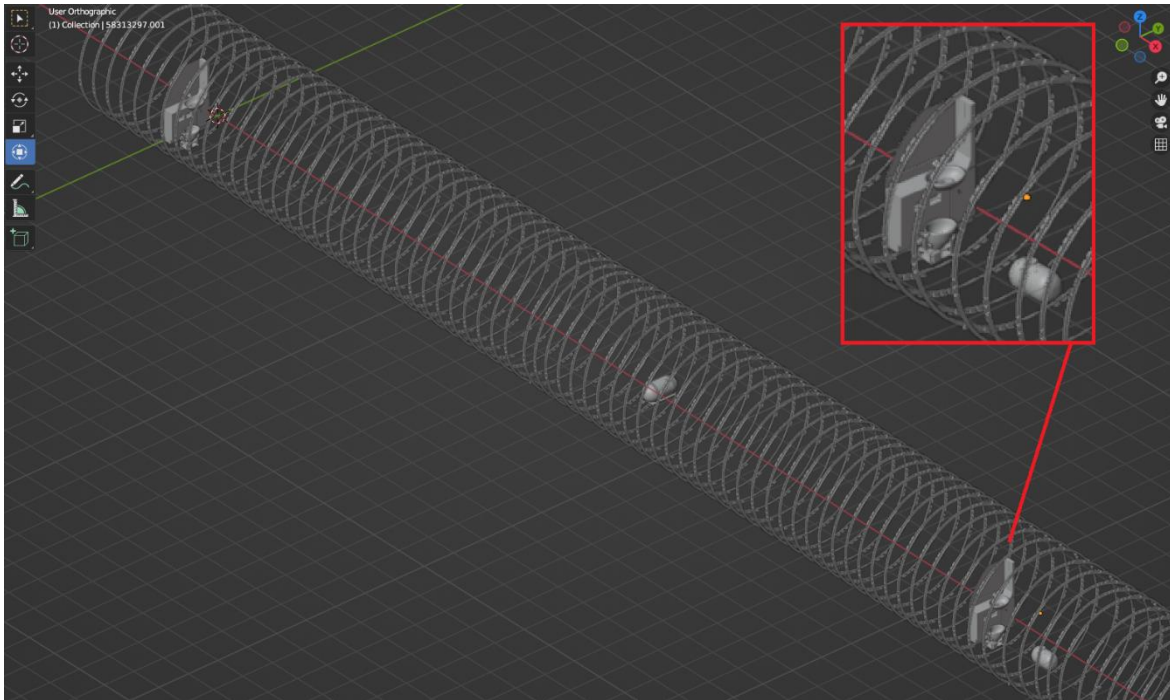


Abbildung 18: Detaillierte Modelldarstellung der Komponenten in Blender

Das *Python*-Skript (*main.py*) übernimmt dann die Aufgabe, diese *.fbx*-Modelle gemäß den definierten Parametern zu importieren, zu positionieren und auszurichten. Auf diese Weise wird eine realitätsnahe Darstellung des WWS innerhalb von Blender erzeugt, die sowohl für Visualisierungszwecke als auch für weiterführende Simulationen in der virtuellen Realität genutzt werden kann (siehe Abbildung 19).

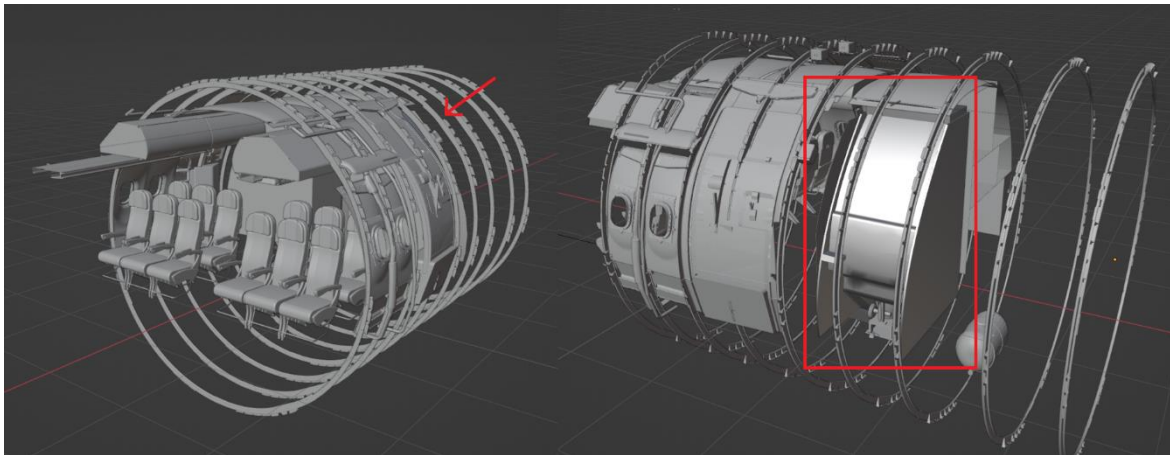


Abbildung 19: Rumpfausschnitt mit eingebauten Water/Waste-Komponenten

### 3.5.4 Erkundbare Darstellung in Unity

Nach dem Start des Programms und dem vollständigen Laden der Benutzeroberfläche zeigt sich zunächst die Struktur von Unity mit mehreren Ordnern und eingebundenen Plugins (siehe Abbildung 20, links). Diese enthalten vordefinierte Funktionalitäten, beispielsweise Ordner für Beleuchtung oder Oberflächenmaterialien. Die dort hinterlegten Eigenschaften werden beim Laden der Szene automatisch übernommen und den Objekten zugeordnet. So erhalten beispielsweise die Sitze direkt passende Texturen und Reflexionseigenschaften, ohne dass diese manuell angewendet werden müssen.

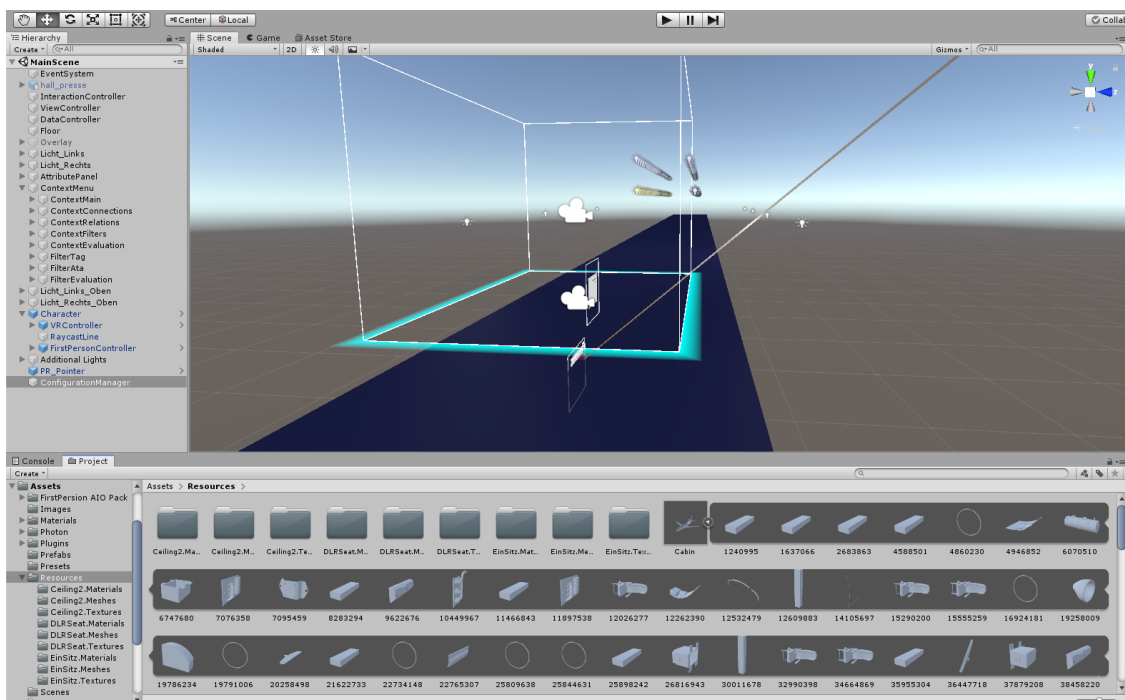


Abbildung 20: Benutzeroberfläche von Unity

Für die Darstellung der Kabine stehen zwei unterschiedliche Ansichts- und Navigationsmodi zur Verfügung. Der erste Modus ist der First Person Controller (FPC), ein Plugin, das den virtuellen Rundgang durch die Flugzeugkabine mithilfe eines VR-Headsets und Controllern ermöglicht. Über die Sensorik der Ausrüstung können Objekte in der Kabine direkt angewählt werden. Die Steuerung im VR-Raum ermöglicht dadurch ein immersives Erleben der Darstellung.

Der zweite Modus stellt eine eigens programmierte Benutzeroberfläche dar, die einem Videospiel aus der Ego-Perspektive gleicht. Die Bewegung erfolgt mithilfe der Tasten W, A, S, und D, während die Maus zur Orientierung in der Umgebung dient. Interaktionen mit Objekten können über ein zentriertes Fadenkreuz ausgeführt werden (siehe Abbildung 21). Zusätzlich kann über die M-Taste ein Menü aufgerufen werden, das weitere Funktionen bereitstellt. Dieser Darstellungsmodus dient einerseits dazu, Fehler (Bugfixing) ohne VR-Ausrüstung deutlich schneller beheben zu können, andererseits wird damit Nutzern ohne VR-System ein Zugang zur Umgebung ermöglicht.

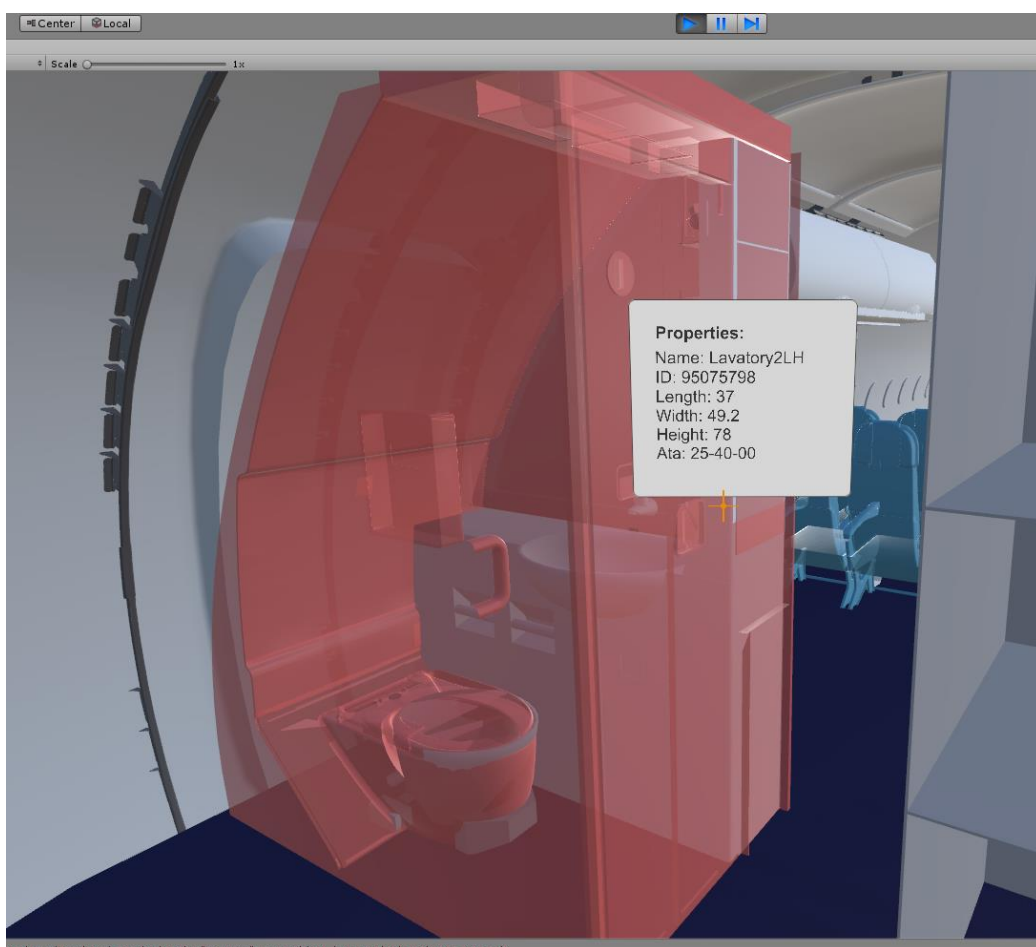


Abbildung 21: Lavatory in der VR mit Informationsausgabe

Das konkrete Vorgehen innerhalb der Software gestaltet sich wie folgt: Zunächst werden im Ordner *Resources* die benötigten Dateien abgelegt, darunter das mit Blender erstellte Kabinenmodell *Cabin.fbx* sowie die aus MATLAB exportierte *output.xml*. Danach wird Unity gestartet. Über den Play-Button am oberen Bildschirmrand wird die Simulation ausgeführt. Erst zu diesem Zeitpunkt lädt Unity das 3D-Modell vollständig in die Szene und bereitet es zur Interaktion vor. Objekte können anschließend über das Fadenkreuz (im Desktop-Modus) oder über den Laserpointer der VR-Controller angewählt werden. Diese leuchten bei der Erfassung blau (siehe Abbildung 22).

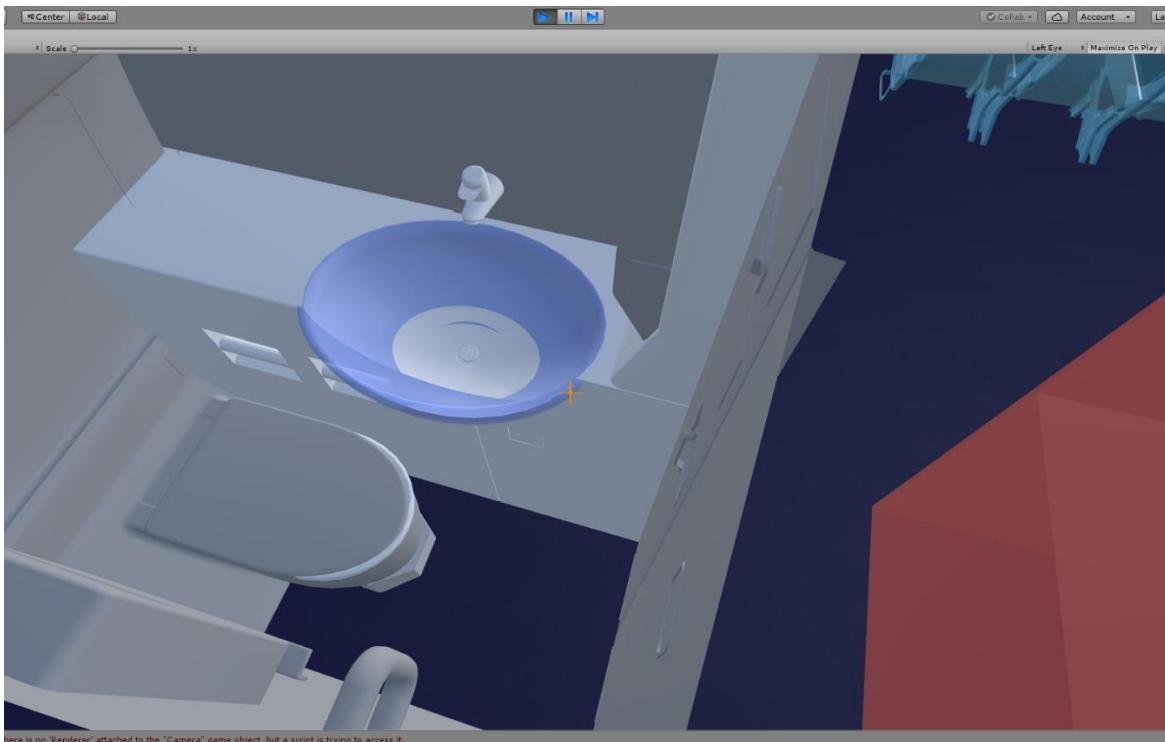


Abbildung 22: Anwählen eines Objekts in der VR

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 (siehe Abbildung 21).

## 4 Der Mensch als Einflussfaktor

Nachdem die technische Funktionsweise des WWS erläutert wurde, wird nun der Mensch als Nutzer betrachtet, sowie die Anforderungen an das System. Technische Kabinensysteme sind nicht nur funktionale Bestandteile des Flugzeugs, sondern erfüllen Aufgaben, die mit den physiologischen und hygienischen Anforderungen von Passagieren zusammenhängen (Konieczny, 2024). Für eine komfortable Nutzung des Flugzeugs müssen diese Systeme so gestaltet sein, dass sie die körperlichen Bedürfnisse des Menschen berücksichtigen und gleichzeitig die betrieblichen Rahmenbedingungen des Luftverkehrs einhalten.

Damit wird deutlich, dass die Gestaltung des WWS nicht ausschließlich eine technische Fragestellung darstellt, sondern auch von menschlichen Faktoren geprägt ist.

### 4.1 Berücksichtigung menschlicher Faktoren

Zur Erfassung der Anforderungen können etablierte Modelle aus den Human Factors herangezogen werden, die eine Verbindung zwischen den technischen Funktionen und den Erwartungen der Nutzer herstellen. Eine Grundlage zur Analyse stellt die Bedürfnispyramide nach Bubb (2007) und Maslow (1943) dar (zitiert nach Konieczny, 2024) (siehe Abbildung 23).

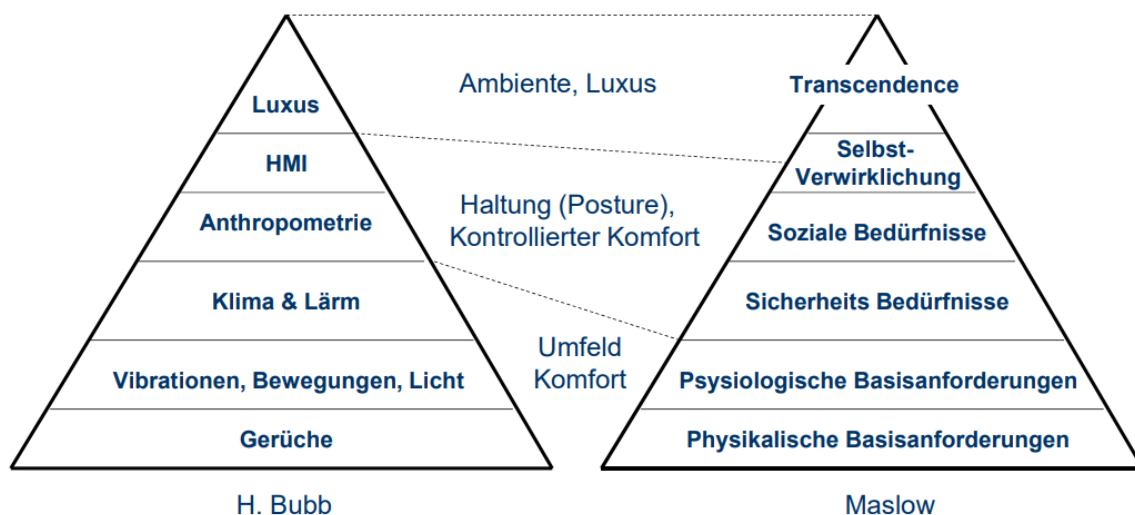


Abbildung 23: Bedürfnispyramiden nach Bubb und Maslow (Konieczny, 2024)

Die Abbildung (Abbildung 23) zeigt auf der linken Seite eine Pyramide nach Bubb, die die verschiedenen Ebenen von Komfort im Rahmen von Technik und Umwelt

beschreibt. Von unten nach oben werden die Einflussfaktoren Gerüche, Vibrationen, Bewegungen, Licht, Klima und Lärm betrachtet. Darauf folgen ergonomische Punkte wie Anthropometrie (Anpassung an Körpermaße) und Mensch-Maschine-Interaktion (human machine Interface, HMI). An der Spitze steht Luxus bzw. Komfortmerkmale, die über wesentliche Anforderungen hinausgehen.

Rechts ist dagegen die klassische Bedürfnispyramide nach Maslow zu sehen. Diese beginnt unten mit den Grundanforderungen wie Nahrung, Wasser, Schlaf und führt über soziale und Sicherheitsbedürfnisse hin zu Selbstverwirklichung und Transzendenz.

Physikalische Einflüsse der Pyramide nach Bubb, wie Gerüche oder Vibrationen, gleichen den physiologischen Bedürfnissen nach Maslow. Die Mensch-Maschine-Interaktion oder die ergonomische Anpassung stehen den sozialen und psychologischen Bedürfnissen gegenüber. Der Luxus an der Spitze kann mit den höheren Ebenen von Maslow gleichgesetzt werden.

Diese beiden Modelle zur Einteilung menschlicher Bedürfnisse in eine Rangfolge ermöglichen es die Bedeutung des WWS aus Nutzersicht besser zu verstehen. Am Beispiel dieses Systems in Flugzeugen werden auf der untersten Stufe der Pyramide die physiologischen Bedürfnisse dargestellt (siehe Abbildung 24), zu denen der Zugang zu funktionsfähigen Toiletten, die Möglichkeit des Händewaschens sowie die Verfügbarkeit von Trinkwasser zählen.

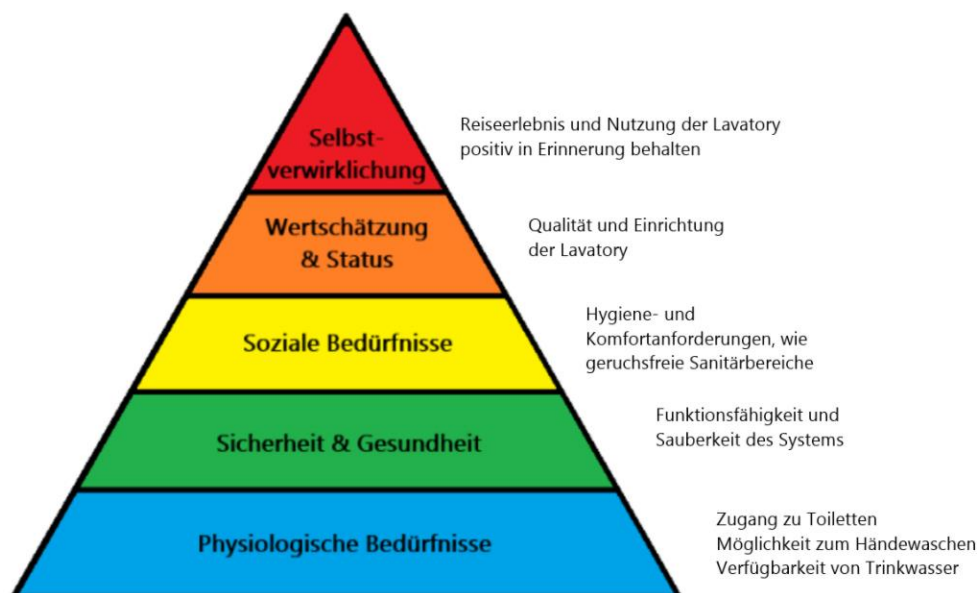


Abbildung 24: Bedürfnispyramide des WWS

Ohne diese Grundlage wäre eine Flugreise nicht möglich, ohne dass dabei die Gesundheit und das Wohlbefinden der Passagiere beeinträchtigt wird. Auf der

nächsten Stufe der Pyramide steht die Sicherheit im Fokus. Passagiere und Crew müssen sich darauf verlassen können, dass das WWS funktionsfähig und sauber bleibt damit keine Gesundheitsrisiken entstehen. Ein Ausfall würde nicht nur zu Unzufriedenheit führen oder den Betriebsablauf stören, sondern im schlimmsten Fall auch gesundheitlichen Problemen auslösen. Die nächste Pyramidenstufe ist die soziale Ebene mit Hygieneaspekten, die nicht nur Komfort bieten, sondern auch gesellschaftlichen Erwartungen entsprechen. Passagiere vergleichen Hygienestandards mit ihrem Alltag und anderen Airlines bzw. Anbietern. Saubere und geruchsfreie Sanitärbereiche sind somit ein Symbol für Normalität. Fehlfunktionen sollten also vermieden werden, um das Wohlbefinden der Passagiere sicher zu stellen und Konflikte zu vermeiden. Ebenso spielen Wertschätzung und Status eine Rolle. Die Qualität der Sanitärbereiche wird von den Passagieren auch auf die Airline an sich zurückgeführt. Gepflegte, hochwertige und komfortable Einrichtungen vermitteln das Gefühl, dass die Airline Bedürfnisse erfüllt, die über den Standard hinaus gehen. An der Spitze der Pyramide steht die Selbstverwirklichung. Für viele Reisende ist das Fliegen Teil eines größeren Reiseerlebnisses, das durch Komfort und Hygiene unterstützt wird und somit als positive Gesamterfahrung in Erinnerung bleibt.

Während Bubbs und Maslows Modell die hierarchische Struktur menschlicher Bedürfnisse betont, bietet das Kano-Modell (zitiert nach Konieczny, 2024) (siehe Abbildung 25) eine andere Betrachtung, wie unterschiedliche Arten von Anforderungen die Nutzerzufriedenheit beeinflussen.

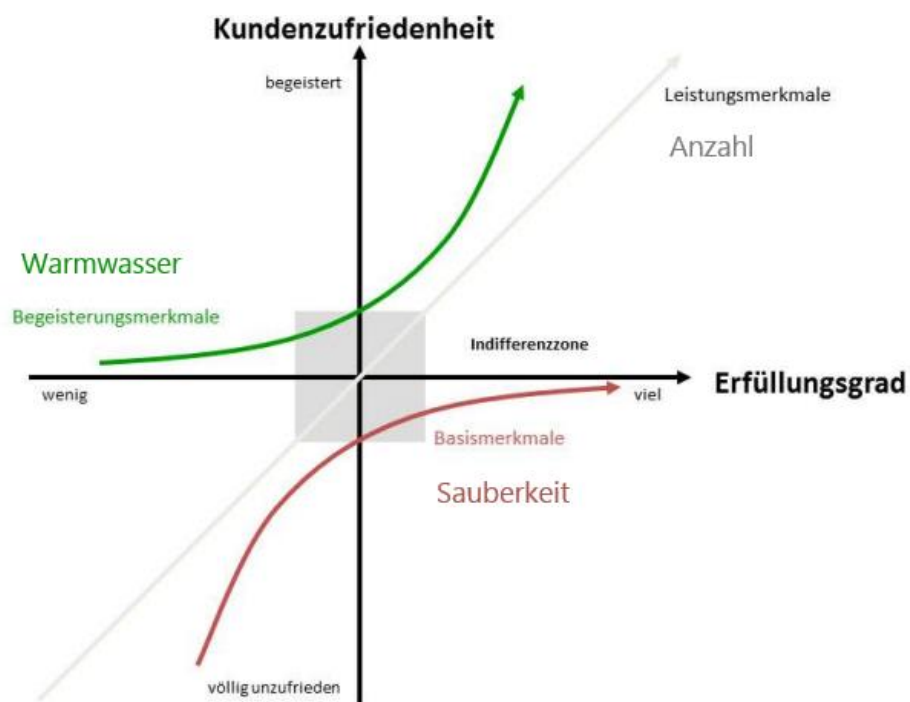


Abbildung 25: Kano-Modell (Konieczny, 2024)

Damit können im Rahmen des WWS Basismerkmale identifiziert werden. Hierzu zählen beispielsweise die Funktionsfähigkeit der Toiletten, die hygienische Sauberkeit des Wassers und die Vermeidung von unangenehmen Gerüchen (Koniczny, 2024). Diese Merkmale werden von den Passagieren als selbstverständlich vorausgesetzt. Das Fehlen von diesen würde zu starker Unzufriedenheit führen, die Erfüllung hingegen steigert die Zufriedenheit nicht aktiv, da sie als Mindestanforderung betrachtet werden.

Daneben gibt es die Leistungsmerkmale, deren Erfüllung im direkten Zusammenhang mit der wahrgenommenen Zufriedenheit steht. Zu diesen gehören beispielsweise eine hohe Sauberkeit, die schnelle Verfügbarkeit von Sanitärbereichen und eine ausreichende Anzahl an Toiletten. Je besser diese Anforderungen erfüllt sind, desto höher ist auch die Zufriedenheit des Nutzers (Koniczny, 2024).

Daneben gibt es die Begeisterungsmerkmale, die über den zu erwartenden Standard hinausgehen, wie Warmwasser, berührungslose Armaturen oder ansprechend gestaltete Sanitärbereiche. Diese Merkmale werden nicht zwingend gefordert, können allerdings bei Erfüllung zur Abhebung einer Airline von einer anderen beitragen (Koniczny, 2024).

Dieses Modell verdeutlicht, dass unterschiedliche Nutzer unterschiedliche Schwerpunkte in den Erwartungen an das System haben. Passagiere sind beispielsweise an Komfort, Hygiene und sozialer Normalität interessiert (Koniczny, 2024). Für die Kabinencrew steht mehr die Zuverlässigkeit des Systems im Vordergrund, da Ausfälle die Arbeitsbelastung erhöhen und das Verhältnis zu den Passagieren erschwert. Das Wartungs- und Bodenpersonal legt Wert auf eine robuste Bauweise, gute Zugänglichkeit und einfache Serviceprozesse, um die Standzeiten am Boden einzuhalten (Koniczny, 2025). Aus der Perspektive der Fluggesellschaft soll das System am besten zuverlässig funktionieren, gleichzeitig möglichst wenig Gewicht haben, sparsam mit Wasser umgehen und geringe Betriebskosten verursachen (Lutzer, 2024).

Aus diesen unterschiedlichen Perspektiven bzw. Anforderungen entstehen Zielkonflikte. Beispielsweise der Wunsch nach höherem Komfort steht im Widerspruch der Airlines, Gewicht zu reduzieren und dadurch Treibstoffkosten einzusparen (Koniczny, 2024). Die Bereitstellung von Warmwasser erfordert beispielsweise den Einsatz eines Heizers, der nicht nur zusätzliches Gewicht mit sich bringt, sondern aufgrund seiner Heizleistung auch den Energiebedarf erhöht. Ebenso kollidieren höhere Hygienestandards, die für Passagiere und Crew von hoher Bedeutung sind, mit den Anforderungen nach schneller und einfacher Wartung sowie geringen Betriebskosten (Lutzer, 2024). Ein Beispiel hier wären

berührungsfreie Armaturen, wie automatische Wasserhähne, die einen Hygienevorteil bieten, aber Sensoren beinhalten, die wartungsanfälliger sind.

Das WWS an Bord von Flugzeugen ist damit unmittelbar mit der Erfüllung menschlicher Bedürfnisse verknüpft. Von den physiologischen Grundanforderungen über sicherheitsbezogene und soziale Punkte bis hin zu Komfort- und Abgrenzungsmerkmalen wirkt dieses System auf das Reiseerlebnis ein. Die Herausforderung besteht darin, diese eben genannten Anforderungen und Nutzergruppen in Einklang zu bringen und damit ein Gleichgewicht zwischen Human Factors, ökonomischen Rahmenbedingungen und technischer Realisierung herzustellen.

## 4.2 Menschliche Anforderungen an das Water/Waste-System

Der Mensch benötigt regelmäßig Flüssigkeit sowie Nahrung und gibt gleichzeitig Stoffwechselprodukte ab. Während eines Fluges, gekennzeichnet durch trockene Kabinenluft (relative Luftfeuchtigkeit < 20%), eingeschränkte Bewegungsmöglichkeiten und zeitlich getakteten Service, treten diese Bedürfnisse besonders hervor (Konieczny, 2024). Der erhöhte Flüssigkeitsverlust durch trockene Luft führt zu verstärktem Durst und damit zu einer stärkeren Nutzung der Lavatories. Gleichzeitig werden Essens- und Trinkphasen durch feste Servicezeiten bestimmt, wodurch die Abgabe von Stoffwechselprodukten nicht individuell, sondern zeitlich konzentriert erfolgen kann (Tivig, et al., 2025). Die Anforderungen an das WWS hängen daher direkt mit den physiologischen Vorgängen wie Trinken, Essen, Händewaschen und Toilettengang zusammen.

Der Betrachtungsfall dieser Arbeit beschränkt sich auf den A320, welcher eine maximale Flugdauer von acht Stunden besitzt (Airbus, 2007). Im Folgenden werden Kurzstrecke (2 Stunden), Mittelstrecke (4 Stunden) und Langstrecke (8 Stunden) als Fallbeispiel herangezogen. Die dafür angenommenen Werte stammen aus Angaben von *Diehl Aviation* (Tivig, et al., 2025).

### 1. Kurzstreckenflug (ca. 2 Stunden)

Auf einem zweistündigen Flug ist die Beanspruchung für den menschlichen Körper gering. Viele Passagiere kommen ohne Toilettengang aus, besonders wenn sie vor dem Flug darauf geachtet haben. Dennoch wird Flüssigkeit aufgenommen durch Getränke oder den Bordservice. Typischerweise konsumiert ein Passagier auf so einem Flug 0,1 bis 0,2 L Flüssigkeit. Feste Nahrung spielt eine kleine Rolle, da sich der Konsum häufig auf Snacks beschränkt.

- Das WWS muss aufgrund von physiologischen Unterschieden wie Alter, Gesundheitszustand, Flüssigkeitsaufnahme für einen Teil der Passagiere die Toilettennutzung ermöglichen.
- Auch wenn wenige Passagiere die Lavatory in dieser Zeit nutzen, ist das Händewaschen nach der Toilettbenutzung notwendig, wodurch Frischwasser und Seife bereitgestellt werden müssen.
- Das Abwasseraufkommen ist insgesamt noch gering.

## **2. Mittelstreckenflug (ca. 4 Stunden)**

Bei vier Stunden Flugzeit steigt die Wahrscheinlichkeit von Toilettbesuchen deutlich an. Die Luftfeuchtigkeit in der Kabine sorgt für vermehrten Flüssigkeitsverlust über bspw. die Atmung, sodass der Flüssigkeitsbedarf höher ist als am Boden. Passagiere nehmen in diesem Zeitraum ca. 0,4 L Flüssigkeit zu sich. Häufig werden kleinere Mahlzeiten oder Snacks angeboten, die auf Dauer auch einen Toilettbesuch mit sich bringen.

- Geruchsneutralität und Hygiene werden wichtiger, da die Nutzung häufiger erfolgt.
- Abwasseraufkommen und feste Bestandteile steigen und müssen zuverlässig gesammelt werden.
- Das Reinigungssystem der Hände (Wasser, Seife, ggf. Trocknung) ist für die soziale Akzeptanz wichtig.

## **3. Langstreckenflug (bis zu 8 Stunden)**

Auf Langstrecken wird das WWS zu einem wichtigen Bestandteil der Aufrechterhaltung von Gesundheit und Komfort. In dieser Zeit nehmen Passagiere im Durchschnitt einen Liter Flüssigkeit zu sich, wobei Airlines aktiv Getränke anbieten, um der Dehydration entgegenzuwirken. Häufig werden ein bis zwei Mahlzeiten sowie Snacks serviert. Dies führt zu mehreren Toilettbesuchen pro Passagier. Damit steigt die Beanspruchung des Systems.

- Ausreichende Frisch- und Abwasserkapazität der Tanks, um die lange Flugzeit ohne Engpässe abzudecken.
- Verlässliche Funktion sämtlicher Toilett, da ein Ausfall zu Komfort- und Hygienemängeln führt.
- Geruchskontrolle, Geräuscharm und Sauberkeit werden bedeutsamer.
- Komfortmerkmale wie Warmwasser oder berührungslose Armaturen werden zunehmend von Passagieren erwartet.

Für Passagiere wird allgemein empfohlen, zur Vermeidung von Dehydration etwa 0,150 L Flüssigkeit pro Stunde zu sich zu nehmen (Tivig, et al., 2025). In der Praxis wird dieser Wert jedoch von den meisten Passagieren nicht erreicht.

#### 4.2.1 Vorbetrachtung der auftretenden Massen

Für die Berechnung des Wasserverbrauchs werden Parameter festgelegt, die von *Diehl Aviation* erhoben wurden.

- Ein Spülvorgang an der Toilette verbraucht etwa 0,150 L Wasser.
- Der Wasserhahn hat einen Verbrauch von 1,5 L pro Minute, wird jedoch typischerweise nur für ca. fünf Sekunden pro Benutzung verwendet, was einem Wasserverbrauch von 0,125 L entspricht.
- Die durchschnittliche Dauer eines Toilettengangs kann bei Vollbetrieb zwischen drei und fünf Minuten liegen, wobei nicht jeder Passagier den Wasserhahn verwendet.
- Die Urinproduktion eines Menschen beträgt ungefähr zwei Liter pro 24 Stunden.
- Die Blase fasst maximal rund 0,5 L, sodass mehrere Toilettengänge erforderlich sein können, um eine Flüssigkeitsmenge zu entsorgen.
- Zusätzlich wird angenommen, dass fester Abfall 250 g beträgt.

Ebenfalls werden folgende Annahmen festgelegt, um die ausgewählten Szenarien von zwei, vier und acht Stunden Flugzeit abbilden zu können.

##### **Annahmen und Parameter:**

- Kabine: 180 Sitze mit 90 % Auslastung, dies entspricht 162 Passagieren
- 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: abhängig von Flugdauer/Flüssigkeitsaufnahme:
  - 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 (Range low zu high): Anteil der Passagiere, die überhaupt gehen (U) und Voids/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

Diese Daten sind konservativ gewählt, um die Grenzfälle abdecken zu können. Sie entsprechen weniger der Realität, da beispielsweise auf einem zweistündigen Flug nur wenige Passagier die Sanitäranlagen an Bord nutzt. Allgemein wird eine gute Näherung an die anfallende Flüssigkeitsmenge mit folgender Gleichung beschrieben (Gleichung 1).

$$V_{Abgabe} = 0,2 L \cdot PAX \cdot t [h] \quad (1)$$

Mit

- $PAX$  = Anzahl Passagiere
- $t$  = Flugzeit in Stunden

Für die drei Flugzeiten ergeben sich in folgender Tabelle (siehe Tabelle 4) die folgenden Flüssigkeitsvolumen:

Tabelle 4: Flüssigkeitsabgabe nach Faustformel (162 PAX)

Flugdauer [h]	2	4	8
Volumen [L]	64,8	129,6	259,2

Aus den Interviews mit Fachexperten von *Diehl Aviation* ergab sich ein weiterer zu berücksichtigender Faktor, dass auf längeren Flugstrecken zusätzliche Wasserverbräuche entstehen. Einige Passagiere nutzen auf Langstreckenflügen die Möglichkeit, sich die Zähne zu putzen. Zudem bietet das Bordpersonal Getränke wie Kaffee an und es muss Frischwasser sowohl für die Crew als auch für Reinigungszwecke bereitgestellt werden. Hier wurden vereinfachte Annahmen getroffen, dass ab einer Flugzeit von vier Stunden 25 % der Passagiere ihre Zähne putzen und dafür zwei Hahnaktivierungen mit je 0,125 L benötigen. Ebenfalls

nehmen 35 % der Passagiere das Getränkeangebot an und bestellen ein Getränk mit 0,250 L Inhalt. Die Galley muss im laufenden Betrieb regelmäßig gereinigt werden, wofür ein Wasserverbrauch von zwei Litern pro Stunde vorgesehen ist. Zusätzlich steht dem Bordpersonal ein Liter Wasser pro Stunde zur eigenen Nutzung zur Verfügung. Diese Annahmen werden in der späteren Simulation aufgegriffen und mitverarbeitet.

#### 4.2.2 Vorbetrachtung der benötigten Energie

Im Kapitel 2.7 wurde die Funktionsweise des WWS thematisiert. Im Folgenden sind die Komponenten aufgeführt, die innerhalb dieses Systems arbeiten und Energie benötigen:

- Water Waste System Controller (WWSC)
- Toilettenventil
- Wasserhahnventil
- Vacuumgenerator (für niedrige Flughöhen)
- Wasserheizer (Warmwasser)

Der Water/Waste-System Controller bildet das Steuerungselement des gesamten Systems und ist für die Koordination der einzelnen Komponenten verantwortlich. Sein angenommener Energieverbrauch liegt bei ca. zehn Watt. Als Referenz für diese Schätzung diente ein Raspberry Pi, dessen Leistungsaufnahme im gleichen Bereich liegt und somit eine geeignete Grundlage für den Wert bietet (Raspberry Pi Foundation, 2025) (Anhang A2).

Das Toilettenventil benötigt eine Leistung von etwa 96 Watt (28 V und 3,45 A) (Anhang A3), um geöffnet zu werden und das Ventil des Wasserhahns 11 Watt (28 V und 0,4 A) (Anhang A4). Die Ansteuerungszeiten sind dabei kurz und betragen eine Sekunde beim Toilettenventil und fünf Sekunden beim Wasserhahnventil (Tivig, et al., 2025).

Die notwendige Unterdruckerzeugung im Toilettensystem erfolgt über einen Vacuumgenerator, der die erforderliche Druckdifferenz in geringeren Flughöhen bereitstellt (Lutzer, 2024). Dadurch wird sichergestellt, dass das Abwassersystem auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen zuverlässig funktioniert. Der Vacuumgenerator wird in allen untersuchten Szenarien für eine Dauer von einer Stunde pro Flug betrieben: 30 Minuten nach dem Start und 30 Minuten während des Sinkflugs mit einer Leistungsaufnahme von 250 Watt.

Für die Bereitstellung von Warmwasser kommt ein Heizer zum Einsatz (Anhang A5). Dieser erwärmt Wasser aus dem Frischwassertank von 18 °C auf 35 °C. Das erwärmte Wasser wird anschließend, je nach Nutzereinstellung, mit kaltem Frischwasser gemischt und gelangt so in der gewünschten Temperatur zum Passagier (Tivig, et al., 2025).

#### 4.2.3 Vorbetrachtung zu CO<sub>2</sub>-Emissionen und Betriebskosten

Während des Fluges entsteht die CO<sub>2</sub>-Belastung des WWS aus zwei unabhängigen Quellen. Zum einen aus der elektrischen Energie, die für die Steuerung, die Ventilbetätigungen, den Betrieb des Heizers und den Unterdruckgenerator benötigt wird und zum anderen aus der transportierten Masse des Wassers und Abwassers.

Um daraus den CO<sub>2</sub>-Ausstoß abzuleiten, wird berücksichtigt, dass elektrische Energie im Flugzeug aus dem Treibstoff der Triebwerke bzw. der Hilfsturbine (Auxiliary Power Unit, APU) erzeugt wird. Die Umrechnung erfolgt über den Wirkungsgrad des Generators und den unteren Heizwert (Lower Heating Value, LHV) des Kerosins (IPCC, 2016). Die benötigte elektrische Energie wird in eine Kerosinmasse umgerechnet, die wiederum mit dem CO<sub>2</sub>-Faktor pro verbranntem Kraftstoff multipliziert wird. Daraus entsteht der CO<sub>2</sub>-Beitrag des elektrischen Anteils.

Parallel dazu besitzt das System einen massebedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Da das Flugzeug zu Beginn des Fluges mit etwa 200 Litern Frischwasser startet und während des Fluges sowohl Frischwasser verbraucht als auch Abwasser sammelt, verändert sich die Bordmasse (Lutzer, 2024).

Für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist nicht der Anfangs- oder Endwert allein entscheidend, sondern die durchschnittlich transportierte Wassermasse über die gesamte Flugdauer. Diese mittlere Masse wird mit einem empirischen Faktor verknüpft, der angibt, wie viel zusätzliches Kerosin pro transportiertem Kilogramm und pro Flugstunde benötigt wird. Auch hier wird die resultierende Kraftstoffmasse mit dem gleichen CO<sub>2</sub>-Faktor multipliziert.

Die Gesamtemissionen ergeben sich schließlich aus der Summe der elektrischen und massebedingten CO<sub>2</sub>-Beiträge. Die Kosten des Systems werden analog aus der insgesamt erforderlichen Kraftstoffmasse berechnet, indem diese mit dem durchschnittlichen Kerosinpreis multipliziert wird. Die Kosten steigen daher proportional mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß und damit vor allem mit der transportierten Wasser- und Abwassermenge.

## 5 Entwicklung eines simulationsgestützten Modells

Für die Entwicklung eines simulationsgestützten Modells zur Auslegung des WWS wird zunächst eine erste Vorauslegung für den Airbus A320 durchgeführt. Ziel ist es dieses System ganzheitlich zu modellieren, zu analysieren und zu bewerten, abhängig von der Flugzeugkonfiguration. Dabei werden insbesondere Leistungsparameter wie Masse, Energie, aber auch Größen wie Personenanzahl, Flüssigkeitsbedarf sowie die Nutzung der Sanitäranlagen und die daraus resultierenden Abfallmengen berücksichtigt.

### 5.1 Beschreibung der angewandten Methodik

Das Simulationsmodell verfolgt den Ansatz den Einfluss von Passagiernutzung, Flugdauer und Systemparametern auf Wasserverbrauch, Energiebedarf sowie die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten abzubilden. Methodisch basiert der Ansatz auf einem parametrischen Simulationsmodell, das von nutzungsgetriebenen Eingangsgrößen zu physikalischen und energetischen Ausgangsgrößen führt.

Der methodische Gedanke beim Aufbau des Simulationsmodells ist, das reale System in funktionale Teilbereiche zu zerlegen, die jeweils definierte Ein- und Ausgangsgrößen besitzen. Das reale WWS berücksichtigt mehrere gekoppelte Einflüsse: Die Nutzung durch Passagiere, das Wasser- und Abfallmanagement, die elektrischen Verbraucher im System sowie die energieseitige Anbindung in das Flugzeug. Anstatt das System im Ganzen zu betrachten, wird es daher in aufeinander aufbauende Berechnungsschritte unterteilt (siehe Abbildung 26).

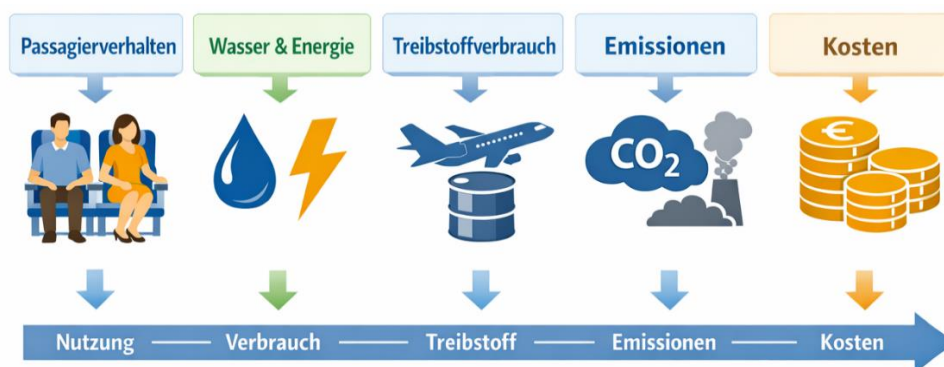


Abbildung 26: Bewertungskette des WWS

Methodisch beginnt das Modell auf der Nutzungsebene. Die Nutzung durch Passagiere wird nicht zeitkontinuierlich, sondern ereignisbasiert modelliert. Das bedeutet, dass Toilettengänge, Händewaschen oder andere Wasserentnahmen als eigenes Ereignis betrachtet werden. Diese Entscheidung wird bewusst getroffen, da die zugrunde liegenden Daten, wie beispielsweise der Anteil der Passagiere, die die Toilette benutzen oder die Anzahl der Nutzungen pro Passagier ebenfalls ereignisbasiert eingetragen werden können. Eine kontinuierliche zeitabhängige Modellierung wäre hier weder datengetrieben noch notwendig und würde den Modellaufwand ohne zusätzlichen Erkenntnisgewinn erhöhen.

Ausgehend von dieser Nutzungsebene werden Zählgrößen berechnet, etwa die Anzahl der Toilettengänge oder die Anzahl der Wasserhahnaktivierungen. Diese Größen stellen das erste Artefakt des Modells dar. Sie sind die Schnittstelle zwischen menschlichem Verhalten und technischer Systemreaktion. Methodisch ist dies ein wichtiger Schritt, da hier die nichttechnische Unsicherheit (Nutzerverhalten) in klar definierte Größen überführt wird.

Im nächsten Schritt wird aus diesen Zählgrößen der stoffliche Systemfluss abgeleitet. Das bedeutet, dass aus der Anzahl der Nutzungen konkrete Volumina an Frischwasser und Abwasser berechnet werden. Jede Nutzung führt zu einer bestimmten Menge Frischwasser, die entweder im Abfalltank gespeichert oder über Bord abgeführt wird. Gleichzeitig entstehen Abfallmengen, die im Abwassertank gesammelt werden. Die zugrunde liegende Methode ist eine klassische Bilanzierung, bei der alle relevanten Stoffströme erfasst und addiert werden. Sicherheitsreserven werden zusätzlich eingeführt, um reale Betriebsunsicherheiten abzubilden.

Das Modell ist an dieser Stelle parametrisch aufgebaut. Sämtliche Annahmen, wie Tankvolumina, Wasserverbrauch pro Nutzung, Passagieranzahl oder Sicherheitsaufschläge, sind nicht fest vorgeschrieben, sondern als veränderbare Parameter definiert. Dieser Ansatz erlaubt es, das Modell später ohne strukturelle Änderungen auf andere Flugzeugvarianten wie den A319 oder A321 zu übertragen. Die Parametrisierung ist damit ein methodisches Element, um Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit sicherzustellen.

Aufbauend auf den Wasser- und Abfallmengen wird im nächsten Schritt der Energiebedarf des Systems berechnet. Methodisch folgt dieser Teil dem Prinzip der komponentenbasierten Modellierung. Jede Komponente, die Energie verbraucht, wie die Ventile, der Heizer, die Steuereinheit oder der Unterdruckgenerator, wird als eigener Energieverbraucher betrachtet. Für jede Komponente wird separat ermittelt, wie oft sie aktiv wird und welche Leistung während dieser Aktivität aufgenommen

wird. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass der Gesamtenergiebedarf transparent aus physikalisch nachvollziehbaren Anteilen zusammengesetzt wird.

Besonders wichtig ist hierbei die Trennung zwischen Energie für Funktion, beispielsweise das Öffnen eines Ventils oder das Erwärmen von Wasser und Energie für Verluste, wie Wärmeabgabe des Heizers an die Umgebung. Methodisch folgt dies dem Ansatz der Energiebilanzierung, bei der sowohl Nutzenergie als auch Verlustenergie berücksichtigt werden. Dadurch wird vermieden, dass Verluste unkontrolliert in den Ergebnissen auftauchen. Gleichzeitig erlaubt diese Trennung eine realistische Bewertung der Effizienz.

Die elektrische Energie stellt jedoch nur eine Zwischenebene dar. Methodisch wird das Modell daher konsequent weitergeführt bis zur Primärenergieebene. Da elektrische Energie im Flugzeug aus Kerosin erzeugt wird, wird der elektrische Energiebedarf über Wirkungsgrade und Heizwerte in einen Kraftstoffverbrauch umgerechnet. Hier kommt der untere Heizwert des Kerosins zum Einsatz, da dieser den tatsächlich nutzbaren Energieinhalt beschreibt (Strauß, 2021). Diese Umrechnung ist notwendig, um den Energiebedarf des WWS mit anderen relevanten Verbrauchern vergleichen zu können.

Parallel zur elektrischen Energie wird auch die transportierte Masse des WWS berücksichtigt. Methodisch wird angenommen, dass jede zusätzlich mitgeführte Masse einen proportionalen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat. Das Modell verwendet hierfür eine vereinfachte, aber in der Vorentwurfsphase übliche lineare Relation zwischen transportierter Masse, Flugzeit und zusätzlichem Kerosinbedarf. Auch dieser Ansatz ist bewusst parametrisch gewählt, um je nach Genauigkeitsbedarf angepasst oder verfeinert werden zu können.

Die Zusammenführung von elektrischem Energiebedarf und massenbedingtem Zusatzverbrauch führt schließlich zur Bilanz des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Methodisch wird hier ein direkter Emissionsfaktor verwendet, der den Zusammenhang zwischen verbranntem Kerosin und ausgestoßenem CO<sub>2</sub> beschreibt. Zusätzlich werden die Kraftstoffkosten aus dem berechneten Kerosinverbrauch abgeleitet, um auch eine ökonomische Bewertung zu ermöglichen.

Der gesamte Modellaufbau folgt damit einer klaren kausalen Kette. Jede Ebene nutzt die Ergebnisse der vorherigen Ebene als Eingangsgröße. Methodisch handelt es sich um ein Simulationsmodell, nicht um eine Optimierung oder Regelung. Das Modell beantwortet somit die Frage „*Was passiert, wenn...?*“ und nicht „*Wie muss ich etwas einstellen, damit...?*“.

In Bezug auf die Programmierstruktur wird bewusst keine objektorientierte Programmierung eingesetzt. Stattdessen wird das Modell modular über Funktionen und Datencontainer aufgebaut. Das System soll transparent, leicht nachvollziehbar

und einfach anpassbar sein. Objektorientierung würde zwar zusätzliche Abstraktion ermöglichen, aber auch den Zugang für fachfremde Nutzer erschweren und ist für den gegebenen Rechenansatz nicht erforderlich.

Zusammenfassend basiert das Simulationsmodell methodisch auf Parametrisierung, funktionaler Zerlegung und physikalischer Bilanzierung. Es ist so aufgebaut, dass jeder Rechenschritt begründet, transparent nachvollziehbar und unabhängig überprüfbar ist. Dadurch eignet sich das Modell sowohl für erste Auslegungsabschätzungen als auch als Basis für spätere Verfeinerungen, Erweiterungen oder den Vergleich unterschiedlicher Flugzeugkonfigurationen.

## 5.2 Modellbeschreibung und mathematisches Vorgehen

Mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik wird ein Modell aufgebaut, mit dem das WWS von Single-Aisle-Konfigurationen abgebildet und analysiert werden kann. Für die drei Flugzeiten (2, 4 und 8 Stunden) wird zunächst das Nutzungsverhalten der Passagiere in den entsprechenden Wasserbedarf überführt. Auf dieser Grundlage wird der elektrische Energiebedarf der Systemkomponenten ermittelt. Anschließend werden sowohl dieser Energiebedarf als auch die mitgeführte Masse in einen Kerosinverbrauch umgerechnet, aus dem schließlich die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die zugehörigen Betriebskosten des WWS errechnet werden.

### 5.2.1 Grundaufbau der Methodik

Der methodische Ansatz dieser Arbeit verfolgt das Ziel, den Ressourcen-, Energie- und Emissionsbedarf des WWS entlang unterschiedlicher Nutzungsszenarien systematisch zu modellieren und zu bewerten. Grundlage bildet ein parametrisches Simulationsmodell, das auf definierten Eingangsgrößen basiert und reproduzierbare Aussagen für verschiedene Flugprofile ermöglicht. Der vollständige MATLAB-Code ist im Anhang (Anhang A6) dokumentiert, während im Folgenden die zugrunde liegende Methodik beschrieben wird.

Zu Beginn werden die relevanten Systemparameter festgelegt. Dazu zählen unter anderem Kabinenkonfiguration und Auslastung, Nutzungsannahmen der Passagiere, Tankkapazitäten sowie Kenngrößen für Energie, Kraftstoff und Emissionen. Diese Parameter werden thematisch unterteilt, um eine klare Trennung zwischen Konfiguration, Energiebedarf, Warmwasserbereitstellung und

ökologischer Bewertung zu gewährleisten. Auf dieser Basis lassen sich unterschiedliche Betriebsszenarien abbilden.

Die Anzahl der Passagiere ergibt sich aus der Sitzplatzkapazität und der angenommenen Auslastung (Gleichung 2).

$$Pax = Plätze \cdot Auslastung \quad (2)$$

Mit

- *Plätze* = maximale Sitzplatzanzahl
- *Auslastung* = genutzte Plätze in %

Für die Analyse werden mehrere Flugzeiten betrachtet, um Kurz-, Mittel- und Langstreckenprofile abzubilden. Die Berechnung erfolgt abhängig vom Szenario, sodass jede Flugzeit separat ausgewertet werden kann.

### 5.2.2 Methodik zur Abbildung der Toilettennutzung

Ein Teil der Methodik ist die Abbildung des Passagierverhaltens im Sanitärbereich. Hierfür werden Annahmen zum Anteil der Nutzer sowie zur Häufigkeit der Toilettennutzung getroffen, die sich mit zunehmender Flugzeit verändern (siehe Tabelle 5). Auf dieser Grundlage werden sowohl Low- als auch High-Cases berechnet, um eine Bandbreite realistischer Nutzungsszenarien abzudecken. Aus der Anzahl der Nutzungen werden anschließend die relevanten Stoffströme abgeleitet.

Tabelle 5: Angenommener Anteil an Nutzern und Nutzungen des WWS

Flugzeit	Anteil der Nutzer	Nutzungen pro Nutzer
2 h	15 - 30 %	1,0
4 h	45 - 60 %	1,2 - 1,8
8 h	75 - 90 %	2,0 - 2,5

Jeder Toilettengang wird dabei in mehrere funktionale Abläufe zerlegt, darunter Spülung (Gleichung 3), Händewaschen (Gleichung 4) sowie die Entstehung flüssiger (Gleichung 5) und fester Abfallstoffe (Gleichung 6):

- Spülung (0,150 L Frischwasser → Abfalltank)
- Händewaschen (80% der Nutzer mit 0,125 L pro Aktivierung → über Bord)
- Urin/Abfallstoffe (flüssig + evtl. fester Anteil → 0,25 L = 250 g → Abfalltank)

$$V_{Spül} = N_{voids} \cdot 0,150 \text{ L} \quad (3)$$

$$V_{Hand} = N_{voids} \cdot 0,8 \cdot 0,125 \text{ L} \quad (4)$$

$$V_{Urin} = N_{voids} \cdot v_{Urin,pro\ void} \text{ [L]} \quad (5)$$

$$V_{Fest} = Pax \cdot p_{Fest}(k) \cdot 0,250 \text{ L} \quad (6)$$

Mit

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

Diese Unterscheidung erlaubt es, Frisch- und Abfallwasser getrennt zu erfassen und realitätsnah zu bilanzieren. Zusätzlich wird ein Sicherheitsaufschlag von 10 % berücksichtigt, um reale Betriebsunsicherheiten abzubilden (Gleichung 7 & 8). Das Ergebnis sind flugzeit- und szenarienabhängige Volumina für Frischwasserverbrauch und Abfallaufkommen.

$$V_{Frisch} = (V_{Spül} + V_{Hand}) \cdot 1,1 \text{ [L]} \quad (7)$$

$$V_{Abfall} = (V_{Urin} + V_{Spül} + V_{Fest}) \cdot 1,1 \text{ [L]} \quad (8)$$

### 5.2.3 Modellierung zusätzlicher Frischwasserverbräuche

Neben dem Wasserbedarf durch die Toilettennutzung werden im Modell weitere Frischwasserverbräuche berücksichtigt, die für den Kabinenbetrieb relevant sind. Dazu zählen Zahnputzvorgänge auf längeren Flügen (Gleichung 9). Der Wasserbedarf der Galley umfasst sowohl die Bereitstellung von Heißgetränken (Gleichung 10), als auch Reinigungsprozesse (Gleichung 11). Ergänzend wird ein zeitabhängiger Frischwasserbedarf der Crew berücksichtigt (Gleichung 12). Diese zusätzlichen Verbräuche gehen vollständig in die Frischwasserbilanz ein, wirken sich jedoch nicht auf das Abfallvolumen aus, da das Wasser entweder konsumiert oder über alternative Entsorgungswege abgeführt wird.

- Zähneputzen: Nur auf längeren Flügen → 25 % der Passagiere putzen einmal Zähne → zusätzliche Hahnaktivierung
- Galley: 35 % der Passagiere nehmen ein Getränk, wie Tee oder Kaffee zu sich (0,25 L), Reinigung der Galley: 2 Liter pro Stunde
- Crew: 1 Liter pro Stunde zur freien Verfügung

$$V_{\text{Zähneputzen}} = N_{\text{Acts,Zähne}} \cdot 0,125 \text{ L} \quad (9)$$

$$V_{\text{Galley,Getränke}} = Pax \cdot 0,35 \cdot 0,25 \text{ L} \quad (10)$$

$$V_{\text{Galley,Reinigung}} = 2 \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot t \text{ [h]} \quad (11)$$

$$V_{\text{Crew}} = 1 \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot t \text{ [h]} \quad (12)$$

Mit

- $N_{\text{Acts,Zähne}}$  = Anzahl an Zahnputzvorgängen
- $t$  = Flugzeit in Stunden

### 5.2.4 Analyse der Gesamtverbräuche

Aus der Zusammenführung aller Teilverbräuche ergibt sich der gesamte Frischwasserbedarf pro Flugprofil (Gleichung 13), während das Abfallvolumen

ausschließlich aus der Sanitärnutzung resultiert. Auf diese Weise lassen sich die Anforderungen an Tankkapazitäten und deren zeitliche Entwicklung entlang des Fluges analysieren.

$$V_{Frisch,gesamt} = V_{Frisch} + V_{Zähneputzen} + V_{Galley} + V_{Crew} \quad (13)$$

### 5.2.5 Modellierung der elektrischen Energie

Darauf aufbauend wird der elektrische Energiebedarf des Systems betrachtet. Dieser ergibt sich aus mehreren funktionalen Komponenten, darunter der Steuereinheit (Gleichung 14), den Ventilen (Gleichung 15), der Unterdruckerzeugung für die Toilettenspülung (Gleichung 14), sowie der Warmwasserbereitstellung (Völker, 2022). Die benötigten Leistungen wurde den Datenblättern im Anhang entnommen (Anhang A2 bis A5) und jeweils für Low- und High-Case bestimmt. Ebenfalls wurde auf anfallende Verlustleistungen geachtet.

Bei der Energiebetrachtung sind folgende Komponenten zu berücksichtigen:

- Kontrolleinheit (Water/Waste System Controller)
- Ventile des Wasserhahns und der Toilette
- Energie des Unterdruckgenerators für die Toilettennutzung in geringen Flughöhen
- Heizer für die Nutzung von Warmwasser beim Händewaschen
- Heizverluste aufgrund von geringer Dämmung

$$E_{Komponente} = \frac{P [W] \cdot t [h]}{1000} [kWh] \quad (14)$$

$$E_{Ventile} = \frac{N \cdot P [W] \cdot S [s]}{3600 [s] \cdot 1000} [kWh] \quad (15)$$

Mit

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

Im nächsten Schritt wird die Warmwasserbereitstellung durch den Heizer betrachtet. Dazu wird zunächst bestimmt, welcher Anteil des Wasserverbrauchs auf Warmwasser anfällt, wobei angenommen wird, dass 70 % der Passagiere beim Händewaschen warmes Wasser verwenden (Gleichung 16).

$$V_{Warm} = N_{Hand} \cdot 0,7 \cdot 0,125 L \quad (16)$$

Mit

- $N_{Hand}$  = Anzahl Handwaschvorgänge

Die erforderliche Energiemenge zum Erwärmen des Wassers ergibt sich aus der notwendigen Temperaturerhöhung des Wassers sowie dessen spezifischer Wärmekapazität und dem Wirkungsgrad (Strauß, 2021). Unter der Annahme einer Wasserdichte von einem Kg pro Liter lässt sich daraus die benötigte Energie pro Liter Warmwasser bestimmen (Gleichung 17).

$$E_{Heizer} = \frac{cp \cdot \Delta T \cdot \rho}{\eta \cdot 3600} \cdot V_{Warm} [kWh] \quad (17)$$

Mit

- $cp$  = spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]
- $\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]
- $\rho$  = Dichte von Wasser [kg/L]
- $\eta$  = Wirkungsgrad

Der Energiebedarf wird nicht nur nutzungsabhängig erfasst, sondern auch um systembedingte Verluste ergänzt, beispielsweise durch Wärmeabgabe des Heizers durch Konvektion (Gleichung 18) und Strahlung (Gleichung 19) (Strauß, 2021). Dadurch wird eine realistische Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs ermöglicht.

$$Q_{Konvektion} = h \cdot A \cdot (T_{Heizer} - T_{Luft}) \quad (18)$$

$$Q_{Strahlung} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{Heizer}^4 - T_{Luft}^4) \quad (19)$$

$$Q_{Verlust} = Q_{Konvektion} + Q_{Strahlung} \quad (20)$$

Mit

- $h$  = Wärmeübergangskoeffizient [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
- $A$  = Wärmeübertragende Fläche [ $m^2$ ]
- $T_{Heizer}$  = Temperatur der Oberfläche [K]
- $T_{Luft}$  = Temperatur des umgebenden Fluids [K]
- $\varepsilon$  = Emissionsgrad der Oberfläche
- $\sigma$  = Stefan-Boltzmann-Konstante [ $W/(m^2 \cdot K^4)$ ]

Der Gesamtenergiebedarf setzt sich aus dem Bedarf der genannten Komponenten und den einhergehenden Verlusten zusammen (Gleichung 21).

$$E_{Total} = E_{Controller} + E_{Generator} + E_{Ventile} + E_{Heizer} + Q_{Verlust} [kWh] \quad (21)$$

### 5.2.6 Berechnungsansatz von Kerosinverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Im nächsten Schritt werden die energetischen und massenbezogenen Ergebnisse in betriebliche Auswirkungen überführt. Der elektrische Energiebedarf wird über Wirkungsgrade auf einen äquivalenten Kerosinbedarf zurückgeführt (Gleichung 22).

$$m_{Kerosin} = \frac{E_{Total}[kWh] \cdot 3,6 [MJ/kWh]}{\eta_{APU} \cdot LHV[MJ/kg]} \quad (22)$$

Mit

- $E_{total}$  = Anfallende elektrische Energie [kWh]
- $LHV$  = Lower Heating Value von Kerosin (Jet-A1) mit 43 [MJ/kg] (Shell International B.V., 2021)
- $\eta_{APU}$  = Wirkungsgrad der Hilfsturbine

Zusätzlich wird der Einfluss der transportierten Wasser- und Abfallmassen auf den Treibstoffverbrauch berücksichtigt. Hierzu wird ein mittleres Massenprofil über den Flugverlauf angenommen, das sowohl den Abbau von Frischwasser als auch den Aufbau von Abfallvolumen abbildet (Gleichung 23 bis 25). Es wird davon ausgegangen, dass zu Beginn des Fluges ein Frischwasservorrat von 200 L zur Verfügung steht, während der Abwassertank vollständig entleert ist.

$$\bar{V}_{Frisch} = 0,5 \cdot (200 \text{ L} + V_{Frisch}) \quad (23)$$

$$\bar{V}_{Abfall} = 0,5 \cdot V_{Abfall} \quad (24)$$

$$\bar{m} = \bar{V}_{Frisch} + \bar{V}_{Abfall} \quad (25)$$

Diese mittlere Masse wird anschließend unter der Annahme, dass für jedes kg Transportmasse ca. 0,03 kg Kerosin pro Flugstunde verbraucht wird, multipliziert (EUROCONTROL, 2022) (Gleichung 26).

$$m_{Kerosin} = \bar{m} \cdot 0,03 \cdot \frac{\text{kg Kerosin}}{\text{kg} \cdot \text{h}} \cdot t [\text{h}] \quad (26)$$

Auf Basis des ermittelten Kerosinbedarfs lassen sich schließlich die verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmen. Diese werden getrennt für energie- und massebedingte Anteile berechnet und anschließend zu einer Gesamtbilanz zusammengeführt.

Sowohl für den massenbedingten als auch für den energiebedingten Anteil wird angenommen, dass bei der Verbrennung von einem Kilogramm Kerosin etwa 3,15 kg CO<sub>2</sub> freigesetzt werden (EUROCONTROL, 2022) (Gleichung 27).

$$CO_2 = m_{Kerosin}[\text{kg}] \cdot 3,15 \quad (27)$$

### 5.2.7 Modellierung der Kosten durch Masse und Energie

Die Kosten ergeben sich, indem die benötigte Kerosinmenge mit einem durchschnittlichen Kraftstoffpreis von 0,8 € pro Kilogramm verknüpft wird (IATA, 2025b) (Gleichung 28).

$$Kosten = m_{Kerosin}[kg] \cdot 0,8 \frac{\text{€}}{kg} \quad (28)$$

Zusammenfassend stellt die Methodik eine durchgängige Bewertungsmöglichkeit dar, die vom Nutzungsverhalten der Passagiere über Wasser- und Energiebedarf bis hin zu Treibstoffverbrauch, Emissionen und Kosten reicht. Der entwickelte Ansatz ermöglicht es, unterschiedliche Nutzungsszenarien transparent zu vergleichen und liefert damit eine Grundlage für die frühe Auslegung und Optimierung von WWS in der Flugzeugkabine.

Die physikalischen Abhängigkeiten sind zur besseren Übersicht noch einmal tabellarisch aufgelistet (siehe Tabelle 6):

Tabelle 6: Übersicht physikalischer Abhängigkeiten für das WWS

Größe	Formel	Einheit	Bedeutung
Spülverbrauch	$0,150 \cdot N_{voids}$	L	Spülwasser pro Flug
Händewaschen	$0,125 \cdot 0,8 \cdot N_{voids}$	L	durchschnittl. Kalt-/Warmwasser
Abfallvolumen	$V_{Urin} + V_{Spül} + V_{Fest}$	L	zu speicherndes Abwasser
Energie Ventile	$P \cdot \frac{t}{3,6 \cdot 10^6}$	kWh	Umrechnung in [kWh]
Heizerenergie	$\frac{cp \cdot \Delta T \cdot \rho}{\eta \cdot 3600} \cdot Warmwasser$	kWh	Erwärmung von 18 °C auf 35 °C
CO <sub>2</sub> (elektr.)	$E_{Total} \cdot \frac{3,6}{\eta_{APU} \cdot LHV} \cdot 3,15$	kg CO <sub>2</sub>	Verursacht durch Stromverbrauch
CO <sub>2</sub> (Masse)	$\bar{m} \cdot 0,03 \cdot t \cdot 3,15$	kg CO <sub>2</sub>	Verursacht durch Transportmasse
Kosten	$m_{Kerosin} \cdot 0,8$	€	Kerosinkosten

### 5.3 Ergebnisse der Water/Waste-Simulation

Der vorliegende Anwendungsfall des WWS wird mithilfe der im vorherigen Kapitel beschriebenen methodischen Ansätze untersucht und bewertet. Auf Basis eines parametrisierbaren, simulationsgestützten Modells erfolgt die Analyse relevanter Systemgrößen wie Wasserverbrauch, Energiebedarf und resultierender Emissionen für unterschiedliche Flugzeiten. Die im Rahmen der Simulation ermittelten Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt und eingeordnet.

#### 5.3.1 Betrachtungsfall einer Flugzeit von zwei Stunden

Für das Szenario des zweistündigen Fluges liefert die Simulation einen Überblick über das Nutzungsverhalten, den Ressourcenverbrauch und die daraus resultierenden Umweltwirkungen des WWS. Die berechneten Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

*Tabelle 7: Ergebnisse des Zweistundenfluges*

Kategorie	Low-Case	High-Case	Einheit / Hinweis
Toilettennutzung (Voids)	24,30	48,60	Anzahl
Händewaschvorgänge	19,40	38,90	Anzahl
Warmwassernutzung (70 % HW)	1,70	3,40	Liter
Gesamt-Frischwassernutzung	26,86	33,54	Liter
Verbleibende Frischwasserreserven	173,10	166,50	Liter
Masse Frischwasser Ø	186,60	183,20	kg
Masse Abfall Ø	6,59	13,14	kg
Kerosinbedarf durch Masse	11,59	11,78	kg
Elektrischer Energiebedarf	0,32	0,37	kWh

<b>Kerosinbedarf durch Elektrik</b>	0,07	0,08	kg
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (Masse)</b>	36,51	37,11	kg CO <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (Elektrik)</b>	0,24	0,28	kg CO <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	36,75	37,39	kg CO <sub>2</sub>
<b>Treibstoffkosten</b>	9,33	9,49	€

Für eine zweistündige Flugzeit fällt der Verbrauch des WWS gering aus. Die Toilettennutzung liegt im Low-Case bei etwa 24,30 Vorgängen und kann im High-Case auf bis zu 48,60 steigen. Entsprechend ergeben sich zwischen 19,40 und 38,90 Händewaschvorgänge.

Aus diesen Nutzungszahlen ergibt sich ein Warmwasserbedarf von 1,70 Litern im Low-Case und 3,40 Litern im High-Case. Der Gesamtverbrauch an Frischwasser bleibt mit 26,80 bis 33,54 Litern sehr gering, wodurch über 166,50 Liter Frischwasserreserve im Tank verbleiben.

Auf die durchschnittliche Masse bezogen bedeutet das, dass am Ende des Fluges noch 186,60 kg bzw. 183,20 kg Frischwasser an Bord sind, während 6,59 bis 13,14 kg Abfallmasse anfallen. Da die Systemmasse einen direkten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch hat, entsteht ein zusätzlicher Kerosinbedarf von 11,59 kg im Low-Case und 11,78 kg im High-Case allein durch das mitgeführte Gewicht.

Hinzu kommt der elektrische Energiebedarf, der bei 0,32 kWh bzw. 0,37 kWh liegt. Die Erzeugung der Leistung führt zu einem zusätzlichen Kraftstoffbedarf von 0,07 bis 0,08 kg. Insgesamt verursacht das WWS somit CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 36,75 kg und 37,39 kg. Der elektrische Anteil bleibt mit 0,24 bis 0,28 kg nahezu vernachlässigbar und es fallen zusätzliche Treibstoffkosten in Höhe von 9,33 € bzw. 9,49 € an.

### 5.3.2 Betrachtungsfall einer Flugzeit von vier Stunden

Die Simulation für einen vierstündigen Flug zeigt gestiegene Verbrauchs- und Emissionswerte. Eine vollständige Übersicht der Ergebnisse ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 8: Ergebnisse des Vierstundenfluges

Kategorie	Low-Case	High-Case	Einheit / Hinweis
Toilettennutzung (Voids)	87,50	175,00	Anzahl
Händewaschvorgänge	70,00	140,00	Anzahl
Zähneputzvorgänge	81,00	81,00	Anzahl
Warmwassernutzung (70 % HW)	6,12	12,25	Liter
Gesamt-Frischwassernutzung	60,36	84,41	Liter
Verbleibende Frischwasserreserven	139,60	115,60	Liter
Masse Frischwasser Ø	169,80	157,80	kg
Masse Abfall Ø	22,92	47,45	kg
Kerosinbedarf durch Masse	23,13	24,63	kg
Elektrischer Energiebedarf	0,48	0,65	kWh
Kerosinbedarf durch Elektrik	0,11	0,16	kg
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Masse)	72,86	77,58	kg CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> -Emissionen (Elektrik)	0,36	0,49	kg CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> -Emissionen gesamt	73,21	78,08	kg CO <sub>2</sub>
Treibstoffkosten	18,59	19,83	€

Bei einer vierstündigen Flugzeit zeigt die Simulation einen moderaten, aber messbaren Wasser- und Energieverbrauch. Im Low-Case wird die Toilette 87,50 Mal genutzt, während im High-Case bis zu 175,00 Nutzungen auftreten. Damit verbunden sind zwischen 70,00 und 140,00 Händewaschvorgänge. Zusätzlich werden in beiden Szenarien 81,00 Zahnputzvorgänge berücksichtigt.

Der daraus resultierende Warmwasserbedarf liegt bei 6,12 Litern im Low-Case und 12,25 Litern im High-Case. Insgesamt werden 60,36 bis 84,41 Liter Frischwasser verbraucht. Somit verbleiben im Tank nach Flugende noch 139,64 Liter bzw. 115,59 Liter.

Mit zunehmender Nutzung der Lavatories verschiebt sich die durchschnittliche Massenverteilung im System. Die verbleibende Wassermasse sinkt auf 169,80 kg bzw. 157,80 kg, während die Abfallmasse auf 22,92 kg bzw. 47,45 kg ansteigt. Diese Masseveränderungen wirken sich direkt auf den Treibstoffbedarf aus. Für diese Flugzeit ergibt sich daraus ein zusätzlicher Kraftstoffbedarf von 23,13 kg im Low-Case und 24,63 kg im High-Case. Darüber hinaus fällt elektrischer Energiebedarf an, hauptsächlich durch den Heizer zur Warmwasserproduktion. Dieser liegt bei 0,48 kWh bzw. 0,65 kWh. Die Bereitstellung der elektrischen Energie führt zu einem Kerosinverbrauch von 0,11 kg bzw. 0,16 kg. Die Summe dieser Einflüsse führt zu zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 73,21 kg (Low-Case) und 78,08 kg (High-Case). Dadurch entstehen 18,59 € bzw. 19,83 € an Treibstoffkosten.

### 5.3.3 Betrachtungsfall einer Flugzeit von acht Stunden

Die Analyse des achtstündigen Fluges macht deutlich, wie der Ressourcenbedarf über die Zeit zunimmt. Die resultierenden Berechnungswerte sind in der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 9: Ergebnisse des Achtstundenfluges

Kategorie	Low-Case	High-Case	Einheit / Hinweis
Toilettennutzung (Voids)	243,00	364,50	Anzahl
Händewaschvorgänge	194,40	291,60	Anzahl
Zähneputzvorgänge	81,00	81,00	Anzahl
Warmwassernutzung (70 % HW)	17,01	25,52	Liter

<b>Gesamt-Frischwassernutzung</b>	115,12	148,54	Liter
<b>Verbleibende Frischwasserreserven</b>	84,90	51,50	Liter
<b>Masse Frischwasser Ø</b>	142,40	125,70	kg
<b>Masse Abfall Ø</b>	69,06	107,15	kg
<b>Kerosinbedarf durch Masse</b>	50,76	55,89	kg
<b>Elektrischer Energiebedarf</b>	0,84	1,08	kWh
<b>Kerosinbedarf durch Elektrik</b>	0,20	0,26	kg
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (Masse)</b>	159,89	176,05	kg CO <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (Elektrik)</b>	0,63	0,82	kg CO <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen gesamt</b>	160,52	176,87	kg CO <sub>2</sub>
<b>Treibstoffkosten</b>	40,77	44,92	€

Im Fall der achtstündigen Flugzeit zeigt die Simulation einen gesteigerten Wasser- und Energiebedarf gegenüber kürzeren Flügen. Im Low-Case nutzen die Passagiere die Toilette 243,00 Mal, während es im High-Case zu 364,50 Nutzungen kommt. Entsprechend ergeben sich beim Händewaschen zwischen 194,40 und 291,60 Hahnaktivierungen. Hinzu kommen 81,00 Vorgänge des Zähneputzens.

Es entsteht ein Warmwasserbedarf von 17,01 Litern im Low-Case und 25,52 Litern im High-Case. Der Gesamtverbrauch an Frischwasser liegt zwischen 115,12 Litern und 148,54 Litern, sodass sich die verbleibende Tankreserven bei 84,88 Litern bzw. 51,46 Litern befinden.

Die zunehmende Nutzung führt zu einer verbleibenden Masse des Frischwassers sowie einer steigenden Abfallmasse. Im Durchschnitt verbleiben 142,40 kg bzw. 125,70 kg Frischwasser an Bord. Gleichzeitig steigt die Abfallmasse auf 69,06 kg und bis zu 107,15 kg an. Durch die mitgeführte Systemmasse entsteht ein zusätzlicher Kerosinbedarf zwischen 50,76 kg im Low- und 55,89 kg im High-Case.

Der elektrische Bedarf liegt hier bei 0,84 kWh bzw. 1,08 kWh, was zu weiterem Verbrauch von 0,20 kg bzw. 0,26 kg führt. Insgesamt ergibt sich daraus ein zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 160,52 kg im Low-Case und 176,87 kg im High-Case. Dieser Ausstoß hat Mehrkosten an Treibstoff von 40,77 € bzw. 44,92 € zur Folge.

## 6 Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen eingeordnet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für das WWS bewertet. Dabei sind nicht nur die berechneten Systemmassen, der Energiebedarf sowie die daraus resultierenden Emissionen interessant, sondern auch deren Auswirkungen auf den Kabinenentwurf und den praktischen Einsatz im Flugzeug.

### 6.1 Analyse der anfallenden Systemmassen

Die Ergebnisse der Simulation werden als Balkendiagramm ausgegeben. Darin werden die leistungsbezogenen Größen für die angenommenen Flugzeiten dargestellt, beginnend mit den anfallenden Volumen (siehe Abbildung 27).

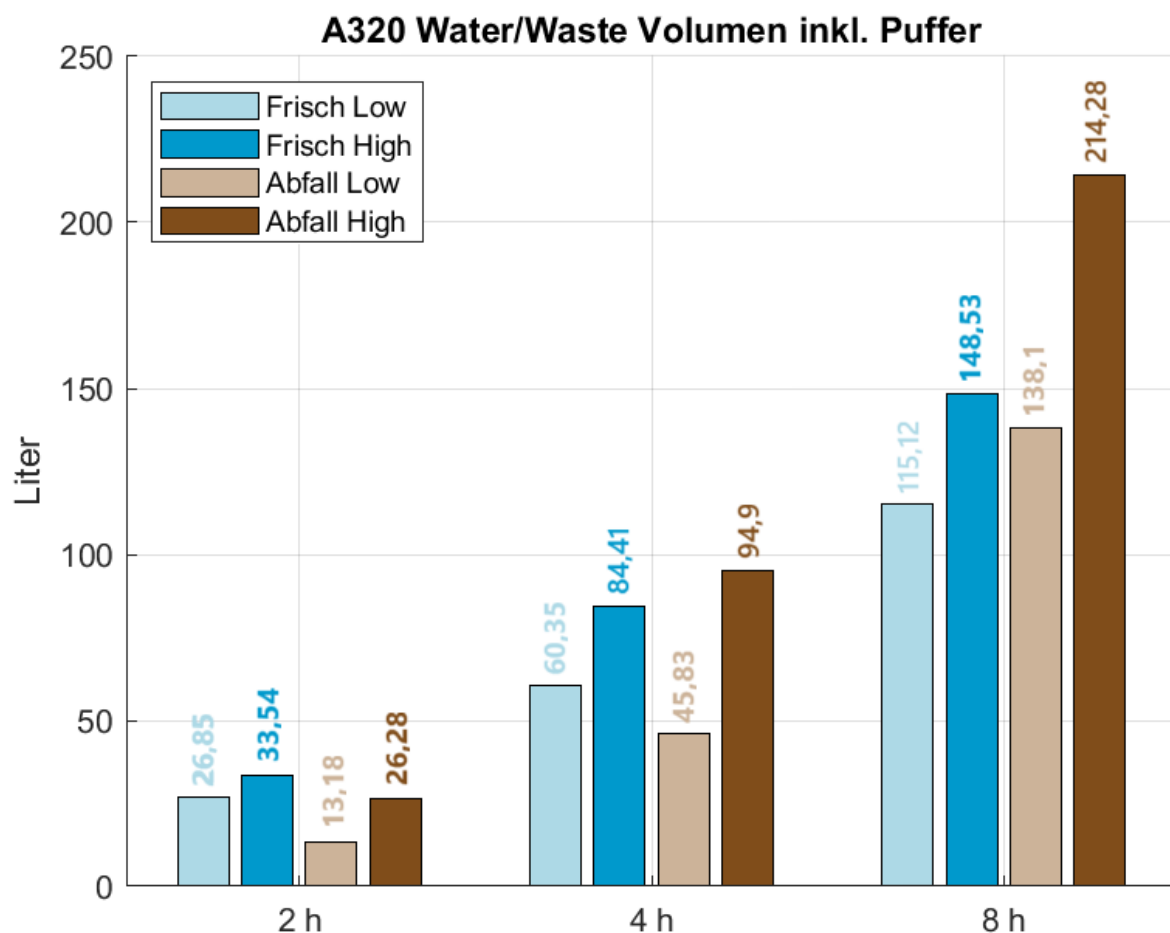


Abbildung 27: A320 Wasser- und Abfallvolumen des WWS

Das Balkendiagramm zeigt das Wasser- und Abfallvolumen des A320 für die gewählten Flugzeiten und die Entwicklung des Verbrauchs. Für jede Flugzeit

werden die Szenarien des Low- und High-Case betrachtet. Dabei stehen die hellblauen Balken für das verbrauchte Frischwasser im Low-Case, die dunkelblauen Balken für den Frischwasserverbrauch im High-Case, während die hellbraunen und dunkelbraunen Balken den Abfall im Low- bzw. High-Case beschreiben.

Das Diagramm stellt die am Flugende vorhandenen Gesamtvolumina einschließlich des 10 % Sicherheitsaufschlags dar. Diese Werte entsprechen nicht den vorher ermittelten mittleren Systemmassen, die für die Berechnung des zusätzlichen Kerosinverbrauchs herangezogen werden, da diese Berechnung von einer über die gesamte Flugzeit konstant angenommenen Masse ausgeht, sondern den tatsächlichen Endwerten.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Wasser- und Abfallbedarf in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer verändert. Aufgrund der geringen Nutzungsfrequenz und der vernachlässigbaren Menge an Abfall ergibt sich für den zweistündigen Flug eine niedrige Bilanz ohne Kapazitätsprobleme. Für eine Flugdauer von vier Stunden steigt die Nutzerzahl. Es bestehen jedoch nach wie vor gute Reserven, und auch im oberen Bereich der Annahmen bleiben beide Tanks unterhalb der Kapazitätsgrenzen von 200 Litern des Frischwassertanks und 180 Litern des Abwassertanks. Bei Langstreckenflügen mit einer Dauer von acht Stunden und entsprechend hoher Nutzung ergibt sich ein anderes Bild. Der Verbrauch an Frischwasser nimmt zu, bleibt jedoch innerhalb eines unkritischen Bereichs. Kritisch wird dagegen der Abfalltank, der im High-Case die typische Kapazität von 180 Litern überschreitet (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Massenvergleich von 2,4,8 Stunden Flugzeit

Flugzeit [h]	Frischwasser [L]	Abfall [L]	Tankcheck (Frisch/Abfall)
2	26,85 - 33,54	13,18 - 26,28	✓ / ✓
4	60,35 - 84,41	45,83 - 94,90	✓ / ✓
8	115,12 - 148,53	138,1 - 214,28	✓ / ⚠ (High)

Verantwortlich dafür ist die deutlich erhöhte Nutzungsfrequenz. Diese ergibt sich sowohl aus einem größeren Anteil von Passagieren, die die Sanitäranlagen nutzen, als auch aus einer höheren Anzahl von Toilettengängen pro Nutzer. Zusätzlich trägt der angenommene feste Abfallanteil zur Gesamtmenge des anfallenden Abwassers bei. Während der Low- Case noch innerhalb der zulässigen Grenzen bleibt, wird der

Tank im High-Case überlastet. In diesem Fall muss ein größerer Tank eingebaut werden, da es sonst zu Stau, Leckage oder Geruchsproblemen kommt. Ebenso könnte die Nutzung der Lavatories eingeschränkt oder vollständig gesperrt werden.

Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Überlaufs ist mit der Auslegung des High-Case verknüpft. Da dieser Fall bewusst konservativ gewählt ist und mehrere ungünstige Annahmen kombiniert (hohe Nutzungsraten, maximale Voids pro Nutzer, Sicherheitsaufschlag von 10 % sowie ein hoher Anteil fester Abfälle), stellt er weniger einen typischen Durchschnittsflug dar als vielmehr ein Worst-Case-Szenario. Entsprechend ist davon auszugehen, dass dieser Fall im regulären Flugbetrieb selten auftritt. Dennoch besitzt er eine Relevanz für die Systemauslegung, da in der Luftfahrt gefordert wird, dass Systeme auch unter plausiblen Belastungsbedingungen sicher funktionieren und keine kritischen Zustände erreichen. Darüber hinaus ist nicht auszuschließen, dass die tatsächliche Belastung in Einzelfällen sogar über die im Modell angesetzten Werte hinausgeht. Faktoren wie eine außergewöhnlich hohe Flüssigkeitsaufnahme, ein hoher Kinderanteil, medizinische Sonderfälle oder stark ausgelastete Flüge mit intensivem Kabinenservice können die Nutzung der Sanitäranlagen weiter erhöhen. Gleichzeitig wirken im realen Betrieb auch dämpfende Effekte. Nicht jeder Toilettengang führt zur maximalen Urinmenge, nicht jeder Nutzer verwendet den Wasserhahn und die Abläufe des Kabinen- und Servicepersonals variieren.

Aus dem Diagramm lässt sich somit ableiten, dass sowohl Frischwasser- als auch Abfallvolumen mit der Flugdauer steigen, jedoch nicht linear. Während bei kurzen Flügen die Differenz zwischen Verbrauch und Abfall moderat ausfällt, führt eine höhere Nutzung sowie eine längere Flugzeit zu einer Verschiebung. Das Abfallvolumen nimmt überproportional zu und übersteigt ab längeren Flugzeiten den Frischwasserverbrauch.

Hinzuzufügen ist, dass der A320 ein Mittelstreckenflugzeug ist und auf dieser Strecke auch mit 180 belegten Plätzen die Kapazitäten zur Verfügung stellen würde, damit die Nutzung der Sanitäranlagen reibungsfrei abläuft. Während die aktuelle Auslegung des WWS für den Einsatz im A320 als ausreichend bewertet werden kann, stößt sie bei einer Übertragung auf den A321XLR an ihre Grenzen. Das Langstreckenprofil des A321XLR führt zu deutlich längeren Einsatzzeiten des Systems, gleichzeitig erhöht sich durch die um bis zu 60 zusätzliche Passagiere die Nutzungsintensität (Airbus, 2007). In dieser Konfiguration würde die bestehende Dimensionierung voraussichtlich nicht mehr alle betrieblichen Anforderungen erfüllen und müsste unter Berücksichtigung der geänderten Rahmenbedingungen sowie der abweichenden Systemarchitektur des A321XLR angepasst werden.

Eine naheliegende Schlussfolgerung wäre, das WWS abhängig von der Flugdistanz auszulegen, beispielsweise mit kleineren Tanks für Kurzstreckenflugzeuge und größeren Tanks für Langstreckeneinsätze. In der Praxis werden Flugzeuge jedoch von Airlines flexibel auf unterschiedlich langen Strecken eingesetzt. Eine streckenspezifische Auslegung würde diese Flexibilität einschränken und zusätzlichen wirtschaftlichen Aufwand verursachen, etwa durch Umbauten, Variantenvielfalt oder höhere Wartungsarbeiten. Zwar könnten kleinere Tanks auf Kurzstrecken zu Gewichts- und Verbrauchsvorteilen führen, diese Vorteile stehen jedoch einer geringeren Flexibilität und höheren Systemkosten gegenüber.

Damit bestätigt sich der Nutzen eines parametrischen Simulationsmodells. Anstatt ein fest ausgelegtes System zu betrachten, kann die Tankgröße als freier Parameter in das Modell integriert werden. Dadurch lässt sich untersuchen, welche Tankdimensionen erforderlich sind, um unterschiedliche Einsatzprofile zuverlässig abzudecken und wie sich Änderungen der Systemauslegung auswirken.

## **6.2 Analyse des Energieverbrauchs**

Der Energiebedarf des WWS im A320 für die Flugzeiten wird als nächstes ausgegeben (siehe Abbildung 28). Betrachtet wird nur der elektrische Verbrauch ohne Heizsystem für Warmwasser und Generator zur Unterdruckerzeugung. Diese Komponenten sind nicht im Balkendiagramm der Abbildung enthalten, um die geringen Verbrauchswerte der Steuer- und Aktorkomponenten hervorzuheben.

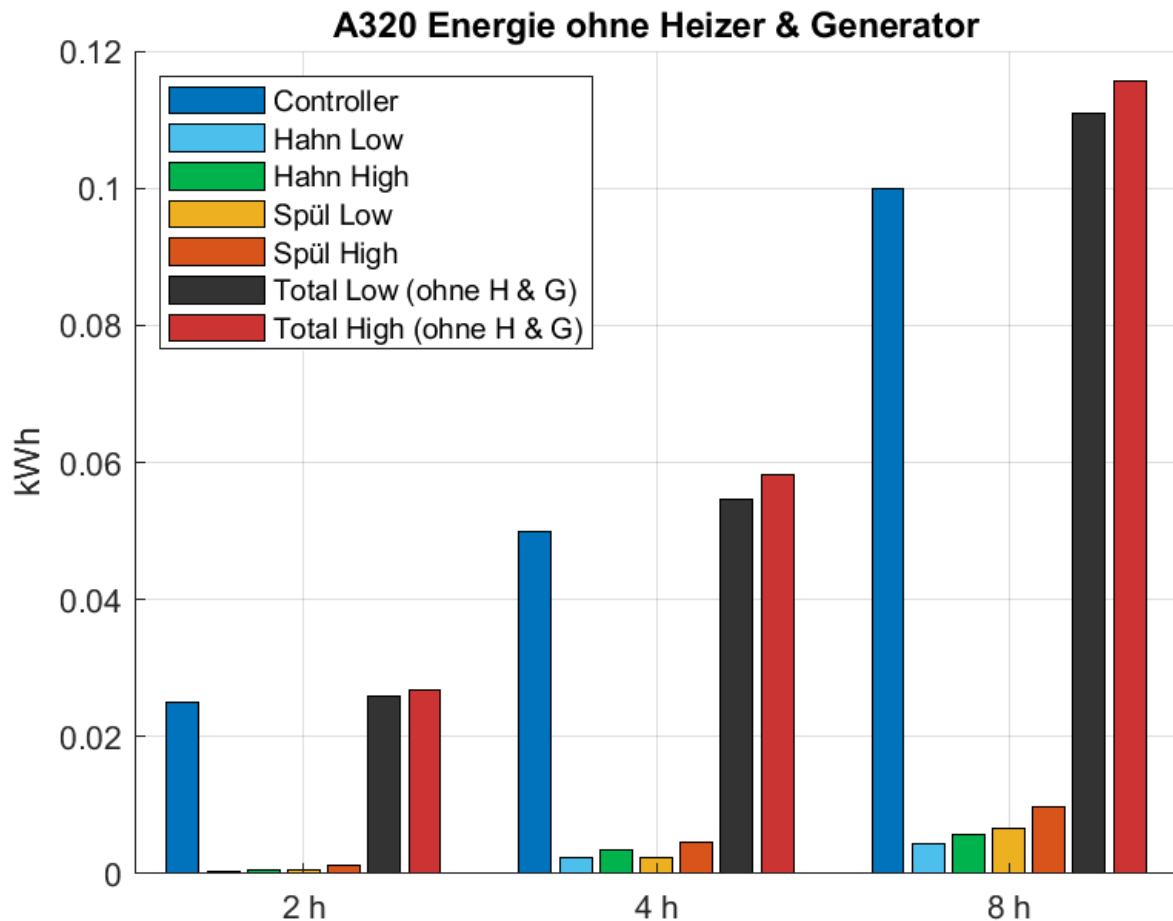


Abbildung 28: A320 Energiebedarf des WWS ohne Heizer und Generator

Darunter fällt der Verbrauch des Controllers (dunkelblau), der Wasserhahnventile (hellblau & grün) sowie der Spülventile (gelb & orange) im Low- und High-Case. Zusätzlich wird die Gesamtenergie ohne Heizer- und Generatorenergie für beide Szenarien dargestellt (schwarz & rot).

Bereits bei einem zweistündigen Flug wird deutlich, dass der Controller den größten Anteil an Energie benötigt. Die Spülvorgänge der Toilette tragen einen kleinen Anteil bei, bleiben im Low-Case jedoch auf einem niedrigen Niveau. Im High-Case steigt ihr Verbrauch an, bleibt allerdings weiterhin unterhalb des Controllers. Die Aktivierungen der Wasserhähne haben den geringsten Energiebedarf und liegen im Vergleich zu den anderen Komponenten im kaum wahrnehmbaren Bereich.

Mit zunehmender Flugdauer wächst der Energiebedarf proportional zur Nutzung. Der Controller behält weiterhin die Rolle der energieaufwendigsten Komponente und zeigt den deutlichsten Zuwachs. Auch die Nutzung vom Wasserhahn nimmt zu, besonders im High-Case, was auf die höhere Passagieraktivität hindeutet. Die Spülvorgänge steigen relativ zur Flugzeit und zeigen einen sehr ähnlichen Energiebedarf wie die Handwaschvorgänge.

Während der Energiebedarf bei Kurz- und Mittelstrecken moderat bleibt, nimmt er bei Langstreckenflügen deutlich zu. Der Controller erreicht wieder den größten Verbrauchswert, gefolgt von den Spülvorgängen. Die Wasserhahnaktivierungen steigen ebenfalls an, bleiben aber im Gesamtbild am kleinsten. Die Werte summieren sich auf, was den Effekt längerer Flugzeiten und höherer Nutzungsintensität unterstreicht.

Der Controller übernimmt die Überwachung und Steuerung des Wasser- und Abwassersystems (Lutzer, 2024). Dabei werden Sensorinformationen erfasst und Aktoren wie Spül-, Hahn- und Abwasserventile angesteuert. Ebenfalls ist er in die Borddiagnose eingebunden und stellt Status- und Fehlermeldungen für Crew und Wartung bereit (Tivig, et al., 2025). Der vergleichsweise konstante Energiebedarf entsteht dadurch, dass der Controller kontinuierlich aktiv ist und nicht nur bei einer Interaktion mit dem System. Er arbeitet typischerweise im Dauerbetrieb, um jederzeit Zustände überwachen und sicherheitsrelevante Funktionen ausführen zu können. Ein vollständiges Abschalten ist aus Sicherheitsgründen unüblich (Lutzer, 2024).

Während das erste Diagramm (siehe Abbildung 28) die Unterschiede zwischen den Komponenten zeigt und besonders die Werte des Controllers darstellt, zeigt der zweite Ausschnitt (siehe Abbildung 29) die gleichen Daten, jedoch mit größerem Fokus auf die restlichen Komponenten. Dadurch werden die kleinen Anteile der benötigten Energie sichtbar, die im ersten Diagramm kaum wahrnehmbar sind.

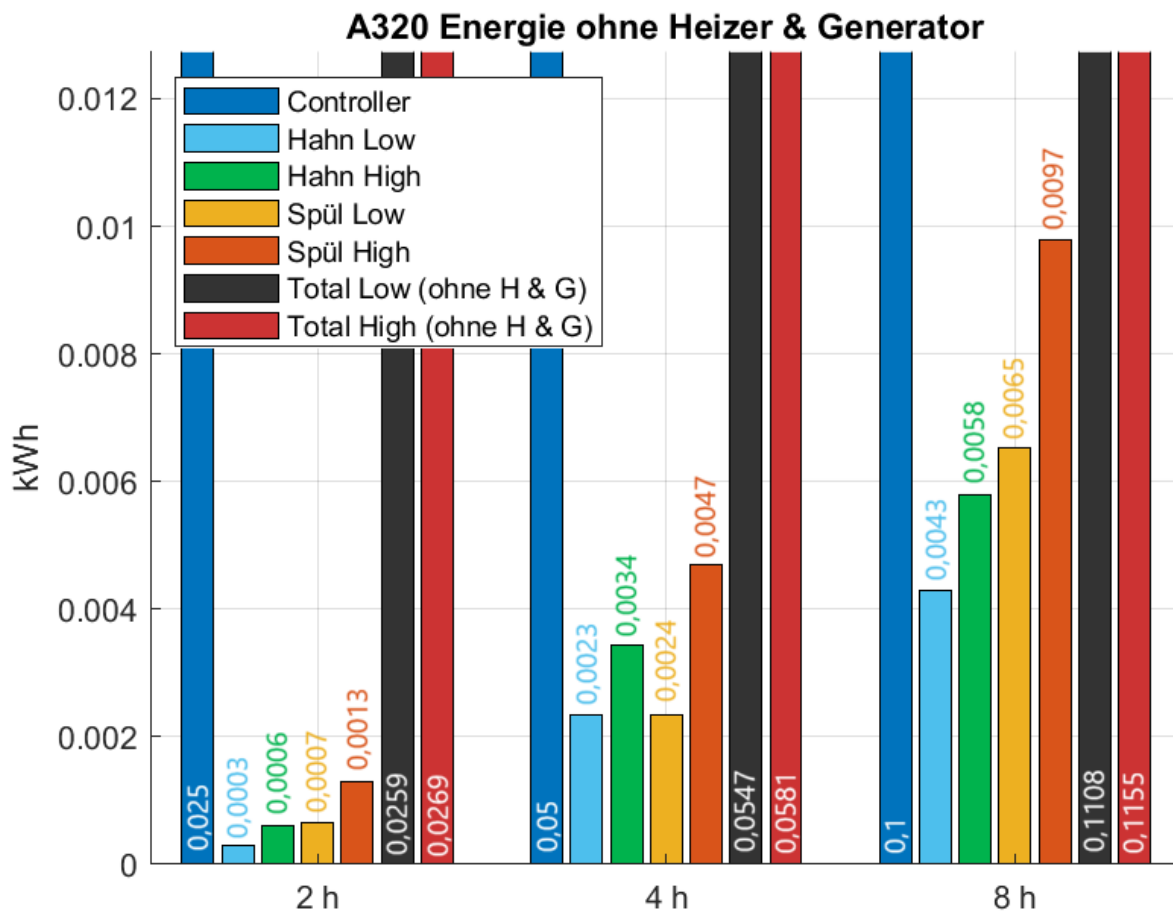


Abbildung 29: A320 Energiebedarf des WWS ohne H & G im Detail

Es wird verdeutlicht, dass der elektrische Energiebedarf des WWS ohne die Betrachtung von Heizer und Generator ungefähr linear mit der Nutzungsdauer steigt. Die einzelnen Komponenten leisten jedoch unterschiedliche Beiträge. Unabhängig von Case und der Flugzeit bleibt der Controller der Hauptverbraucher, gefolgt von den Spülvorgängen und mit Abstand den Wasserhahnaktivierungen. Der Unterschied zwischen Low- und High-Case tritt bei zunehmender Flugzeit mehr hervor, wirkt sich jedoch weniger stark aus als im Wasser- und Abfallvolumen.

Die Form des Anstiegs ergibt sich daraus, dass die verbleibenden Verbraucher im Modell entweder zeitproportional oder nutzungsproportional sind. Der Controller läuft mit konstanter Leistung über die gesamte Flugzeit, sodass sein Energiebedarf per Definition linear mit der Dauer wächst. Die Ventilbetätigungen (Spül- und Wasserhahnventile) hängen zwar von der Nutzung ab, diese wird im Modell jedoch ebenfalls näherungsweise proportional zur Flugzeit angesetzt. In der Realität kann dieser Zusammenhang abweichen. Auf sehr kurzen Flügen ist die Nutzung oft gering, während sie auf längeren Flügen zeitlich nicht gleichmäßig verteilt ist, wie bei Nutzungsspitzen nach dem Service.

Das Balkendiagramm (siehe Abbildung 30) zeigt den Energiebedarf des WWS inklusive Heizer- (dunkellila & dunkelrot) und Generatorleistung (lila) sowie die anfallende Verlustleistung des Heizers (hell- & dunkelgrau). Im Gegensatz zur ersten Darstellung, zeigt dieses Diagramm den Gesamtbedarf an Energie, der während der drei Flüge entsteht. Die zuvor in der Gesamtbetrachtung gezeigten Energieanteile besitzen somit eine untergeordnete Rolle.

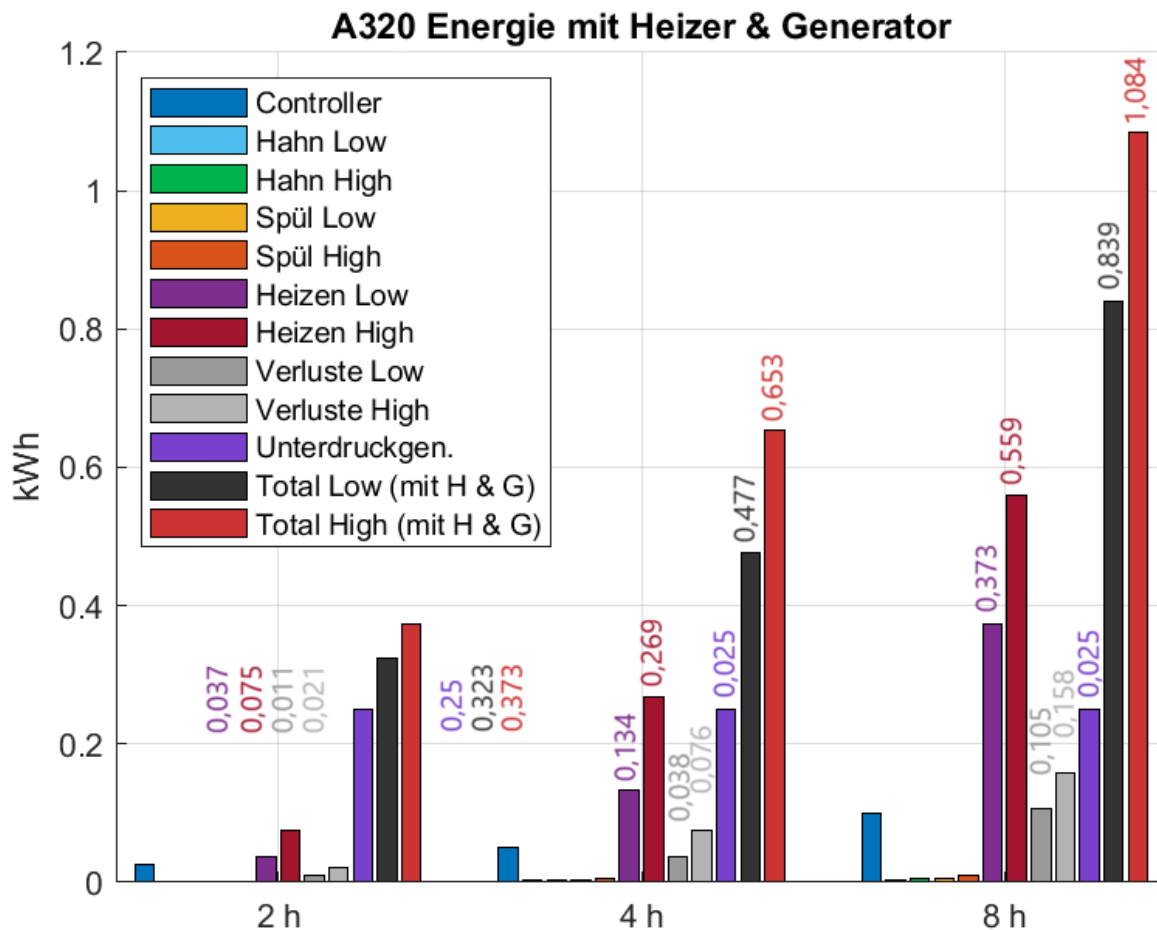


Abbildung 30: A320 Energiebedarf des WWS mit Heizer & Generator

Durch das Betrachten der benötigten Energie des Generators zur Unterdruckerzeugung sowie des Heizers und der damit verbundenen Wärmeverluste verändert sich das Diagramm stark. Der größte Verbraucher ist jetzt der Generator, der in beiden Szenarien eine deutlich höhere Energie benötigt als alle anderen Komponenten. Schon bei einem zweistündigen Flug überschreitet die Leistungen mit 0,250 kWh die Summe der übrigen elektrischen Lasten. Dahinter folgt der Heizer mit 0,037 kWh bzw. 0,075 kWh je nach Case. Hinzu kommen die Verluste am Heizer, die im Betrieb als kontinuierlicher Grundverbrauch auftreten mit 0,011 kWh und 0,021 kWh.

Bei vierstündigen Flügen liegen die Heizwerte bei 0,134 kWh im Low- und 0,269 kWh im High-Case. Obwohl die Spülvorgänge und Hahnaktivierungen zunehmen, bleibt ihr Einfluss gering. Die Heizverluste wirken erneut als konstanter Verbrauch mit 0,038 kWh bzw. 0,076 kWh, der sich über die Betriebsdauer fortsetzt. Der Balken des Unterdruckgenerators bleibt gleich mit 0,250 kWh über die Flugzeit.

Am deutlichsten zeigen sich die Verbräuche beim achtstündigen Flug. Die Heizenergie des Heizers steigt auf 0,373 kWh im Low-Case und 0,559 kWh im High-Case, während die Verluste zusätzlich 0,105 kWh bzw. 0,158 kWh verursachen. Damit übersteigt der Energiebedarf des Heizers die übrigen Energieverbraucher.

Die Gesamtenergie verdeutlicht den Unterschied noch einmal (siehe Tabelle 11). Während die erste Darstellung der Energie bei acht Stunden im Bereich von 0,10 bis 0,12 kWh liegt, steigt der Gesamtverbrauch mit Heizer- und Generatoranteil auf 0,84 kWh im Low- und 1,08 kWh im High-Case.

*Tabelle 11: Energievergleich des WWS von 2,4,8 Stunden Flugzeit*

<b>Flugzeit</b>	<b>Energiebedarf Low-Case</b>	<b>Energiebedarf High-Case</b>
<b>2 h</b>	0,323 kWh	0,373 kWh
<b>4 h</b>	0,477 kWh	0,653 kWh
<b>8 h</b>	0,839 kWh	1,084 kWh

Der Energiebedarf entsteht somit nicht hauptsächlich aus Bedienvorgängen oder Steuerfunktionen, sondern aus der Bereitstellung von warmem Wasser und dem Aufrechterhalten des Unterdrucks in geringen Flughöhen. Mit der Integration des Heizers, dessen Verlusten und dem Unterdruckgenerator wird deutlich, dass diese Vorgänge den größten Anteil der Energie des Systems ausmachen, besonders bei längeren Flugzeiten und hoher Nutzung.

### **6.3 Analyse von Emissionen und Kosten**

Das Balkendiagramm zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen des WWS für die angenommenen Flugzeiten (siehe Abbildung 31). Die Emissionen werden dabei in drei Kategorien betrachtet: CO<sub>2</sub> aus elektrischem Verbrauch (hell- & dunkelblau), CO<sub>2</sub> aufgrund der Masse (orange & gelb) und CO<sub>2</sub> aus resultierenden Gesamtwerten (schwarz & rot).

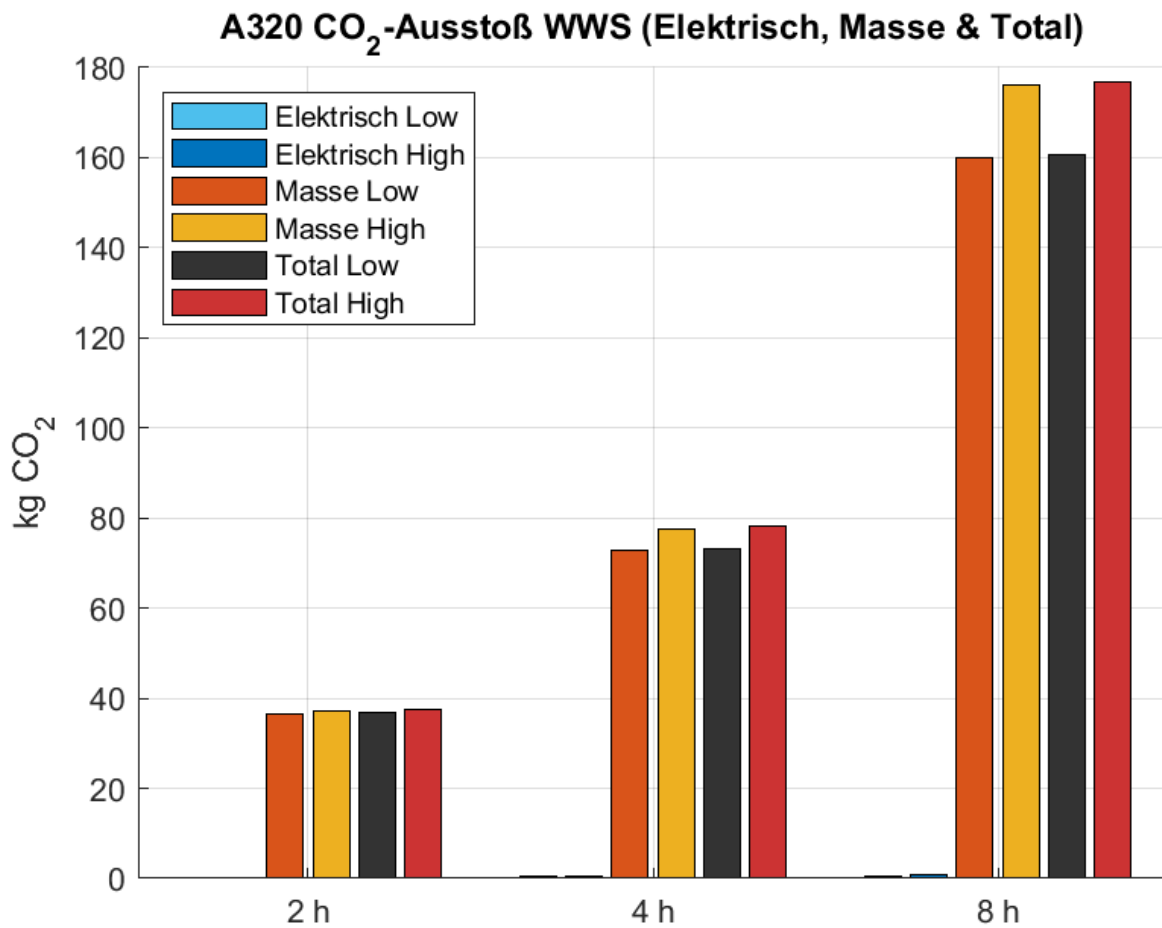


Abbildung 31: A320 CO<sub>2</sub>-Emissionen des WWS

Während das erste Diagramm die Werte über die Flugzeiten aufzeigt, stellt ein weiterer Ausschnitt zusätzlich die Werte an den Balken in vergrößerter Form dar (siehe Abbildung 32).

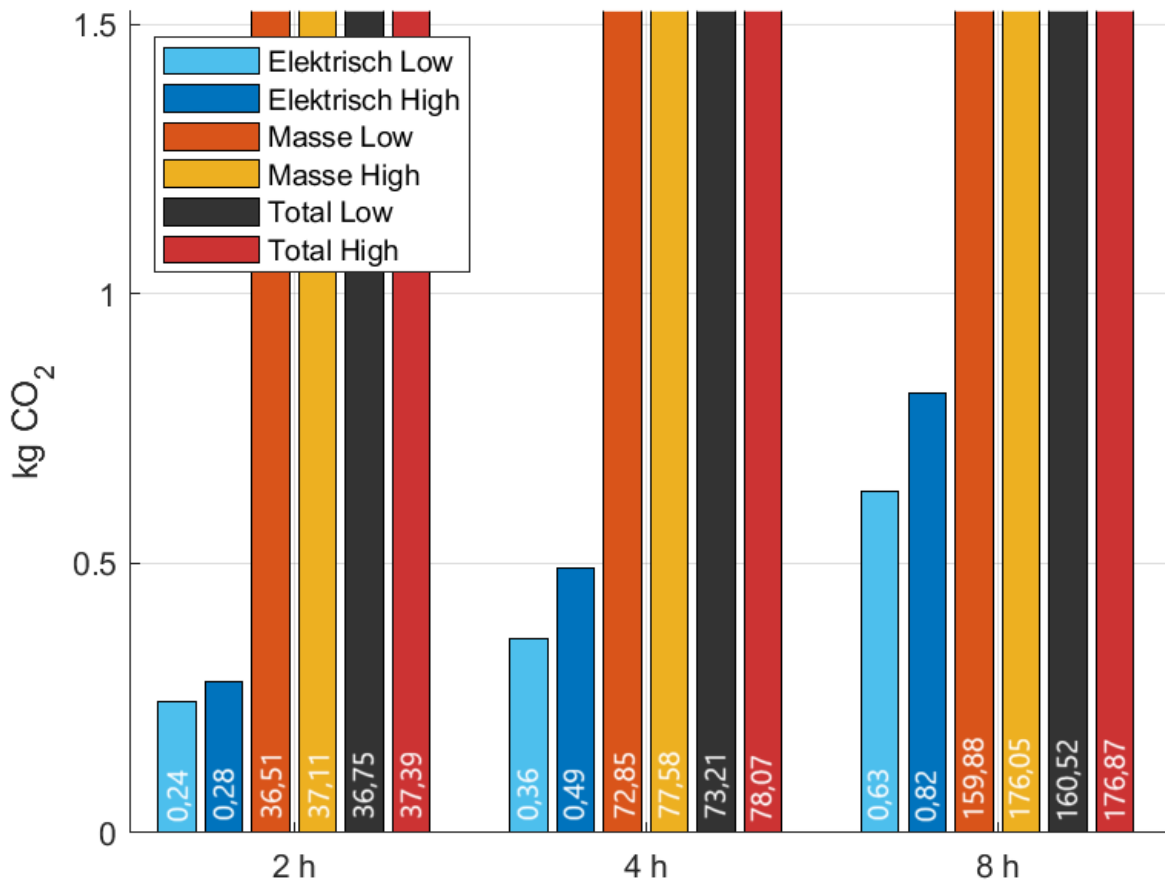


Abbildung 32: A320 CO<sub>2</sub>-Emissionen des WWS im Detail

Bei einem zweistündigen Flug wird deutlich, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen des WWS größtenteils durch die transportierte Masse entstehen. Im Low-Case fallen rund 0,24 kg CO<sub>2</sub> auf den elektrischen Verbrauch an, während die massenbedingten Emissionen 36,51 kg betragen. Im High-Case sind es 0,28 kg CO<sub>2</sub> für elektrische Verbraucher und 37,11 kg für die Massenmitnahme. Zusammen ergeben sich Werte von 36,75 kg bzw. 37,39 kg CO<sub>2</sub>. Der elektrische Verbrauch besitzt nur einen vernachlässigbaren Anteil am Gesamtausstoß. Mit längerer Flugzeit steigen die Emissionen für Massenmitnahme und elektrische Verbraucher sichtbar an.

Bei vier Stunden Flugzeit betragen die elektrischen Emissionen 0,36 kg bzw. 0,49 kg, während die Masseanteile mit 72,85 kg und 77,58 kg zugenommen haben. Die Gesamtemissionen steigen auf 73,21 kg im Low- und 78,07 kg im High-Case. Der Bedarf an elektrischer Energie steigt, bleibt aber vernachlässigbar im Vergleich zum Einfluss der Masse. Der jetzt sichtbare Bereich zwischen Low- und High-Case zeigt, dass die Nutzung mit zunehmender Flugzeit stärkere Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß hat.

Noch deutlicher wird dieser Einfluss beim achtstündigen Flug. Die elektrischen Emissionen steigen auf 0,63 kg bzw. 0,82 kg, liegen aber nach wie vor unter dem

Einfluss der Masse. Dieser steigt auf 159,88 kg im Low- bzw. 176,05 kg im High-Case an. Die Gesamtemission beträgt damit 160,52 kg oder auch 176,87 kg. Der Unterschied zwischen Frischwasserreserven und dem Abfallvorkommen verschiebt die Gewichtsverteilung in Richtung Abfall, wodurch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit der Flugzeit stärker zunimmt.

Das Diagramm zeigt, dass die Masse des WWS der stärkste Treiber der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Systems ist, unabhängig von der Flugzeit. Der elektrische Bedarf trägt zwar einen Teil an Emissionen bei, fällt jedoch im Vergleich kaum ins Gewicht. Der Effekt verstärkt sich mit zunehmender Flugzeit, da bei Kurzstreckenflügen die Unterschiede zwischen Low- und High-Case gering bleiben, sich bei Langstreckenflügen aber ein zunehmender CO<sub>2</sub>-Ausstoß entwickelt.

Zusammenfassend hat die Dimensionierung von Frisch- und Abwassertanks, die Nutzung von Warmwassersystemen sowie das Verhältnis von Nutzlast zu Verbrauch einen größeren Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß als der elektrische Energieaufwand des Systems. Die durch den Betrieb des WWS anfallenden Emissionen sind in folgender Tabelle dargestellt (siehe Tabelle 12).

*Tabelle 12: CO<sub>2</sub>-Emissionen des WWS von 2,4,8 Stunden Flugzeit*

Flugzeit	CO <sub>2</sub> -Ausstoß Low-Case	CO <sub>2</sub> -Ausstoß High-Case
2 h	36,75 kg	37,39 kg
4 h	73,21 kg	78,07 kg
8 h	160,52 kg	176,87 kg

## 6.4 Aussagekraft der Ergebnisse

Die im Rahmen der entwickelten Methode erzeugten Ergebnisse stützen sich auf eine Kombination aus realen Systemdaten, Literaturwerten und Modellannahmen. Hervorzuheben ist die Verwendung technischer Ist-Daten, etwa der elektrischen Leistungsaufnahmen typischer Komponenten wie Ventilen und Heizsystemen, Steuereinheiten oder Generatoren. Diese Daten bilden eine Grundlage für die Bewertung des Systems.

In Bereichen, in denen keine Daten verfügbar waren, insbesondere hinsichtlich Verbrauchs- und Nutzungswerten, wurde mit Annahmen gearbeitet. Dazu zählen Durchschnittswerte zum Wasserverbrauch pro Passagier und Flugstunde, Standardwerte zur Abfallmenge sowie typische Nutzungsintervalle. Diese

Annahmen ermöglichen eine Vergleichsbewertung, auch wenn eine vollständige Kalibrierung anhand airline-spezifischer Betriebsdaten aktuell noch aussteht.

Ein Mehrwert der entwickelten Methode liegt in der Überführung des modellierten WWS in eine immersive VR-Umgebung. Dadurch werden die Systemkomponenten nicht nur abstrakt beschrieben, sondern räumlich erfahrbar. Insbesondere lassen sich Bauräume, Platzverhältnisse und die wahrgenommene Enge realitätsnah beurteilen, was über klassische CAD-Darstellungen hinausgeht. Die immersive Darstellung ermöglicht es zudem, auch fachfremde Probanden oder interdisziplinäre Entwicklungsteams, beispielsweise aus Design, Kabine, Wartung oder Human Factors, frühzeitig einzubinden. Aspekte wie Komfortempfinden, Zugänglichkeit, Ein- und Ausbauszenarien, Wartungsfreundlichkeit sowie visuelle Eindrücke, wie Licht, Sichtachsen, optische Integration, können direkt im virtuellen Raum bewertet werden.

Insgesamt zeigt sich, dass das entwickelte Modell nicht nur technisch funktionsfähig, sondern auch methodisch anschlussfähig ist durch die Schnittstellen zu CPACS und einer VR-Umgebung. Die Datengewinnung ermöglicht nachvollziehbare Analysen und objektive Entscheidungsgrundlagen in frühen Phasen der Flugzeug- und Kabinenauslegung.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die zentralen Erkenntnisse der entwickelten Methodik sowie die gewonnenen Ergebnisse aus der Simulation des WWS zusammengeführt und bewertet. Das folgende Kapitel fasst zunächst die wesentlichen Inhalte der Arbeit zusammen. Darauf aufbauend werden die eingangs formulierten Forschungsfragen beantwortet, bevor abschließend praxisorientierte Konsequenzen für die Systemauslegung sowie Perspektiven für zukünftige Forschung aufgezeigt werden.

### 7.1 Zusammenfassung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines simulationsgestützten, parametrischen Modells zur funktionalen Auslegung und Bewertung des WWS in der Flugzeugkabine. Vor dem Hintergrund zunehmender Anforderungen an Ressourceneffizienz, Nachhaltigkeit und Digitalisierung in der Kabinenentwicklung wurde ein methodischer Ansatz erarbeitet, der technische und nutzerbezogene Aspekte integriert und auf unterschiedliche Flugprofile übertragbar ist. Als Anwendungsfall diente ein Airbus A320 in typischer Kabinenkonfiguration, untersucht für Flugzeiten von zwei, vier und acht Stunden.

Nach einer Einordnung in den aktuellen Forschungsstand und die zukünftige Entwicklung von Flugzeugkabinen wurden zunächst die notwendigen Grundlagen geschaffen. Dazu zählen die Einordnung des WWS in den Kabinenentwicklungsprozess, relevante Systemgrenzen und Standards, sowie die Rolle digitaler Werkzeuge entlang des Entwicklungsprozesses. Insbesondere die Kombination aus CPACS zur strukturierten Datenbeschreibung, MATLAB zur Simulation und Analyse sowie Blender und Unity zur geometrischen und immersiven Darstellung bildet die methodische Basis dieser Arbeit. Ergänzend wurde die parametrische Modellierung und objektorientierte Programmierung eingeführt, um eine flexible, skalierbare und wiederverwendbare Systembeschreibung zu ermöglichen.

Auf dieser Grundlage wurde im Hauptteil der Arbeit ein parametrisches Simulationsmodell des WWS aufgebaut. Der methodische Ansatz folgt dabei einem klar strukturierten Vorgehen. Ausgehend vom Nutzerverhalten werden die relevanten Wasserströme bestimmt. Daraus werden Gesamtvolumina für Frisch- und Abwasser gebildet, inklusive eines Sicherheitsaufschlags. Parallel dazu wird die elektrische Energie der einzelnen Systemkomponenten berechnet.

Ein Element des Modells ist die Verknüpfung von Wasser- und Energieverbräuchen mit der transportierten Masse. Es wird ein zeitlich gemittelttes Massenprofil des Systems bestimmt, das gemeinsam mit dem elektrischen Energiebedarf in einen zusätzlichen Kerosinverbrauch überführt wird. Auf dieser Basis werden sowohl der CO<sub>2</sub>-Ausstoß als auch die daraus resultierenden Kosten abgeschätzt. Die gesamte Methodik ist vollständig parametrisch aufgebaut, sodass Anpassungen an andere Flugzeugvarianten, Kabinenlayouts oder Nutzungsszenarien ohne grundlegende Modelländerungen möglich sind.

Die Simulationsergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Flugzeiten. Für den Zweistundenflug bleibt der Frisch- und Abwasserverbrauch insgesamt auf einem niedrigen Niveau und sowohl Energiebedarf als auch CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen gering aus. Der Vierstundenflug stellt einen Übergangsfall dar, bei dem insbesondere die Nutzungsfrequenz der Toiletten und der Warmwasserbedarf ansteigen, während die Systemgrenzen weiterhin eingehalten werden. Beim Achtstundenflug zeigt sich schließlich der stärkste Anstieg aller betrachteten Größen. Insbesondere der Abfalltank erreicht im High-Case die konfigurationstypische Kapazitätsgrenze des A320 und überschreitet diese, was auf die hohe Nutzungsfrequenz, den erhöhten Flüssigkeitskonsum und den größeren Anteil fester Abfälle zurückzuführen ist. Der elektrische Energiebedarf steigt mit der Flugzeit annähernd linear, während der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch den massebedingten Kerosinverbrauch überproportional zunimmt.

In der Diskussion der Ergebnisse wird deutlich, dass das entwickelte Modell vor allem als Auslegungs- und Bewertungswerkzeug zu verstehen ist. Der High-Case stellt keinen typischen Durchschnittsflug dar, sondern einen konservativen Stressfall, der dazu dient, Systemgrenzen sichtbar zu machen. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass eine rein flugzeitabhängige Auslegung von Tanks und Komponenten zwar theoretisch effizienter wäre, in der Praxis jedoch mit erheblichen Nachteilen hinsichtlich Flexibilität und operativem Einsatz verbunden ist. Gerade hier zeigt sich der Mehrwert eines parametrischen Modells, das unterschiedliche Szenarien transparent vergleichbar macht.

Abschließend wird der Ansatz durch die Überführung des Systems in eine virtuelle Realität ergänzt. Die immersive Darstellung der Komponenten ermöglicht es, Bauraum, Zugänglichkeit, Einbau- und Wartungsszenarien sowie subjektive Aspekte wie Engegefühl oder visuelle Wahrnehmung zu bewerten. Dadurch wird das Simulationsmodell nicht nur zu einem rechnerischen Auslegungswerkzeug, sondern zu einem interdisziplinären Entwicklungsartefakt, das technische Analyse, digitale Modellierung und menschenzentrierte Bewertung miteinander verbindet.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die entwickelte Methodik einen fundierten und praxisnahen Beitrag zur digitalen Auslegung von Kabinensystemen leisten kann.

## 7.2 Antwort auf die gestellten Forschungsfragen

Die Bewertung orientiert sich an den drei Forschungsfragen (siehe Kapitel 1.4) dieser Arbeit und untersucht, in welchem Umfang die entwickelte Modellarchitektur zur parametrischen Abbildung des WWS beiträgt, welche Stärken, Schwächen und Limits der Ansatz aufweist und an welchen Stellen Optimierungsbedarf vorliegt.

### Forschungsfrage 1

Wie kann die parametrische Modellierung eines Water/Waste-Systems realisiert werden, sodass sie anschlussfähig an den frühen Entwurfs- und Auslegungsprozess der Kabine bleibt?

Diese erste Forschungsfrage kann dahingehend beantwortet werden, dass eine parametrische Modellierung des Water/Waste-Systems durch die Kombination aus funktionaler Zerlegung, klar definierten Systemgrenzen und einer modularen Modellstruktur erfolgreich realisiert werden kann. Die Umsetzung in einem MATLAB-basierten Rahmen unter Anwendung des EVA-Prinzips (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe) ermöglicht eine klare Trennung von Eingangsparametern, Modelllogik und Ergebnisdarstellung.

Durch die Kapselung einzelner Funktionen und die Trennung von Eingabeparametern, Berechnung und Ergebnisdarstellung bleibt das Modell flexibel und erweiterbar. Damit kann das WWS nicht nur geometrisch, sondern funktional und ressourcenbasiert beschrieben werden, was die Anschlussfähigkeit an den bestehenden virtuellen Entwurfsprozess des DLR gewährleistet. Limitiert ist dieser Ansatz derzeit durch die Fokussierung auf Single-Aisle-Flugzeuge sowie durch die vereinfachten Annahmen zum Nutzerverhalten und zur Systemdynamik. Diese Einschränkungen beeinträchtigen nicht die grundsätzliche methodische Gültigkeit, können allerdings durch eine Verfeinerung der Parameter oder die Kopplung mit realen Betriebsdaten reduziert werden.

## **Forschungsfrage 2**

Ist es möglich, mit einem simulationsgestützten Ansatz die Auswirkungen von Flugzeit und Nutzungsverhalten auf Masse, Energiebedarf sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen des WWS abzubilden und zu bewerten?

Die zweite Forschungsfrage kann eindeutig bejaht werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass sich sowohl die anfallenden Wassermengen als auch der elektrische Energiebedarf und die daraus abgeleiteten CO<sub>2</sub>-Emissionen systematisch aus der Flugzeit und dem angenommenen Nutzungsverhalten ableiten lassen. Durch die Betrachtung der drei repräsentativen Flugzeiten von zwei, vier und acht Stunden konnte nachvollzogen werden, dass insbesondere der Energiebedarf nahezu linear mit der Flugzeit ansteigt, was auf die zugrunde gelegten zeitabhängigen Verbraucher zurückzuführen ist. Auf Basis von Passagieraufkommen und Missionsdauer lassen sich somit unterschiedliche Nutzungsprofile abbilden, aus denen wiederum Anforderungen an das WWS abgeleitet werden.

Darüber hinaus ermöglicht das Modell die getrennte Betrachtung von energiebedingten Emissionen und massebedingten Emissionen, die aus der Mitnahme von Frisch- und Abwasser resultieren. Damit wird deutlich, dass nicht nur der direkte elektrische Energieverbrauch, sondern auch die Systemmasse einen Beitrag zur gesamten CO<sub>2</sub>-Bilanz leistet. Der simulationsgestützte Ansatz erlaubt somit eine konsistente Bewertung dieser Effekte und stellt eine geeignete Grundlage für vergleichende Analysen unterschiedlicher Auslegungs- und Nutzungsszenarien dar. Eingeschränkt ist die Aussagekraft jedoch durch das Fehlen realer Airline-spezifischer Betriebsdaten zur Anpassung der Nutzungsannahmen.

### **Forschungsfrage 3**

Kann die entwickelte Methode genutzt werden, um Auslegungsgrenzen und kritische Betriebszustände des WWS frühzeitig zu identifizieren und zu diskutieren?

Auch die dritte Forschungsfrage kann bejaht werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass insbesondere der typischerweise eingebaute Abfalltank im High-Case bei längeren Flugzeiten an seine Kapazitätsgrenzen stößt oder diese überschreitet. Somit kann für zukünftige Entwicklungen ein angepasster Tank verbaut werden. Diese Überlastung ist im Modell primär auf die erhöhte Nutzungsfrequenz sowie auf konservative Annahmen hinsichtlich fester Abfallanteile und Sicherheitsaufschläge zurückzuführen. Dadurch wird deutlich, dass das entwickelte Modell nicht nur Durchschnittszustände abbildet, sondern gezielt als Stress-Test für plausible Randbedingungen eingesetzt werden kann.

Die Methode erlaubt es somit, kritische Szenarien des WWS sichtbar zu machen und deren Ursachen zu analysieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass diese Grenzfälle nicht zwangsläufig den typischen Betrieb repräsentieren, sondern vielmehr als Grundlage für eine robuste Auslegung dienen. Damit leistet das Modell einen Beitrag zur frühzeitigen Entscheidungsunterstützung im Kabinenentwurf, insbesondere bei Systemgewicht und Tankkapazität. Limitiert ist die Bewertung durch die fehlende Validierung anhand realer Betriebsdaten.

Sowohl Hersteller als auch Zulieferer profitieren von dieser parametrischen Modellierung. Insbesondere in frühen Konzeptphasen, in denen vielfältige Entscheidungen unter Unsicherheit getroffen werden müssen, liefert der Ansatz Aussagen zu Ressourcenbedarf, Energieeffizienz und logistischen Anforderungen. Durch die XML-basierte Beschreibung der Kabinen- und Systemkonfigurationen können relevante Informationen strukturiert, standardisiert und toolunabhängig an Visualisierungs- und Präsentationsplattformen weitergegeben werden. XML arbeitet dabei als universelle Schnittstelle, die von zahlreichen Programmen interpretiert werden kann und den Übergang von technischen Modellen zu anschaulichen Darstellungen ermöglicht. Dadurch können Kabinenlayouts und Komfortmerkmale ohne physische Mockups bewertet und kommuniziert werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in dieser Arbeit entwickelte simulationsgestützte und parametrische Modellierungsmethodik grundsätzlich geeignet ist, das WWS eines A320 realitätsnah zu analysieren. Die Forschungsfragen konnten positiv beantwortet werden, wobei gleichzeitig Grenzen und Erweiterungspotenziale des Ansatzes identifiziert wurden.

### 7.3 Praktische Implikationen

Die Ergebnisse zeigen, dass das WWS zum Ressourcenverbrauch eines Flugzeugs beiträgt, wobei der Umfang dieses Beitrags maßgeblich von der Flugdauer sowie vom Nutzungsverhalten der Passagiere abhängt. Vor allem die Systemmasse stellt den Treiber für Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß dar. Während Kurz- und Mittelstrecken keine Kapazitätsprobleme aufweisen, führen Langstreckenflüge zu einer starken Zunahme der Abfallmasse, die im High-Case sogar die gesetzten Tankgrenzen überschreitet. Für die Luftfahrtindustrie bedeutet dies, dass die Dimensionierung von Tanks, die Wahl der Systemarchitektur und die Steuerung der Wasserbereitstellung nicht nur Komfortaspekte betreffen, sondern auch direkte Auswirkungen auf Effizienz, Betriebssicherheit und Nachhaltigkeit haben.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich verschiedene Ansatzpunkte zur Optimierung des WWS ableiten. Eine Maßnahme ist die adaptive Skalierung von Tankgrößen und Systemkomponenten, insbesondere die Vergrößerung von Abwassertanks oder deren modulare Erweiterbarkeit. Ergänzend bieten sich Strategien zur Reduktion des Abfallvolumens an, etwa durch leistungsstärkere Vakuumsysteme, additives Wasserrecycling, effizientere Toilettenmechanismen oder den Einsatz physikalischer bzw. chemischer Verfahren zur Volumenreduktion.

Auch im Bereich der Warmwasserversorgung bestehen Optimierungspotenziale, beispielsweise durch energieeffizientere Heizsysteme, verbesserte Dämmkonzepte oder eine bedarfsgerechte Steuerung der Warmwasserbereitstellung. Darüber hinaus könnte eine dynamische Wassermanagement-Logik implementiert werden, die sich an Flugzeit, Auslastung und realem Verbrauchsprofil orientiert, anstatt mit festen Reservemengen zu arbeiten. Dadurch ließen sich sowohl mitgeführte Massen als auch der daraus resultierende Treibstoffverbrauch reduzieren.

Die in dieser Arbeit entwickelte parametrische Modellstruktur bildet die methodische Grundlage, um solche Optimierungsansätze zu untersuchen. Durch das aufgebaute Grundgerüst können alternative Auslegungen, Regelstrategien und Systemvarianten bald gezielt implementiert, simuliert und bewertet werden. Die hier beschriebenen Maßnahmen stellen somit einen theoretischen Ausblick dar für einen nächsten Schritt auf Basis dieser Arbeit.

### 7.4 Weiterführende Forschung

Für die weiterführende Forschung ergeben sich mehrere Ansatzpunkte, die direkt auf der in dieser Arbeit entwickelten Methodik aufbauen können und keinen Neuanfang erfordern. Besonders vielversprechend ist die Erweiterung um ein

intelligentes Water/Waste-Management, das Echtzeitdaten aus dem Kabinenbetrieb nutzt, um den Verbrauch vorherzusagen und bedarfsgerecht zu steuern (Lutzer, 2024). Die in dieser Arbeit etablierte objektorientierte Struktur sowie die klare Funktionskapselung der Systemkomponenten bilden hierfür bereits eine geeignete Grundlage. Sensorwerte, Zustandsgrößen oder Prognosemodelle könnten als zusätzliche Attribute und Methoden integriert werden, ohne die grundlegende Modellarchitektur zu verändern. Auf diese Weise ließen sich Ressourcen effizienter einsetzen und Systemauslegungen dynamisch an reale Betriebsbedingungen anpassen.

Auch die Untersuchung von Recyclingtechnologien, etwa zur Frischwasseraufbereitung oder zur Reduktion des Abwasservolumens an Bord, kann auf dem bestehenden Modell aufsetzen. Die modular aufgebaute Systembeschreibung erlaubt es, zusätzliche Komponenten zu ergänzen und deren Auswirkungen auf Masse, Energiebedarf und Emissionen systematisch zu bewerten. Damit bietet die entwickelte Methodik bereits einen Rahmen, um solche Konzepte vergleichend zu analysieren, ohne neue Modellstrukturen entwickeln zu müssen.

Ein weiteres Entwicklungspotenzial liegt in der dynamischen Abbildung von Nutzungs- und Passagierprofilen (Koniczny, 2024). Das aktuelle Modell unterscheidet nicht zwischen Funktionsvarianten wie Standard-, Premium- oder barrierefreien Lavatories, und die Konfiguration erfolgt bislang unabhängig von realen Einsatzprofilen oder kulturell geprägten Nutzungs- und Hygienegewohnheiten. Methodisch ist die Grundlage hierfür jedoch vorhanden: Unterschiedliche Lavatory-Konfigurationen können als Klassen umgesetzt werden, während nutzer- und missionsabhängige Parameter als Eingangsgrößen in die bestehende Parametrisierung integriert werden. Die OOP erleichtert dabei die Erweiterung um zusätzliche Varianten, ohne Bestehende zu beeinträchtigen.

Darüber hinaus lässt sich das Modell mit konkreten Missionsprofilen und realen Flugdaten koppeln. Kurzstrecken mit geringer Nutzungsintensität stellen andere Anforderungen an Reinigungszyklen, Abfallkapazitäten oder Wasserverfügbarkeit als Langstreckenflüge mit hoher Nutzung, bei denen Aspekte wie Geruchsreduzierung oder berührungslose Armaturen an Bedeutung gewinnen (Lutzer, 2024). Solche Unterschiede können im bestehenden Rahmen bereits über veränderte Eingangsparameter und Szenarien abgebildet werden. Ergänzend ermöglichen kulturell geprägte Hygienepraktiken eine weitere Unterscheidung, die sich direkt auf Dimensionierung, Funktionsausstattung und Ressourcenbedarf auswirkt.

Auch Airline-spezifische Service- und Markenstrategien lassen sich auf dieser Basis berücksichtigen. Premium-Lavatories mit erweiterten Anforderungen an

Ausstattung, Barrierefreiheit und Materialqualität sowie robuste, kostenoptimierte Low-Cost-Varianten können innerhalb der vorhandenen Modellarchitektur als unterschiedliche Ausprägungen desselben Systems beschrieben werden. Die Anbindung an VR-Umgebungen bietet dabei einen zusätzlichen Mehrwert, da neue Konzepte nicht nur bewertet, sondern auch räumlich und funktional erfahrbar gemacht werden können, was insbesondere interdisziplinäre Abstimmungsprozesse unterstützt (Fuchs, et al., 2022).

Insgesamt wird deutlich, dass das WWS nicht isoliert betrachtet werden sollte, sondern als integraler Bestandteil der Kabinen- und Systemarchitektur mit messbarem Einfluss auf Emissionen und Betriebskosten. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik stellt hierfür bereits ein Grundgerüst dar. Objektorientierte Modellierung, Funktionskapselung und die Anbindung an VR schaffen die Voraussetzungen, um zukünftige Erweiterungen umzusetzen und das System schrittweise in Richtung eines ganzheitlichen, modellbasierten Systementwurfs weiterzuentwickeln.

## 8 Literaturverzeichnis

**Airbus. 2023.** *Airspace Cabin Vision 2035* [Online].

<https://www.aircraft.airbus.com/en/aircraft/airspace-cabin/airspace-cabin-vision-2035> [Zitat vom: 07. 07. 2025].

—, **2018.** Wartungsdokumente ATA-38 Water/Waste [Maintenance manual]. Toulouse: Airbus.

—, **2007.** Wikipedia - A320 Familie [Online] 11.01.2007.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Airbus-A320-Familie> [Zitat vom: 04. 10. 2025].

**Alder, M., et al. 2020.** Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS. Aerospace Europe Conference 2020. Bordeaux, France, Feb. 2020.

**Bahns, T., Gebhardt, N. und Krause, D. 2013.** A Modularization Approach for Aircraft Cabin Components. In: 4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST). Hamburg, Deutschland, April 2013.

**BDLI. 2023.** The Role of Cabin and Cargo for sustainable aviation. Berlin: German Aerospace Industries Association, 2023.

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

**Blender. 2025.** Blender [Online]. Blender Foundation. <https://www.blender.org/> [Zitat vom: 07. 08. 2025].

**Camba, J. D., Contero, M. und Company, P. 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>

**Christiansen, F. H., Laukotka, F. und Krause, D. 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>

**CPACS. 2015.** Common Parametric Aircraft Configuration Schema [Online] 01. 12. 2015. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.. <https://cpacs.de> [Zitat vom: 22. 07. 2025].

**Diehl Aviation AIX. 2025.** Diehl Aviation auf der Aircraft Interiors Expo 2025: Produkte und Konzepte für die Kabine der Zukunft [Online]. <https://new.diehl.com/aviation/de/presse-und-medien/presse/diehl-aviation-auf->

der-aircraft-interiors-expo-2025-produkte-und-konzepte-fuer-die-kabine-der-zukunft-und-konzepte-fuer-die-kabine-der-zukunft [Zitat vom: 25. 09. 2025].

**Diehl InnoLite. 2018.** Diehl InnoLite Toilet [Online].

[https://www.diehl.com/cms/files/InnoLite\\_Online-2018.pdf](https://www.diehl.com/cms/files/InnoLite_Online-2018.pdf) [Zitat vom: 23. 10. 2025].

**DLR. 2021.** Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt: Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal [Online]. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.. <https://www.dlr.de> [Zitat vom: 02. 07. 2025].

—. **2022.** Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt - Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal [Online]. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.. <https://event.dlr.de/downloads/ila22/de/auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt.pdf> [Zitat vom: 25. 08. 2025].

**Dörner, R., et al. 2019.** Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>.

**EASA. 2023.** Certification Specifications - CS-25 Large Aeroplanes [Online]. European Union Aviation Safety Agency. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> [Zitat vom: 20. 09. 2025].

**EUROCONTROL. 2022.** Environmental Assessment Report 2022 [Online]. Brussels: European Organisation for the Safety of Air Navigation. <https://www.eurocontrol.int/publication/environmental-assessment-report-2022> [Zitat vom: 10. 07. 2025].

**European Commission, EU. 2019.** The European Green Deal. Brussels: s.n., 2019.

**Frommann, O. 2021.** Flugzeugbau. [Vorlesung]. Bremen: Hochschule Bremen, 2021.

**Fuchs, M., et al. 2022.** Enhancement of the virtual design platform for modeling a functional system architecture of complex cabin systems. CEAS Aeronaut J 13, 1101–1117 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13272-022-00608-z>.

—. **2021.** Erweiterung der virtuellen Entwurfsplattform zur Abbildung einer funktionalen Systemarchitektur komplexer Kabinensysteme. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2021.

**Fuchs, M., et al. 2020.** Virtuelle Realität im digitalen Designprozess von Flugzeugkabinensystemen. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt -

Lilienthal-Oberth e.V.. (Text). <https://doi.org/10.25967/530007>. urn:nbn:de:101:1-2020120413253644231510.

**IPCC. 2016.** IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2: Energy [Online]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2016. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html> [Zitat vom: 02. 09. 2025].

**Hanna, M., 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.2021.05.136>.

**Hanna, M., Schwenke, J. und Krause, D. 2020.** Inconsistency Management for Product Families with Many Variants through a Model-Based Approach in Modular Lightweight Design. Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1, pp. 917–926. doi:10.1017/dsd.2020.309.

**Hennigs, D. 2021.** Konstruktion & CAD [Vorlesung]. Bremen: Hochschule Bremen, 2021.

**Hoppen, H. 2014.** Aufbau und Charakterisierung eines generischen Wasser-Abwasser-Versuchsstands [Masterarbeit]. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2014.

**Hubwieser, P., Mühling, A. und Aiglstorfer, G. 2013.** Fundamente der Informatik. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2013.

**IATA. 2025a.** Air Passenger Market Analysis – July 2025 [Online]. International Air Transport Association. <https://www.iata.org/en/publications/economics/reports/air-passenger-market-analysis-july-2025/> [Zitat vom: 30. 07. 2025].

—. **2025b.** Jet Fuel Price Monitor [Online]. International Air Transport Association. <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor>. [Zitat vom: 02. 07. 2025].

**International Water-Guard Industries Inc. 2014.** IWG-HE Series PDF [Online]. [https://www.water.aero/wp-content/uploads/2014/07/IWG-HE-Series\\_May\\_2018\\_420\\_210\\_only\\_vrs9\\_NO-DIMENSIONS-compressed-1.pdf](https://www.water.aero/wp-content/uploads/2014/07/IWG-HE-Series_May_2018_420_210_only_vrs9_NO-DIMENSIONS-compressed-1.pdf) [Zitat vom: 21. 10. 2025].

—. **2018.** IWG Featherweight-MOV Product Sheet [Online]. [https://www.water.aero/wp-content/uploads/2018/09/IWG\\_Featherweight-MOV-Product-Sheet\\_IWG\\_August-2018\\_vrs4.compressed.pdf](https://www.water.aero/wp-content/uploads/2018/09/IWG_Featherweight-MOV-Product-Sheet_IWG_August-2018_vrs4.compressed.pdf) [Zitat vom: 21. 10. 2025].

**Keiser, D. , Demir, M. und Freitag, M. 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>

**Kistler Instrumente AG. 2023.** EN-9100 / AS9100 Zertifizierung [Online]. Kistler Group. <https://www.kistler.com/DE/de/en-9100-as9100-zertifizierung/C00000672> [Zitat vom: 22. 09. 2025].

**Konieczny, G. 2024.** Bauweisen, Human Factors, Aeromedizin [Vorlesung]. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2024.

—. **2025.** Maintenance, Upgrade und Retrofit [Vorlesung]. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2025.

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

**Lufthansa Group. 2023.** Lufthansa Allegris [Online]. <https://www.lufthansagroup.com/en/themes/lufthansa-allegris.html> [Zitat vom: 08. 07. 2025.]

**Lutzer, W. 2024.** Labor für Kabine und Kabinensysteme [Vorlesung]. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. HCAT Hamburg.

**Mathworks Inc. 2025.** MATLAB [Online]. The MathWorks Inc.. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html> [Zitat vom: 07. 10. 2025].

**Raspberry Pi Foundation. 2025.** Raspberry Pi [Online]. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> [Zitat vom: 18. 11. 2025].

**Rauscher, F., et al. 2024.** Abstraktion von hochauflösenden 3D Ist-Daten in einen konsistenten und systemübergreifenden Datensatz für die Bewertung des DLR Forschungsflugzeugs ISTAR. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.. (Text). <https://doi.org/10.25967/630368>. urn:nbn:de:101:1-2501101359350.769672138942.

**Shell International B.V. 2021.** Shell Aviation [Online]. Shell Global Solutions B.V.. <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/civil-jet-fuel-grades.html> [Zitat vom: 17. 10. 2025].

**Stein, U. 2015.** Objektorientierte Programmierung mit MATLAB. Hamburg: Carl Hanser Verlag, 2015.

**Strauß, P. 2021.** Thermodynamik [Vorlesung]. Bremen: Hochschule Bremen, 2021.

**Tivig, S. und Engelhardt, J. 2025.** Kooperation DLR & Diehl Aviation [Interview]. Hamburg, 29. 10. 2025.

**Unity Technologies ADSK. 2025.** Work Assets Between Unity and Autodesk [Online]. <https://unity.com/de/how-to/work-assets-between-unity-and-autodesk> [Zitat vom: 14. 09. 2025].

**Unity Technologies. 2025.** Unity [Online. UT. <https://unity.com/de> [Zitat vom: 14. 09. 2025].

**Völker, T. 2022.** Elektrotechnik [Vorlesung]. Bremen: Hochschule Bremen, 2022.

**Wiegmann, M. 2024.** Vertiefung elektronischer Kabinensysteme [Vorlesung]. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. HCAT Hamburg, 2024.

## 9 Anhang und Anleitung

### Anhang A1

Die Verbindungen und die Funktionsweise der Komponenten des WWS sind im Folgenden bildlich dargestellt. Dabei wird das System in drei Funktionsweisen unterteilt: Einmal die des Frischwassersystems (siehe Abbildung 33), die des Grauwassersystems (siehe Abbildung 34) und die des Abwassersystems (siehe Abbildung 35).

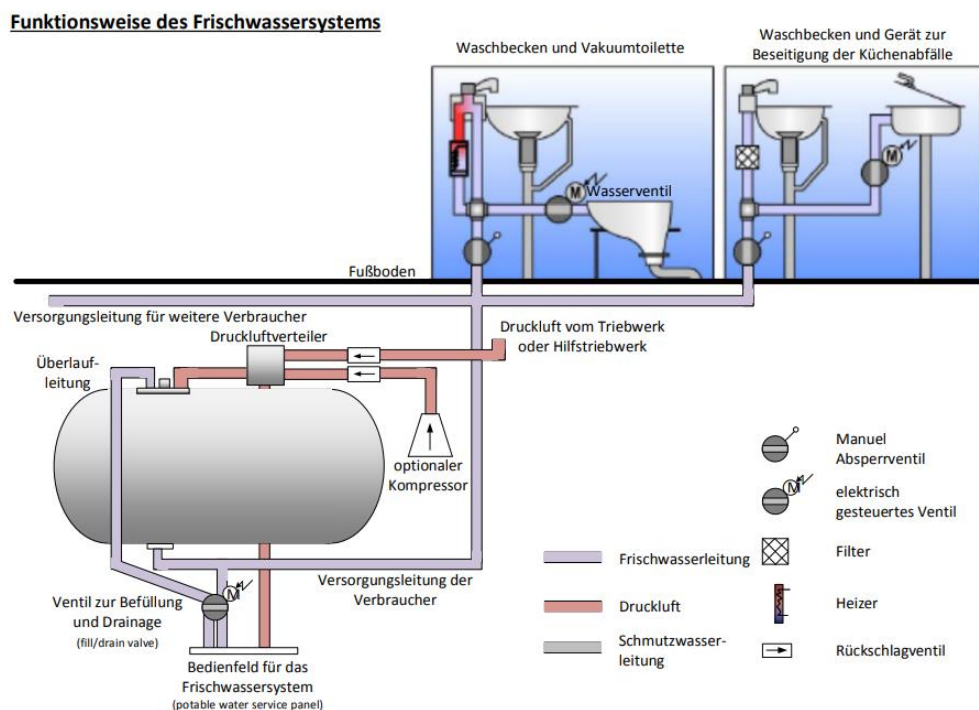


Abbildung 33: Funktionsweise des Frischwassersystems (Hoppen, 2014)

Die Abbildung zeigt die Funktionsweise des Frischwassersystems, das im Flugzeug verwendet wird. Es sind verschiedene Komponenten des Systems dargestellt, die zusammenarbeiten, um Frischwasser zu speichern, zu verteilen und Abwasser zu entsorgen.

1. Waschbecken und Vakuumtoilette: Diese Komponenten sind mit dem Wasser- und Abwassersystem verbunden das den Wasserfluss reguliert. Ein Wasserventil (gekennzeichnet mit "M") steuert den Wasserfluss in die entsprechenden Komponenten.
2. Versorgungsleitung für weitere Verbraucher (lila): Dies stellt eine Versorgungseinheit für andere Komponenten oder Verbraucher im System dar, die mit Frischwasser versorgt werden müssen.

3. Überlaufleitung: Eine Leitung, die überschüssiges Wasser oder Abwasser ableitet, um eine Überflutung zu verhindern.
4. Wassertank: Ein Vorratsbehälter für Frischwasser. Das Wasser wird von hier aus an die verschiedenen Verbraucher im System weitergeleitet. Der Tank hat auch ein Ventil zur Befüllung und Drainage.
5. Druckluft vom Triebwerk oder Hilfstriebwerk (rot): Es wird Druckluft bereitgestellt, um Wasser durch das System zu befördern, insbesondere beim Spülen oder Händewaschen.
6. Schmutzwasserleitung (grau): Diese Leitung führt Abwasser oder Schmutzwasser, das in den verschiedenen Komponenten entsteht, ab.
7. Bedienfeld für das Frischwassersystem: Ein Steuerpanel, über das der Benutzer das System überwachen und steuern kann.
8. Manuelles Absperrventil und elektrisch gesteuertes Ventil: Diese Ventile regulieren den Wasserfluss und sind wichtige Sicherheits- und Steuermechanismen.
9. Filter und Heizer: Ein Filter sorgt für sauberes Wasser, während der Heizer das Wasser erwärmen kann, wenn erforderlich.
10. Rückschlagventil: Ein Mechanismus, der verhindert, dass Wasser in die falsche Richtung fließt.

### Funktionsweise des Grauwassersystems

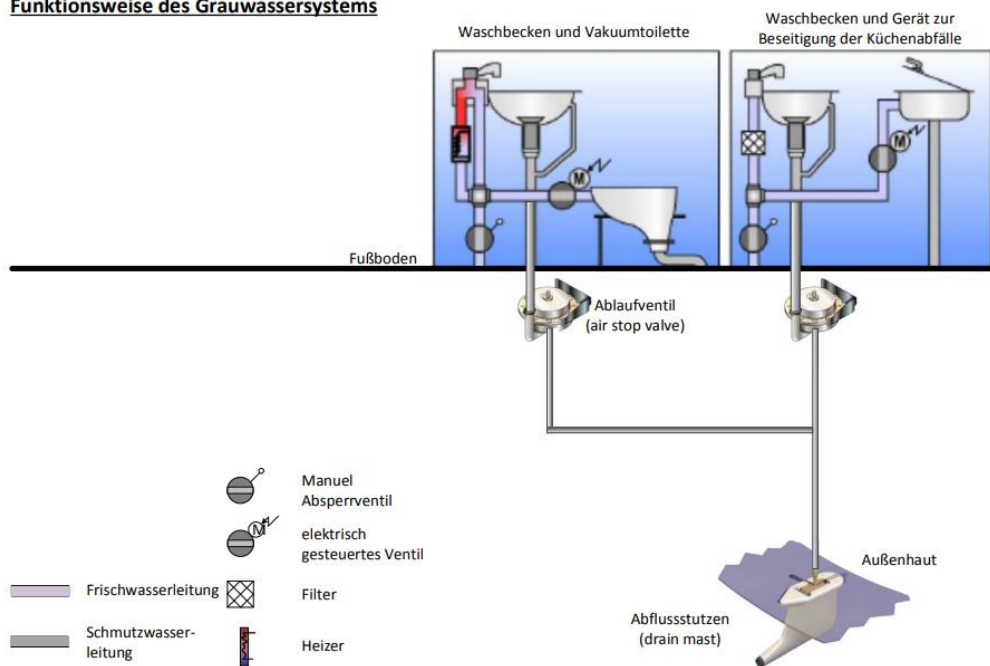


Abbildung 34: Funktionsweise des Grauwassersystems (Hoppen, 2014)

Diese Abbildung zeigt die Funktionsweise des Grauwassersystems, das in Flugzeugen zum Einsatz kommt. Es beschreibt, wie Grauwasser (Abwasser aus Waschbecken und Küchengeräten) gesammelt und abgeführt wird.

1. Waschbecken: Dieses Bauteil ist mit dem Grauwassersystem verbunden. Das Abwasser, das hier ins System gelangt, wird in das Grauwassersystem geleitet.
2. Ablaufventil (air stop valve): Ein Ventil, das den Wasserfluss reguliert und sicherstellt, dass das Grauwasser in die richtige Richtung fließt.
3. Schmutzwasserleitung (grau): Diese Leitung führt das Grauwasser von den Komponenten zu den Abläufen und dem Entsorgungspunkt.
4. Abflusstutzen (drain mast): Der Punkt, an dem das Grauwasser aus dem System abgeführt wird, in der Regel über Bord, um es sicher in die Umwelt zu leiten.
5. Manuelles Absperrventil und elektrisch gesteuertes Ventil: Diese Ventile regulieren den Fluss des Abwassers und bieten eine manuelle oder automatische Steuerung.

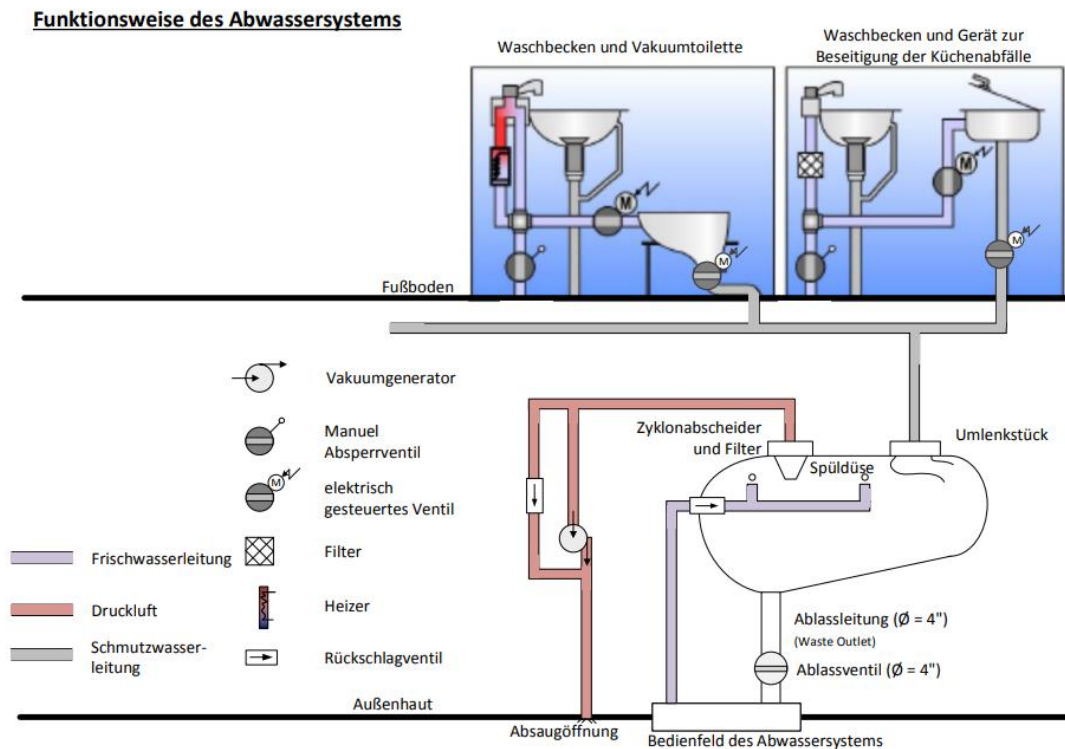


Abbildung 35: Funktionsweise des Abwassersystems (Hoppen, 2014)

Diese Abbildung zeigt die Funktionsweise eines Abwassersystems, das in einem Flugzeug verwendet wird. Es stellt dar, wie Abwasser aus verschiedenen Quellen verarbeitet und abgeführt wird.

1. Vakuumtoilette: Dieses Bauteil ist mit dem Abwassersystem verbunden und leitet das Abwasser in einen Abwassertank. Ein Wasserventil steuert den Wasserfluss zwischen den Komponenten.
2. Vakuumgenerator: Ein Gerät, das ein Vakuum erzeugt, um das Abwasser aus den angeschlossenen Komponenten zu befördern und in das Abwassersystem zu leiten.
3. Zyklonabscheider und Filter: Der Zyklonabscheider trennt feste Bestandteile aus dem Abwasserstrom. Der Filter sorgt dafür, dass keine festen oder flüssigen Bestandteile aus dem Abwasser in den nächsten Teil des Systems gelangt.
4. Spüldüse: Ein Teil des Systems, das zur Reinigung des Systems durch das Bodenpersonal verwendet wird.
5. Druckluftleitung: Eine Leitung, die Unterdruck verwendet, um das Abwasser durch das System zu transportieren.

6. Umlenkstück: Ein Bauteil, das den Abwasserfluss umleitet, sodass Bestandteile nicht mit voller Wucht die Tankwand treffen.
7. Ablassleitung (Ø 4"): Eine Leitung, die das Abwasser nach außen abführt.
8. Ablassventil (Ø 4"): Ein Ventil, das den Abfluss des Abwassers regelt und sicherstellt, dass das Abwasser korrekt abgeführt wird.
9. Manuelles Absperrventil und elektrisch gesteuertes Ventil: Diese Ventile kontrollieren den Wasserfluss und können entweder manuell oder automatisch betätigt werden.
10. Rückschlagventil: Ein Ventil, das den Rückfluss von Luft in das System verhindert.
11. Bedienfeld des Abwassersystems: Ein Steuerpanel, über das das Abwassersystem überwacht und gesteuert wird.

## Anhang A2

Wenn ein Raspberry Pi für überwachende Tätigkeiten oder das Weiterleiten von Signalen verwendet wird, in diesem Fall der Ventilsteuerung, kann von etwa 5 Watt Verbrauch ausgehen werden. Dies basiert auf dem Strombedarf im Leerlauf, bei dem die CPU wenig beansprucht wird und keine rechenintensiven Aufgaben ausgeführt werden. Messungen zeigen, dass der Raspberry Pi unter solchen Bedingungen typischerweise zwischen 5 und 6 Watt benötigt (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Gemessene Leistungswerte eines Pi 3

Zustand	Strom (A)	Leistung (W)
Idle / niedrige Last	0,54	2,7
Mittlere Last	1,01	5,1
Hohe Last	1,28	6,4

Dieser Kleincomputer kann weitaus mehr Leistung beanspruchen bei anspruchsvolleren Tätigkeiten, weshalb im Datenblatt auch eine höhere Eingangsleistung angegeben ist (siehe Abbildung 36). Diese Leistung wurde auch für die Simulation herangezogen.

## Specification

<b>Processor:</b>	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4 GHz
<b>Memory:</b>	512MB LPDDR2 SDRAM
<b>Connectivity:</b>	2.4 GHz and 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE 1 × USB 2.0 port
<b>Access:</b>	Extended 40-pin GPIO header
<b>Video &amp; sound:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 × full size HDMI</li><li>• MIPI DSI display port</li><li>• MIPI CSI camera port</li><li>• 4 pole stereo output and composite video port</li></ul>
<b>Multimedia:</b>	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
<b>SD card support:</b>	Micro SD format for loading operating system and data storage
<b>Input power:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 5 V/2.5 A DC via micro USB connector</li><li>• 5 V DC via GPIO header</li></ul>
<b>Environment:</b>	Operating temperature, 0–50°C
<b>Compliance:</b>	For a full list of local and regional product approvals, please visit <a href="http://pip.raspberrypi.com">pip.raspberrypi.com</a>
<b>Production lifetime:</b>	Raspberry Pi 3 Model A+ will remain in production until at least January 2030

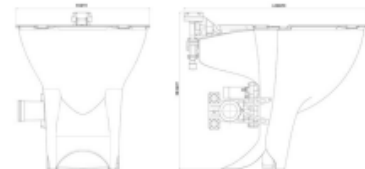
Abbildung 36: Datenblattauszug Pi 3 (Raspberry Pi Foundation, 2025)

## Anhang A3

Ein Datenblatt der Toilette wurde von Diehl Aviation bereitgestellt, um die für einen Spülvorgang benötigte Energie nachvollziehen zu können (siehe Abbildung 37).

### InnoLite Toilet Assembly

Next-generation aircraft toilet with innovative design and minimum weight



### Technical Data

#### DIMENSIONS & WEIGHT

Length [mm/inch]	Height [mm/inch]	Width [mm/inch]	Weight [kg/lb]
515/20.3 (maximum)	427/16.8 (maximum)	360/14.2 (maximum)	3.96/8.7 (maximum)

#### MECHANICAL INTERFACES

Mounting holes for floor mounting

Bowl rim is interface to shroud on top

#### ELECTRICAL INTERFACES

Power Supply	28VDC - 0.12A quiescent current standby cycle (28VDC), - 3.45A operating current during flush cycle (28VDC), - 4.5A motor inrush current (28VDC)
Connector type to aircraft	EN3646 RS 7 1415 MN and EN3646 RS 7 1419 FN

#### HYDRAULIC INTERFACES

Quick disconnect interface for potable water according to ABS0395 C3-08

Quick disconnect interface for vacuum supply according to ABS0395 C2-32

#### OPERATIONAL TIMINGS

Power-up time: <= 10 sec

#### PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Top of bowl withstands weight of 200 kg minimum	Normal operating pressure range of potable water: 35-40 psig
Usable capacity of bowl is 10 litres minimum	Proof pressure of potable water 188 psig
Rinsing water quantity 0.17 litres maximum per flush	Freeze-resistant water valve

Abbildung 37: Datenblattauszug InnoLite Toilet (Diehl InnoLite, 2018)

### Anhang A4

Für das Ventil des Wasserhahns wurde ein Datenblatt von Water-Guard Industries Inc. herangezogen (siehe Abbildung 38).

International Water-Guard Industries Inc. (IWG) as the world leader in onboard UV potable water treatment and water protection on aircraft continues introducing innovative water system solutions to the industry. IWG's mission is to develop water system components that improve performance and contribute to a reduction in the weight of an aircraft for OEM aircraft manufacturers, commercial airlines and completion centers worldwide.

We are proud to introduce the "Featherweight" (FW) Motor Operated Valve series. It is based on a robust design that has over 20,000 units in service today in business jet water systems. The FW valves are a lighter weight derivative of the in-service valve achieved by redesigning the actuator housing assembly into a single part. IWG is offering the FW valves at competitive prices with industry best lead-times.

## PHYSICAL

- Overall Dimensions:  
 High: 4.2" (107mm)  
 Wide: 3.2" (81mm)  
 Deep: 2.6" (51mm)  
 Net Weight Dry: 1.2-1.7 lb (0.55-0.77 kg)  
 Hydraulic Interface: AS1656, AS33514 (Clamshell & Straight Thread)  
 Port Configuration and Size: 2, 3 or 4 way  
 3/8", 1/2", 3/4"  
 Positions: 2 or 3.

## PERFORMANCE

- Flow Rate vs Delta P: 2 gpm (7.4 lpm) MIN at 0.5 psid MAX  
 Temperature, Non-Operational: -40F to 158F (-40C to 70C)  
 Pressure, Operational: 60 psig MAX  
 Rotation Time: 0.1 -1.5 secs  
 Torque: nominal 15 in-lbf (1.7 Nm), stall 45 in-lb (5.1 Nm)  
 MTBF: 45,000 hours  
 Protection: self-protecting electronic clutch with original command memory, 115 VAC input protection

## ELECTRICAL

- Input Voltage: 16-32 VDC  
 Power: nominal 11W  
 Nominal Current Draw: 0.4A (2.5A Stall)  
 Electrical Interface: D38999/20MB35P

### QUALIFICATION PLAN MATRIX

Test	DO-160G	Method
Endurance	n/a	Test
Burst Pressure	n/a	Similarity
Proof Pressure	n/a	Test
Temperature	Section 4, Category A3	Test
Altitude	Section 4, Category A3	Test
Temperature Variation	Section 5, Category B	Test
Operational Shock & Crash Safety	Section 7, Category B	Test
Vibration	Section 8, Category S Curve C	Test
Humidity	Section 6, Category A	Test
Waterproofness	Section 10, Category W	Test
Fluids Susceptibility	Section 11, Category F	Analysis
Fungus Resistance	Section 13, Category F	Analysis
Magnetic Affects	Section 15, Class A	Test
Power Input	Section 16, Category Z	Similarity
Voltage Spike	Section 17, Category A	Similarity
Audio Frequency	Section 18, Category Z	Similarity
Conducted Susceptibility		
Induced Signal	Section 19, Category ZC	Similarity
Susceptibility		
Radio Frequency Susceptibility	Section 20, Category T	Similarity
Emissions of Radio Frequency Energy	Section 21, Category M	Test
Lighting Induced Transient Effects	Section 22, Category A3E3XX	Similarity
Electrostatic Discharge	Section 25 Category A	Test
Fire, Flammability	Section 26, Category C	Analysis

Abbildung 38: Datenblattauszug Watervalue (International Water-Guard Industries Inc., 2018)

**Anhang A5**

Für die Simulation wurde sich an Daten von Diehl Aviation und diesem Datenblatt von International Water-Guard Industries Inc. orientiert (siehe Abbildung 39).

### INNOVATION


**IWG-HE-Flow Through Heater**

Uses a flow-through heater configuration that improves the heating process and reduces scale build-up.


Complies with OSHA recommendations for heated vessels to operate at temperatures that kill Legionella, Pseudomonas Aeruginosa, and other pathogens.

Existing heaters operate at temperatures that allow pathogens to grow and establish biofilms.

Thermal mixing valve provides precise control of outlet water temperature to the faucet.



Same 4" Diameter



"T" Adjustment

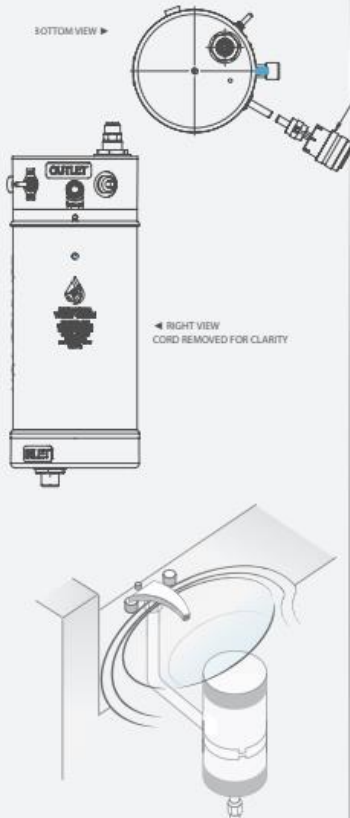
Tank  
Dry Wt: 3.2 lbs (1.4 kg)

Flow-through heater

Inlet water  
55-60 °F (13-16°C)

Cold water is drawn through the heater

**IWG-HE-SERIES**



Bottom view

RIGHT VIEW  
CORD REMOVED FOR CLARITY

ELECTRICAL CONNECTOR  
BACC45FT14C7P  
SEE NOTE 4 FOR PIN ARRANGEMENT

## PHYSICAL

- Max Net Dry Weight: 3.2 lbs (1.4 Kg)
- Wet Weight: 5.6 lbs (2.5 Kg)
- Volume: 0.29 Gal (1.1 L)
- Hydraulic Interface: SAE AS33514G6 (Flareless)

## PERFORMANCE

- Inlet Pressure: 12-25 psig
- Nominal Flow Rate: Up to 1.0 GPM
- Adjustable Temperatures: 90-130°F (32-54 °C)

## ELECTRICAL

- Input Voltage: 115 VAC 60 -800 Hz
- Current Draw: 3.65A (420W) / 1.83A (210W)
- Electrical Interface: BACC45FT14C7P | 420W  
MS3676A10-6P | 210W

## INSTALLATION

- Drop-in replacement, LAV mod not required

International Water-Guard Industries Inc.  
Building #7 - 15050 - 54A Avenue | Surrey, BC, V3S 5X7, Canada  
P 604.255.5555 | F 604.255.5685 | info@water.aero | www.water.aero

## BENEFITS

- Faster recovery time
- Longer hot water flow times
- Reduced scale build up
- Smaller, optimized size
- Weight reduced unit
- Safer operation temperature

## QUALIFICATION

- DO-160G Qualified
- Meets OSHA Hot Water Safe Operating Temperature
- NSF61 Compliant
- PMA Certification

## PERFORMANCE

- Heats faster with 60% improvement in recovery time
- Provides 50% longer hot water flow
- Full tank heating cycle reduced 33%

Abbildung 39: Datenblattauszug IWG-HE (International Water-Guard Industries Inc., 2014)

## Anhang A6

Der MATLAB-Code ist hier abgebildet zur Nachvollziehbarkeit des Simulationsaufbaus.

```

clc; clear; close all;

%% Parameter
cfg.seats          = 180;
cfg.load_factor   = 0.90;
cfg.pax           = cfg.seats * cfg.load_factor; % 162
cfg.buffer_frac   = 0.10;

% Tankvolumen (Grenzwerte) Startfüllung = 200 L
cfg.tank_fresh_L  = 200;
cfg.tank_waste_L  = 180;

% Flugzeiten in Std
cfg.durations_h   = [2 4 8];

% Nutzung (U, V) und Urin/void (L)
cfg.U_low         = [0.15 0.45 0.75];
cfg.U_high        = [0.30 0.60 0.90];
cfg.V_low         = [1.00 1.20 2.00];
cfg.V_high        = [1.00 1.80 2.50];
cfg.urine_L_low   = [0.26 0.28 0.30];
cfg.urine_L_high  = [0.30 0.32 0.34];

% Wasserverbrauch
cfg.flush_L_per_void      = 0.150; % L Frisch+Abfall
cfg.handwash_share       = 0.80; % Anteil Voids mit Händewaschen
cfg.faucet_L_per_act      = 0.125; % L pro Hahnbetätigung (eigentlich 125mL,
    aber manchmal wird 2x gewaschen)
cfg.solid_prob            = [0.05 0.10 0.40]; % passagiere die groß müssen in % (250g
    Masse)
cfg.solid_L_per_event     = 0.250; % gleich 250g

% Im Gespräch mit Diehl Aviation wurde eingeworfen, dass bei längeren
% Flügen Passagiere gerne das Bad zum Zähneputzen nutzen möchten.

% Zusatzverbräuche
cfg.brushing_share_long  = 0.25; % ab 4h putzen 25% der Passagiere ihre
    Zähne
cfg.brushing_acts_per_pax = 2; % 2 Hahnaktivierungen fallen dabei an
cfg.galley_drink_share_pax = 0.35; % 35% der Passagiere trinken Kaffee aus der
    Bordküche
cfg.galley_drink_L_per_pax = 0.250; % 250ml pro Getränk
cfg.galley_clean_L_per_h  = 2.0; % L/Std zur Reinigung der Galley oder
    sonstigen Verbräuchen
cfg.crew_L_per_h         = 1.0; % L/Std Wasserbedarf der Crew

% Energie
pwr.P_ctrl_W           = 5 * 2.5; % 5V * 2.5A Controller (Annahme war ein Raspberry Pi)
% Ventile
pwr.faucet_P_W         = 28 * 0.4; % 28 V * 0,4 A zur Ventilöffnung am Wasserhahn für 5s
pwr.faucet_t_s         = 5.0; % in s
pwr.flush_P_W          = 28 * 3.45; % 28 V * 3,45 A bei WC-Ventilöffnung für 1s
pwr.flush_t_s          = 1.0; % in s
% Unterdruckgenerator
pwr.P_vacgen_W         = 250.0; % 250W für jeweils 30min zu Beginn und Ende der Flugzeit
pwr.vac_runtime_h      = 1.0; % Std pro Flug (Flughöhe zur Nutzung der
    Umgebungsdruckunterschiede muss erst erreicht werden)

% Heizer
boil.volume_L          = 2.2; % Boilervolumen in L (2x 1,1L da 2 Lavatories existieren)
boil.T_in_C            = 18; % Zulauftemp in °C
boil.T_out_C           = 35; % Zieltemp in °C
boil.T_amb_C           = 22; % Kabinentemp in °C
boil.c_p_kJkgK         = 4.18; % spez. Wärmekapazität von Wasser
boil.eta_heater        = 0.90; % Heizerwirkungsgrad
boil.h_conv_Wm2K       = 7.0; % Konvektion

```

```

boil.epsilon      = 0.90;          % Emissionsgrad
boil.area_m2     = 0.25;          % angenommene Oberfläche Heizer
boil.sigma_Wm2K4 = 5.67e-8;      % Boltzmann Konstante
boil.warm_share_hwash = 0.70;    % 70% der Händewaschen mit Warmwasser
boil.loss_cycle_min = 20;        %angenommener „heiß“-Zeitraum pro Heizzyklus in min

%Emissionen und Kosten
eco.CO2_per_kg_fuel = 3.15;      % kgCO2 pro kgTreibstoff
eco.fuel_cost_EURkg = 0.80;     % € pro kg
eco.LHV_MJkg      = 43.0;       % MJ pro kg
eco.eta_gen       = 0.35;       % Wirkungsgrad APU

%!!Annahme wählen!!
eco.mass_fuel_per_hour.enabled = true; %true: kg Treibstoff pro (kg*Std) oder
false: kg Treibstoff pro kg pro Flug
eco.mass_fuel_per_hour.value = 0.03; %kg Treibstoff pro (kg * Flugstunde)
(Dauer-Skalierung)
eco.mass_fuel_per_flight = 0.03; %kg Treibstoff pro kg pro Flug (Auf den
Flug bezogen)

%% Hilfwerte
% Energie je Ventilaktivierung (J)
aux.E_faucet_J = pwr.faucet_P_W * pwr.faucet_t_s; % 30W*5s = 150 J
aux.E_flush_J = pwr.flush_P_W * pwr.flush_t_s; % 30W*1s = 30 J

% Heizer-Verluste: Berechnung Verlustenergie pro Liter Warmwasser
% Annahme: Für jede komplette Boilervollladung ist der Heizer im Mittel
% etwa 'loss_cycle_min' Minuten heiß und gibt dabei Wärme ab
T_hot_K = boil.T_out_C + 273.15;
T_amb_K = boil.T_amb_C + 273.15;
Q_conv_W = boil.h_conv_Wm2K * boil.area_m2 * (boil.T_out_C - boil.T_amb_C);
Q_rad_W = boil.epsilon * boil.sigma_Wm2K4 * boil.area_m2 * (T_hot_K^4 - T_amb_K^4);
aux.Q_loss_W = max(0, Q_conv_W + Q_rad_W); % W

% Verluste pro Liter Warmwasser (kWh/L) überZyklus:
loss_cycle_h = boil.loss_cycle_min / 60; % Std
aux.E_loss_kWh_per_L = (aux.Q_loss_W * loss_cycle_h) / (1000 * boil.volume_L);

% Energie pro Liter Warmwasser (Wh/L)
dT = boil.T_out_C - boil.T_in_C;
aux.E_heat_Wh_per_L = (1.0 * boil.c_p_kJkgK * dT) / boil.eta_heater / 3.6; %Umrechnung von kJ pro L
in Wh pro L

%% Hauptrechnung
res = compute_ranges(cfg); % Low/High-Volumen der Toiletten
extra = compute_extras(cfg, res); % Zusatzfrischwasser
sumdet = sum_volumes(cfg, res, extra); % Gesamtes Frisch- und Abwasservolumen

%Energie, CO2 & Kosten
[dets, co2, cost] = energy_and_impact(cfg, res, extra, aux, boil, eco, pwr, sumdet);

%% Meldung
%Wenn das Tankvolumen überschritten wird gibt das Skript eine Warnung aus
for i = 1:numel(cfg.durations_h)
    if sumdet.fresh_L_high(i) > cfg.tank_fresh_L
        warning('Frischwasserlimit überschritten (%dh): High=%.1f L > %d L', ...
            cfg.durations_h(i), sumdet.fresh_L_high(i), cfg.tank_fresh_L);
    end
    if sumdet.waste_L_high(i) > cfg.tank_waste_L
        warning('Abfalltanklimit überschritten (%dh): High=%.1f L > %d L', ...
            cfg.durations_h(i), sumdet.waste_L_high(i), cfg.tank_waste_L);
    end
end

%% Farbkodierung
% Energie
colE.ctrl = [0.00 0.45 0.74]; % Controller
colE.faucet_low = [0.30 0.75 0.93]; % Hahn Low
colE.faucet_high = [0.00 0.70 0.30]; % Hahn High
colE.flush_low = [0.93 0.69 0.13]; % Spül Low
colE.flush_high = [0.85 0.33 0.10]; % Spül High
colE.boil_heat_low = [0.49 0.18 0.56]; % Heizen Low
colE.boil_heat_high = [0.64 0.08 0.18]; % Heizen High
colE.boil_loss_low = [0.60 0.60 0.60]; % Verluste Low
colE.boil_loss_high = [0.70 0.70 0.70]; % Verluste High
colE.vac = [0.47 0.25 0.80]; % Unterdruckgenerator

```

```

colE.total_low    = [0.20 0.20 0.20]; % Total Low
colE.total_high  = [0.80 0.20 0.20]; % Total High

% Wasser-/Waste
colW.fresh_low   = [0.68 0.85 0.90];
colW.fresh_high  = [0.00 0.60 0.80];
colW.waste_low   = [0.80 0.70 0.60];
colW.waste_high  = [0.50 0.30 0.10];

% CO2
colC.elec_low    = [0.30 0.75 0.93];
colC.elec_high   = [0.00 0.45 0.74];
colC.mass_low    = [0.85 0.33 0.10];
colC.mass_high   = [0.93 0.69 0.13];
colC.total_low   = [0.20 0.20 0.20];
colC.total_high  = [0.80 0.20 0.20];

%% Plots

% Mithilfe von addBarLabels(...) können die Werte über den Säulen
% ausgegeben werden, falls gewollt. Am Ende des Skripts können noch
% Einstellungen an dieser Funktion gemacht werden

% Wasser/Abfall (L)
figure('Name','Wasser & Abfall (L)','Color','w');
vals1 = [sumdet.fresh_L_low', sumdet.fresh_L_high', sumdet.waste_L_low', sumdet.waste_L_high'];
b1 = bar(vals1,'grouped');
xticklabels(strcat(string(cfg.durations_h), " h"));
ylabel('Liter');
legend({'Frisch Low','Frisch High','Abfall Low','Abfall High'}, 'Location','northwest');
title('A320 Water/Waste Volumen inkl. Puffer');
grid on; box off;

% Farben
b1(1).FaceColor = colW.fresh_low;
b1(2).FaceColor = colW.fresh_high;
b1(3).FaceColor = colW.waste_low;
b1(4).FaceColor = colW.waste_high;

%addBarLabels(b1);

% Energie mit ohne Heizer & Generator
figure('Name','Energie mit Heizer & Generator (kWh)','Color','w');
vals2 = [ ...
    dets.E_ctrl_kWh', dets.E_faucet_low_kWh', dets.E_faucet_high_kWh', dets.E_flush_low_kWh',
    dets.E_flush_high_kWh', ...
    dets.E_boiler_heat_low_kWh', dets.E_boiler_heat_high_kWh', dets.E_boiler_loss_low_kWh',
    dets.E_boiler_loss_high_kWh',...
    dets.E_vacgen_kWh', dets.E_total_low_withH_kWh', dets.E_total_high_withH_kWh'...
];
b2 = bar(vals2,'grouped');
xticklabels(strcat(string(cfg.durations_h), " h"));
ylabel('kWh');
legend({ ...
    'Controller','Hahn Low','Hahn High', 'Spül Low','Spül High','Heizen Low','Heizen High', ...
    'Heizer Verluste Low','Heizer Verluste High', 'Unterdruckgen.','Total Low (mit H & G)','Total
    High (mit H & G)'}, ...
    'Location','northwest');
title('A320 Energie mit Heizer & Generator');
grid on; box off;

% Farben
b2(1).FaceColor = colE.ctrl;
b2(2).FaceColor = colE.faucet_low;
b2(3).FaceColor = colE.faucet_high;
b2(4).FaceColor = colE.flush_low;
b2(5).FaceColor = colE.flush_high;
b2(6).FaceColor = colE.boil_heat_low;
b2(7).FaceColor = colE.boil_heat_high;
b2(8).FaceColor = colE.boil_loss_low;
b2(9).FaceColor = colE.boil_loss_high;
b2(10).FaceColor = colE.vac;
b2(11).FaceColor = colE.total_low;
b2(12).FaceColor = colE.total_high;

%addBarLabels(b2);

```

```

% Energie ohne Heizer & Generator
figure('Name','Energie ohne Heizer & Generator (kWh)','Color','w');
vals3 = [ ...
    dets.E_ctrl_kWh,dets.E_faucet_low_kWh',
dets.E_faucet_high_kWh',dets.E_flush_low_kWh',dets.E_flush_high_kWh', ...
    dets.E_total_low_noH_kWh', dets.E_total_high_noH_kWh' ...
];
b3 = bar(vals3,'grouped');
xticklabels(strcat(string(cfg.durations_h), " h"));
ylabel('kWh');
legend({ ...
    'Controller','Hahn Low','Hahn High', 'Spül Low','Spül High','Total Low (ohne H & G)','Total
High (ohne H & G)'},...
    'Location','northwest');
title('A320 Energie ohne Heizer & Generator');
grid on; box off;

% Farben
b3(1).FaceColor = colE.ctrl;
b3(2).FaceColor = colE.faucet_low;
b3(3).FaceColor = colE.faucet_high;
b3(4).FaceColor = colE.flush_low;
b3(5).FaceColor = colE.flush_high;
b3(6).FaceColor = colE.total_low;
b3(7).FaceColor = colE.total_high;

%addBarLabels(b3);

% CO2 (Elektrisch, Masse, Total (kg))
tol = 1e-6;
if any(abs(co2.total_low_kg - (co2.mass_low_kg + co2.elec_low_withH_kg)) > tol) ||...
    any(abs(co2.total_high_kg - (co2.mass_high_kg + co2.elec_high_withH_kg)) > tol)
    warning('CO2-Total stimmt nicht exakt mit Masse+Elektrik überein (numerische Abweichung oder
Berechnungsfehler).');
end

figure('Name','CO2 [Elektrisch, Masse, Total (kg)]','Color','w');
vals4 = [ ...
    co2.elec_low_withH_kg', co2.elec_high_withH_kg',co2.mass_low_kg',co2.mass_high_kg',...
    co2.total_low_kg',co2.total_high_kg'...
];
b4 = bar(vals4,'grouped');
xticklabels(strcat(string(cfg.durations_h), " h"));
ylabel('kg CO_2');
legend({'Elektrisch Low','Elektrisch High','Masse Low','Masse High','Total Low','Total High'}, ...
    'Location','northwest');
title('A320 CO_2-Ausstoß (Elektrisch, Masse & Total)');
grid on; box off;

% Farben
b4(1).FaceColor = colC.elec_low;
b4(2).FaceColor = colC.elec_high;
b4(3).FaceColor = colC.mass_low;
b4(4).FaceColor = colC.mass_high;
b4(5).FaceColor = colC.total_low;
b4(6).FaceColor = colC.total_high;

%addBarLabels(b4);

%% Tabelle
Tabelle = table(cfg.durations_h', sumdet.fresh_L_low', sumdet.fresh_L_high', sumdet.waste_L_low',
sumdet.waste_L_high',...
    dets.E_total_low_withH_kWh', dets.E_total_high_withH_kWh', dets.E_total_low_noH_kWh',
dets.E_total_high_noH_kWh',...
    co2.mass_low_kg', co2.mass_high_kg', co2.elec_low_withH_kg', co2.elec_high_withH_kg',
co2.total_low_kg', co2.total_high_kg',...
    cost.fuel_withH_low_EUR', cost.fuel_withH_high_EUR', cost.fuel_noH_low_EUR',
cost.fuel_noH_high_EUR',...
    'VariableNames', {'Dauer_h', 'Fresh_L_Low', 'Fresh_L_High', 'Waste_L_Low', 'Waste_L_High',...
%Masse
    'E_kWh_Low_mitH', 'E_kWh_High_mitH', 'E_kWh_Low_ohneH', 'E_kWh_High_ohneH',...
%Energie
    'CO2_Masse_Low', 'CO2_Masse_High', 'CO2_Elekt_mitH_Low', 'CO2_Elekt_mitH_High', 'CO2_Total_Low', 'CO2_
Total_High',...
    %CO2

```

```

'FuelCost_mitH_Low_EUR', 'FuelCost_mitH_High_EUR', 'FuelCost_ohneH_Low_EUR', 'FuelCost_ohneH_High_EUR'
});
                                %Kosten
disp('Ergebnisse (inkl. Puffer & Zusatzverbräuche)');
disp(Tabelle);

%% Printout
fprintf('\n Daten pro Flugdauer (Low/High) \n');
for i = 1:numel(cfg.durations_h)
    dur = cfg.durations_h(i);

    % Zählwerte
    voids_lo = res.voids_low(i);
    voids_hi = res.voids_high(i);
    hw_acts_lo = extra.handwash_acts_low(i);
    hw_acts_hi = extra.handwash_acts_high(i);
    brush_acts = extra.brush_valve_acts(i);

    % Warmwasser (nur Anteil HW, kein Zähneputzen)
    hot_L_lo = hw_acts_lo * boil.warm_share_hwash * cfg.faucet_L_per_act;
    hot_L_hi = hw_acts_hi * boil.warm_share_hwash * cfg.faucet_L_per_act;

    % Fresh
    fresh_start = cfg.tank_fresh_L;
    fresh_used_lo = sumdet.fresh_L_low(i);
    fresh_used_hi = sumdet.fresh_L_high(i);
    fresh_end_lo = max(0, fresh_start - fresh_used_lo);
    fresh_end_hi = max(0, fresh_start - fresh_used_hi);

    fresh_avg_lo = 0.5*(fresh_start + fresh_end_lo);
    fresh_avg_hi = 0.5*(fresh_start + fresh_end_hi);
    waste_avg_lo = 0.5*sumdet.waste_L_low(i);
    waste_avg_hi = 0.5*sumdet.waste_L_high(i);

    % Einfluss Masse auf Treibstoff
    if eco.mass_fuel_per_hour.enabled
        fuel_mass_lo = (fresh_avg_lo + waste_avg_lo) * eco.mass_fuel_per_hour.value * dur;
        fuel_mass_hi = (fresh_avg_hi + waste_avg_hi) * eco.mass_fuel_per_hour.value * dur;
        interpTxt = sprintf('kg fuel = (kg_avg * %.3f * %dh)', eco.mass_fuel_per_hour.value, dur);
    else
        fuel_mass_lo = (fresh_avg_lo + waste_avg_lo) * eco.mass_fuel_per_flight;
        fuel_mass_hi = (fresh_avg_hi + waste_avg_hi) * eco.mass_fuel_per_flight;
        interpTxt = sprintf('kg fuel = (kg_avg * %.3f pro Flug)', eco.mass_fuel_per_flight);
    end

    % Elektrik mit H & G (Treibstoff & CO2)
    E_withH_lo = dets.E_total_low_withH_kWh(i);
    E_withH_hi = dets.E_total_high_withH_kWh(i);
    fuel_elec_withH_lo = (E_withH_lo * 3.6) / (eco.eta_gen * eco.LHV_MJkg);
    fuel_elec_withH_hi = (E_withH_hi * 3.6) / (eco.eta_gen * eco.LHV_MJkg);

    CO2_mass_lo = fuel_mass_lo * eco.CO2_per_kg_fuel;
    CO2_mass_hi = fuel_mass_hi * eco.CO2_per_kg_fuel;
    CO2_elec_lo = fuel_elec_withH_lo * eco.CO2_per_kg_fuel;
    CO2_elec_hi = fuel_elec_withH_hi * eco.CO2_per_kg_fuel;

    % Falls Masse 0 wäre, Hinweis ausgeben!!
    if CO2_mass_lo < 1e-9 && CO2_mass_hi < 1e-9
        warning('Masse-CO2 ist ~0 bei %dh. Prüfe Fresh/Waste-Profile und eco.mass_fuel_'
Parameter!', dur);
    end

    fprintf('\n%d Std Flugzeit \n', dur);
    fprintf('Voids: Low = %.1f High = %.1f / Händewaschvorgänge: Low = %.1f High = %.1f /
Zähneputzvorgänge = %.1f\n', voids_lo, voids_hi, hw_acts_lo, hw_acts_hi, brush_acts);
    fprintf('Warmwasser nur HW (70%): Low = %.2f L High = %.2f L\n', hot_L_lo, hot_L_hi);
    fprintf('Frischwassernutzung: Low = %.1f L High = %.1f L / Reserven: Low = %.1f L High = %.1f
L\n', fresh_used_lo, fresh_used_hi, fresh_end_lo, fresh_end_hi);
    fprintf('Masse (Durchschnitt): Wasser Low = %.1f kg High = %.1f kg / Abfall Low = %.1f kg High =
%.1f kg\n', fresh_avg_lo, fresh_avg_hi, waste_avg_lo, waste_avg_hi);
    fprintf('Einfluss Masse auf Treibstoff (%s): Low = %.3f High = %.3f kg\n', interpTxt,
fuel_mass_lo, fuel_mass_hi);
    fprintf('Elektrik: E_low = %.3f kWh E_high = %.3f kWh / Fuel_low = %.3f kg Fuel_high = %.3f
kg\n', E_withH_lo, E_withH_hi, fuel_elec_withH_lo, fuel_elec_withH_hi);
    fprintf('CO2 Masse: Low = %.3f kg High = %.3f kg / CO2 Elektrik: Low = %.3f kg High = %.3f
kg\n', CO2_mass_lo, CO2_mass_hi, CO2_elec_lo, CO2_elec_hi);

```

```

    fprintf('CO2 total: Low = %.3f kg High = %.3f kg\n', CO2_mass_lo + CO2_elec_lo, CO2_mass_hi +
CO2_elec_hi);
end

if eco.mass_fuel_per_hour.enabled
    fprintf('\nEinfluss von Masse auf Treibstoff ist "stundenbasiert" (%.3f kg
Treibstoff/(kg*Std)).\n', eco.mass_fuel_per_hour.value);
else
    fprintf('\nEinfluss von Masse auf Treibstoff ist "pro Flug" (%.3f kg Treibstoff/kg).\n',
eco.mass_fuel_per_flight);
end

%% Funktion
function res = compute_ranges(cfg)
% Low/High (Volumenanteile)
    n = numel(cfg.durations_h); pax = cfg.pax;
    res.voids_low = zeros(1,n); res.voids_high = zeros(1,n);
    res.fresh_L_low = zeros(1,n); res.fresh_L_high= zeros(1,n);
    res.waste_L_low = zeros(1,n); res.waste_L_high= zeros(1,n);

    for k = 1:n
        % Low
        users_lo = pax * cfg.U_low(k);
        voids_lo = users_lo * cfg.V_low(k);

        urine_L_lo = voids_lo * cfg.urine_L_low(k);
        flush_L_lo = voids_lo * cfg.flush_L_per_void;
        hand_L_lo = voids_lo * cfg.handwash_share * cfg.faucet_L_per_act;
        solid_L_lo = pax * cfg.solid_prob(k) * cfg.solid_L_per_event;

        res.fresh_L_low(k) = (flush_L_lo + hand_L_lo) * (1 + cfg.buffer_frac);
        res.waste_L_low(k) = (urine_L_lo + flush_L_lo + solid_L_lo) * (1 + cfg.buffer_frac);
        res.voids_low(k) = voids_lo;

        % High
        users_hi = pax * cfg.U_high(k);
        voids_hi = users_hi * cfg.V_high(k);

        urine_L_hi = voids_hi * cfg.urine_L_high(k);
        flush_L_hi = voids_hi * cfg.flush_L_per_void;
        hand_L_hi = voids_hi * cfg.handwash_share * cfg.faucet_L_per_act;
        solid_L_hi = pax * cfg.solid_prob(k) * cfg.solid_L_per_event;

        res.fresh_L_high(k) = (flush_L_hi + hand_L_hi) * (1 + cfg.buffer_frac);
        res.waste_L_high(k) = (urine_L_hi + flush_L_hi + solid_L_hi) * (1 + cfg.buffer_frac);
        res.voids_high(k) = voids_hi;
    end
end

function extra = compute_extras(cfg, res)
% Zusätzliche Frischwasserverbräuche
    n = numel(cfg.durations_h);
    extra.fresh_brush_low = zeros(1,n);
    extra.fresh_brush_high= zeros(1,n);
    extra.fresh_galley = zeros(1,n);
    extra.fresh_crew = zeros(1,n);

    extra.brush_valve_acts = zeros(1,n);
    extra.handwash_acts_low = res.voids_low * cfg.handwash_share;
    extra.handwash_acts_high = res.voids_high * cfg.handwash_share;

    for k = 1:n
        dur = cfg.durations_h(k);
        % Zähneputzen ab 4h mit 25% Passagiere; 2 Hahnaktivierungen mit 0.125 L (kalt)
        if dur >= 4
            brush_pax = cfg.pax * cfg.brushing_share_long;
            acts = brush_pax * cfg.brushing_acts_per_pax;
            extra.fresh_brush_low(k) = acts * cfg.faucet_L_per_act;
            extra.fresh_brush_high(k) = acts * cfg.faucet_L_per_act;
            extra.brush_valve_acts(k) = acts; % Energie fürs Ventil (30W*5s)
        end

        % Getränke (35% Pax) + Reinigung
        drinks_L = cfg.pax * cfg.galley_drink_share_pax * cfg.galley_drink_L_per_pax;
        clean_L = cfg.galley_clean_L_per_h * dur;
        extra.fresh_galley(k) = drinks_L + clean_L;
    end
end

```

```

        % Crewverbrauch
        extra.fresh_crew(k) = cfg.crew_L_per_h * dur;
    end
end

function sumdet = sum_volumes(cfg, res, extra)
% Summiert Frisch-/Waste-Volumen inkl. Puffer
    fresh_low = res.fresh_L_low + extra.fresh_brush_low + extra.fresh_galley + extra.fresh_crew;
    fresh_high = res.fresh_L_high + extra.fresh_brush_high + extra.fresh_galley + extra.fresh_crew;

    sumdet.fresh_L_low = fresh_low;
    sumdet.fresh_L_high = fresh_high;
    sumdet.waste_L_low = res.waste_L_low;
    sumdet.waste_L_high = res.waste_L_high;
end

function [dets, co2, cost] = energy_and_impact(cfg, res, extra, aux, boil, eco, pwr, sumdet)
% Energiebedarf:
% Controller, Spülventil, Hahnventil, Heizer, Heizer-Verluste proportional zur Warmwassernutzung,
Unterdruckgenerator
% CO2:
% Elektrik + Massenmitnahme (200 L Frischwasser ab Start)
    n = numel(cfg.durations_h);

    E_ctrl_kWh = zeros(1,n); E_faucet_low_kWh = zeros(1,n); E_faucet_high_kWh = zeros(1,n);
    E_flush_low_kWh = zeros(1,n); E_flush_high_kWh = zeros(1,n);
    E_boil_heat_low_kWh = zeros(1,n); E_boil_heat_high_kWh = zeros(1,n);
    E_boil_loss_low_kWh = zeros(1,n); E_boil_loss_high_kWh = zeros(1,n);
    E_vacgen_kWh = zeros(1,n);

    CO2_elec_low_withH = zeros(1,n); CO2_elec_high_withH = zeros(1,n);
    CO2_mass_low = zeros(1,n); CO2_mass_high = zeros(1,n);

    fuel_withH_low_kg = zeros(1,n); fuel_withH_high_kg = zeros(1,n);
    fuel_noH_low_kg = zeros(1,n); fuel_noH_high_kg = zeros(1,n);

    fresh_start_L = cfg.tank_fresh_L;

    for k = 1:n
        dur = cfg.durations_h(k);

        % Controller
        E_ctrl_kWh(k) = (pwr.P_ctrl_W * dur) / 1000;

        % Ventil Hahn = (Händewaschen + Zähne putzen) * 150 J
        acts_hw_low = extra.handwash_acts_low(k);
        acts_hw_high = extra.handwash_acts_high(k);
        acts_brush = extra.brush_valve_acts(k);

        E_faucet_low_kWh(k) = ((acts_hw_low + acts_brush) * aux.E_faucet_J) / 3.6e6;
        E_faucet_high_kWh(k) = ((acts_hw_high + acts_brush) * aux.E_faucet_J) / 3.6e6;

        % Ventil Spülung = Voids * 30 J
        E_flush_low_kWh(k) = (res.voids_low(k) * aux.E_flush_J) / 3.6e6;
        E_flush_high_kWh(k) = (res.voids_high(k) * aux.E_flush_J) / 3.6e6;

        % Heizer = 70% nutzen Warmwasser
        hot_L_low = acts_hw_low * boil.warm_share_hwash * cfg.faucet_L_per_act;
        hot_L_high = acts_hw_high * boil.warm_share_hwash * cfg.faucet_L_per_act;

        E_boil_heat_low_kWh(k) = hot_L_low * aux.E_heat_Wh_per_L / 1000;
        E_boil_heat_high_kWh(k) = hot_L_high * aux.E_heat_Wh_per_L / 1000;

        % Heizer-Verluste = proportional zur Warmwassermenge
        if hot_L_low > 0
            E_boil_loss_low_kWh(k) = hot_L_low * aux.E_loss_kWh_per_L;
        else
            E_boil_loss_low_kWh(k) = 0;
        end
        if hot_L_high > 0
            E_boil_loss_high_kWh(k) = hot_L_high * aux.E_loss_kWh_per_L;
        else
            E_boil_loss_high_kWh(k) = 0;
        end
    end
end

```

```

% Unterdruckgenerator
E_vacgen_kWh(k) = (pwr.P_vacgen_W * pwr.vac_runtime_h) / 1000;

% Totals mit H & G
E_total_low_withH = E_ctrl_kWh(k) + E_faucet_low_kWh(k) + E_flush_low_kWh(k) +
E_boil_heat_low_kWh(k) + E_boil_loss_low_kWh(k) + E_vacgen_kWh(k);
E_total_high_withH = E_ctrl_kWh(k) + E_faucet_high_kWh(k) + E_flush_high_kWh(k) +
E_boil_heat_high_kWh(k) + E_boil_loss_high_kWh(k) + E_vacgen_kWh(k);

% Totals ohne H & G
E_total_low_noH = E_ctrl_kWh(k) + E_faucet_low_kWh(k) + E_flush_low_kWh(k);
E_total_high_noH = E_ctrl_kWh(k) + E_faucet_high_kWh(k) + E_flush_high_kWh(k);

% Elektrik, Treibstoff, CO2 (mit Heizer & Generator)
fuel_elec_low_withH = (E_total_low_withH * 3.6) / (eco.eta_gen * eco.LHV_MJkg);
fuel_elec_high_withH = (E_total_high_withH * 3.6) / (eco.eta_gen * eco.LHV_MJkg);

CO2_elec_low_withH(k) = fuel_elec_low_withH * eco.CO2_per_kg_fuel;
CO2_elec_high_withH(k) = fuel_elec_high_withH * eco.CO2_per_kg_fuel;

% Massenmitnahme
fresh_used_low_L = sumdet.fresh_L_low(k);
fresh_used_high_L = sumdet.fresh_L_high(k);

% Startfüllung 200 L
fresh_end_low_L = max(0, fresh_start_L - fresh_used_low_L);
fresh_end_high_L = max(0, fresh_start_L - fresh_used_high_L);

% Durchschnittliche Fresh/Waste-Massen (kg) [Dichte angenommen mit 1 kg/L]
fresh_avg_low_kg = 0.5 * (fresh_start_L + fresh_end_low_L);
fresh_avg_high_kg = 0.5 * (fresh_start_L + fresh_end_high_L);

waste_avg_low_kg = 0.5 * sumdet.waste_L_low(k);
waste_avg_high_kg = 0.5 * sumdet.waste_L_high(k);

% Durchschnittliche Masse
avg_mass_low_kg = fresh_avg_low_kg + waste_avg_low_kg;
avg_mass_high_kg = fresh_avg_high_kg + waste_avg_high_kg;

% Sicherung gegen negative/NaN
avg_mass_low_kg = max(avg_mass_low_kg, 0);
avg_mass_high_kg = max(avg_mass_high_kg, 0);

% Einfluss Masse auf Treibstoff
if eco.mass_fuel_per_hour.enabled
    fuel_mass_low_kg = avg_mass_low_kg * eco.mass_fuel_per_hour.value * dur;
    fuel_mass_high_kg = avg_mass_high_kg * eco.mass_fuel_per_hour.value * dur;
else
    fuel_mass_low_kg = avg_mass_low_kg * eco.mass_fuel_per_flight;
    fuel_mass_high_kg = avg_mass_high_kg * eco.mass_fuel_per_flight;
end

% Einfluss Masse auf CO2
CO2_mass_low(k) = fuel_mass_low_kg * eco.CO2_per_kg_fuel;
CO2_mass_high(k) = fuel_mass_high_kg * eco.CO2_per_kg_fuel;

% Gesamttreibstoff Kosten
fuel_withH_low_kg(k) = fuel_elec_low_withH + fuel_mass_low_kg;
fuel_withH_high_kg(k) = fuel_elec_high_withH + fuel_mass_high_kg;

% ohne Heizer & Generator berechnet sich Treibstoff nur aus dessen Energie
fuel_elec_low_noH = (E_total_low_noH * 3.6) / (eco.eta_gen * eco.LHV_MJkg);
fuel_elec_high_noH = (E_total_high_noH * 3.6) / (eco.eta_gen * eco.LHV_MJkg);

fuel_noH_low_kg(k) = fuel_elec_low_noH + fuel_mass_low_kg;
fuel_noH_high_kg(k) = fuel_elec_high_noH + fuel_mass_high_kg;

% Totals
E_total_low_withH_kWh(k) = E_total_low_withH;
E_total_high_withH_kWh(k) = E_total_high_withH;
E_total_low_noH_kWh(k) = E_total_low_noH;
E_total_high_noH_kWh(k) = E_total_high_noH;
end

% Ausgabe
dets = struct( ...

```

```

'E_ctrl_kWh',           E_ctrl_kWh, ...
'E_faucet_low_kWh',    E_faucet_low_kWh, ...
'E_faucet_high_kWh',   E_faucet_high_kWh, ...
'E_flush_low_kWh',     E_flush_low_kWh, ...
'E_flush_high_kWh',    E_flush_high_kWh, ...
'E_boiler_heat_low_kWh', E_boil_heat_low_kWh, ...
'E_boiler_heat_high_kWh', E_boil_heat_high_kWh, ...
'E_boiler_loss_low_kWh', E_boil_loss_low_kWh, ...
'E_boiler_loss_high_kWh', E_boil_loss_high_kWh, ...
'E_vacgen_kWh',        E_vacgen_kWh, ...
'E_total_low_withH_kWh', E_total_low_withH_kWh, ...
'E_total_high_withH_kWh', E_total_high_withH_kWh, ...
'E_total_low_noH_kWh',  E_total_low_noH_kWh, ...
'E_total_high_noH_kWh', E_total_high_noH_kWh ...
);

% CO2
co2 = struct( ...
    'mass_low_kg',      CO2_mass_low, ...
    'mass_high_kg',     CO2_mass_high, ...
    'elec_low_withH_kg', CO2_elec_low_withH, ...
    'elec_high_withH_kg', CO2_elec_high_withH, ...
    'total_low_kg',     CO2_mass_low + CO2_elec_low_withH, ...
    'total_high_kg',    CO2_mass_high + CO2_elec_high_withH ...
);

% Kosten
cost = struct( ...
    'fuel_withH_low_EUR', fuel_withH_low_kg * eco.fuel_cost_EURkg, ...
    'fuel_withH_high_EUR', fuel_withH_high_kg * eco.fuel_cost_EURkg, ...
    'fuel_noH_low_EUR', fuel_noH_low_kg * eco.fuel_cost_EURkg, ...
    'fuel_noH_high_EUR', fuel_noH_high_kg * eco.fuel_cost_EURkg ...
);
end

% Ausgabe der Werte über den Balken
function addBarLabels(b)
    for ii = 1:numel(b)
        x = b(ii).XEndPoints;
        y = b(ii).YEndPoints;
        if isempty(x); continue; end
        labels = string(round(y,5)); % fünf Nachkommastellen
        text(x, y, labels, ...
            'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom', ...
            'FontSize',8, 'Rotation',0);
    end
end
end

```

### Anleitung zur Nutzung des digitalen Anhangs:

Nach dem Einlesen des Datenträgers mit dem digitalen Anhang sind folgende Ordner zu sehen (siehe Abbildung 40):

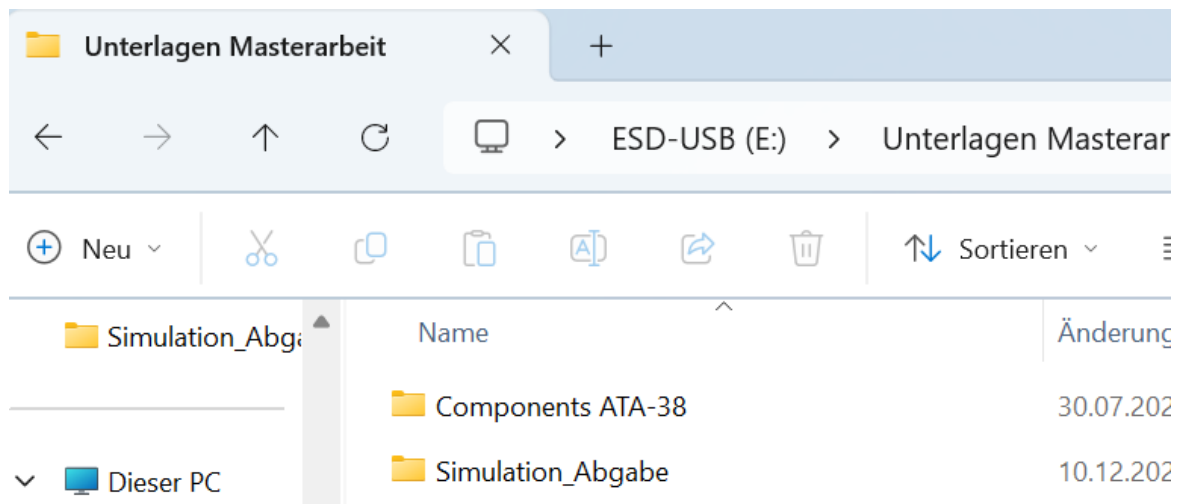


Abbildung 40: Inhalt des digitalen Anhangs

In *Components ATA-38* sind alle erstellten Blenderdateien des WWS zu finden. Diese sind ebenfalls unter *System\_cpacs > Blender > fbx* als *.fbx*-Dateien zu finden.

In *Simulation\_Abgabe* finden sich die Unterlagen für die Erstellung der Kabine in Quader- und detaillierter Form. Zudem ist hier auch das Simulationsmodell des WWS zu finden. Der Ordner sollte wie folgt aussehen nach dem Öffnen (siehe Abbildung 41):

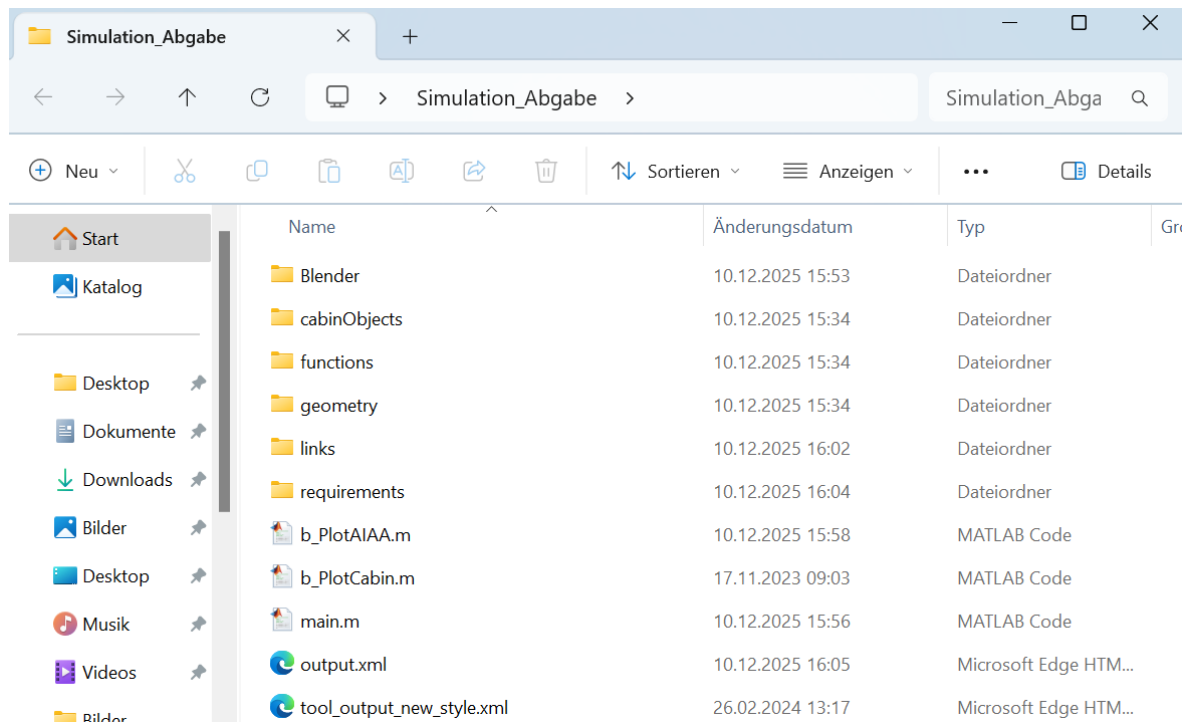


Abbildung 41: Ordner der MATLAB-files

Zur Ansicht des Modells in MATLAB auf Basis von Quadern muss zuerst das *main.m*-File (siehe Abbildung 42) geöffnet und durchlaufen werden (*System\_CPACS > main.m*).

requirements	10.12.2025 16:04	Dateiordner
b_PlotAIAA.m	10.12.2025 15:58	MATLAB Code
b_PlotCabin.m	17.11.2023 09:03	MATLAB Code
main.m	10.12.2025 15:56	MATLAB Code
output.xml	10.12.2025 16:05	Microsoft Edge HTM...
tool_output_new_style.xml	26.02.2024 13:17	Microsoft Edge HTM...

Abbildung 42: MATLAB main.m-file

Anschließend kann das *b\_PlotAIAA.m*-File (*System\_CPACS > b\_PlotAIAA.m*) ausgeführt werden (siehe Abbildung 43).

requirements	10.12.2025 16:04	Dateiordner
b_PlotAIAA.m	10.12.2025 15:58	MATLAB Code
b_PlotCabin.m	17.11.2023 09:03	MATLAB Code
main.m	10.12.2025 15:56	MATLAB Code
output.xml	10.12.2025 16:05	Microsoft Edge HTM...
tool_output_new_style.xml	26.02.2024 13:17	Microsoft Edge HTM...

Abbildung 43: MATLAB b\_plotAIAA-file

Nach dem Ausführen öffnet sich automatisch ein Fenster mit den Komponenten des WWS in Quaderform (siehe Abbildung 44). Diese Ansicht kann ja nach Vorliebe gedreht werden, um einen Überblick der räumlichen Anordnung zu erhalten.

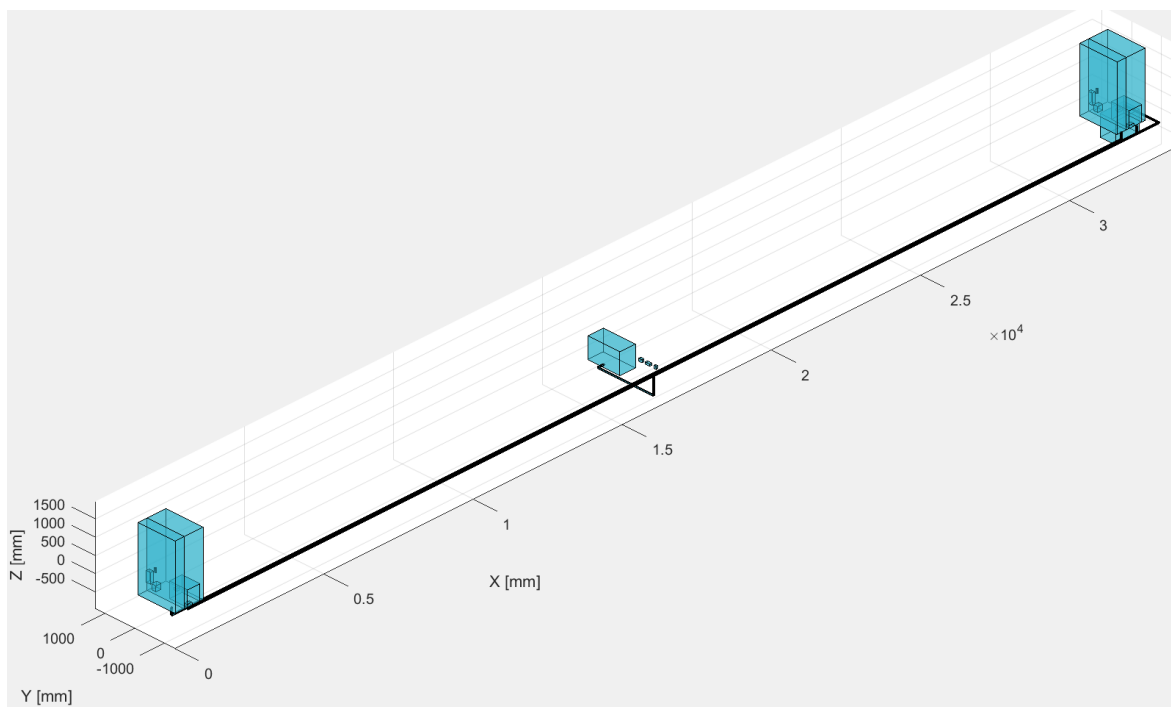


Abbildung 44: WWS als Quaderdarstellung

Zur detaillierten Ansicht der Komponenten in Blender muss im Ordner *Blender* die *Execute-Bennet.bat* Datei ausgeführt werden (*System\_CPACS > Blender > Execute-Bennet.bat*). Diese Datei ist allerdings auf den Nutzer zugeschnitten, sodass sie individuell angepasst werden muss um auf anderen Computern zu funktionieren. Aus diesem Grund lautet der Name auch *Execute-Bennet.bat*.

Diese öffnet Blender und bildet die Rumpfsektion um die Lavatory herum mit allen Komponenten ab (siehe Abbildung 45). Es ist darauf zu achten, dass Blender 3.3 installiert ist und keine neuere Version.

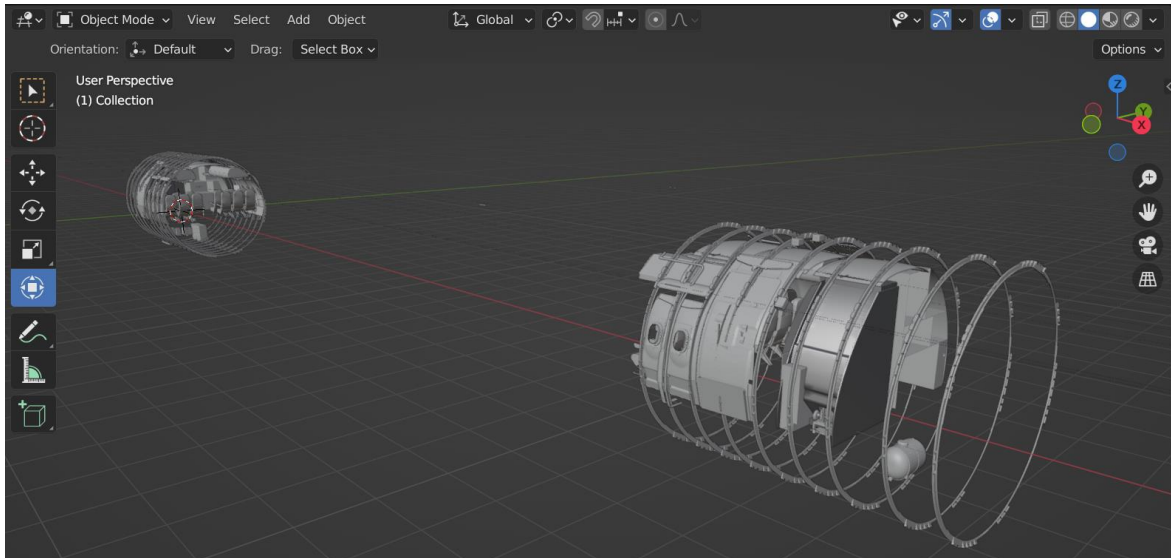


Abbildung 45: Rumpfsektion der Lavatories

Zuletzt findet sich unter dem Ordner *functions* die Simulation des WWS mit dem Namen *Simulation\_Water\_Waste.m* (*System\_CPACS* > *functions* > *Simulation\_Water\_Waste.m*) (siehe Abbildung 46).









 placeWaterWasteSystem.m	15.07.20
 plotObjects.m	10.12.20
 setLOPA.m	10.12.20
 Simulation_Water_Waste.m	28.11.20
 TransformVerticeVector.m	10.12.20
 tubeplot.m	10.12.20
 xml2struct.m	10.12.20
 Zylinder.m	10.12.20

Abbildung 46: Simulationsfile des WWS

Beim Ausführen dieser Datei öffnen sich alle in dieser Arbeit gezeigten Diagramme automatisch.