

DLR-IB-SL-HF-2024-143

**Simulation und Analyse der
elektrischen Auslegung einer
Flugzeugkabine am Beispiel der
Kabinenbeleuchtung mit
Anbindung an die Virtuelle Realität**

Bachelorarbeit

Carina Goetz



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Dokumenteigenschaften

Titel	Simulation und Analyse der elektrischen Auslegung einer Flugzeugkabine am Beispiel der Kabinenbeleuchtung mit Anbindung an die Virtuelle Realität
Betreff	Bachelorarbeit
Institut	Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt (SL)
Erstellt von	Carina Goetz
Beteiligte	
Geprüft von	M.Sc. Mara Fuchs (DLR-SL) und Dr. Jörn Biedermann (DLR-SL)
Freigabe von	Dr. rer. nat. Jürgen Schultheis (Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim)
Datum	27.08.2024
Version	1.0
Dateipfad	

**Simulation und Analyse der elektrischen Auslegung einer Flugzeugkabine
am Beispiel der Kabinenbeleuchtung mit Anbindung an die Virtuelle
Realität**

BACHELORARBEIT

für die Prüfung zum
BACHELOR OF SCIENCE

des Studiengangs Informationstechnik
der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von

Carina Goetz

Abgabe am 27.08.2024

Bearbeitungszeitraum:	04.06.24 – 27.08.24
Matrikelnummer, Kurs:	1523266, TINF21IT1
Ausbildungsbetrieb:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Betreuer des Ausbildungsbetriebs:	Prof. Dr.-Ing. Jörn Biedermann
Gutachter der Dualen Hochschule:	Dr. rer. nat. Jürgen Schultheis

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit mit dem

THEMA

**Simulation und Analyse der elektrischen Auslegung einer Flugzeugkabine
am Beispiel der Kabinenbeleuchtung mit Anbindung an die Virtuelle
Realität**

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel
benutzt habe.

Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten
Fassung übereinstimmt.*

* falls beide Fassungen gefordert sind

Hamburg, den 27.08.2024

Vermerk zur Sprache

Die verwendete Terminologie ergibt sich zum größten Teil aus englischen Begriffen. Aufgrund der in der Informatik üblichen einheitlichen Strukturen und um eine Übereinstimmung mit anderen deutschsprachigen wissenschaftlichen Arbeiten sicherzustellen, wurden diese Begriffe in dieser Arbeit beibehalten. Sofern möglich werden diese Begriffe ins Deutsche überführt. Trotzdem wird im Bezug auf die Implementierung vorrangig die englische Sprache verwendet, um Konzepte von bereits bestehendem Vokabular anwenden zu können. Des Weiteren wird dadurch ein linguistisches Vermischen vermieden.

Gender-Hinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Zusammenfassung

Simulation und Analyse der elektrischen Auslegung einer Flugzeugkabine am Beispiel der Kabinenbeleuchtung mit Anbindung an die Virtuelle Realität

Die Luftfahrtindustrie stellt einen zentralen ökonomischen Sektor dar, in dem kontinuierlich neue Technologien entwickelt werden. Diese Fortschritte betreffen nicht nur den Flugverkehr, der durch Maßnahmen wie die Elektrifizierung von Flugzeugkomponenten sicherer, effizienter und umweltfreundlicher gestaltet werden soll, sondern auch die Entwicklung neuer Flugzeuge und deren Kabinen. Am Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt wird daher an Methoden und Werkzeugen geforscht, die die Entwicklung neuer Flugzeugkabinen unterstützen. Ein Aspekt ist hierbei die Visualisierung und Analyse von Kabinenentwürfen in einer Virtuellen Realität. Im Rahmen dieser Arbeit wurde am Beispiel der Kabinenbeleuchtung erfolgreich die Auslegung und Simulation des elektrischen Systems durchgeführt. Dabei konnten ausgewählte Eigenschaften und Analyseparameter des Beleuchtungssystems bestimmt und in der VR visualisiert werden.

Abstract

Simulation and analysis of the electrical design of an aircraft cabin using the example of cabin lighting with connection to virtual reality

The aviation industry is a key economic sector in which new technologies are constantly being developed. These developments not only affect the air traffic, which is to be made safer, more efficient and more environmentally friendly through measures such as the electrification of aircraft components, but also the development of new aircrafts. At the Institute of System Architectures in Aeronautics of the German Aerospace Center (DLR) methods and tools to support the development of new aircraft cabins are being researched. One aspect of this is the visualization and analysis of cabin designs in a virtual reality (VR) based on cabin design data. As part of this work, the design and simulation of the electrical system was successfully implemented using the example of cabin lighting. In addition, selected properties and analysis parameters of the lighting system were determined and visualized in the VR.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
Quelltextverzeichnis	XII
Anhang	XIII
1. Einleitung	1
2. Strukturierte Aufgabenstellung	4
3. Technologien und Konzepte als Basis der entwickelten Methodik	6
3.1. Speicherung der Kabinenauslegung mit CPACS	6
3.2. Grundlegende Informationen zur verwendeten Flugzeugkabine	8
3.2.1. Einordnung der Kabine in die Flugzeugzonen	8
3.2.2. Grundlagen zum elektrischen System im Flugzeug	10
3.3. Einsatz der Virtuellen Realität zur Simulation der Kabinenauslegung	15
4. Stand der Technik	18
4.1. Eingrenzung der Arbeit und Bedeutung der VR-gestützten Visualisierung in der Flugzeugkabinenentwicklung	18
4.2. Beleuchtungskomponenten in der Flugzeugkabine	20
4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme	23
5. Methodik zur Entwicklung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems	30
5.1. Methode zur Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems	31
5.2. Herangehensweise der Bestimmung von Analyseparametern der Beleuchtungsarchitektur	32

5.3.	Vorgehensweise zur Visualisierung des Beleuchtungssystems in der Virtuellen Realität	34
5.4.	Übersicht der verwendeten Technologien und Software zur Implementierung der Methodik	35
6.	Implementierung der Methodik	36
6.1.	Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine	36
6.2.	Berechnung der Analyseparameter der Beleuchtungsarchitektur	49
6.3.	Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität und Darstellung des Systems und der Analyseergebnisse	52
7.	Auswertung der Ergebnisse	57
7.1.	Auswertung der Analyseparameter bezüglich der implementierten Verkabelungsarchitekturen	57
7.2.	Untersuchung des Einflusses der Systemerweiterung auf die Ausführungszeit des Auslegungsprozesses	60
7.3.	Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess	62
8.	Diskussion	70
8.1.	Interpretation und Diskussion der Analyseergebnisse	70
8.2.	Evaluierung der Integration und Erfüllung der strukturierten Aufgabenstellung	73
9.	Kritische Reflexion und Ausblick	77
	Literatur	80

Abbildungsverzeichnis

3.1. Zonen des Flugzeugs angelehnt an [3]	9
3.2. Genereller elektrischer Schaltplan eines Airbus A320 von [36]	12
3.3. Zentrale und dezentrale Verteilung der Stromleitungen im Flugzeugrumpf von [31]	14
3.4. Raumeinrichtung für die VR am Beispiel des HTC Vive Pro Headsets von [41]	16
4.1. Beispiel für die Komplexität des elektrischen Systems in einer Flugzeugkabine von [14]	20
4.2. Allgemeine Beleuchtungskomponenten in einer Flugzeugkabine	22
4.3. Aufbau der Auslegungsprozesskette	24
4.4. Ausschnitt der Klassenstruktur der Auslegungsinstanzen	25
4.5. Vergleich des Hüllkörpers und des 3D-Modells eines Sitzes (provisorische Bilder)	28
5.1. Teilaspekte der Erstellung der Architektur	32
5.2. Teilaspekte der Analyse	33
5.3. Teilaspekte der Visualisierungsmethodik	34
6.1. Schematische Abbildung des Koordinatensystems in der Flugzeugkabine	37
6.2. Positionierung der Beleuchtungskomponenten in Abhängigkeit der Verkleidungselemente	38
6.3. Schematische Darstellung der Nutzung des Satz des Pythagoras	42
6.4. Schematische Darstellung der ersten Variante der Kabelverbindung zwischen Beleuchtung und Stromversorgungszentrum (Electric Power Distribution Center, EPDC)	43
6.5. Schematische Darstellung der zweiten Variante der Kabelverbindung zwischen Beleuchtung und Stromversorgungszentrum (Electric Power Distribution Center, EPDC)	44
6.6. Ausschnitt des Stromkreises eines Beleuchtungstyps bei einer dezentralisierten Verteilung	50
6.7. Oberfläche des Unity-Editors des Projektes	52
6.8. Menü zur Auswahl der Visualisierung einer Komponente	54

7.1. Leiterwiderstand in Abhängigkeit von Durchmesser und Länge	59
7.2. Architektur der <i>lower</i> Routenführung des Beleuchtungssystems	64
7.3. Architektur der <i>upper</i> Routenführung des Beleuchtungssystems	65
7.4. Visualisierung der generierten Links in Matlab	66
7.5. Virtuelle Kabine mit gelb-orange gekennzeichnetem Beleuchtungssystem in Unity	67
7.6. Visualisierung der Analyseparameter und -ergebnisse in Unity	68
7.7. Visualisierung der Verbindungen einer Beleuchtungskomponente in Unity	69
B.1. Hauptfunktion der Auslegung in Matlab	98
D.1. Auslegung des Beleuchtungssystems der <i>lower</i> -Architektur	102
D.2. Auslegung des Beleuchtungssystems der <i>upper</i> -Architektur	103

Tabellenverzeichnis

5.1. Verwendete Software und Versionen	35
7.1. Analyseparameter der Kabel	58
7.2. Leistungsparameterergebnisse für eine Single-Aisle Konfiguration mit 198 Passagieren	60
7.3. Durchschnittlicher Zeitaufwand der Realisierung des Auslegungspro- zesses in Sekunden	61
8.1. Erfüllung der Aufgabenstellung	74
C.1. Übersicht der Messungen für die Realisierungszeit der Teilprozesse . .	100

Abkürzungsverzeichnis

- APU** Hilfstriebwerk (Auxiliary Power Unit)
- ATA** Luftverkehrsverband (Air Transport Association)
- CAVE** Räume mit der Projektion einer virtuellen Umgebung (Cave Automatic Virtual Environment)
- CPACS** Common Parametric Aircraft Configuration Schema
- DLR** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- EPDC** Stromversorgungszentrum (Electric Power Distribution Center)
- IDG** integrierter Antriebsgenerator (Integrated Drive Generator)
- main EPDC** Hauptstromversorgungszentrum (Main Electric Power Distribution Center)
- OHSC** Gepäckfach (Overhead Storage Compartment)
- OOP** Objekt-Orientierte Programmierung
- PSU** Passagierserviceeinheit (Passenger Service Unit)
- SPDB** Verteilerkasten (Secondary Power Distribution Box)
- TRU** Transformator mit Gleichrichter (Transformer Rectifying Unit)
- VR** Virtuelle Realität (Virtual Reality)
- XML** Erweiterte Auszeichnungssprache (Extensible Markup Language)

Quelltextverzeichnis

3.1. Beispielstruktur einer CPACS-Datei	7
4.1. Struktur der exportierten Auslegungsdaten in XML	27
6.1. Definition der Klasse <i>WashLight</i>	39
6.2. Definition der Klasse <i>PowerCable</i>	45
6.3. Ausschnitt der Speicherung der Zwischenpositionen einer Kabelkomponente in der Export-Erweiterte Auszeichnungssprache (Extensible Markup Language, XML)-Datei	47
6.4. Erstellung der Punkte einer Bézierkurve in Python für Blender	48
6.5. Ausschnitt der Funktion zum Anzeigen von Analyseergebnissen in Form von einzelnen Parameterwerten in Unity (C#)	55
6.6. Ausschnitt der Funktion zum Anzeigen von Analyseergebnissen in Form von Netzwerkgrafiken in Unity (C#)	56

Anhang

Anhang A: Datenblatt einer Standard-LED mit Lichtfarbe weiß	85
Anhang B: Hauptfunktion der Auslegung in Matlab	97
Anhang C: Zeitaufwände der Berechnungen der Teilprozesse in Tabellenform	99
Anhang D: Vollständige Auslegung des Beleuchtungssystems	101

1. Einleitung

In der Luftfahrtindustrie werden kontinuierlich neue Technologien und Konzepte entwickelt, um den Flugverkehr sowie den Entwicklungsprozess von neuen Flugzeugen zu verbessern. Diese Innovationen müssen die Regularien von Acare und der Strategie Flightpath 2050 im Bezug auf die Umweltfreundlichkeit und Sicherheit erfüllen [7]. Zu diesen Technologien zählen beispielsweise die Forschung an Wasserstoffantrieben und die Elektrifizierung von Flugzeugen, bei der mechanische, hydraulische und pneumatische Komponenten durch elektrische Bauteile ersetzt werden. Diese Neuerungen bringen jedoch Herausforderungen mit sich, wie zum Beispiel eine steigende Systemkomplexität bei der Elektrifizierung von Flugzeugen, die zusätzliche Anforderungen an die Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Sicherheit stellt [40].

Bei der Integration moderner Technologien in das Flugzeug werden eine Reihe neuer Experten in den Entwicklungsprozess des neuen Flugzeugs mit einbezogen. Dies bringt die Herausforderung mit sich, alle relevanten Experten zusammenzubringen, damit eine effiziente Entwicklung und Kooperation möglich ist. Jeder Spezialist hat dabei seine eigene Fachdomäne, in der fachspezifische Entwicklungsumgebungen Verwendung finden. Dadurch gibt es eine Vielzahl heterogener Entwicklungsumgebungen, die für den Entwicklungsprozess des Gesamtsystems notwendig sind, um die Komplexität des Flugzeugsystems zu handhaben. Diese Entwicklungsumgebungen gilt es miteinander zu verknüpfen, um eine disziplinübergreifende Gesamtsystemfähigkeit aufzubauen. Ein weiterer Aspekt ist mit acht bis zehn Jahren die lange Entwicklungszeit von neuen Flugzeugen [23], die die Integration aktueller Technologien in den Entwicklungsprozess verlangsamt, weshalb die Beschleunigung des Entwicklungsprozesses ein zentraler Forschungsaspekt ist. Allerdings wirkt sich dies

nicht nur auf die Entwicklung des gesamten Flugzeugsystems aus, sondern auch auf die Entwicklung von Teilsystemen wie der Flugzeugkabine.

Am Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird unter anderem an Methoden der Optimierung des Design- und Entwicklungsprozesses von Flugzeugkabinen mithilfe von Digitalisierungstechnologien geforscht. Im Rahmen der Digitalisierung der Prozesse wird die VR als Werkzeug zur Visualisierung und Analyse von Kabinendesigns eingesetzt. Die virtuelle Realität ermöglicht eine realistische Darstellung von Kabinendesigns und deren Systeme, wodurch Entwickler ein besseres Verständnis für die Ästhetik, das Raumgefühl und die Funktionalität der Kabinen erhalten. Des Weiteren ist es möglich Änderungen an den Kabinenkomponenten in Echtzeit vorzunehmen, was den Entwicklungsprozess beschleunigt und die Identifizierung von Designfehlern ermöglicht. Diese Technologie ist besonders nützlich, um komplexe Systeme (z.B. elektrisches System der Kabine), die Wechselwirkungen der Komponenten untereinander sowie den Einfluss von Parameteränderungen auf das Gesamtsystem Kabine zu analysieren und übersichtlich darzustellen.

In dieser Arbeit wird eine grundlegende Auslegung der elektrischen Systeme der Flugzeugkabine am Beispiel der Kabinenbeleuchtung entwickelt und ausgewählte Architekturen des Stromverlaufes in einer Virtuellen Realität visualisiert und untersucht. Diese Architekturen werden dann anhand gewählter Kriterien wie Leistung und Gewicht bewertet und miteinander verglichen, um verschiedene Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu betrachten.

Ziel und Aufbau der Arbeit

Im Zuge der Luftfahrtindustrie ist die kontinuierliche Weiterentwicklung in allen Bereichen des Lebenszyklus eines Flugzeuges von zentraler Bedeutung, um den steigenden Anforderungen an Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Sicherheit gerecht zu werden. Hierzu gehört auch die Forschung von beschleunigten und effizienten Entwicklungsprozessen von Flugzeugkabinen. Die Entwicklung von Flugzeugkabinen

ist aufgrund der Vielzahl an komplexen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und Subsystemen ein langwieriger Prozess.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Erweiterung eines Auslegungsprozesses einer digitalen Flugzeugkabine zur umfassenden Visualisierung und Analyse entwickelt. Während bestehende Modelle und Werkzeuge zur Auslegung bereits grundlegende Systeme der Flugzeugkabine berücksichtigen, besteht eine Lücke in der Integration und Analyse weiterer Subsysteme, wie dem elektrischen System der Kabinenbeleuchtung.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Modellierung der elektrischen Systemkomponenten der Kabinenbeleuchtung und der Analyse gewählter Architekturen des Stromverlaufs im Bezug auf geometrische und funktionale Eigenschaften, wie dem Kabelgewicht und der benötigte Leistung. Ein zentraler Aspekt ist dabei jeweils die Integration des Beleuchtungssystems und der Analyseergebnisse in ein modular-generiertes Modell der Flugzeugkabine in der Virtuellen Realität. Diese visuelle Darstellung ermöglicht es, die Auswirkungen der komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten in der Flugzeugkabine realitätsnah zu erfassen.

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die in dieser Arbeit zu bearbeitenden Aufgaben strukturiert dargestellt. Anschließend folgen in Kapitel 3 und Kapitel 4 die Einführung in die Grundlagen und der Stand der Technik der relevanten Themenbereiche wie dem elektrischen System im Flugzeug und dem bestehenden Auslegungsprozess eines Kabinensystems. In Kapitel 5 wird die Methode zur Bearbeitung der Aufgabenstellung erläutert, bevor sich in Kapitel 6 mit deren Umsetzung in den verschiedenen Softwareumgebungen befasst wird. Die Vorstellung der Ergebnisse zur Validierung der Methodik erfolgt in Kapitel 7, bevor in Kapitel 8 diese Ergebnisse diskutiert und bewertet werden. Eine Zusammenfassung der Arbeit mit einem Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen erfolgt in Kapitel 9.

2. Strukturierte Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Arbeit werden eine Reihe an Aufgaben bearbeitet, um die Integration und Analyse der Kabinenbeleuchtung und dessen elektrischen Systems in eine virtuelle Flugzeugkabine zu ermöglichen. Diese Aufgaben werden in der folgenden strukturierten Aufgabenstellung in drei Teilbereiche unterteilt, zunächst die Platzierung und Modellierung der Beleuchtungskomponenten, zu denen auch die Verkabelung gehört. Anschließend folgt die Auswertung der Architekturen, bei der die geometrischen und funktionalen Eigenschaften der Verkabelungen berechnet und analysiert werden. Zuletzt wird die Visualisierung der implementierten Auslegung in Unity VR durchgeführt, um das Beleuchtungssystem im Umfeld der virtuellen Flugzeugkabine darzustellen und die Analyseergebnisse dem Nutzer zu präsentieren.

1. Platzierung und Modellierung
 - 1.1. Platzierung der Beleuchtungskomponenten in Matlab
 - 1.2. Implementierung der Verkabelung in Matlab
 - 1.3. Integration und Modellierung in Blender
2. Auswertung der Architekturen
 - 2.1. Berechnung der geometrischen und funktionalen Eigenschaften
 - 2.2. Durchführung der Leistungsanalyse
 - 2.3. Leistungsauswertung
 - 2.4. Vergleich der Architekturen anhand der Eigenschaften

2. Strukturierte Aufgabenstellung

3. Visualisierung in Unity VR

3.1. Visualisierung des Beleuchtungssystems

3.2. Darstellung der Ergebnisse

3. Technologien und Konzepte als Basis der entwickelten Methodik

Um eine Grundlage für die Umsetzung der entwickelten Methoden zu bieten, gibt das folgende Kapitel eine Einführung in die genutzten Konzepte und Technologien dieser Arbeit. Hierzu wird zu Beginn in Abschnitt 3.1 die Speicherung von Kabinenauslegungsdaten mit CPACS vorgestellt. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 3.2 die Flugzeugkabine genauer betrachtet. Im Detail wird hier zunächst die Kabine in die Flugzeugzonen eingeordnet und anschließend der Fokus auf das elektrische System des Flugzeuges und speziell in der Kabine gelegt. Zuletzt wird der Einsatz der Virtuellen Realität für die Darstellung des Flugzeugkabinenentwurfs in Abschnitt 3.3 vorgestellt.

3.1. Speicherung der Kabinenauslegung mit CPACS

Für die Entwicklung von Flugzeugkabinenentwürfen werden viele Daten im Bezug auf die unterschiedlichen Systeme und Komponenten benötigt und zwischen den verschiedenen Entwicklungsumgebungen ausgetauscht. Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) ist ein auf der XML basiertes Datenformat, das die Speicherung und den Austausch von Flugzeugkonfigurationsdaten ermöglicht. CPACS wurde vom DLR entwickelt und beschreibt die Geometrien und Charakteristiken von Flugzeugen [6]. Dabei werden die Daten in einer hierarchischen Struktur abgelegt und in verschiedene Submodule wie die Motoren, die Flügel oder den Rumpf des Flugzeugs unterteilt. Diese Struktur ist beispielhaft in Quelltext 3.1 visualisiert.

3.1. Speicherung der Kabinenauslegung mit CPACS

```
1      <cpacs>
2          <vehicles>
3              <aircraft>
4                  <model uID="AircraftModel">
5                      <engines>
6                          <engine uID="engine12">
7                              <name>engine</name>
8                          </engine>
9                      </engines>
10                 </model>
11             </aircraft>
12         </vehicles>
13     <airport></airport>
14 </cpacs>
```

Quelltext 3.1: Beispielstruktur einer CPACS-Datei

Dabei werden in dem Datenformat die Daten zwischen sogenannten Start- und Endtags gespeichert und können annähernd unendlich tief verschachtelt werden. Ein typisches Element des Flugzeugentwurfs enthält zumeist Informationen wie die Positionierung, das Material und weitere Spezifikationen, die in untergeordneten Tags definiert sind. Dabei können für die Elemente auch Attribute, wie zum Beispiel eine “unique” ID, definiert werden. Mit dieser uID können die Elemente referenziert werden. Diese IDs werden in dem Quellcode beispielhaft an dem Tag *model* und *engine* verwendet.

In dieser Arbeit müssen die Kabinenkonfigurationen und Auslegungsdaten konsistent zwischen den Entwicklungsumgebungen und beteiligten Personen ausgetauscht werden. Für diesen Zweck wird CPACS verwendet. Für die Generierung der Auslegungsdaten werden die Daten wie das Kabinenlayout aus der XML-Datei in der Softwareumgebung Matlab importiert und hier ausgewertet, um die Kabinenkomponenten beispielsweise zu platzieren.

Dabei werden die Daten aus der XML-Datei in Matlab eingelesen und verarbeitet. Bei diesen Daten handelt es sich um das Kabinenlayout, das Layout der Komponenten wie beispielsweise der Sitze und Küchen sowie die komplette Rumpfstruktur des Flugzeuges. Diese Informationen bilden den Bauraum der Kabine, in dem weitere Systeme integriert und platziert werden.

3.2. Grundlegende Informationen zur verwendeten Flugzeugkabine

Die gesamte Flugzeugkabine hat sich über die Jahrzehnte verändert. Die anfänglich offene, kleine Kabine der frühen Luftfahrt entwickelte sich im Zuge der Weltkriege im frühen bis mittleren 20. Jahrhundert zu einem stabilen Transportbereich [35]. Nach dem Zweiten Weltkrieg stieg die Nachfrage nach Passagierflugzeugen, wodurch der Komfort und die Sicherheit der Passagiere zu zentralen Bewertungskriterien der Flugzeugindustrie wurden. Dabei sind der Luftdruckerhalt, die Belüftungsanlage und die Klimaanlage sowie die Beleuchtung einige der wichtigsten Elemente, um den Komfort zu steigern [38].

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Aufbau eines Airbus A320 Flugzeuges als Grundlage verwendet. Dieser Flugzeugtyp ist eines der meistverkauften Flugzeuge und wird von vielen Fluggesellschaften weltweit eingesetzt [25][4]. Dabei hat die Flugzeugkabine eine Konfiguration mit einem Kabinengang (*englisch*: Single-Aisle) als Merkmal, bei der der Gang mittig entlang der Kabine verläuft. Dieses Merkmal ist bei vielen Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen weit verbreitet und ist beispielsweise auch der von Boeing bis 2035 meistgelieferte Flugzeugtyp [11].

3.2.1. Einordnung der Kabine in die Flugzeugzonen

Im Allgemeinen lässt sich ein Flugzeug in acht verschiedene Zonen oder Bereiche unterteilen [20]. Diese Zonen umfassen alles von den Triebwerken über die Flügel bis hin zum Flugzeugrumpf und dem Interieur. Dabei ist jede Zone ein Bereich am Flugzeug, der detailliert betrachtet wird. Diese Zonen sind wie in Abbildung 3.1 dargestellt definiert. In der Abbildung werden die unterschiedlichen Zonen des Flugzeugs farblich dargestellt. Die erste Zone umfasst den Flugzeugrumpf, die in der Grafik in Dunkelblau dargestellt ist. In Hellblau erkennt man die Zone 2, die die Instrumententafel und Konsole umfasst. Die Triebwerksgondeln und -pylonen der Zone 3 sind in der Grafik in Orange abgebildet und befinden sich direkt an den Motoren und dem Getriebe (Zone 4), die hier in Rot dargestellt sind. Die fünfte Zone,

3.2. Grundlegende Informationen zur verwendeten Flugzeugkabine

die Flügel und Radkästen, sind in Grün dargestellt. In Dunkelgrau wird die Zone 6 dargestellt, das sich mit dem Fahrwerk befasst. Zuletzt sind in Lila das Leitwerk und die vertikale Stabilisatorspitze in Zone 7 und in Braun das Innenraumvolumen der Kabine in Zone 8 dargestellt.

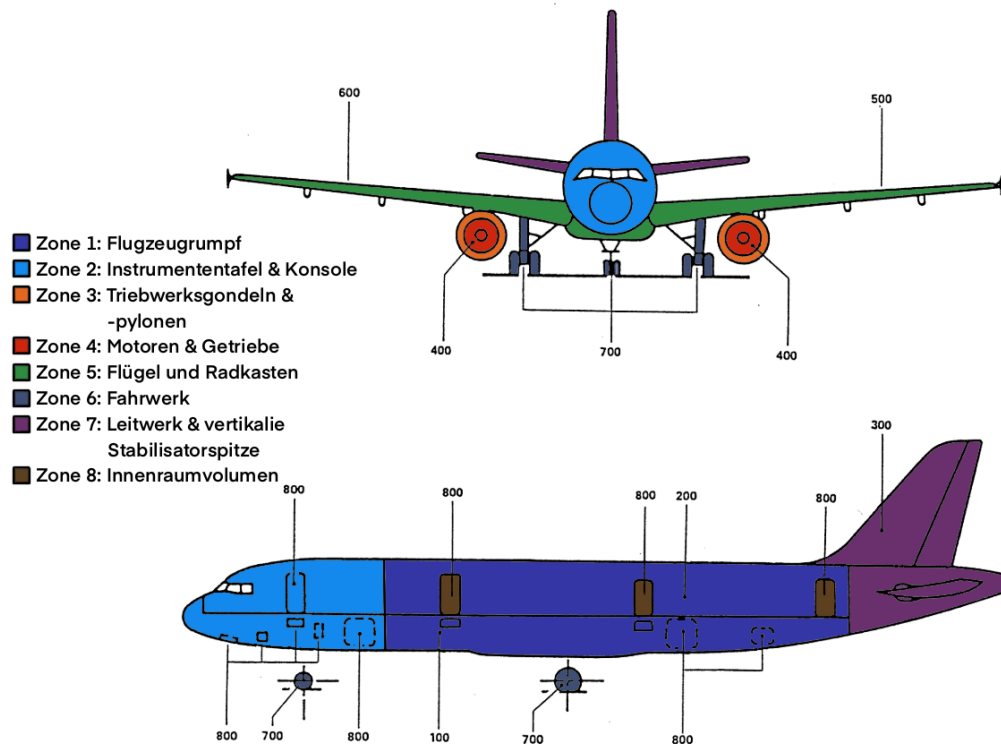


Abbildung 3.1.: Zonen des Flugzeugs angelehnt an [3]

Die Flugzeugkabine wird zwei Zonen zuordnet. Zum einen ist die Flugzeugkabine Teil der Zone 1, die den mittleren Flugzeugrumpf beschreibt. In dieser Zone sind Elemente wie das Crown-Module, die Beleuchtung, aber auch die Klimaanlage und die Stromverkabelung der Kabine untergebracht. Zum anderen ist die Flugzeugkabine auch Teil der Zone 8, dem Innenraumvolumen der Kabine. Dabei umfasst diese Zone unterschiedliche Kabinenelemente wie die Sitze, Küchen, Toiletten und verschiedene elektrische Komponenten wie beispielsweise die Passagierserviceeinheit. Somit ist die Kabinenelektronik auf beide Zonen aufgeteilt. Abgesehen von der Kabinenbeleuchtung befinden sich die elektrischen Verbraucher in Zone 8, während die Strom- und Datenleitungen zu Zone 1 zählen. [20]

In jeder Zone des Flugzeuges gibt es bestimmte Herausforderungen und Richtlinien, die jeweils zu beachten sind. In Zone 1 ist die Brandsicherheit aufgrund der Vielzahl von Leitungen und Kabeln ein wichtiger Faktor. Zudem ist hier eine große Herausforderung, das Gewicht durch die Kabel so gering wie möglich zu halten, da das Gesamtgewicht des Flugzeuges einen Einfluss auf weitere Kenngrößen des Flugzeugs, wie zum Beispiel dem Treibstoffverbrauch, hat [15]. In der Zone 8 hingegen muss zusätzlich zu den Brandsicherheitsaspekten auch auf den Komfort und das Design sowie die Verwendung von nicht giftigen Materialien geachtet werden. [20]

3.2.2. Grundlagen zum elektrischen System im Flugzeug

Die elektrischen Systeme sind entscheidend für den Betrieb und die Sicherheit im Flugzeug. Dies sind komplexe Systeme, die aus einer Vielzahl an Komponenten und deren Wechselwirkungen untereinander bestehen, die unterschiedliche Funktionen erfüllen. Dazu gehören beispielsweise die Generatoren, Verteilungsnetze, Schutzmechanismen und die Verbraucher. Dabei kann man die elektrischen Systeme in zwei Hauptbereiche unterteilen: die Stromgenerierung und die Stromverteilung. [21]

Sowohl bei der Stromgenerierung als auch bei der -verteilung werden verschiedene neue Konzepte und Technologien entwickelt, um die Effizienz und Sicherheit der Systeme zu erhöhen. Dabei wird auch das Ziel verfolgt, den Flugverkehr umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten.

Stromgenerierung

In einem Flugzeug existieren unterschiedliche Möglichkeiten elektrischen Strom zu generieren. Dabei sind die Hauptstromquellen Generatoren, die von den Triebwerken oder einer Hilfsturbine angetrieben werden. Diese Generatoren können Wechselstromgeneratoren oder Gleichstromgeneratoren sein, wobei die Wechselstromgeneratoren weiter verbreitet sind [27]. Wechselstromgeneratoren mit variabler Frequenz werden beispielsweise bei Flugzeugen wie dem Airbus A350, A380 und der Boeing 787 eingesetzt [24]. Im Allgemeinen liefern die Generatoren den Strom, der über ein Netz

von Verteilerzentren, Transformatoren und Schutzmechanismen zu den Verbrauchern geleitet wird [38].

Generell unterscheidet man bei den Generatoren zwischen Konstantfrequenz-Generatoren und Variabelfrequenz-Generatoren. Konstantfrequenz-Generatoren bestehen heutzutage zumeist aus einem integrierten Antriebsgenerator (*englisch*: Integrated Drive Generator, IDG). In einem Airbus A320 generieren diese Generatoren eine Spannung von 115 V bei einer Frequenz von 400 Hz [12]. Der Vorteil der Konstantfrequenz-Generatoren ist, dass viele Systeme und Verbraucher auf die Frequenz von 400 Hz ausgelegt sind [44]. Die Variabelfrequenz-Generatoren erzeugen den Strom mit einer Frequenz von 360 bis 800 Hz. Diese Generatoren sind in der Regel leichter und effizienter als die Konstantfrequenz-Generatoren [44].

In den letzten Jahren wurde vermehrt an neuen Konzepten und Technologien im Bereich der Stromgenerierung in Flugzeugen geforscht. So wird beispielsweise an alternativen Energiequellen wie der Verbrennung von Wasserstoff oder einer Kombination aus Brennstoffzelle und Wasserstoff geforscht, um den Flugverkehr nachhaltiger zu gestalten [9][32]. Zudem ist ein weiterer Trend die Elektrifizierung des Flugzeuges, um ein „More Electric Aircraft“ oder „All Electric Aircraft“ zu entwickeln [27]. Dabei werden mechanische, hydraulische und pneumatische Systeme im Flugzeug durch elektrische Systeme ersetzt. Dies verspricht eine Gewichtsreduktion, jedoch steigt gleichzeitig die Komplexität des Systems [29]. Das Konzept des „More Electric Aircraft“ kommt bereits bei Neuentwicklungen wie dem Airbus A350 oder der Boeing 787, jedoch nicht bei älteren Flugzeugen wie dem Airbus A320, zum Einsatz, da der Entwicklungsprozess von Flugzeug bereits 8 bis 10 Jahre dauert [23].

Stromverteilung

Über das Stromversorgungssystem wird der Strom von den Generatoren zu den Verbrauchern geleitet. Dabei gibt es verschiedene Verteilerschienen (*englisch*: bus), über die der Strom verteilt wird. Diese unterschiedlichen Verteilerschienen und Kabel die hiervon abzweigen haben einen Durchmesser von 1 bis 10 mm [19]. Dieser Aufbau ist vereinfacht in Abbildung 3.2 dargestellt. Hierbei wird der Strom von den beiden

3.2. Grundlegende Informationen zur verwendeten Flugzeugkabine

Hauptgeneratoren zu den Hauptverteilerschienen (AC BUS 1 und AC BUS 2) geleitet. Auch der Strom von den Hilfsstromquellen, dem Hilfstriebwerk (*englisch*: Auxiliary Power Unit, APU) und externen Stromquellen wird an diese Verteilerschienen geführt. Diese Verteilerschienen sind auch miteinander über Schaltschütze verbunden, um im Falle des Ausfalls einer Stromquelle, den Strom von einer anderen verfügbaren Quelle zu beziehen und Redundanz zu gewährleisten.

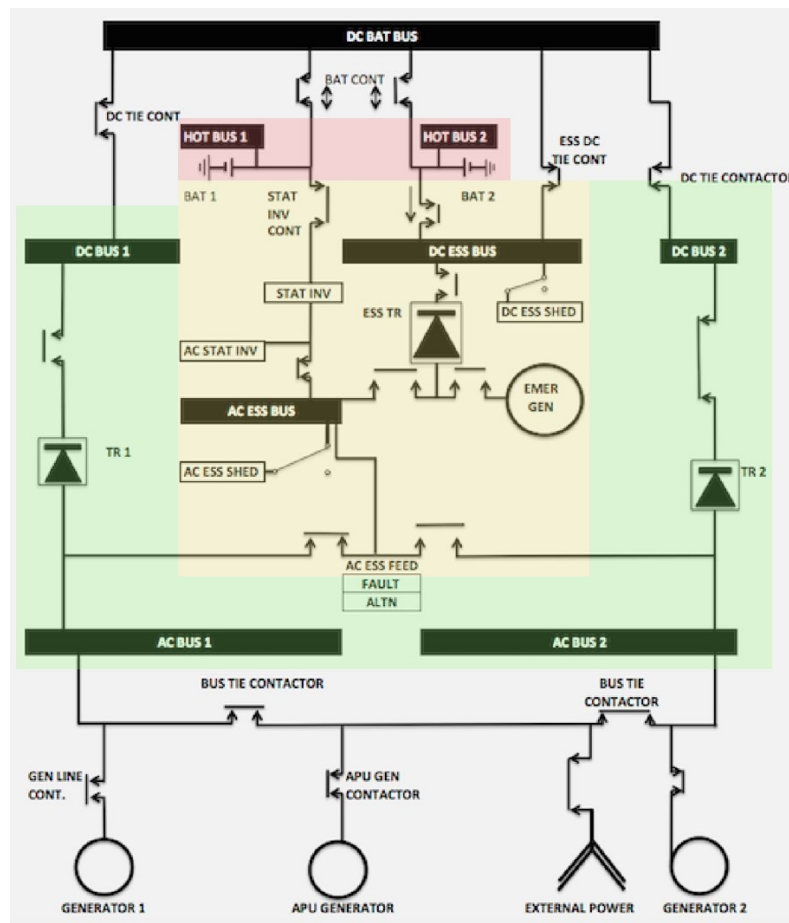


Abbildung 3.2.: Genereller elektrischer Schaltplan eines Airbus A320 von [36]

Von den Hauptverteilerschienen wird der Wechselstrom entweder an die essenziellen Wechsel- und Gleichstrom-Verteilerschienen (AC ESS BUS und DC ESS Bus) oder mittels eines Transformators mit Gleichrichter (*englisch*: Transformer Rectifying Unit, TRU) in Gleichstrom umgewandelt an die Gleichstromverteilerschienen (DC

BUS 1 und DC BUS 2) geleitet. An die essenziellen Verteilerschienen sind zudem die kritischen Verteilerschienen (HOT BUS 1 und HOT BUS 2) gekoppelt. Zuletzt gibt es die Batterieverteilerschienen, die die angrenzenden Verteilerschienen im Falle eines Ausfalls mit Strom von den Batterien versorgen kann.

Dabei wird das Stromversorgungssystem in drei Kategorien unterteilt: kritische, essenzielle und nicht-essenzielle Systeme [21][37].

- kritische Systeme: Die kritischen Systeme sind diejenigen, die für den sicheren Betrieb des Flugzeuges notwendig sind. Die Triebwerke, die Hydraulik, die Avionik sowie die Notbeleuchtung sind Beispiele für kritische Verbraucher. Die zugehörigen Bereiche des elektrischen Schaltplans sind in Abbildung 3.2 in Rot dargestellt.
- essenzielle Systeme: Die essenziellen Systeme sind diejenigen, die für den sicheren Betrieb des Flugzeuges notwendig sind, jedoch nicht kritisch sind. Hierzu gehören beispielsweise die Klimaanlage, die Beleuchtung und die Unterhaltungssysteme. Der Bereich dieser Systeme wird im elektrischen Schaltplan in Gelb visualisiert.
- nicht-essenzielle Systeme: Die nicht-essenziellen Systeme sind diejenigen, die in Grün im Schaltplan gekennzeichnet sind, die für den sicheren Betrieb des Flugzeuges nicht notwendig sind. Dazu gehören beispielsweise die Küchen, die Toiletten, die Bordunterhaltung sowie die allgemeine Kabinenbeleuchtung.

Die unterschiedlichen Verteilerschienen sind innerhalb der Hauptstromversorgungszentren (*englisch*: Main Electric Power Distribution Centers, main EPDCs) des Flugzeuges untergebracht. Dies befindet sich zumeist im Bug des Flugzeuges, unterhalb des Cockpits und der Küche im Bordelektronikraum [2]. Von hier aus werden die Stromleitungen zu den Verbrauchern in den unterschiedlichen Teilen des Flugzeuges, wie beispielsweise das Cockpit, der Frachtraum oder auch die Flugzeugkabine geleitet.

Die Verteilung der Stromleitungen kann auf unterschiedliche Weise im Flugzeugrumpf verlaufen. Eine Verteilungsart der Stromverkabelung ist die zentralisierte Architektur. Dies ist die konventionelle Art der Architektur, die beispielsweise auch bei Airbus

3.2. Grundlegende Informationen zur verwendeten Flugzeugkabine

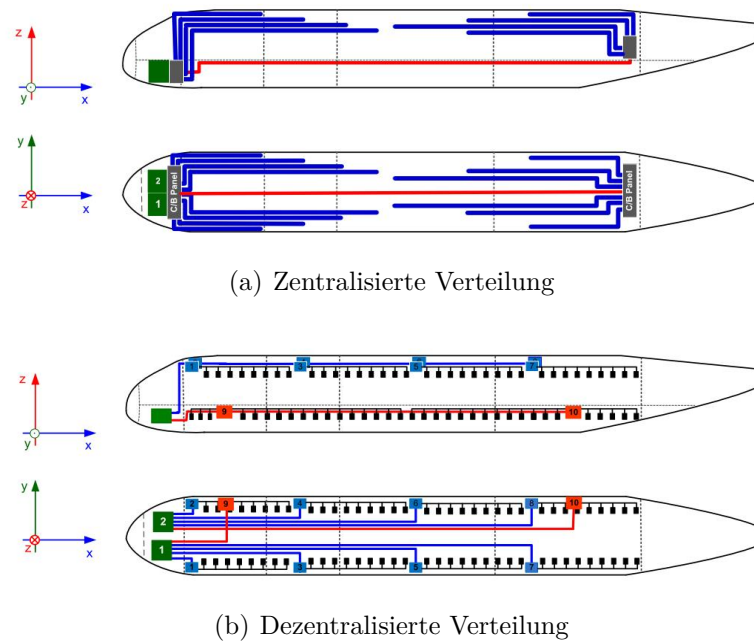


Abbildung 3.3.: Zentrale und dezentrale Verteilung der Stromleitungen im Flugzeugrumpf von [31]

A320, A330 oder A340 Flugzeugen angewendet wird [31]. Hierbei werden die Verbraucher wie bei einer sternförmigen Topologie direkt vom Stromversorgungszentrum (*englisch*: Electric Power Distribution Center, EPDC) mit Strom versorgt [46]. Diese Architektur ist in Abbildung 3.3 (a) dargestellt, wobei in Grün das Stromversorgungszentrum und in Blau die Verbindungen zu den Verbrauchern der Flugzeugkabine visualisiert sind.

Eine weitere Art ist die dezentralisierte Verteilungsarchitektur. Bei dem dezentralisierten System wird der Strom nicht direkt an die Verbraucher, sondern über weitere Verteilerzentren, sogenannte Verteilerkästen (*englisch*: Secondary Power Distribution Boxes, SPDBs), oder Knotenpunkte geleitet. Schematisch ist diese Architekturart in Abbildung 3.3 (b) dargestellt. In der Grafik sind in Rot die Stromversorgung des Frachtraums und in Blau die Stromversorgung der Kabine dargestellt. Diese Architektur wird in Flugzeugen wie dem Airbus A350 oder auch dem Airbus A380 eingesetzt.

3.3. Einsatz der Virtuellen Realität zur Simulation der Kabinenauslegung

Damit das elektrische System der Flugzeugkabine besonders anwenderfreundlich und effizient analysiert werden kann, wird in dieser Arbeit die ausgelegte Systemarchitektur in der Virtuellen Realität (*englisch*: Virtual Reality, VR) simuliert. Dabei wird die Auslegung der elektrischen Systeme in den bestehenden Prozess der modularen Flugzeugkabine integriert.

Die Virtuelle Realität ist eine computergenerierte Darstellung einer dreidimensionalen Umgebung. Die Darstellung in der VR kann je nach Anwendungsbereich variieren. Bei jeder Art von Umgebung soll sich der Nutzer so weit wie möglich in die virtuelle Welt integriert fühlen, um die VR-Erfahrung so realistisch wie möglich zu gestalten. Dies wird durch eine hohe Integration der Sinne erreicht. Dafür besteht die Möglichkeit, dass der Nutzer nicht nur visuell in die VR eintaucht, sondern auch akustische Reize genutzt werden [42]. Im Allgemeinen erfolgt die Interaktion mit der virtuellen Umgebung durch Räume mit der Projektion einer virtuellen Umgebung (*englisch*: Cave Automatic Virtual Environment, CAVE)-Räume, bei denen auf die Wände eines Raums die abzubildenden Bilder projiziert werden, oder durch VR-Brillen, auch Headsets genannt. Hauptsächlich werden VR-Brillen verwendet [13].

In wissenschaftlichen Bereichen liegt der Schwerpunkt zumeist auf einer möglichst präzisen und realistischen Darstellung. Diese detailreichen Abbildungen der Wirklichkeit sind gefragt, um Systeme besser zu verstehen oder Einsicht in sonst unerreichbare Bereiche und Positionen zu ermöglichen. Genau hierfür wird die VR in der Umsetzung der Digitalisierung des Entwicklungsprozesses von Flugzeugkabinen genutzt. Dies ermöglicht bei einer Flugzeugkabine beispielsweise Einsicht in die Systeme hinter der Kabinenverkleidung und stellt die Verbindungen sowie Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten visuell dar.

Um diese visuelle Darstellung interaktiv zu gestalten und präzise zu steuern, müssen die Bewegungen der VR-Brille und verwendeten Controller erfasst werden. Hierfür wird mindestens eine Basisstation benötigt, die als Erfassungssensor fungiert. Mittels

3.3. Einsatz der Virtuellen Realität zur Simulation der Kabinenauslegung

Synchronimpulsen von Laserstrahlen werden die Position der anderen Stationen sowie die Position und Bewegungen des Headsets und der Controller von der Basisstation erfasst. Diese Daten werden anschließend an den Computer weitergegeben. Auf dem Headset und den Controllern befinden sich Sensoren, die die Laserstrahlen erkennen können und durch die Zeitmessung vom Aussenden an den Basisstationen bis zum Eintreffen am Headset und den Controllern deren genaue Position bestimmen. Durch die genaue Erfassung des Headsets kann in Echtzeit das Bild aus dem Blickwinkel des Nutzers generiert werden.

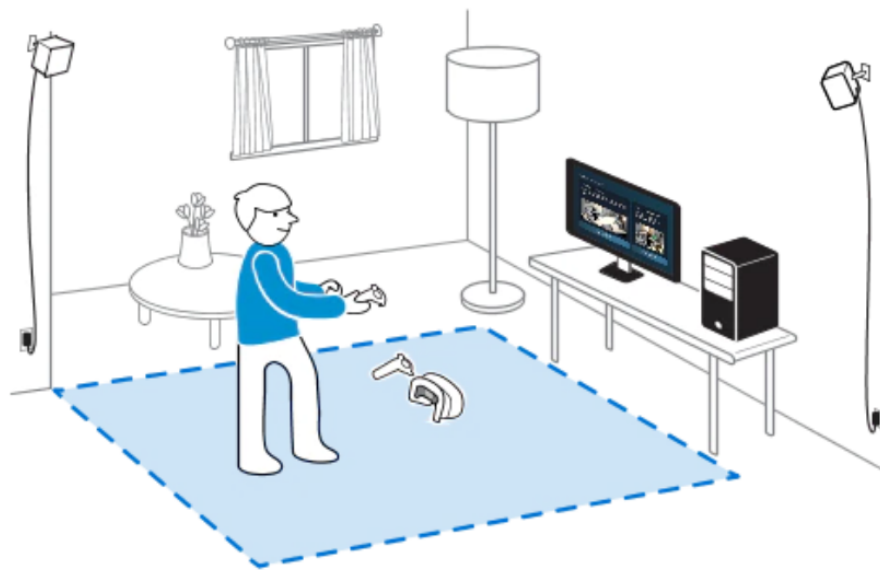


Abbildung 3.4.: Raumeinrichtung für die VR am Beispiel des HTC Vive Pro Headsets von [41]

Um die Funktionsweise des VR-Systems besser zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 3.4 einen allgemeinen Aufbau der Raumeinrichtung zur Nutzung des VR-Systems am Beispiel des Headsets HTC Vive Pro. Die Basisstationen stehen am Rand der Fläche, in der man sich bewegen kann, der sogenannten Trackingfläche. Diese Fläche muss bei der verwendeten Technologie von Unity und SteamVR freigeräumt und mindestens $2\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ groß sein. Es gibt jedoch auch eine Variante, bei der nur minimaler Raum benötigt wird, wobei der Nutzer sich jedoch nicht bewegen, sondern nur stehen darf. Die maximale Trackingfläche variiert je nach Anzahl der Basisstationen. Bei zwei Basisstationen kann eine Fläche von $7\text{ m} \times 7\text{ m}$ abgedeckt

werden. Mit einer höheren Anzahl an Sensoren kann die Fläche auch $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ groß sein. Um Verletzungsgefahren zu vermeiden, wird in der VR eine Begrenzung der Bewegungsfläche angezeigt, sobald man sich dem Rand nähert.

Am Institut für Systemarchitektur in der Luftfahrt vom DLR wird eine Trackingfläche von ca. $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ und das Equipment der HTC Vive Pro 2 zur Nutzung der VR verwendet. Die Fläche ist mit 6 Basistationen ausgestattet.

Echtzeitentwicklungsumgebung Unity

Unity ist eine Entwicklungsumgebung für Spiele und andere 3D-Anwendungen, die mithilfe integrierter Tools und eigenem Code erstellt werden können. Dabei gibt es Funktionen wie das Rendern der Szene und die Manipulation von Objekten, der Kamera und des Lichts, die von der Umgebung übernommen werden. Den Objekten können zudem Komponenten zugewiesen werden, damit sie physikalische Eigenschaften, Materialien und Skripte erhalten. Diese Skripte sind in C# geschrieben und können die Objekte in der Szene steuern.

Da die in Unity erstellten Anwendungen mit vielen Plattformen wie Windows, Linux, mobilen Endgeräten, Spielekonsolen und auch VR-Endgeräten kompatibel sind, wird diese Entwicklungsumgebung in dieser Arbeit genutzt. Durch Unity Add-ons können beispielsweise Anwendungen entwickelt werden, die auf SteamVR-validiertem Equipment laufen. SteamVR ist eine von Valve Corporation entwickelte Plattform, die Verwaltung und Interaktion mit VR-Equipment ermöglicht. Dabei bietet das Unity Add-on die Verknüpfung zu den Geräten und enthält viele vorgefertigte Objekte, die die Programmierung der Steuerung und Interaktionen vereinfachen.

4. Stand der Technik

Das folgende Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf die Kabinenelemente und das gewählte Anwendungsszenario. Zudem wird der Auslegungsprozess vorgestellt, auf den diese Arbeit aufbaut und welche hierdurch erweitert wird. Dabei wird auf die einzelnen Schritte des Prozesses eingegangen und die jeweiligen Methoden vorgestellt, die in den verschiedenen Schritten verwendet werden.

4.1. Eingrenzung der Arbeit und Bedeutung der VR-gestützten Visualisierung in der Flugzeugkabinenentwicklung

Die Virtuelle Realität hat sich in den letzten Jahren zu einem wertvollen Werkzeug in verschiedenen Branchen entwickelt und seinen Platz in unterschiedlichen Einsatzgebieten gefunden, darunter auch in der Luftfahrt. Am DLR-SL wird aus diesem Grund analysiert, wie die VR bei der Entwicklung von Flugzeugkabinen eingesetzt werden kann, um den Design- und Entwicklungsprozess zu optimieren. Dabei bietet die Simulation von Flugzeugkabinendesigns zahlreiche Vorteile für die Entwickler und Flugzeugbauunternehmen. Der Hauptgrund warum eine Flugzeugkabine in der Virtuellen Realität visualisiert wird, ist die Möglichkeit, einen vergleichbaren und schnellen Überblick über das Produkt zu geben. Durch die umfassenden Eigenschaften der VR können Designer und Entwickler die Kabine in einer realistischen dreidimensionalen Umgebung erleben, was eine präzisere Einschätzung des Raumgefühls, der Materialien und der allgemeinen Ästhetik ermöglicht.

4.1. Eingrenzung der Arbeit und Bedeutung der VR-gestützten Visualisierung in der Flugzeugkabinenentwicklung

Ein weiterer Vorteil der Darstellung der Flugzeugkabine als virtuelles Modell ist die Möglichkeit, Änderungen am Produkt in Echtzeit darzustellen. Traditionell erfordern Designmodifikationen oft erhebliche Zeit, Ressourcen und Gelder zur Erstellung neuer physischer Prototypen. In der Industrie dauern solche Änderungen oft Wochen oder Monate, bis sie umgesetzt und getestet werden können, da verschiedene Experten an einer solchen Umsetzung beteiligt sind und ein Austausch zwischen den kleinen Gruppen über mehrere Iterationen der Prozesse erfolgt. Mit der Virtuellen Realität hingegen können Änderungen an der Kabine unmittelbar vorgenommen und überprüft werden. Dadurch erhalten die Entwickler ein sofortiges Feedback, wodurch der gesamte Entwicklungsprozess erheblich beschleunigt wird. Zudem erlaubt die VR-Simulation von Flugzeugkabinen die frühzeitige Identifizierung und Behebung potenzieller Designfehler. Vor allem die Nachbesserung in späteren Phasen der Konstruktion in Bereichen des Flugzeuges, die von einer Verkleidung verdeckt sind, können sehr kostspielig sein.

Eines dieser Systeme der Flugzeugkabine, das sehr komplex ist und in späteren Phasen schwer zu verändern ist, ist das elektrische System. Die Anwendung von VR ermöglicht es, dieses Netz an Stromleitungen, -verteiltern und Verbrauchern übersichtlich darzustellen und zu analysieren. Dies erleichtert es auch Designern und Entwicklern, die nicht auf Elektronik spezialisiert sind, das System besser zu verstehen und sich eine klarere Vorstellung davon zu machen. Dabei ist es jedoch nicht vorgesehen, das elektrische System im Detail und in seiner tatsächlichen Komplexität darzustellen, wie in Abbildung 4.1 gezeigt.

Die Abbildung verdeutlicht das komplexe Geflecht von Kabeln und Verbindungen, das im Flugzeug verbaut ist. Die Vielzahl an Leitungen und Anschlüssen führt zu einer erheblichen Unübersichtlichkeit, was die Wartung und Modifikation erschwert. In der VR-Darstellung hingegen wird das System vereinfacht präsentiert, um eine klare und intuitive Visualisierung zu gewährleisten, die die grundlegende Funktionalität und Struktur verdeutlicht. Auf diese Weise können Designer und Entwickler leichter interagieren und fundierte Entscheidungen treffen, ohne von der tatsächlichen Komplexität überwältigt zu werden.

Da das elektrische System ein sehr umfangreiches und großes Netzwerk ist, wird

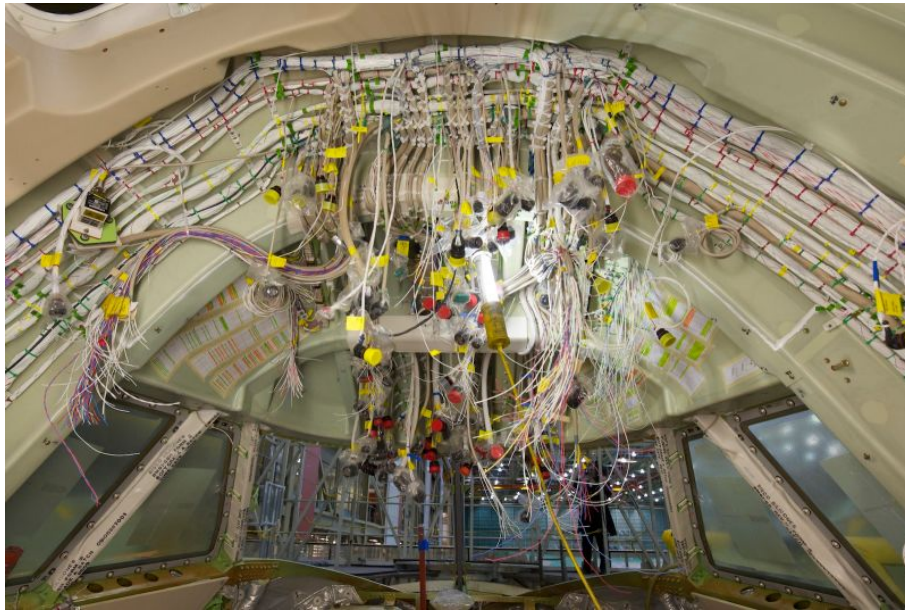


Abbildung 4.1.: Beispiel für die Komplexität des elektrischen Systems in einer Flugzeugkabine von [14]

in dieser Arbeit der Fokus auf die Beleuchtung der Flugzeugkabine gelegt. Dabei gibt es in dem Inneren des Flugzeuges eine Reihe an unterschiedlichen Beleuchtungskomponenten. Diese Komponenten umfassen das Lichtsystem im Cockpit, die Notbeleuchtung, die Passagierinformationsanzeigen, die Beleuchtung der Serviceeinheiten und den Cargobereichen sowie die allgemeine Kabinenbeleuchtung inklusive persönlicher Passagierlampen [30]. Für die Flugzeugkabine sind jedoch nur die Notbeleuchtung, Passagierinformationsanzeigen und die allgemeine Kabinenbeleuchtung relevant, auf die sich hier konzentriert wird.

4.2. Beleuchtungskomponenten in der Flugzeugkabine

Die Beleuchtung der Flugzeugkabine spielt eine entscheidende Rolle für die Gesamtqualität des Flugerlebnisses der Passagiere. Dabei beeinflusst die Beleuchtung nicht nur den Komfort und das Wohlbefinden der Passagiere, sondern trägt auch zur Sicherheit des Flugbetriebs bei. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über

4.2. Beleuchtungskomponenten in der Flugzeugkabine

die verschiedenen Beleuchtungskomponenten und deren technologischen Fortschritte gegeben.

In der Flugzeugkabine gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Beleuchtungselementen, die für eine angenehme Atmosphäre sorgen oder zur Sicherheit des Fluges und den Passagieren beitragen. Dabei wird für diese Arbeit die Flugzeugkabine so definiert, dass der Raum im Rumpf des Flugzeuges gemeint ist, in dem die Passagiere während des Fluges sitzen. Dies schließt die Bereiche des Cockpits, der Toiletten, der Küchen, des Frachtraums und der Serviceeinheiten des Personals aus. Dieser Bereich enthält dabei die folgenden Beleuchtungskomponenten [22]:

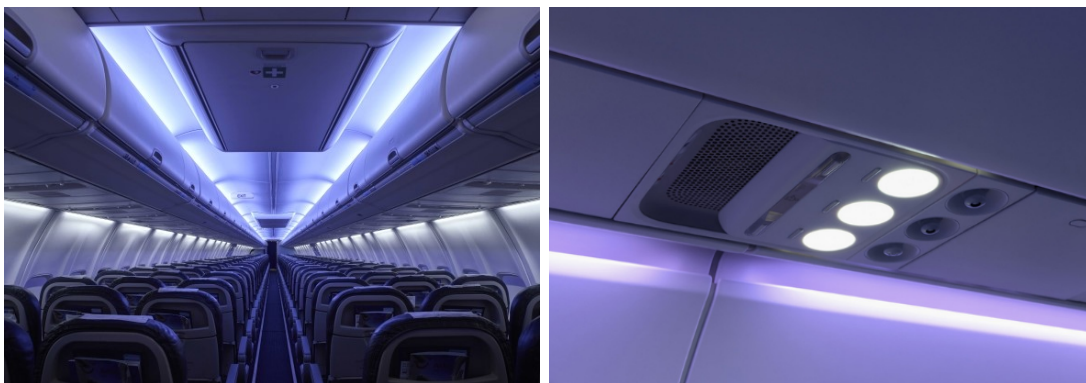
- Deckenbeleuchtung (*englisch*: dome lights): Diese Beleuchtungskomponenten sind entlang der Deckenelemente der Flugzeugkabine angebracht und sorgen für eine gleichmäßige Ausleuchtung des Raumes. Dabei sind die Deckenbeleuchtungen in der Regel dimmbar, um die Helligkeit an die Tageszeit und die Bedürfnisse der Passagiere anzupassen. Diese Lichter werden von dem Flugpersonal gesteuert.
- Wandbeleuchtung (*englisch*: wash lights): Diese Leuchten sind zwischen den Seitenwänden und den Gepäckfächern angebracht und sorgen für eine indirekte Beleuchtung der Wände. Diese Beleuchtungskomponenten tragen zur allgemeinen Atmosphäre der Kabine bei und sind ebenfalls dimmbar. Auch diese Lichter werden vom Flugpersonal kontrolliert.
- Leselampen (*englisch*: reading lights): Diese Beleuchtungskomponenten sind Teil der Passagierserviceeinheiten (*englisch*: Passenger Service Units, PSUs), die oberhalb der Sitze und unterhalb der Gepäckablagen angebracht sind. Die PSU umfasst zudem Elemente wie die Belüftungsdüsen und die Sauerstoffmasken. Die Leselampen sind individuell steuerbar und ermöglichen es den Passagieren, bei Bedarf zusätzliche Beleuchtung zu erhalten.
- Hinweisbeleuchtung: Diese Beleuchtungskomponenten sind eine weitere Komponente der PSU, werden jedoch von den Piloten gesteuert. Dabei sind sie je nach Funktion entweder während des Starts, der Landung und bei Turbulen-

4.2. Beleuchtungskomponenten in der Flugzeugkabine

zen oder den gesamten Flug über eingeschaltet, um den Passagieren wichtige Informationen zu übermitteln. Hierzu zählt beispielsweise das Ansnallzeichen.

- Notbeleuchtung (*englisch*: emergency lights): Diese Beleuchtungskomponenten sind in der Flugzeugkabine angebracht und dienen dazu, den Passagieren im Falle eines Notfalls den Weg zu den Notausgängen zu weisen. Somit befinden sich diese Lichter über den Notausgängen in der Kabine. Zudem gibt es in einigen Flugzeugen entlang der Gänge eine Beleuchtung am Boden. Hierfür werden oft auch fluoreszierende Streifen verwendet, die bei einer Abdunklung der Kabine weiterhin sichtbar sind.

Die Hinweis- und die Notbeleuchtung sind dabei kritische Stromverbraucher, die im Falle eines Generatorenausfalls weiterhin mit Strom versorgt werden, um die Sicherheit der Passagiere zu gewährleisten. Die ersten drei Beleuchtungsarten gehören hingegen zu den nicht-essenziellen Stromverbrauchern. Aus diesem Grund sind die Notbeleuchtung und die Informationslampen an einem anderen Stromkreis angeschlossen als die allgemeine Kabinenbeleuchtung. Somit lassen Beleuchtungskomponenten der verschiedenen Stromverbraucherarten separat betrachten [22]. In Abbildung 4.2 sind Beispiele für die ersten drei Beleuchtungskomponenten dargestellt. Dabei sind die Decken- und Wandbeleuchtung in (a) und die Leselampen, die Teil der PSU sind, in (b) visualisiert.



(a) Decken- und Wandbeleuchtung von [28]

(b) Leselampen der PSU von [33]

Abbildung 4.2.: Allgemeine Beleuchtungskomponenten in einer Flugzeugkabine

Wie bereits erwähnt, sind die Decken- und Wandbeleuchtungen dimmbar und helfen, eine angenehme Atmosphäre während des Fluges zu schaffen. Sie werden verwendet, um die Stimmung der Passagiere zu beeinflussen und den Komfort dadurch zu erhöhen. Die Lampen ermöglichen heutzutage eine Farbänderung, um bestimmte Stimmungen und Szenarien zu erzeugen. Dies kann helfen, den zirkadianen Rhythmus der Passagiere zu unterstützen, sodass der Jetlag minimiert wird, oder das Wärmegefühl der Passagiere beeinflusst wird. Hierzu wird momentan erforscht, ob die Simulation von Tages- und Nachtzyklen mittels der Beleuchtung bei Langstreckenflügen hilfreich sein kann. [5][43]

Heutzutage werden zudem vermehrt LED-Lampen in Flugzeugkabinen eingesetzt. Die Einführung der LED-Lampen hat die Beleuchtung in dieser Industrie revolutioniert, da sie energieeffizient, langlebig und gewichtssparend sind [45]. Laut [1] werden in einem Airbus A320 bei LED-Lampen bis zu 45 einzelne LEDs in einer Einheit verbaut, um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu gewährleisten. Ihre geringe Wärmeentwicklung und vielseitige Einsatzmöglichkeit machen sie zur bevorzugten Wahl in modernen Kabinen. Zukünftige Entwicklungen könnten den Einsatz von OLEDs (organischen Leuchtdioden) und anderen fortschrittlichen Materialien umfassen, die noch flexiblere und energieeffizientere Beleuchtungslösungen ermöglichen.

4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme

Damit das elektrische System der Kabinenbeleuchtung in einer virtuellen Flugzeugkabine integriert und simuliert werden kann, wird in dieser Arbeit ein bestehender Auslegungsprozess erweitert. Dieses Gesamtsystem des Prozesses wurde über die letzten Jahre in der Abteilung Integrierte Kabine und Industrialisierung am DLR-SL maßgeblich von F. Beckert und M. Fuchs entwickelt und wird in dieser Arbeit als Grundlage verwendet [10][16][17][18].

Auslegungsschritte im Prozess

Dieser Prozess ist interdisziplinär aufgebaut und besteht aus einer Reihe an Schritten, die ausgeführt werden, um die Kabinenelemente zu modellieren und in eine virtuelle Realität zu überführen. Die Einteilung des Prozesses in die einzelnen Auslegungsschritte wird in Abbildung 4.3 dargestellt.

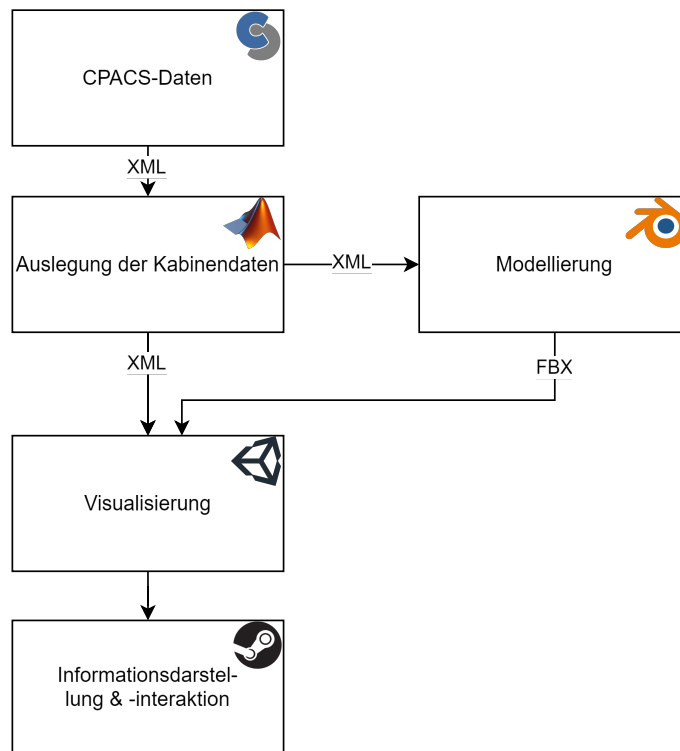


Abbildung 4.3.: Aufbau der Auslegungsprozesskette

Die Flugzeugkonfigurationen und -auslegungsdaten der zu simulierenden Flugzeugkabinen werden in CPACS-Dateien gespeichert, wie in Abschnitt 3.1 vorgestellt wird. Zunächst werden in Matlab Daten zu der Rumpfstruktur des Flugzeuges sowie Parameter der Flugzeugkabine und ihren Komponenten importiert. Anhand der eingelesenen Informationen wird im Anschluss die Kabinenauslegung in Matlab durchgeführt. In dem Auslegungsalgorithmus werden den Kabinenelementen Geometrien, Identifikationen und weitere Attribute zugewiesen. Dies wird mittels Objekt-Orientierter Programmierung (OOP) realisiert. Abschließend werden die

4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme

Parameter wie beispielsweise Position, Masse oder ID aus der Auslegung in eine XML-Datei exportiert. Diese XML-Datei wird im Anschluss genutzt, um die Kabinenelemente in Blender als hochauflösendes 3D-Modell zu modellieren. Bei der Modellierung wird eine FBX-Datei der Flugzeugkabine mit den dreidimensionalen Kabinenelementen erstellt. In Unity werden dann die XML-Datei aus Matlab und die FBX-Datei aus Blender importiert, um die Daten in einer virtuellen Realität per Steam-VR zu visualisieren und dem Nutzer eine Interaktion mit den Analyseergebnissen sowie dem 3D-Modell zu ermöglichen.

Objektorientierte Klassenstruktur des Auslegungsalgorithmus in Matlab

Die Kabinenelemente werden mittels OOP in Matlab erstellt. Abbildung 4.4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Klassen der Auslegungsinstanzen. Entsprechend der UML-Konvention sind Vererbungen mittels Pfeilen von der Kindklasse zur Elternklasse dargestellt.

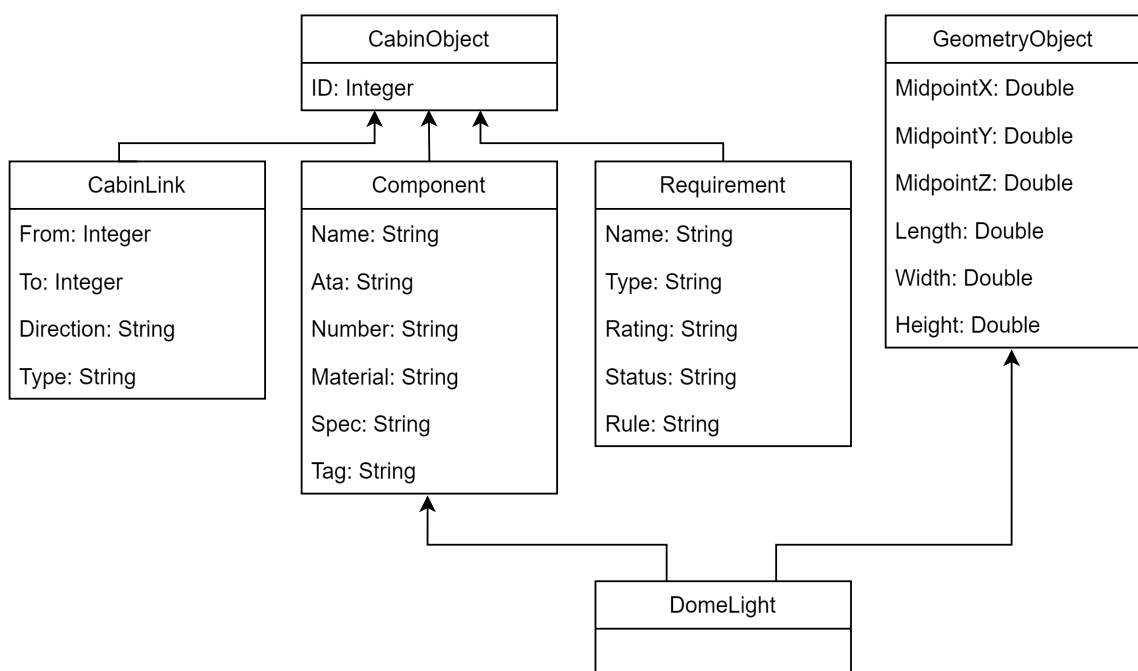


Abbildung 4.4.: Ausschnitt der Klassenstruktur der Auslegungsinstanzen

4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme

Hierbei gibt es die Basisklasse *CabinObject*, von der jedes Objekt erbt, das instanziiert wird. Diese Klasse enthält grundlegende Eigenschaften und Methoden. Mit der hier zugeteilten ID lassen sich die Objekte im weiteren Verlauf der Prozesskette referenzieren. Von der Basisklasse erben drei weitere Klassen, die verschiedene Gruppen an Klassen repräsentieren. Zunächst gibt es die Klasse *CabinLink*, welche für Verbindungen zwischen Objekten vorgesehen ist. Zudem gibt es die Klasse *Component*. Von dieser Klasse erben alle Kabinenkomponenten, wie beispielsweise die Leuchtkörper in der Kabine oder die Sitze. Das Luftverkehrsverband (*englisch*: Air Transport Association, ATA)-Kapitel beschreibt, zu welchem System eines Flugzeuges die Komponente gehört. Das Klassenattribut *Number* wird für die Erstellung der Verbindungen benötigt. Die Attribute *Material* und *Tag* werden für die Darstellung in Unity benötigt. Zuletzt erbt auch die Klasse *Requirement* von der Basisklasse, mit der die Anforderungen an bestimmte Kabinenelemente festgelegt werden. Zudem gibt es die Klasse *GeometryObject*, die als Helferklasse dient. Diese Klasse enthält Attribute, um einem Objekt geometrische Eigenschaften zu geben, damit dieses auch eine definierte Geometrie erhält, sowie die Position des Objektes.

Jedes Kabinenelement wird als Instanz einer Klasse erstellt. Diese Klasse beschreibt den Elementtyp und ist immer eine Unterklasse von einer der drei genannten Klassen. Zu den geerbten Attributen von der Elternklasse können weitere Attribute hinzugefügt werden, die spezifisch für den jeweiligen Kabinenelementtyp sind. Dabei werden einige Attribute der Klassen von in Matlab festgelegten oder aus den CPACS-Daten importierten Parametern abgeleitet. Dies sind beispielsweise die Eigenschaften wie Höhe, Breite und Tiefe eines Objektes der Klasse oder Daten zu der Kabinengeometrie.

Export der Auslegungsparameter als XML-Datei

Wie bereits in der Einführung des Gesamtsystems von Abschnitt 4.3 beschrieben, wird in Matlab im Anschluss an den Auslegungsalgorithmus die Parameter der erzeugten Kabinenauslegung als XML-Datei exportiert. Dabei wird die Auslegung in einer hierarchischen Struktur abgelegt, die beispielhaft in Quelltext 4.1 dargestellt ist. Diese Struktur ist so aufgebaut, dass zunächst die allgemeinen Parameter (*<parameters>*) abgelegt sind. Im Anschluss an die Parameter werden unter *<components>* die

4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme

Informationen der Kabinenelemente in eigenen `<component>` gespeichert. Dabei werden hier alle vorhandenen Attribute als verschachtelte Elemente abgelegt.

Darauf folgen die erstellten Links (`<links>`) und Anforderungen (`<requirements>`), die ebenfalls in eigenen Tags abgelegt sind. Abschließend werden die Daten, die für die Evaluation der Kabinenelemente benötigt werden, unter `<evaluationData>` gespeichert.

```
1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <cabin>
3   <parameters>...</parameters>
4   <components>
5     <component>...</component>
6     ...
7   </components>
8   <links>...</links>
9   <requirements>...</requirements>
10  <evaluationData>...</evaluationData>
11 </cabin>
```

Quelltext 4.1: Struktur der exportierten Auslegungsdaten in XML

Modellierung der Kabinenelemente in Blender

Um die Flugzeugkabine und deren Elemente in einer virtuellen Realität mit einer hohen Immersion darzustellen, werden die Kabinenelemente in Blender als hochauflösende 3D-Geometrien modelliert. Dafür werden mittels eines Python-Skriptes die XML-Datei aus Matlab mit den Auslegungsparameter und eine Konfigurationsdatei mit Zusatzinformationen eingelesen. Die Konfigurationsdatei ist im JSON-Format strukturiert und enthält Parameteränderungen zu den Komponentarten, die im Nachhinein an die Auslegung in Matlab angepasst werden müssen. Da in Matlab nur die Hüllkörper (*englisch*: bounding boxes) der Kabinenelemente erstellt werden und diese in Blender durch hochauflösende 3D-Modelle ersetzt werden, ist es bei einigen Objekten notwendig, die Geometrie oder Positionierung der exakten Modelle leicht anzupassen. Dieser Unterschied zwischen dem Zwischenergebnis der Auslegung in Matlab und der eigentlichen Modellierung in Blender ist in Abbildung 4.5 am Beispiel eines Sitzes dargestellt. In Abbildung (a) ist der Hüllkörper des Sitzes in Matlab

4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme

visualisiert, wobei die Geometrie anhand der Parameter von Höhe, Breite und Tiefe erstellt wird. In Blender wird der Hüllkörper dann jedoch mit einem importiertem 3D-Modell des Sitzes ersetzt, das in (b) dargestellt ist.

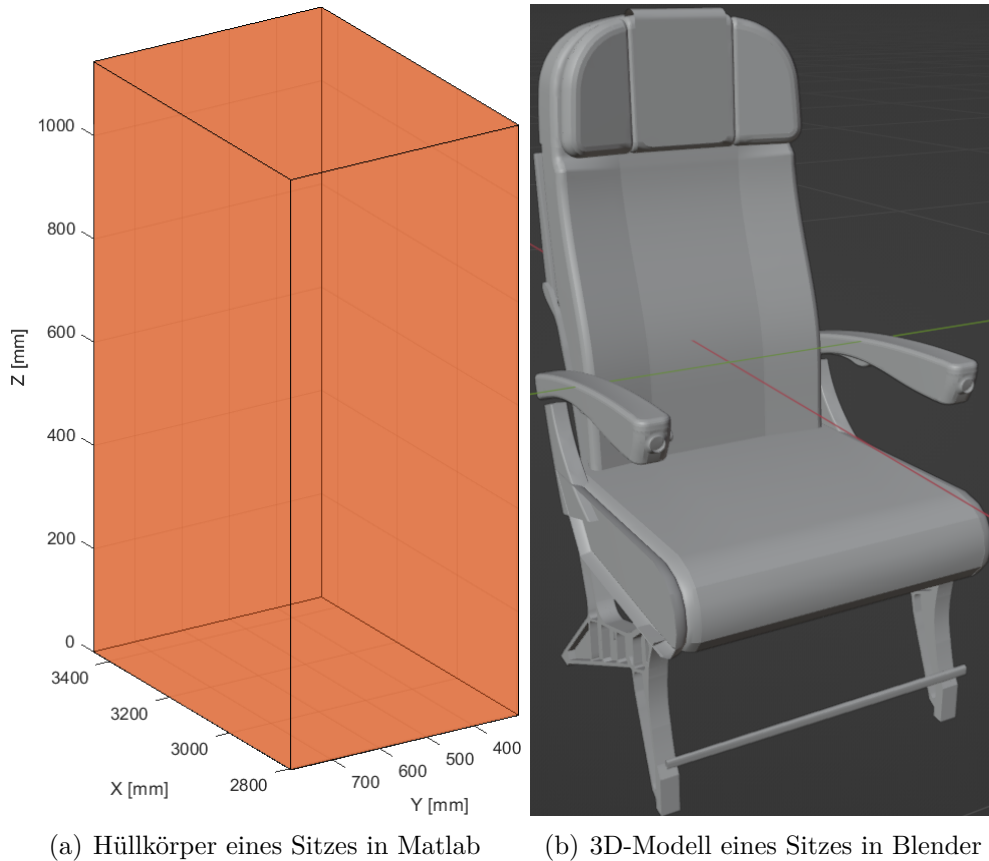


Abbildung 4.5.: Vergleich des Hüllkörpers und des 3D-Modells eines Sitzes (provisorische Bilder)

Anhand der eingelesenen Informationen werden in dem Python-Skript Blender-konforme Objekte erstellt oder, wenn vorhanden, bestehende dreidimensionale Modelle von den einzelnen Kabinenelementen geladen. Nachdem die Kabine fertig modelliert wurde, wird das dreidimensionale Modell der Flugzeugkabine als FBX-Datei exportiert. Während der FBX-Dateityp ursprünglich für die Aufnahme von Grafik-Animationssquenzen verwendet wurde, ist es heutzutage 3D-Daten-Austauschformat zwischen Editoren und Entwicklungsumgebungen für Spiele [8]. Unity verarbeitet dieses Datenformat besonders gut und kann die Daten automatisch in die Szenen

4.3. Auslegungsprozess der Kabinensysteme

laden. Dieses Modell wird im Anschluss in Unity importiert, um die Kabinenelemente in einer virtuellen Realität zu visualisieren.

5. Methodik zur Entwicklung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration und Analyse der Kabinenbeleuchtung und deren elektrischen Systems in eine virtuelle Flugzeugkabine eines Airbus A320. Diese Integration in ein virtuelles Modell soll das Verständnis und die Analyse des Systems während der Entwicklungsphase einer neuen Flugzeugkabine erleichtern. Da die Integration aus einer Vielzahl an heterogenen Systemen im Flugzeug und Entwicklungsumgebungen besteht, die miteinander kommunizieren müssen, lässt sich die entwickelte Methodik zur Umsetzung der Aufgabe in drei Teilbereiche unterteilen:

1. Erstellung einer Architektur für die Kabinenbeleuchtung & Stromversorgung
2. Analyse der Architektur
3. Visualisierung der Architektur in einer virtuellen Umgebung

Im ersten Teilbereich, der Erstellung der Architektur werden die technischen Anforderungen und Spezifikationen der Beleuchtungselemente und der Stromversorgung definiert. Daran angeknüpft gilt es, die relevanten Komponenten zu identifizieren und diese zu generieren und modellieren. Hier steht auch die Erstellung von Schnittstellen zwischen den Systemkomponenten im Fokus.

Im zweiten Teil der Methodik, der Analyse der Architektur, werden verschiedene Szenarien und Anwendungsfälle betrachtet, um die Eigenschaften zu analysieren. Hierfür

werden geometrische und funktionale Eigenschaften berechnet und in Beziehung zueinander gesetzt.

Im dritten Teilbereich, der Visualisierung der Architektur geht es um die interaktive Darstellung der Architektur in einer virtuellen Umgebung. Ein weiterer Aspekt ist die Darstellung der Analyseergebnisse in der Virtuellen Realität.

Diese drei Teilbereiche der Methodik werden im Folgenden zusammen mit ihren Unteraufgaben genauer erläutert.

5.1. Methode zur Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems

Damit die Kabinenbeleuchtung und deren Stromversorgung in eine virtuelle Flugzeugkabine integriert und an die weiteren komplexen Systeme gekoppelt werden kann, muss zunächst eine Architektur für das System erstellt werden. Für diese Ausarbeitung wird in dieser Arbeit hauptsächlich die Simulations- und Modellierungssoftware Matlab verwendet. Hier wird eine objektorientierte Klassenstruktur genutzt (siehe Abschnitt 4.3), um die Komponenten des Systems zu modellieren. Somit wird jede Komponente in der Flugzeugkabine als Instanz einer Klasse modelliert, wobei die Klasse den Komponententyp beschreibt.

Die Erstellung der Auslegung der Kabinenbeleuchtung und dessen Stromversorgung lässt sich in vier Aufgaben oder Schritte unterteilen, die schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt sind. Der erste Schritt ist die Generierung und Platzierung der Beleuchtungskomponenten in der Flugzeugkabine. Als zweiter Schritt folgt die Bestimmung von geometrischen Positionen, die als Stützpunkte für den Kurvenverlauf der Stromkabel zwischen Beleuchtung und Verteilerzentrum dienen. Im dritten Schritt werden die Kabelverbindungen in Matlab generiert, bevor die Auslegung der gesamten Beleuchtungsarchitektur im letzten Schritt in Blender importiert und modelliert wird. Dabei werden die ersten drei Teilaspekte in Matlab umgesetzt, während der letzte Teil in Blender-Python-Scripting realisiert wird.

5.2. Herangehensweise der Bestimmung von Analyseparametern der Beleuchtungsarchitektur

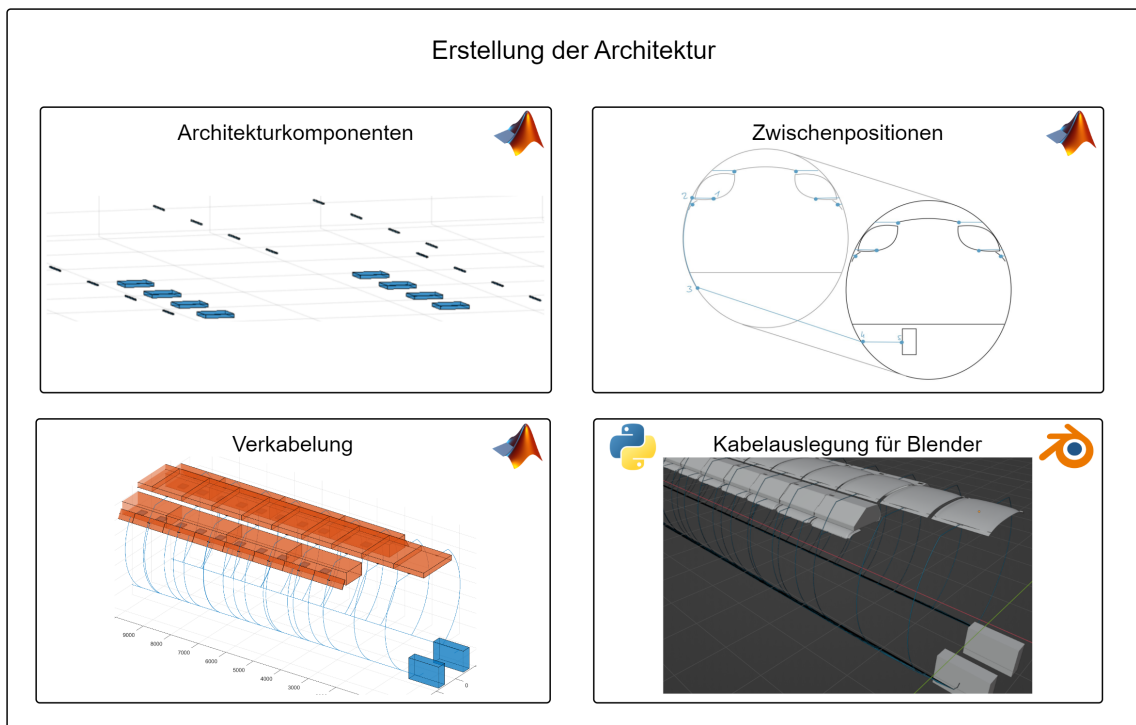


Abbildung 5.1.: Teilaspekte der Erstellung der Architektur

Für die Kabel im Flugzeug werden in der Praxis Kupferleiter mit einem Durchmesser von 1 bis 10 mm verwendet [19]. Aus diesem Grund wird der Leiterdurchmesser auf den Median mit 5,5 mm gesetzt. Eine weitere Eingrenzung erfolgt im Bezug auf die LEDs in den Lampen. Hier wird die Annahme getroffen, dass eine Standard-LED in weißer Lichtfarbe genutzt wird, dessen Datenblatt in Anhang A zu finden ist.

5.2. Herangehensweise der Bestimmung von Analyseparametern der Beleuchtungsarchitektur

Die modellierten Architekturen gilt es darüber hinaus zu untersuchen. Dabei werden zwei Verteilungsarten für die beiden implementierten Kabelarchitekturen untersucht, eine zentrale und eine dezentrale Verteilung. Für die Analyse des Systems werden zunächst geometrische und funktionale Eigenschaften der Verkabelungen bestimmt,

5.2. Herangehensweise der Bestimmung von Analyseparametern der Beleuchtungsarchitektur

um auf Grundlage dieser Daten bestimmte Analyseparameter zu berechnen. Diese Analyseparameter umfassen elektrische Daten wie den Leiterwiderstand, aber auch weitere Eigenschaften wie das Gesamtgewicht. Zur besseren Darstellung werden einige der Ergebnisse als Graphen oder Diagramme visualisiert.

In Abbildung 5.2 ist dargestellt, dass die Auswertung der Architekturen aus den zwei Teilaspekten Bestimmung von geometrischen und funktionalen Eigenschaften sowie der Berechnung der Analyseparameter besteht. Dabei werden beide Aspekte in Matlab durchgeführt. Zu den Eigenschaften zählen die Kabellänge, der Leiterwiderstand und der Kabeldurchmesser. Die Analyseparameter umfassen die benötigte Leistung der Beleuchtungskomponenten, das Gesamtgewicht sowie Korrelationen zwischen den Daten.

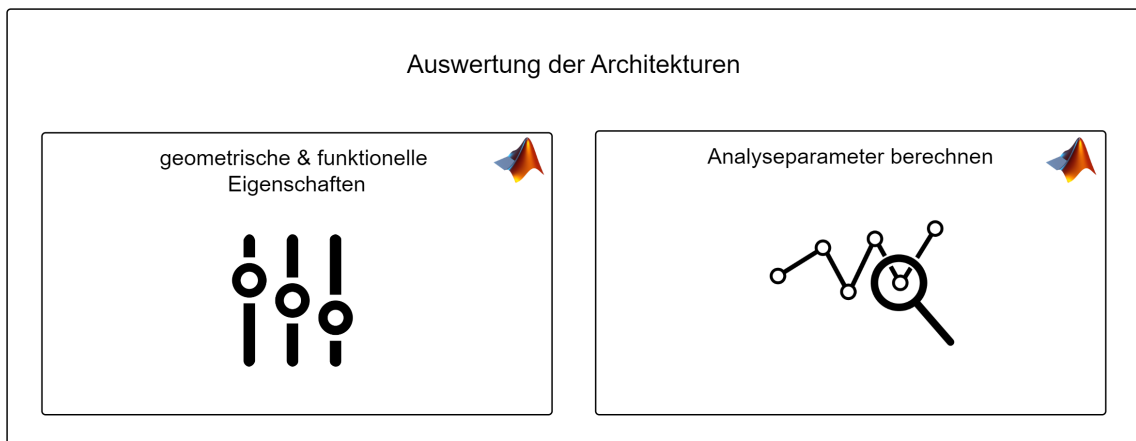


Abbildung 5.2.: Teilaspekte der Analyse

Damit sowohl die Eigenschaften als auch die Analyseergebnisse in der Virtuellen Realität dargestellt werden können, gilt es, diese Daten in Matlab in den XML-Export zu integrieren. Dabei werden die Zahlenwerte unter den zugehörigen XML-Tags gespeichert und für die Grafiken die Dateipfade hinterlegt, unter denen die Bilder zu finden sind.

5.3. Vorgehensweise zur Visualisierung des Beleuchtungssystems in der Virtuellen Realität

Der letzte Schritt der Methodik ist die Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität. Die Methodik der Visualisierung lässt sich in zwei Teilaspekte unterteilen, der Darstellung der Architektur und der Darstellung der Analyseergebnisse in der Virtuellen Realität, die in Abbildung 5.3 dargestellt sind. Dabei werden die Teilbereiche mithilfe von C# in Unity umgesetzt.

Für diese Methodik werden die in Matlab und Blender erstellten Modelle, Auslegungen und Analyseergebnisse in Unity als Ressourcen importiert. Zur Validierung der generierten Architektur des Beleuchtungssystems, wird der Objekttyp *electricalSystem* als mögliche Komponentenart definiert. Daraufhin werden die neuen Objekte als Instanzen erkannt und lassen sich in der virtuellen Umgebung visualisieren und damit interagieren.

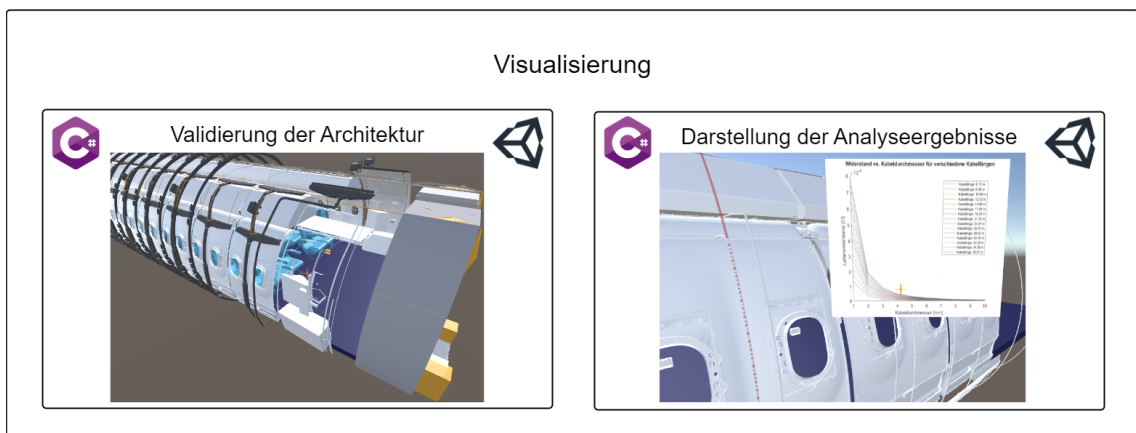


Abbildung 5.3.: Teilaspekte der Visualisierungsmethodik

Der zweite Teil der Visualisierung bezieht sich auf die Darstellung der Analyseergebnisse in der Virtuellen Realität. Dafür werden nur bereits im Projekt vorhandene Unity-Objekte verwendet und deren Funktionen erweitert, um die Parameterwerte oder Grafiken der Ergebnisse darzustellen. Diese Daten werden dann in Unity aus

5.4. Übersicht der verwendeten Technologien und Software zur Implementierung der Methodik

der in Matlab generierten XML-Datei geladen und mithilfe der Unity-internen C# Programmierung in der virtuellen Umgebung visualisiert.

5.4. Übersicht der verwendeten Technologien und Software zur Implementierung der Methodik

Für die Implementierung werden in dieser Arbeit verschiedene Software und Bibliotheken oder Erweiterungen verwendet. Diese sind in Tabelle 5.1 mit den jeweiligen Versionen aufgelistet, wobei die Bibliotheken kursiv geschrieben. Für die Auslegung der Kabinenarchitektur, deren Analyse und Platzierung wird Matlab verwendet. Um diese Auslegung zu modellieren wird Blender verwendet, wobei die notwendigen Daten mittels Python in Blender importiert werden. Zuletzt wird die Visualisierung der Kabinenarchitektur und dessen Auswertung mittels der Entwicklungsumgebung Unity in Kombination mit dem SteamVR-Equipment umgesetzt.







Logo	Software	Entwickler	Version
	Blender	Blender Foundation	3.3.1
	CPACS	DLR	3.2
	Matlab	MathWorks	2024a
	Python	Python Software Foundation	3.10.6
	<i>bpy</i>	Blender Foundation	4.0.0
	SteamVR	Valve Corporation	1.21
	Unity	Unity Technologies	2018.4.27 f1
	<i>GUISystem</i>	Unity Technologies	2018 4.27
	<i>UNetHLAPI</i>	Unity Technologies	2018 4.27
	<i>UnityGoogleAudioSpatializer</i>	Unity Technologies	2018 4.27
	<i>UnitySpartialTracking</i>	Unity Technologies	2018 4.27
	<i>UnityVR</i>	Unity Technologies	2018 4.27

Tabelle 5.1.: Verwendete Software und Versionen

6. Implementierung der Methodik

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

Um die Kabinenbeleuchtung und deren Stromversorgung in die Auslegung einer virtuellen Flugzeugkabine zu integrieren, wird zunächst eine Architektur für das System erstellt. Für diese Ausarbeitung wird in dieser Arbeit hauptsächlich die Simulations- und Modellierungssoftware Matlab verwendet. Hier wird eine objektorientierte Klassenstruktur genutzt, um die Komponenten des Systems zu modellieren. Somit wird jede Komponente in der Flugzeugkabine als Instanz einer Klasse modelliert, wobei die Klasse den Komponententyp beschreibt. Bei der Ausführung des Auslegungsalgorithmus wird die *main.m*-Datei ausgeführt, in der die Hauptfunktion der Auslegung implementiert ist. Hier werden die Parameter für Kabinenvariationen gesetzt und Unterfunktionen zum Einlesen der CPACS-Daten, Generierung der Komponenten und Export der Auslegungsdaten aufgerufen. Diese Datei ist zur besseren Vorstellung in Anhang B dargestellt. Bei der Generierung der Objekte werden in Matlab die Objekte in verschiedenen Listen zur weiteren Verarbeitung gespeichert, wobei jede Liste einer Klasse zugeordnet ist. Zur Verbesserung des Raumgefühls wird im Folgenden das in Abbildung 6.1 dargestellte Koordinatensystem verwendet, um Richtungen und Positionen zu verdeutlichen. Dabei zeigt die x-Achse die Längsrichtung in Richtung des Hecks vom Flugzeug, die y-Achse in Fahrtrichtung nach rechts und die z-Achse nach oben.

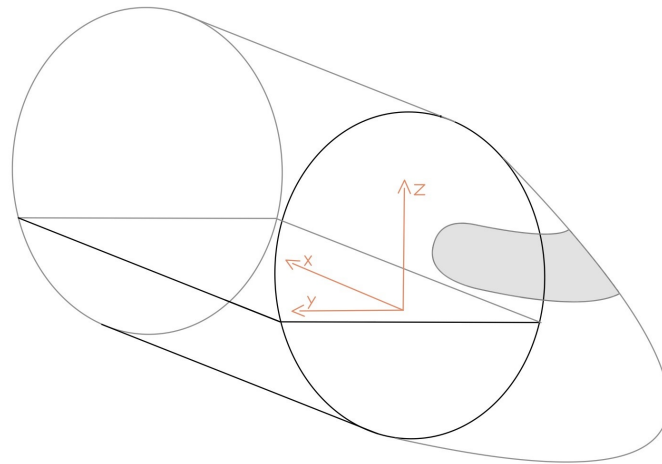


Abbildung 6.1.: Schematische Abbildung des Koordinatensystems in der Flugzeugkabine

Die Erstellung der Auslegung der Kabinenbeleuchtung und deren Stromversorgung ist in vier Aufgaben oder Schritte unterteilt, die schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt sind. Der erste Schritt ist die Generierung und Positionierung der Beleuchtungskomponenten in der Flugzeugkabine. Als zweiter Schritt folgt die Bestimmung von Zwischenpositionen, die als Übergangsstationen der Stromkabel zwischen Beleuchtung und Verteilerzentrum dienen. Im dritten Schritt werden die Kabelverbindungen in Matlab generiert, bevor die Auslegung der gesamten Beleuchtungsarchitektur im letzten Schritt in Blender importiert und modelliert wird.

Schritt 1: Generierung der Beleuchtungskomponenten

Im ersten Schritt werden zunächst die Architekturkomponenten des elektrischen Systems der Kabinenbeleuchtung identifiziert und in Matlab anhand von anderen, vorher generierten, Kabinenobjekten platziert, da die Beleuchtungen an diesen Objekten in der Kabine befestigt sind. Die Wandbeleuchtung liegt hinter den Lichtabdeckungen (*light covers*), die zwischen den Seitenwänden und den Gepäckfächer (*englisch: Overhead Storage Compartments, OHSCs*) als Verbindungsstück platziert sind. Die Deckenbeleuchtung ist in der Flugzeugkabine an beiden Rändern der Deckenverkleidung befestigt. Die Leselampen müssen in diesem Schritt nicht platziert werden, da

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

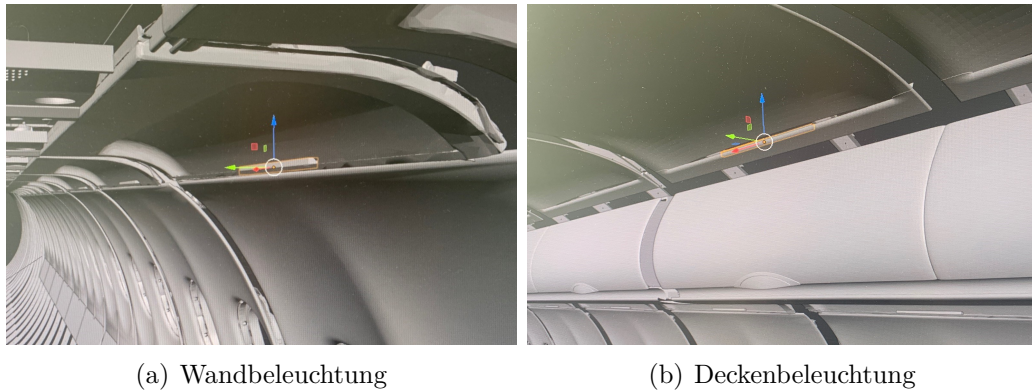


Abbildung 6.2.: Positionierung der Beleuchtungskomponenten in Abhängigkeit der Verkleidungselemente

sie ein Bestandteil der PSUs sind und hierfür bereits die Auslegung implementiert ist.

Wird nun die Kabine entlang der x-z-Ebene in der Mitte des Kabinengangs symmetrisch in zwei Hälften geteilt, so lässt sich eine 1 zu 1 Beziehung zwischen Verkleidungsobjekt und einer Wand- beziehungsweise Deckenlampe herstellen. Da die Positionen der Verkleidungselemente zum Zeitpunkt der Platzierung der Beleuchtungen bereits bekannt sind, können diese als Referenzpunkte für die Positionierung der Beleuchtungselemente genutzt werden. Somit lässt sich über die jeweilige Liste der Kabinenverkleidungsart iterieren, um so nacheinander die Instanzen der Beleuchtungskomponentenklassen zu generieren. In Abbildung 6.2 sind die Ausrichtungen und Platzierungen der Wandbeleuchtung im Zusammenhang mit der Lichtabdeckung (a) und der Deckenbeleuchtung in Abhängigkeit der Deckenverkleidung (b) dargestellt. Dabei wird die Wandbeleuchtung mittig zur Verkleidung platziert und die Deckenlampen sind mittig entlang der beiden unteren äußeren Kanten orientiert.

Die Klassen *WashLight* und *DomeLight*, die die Wand- und Deckenbeleuchtung repräsentieren, erben von der Klasse *Component* und *GeometryObject*. Zur Veranschaulichung ist die Definition der Klasse *WashLight* in 6.1. Die Vererbungen sind in dem Quelltext in Zeile 1 zu erkennen. In Zeilen 7-24 ist die Instanziierungsfunktion dargestellt. Hierfür müssen, wie in Zeile 7 des Quellcodes zu erkennen ist, die folgenden Eigenschaften beim Instanzieren eines Objektes der Klassen angegeben werden:

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

Length, Width, Height, Midpointx, Midpointy, Midpointz, Number, Spec. Zusätzlich erhält die Klasse das eigene private Attribut *expectedPower*, der angibt, wie viel Leistung die Lampe benötigt. Dieser Parameter ist auch der PSU-Klasse zugeteilt. Zudem kann das vererbte Attribut *Connections* genutzt werden, um die funktionalen Verbindungen einer Lampe zu den Verkleidungsobjekten und dem zugehörigen EPDC zu speichern. Dabei wird lediglich die Klasse des Zielobjektes angegeben und wie viele Verbindungen zu dieser Klasse bestehen. Daraufhin werden die Verbindungen zu den n-nächstliegenden Objekten erzeugt.

```
1 classdef WashLight < Component & GeometryObject
2     properties
3         expectedPower
4     end
5
6     methods
7         function obj = WashLight(Length, Width, Height, Midpointx, Midpointy,
8             Midpointz, Number, Spec)
9             n_LEDS = 45;
10            obj.Height = Height;
11            obj.Width = Width;
12            obj.Length = Length;
13            obj.Color = [0 0.4470 0.7410];
14            obj.Tag = 'electricalSystem';
15            obj.Spec = Spec;
16            obj.Number = Number;
17            obj.Midpointx = Midpointx;
18            obj.Midpointy = Midpointy;
19            obj.Midpointz = Midpointz;
20            obj.Ata = '33-25-00';
21            obj.Material = 'PVC';
22            obj.Connections = {'LightCover', 1, 'MainEPDC', 1};
23            obj.Name = strcat('WashLights', num2str(Number), Spec);
24            obj.expectedPower = n_LEDS * 3 * 0.02 ; % 3V, 20mA
25        end
26    end
```

Quelltext 6.1: Definition der Klasse *WashLight*

Jedes Objekt erhält seine Positionsdaten (*Midpointx, Midpointy, Midpointz*) durch die Informationen der Verkleidungselemente und die Dimensionen des Objektes werden aus den in Matlab gespeicherten allgemeinen Parametern eingelesen. Das Attribut *Number* gibt an, das wievielte Objekt der Klasse instanziiert wird und

Spec ist ein String, der die spezifischen Eigenschaften des Objektes beschreibt, wie beispielsweise, ob das Objekt sich auf der rechten ('RH') oder linken ('LH') Seite oder in der Mitte ('RHLH') der Kabine befindet. Die Eigenschaft *expectedPower* wird beim Instanzieren des Objektes bestimmt, dabei hat jede Beleuchtungskomponente eine festgelegte Anzahl an LEDs, die in einer Lampe verbaut sind. Bei den Wand- und Deckenlampen wird angenommen, dass jede Lampe 45 LEDs enthält. Bei den PSUs hingegen werden 5 LEDs pro Leselampe angenommen, da diese einen kleinen Bereich beleuchten. Eine Standard LED mit 5 mm Durchmesser in weißer Farbe hat eine Leistung von 0,06 Watt, da sie eine Spannung von 3 V und einen Strom von 20 mA benötigt, wie aus Anhang A zu entnehmen ist. Somit ergibt sich die benötigte Leistung einer Lampe durch die Anzahl der verbauten LEDs multipliziert mit der Leistung einer LED. Gleichung (6.1) repräsentiert die zugehörige Berechnungsformel.

$$P_{light} = 0.06W \cdot n_{LEDs} \quad (6.1)$$

Schritt 2: Bestimmung der Zwischenpositionen

Die Verkabelung der Beleuchtungskomponenten verbindet jeweils ein Beleuchtungselement mit dem EPDC, was beim Airbus A320 unterhalb der Kücheneinheit im vorderen Teil des Flugzeuges liegt [2]. Da die Informationen zum EPDC nicht in den verwendeten CPACS-Daten enthalten sind, müssen diese in Matlab anhand von manuell hinzugefügten Daten instanziiert werden.

Um die Auslegung der Verkabelung in Matlab zu implementieren, werden die vereinfachten Kabelarchitekturen anhand von Zwischenpositionen erstellt. Diese Zwischenpositionen sind die Punkte, an denen die Verkabelung von einem Beleuchtungselement zum EPDC verläuft. Zur Bestimmung der Zwischenpositionen der Kabelverbindungen werden zwei verschiedene Kabelrouten betrachtet. Zum einen wird eine Variante betrachtet, bei der die Kabel zunächst entlang der Rundung des Flugzeugrumpfes läuft und anschließend Richtung Flugzeugbug zum EPDC geführt werden. Bei der zweiten Variante verlaufen die Kabel oberhalb der OHSCs entlang der x-Achse und werden dann im Bereich des Stromversorgungszentrums unter die Flugzeugkabine geführt.

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

Bei der ersten Variante liegt die Startposition und damit auch die erste Zwischenposition der Kabelverbindung am Rand der Beleuchtung, als Verlängerung des Objekt-Mittelpunktes mit der Ausrichtung zum Flugzeugrumpf. Somit sind die x- und z-Werte der Startposition identisch mit denen des Objektmittelpunktes und der y-Wert wird um $1/2$ der Objektbreite erweitert. Anschließend wird die Verkabelung zum Rand der Kabine geführt. Hierfür wird jedoch die y-Position des Kabinenrumpfes auf der Höhe der Beleuchtungskomponente benötigt. Hierfür wird der Satz des Pythagoras angewendet. Der Kabinenrumpf eines A320 lässt sich dabei im Kabinenbereich als Kreis vereinfacht darstellen, was für diese Berechnung genutzt wird. Der Radius des Kabinenrumpfes ist durch die CPACS-Daten bekannt und der Kreisursprung liegt auf der y-z-Ebene des Flugzeug-Koordinatensystems 650 mm in z-Richtung über dem Ursprung. Der z-Wert, der in der Berechnung genutzt wird, entspricht dem *Midpointz* der Beleuchtung, wobei die 650 mm Differenz zum Kreisursprung noch davon subtrahiert werden müssen, damit der Pythagoras angewendet werden kann. In Abbildung 6.3 wird die beschriebene Anordnung dargestellt. Diese Abbildung zeigt die y-z-Ebene in der Flugzeugkabine. Hier sind in Grau Kabinenelemente wie der Rumpf, die Deckenverkleidung und auf jeder Seite von der Deckenverkleidung die OHSCs abgebildet. Auf der y-Achse liegt der Fußboden der Flugzeugkabine. In Rot ist der an den Flugzeugrumpf angenäherten Kreis dargestellt, der im Bereich der Flugzeugkabine den Rumpf relativ gut repräsentiert. Der Mittelpunkt des Kreises ist dabei als rotes Kreuz visualisiert. Dieser bildet eine Ecke des rechtwinkligen Dreiecks, das für die Berechnung des y-Wertes ($pos2_y$ in Abbildung 6.3) verwendet wird. Die Hypotenuse des Dreiecks entspricht dem Radius des roten Kreises.

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

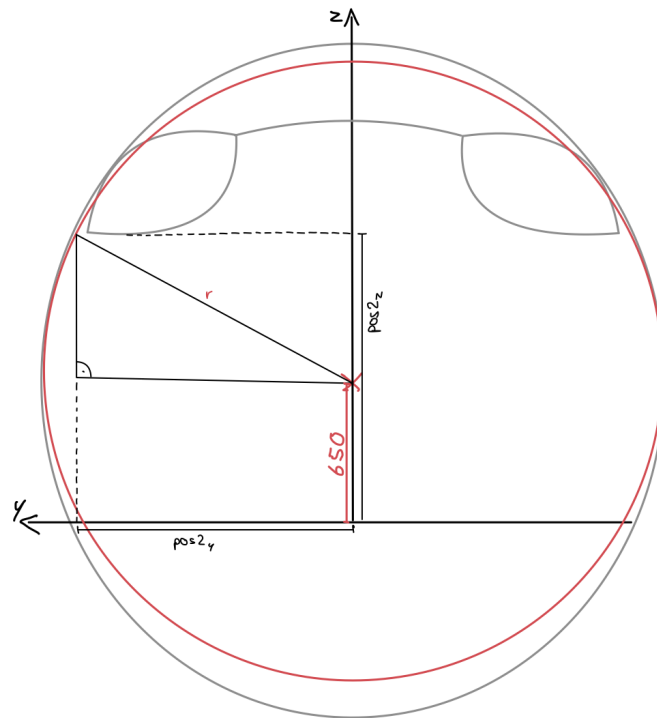


Abbildung 6.3.: Schematische Darstellung der Nutzung des Satz des Pythagoras

Gleichung (6.2) zeigt die verwendete Formel des umgeformten Satzes des Pythagoras zur Bestimmung der y-Koordinate für die zweite Zwischenposition.

$$y = \sqrt{r^2 - (z - 650)^2} \quad (6.2)$$

Die nächste Zwischenposition ist auf der Höhe in z-Richtung von dem EPDC, wodurch der z-Wert durch den *Midpointz* des EPDCs gegeben wird. Somit muss die Verkabelung von der vorherigen Position zur nächsten entlang der Seitenwand der Kabine geführt werden und der Satz des Pythagoras wird erneut angewendet, um die y-Koordinate des Punktes zu berechnen, wobei hier der z-Wert anders ist, als bei der vorherigen Berechnung. Bis jetzt liegen alle berechneten Zwischenpositionen auf einer y-z-Ebene im Raum. Für den vierten Zwischenpunkt wird der x-Wert des vorherigen Punktes so angepasst, dass dieser mit dem *Midpointx* des EPDCs übereinstimmt. Die letzte Zwischenposition befindet sich direkt am Stromversorgungszentrum, wobei wie bei der Startposition die halbe Breite des Objektes auf den *Midpointy* addiert

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

wird, um am äußeren Ende des Objektes zu landen.

In Abbildung 6.4 wird die beschriebene Kabelroutenvariante schematisch dargestellt, indem die Zwischenpositionen und geplante passende Verkabelung in Blau von einem PSU-Element zum EPDC visualisiert. Zusätzlich sind auch andere Beleuchtungselemente wie die Wand- und Deckenbeleuchtung punktuell sowie Querschnitte der relevanten Verkleidungselementen und den Gepäckfächern, die sich im sogenannten Crown Module befinden, dargestellt.

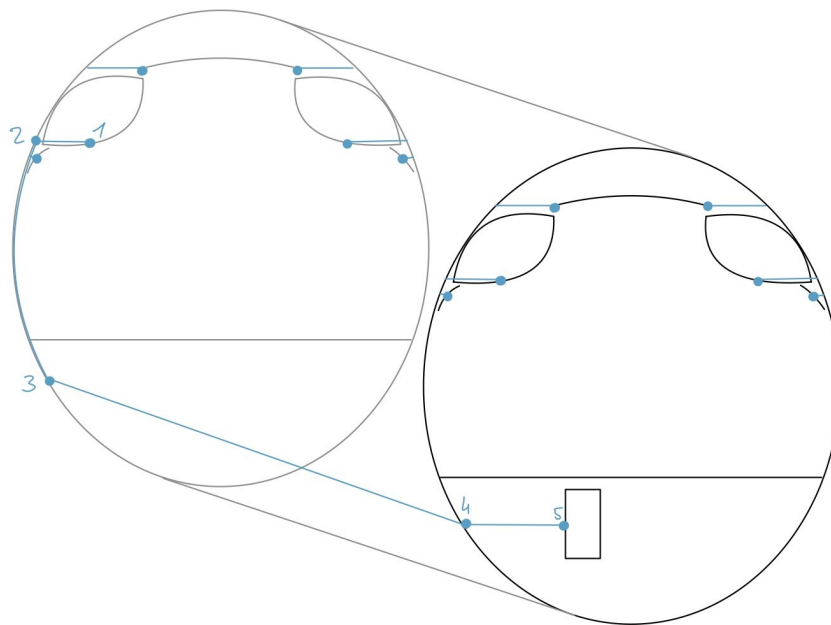


Abbildung 6.4.: Schematische Darstellung der ersten Variante der Kabelverbindung zwischen Beleuchtung und EPDC

Bei der zweiten Variante der Kabelführung verlaufen die Kabel nicht an der Seitenwand entlang, sondern mittig oberhalb der Crown Modules und der OHSCs. Die Startposition ist bei dieser Variante identisch wie bei der ersten Route, auf der zum Kabinenrumpf gerichteten Seite der Objekt. Da die PSU und die Wandbeleuchtung unterhalb der Gepäckfächer liegen, müssen diese Lichter zunächst am Kabinenrand nach oben geführt werden. Dafür wird auch hier der y-Wert der Position am Flugzeugrumpf mit dem Satz des Pythagoras berechnet, wobei die x- und z-Werte sich im Vergleich zur Startposition nicht verändern. Die dritte Zwischenposition beschreibt

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

den Punkt auf Höhe der oberen Seite der OHSCs entlang des Flugzeugrumpfes. Die anschließende Zwischenposition befindet sich an der oberen Fläche des Gepäckfaches, auf halber Höhe zwischen dem Objektmittelpunkt und dem Rand der Fläche, der am Nächsten am Kabinengang liegt. Als nächsten Schritt wird eine Verschiebung in x-Richtung vorgenommen, bis auf Höhe des Verteilerzentrums im vorderen Teil des Flugzeugs. Bei den letzten zwei Zwischenpositionen wird zunächst der z-Wert bearbeitet, damit dieser identisch mit dem z-Wert des Objektmittelpunktes des EPDCs ist. Anschließend wird der y-Wert angepasst, damit der Endpunkt an der Oberfläche des Verteilerzentrums liegt.

In Abbildung 6.5 wird die zweite Variante der Kabelroutenführung dargestellt. Hierbei sind die Zwischenpositionen und die geplante Verkabelung in Blau von einem PSU-Element zum EPDC visualisiert. Die Darstellung der Routenführung und der Kabine ist dabei identisch zu der in Abbildung 6.4.

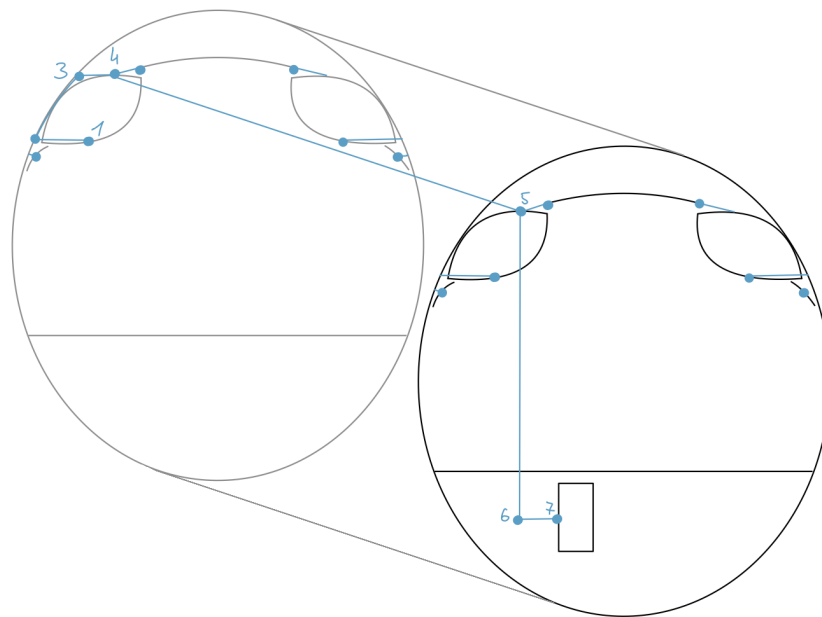


Abbildung 6.5.: Schematische Darstellung der zweiten Variante der Kabelverbindung zwischen Beleuchtung und EPDC

Schritt 3: Generierung der Verkabelung

Die Verkabelung zwischen den Beleuchtungskomponenten und dem EPDC wird in Matlab anhand der Zwischenpositionen generiert. Die Kabel entsprechen dabei Instanzen der Klasse *PowerCable*, die von den Klassen *Component* und *GeometryObject* erbt. In Zeile 1 der Kabinendefinition aus Quelltext 6.2 wird diese Vererbung dargestellt. Die Klasse benötigt zum Instanzieren den Parameter des Kabel-Durchmessers, der unter dem Attribut *Width* gespeichert wird. Weitere Parameter sind die Start- und Endobjekte, die mit dem Kabel verbunden sind. Diese Daten werden zum einen verwendet, um die Zwischenpositionen zu bestimmen, indem die x-, y- und z-Werte, sowie Höhe, Breite und Länge der beiden Objekte ausgewertet werden und zum anderen, um für das Kabel Informationen zum Startobjekt wie ID und Namen zu hinterlegen. Weitere Parameter sind die Standarddaten wie die Nummer und Spec, die die Klasse von *Component* erbt. Zuletzt benötigt die Klasse noch die Information, welche Kabelarchitektur verwendet wird und ein Objekt der Gepäckfächer, das sich auf der Seite des Startobjektes befindet, um die passende Kabelführung zu generieren. Die Instanziierungsfunktion ist in dem Quelltext ab Zeile 9 mit den benötigten Parametern dargestellt.

```
1 classdef PowerCable < Component & GeometryObject
2     properties
3         points
4         weight % in g
5         resistor % in Ohm
6     end
7
8     methods
9         function obj = WashLight(Width, startObject, endObject, Number, Spec,
10            cableArchitecture, ohsc)
11             obj.Height = 0;
12             obj.Width = Width; % diameter
13             obj.Length = 0;
14             obj.Color = [0 0.4470 0.7410];
15             obj.Tag = 'electricalSystem';
16             obj.Spec = Spec;
17             obj.Number = Number;
18             obj.Midpoint_x = startObject.Midpoint_x;
19             obj.Midpoint_y = startObject.Midpoint_y;
20             obj.Midpoint_z = startObject.Midpoint_z;
21             obj.Ata = '24-22-00';
```

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

```
21     obj.Material = 'Copper';
22     obj.Name = strcat('PowerCable', startObject.Name,
    num2str(Number),Spec);
23     if contains(cableArchitecture, 'lower')
24         obj.points = createLowerCablePoints(obj,startObject,endObject);
25     elseif contains(cableArchitecture, 'upper')
26         obj.points =
    createUpperCablePoints(obj,startObject,endObject,ohsc);
27     end
28     obj.geometryType = 'cable';
29 end
30 end
31 end
```

Quelltext 6.2: Definition der Klasse *PowerCable*

Die Klasse besitzt jedoch nicht nur die von den Elternklassen vererbten Attribute, sondern auch eigene Attribute, wie *points*, *weight* und *resistor* die in Quelltext 6.2 in Zeilen 2-6 definiert sind. In *points* werden dabei die Zwischenpositionen als Matrix gespeichert, die aus drei Zeilen besteht, die für die x-, y- und z-Werte stehen und so viele Spalten wie Zwischenpositionen hat. Je nachdem welchen Wert *cableArchitecture* hat, wird in Zeile 24 oder 26 die Funktion zur Bestimmung der Punkte aufgerufen. Dabei werden auf den Geraden eine höhere Anzahl von Punkten gespeichert, da sich die Notwendigkeit bei der Umsetzung in Blender ergibt. Ohne zusätzliche Punkte würden bei der Nutzung von Bézierkurven diese einen unerwünschten Verlauf annehmen. Diese Herausforderung wird im folgenden Unterkapitel genauer betrachtet und kann in Matlab gelöst werden, indem mehr Punkte zwischen Punkten mit einer hohen Entfernung generiert werden.

Beim Export der Auslegungsdaten werden die gespeicherten Punkte des Kabels dann in dem jeweiligen *<component>* verschachtelt unter dem Tag *<Points>* gespeichert. Hier wird jeder Punkt als *<Point>* mit den Untertags *<x>*, *<y>* und *<z>* gespeichert. Diese Struktur ist in Quelltext 6.3 dargestellt. Dabei werden die Tags der Punkte nur bei den Komponenten hinzugefügt, die das Attribut *geometryType* mit dem Wert "cable" haben.

```
1 ...
2 <components>
3   <component>
4     <Type>PowerCable</Type>
5     ...
6     <Points>
7       <Point>
8         <x>...</x>
9         <y>...</y>
10        <z>...</z>
11      </Point>
12    </Points>
13  </component>
14 </components>
15 ...
```

Quelltext 6.3: Ausschnitt der Speicherung der Zwischenpositionen einer Kabelkomponente in der Export-XML-Datei

Schritt 4: Import und Modellierung in Blender

Im Anschluss an den Export der Auslegungsdaten in Matlab werden diese Daten genutzt, um die in Matlab erstellten Hüllkörper der Komponenten in Blender mit dreidimensionalen Modellen zu ersetzen. Dabei gibt es zwei Dateien, die die Grundlage für die Modellierung in Blender bilden. Zum einen die *output.xml*, die die Auslegungsdaten enthält und zum anderen die *config.json*, die Korrekturdaten jedes Komponententyps enthält, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben.

Für die Darstellung der Verkabelung werden aufgrund der variabel verlaufenden Kabelverbindungen keine 3D-Modelle in Blender importiert, sondern mithilfe von Bézierkurven die Kabel erstellt. Bézierkurven sind parametrisch modellierte Kurven zur Beschreibung von Freiformen. Dabei bestehen die Kurven aus einer Reihe an sogenannten Stützpunkten, durch die die Kurve verläuft, sowie Steuerpunkten, mit denen die Form der Kurve beeinflusst wird. Dabei befinden sich zwischen den Steuer- und Stützpunkten Hilfslinien. Diese beeinflussen in Abhängigkeit ihrer Länge den Kurvenverlauf.

6.1. Generierung der Auslegung des Kabinenbeleuchtungssystems zur Integration in die Flugzeugkabine

Die exportierten Auslegungsdaten der Kabel enthalten die Zwischenpositionen, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben. Mithilfe dieser Daten werden die Stützpunkte der Kurve erzeugt, indem durch die Einträge jedes *Point*-Tags iteriert wird, wie in Quelltext 6.4 dargestellt. Die Bézierkurve wird dabei als *polyline* generiert. Da jedoch keine weiteren Informationen außer den Stützpunkten zu den Kurven in dem Auslegungsprozess in Matlab berechnet werden, werden die Steuerpunkte automatisch generiert. Dies führt jedoch dazu, dass die Kurve nicht immer den gewünschten Verlauf annimmt, da die Automatik annimmt, dass wenn zwei Punkte weiter auseinanderliegen, die Kurve mehr Spielraum hat und somit einen größeren Bogen bilden kann. Diese Herausforderung ist dadurch gelöst, dass mehr Punkte zwischen den eigentlichen Zwischenpositionen gespeichert werden, um den Kurvenverlauf genauer zu steuern.

```
1 import bpy
2 curve_data = bpy.data.curves.new(name, type='CURVE')
3 polyline = curve_data.splines.new('BEZIER')
4 spline.bezier_points.add(len(points) - 1)
5 points = component.find("Points").findall("Point")
6 for i, point in enumerate(points):
7     polyline.bezier_points[i].co = (x, y, z)
8     polyline.bezier_points[i].handle_left_type = 'AUTO'
9     polyline.bezier_points[i].handle_right_type = 'AUTO'
```

Quelltext 6.4: Erstellung der Punkte einer Bézierkurve in Python für Blender

Zur korrekten Zuordnung und Interaktion in Unity wird dem Blender-Objekt der Kurve die eindeutige ID aus der XML-Datei zugewiesen. Damit wird sichergestellt, dass die Objekte im Unity-Umfeld identifizierbar sind. Der Bézierkurve wird zudem eine Stärke zugewiesen, indem der Kurve mit *bevel_depth* der Wert des Kabeldurchmessers zugewiesen wird.

6.2. Berechnung der Analyseparameter der Beleuchtungsarchitektur

Die Berechnungen der Analyseparameter der Kabelarchitekturen werden in Matlab durchgeführt. Dabei werden die Auslegungsdaten der Kabelverbindungen genutzt, um zunächst die geometrischen und funktionalen Eigenschaften der Kabel zu bestimmen. Zudem gilt es die benötigte elektrische Leistung der Beleuchtungskomponenten zu berechnen.

Im Bezug auf die Kabelroutenführung wurden zwei Architekturen betrachtet, die in den vorherigen Abschnitten beschrieben wurden. Zur Analyse dieser beiden Architekturen werden jedoch auch zwei Stromverteilungsarten betrachtet, die zentrale und dezentrale Verteilung. Dabei entspricht die Umsetzung der Modellierung der Verkabelung einer zentralen Verteilung, bei der jeder Verbraucher durch einen eigenen Leiter mit Strom versorgt wird. Bei der dezentralisierten Verteilung gibt es bei dem entwickelten Beleuchtungssystem insgesamt sechs Stromkreise, jeweils eins pro Kabinenseite und Beleuchtungstyp. Somit sind alle Lampen einer Beleuchtungsart auf einer Seite parallel geschaltet. Um eine dezentralisierte Verteilung zu simulieren, wird die Modellierung nicht verändert, jedoch die Berechnungen der Kabeleigenschaften wie Länge und Gewicht angepasst. Dafür wird nach Berechnung der Länge diese angepasst, indem der Abschnitt bis zum vorherigen Knotenpunkt von der berechneten Länge subtrahiert wird. Ein Ausschnitt eines Stromkreises bei einer dezentralisierten Verteilung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Hierbei gibt es jeweils Leiterabschnitte zwischen den Knotenpunkten, die mit L_1, L_2, \dots, L_n bezeichnet sind, sowie Kabelabschnitte zwischen den Knotenpunkten und der Beleuchtungskomponente L_{LED} . Der Leiterabschnitt L_{LED} ist bei allen Beleuchtungskomponenten identisch. Die Stromquelle stellt in dieser Abbildung das Stromversorgungszentrum dar.

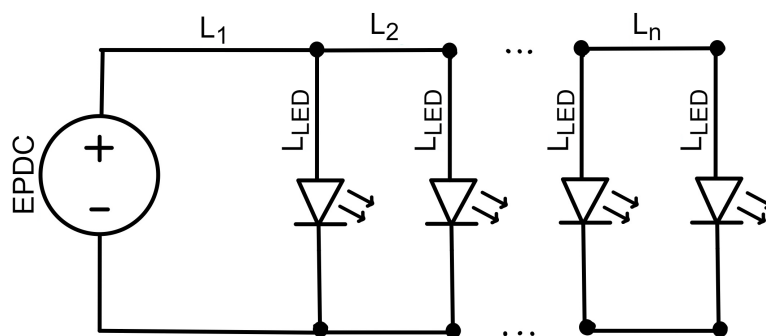


Abbildung 6.6.: Ausschnitt des Stromkreises eines Beleuchtungstyps bei einer dezentralisierten Verteilung

Bestimmung von geometrischen und funktionalen Eigenschaften

Die geometrischen und funktionalen Eigenschaften der Kabelverbindungen werden anhand der Objektattribute in Matlab berechnet. Hierfür werden die Kabellänge, das Gewicht und der Leiterwiderstand bestimmt.

Für die Berechnung der Kabellänge werden die gespeicherten Zwischenpositionen der Kabelverbindungen genutzt. Dabei wird die Distanz zwischen zwei Punkten (p_1 und p_2) mit dem Satz des Pythagoras berechnet, wie in Gleichung (6.3) dargestellt. Diese Berechnung wird für alle Punkte durchgeführt und die Summe der Distanzen ergibt die Gesamtlänge des Kabels.

$$|\vec{p_1 p_2}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (6.3)$$

Für die Berechnung des Gewichts des Kabels (M) wird die Formel aus [26] verwendet, die in Gleichung (6.4) aufgezeigt wird. Hierfür werden verschiedene Eigenschaften des Leiters benötigt. Darunter zählen der Radius des Leiterquerschnitts (r) in Zentimetern, die Länge des Kabels (l) in Zentimetern sowie die spezifische Dichte von Kupfer (ρ), da es sich hier um einen Kupferdraht handelt. Die Dichte von Kupfer beträgt dabei $8,96 \text{ g/cm}^3$ [26]. Da die Kabellänge für die Berechnung verwendet wird, muss diese zuvor bestimmt werden. Die Masse des Kabels in Gramm wird nun berechnet, indem zunächst das Volumen des Leiters bestimmt wird und dies mit der

Leiterdichte multipliziert wird.

$$M = \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho \quad (6.4)$$

Der Leiterwiderstand wird durch die Formel in Gleichung (6.5) bestimmt, die aus der Formelsammlung [39] stammt. Hierbei wird der spezifische Widerstand von Kupfer (ρ) benötigt, der $0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ beträgt. Die Länge des Kabels (l) in Metern und der Querschnitt des Leiters (A) in Quadratmillimeter werden ebenfalls benötigt.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (6.5)$$

Berechnung der benötigten Leistung

Um eine Grundlage für weitere mögliche Analysen zu schaffen, wird in dieser Arbeit die benötigte Leistung des Beleuchtungssystems bestimmt. Dafür wurden bereits beim Instanzieren der Beleuchtungskomponente die Anzahl der LEDs in den Lampen festgelegt sowie die Leistung einer Lampe berechnet, wie bereits in Abschnitt 6.1 beschrieben. Dabei hat eine LED eine Leistung von $0,06 \text{ W}$, da sie eine Spannung von 3 V und einen Strom von 20 mA benötigt. Die benötigte Gesamtleistung des Systems ergibt sich aus der Summe der Leistungen der unterschiedlichen Beleuchtungstypen, wobei diese jeweils aus der Anzahl der Lampen (n), Anzahl an LEDs pro Lampe und der Leistung einer LED berechnet wird. Bei den Decken- und Wandbeleuchtungen wird angenommen, dass jede Lampe 45 LEDs enthält, während die Leselampen 5 LEDs besitzen, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben. Somit ergibt sich eine Gesamtleistung (P_{ges}) in Abhängigkeit der Anzahlen der Lampen pro Beleuchtungstyp, wie in Gleichung (6.6) dargestellt.

$$P_{ges} = 0,06 \text{ W} \cdot 45 \cdot n_{domeLights} + 0,06 \text{ W} \cdot 45 \cdot n_{washLights} + 0,06 \text{ W} \cdot 5 \cdot n_{readingLights} \quad (6.6)$$

6.3. Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität und Darstellung des Systems und der Analyseergebnisse

Der letzte Schritt der Kabinen-Auslegungsprozesskette ist die Visualisierung der Kabine in der Virtuelle Realität. Hierfür werden die in Matlab und Blender erstellten Modelle, Auslegungen und Analyseergebnisse in Unity als *Assets* unter den *Resources* importiert. In Abbildung 6.7 ist die Entwicklungsumgebung in Unity dargestellt, wobei im unteren Teil des Bildschirmes die Ordnerstruktur *Assets/Resources* visualisiert ist. Auf den *Resources* Ordner kann während der Laufzeit der virtuellen Umgebung zugegriffen werden, um die Objekte in der Szene zu instanziiieren. In den *Resources* werden die Bilder von Analysegrafiken in dem Unterordner *EvaluationData* gespeichert. Die Auslegungsdaten (*output.xml*) und das Kabinenmodell aus Blender (*Cabin.fbx*) werden direkt im *Resources* hinzugefügt. Der Unterordner *EvaluationData* sowie die *output.xml* und *Cabin.fbx* Dateien sind in Abbildung 6.7 in der Ordnerstruktur zu erkennen.

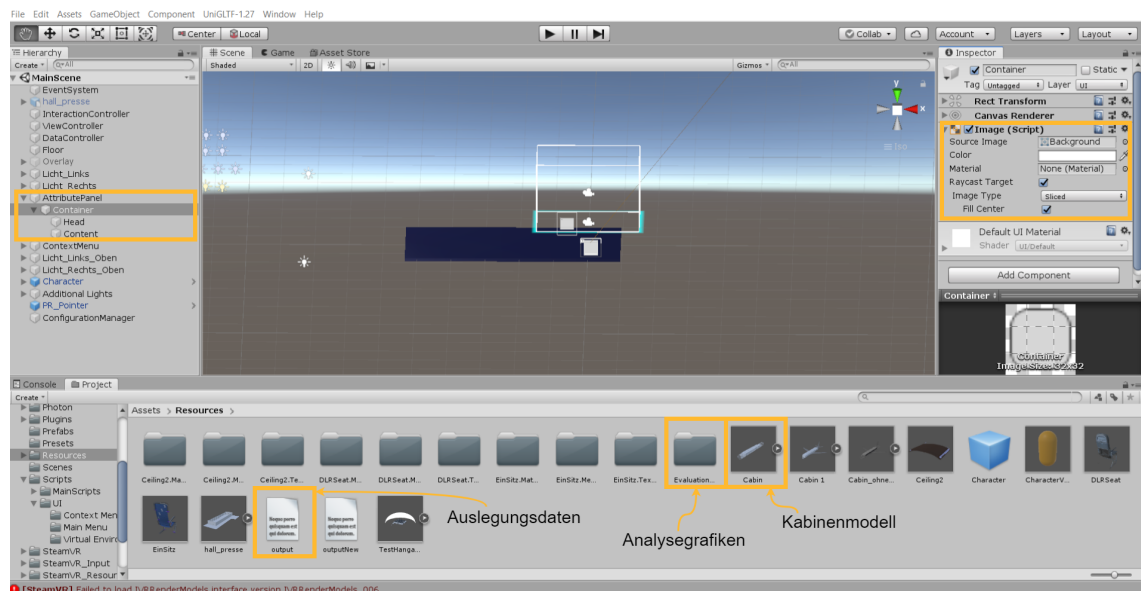


Abbildung 6.7.: Oberfläche des Unity-Editors des Projektes

6.3. Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität und Darstellung des Systems und der Analyseergebnisse

Zur Validierung der generierten Auslegung des Beleuchtungssystems gilt es zu überprüfen, dass die Beleuchtungselemente und die Kabelarchitekturen korrekt aus Matlab in Unity übertragen wurden und hier somit noch identisch vorliegen. Dafür wird der Objekttyp *electricalSystem* als mögliche Komponentenart in Unity definiert. Die neuen Objekte werden dann als Instanzen identifiziert und können in der virtuellen Umgebung sowohl dargestellt als auch mit ihnen interagiert werden.

Der zweite Teil der Visualisierung bezieht sich auf die Darstellung der Analyseergebnisse in der VR. Hier sollen zwei Arten von Analyseergebnissen dargestellt werden können, zum einen numerische Werte und zum anderen Bilder von Graphen oder Diagrammen. Dabei werden für die Implementierung möglichst wenig neue Objekte erstellt, weshalb die Funktionalitäten bestehender Unity-Objekte erweitert werden. In der VR lassen sich Kabinenkomponenten auswählen, indem sie angeklickt werden. Dabei öffnet sich ein sogenanntes *AttributePanel*, auf dem die Eigenschaften der Komponente wie Höhe, Breite, Länge, der Name und das ATA-Kapitel angezeigt werden. Dieses *AttributePanel* ist in Abbildung 6.7 in der Hierarchie im linken Teil des Editors hervorgehoben. In der virtuellen Kabine gibt es bereits ein Menü, das in Abbildung 6.8 in der virtuellen Kabine dargestellt ist. Für ein ausgewähltes Objekt gibt es hier die Optionen der Visualisierung von Verbindungen (*Highlight Connections*), ähnlicher Objekte (*Highlight related objects*) und Analyseergebnisse (*Highlight evaluation data*).

In diesem Menü lässt sich auch die Kategorie *Highlight evaluation data* auswählen, um die Analyseergebnisse zu betrachten. Hierbei wird ein Untermenü geöffnet, in dem man zwischen der Analyse des einzelnen Objektes oder der Analyse aller Objekte des selben Typs wählen kann. Allgemein wird für das Auslesen der Analysedaten die Funktion *GetEvaluationDataByID* der Klasse *dataHandleController* genutzt. Diese Funktion gibt die Analyseergebnisse der ausgewählten Komponente zurück, die in der XML-Datei gespeichert sind, indem der Eintrag des mitgelieferten Suchkriteriums und des dazugehörigen Wertes ausgewertet wird. Diese Funktion wird in Quelltext 6.5 in Zeile 10 und in Quelltext 6.6 in Zeile 1 verwendet, um die Analysedaten zu erhalten.

6.3. Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität und Darstellung des Systems und der Analyseergebnisse

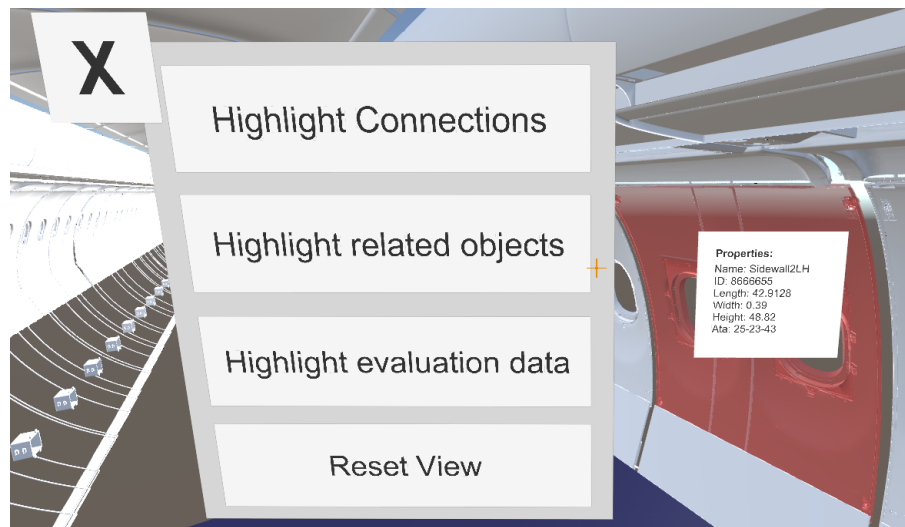


Abbildung 6.8.: Menü zur Auswahl der Visualisierung einer Komponente

Bei den Analysedaten kann es sich entweder um numerische Parameterwerte oder um Bilder von Grafiken handeln. Der Datentyp ist dabei in der XML-Datei hinterlegt und wird ausgewertet, um die korrekte Darstellung zu wählen. Die Funktion zur Darstellung der einzelnen Parameterwerte ist in Quelltext 6.5 visualisiert. Im Bezug auf die Stromversorgung der Beleuchtungskomponenten werden bei einer ausgewählten Verkabelung die Attribute wie Name, Kabellänge und -durchmesser, Gewicht und Leiterwiderstand dem Nutzer dargestellt, wie in Zeilen 1-6 des Quelltextes zusammengefasst wird. Diese Daten werden aus den Komponentenattributen der XML-Datei ausgelesen. Für das Auslesen von Informationen der Komponenten aus der XML-Datei werden die bereits vorhandenen Funktionen der Klasse *dataHandleController* wie beispielsweise *GetAttributesByID* genutzt. Bei den Analyseergebnissen anderer Kabinenkomponenten werden im allgemeinen die anzuzeigenden Daten mittels der Funktion *GetEvaluationDataByID* ausgelesen, wie in Zeile 10 des Quellcodes zu sehen ist. Diese ausgelesenen Eigenschaften werden dann in dem *AttributePanel* angezeigt, indem die vorhandene Funktion *DisplayInfoPanel* der Klasse *dataDisplayController* in Zeile 12 aufgerufen wird und dabei die eigenen gewählten Werte mit Beschreibung als Parameter übergeben werden.

6.3. Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität und Darstellung des Systems und der Analyseergebnisse

```
1 if (generalAttributes["Type"] = "PowerCable") // spezieller Fall bei Kabeln
2 {
3     List<string> attributeList = new List<string>();
4     attributeList.AddRange(new List<string> {"Name", "Length", "Width", "
5     Weight", "Resistor"});
6     Dictionary<string, string> attributesToShow = dataHandleController.
7     GetAttributesByID("current", selectObjectID, attributeList);
8 }
9 else // allgemeine numerische Analyseergebnisse
10 {
11     Dictionary<string, string> attributesToShow = new Dictionary<string,
12     string>;
13     attributesToShow.Add("evaluationData", dataHandleController.
14     GetEvaluationDataByID("current", "ID", selectObjectID));
15 }
16 dataDisplayController.DisplayInfoPanel(attributesToShow, hitPoint, cameraPos);
```

Quelltext 6.5: Ausschnitt der Funktion zum Anzeigen von Analyseergebnissen in Form von einzelnen Parameterwerten in Unity (C#)

Die Funktion zum Anzeigen von Netzwerkgrafiken wird in Quelltext 6.6 dargestellt. Für die Darstellung von Bildern wird auch das *AttributePanel* genutzt. Hierbei kann jedoch nicht die Funktion *DisplayInfoPanel* verwendet werden, sondern das *imageComponent* des Objektes wird eigenständig angepasst. Das *imageComponent* wird in Abbildung 6.7 auf der rechten Seite im Inspector als *Image*-Komponente dargestellt. Für die Umsetzung der Visualisierung wird zunächst in Zeile 1 des Quellcodes der Dateipfad des Bildes aus den *evaluationData* der XML-Datei ausgelesen, indem das Suchkriterium und der dazugehörige Wert ausgewertet werden. Hierfür wird als Suchkriterium bei der Darstellung der Analyse der einzelnen Komponente nach der ID des Objektes gesucht, während bei der Analyse aller Komponenten des Typs nach der ATA-Kapitelnummer gesucht wird. Anschließend wird mit dem Bild ein Sprite generiert und dies dem *imageComponent* hinzugefügt, um das Bild in Unity darzustellen, wie in Zeilen 10-11 zu sehen ist. Zusätzlich wird der Text des *AttributePanel* deaktiviert, damit dieser nicht das Bild verdeckt. Beim erneuten Öffnen des *AttributePanel* zur Anzeige der Attribute oder numerischen Analyseergebnisse wird der Text wieder aktiviert und die Analysegrafik mit einer Hintergrundfarbe ausgetauscht.

6.3. Visualisierung der Architektur in der Virtuellen Realität und Darstellung des Systems und der Analyseergebnisse

```
1 string imagePath = dataHandleController.GetEvaluationDataByID("current", "ATA"  
    , generalAttributes["Ata"]);  
2  
3 GameObject attributePanel = GameObject.Find("AttributePanel");  
4 GameObject infoPanel = attributePanel.transform.Find("Container").gameObject;  
5 Image imageComponent = infoPanel.GetComponent<Image>();  
6  
7 Texture2D texture = Resources.Load<Texture2D>(imagePath);  
8 if (texture != null)  
9 {  
10     Sprite sprite = Sprite.Create(texture, new Rect(0, 0, texture.width,  
        texture.height), new Vector2(0.5f, 0.5f));  
11     imageComponent.sprite = sprite;  
12     imageComponent.enabled = true;  
13 }
```

Quelltext 6.6: Ausschnitt der Funktion zum Anzeigen von Analyseergebnissen in Form von Netzwerkgrafiken in Unity (C#)

7. Auswertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der Implementierung und Analyse präsentiert, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Zunächst wird der Fokus auf die Auswertung der Analyseparameter gelegt, bei der wichtige technische Parameter wie Leiterwiderstand, Kabellänge und -gewicht sowie deren Einflüsse aufeinander untersucht werden. Anschließend wird betrachtet, inwieweit die entwickelte Systemerweiterung die Ausführungszeit des Auslegungsprozesses beeinflusst. Abschließend folgt die detaillierte Betrachtung der Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess. Dabei liegt der Fokus auf der Umsetzung der Beleuchtungskomponenten und der Routenführung der Kabel in verschiedenen Schritten der Prozesskette.

7.1. Auswertung der Analyseparameter bezüglich der implementierten Verkabelungsarchitekturen

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Untersuchung der relevanten elektrischen und technischen Parameter des Beleuchtungssystems. Dabei wurde jeder Architekturtyp des Beleuchtungssystems analysiert, um deren Auswirkungen auf die Analyseparameter zu ermitteln. Zum besseren Verständnis wird im Folgenden die Kabelarchitektur, die entlang der Seitenwände und unterhalb der Kabine verläuft, als *lower* bezeichnet, während die Kabelarchitektur, die oberhalb der Gepäckfächer verläuft, als *upper* bezeichnet wird. Zudem wird in Betracht gezogen, ob das System zentralisiert und somit aus vielen einzelnen Kabeln besteht, oder dezentralisiert aus-

7.1. Auswertung der Analyseparameter bezüglich der implementierten Verkabelungsarchitekturen

Kabelarchitektur	lower centralized	upper centralized	lower decentralized	upper decentralized
Gesamtlänge [m]	3615.64	3663.32	829.83	375.62
Gesamtgewicht [kg]	769.50	779.75	176.43	79.81
durchschnittlicher Leiterwiderstand [Ω]	0.015	0.016	0.004	0.002

Tabelle 7.1.: Analyseparameter der Kabel

geführt ist, wobei das System eines Lichttyps einen kompletten Stromkreis darstellt mit einer Reihe von Knotenpunkten. Somit sind die Lampen alle parallel geschaltet.

Die Analyseparameter der Kabelarchitekturen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Dabei werden die Parameter der Gesamtlänge und des -gewichts der gesamten Kabelarchitektur sowie der durchschnittliche Leiterwiderstand der Stromkreise betrachtet. Für die Berechnung dieser Werte wurde ein Kabeldurchmesser von 5.5 mm gewählt. Bei den dezentralisierten Architekturen wird somit der Gesamtstromkreis betrachtet und der Leiterwiderstand davon berechnet, während bei den zentralisierten Architekturen jedes Kabel seinen eigenen Stromkreis bildet. Allgemein lässt sich erkennen, dass die Gesamtlänge der Kabel bei den dezentralisierten Architekturen deutlich geringer sind als bei den zentralisierten Architekturen. Dabei ist die Länge des dezentralisierten *upper* Systems fast halb so lang wie die des *lower* Systems und mit 375,62 m fast ein zehnfaches kürzer als die der beiden zentralisierten Systeme. Die längste Kabelarchitektur ist dabei das *upper centralized* System mit 3663,32 m. Das Gesamtgewicht der Kabel folgt einem ähnlichen Muster wie dem der Gesamtlänge. Die zentralisierten Architekturen weisen ein deutlich höheres Gewicht auf, da die Kabellänge einen direkten Einfluss auf das Gewicht hat. Auch hierbei hat das *upper centralized* System den höchsten Wert, während das *upper decentralized* das geringste Gewicht aufweist. Die durchschnittlichen Leiterwiderstände der Kabel befinden sich zwischen 0,015 und 0,016 Ω . Dabei ist auch hier der Widerstand der dezentralisierten Architekturen bei der *lower* Architektur ein Viertel und bei der *upper* Architektur ein Achtel geringer als bei den zentralisierten Architekturen.

Zudem wurde untersucht, welchen Einfluss der Leiterdurchmesser und die Kabellänge auf den Leiterwiderstand hat, da der Durchmesser der Leiter zwischen 1 und 10 mm

7.1. Auswertung der Analyseparameter bezüglich der implementierten Verkabelungsarchitekturen

liegt und die Kabellängen aufgrund der langen Flugzeugkabine stark variieren [19]. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 7.1 visualisiert. Dabei ist auf der x-Achse der Kabeldurchmesser in Millimeter und auf der y-Achse der Leiterwiderstand in Ohm dargestellt. In unterschiedlichen Farben werden die verschiedenen Kabellängen zwischen 5,1 m und 35,6 m als Graphen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Leiterwiderstand mit steigendem Kabeldurchmesser augenscheinlich exponentiell abnimmt. Dieser Effekt ist bei allen Kabellängen zu beobachten. Aus Gleichung (6.5) ist jedoch zu erkennen, dass mit $A = \pi \cdot r^2$ der Durchmesser oder Radius einen reziprok quadratischen Einfluss auf den Widerstand hat. Des Weiteren ist der Leiterwiderstand bei längeren Kabeln höher als bei kürzeren Kabeln. Dabei hat die Kabellänge einen linearen Einfluss auf den Leiterwiderstand. Die Leiterwiderstände der Kabel liegen dabei unter $1 \text{ m}\Omega$, was einen sehr geringer Wert für einen Widerstand darstellt.

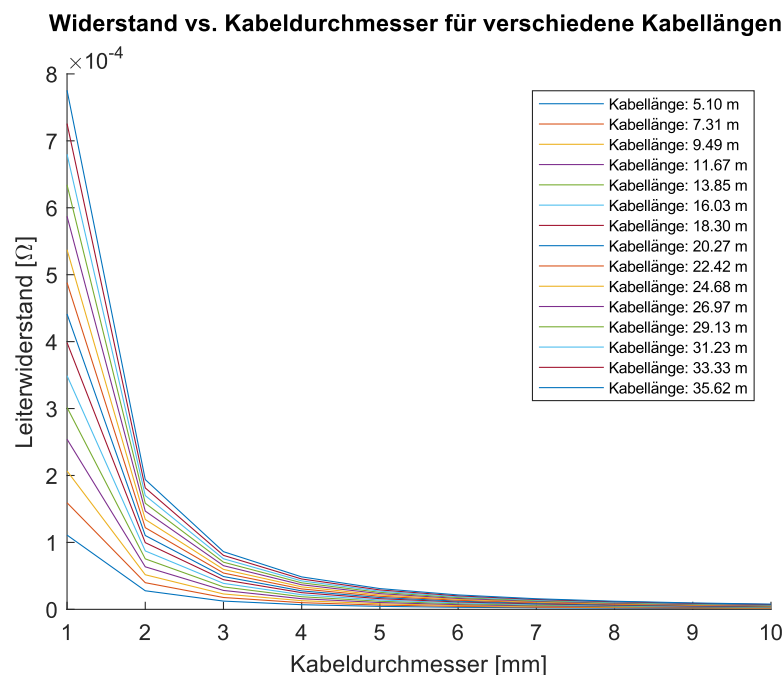


Abbildung 7.1.: Leiterwiderstand in Abhängigkeit von Durchmesser und Länge

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Analyse der Kabelarchitekturen ist die Leistung, die die Lampen benötigen. Die Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die

7.2. Untersuchung des Einflusses der Systemerweiterung auf die Ausführungszeit des Auslegungsprozesses

Leistungsparameter der verschiedenen Lampentypen in einem Flugzeug mit Single-Aisle Konfiguration und 198 Passagieren.

Insgesamt sind 310 Lampen in dieser Konfiguration installiert, wobei die Leselampen mit 198 Stück am häufigsten vertreten sind, gefolgt von den Deckenlampen mit 60 Stück und den Wandlampen mit 52 Stück. Die benötigte Leistung variiert je nach Lampentyp, da in den Leselampen weniger LEDs pro Lampe verbaut sind als in den Decken- und Wandlampen. Die Leselampen benötigen somit 59,4 W, während die Deckenlampen 162 W und die Wandlampen 140,4 W benötigen. Das gesamte Beleuchtungssystem benötigt somit 361,8 W. Diese Informationen sind entscheidend für die Auslegung der Kabelarchitektur, um zu bestimmen wie viel Leistung geliefert werden müssen, damit die Lampen erwartungsgemäß funktionieren. Die weitere Analyse überschreitet jedoch den Rahmen dieser Arbeit und wird daher nicht weiter betrachtet.

Lampentyp	Anzahl Lampen	benötigte Leistung [W]
Leselampe	198	59.4
Deckenlampe	60	162
Wandlampe	52	140.4
Gesamt	310	361.8

Tabelle 7.2.: Leistungsparameterergebnisse für eine Single-Aisle Konfiguration mit 198 Passagieren

7.2. Untersuchung des Einflusses der Systemerweiterung auf die Ausführungszeit des Auslegungsprozesses

Für die Ausführung der Prozesskette um die virtuelle Flugzeugkabine zu generieren, wurden die Zeiten gemessen, die für die Durchführung der einzelnen Prozessschritte benötigt werden. Die Ergebnisse davon sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Hier sind die Durchschnittszeiten und deren Standardabweichungen mit und ohne der in dieser Arbeit vorgestellten Integration des Beleuchtungssystems tabellarisch aufgelistet, wobei

7.2. Untersuchung des Einflusses der Systemerweiterung auf die Ausführungszeit des Auslegungsprozesses

jeweils zehn Mal der Zeitaufwand pro Teilprozess bestimmt wurde. Die vollständige Tabelle ist in Anhang C aufgeführt. Bei diesen Berechnungen des Zeitaufwandes wurden nicht nur die Auslegungen und Modellierungen aller Kabinenkomponenten durchgeführt, sondern es wurden auch die Verbindungen zwischen den Komponenten, Anforderungen und Analysedaten inkludiert. Für die Erstellung der Auslegungsdaten in Matlab wurde ein Dell Latitude 7420 Laptop eingesetzt. Dieser Computer hat eine 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 CPU, 16 GB RAM und eine integrierte GPU. Für die Modellierung der Kabine in Blender und die Visualisierung mit Unity wurde hingegen ein Dell Alienware M15 R6 Laptop verwendet. Dieser hat eine 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11800H CPU, 32 GB RAM und zusätzlich zu der integrierten GPU eine eingebaute NVIDIA GeForce RTX 3080 Grafikkarte. Die Zeitspannen wurden je nach Prozessschritt auf unterschiedliche Weise ermittelt. In Matlab wurde die Funktion *Run and Time* genutzt. Für die Modellierung in Blender wurde im ausgeführten Pythonskript die *time* Bibliothek genutzt, während die Zeit zum Laden der virtuellen Umgebung in Unity mittels Zeitstempeln in der Konsole ermittelt wurde.

Schritt	ohne Beleuchtungs- system [s]	mit Beleuchtungs- system [s]
Auslegung in Matlab	80.62 ($\sigma = 5.34$)	107.83 ($\sigma = 2.99$)
Modellierung in Blender	879.13 ($\sigma = 43.25$)	942.03 ($\sigma = 30.02$)
Visualisierung in Unity VR	102.1 ($\sigma = 0.83$)	142.6 ($\sigma = 1.02$)
Gesamt	1061.85	1192.46

Tabelle 7.3.: Durchschnittlicher Zeitaufwand der Realisierung des Auslegungsprozesses in Sekunden

Im Allgemeinen ist zu erkennen, dass der Zeitaufwand bei der Auslegung mit dem Beleuchtungssystem höher ist als ohne. Die Generierung in Matlab ist für beide Auslegungstypen der Prozessschritt, der mit 80,62 s und 107,83 s den geringsten durchschnittlichen Zeitaufwand benötigt. Dabei ist die Standardabweichung bei der Auslegung mit dem Beleuchtungssystem jedoch mit 2,99 s geringer als ohne. Die Modellierung ohne Beleuchtungssystem benötigt in Blender mit 879,13 s fast das zehnfache der Zeit, die für den Matlab-Prozess benötigt wurde. Für die Auslegung mit dem Beleuchtungssystem wurde in diesem Schritt 942,03 s benötigt. Auch hier

ist die Standardabweichung bei der Auslegung mit dem Beleuchtungssystem geringer als ohne. Der Zeitaufwand für die Generierung der virtuellen Umgebung in Unity mit dem Beleuchtungssystem beträgt ca. 40 s mehr als die Kabinenauslegung ohne Beleuchtungssystem. Dabei ist die Standardabweichung bei diesem Prozessschritt mit 1,02 s und 0,83 s am geringsten. Insgesamt beträgt der Zeitaufwand für die Auslegung ohne das Beleuchtungssystem durchschnittlich 1061,85 s, während die Auslegung mit dem Beleuchtungssystem 1192,46 s benötigt. Dies entspricht umgerechnet Zeiten von 17,7 Minuten und 19,9 Minuten. Somit führte das Hinzufügen der Auslegung des Beleuchtungssystems zum bestehenden Kabinenauslegungsprozess zu einer Verlängerung des Zeitaufwandes um ca. 2 Minuten.

7.3. Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess

Um die Methodik und deren Umsetzung zu validieren, soll gewährleistet sein, dass das Beleuchtungssystem erfolgreich in den Auslegungsprozess integriert werden kann und die Komponenten in jedem Schritt der Prozesskette korrekt übergeben werden. In diesem Abschnitt werden die erstellten Architekturen des Beleuchtungssystems und die Verlinkungen der Systemkomponenten in den verschiedenen Prozessphasen präsentiert.

Vorstellung der Prozesskette für die Modellierung der Architektur des Beleuchtungssystems

Zunächst wird die Kabelarchitektur betrachtet, bei der die Kabel unter die Flugzeugkabine geführt werden, um dort entlang der Kabine zu verlaufen. Die Abbildung 7.2 zeigt einen Ausschnitt dieses Aufbaus in den verschiedenen Zwischenphasen, bevor die Kabine in der Virtuellen Realität visualisiert wird.

In diesen Ausschnitten sind die ersten zehn Sitzreihen und somit auch die ersten zehn Reihen an Passagierserviceeinheiten visualisiert. Grafiken des Systems der gesamten

7.3. Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess

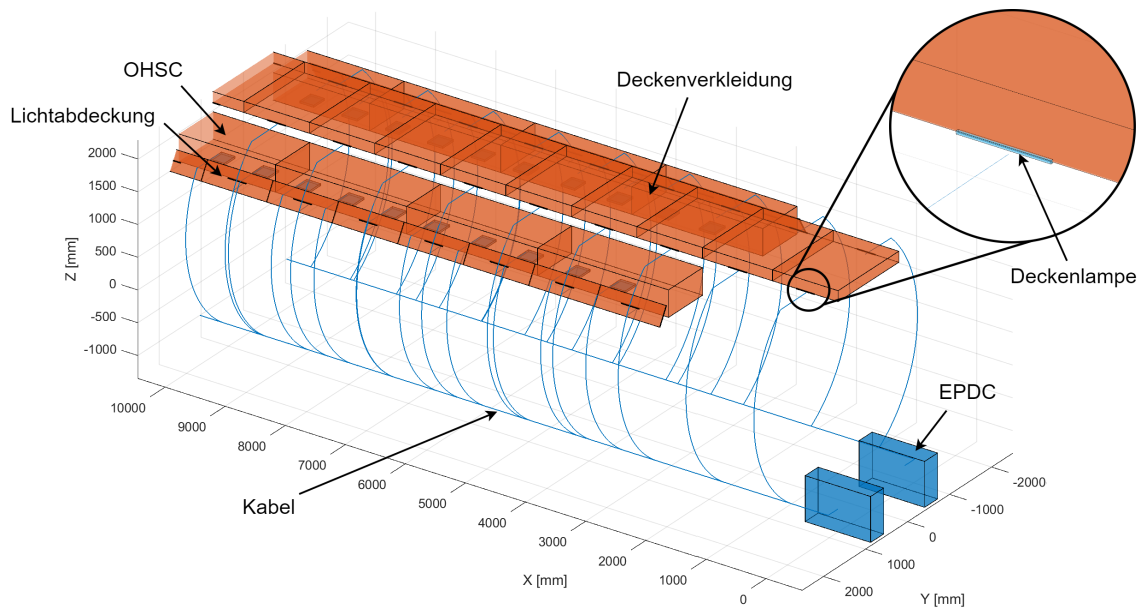
Kabine sind zur genaueren Betrachtung in Anhang D beigelegt.

Abbildung 7.2 (a) stellt das modellierte System in Matlab dar. Hier sind nur die Hüllkörper der für das Beleuchtungssystem relevanten Komponenten abgebildet. In Orange dargestellt sind die Komponenten, an denen die Beleuchtungselemente befestigt sind, wie die Deckenverkleidung, die Gepäckfächer auf beiden Seiten der Deckenverkleidung und die Lichtabdeckungen. In Blau werden die Komponenten dargestellt, die zu dem elektrischen System gehören. Dazu zählen die Verteilerzentren, die am rechten Rand der Grafik zu sehen sind, die Kabel, die als Linien hier beschrieben werden und die PSUs, die durch die Gepäckfächer zu erkennen sind. Die Wand- und Deckenlampen gehören eigentlich auch zu dieser Gruppe, jedoch sind sie aufgrund der Größe der Objekte in der Grafik als schwarze Stifte zu erkennen. Die Liniendicke der Kabel entspricht dabei dem Durchmesser des Kabels. In der Grafik ist zu erkennen, dass die Beleuchtungskomponenten an den festgelegten Verkleidungsobjekten platziert sind. Zudem verlaufen die Linien der Kabel im Bogen entlang der Kabinenwände.

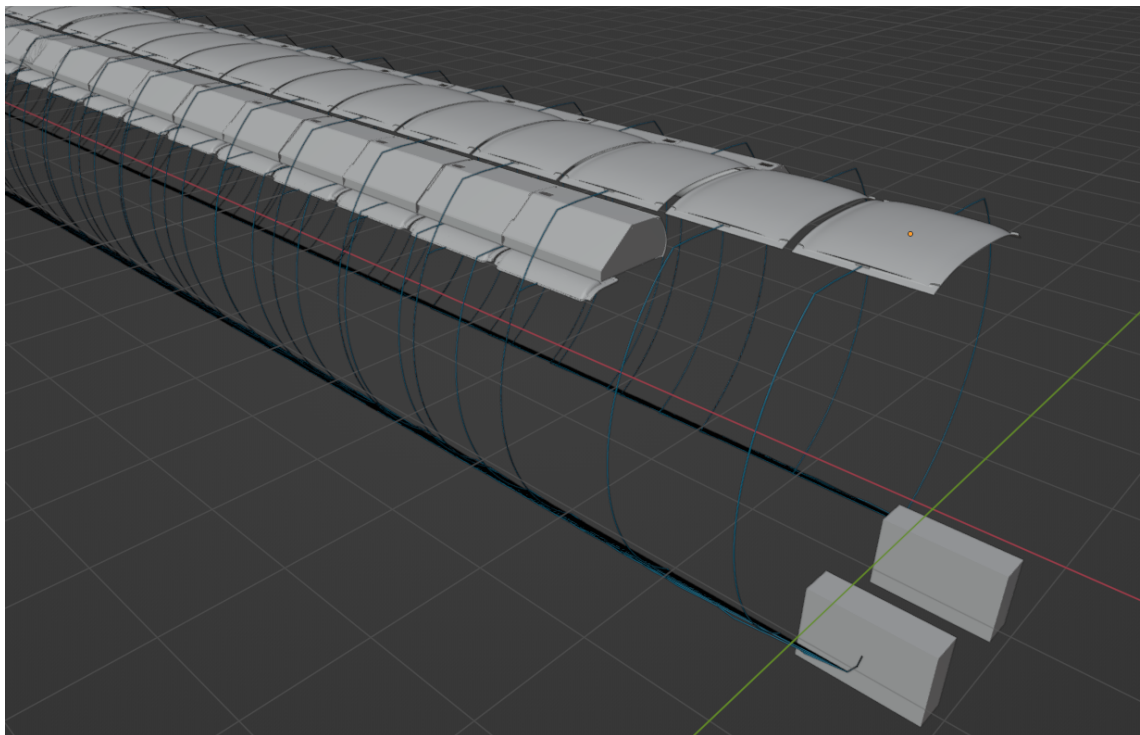
In Abbildung 7.2 (b) ist das Beleuchtungssystem nach der Modellierung in Blender visualisiert. Hier sind die Hüllkörper der Objekte bereits durch die tatsächlichen 3D-Modelle ersetzt. Die Kabel, die hier auch in Blau dargestellt sind, sind keine mathematischen Beschreibungen mehr, wie in Matlab, sondern geometrische Objekte.

Die zweite Kabelarchitektur wird in Abbildung 7.3 betrachtet. Hier verlaufen die Kabel hauptsächlich oberhalb der Gepäckfächer. Diese Grafik ist analog zu Abbildung 7.2 aufgebaut, sodass in (a) die Auslegung in Matlab und in (b) das Ergebnis der Modellierung in Blender gezeigt wird. Die Visualisierung der Auslegungsdaten in Matlab zeigt, dass die Kabel, die unterhalb der Gepäckfächer ihren Startpunkt haben zunächst am Rand der Kabine nach oben entlanglaufen und erst oberhalb der Gepäckablagen gebündelt weiterführen. Während die Linien der Kabel in (a) kantig sind, verlaufen die Kabel in Abbildung (b) in den Kurvenbereichen abgerundet. Dieses ist in der Abbildung vor allem auf Höhe der Verteilerzentren an der ersten Deckenverkleidung zu erkennen.

7.3. Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess



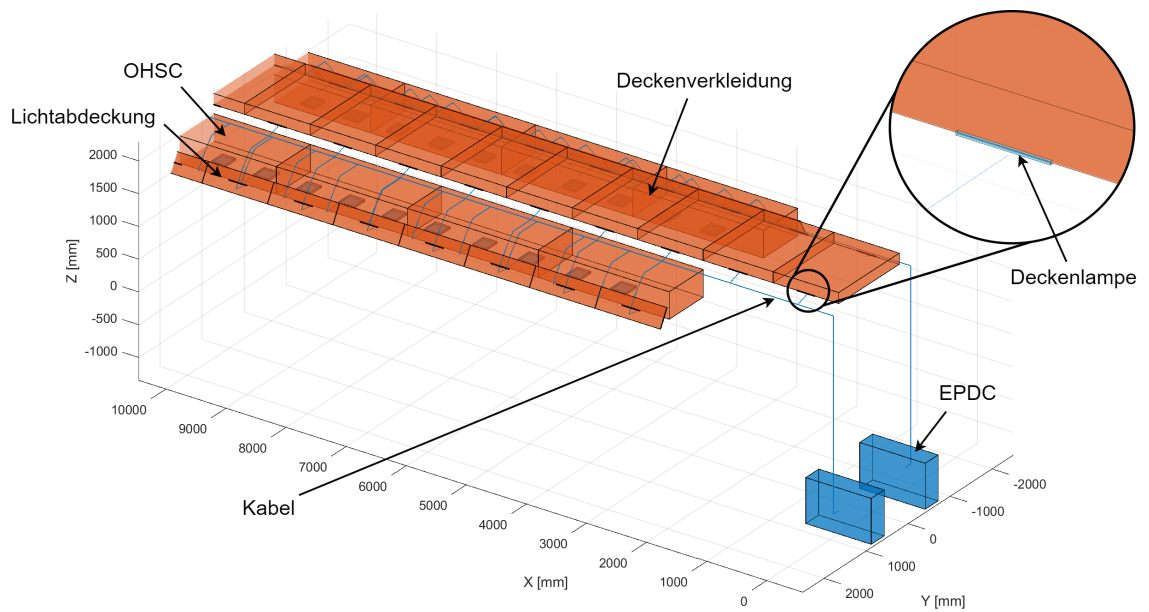
(a) Visualisierung in Matlab



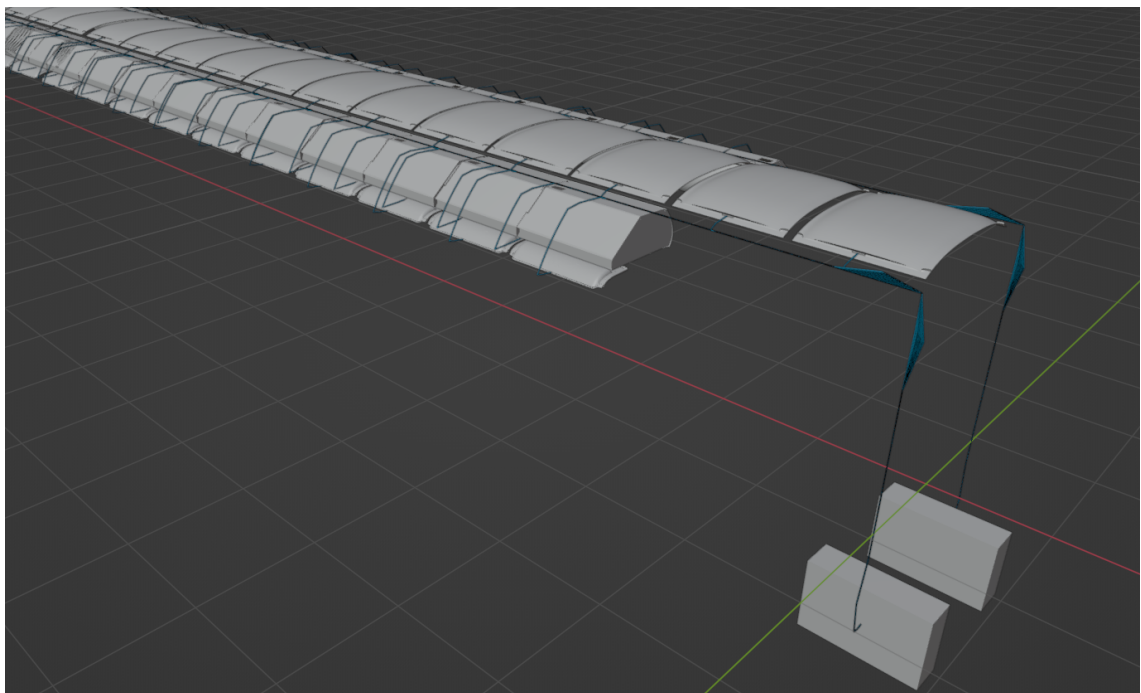
(b) Visualisierung in Blender

Abbildung 7.2.: Architektur der *lower* Routenführung des Beleuchtungssystems

7.3. Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess



(a) Visualisierung in Matlab



(b) Visualisierung in Blender

Abbildung 7.3.: Architektur der *upper* Routenführung des Beleuchtungssystems

Vorstellung der Darstellung zur Verknüpfung der Systemkomponenten

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Visualisierung der Flugzeugkabine ist die Systemintegration der verschiedenen Teilsysteme. In diesem Kontext werden die Systemkomponenten mithilfe von Links verknüpft, um so Abhängigkeiten darzustellen. Auch das entwickelte Beleuchtungssystem besitzt solche Relationen untereinander und zu anderen Komponenten. Ein Ausschnitt der während des Auslegungsprozesses generierten Links der Beleuchtungskomponenten wird in Abbildung 7.4 dargestellt. In dieser Grafik sind jeweils vier Objekte der Decken-, Wandbeleuchtung und der PSU visualisiert. Die Linien zwischen den Objekten zeigen die Verknüpfungen der Komponenten. Dabei gibt es zwei Arten von Links: die roten Links stellen elektrische Verbindungen dar, während die schwarzen Linien eine physische Verbindung repräsentieren. Diese physischen Links sind hierbei die Verknüpfungen zwischen den Beleuchtungskomponenten und den jeweiligen Verkleidungselementen.

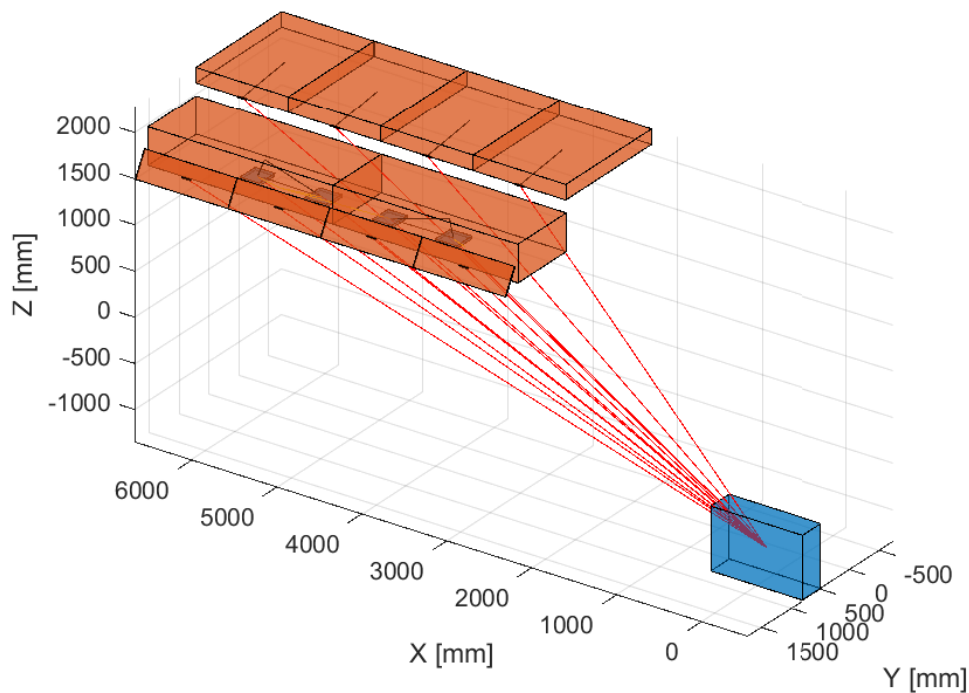
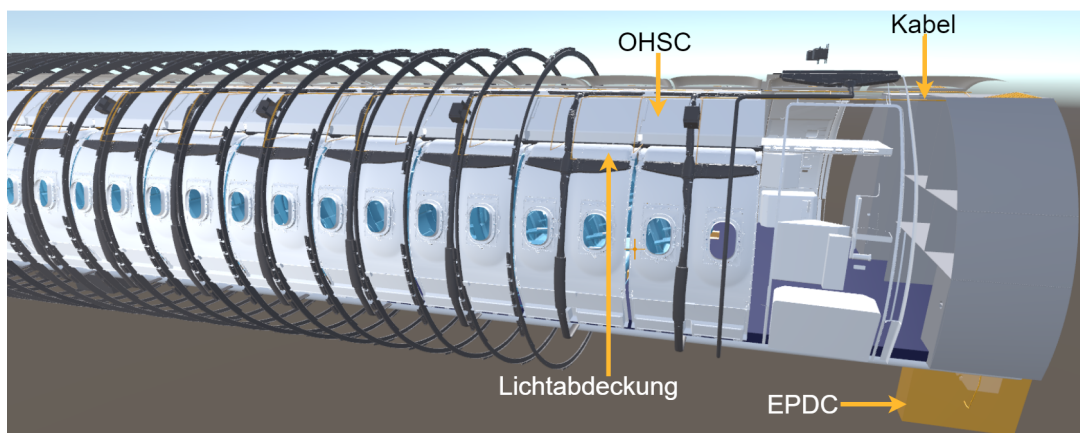


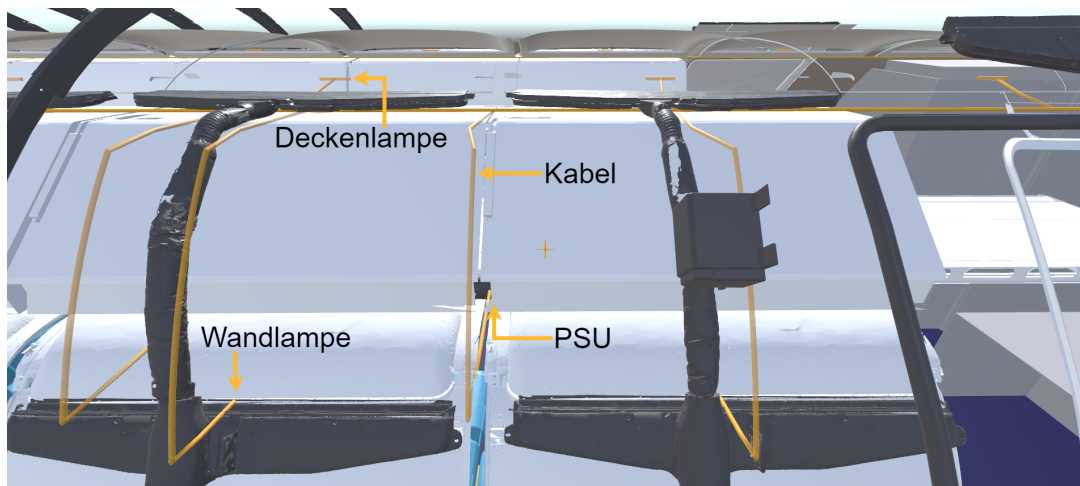
Abbildung 7.4.: Visualisierung der generierten Links in Matlab

Visualisierung der 3D Architektur und Analyseergebnisse in Unity

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Beleuchtungssystem in eine Auslegungsprozesskette zu integrieren, sodass das System in einer virtuellen Flugzeugkabine dargestellt und mit diesem sowie den Analyseergebnissen integriert werden kann. Abbildung 7.5 zeigt die modellierte virtuelle Kabine, wobei die Rumpfstruktur der Kabine nur im hinteren Teil dargestellt ist.



(a) Gesamtsystem Kabine



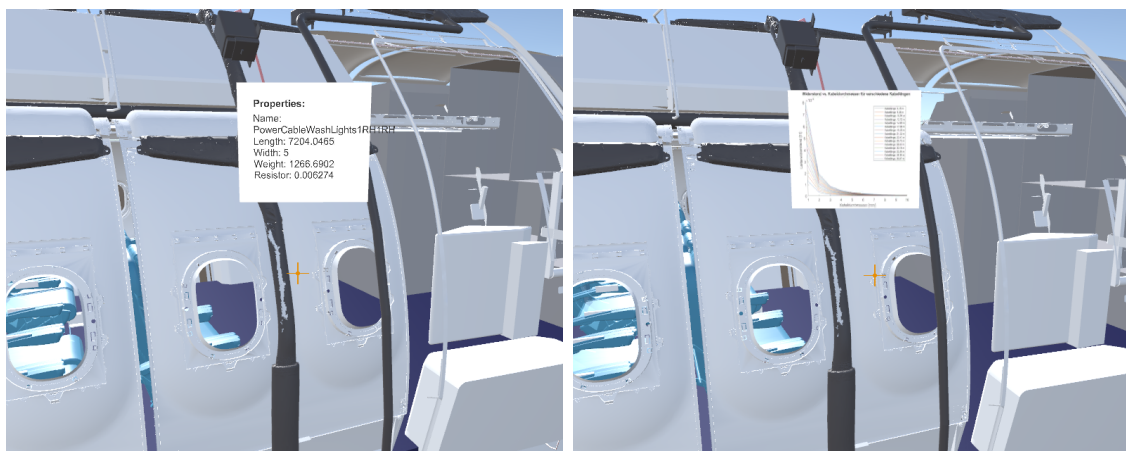
(b) Nahaufnahme eines Ausschnitts des Beleuchtungssystems

Abbildung 7.5.: Virtuelle Kabine mit gelb-orange gekennzeichnetem Beleuchtungssystem in Unity

7.3. Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess

In dieser Grafik ist die Verkabelung des Beleuchtungssystems in einem orangefarbenen Ton zu sehen. Besonders am vordersten Kabel lässt sich erkennen, dass das Kabel bis zu einem kleinen Quader am Rand des Deckenelementes führt. Dieser Quader repräsentiert eine Deckenleuchte. Diese Ansicht erfolgt automatisch über die implementierten Funktionen aus Kapitel 6.

Zudem lassen sich in Unity die Analyseparameter und -ergebnisse anzeigen, indem ein Kabel ausgewählt wird und anschließend über ein Menü die Auswertungsdaten abgerufen werden. Diese werden anschließend in einem Fenster angezeigt, wie in Abbildung 7.6 zu sehen ist. Dabei sind entweder die Zahlenwerte der Analyseparameter oder die Bilder der Grafiken dargestellt. In Abbildung (a) sind die Analyseparameter eines ausgewählten Kabels zu sehen, wobei der Objektname, die Kabellänge, der Kabeldurchmesser, das Gewicht und der Leiterwiderstand aufgeführt sind. In Abbildung (b) sind die Analyseergebnisse aller Kabel in der Kabine dargestellt, wobei es sich bei der gezeigten Grafik beispielhaft um die Abhängigkeit des Leiterwiderstands von Durchmesser und Länge handelt.



(a) Analyseparameter

(b) Grafik der Analyseergebnisse

Abbildung 7.6.: Visualisierung der Analyseparameter und -ergebnisse in Unity

In der virtuellen Flugzeugkabine in Unity werden zudem auch die funktionalen Verbindungen zwischen den Komponenten angezeigt. Dabei werden für die ausgewählte Kabinenkomponenten die Links zu anderen Komponenten angezeigt. In Abbildung 7.7

7.3. Validierung der Methode zur Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess

sind die Links einer Deckenbeleuchtung in Unity dargestellt, die analog zu den generierten Links in Matlab in Abbildung 7.4 sind, wobei hier die Links in Blau gefärbt sind. Die Zielkomponenten der Verbindungen, die die Deckenverkleidung und ein EPDC umfassen, sind gelb-transparent hervorgehoben, wobei das Verteilerzentrum in dieser Ansicht nicht dargestellt.

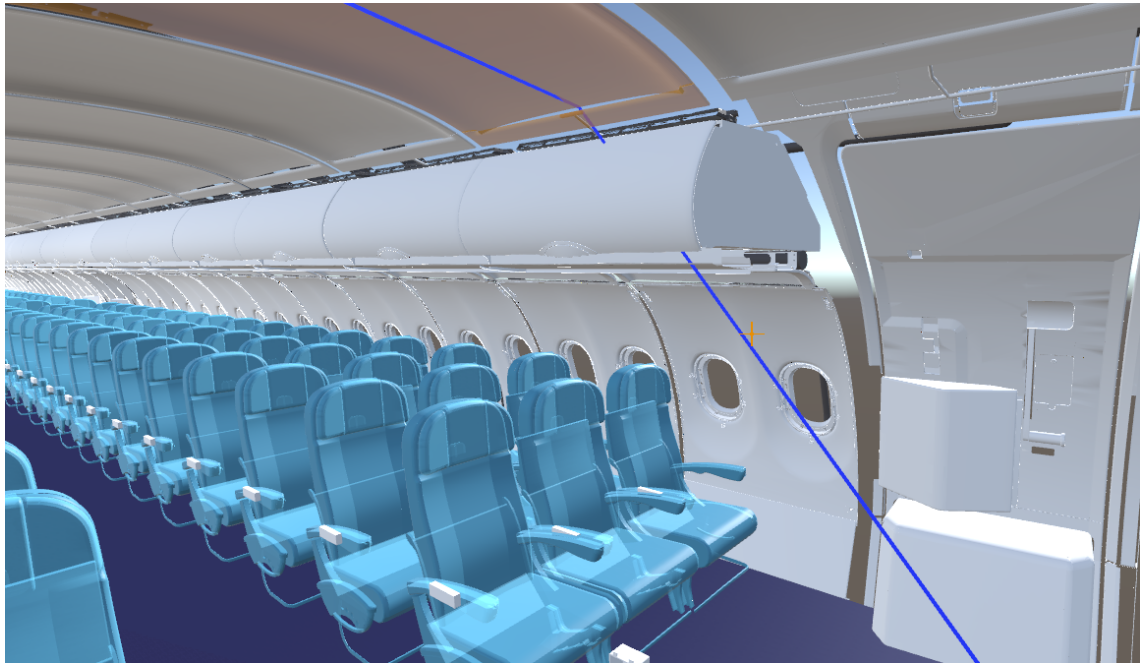


Abbildung 7.7.: Visualisierung der Verbindungen einer Beleuchtungskomponente in Unity

8. Diskussion

Dieses Kapitel befasst sich mit den Resultaten der Umsetzung und Auswertung des entwickelten Beleuchtungssystems im Rahmen der Auslegungsprozesskette. Zuerst erfolgt die Interpretation der Analyseergebnisse und die Erläuterung ihrer Auswirkungen. Anschließend wird die Umsetzung der Integration des Beleuchtungssystems untersucht. Dabei werden die Anforderungen, die in der strukturierten Aufgabenstellung festgelegt sind und die damit verbundenen Herausforderungen berücksichtigt. Abschließend wird die Modularisierung des Systems diskutiert und aufgezeigt, wie diese Modularisierung zukünftige Arbeiten und Weiterentwicklungen erleichtern kann.

8.1. Interpretation und Diskussion der Analyseergebnisse

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Analyseergebnisse ausführlich diskutiert und interpretiert. Die Auswertung beinhaltet die im Zuge dieser Studie ermittelten technischen Werte wie Leiterwiderstand, Kabellängen und -gewichte sowie die benötigten Leitungen der Lampen des Beleuchtungssystems. Um das Gesamtsystem zu verstehen, werden die Resultate im Zusammenhang mit der vorhandenen Literatur und theoretischen Erwartungen betrachtet. Des Weiteren wird der Zeitaufwand der Ausführung des gesamten Auslegungsprozesses diskutiert.

Die Analyse der technischen Parameter der Kabellänge, -gewichte und Leiterwiderstände der verschiedenen Kabelarchitekturen liefern wichtige Erkenntnisse für die Systemintegration im Flugzeug. Insbesondere die dezentralisierten Systeme weisen

deutliche Vorteile gegenüber den zentralisierten Systemen im Bezug auf die Gesamtlänge und das Gewicht der Kabel auf. Hierbei liegen die Werte der dezentralisierten Systeme bei einem Viertel und einem Zehntel der Werte der zentralisierten Systeme, wie in Tabelle 7.1 zu sehen ist. Dies ist besonders relevant für die Effizienz von Flugzeugen, da das Gewicht eines Flugzeugs einen direkten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch hat [15]. Somit führt das geringere Gewicht der Kabel zu einer Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und damit zu einer Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Flugbetriebs [15].

Zudem zeigt die Analyse, dass die Kabeldurchmesser mit Werten im Bereich von 1 bis 10 mm sehr einflussreich sind. Einerseits hat der Durchmesser einen quadratischen Einfluss auf das Gewicht, was sich aus Gleichung (6.4) zu erkennen ist. Zudem weist Kupfer mit einer Dichte von $8,96 \text{ g/cm}^3$ im Vergleich zu den meisten anderen leitenden Materialien wie Aluminium oder Eisen ein hohes Gewicht auf, wodurch der Einfluss des Wertes des Kabeldurchmessers noch verstärkt wird [39]. In dieser Arbeit werden jedoch nicht leichtere Materialien verwendet, da hier die elektrische Leitfähigkeit gegenüber Kupfer deutlich geringer ist [39]. Ein größerer Durchmesser führt somit zu schwereren Kabeln, wobei in der Luftfahrt auf jedes Gramm geachtet wird, um den Treibstoffverbrauch gering zu halten. Andererseits führen dünnere Kabel zu einer Gewichtsreduzierung, bringen jedoch einen höheren Leiterwiderstand mit sich, da die Grundfläche, durch die die Elektronen bewegt werden, geringer ist und hier eine laut Gleichung (6.5) reziprok quadratische Abhängigkeit besteht. Der höhere Widerstand der Kabel führt unter anderem zu einer verstärkten Wärmeentwicklung. Bezüglich der Wärmeentwicklung muss eine Brandgefahr auch in unzugänglichen Bereichen des Flugzeuges beachtet werden [20]. In diesem Artikel von Glenair [20] wird zudem aufgegriffen, dass die Brandgefahr eine besondere Herausforderung in den Bereichen des Flugzeugs auftritt, in denen die Kabel verlaufen, wie Zone 1 und 8 [20]. Die Wahl des Kabeldurchmessers ist daher ein Kompromiss zwischen Gewichtseinsparung und Sicherheit, der sorgfältig abgewogen werden muss.

Durch die Betrachtung dieser Parameter im Kontext der Systemintegration wird deutlich, dass eine optimierte Kabelführung und -architekturauswahl entscheidend ist, um sowohl die Effizienz als auch die Sicherheit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Analyse unterstreichen die Bedeutung einer durchdachten Systemarchitektur, die diese Faktoren berücksichtigt und die Basis für eine erfolgreiche Integration und Weiterentwicklung des Beleuchtungssystems bildet.

Die Leistungsanalyse der Lampen zeigt, dass es am meisten Leselampen in der Flugzeugkabine gibt, die jedoch aufgrund der geringeren Anzahl an LEDs pro Lampe weniger Leistung benötigen, als die Decken- und Wandlampen. Von den ca. 361,8 W für eine Single-Aisle Konfiguration mit 198 Passagieren fallen 59,4 W auf die Leselampen und 302,4 W zusammen auf die Decken- und Wandlampen. Die 361,8 W, die das gesamte Beleuchtungssystem benötigt, kann in weiteren Arbeiten berücksichtigt werden, um zu untersuchen, ob das Verteilerzentrum diese Leistung bereitstellen kann. Somit wurde hier mit der parametrischen Berechnung der benötigten Leistung eine Grundlage für weitere Analysen geschaffen.

Der Zeitaufwand für die Durchführung der gesamten Auslegungsprozesskette ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der in dieser Arbeit untersucht wurde. Dabei wurde festgestellt, dass die Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess zu einer Verlängerung des Zeitaufwandes um ca. 2 Minuten führt. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass bei der Auslegung der Kabine mehr Funktionen durchlaufen werden und die Anzahl an Komponenten durch die Integration eines weiteren Systems ansteigt. Auch bei der Modellierung und Visualisierung in Blender und Unity wird aufgrund der zusätzlichen Objekte und Verknüpfungen mehr Zeit benötigt. Bei einer Gesamtzeit von weniger als 20 Minuten für den gesamten Auslegungsprozess ist eine Verlängerung um 2 Minuten signifikant, insbesondere da bei der Integration weiterer ähnlicher Systeme zusätzliche Zeitverlängerungen zu erwarten sind. Da ein Ziel der Entwicklung des Auslegungsprozesses die Analyse verschiedener Systeme umfasst, können diese Verlängerungen sich kumulieren. Schon bei der Integration von zehn weiteren Systemen würde der Zeitaufwand um 20 Minuten steigen. Das Ziel des Auslegungsprozesses ist es, eine effiziente Alternative zu der traditionellen Methode, Kabinenentwürfe zu visualisieren und zu testen, zu bieten. Bei der traditionellen Methode der Entwicklung von Flugzeugkabinen werden physische dreidimensionale Modelle erstellt, um die Anforderungen an die Kabine und ihr Design zu prüfen. Da dieser Prozess in der Industrie der Prozess mehrere

Wochen oder Monate dauern kann, ist im Vergleich dazu eine Zeitverlängerung bei diesem Auslegungsprozess, unabhängig davon ob sie nur wenige Minuten oder eine Stunde beträgt, ein geringfügiger Zeitaufwand.

8.2. Evaluierung der Integration und Erfüllung der strukturierten Aufgabenstellung

Dieser Abschnitt widmet sich der praktischen Umsetzung der Integration des entwickelten Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess. Darüber hinaus wird die Erfüllung der strukturierten Aufgabenstellung in tabellarischer Form dargestellt. Zudem werden die praktischen Herausforderungen und Schwierigkeiten bei der Integration beschrieben.

In Tabelle 8.1 werden die in Kapitel 2 gestellten Aufgaben aufgegriffen, um zu beleuchten, inwieweit die strukturierte Aufgabenstellung erfüllt wurde. Dabei wird in der rechten Spalte gekennzeichnet, welche Aufgaben erfolgreich umgesetzt wurden. Wie in der Tabelle zu erkennen ist, konnten alle Aufgaben von der Platzierung und Modellierung des Beleuchtungssystems über die Auswertung der Architekturen bisher zur Visualisierung in Unity VR erfolgreich erfüllt werden. Bei der Integration des Beleuchtungssystems in den Auslegungsprozess der Flugzeugkabine spielt die Modularität der entwickelten Funktionen eine entscheidende Rolle. Sie erleichtert nicht nur die Implementierung, sondern bietet auch die Möglichkeit für zukünftige Erweiterungen und neue Kabelarchitekturen.

Da der Auslegungsalgorithmus in Matlab objektorientiert implementiert ist, können die bereits bestehenden Klassen zum Instanzieren ähnlicher Komponenten oder als Elternklasse für neue Klassen genutzt werden. Zudem ist das Ziel der Prozesskette nur Änderungen an einer Datei vorzunehmen, um eine neue Kabinenauslegung zu generieren. Hier wird für das Beleuchtungssystem in Matlab lediglich ein String angepasst, um eine andere Kabelarchitektur zu integrieren. So kann einfach zwischen den Architekturen gewechselt werden, ohne Änderungen an verschiedenen Stellen des Auslegungsalgorithmus vornehmen zu müssen. Auch in Unity sind die implementierten

8.2. Evaluierung der Integration und Erfüllung der strukturierten Aufgabenstellung

Nummer	Aufgabe	Erledigt
1	Platzierung und Modellierung	✓
1.1	Platzierung der Beleuchtungskomponenten in Matlab	✓
1.2	Implementierung der Verkabelung in Matlab	✓
1.3	Integration und Modellierung in Blender	✓
2	Auswertung der Architekturen	✓
2.1	Berechnung der geometrischen und funktionalen Eigenschaften	✓
2.2	Durchführung der Leistungsanalyse	✓
2.3	Leistungsauswertung	✓
2.4	Vergleich der Architekturen anhand der Eigenschaften	✓
3	Visualisierung in Unity VR	✓
3.1	Visualisierung des Beleuchtungssystems	✓
3.2	Darstellung der Ergebnisse	✓

Tabelle 8.1.: Erfüllung der Aufgabenstellung

Funktionen zur Visualisierung der Analyseergebnisse modular aufgebaut. Dadurch können Analyseergebnisse anderer Kabinenelemente ohne Änderungen am Code in der Virtuelle Realität dem Nutzer präsentiert werden.

Dieser Ansatz der Modularität wurde auch bereits in anderen Arbeiten zur Integration von Variationen eines Kabinenelements wie beispielsweise den Gepäckablagen verwendet [18]. In der Arbeit von Fuchs et. al. wird SysML als erweiterter Teil der Auslegungsprozesskette verwendet, um Variationen eines Kabinenelementes zu untersuchen. Zur Generierung der Variationen wird jedoch eine ähnliche Methodik angewendet, die die Modularität bei der Auslegung und Integration der Kabinenelemente in den Fokus stellt. Das Anwendungsbeispiel bezieht sich hierbei auf die flexible Anpassung und Erweiterung der Gepäckablagen in Flugzeugkabinen. Bereits zu Beginn der Entwicklung des Auslegungsprozesses wurden Modularität und Objektorientierung als grundlegende Prinzipien integriert, um die Flexibilität und Erweiterbarkeit des Systems zu gewährleisten [10][16][17]. Diese Ansätze ermöglichen es, einzelne Komponenten des Systems unabhängig voneinander zu entwickeln und bei Bedarf anzupassen oder zu erweitern, ohne dass umfassende Änderungen an der gesamten Systemarchitektur notwendig sind.

Ein wichtiger Aspekt der erfolgreichen Integration ist die korrekte und einheitliche

8.2. Evaluierung der Integration und Erfüllung der strukturierten Aufgabenstellung

Datenübergabe zwischen den verwendeten Softwaretools: Matlab, Blender und Unity. Die Daten werden präzise von Matlab an Blender und schließlich an Unity übergeben, was eine konsistente und genaue Darstellung und Analyse der Beleuchtungssysteme ermöglicht. Während das Ergebnis der mathematischen Auslegung der Kabel und die Modellierung davon in Blender bei der seitlichen Routenführung identisch sind, treten bei der oberen Routenführung leichte Unterschiede auf, die in Abbildung 7.3 zu erkennen sind. Hier sind an den Eckpunkten des Kabels unterschiedliche Kabelverläufe im Bereich der Ecke zu erkennen. Diese Änderungen sind auf die automatisch generierten Steuerpunkte der Bézierkurven zurückzuführen, die in Blender erstellt werden. Um eine genaue Übereinstimmung zu erzeugen, müssten mehr Zwischenpositionen für die längeren geraden Strecken der Kabel gespeichert werden, um die Ausrichtung nicht zu sehr gewichten zu lassen.

Im Vergleich dazu treten bei der Auslegung und Modellierung der ersten Routenführung Herausforderungen auf, wenn die Kabel realistischer dargestellt werden sollen. Hier verlaufen die Kabel hinter den Seitenwandverkleidungen vertikal von oben nach unten, wodurch die Kabelführung teilweise durch Fenster verläuft. Um dies zu vermeiden, müssen die Regeln der Kabelführung angepasst werden, wodurch die Routenführung dieser Kabelarchitektur komplexer wird. Hierfür muss die Methodik der Auslegung der Kabelarchitektur erweitert werden, indem Regeln und Anforderungen an die Kabelobjekte implementiert werden, sodass Notausgänge oder Fenster berücksichtigt werden. Bei der zweiten Routenführung, bei der die Kabel oberhalb der Gepäckfächer verlaufen, treten diese Probleme nicht auf, da die Kabel nicht in der Nähe von Aussparungen wie Fenstern oder Türen verlaufen und der vertikale Teil der Route hinter der Bordküche platziert sind.

Eine weitere Herausforderung seitens der Architekturanalyse des elektrischen Systems stellen die fehlenden Informationen von offiziellen Quellen über die praktische Umsetzung des elektrischen Systems in Flugzeugen dar. Speziell betrifft dies das Beleuchtungssystem im Bezug auf die verwendeten Komponenten wie Spannungstromwandler und die Spannung, die an den Kabeln anliegt. Diese Informationslücken erschweren nicht nur die Entwicklung präziser Auslegungsmodelle und Simulationen, sondern erhöhen auch das Risiko von Abweichungen zwischen dem simulierten und

8.2. Evaluierung der Integration und Erfüllung der strukturierten Aufgabenstellung

dem tatsächlichen Systemverhalten. Diese Daten sind essenziell, um Analysen des erstellten Systems durchzuführen, ohne dass die Abweichung zu den tatsächlichen Werten so groß ist, dass die Analyseergebnisse nicht mehr aussagekräftig sind. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit keine konkreten Spannungsabfälle gemessen und Leistungsanalysen durchgeführt.

9. Kritische Reflexion und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde erfolgreich eine Auslegung für elektrische Systeme in eine virtuelle Flugzeugkabine entwickelt und implementiert. Das Ziel bestand darin, eine Erweiterung eines bestehenden Auslegungsprozesses einer digitalen Flugzeugkabine zu entwickeln, um die Integration und Analyse weiterer Subsysteme, wie beispielsweise dem elektrischen System der Kabinenbeleuchtung, zu ermöglichen. Dieser Auslegungsprozess wird vor dem Hintergrund entwickelt, die Auswirkungen der komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten in der Flugzeugkabine bereits im Entwicklungsprozess einer neuen Flugzeugkabine realitätsnah zu erfassen und zu analysieren. Hierbei werden eine Reihe an heterogenen Entwicklungsumgebungen miteinander verknüpft, um ein disziplinübergreifendes Gesamtsystem zu schaffen, an dem die relevanten Experten unterschiedlicher Fachbereiche zusammenarbeiten können. An dem Konzept dieses Auslegungsprozesses wird geforscht, um den Entwicklungs- und Designprozess von innovativen Flugzeugkabinen zu beschleunigen.

Der Fokus der Arbeit lag dabei auf der Integration und Visualisierung des Beleuchtungssystems und der Analyse wesentlicher technischer Eigenschaften wie Kabellänge, -gewicht und Leiterwiderstand sowie die benötigte Leistung des Beleuchtungssystems. Dabei galt es den objektorientierten und modularen Ansatz des Auslegungsalgorithmus weiterzuführen, um mit minimalem Aufwand zwischen Kabelarchitekturen der Stromversorgung wechseln zu können. Die Integration des Beleuchtungssystems hat den Auslegungsprozess um ca. 2 Minuten verlängert. Im Vergleich zum Zeitaufwand für die traditionelle Entwicklung eines Kabinenprototyps von mehreren Wochen oder Monaten, ist dieser Mehraufwand jedoch vernachlässigbar.

Die Analyse der Kabeleigenschaften zeigte, dass eine Kabelführung oberhalb der Gepäckfächer zu einer geringeren Gesamtkabellänge und somit auch einem geringeren

Kabelgewicht führt, verglichen mit einem Kabelsystem, das an den Seitenwänden und unterhalb der Flugzeugkabine verläuft. Bei letzterem Ansatz müssen zudem bei einer realistischen Umsetzung Aussparungen wie beispielsweise Fenster oder Notausgänge zusätzlich berücksichtigt werden, was zu einer weiteren Erhöhung der Kabellängen führt. Zugleich haben dezentralisierte Kabelarchitekturen einen starken Gewichtsvorteil gegenüber den zentralisierten Systemen, bei denen jeder Verbraucher über eine eigene Stromversorgung verfügt. Im Gegenzug dazu steigt bei dezentralisierten Systemen die Komplexität der Stromkreise, um hier eine stabile Stromversorgung aller Verbraucher zu gewährleisten.

Für die Simulation der Stromversorgung wurden komplexere Komponenten wie Spannungsteiler oder Verteilerboxen nicht berücksichtigt, die jedoch für eine realistische Analyse der dezentralisierten Systeme benötigt werden. Aufgrund dieser Vereinfachungen sind die Analyseergebnisse des vereinfachten Systems nicht repräsentativ für die tatsächlichen, komplexeren Systeme. Daher ist die Durchführung einer detaillierten Analyse der Simulation in diesem Kontext nur bedingt aussagekräftig.

Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelte modulare und objektorientierte Implementierung des Auslegungsprozesses bildet die Grundlage für künftige Erweiterungen und Anpassungen des Gesamtsystems und weiterer Subsysteme der Kabine. Aufgrund der Modularität ist es möglich, auch andere Kabelsysteme und -verbindungen modellieren und simulieren zu können sowie weitere Kabelarchitekturen mit geringem Aufwand zu implementieren. Hierzu zählen beispielsweise weitere dezentralisierte Kabelarchitekturen mit SPDBs, wie in [18] beschrieben. Darüber hinaus lassen sich Analyseergebnisse unterschiedlicher Kabelsysteme sowie anderer Kabinenkomponenten durch die entwickelten modularen Funktionen unkompliziert in der VR visualisieren, was die Anwendbarkeit der entwickelten Werkzeuge erweitert.

Ein weiterer Schritt in der Weiterentwicklung des Beleuchtungssystems könnte darin bestehen, die Lampenmodelle als Unity-Lichtquellen in der Virtuellen Realität zu implementieren. Dies würde eine detaillierte Analyse der Lichtverteilung, -intensität

und möglicher Lichtszenarien innerhalb der virtuellen Flugzeugkabine ermöglichen, wodurch eine präzise Bewertung und Optimierung von Beleuchtungskonzepten der Kabine unterstützt wird.

Zudem bietet die modulare Berechnung der benötigten Leistung des Beleuchtungssystems die Möglichkeit in diesem Bereich weitere Analysen durchzuführen. Hierzu könnte im Zuge künftiger Untersuchungen eine detaillierte Analyse der Performanz der Architekturen durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Air Info. „Airbus : First A321 with LED lighting throughout the cabin“. (2014), Adresse: <https://endotairinfodotorg.wordpress.com/2014/03/13/airbus-first-a321-with-led-lighting-throughout-the-cabin/> (besucht am 13.08.2024).
- [2] Airbus, „A319/A320/A321 Flightdeck and systems briefing for pilots“, 1998-09-01.
- [3] Airbus, *Facility Planning Manual Maintenance Facility Planning MFP*.
- [4] Airbus Aircraft. „A320 | The most successful aircraft family ever“. (2021), Adresse: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-the-most-successful-aircraft-family-ever> (besucht am 16.07.2024).
- [5] F. Albers, J. Maier und C. Marggraf-Micheel, „In search of evidence for the hue-heat hypothesis in the aircraft cabin“, *Lighting Research & Technology*, Jg. 47, Nr. 4, S. 483–494, 2015, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153514546784.
- [6] M. Alder, E. Moerland, J. Jepsen und B. Nagel, „Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS“, in *Aerospace Europe Conference 2020*, 2020. Adresse: <https://elib.dlr.de/134341/>.
- [7] R. M. ARNALDO VALDES, S. BURMAOGLU, V. TUCCI, DA COSTA CAMPOS, Luiz Manuel Braga, L. MATTERA und V. F. GOMEZ COMENDADOR, „ACARE and Flight Path 2050 Goals for Maintaining and Extending Aviation Industrial Leadership“, in *8th European Conference For Aeronautics And Space Sciences*. DOI: 10.13009/EUCASS2019-843.
- [8] Autodesk. „FBX | Adaptable File Formats for 3D Animation Software | Autodesk“. (15.08.2024), Adresse: <https://www.autodesk.com/products/fbx/overview#> (besucht am 15.08.2024).
- [9] L. Baum, C. Cosse, F. Grumm und D. Schulz, „Zukunftsfähige Antriebskonzepte für Luftfahrzeuge – Vom „fossilen“ zum „grünen“ Fliegen –“, in *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz*, 2021, S. 121–127.
- [10] F. Beckert, „Automatisierte Kabinendarstellung der CPACS-Flugzeugdefinition in der Virtuellen Realität“, Studienarbeit. Adresse: <https://elib.dlr.de/139090/>.

- [11] Boeing. „Current Market Outlook (2016 - 2035)“. (2016), Adresse: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/about-our-market/assets/downloads/cmo_2016_infographic.pdf (besucht am 08.05.2024).
- [12] J. Chen, C. Wang und J. Chen, „Investigation on the Selection of Electric Power System Architecture for Future More Electric Aircraft“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Jg. 4, Nr. 2, S. 563–576, 2018, ISSN: 2332-7782. DOI: 10.1109/TTE.2018.2792332.
- [13] F. de Crescenzo, S. Bagassi und F. Starita, „Preliminary user centred evaluation of regional aircraft cabin interiors in virtual reality“, *Scientific Reports*, Nr. 11, 2021, ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-021-89098-3.
- [14] Custom Designed Cables Ltd. „How Custom Cables Power Commercial Aircraft - Custom Designed Cables Ltd“. (2015), Adresse: <https://www.customdesignedcable.co.uk/how-custom-cables-power-commercial-aircraft/> (besucht am 12.07.2024).
- [15] A. Filippone, *Advanced Aircraft Flight Performance*, 1st ed. Reston: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2022, ISBN: 978-1-62410-639-2. DOI: 10.2514/4.106408.
- [16] M. Fuchs, F. Beckert, J. Biedermann und B. Nagel, „Experience of Conceptual Designs and System Interactions for the Aircraft Cabin in Virtual Reality“, in *AIAA AVIATION 2020 FORUM*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020, ISBN: 978-162410598-2. DOI: 10.2514/6.2021-2773.
- [17] M. Fuchs, F. Beckert, J. Biedermann und B. Nagel, „A collaborative knowledge-based method for the interactive development of cabin systems in virtual reality“, *Computers in Industry*, Jg. 136, 2022. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103590.
- [18] M. Fuchs, Y. Ghanjaoui, J. Biedermann und B. Nagel, „An Approach for Linking Heterogenous and Domain-Specific Models to Investigate Cabin System Variants“, 2023, S. 1418–1434. DOI: 10.1002/iis2.13090.
- [19] C. Furse und R. Haupt, „Down to the wire“, *IEEE Spectrum*, Jg. 38, Nr. 2, S. 34–39, 2001, ISSN: 0018-9235. DOI: 10.1109/6.898797.
- [20] Glenair, „Interconnect Technologies You Need on Your Aircraft Now“, *Qwikconnect*, Jg. 23, Nr. 2, 2019. Adresse: <https://cdn.glenair.com/qwikconnect/2019/pdf/electrical-wiring-interconnect-system-zone-by-zone-design-guide.pdf> (besucht am 23.05.2024).
- [21] C. Goetz, „Anaylse des Stands der Technik der elektrischen Stromversorgung in Flugzeugkabinen“, Hausarbeit, 16.05.2024.

- [22] I. d. A. B. Guimarães, A. d. O. Moraes und D. S. Barbosa, „Financial Analysis of an Illumination Retrofit for Regional Aircraft“, in *Journal of Aerospace Technology and Management*, Bd. 13, 2021. DOI: 10.1590/jatm.v13.1211.
- [23] U. Hoffmann, *Die Flugzeugkabine der Zukunft – Was ist heute schon möglich?*, Diehl Aerospace GmbH.
- [24] K. Kochen, „Flugzeugsysteme - Bordstromversorgung - ATA24“, 2024-03-14.
- [25] T. Kotowski, „Airbus A320 überholt Boeing 737 als meistverkauftes Flugzeug“, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2019. Adresse: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/airbus-a320-ueberholt-boeing-737-als-meistverkauftes-flugzeug-16493294.html> (besucht am 16.07.2024).
- [26] H. Kuchling, *PHYSIK- Formel und Gesetze*, 17. Aufl. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1982.
- [27] V. Madonna, P. Giangrande und M. Galea, „Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Jg. 4, Nr. 3, S. 646–659, 2018, ISSN: 2332-7782. DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142.
- [28] W. Messer, „LED-Tagebuch (KW 48): Flackerlaternen, 100-Watt-Handleuchte, 1,40 €-Lampen“, *Wolfgang Messer*, 2015. Adresse: <http://fastvoice.net/2015/11/29/led-tagebuch-kw-48-flackerlaternen-100-watt-handleuchte-140-euro-lampen/> (besucht am 15.07.2024).
- [29] Mike Sinnett, „787 No-bleed systems: Saving fuel and enhancing operational efficiencies“, *AERO Magazine*, Jg. 28, S. 125–131, 2007.
- [30] I. Moir und A. G. Seabridge, *Aircraft systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration* (THEi Wiley ebooks), 3rd ed. Chichester, West Sussex, England und Hoboken, NJ: Wiley, 2008, ISBN: 9781119965206.
- [31] B. Nya, J. Brombach, T. Schroeter und D. Schulz, „Weight Evaluation of Cabin Power Architecture on Smaller Civil Aircraft“, in *AST 2011 Workshop on Aircraft System Technology*, 2011.
- [32] K. Oesingmann, W. Grimme und J. Scheelhaase, „Hydrogen in aviation: A simulation of demand, price dynamics, and CO2 emission reduction potentials“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 64, S. 633–642, 2024, ISSN: 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.241.
- [33] A. Preston, „Airbus A320 Family Airspace cabin to be fitted with Collins PSUs“, *Inflight Magazine - HMG Aerospace*, 2021. Adresse: <https://www.inflight-online.com/airbus-a320-family-airspace-cabin-to-be-fitted-with-collins-psus/> (besucht am 15.07.2024).

- [34] Reichelt Elektronik GmbH & Co KG. „EVL 1224UTC - LED, 3 mm, bedrahtet, weiß, 2850 mcd, 25°“. (26.08.2024), Adresse: https://www.reichelt.de/led-3-mm-bedrahtet-weiss-2850-mcd-25--evl-1224utc-p230790.html?&trstct=pol_0&nbcr=1 (besucht am 26.08.2024).
- [35] Royal Aeronautical Society. „Electricity in the air - Royal Aeronautical Society“. (22.04.2024), Adresse: <https://www.aerosociety.com/news/electricity-in-the-air/> (besucht am 22.04.2024).
- [36] M. Saur und L. Nikolaisen, „Design and Implementation of ELA for Cross Fleet Configuration“, Bachelorarbeit, Västerås, 2015-11-17.
- [37] D. Scholz. „Skript - Bordstromversorgung - ATA 24“. (05.12.2013), Adresse: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/materialFS/FS_Skript_3-Bordstromversorgung.pdf (besucht am 29.04.2024).
- [38] M. Schrötter, R. Bréda, R. Andoga und L. Fözö, „The Evolution of the Aircraft Electric Power Systems“, in *2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, 2018, S. 159–162. DOI: 10.1109/CANDO-EPE.2018.8601156.
- [39] A. Senner, *Tabellenbuch Elektrotechnik*, 8. Aufl. Europa-Lehrmittel, 1969, ISBN: 3-8085-0026-3.
- [40] M. Terörde, I. Pirellhu, A. Lücken, D. Schulz und T. Weiß, „Modern concepts for the electrical power generation and distribution system on board aircraft“, in *6th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, 2012.
- [41] Vive. „Setting up a room-scale play area“. (2024), Adresse: https://www.vive.com/us/support/vive-pro-hmd/category_howto/setting-up-room-scale-play-area.html (besucht am 10.07.2024).
- [42] Vive. „VIVE Pro Eye Overview“. (2024), Adresse: <https://www.vive.com/hk/product/vive-pro-eye/overview/> (besucht am 10.07.2024).
- [43] J. Winzen, F. Albers und C. Marggraf-Micheel, „The influence of coloured light in the aircraft cabin on passenger thermal comfort“, *Lighting Research & Technology*, Jg. 46, Nr. 4, S. 465–475, 2014, ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153513484028.
- [44] Xin Zhao, J. M. Guerrero und Xiaohua Wu, „Review of aircraft electric power systems and architectures“, S. 949–953, 2014. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850540.

- [45] D. Xiong, X. Guo, G. Shi und B. Yu, „Application of LED in Aircraft Lighting“, in *Proceedings of the 13th International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering*, S. Long, Hrsg., Ser. Lecture Notes in Electrical Engineering Series, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2014, S. 267–273, ISBN: 978-3-642-38968-9. DOI: 10.1007/978-3-642-38968-9_30.
- [46] M. Zarraga-Rodriguez, X. Insausti, F. R. Lalanne, J. Velasco und J. Gutierrez-Gutierrez, „Algorithm for the Optimal Design of a Fault-Tolerant Aircraft Power Transmission Network“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Jg. 8, Nr. 4, S. 4219–4228, 2022, ISSN: 2332-7782. DOI: 10.1109/TTE.2022.3189442.

Anhang A.

Datenblatt einer Standard-LED mit Lichtfarbe weiß

Im Folgenden ist das Datenblatt von Everlight zu einer weißen 3mm LED mit der Artikelnummer EVL 1224UTC aufzufinden. Das Datenblatt wurde über den Elektronikfachmarkt Reichelt Elektronik GmbH & Co. KG bezogen [34].

Anhang B.

Hauptfunktion der Auslegung in Matlab

In Abbildung B.1 ist die Hauptfunktion der Auslegung in Matlab dargestellt. Hier werden zunächst globale Variablen definiert, bevor die Modularitätsparameter festgelegt werden. Im Anschluss werden die CPACS-Daten importiert und die Kabinenauslegung anhand dieser Informationen durchgeführt. Zuletzt werden noch die Analysen durchgeführt, bevor die Daten in eine XML-Datei exportiert werden.

```
%% EINGABE: Import Daten und Klassen
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 = "top_decentral"; %side_central, top_central, side_decentral, top_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

%% VERARBEITUNG: Start Layout Cabin

[ohsc,psc,oxygenMasks,indivAirOutlets,psu,readingLights,signs,loudspeaker,fillerPanels] = calculateOHSCVersion(seats,frames,exitDoors,ohscType);

[sidewalls,dadopanel,lightCovers,ceilings] = placeLining(seats,frames,exitDoors);
[mixerUnit,supplyDucts,riserDucts,airOutlets,indivSupplyDucts] = placeACsystem(sidewalls,ohsc,exitDoors);
[cids,mmpes,wdb,seb,pcu,deuA,deuB] = placeDigitalSystem(seats,exitDoors,frames);
[domeLights,washLights,mainEPDCs,wiringCables] = placeLightSystem(psu,ohsc,lightCovers,ceilings,cableArchitecture);

% evaluation
[CableLengthTOTAL,CableMassTOTAL,CableResistorAVG,expectedPower] = calculateCables(wiringCables,domeLights,washLights,psu,cableArchitecture);

mainLinks();
mainRequirements();

%Export Daten in output.xml für Blender/VR und neuer Adapter
exportNew
```

Abbildung B.1.: Hauptfunktion der Auslegung in Matlab

Anhang C.

Zeitaufwände der Berechnungen der Teilprozesse in Tabellenform

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse der Berechnung der Zeitaufwände für die einzelnen Teilprozesse dargestellt. Die Teilprozesse beinhalten dabei die Auslegung in Matlab, die Modellierung in Blender und die Visualisierung in Unity, jeweils für die Kabine ohne und mit dem Beleuchtungssystem. Die Berechnung wurde zehn Mal durchgeführt und die Ergebnisse in der Tabelle festgehalten. Die Zeiten sind in Sekunden angegeben.

Iteration der Berechnung	Ohne Beleuchtung			Mit Beleuchtung		
	Matlab	Blender	Unity	Matlab	Blender	Unity
1	82.36	941.02	102	107.82	947.01	145
2	88.31	960.39	102	105.33	950.6	142
3	84.17	926.87	102	113.64	901.71	143
4	75.9	835.35	101	110.6	905.52	142
5	73.73	856.58	102	110.92	957.27	141
6	78.6	850.91	103	104.19	947.07	142
7	89.57	840.34	101	104.39	897.95	143
8	81.5	852.17	104	107.95	960.41	143
9	78.67	869.77	102	108.31	953.32	143
10	73.44	857.9	102	105.17	999.4	142

Tabelle C.1.: Übersicht der Messungen für die Realisierungszeit der Teilprozesse

Anhang D.

Vollständige Auslegung des Beleuchtungssystems

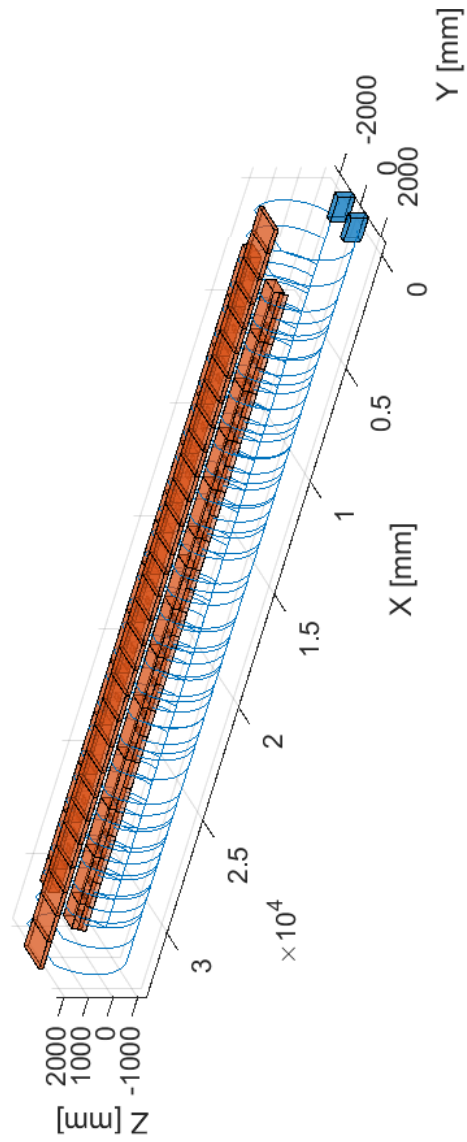


Abbildung D.1.: Auslegung des Beleuchtungssystems der *lower*-Architektur

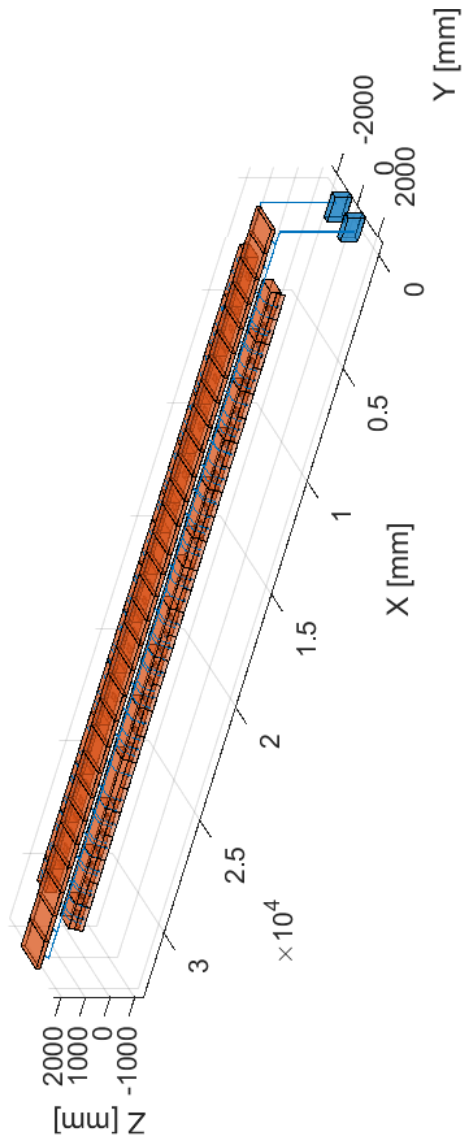


Abbildung D.2.: Auslegung des Beleuchtungssystems der *upper*-Architektur