

EIN METHODISCHER ANSATZ ZUR KONVERTIERUNG VON CAD-MODELLEN AUS DEM CABIN-DESIGN ZU CPACS-DATEN ÜBER VISUAL-SCRIPTING IN GRASSHOPPER FÜR RHINO3D

A. Stickler, M. Fuchs, J. Biedermann, B. Nagel

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

Zusammenfassung

An der Entwicklung neuer Flugzeugkonzepte und -modelle sind eine große Anzahl an Fachdisziplinen mit je eigenen Fragestellungen, Methoden und Werkzeugen beteiligt. Um diese auf eingegrenzte Teilaspekte fokussierten Untersuchungsfelder zu einem ganzheitlichen Bewertungs- und Optimierungsprozess zusammenzuführen, ist es notwendig, die so gewonnenen Daten in eine durchgängige Prozesskette zu integrieren. Konzepte eines „Digitalen Fadens“ als Verknüpfung und Integration von Daten über mehrere Anwendungen und Systeme in der Produktentwicklung und Lebenszyklusbetrachtung sind aktuell ein Forschungsfeld im Flugzeugentwurf.

Das Kabinen-Design trägt durch neue disruptive Kabinenkonzepte wesentlich zur Entwicklung des Fliegens von Morgen bei, besonders angesichts globaler Herausforderungen wie dem demografischen Wandel, politischeinflüssen, gesellschaftlichem Werte- und Normenwandel. Ein wesentlicher Aspekt des Gesamtentwurfs ist dabei die frühzeitige und ganzheitliche Untersuchung dieser Konzepte unter Berücksichtigung einer Integration der Passagier/Mensch-Sicht als Input in den digitalen Entwurfsprozess.

Insbesondere das dem Industrie- und Produkt-Design nahestehende Kabinen-Design nutzt entwurfsmethodisch Werkzeuge, die sich in Medien und Datenformaten von anderen am Flugzeugentwurf beteiligten Disziplinen unterscheiden. So kommen hier bevorzugt Werkzeuge und Methoden zum Einsatz, die ein unmittelbares optisches Feedback erlauben. Je nach Entwurfsmethodik kann der Prozess bereits mit analogen Handzeichnungen als initialem Werkzeug beginnen.

Dieser Beitrag widmet sich der Frage, wie Methoden aus dem Kabinen-Design mit Daten aus klassischen Ingenieursdisziplinen effektiv gekoppelt werden können. Zur Überbrückung wird eine Schnittstellenmethode entwickelt, die den Austausch von Ergebnissen aus dem Kabinen-Design mit anderen Datenformaten des Vorentwurfs ermöglicht. Mit dem Dateiformat CPACS (*Common Parametric Aircraft Configuration Schema*) wurde am DLR ein Datenformat entwickelt, das als zentrales Austausch- und Speichermodell für alle Entwurfsdaten als „Single Source of Truth“ einen nahtlosen Entwicklungsprozess über Disziplingrenzen hinweg ermöglicht. Dafür wird in dieser Arbeit ein stufenweiser Prozess beschrieben, in dem die Erstellung digitaler CAD-Modelle erfolgt, die über visuelle Skripte in ein zur Weitergabe nutzbares Format abstrakter Datensätze konvertiert werden.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode demonstriert, wie Entwürfe von Kabinenmonumenten und Kabinenlayouts am Beispiel von Sitzen von der ersten Entwurfszeichnung über die Erstellung reiner („toter“) NURBS-Geometrie bis hin zu in CPACS konforme Datensätze konvertiert werden können. Dafür wird die 3D-Modellierungsumgebung „Rhinceros3D“ und die darin integrierte Anwendung zur Entwicklung visueller Skripte mit „Grasshopper“ nutzbar gemacht. Die damit erstellten CPACS-Datensätze ermöglichen eine Integration und rückwirkende Optimierung neuer Entwürfe von Kabinenmonumenten und Kabinen-Layouts in und über die am DLR entwickelten Bewertungsketten.

Die vorgestellte Methode leistet einen Beitrag zur frühen Integration der Kabinensystem- und Strukturauslegung im Flugzeugvorentwurf mit einem menschenzentrierten Design-Ansatz.

Keywords

CAD, Cabin-Design, Digitaler Faden, CPACS, Visual-Scripting, Rhino3D, Grasshopper

1. EINFÜHRUNG

Die moderne Luftfahrtindustrie steht vor der Herausforderung, immer komplexere Flugzeugsysteme in kürzerer Zeit und mit höherer Effizienz zu entwickeln. Diese Komplexität entsteht nicht nur durch technische Anforderungen an Aerodynamik, Struktur und Antrieb, usw. sondern auch durch die Notwendigkeit, vielfältige und oft widersprüchliche

Anforderungen aus Bereichen wie Passagierkomfort, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Sicherheit in einem integrierten Entwurf zu berücksichtigen. Gleichzeitig ist an der Flugzeugentwicklung eine stetig wachsende Anzahl spezialisierter Fachdisziplinen beteiligt, von denen jede ihre eigenen bewährten Methoden, Werkzeuge und Datenformate verwendet.

Diese disziplinäre Spezialisierung, obwohl für die Tiefe der Analyse unerlässlich, führt zu erheblichen Herausforderungen bei der Integration der Ergebnisse. Traditionell wurden Entwurfsdaten zwischen den Disziplinen über manuelle Übertragungsprozesse, unterschiedliche Dateiformate oder spezialisierte Konvertierungstools ausgetauscht. Diese Vorgehensweise ist nicht nur zeitaufwendig und fehleranfällig, sondern erschwert auch die iterative Optimierung von Entwürfen, da Änderungen in einer Disziplin oft aufwendige Neubearbeitungen in nachgelagerten Bereichen zur Folge haben.

Das Konzept des "Digitalen Fadens" (Rauscher, 2022) hat sich als vielversprechender Lösungsansatz für diese Integrationsprobleme etabliert. Dabei werden Daten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg in einer durchgängigen, digitalen Prozesskette verknüpft und zwischen verschiedenen Anwendungen und Systemen ausgetauscht. Für die Luftfahrtindustrie bedeutet dies konkret die Entwicklung gemeinsamer Datenstandards und -formate, die es ermöglichen, Entwurfsinformationen disziplinübergreifend konsistent zu verwalten und zu nutzen.

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde mit CPACS (*Common Parametric Aircraft Configuration Schema*) ein solches zentrales Datenformat entwickelt. CPACS fungiert als "Single Source of Truth" für Flugzeugentwurfsdaten und ermöglicht den nahtlosen Austausch zwischen verschiedenen Analyse- und Entwurfswerkzeugen.

Während CPACS bereits erfolgreich für die Integration klassischer ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen eingesetzt wird, stellt die Einbindung designorientierter Disziplinen wie dem Kabinen-Design besondere Herausforderungen dar. Das Kabinen-Design, das methodisch dem Industrie- und Produkt-Design nahesteht, folgt anderen Entwurfsprinzipien und -methodiken als die traditionellen Ingenieursdisziplinen. Hier spielen kreative Prozesse, menschenzentrierte Gestaltungsansätze und die Berücksichtigung ästhetischer und ergonomischer Faktoren eine zentrale Rolle.

Nach der Designtheorie von Bryan Lawson (Lawson, 2004) unterscheidet sich Designwissen grundlegend von rein analytischem, ingenieurwissenschaftlichem Wissen. Designer nutzen sowohl rationale als auch intuitive Erkenntnisprozesse und sind auf Werkzeuge angewiesen, die schnelles visuelles Feedback und iterative Gestaltung ermöglichen. Dies beginnt oft mit analogen Methoden wie Handzeichnungen und physischen Modellen, die eine unmittelbare, körperlich-sinnliche Auseinandersetzung mit dem Entwurf ermöglichen, und setzt sich in der digitalen Umsetzung mit CAD-Systemen fort, die ähnlich intuitive Bedienkonzepte bieten.

Für die digitale Realisierung solcher Entwurfsprozesse haben sich in der Designpraxis CAD-Systeme etabliert, die eine Balance zwischen gestalterischer Freiheit und technischer Präzision bieten. Rhinoceros3D hat sich dabei als eines der bevorzugten Werkzeuge im Produkt-Design und in der Designforschung etabliert. Es zeichnet sich durch seine Vielseitigkeit in der Geometrieerstellung, die direkte Manipulierbarkeit von NURBS-Oberflächen, Echtzeit-visuelles Feedback beim parametrischen Modellieren in der visuellen Programmieroberfläche "Grasshopper" und seine Offenheit für eigene Anpassungen über eine umfassende API aus.

Die Integration von Kabinen-Design-Ergebnissen in den digitalen Faden erfordert daher spezielle Methoden, die die Eigenarten designorientierter Arbeitsweisen berücksichtigen, während gleichzeitig die Kompatibilität mit ingenieurwissenschaftlichen Datenformaten wie CPACS gewährleistet wird. Die vorliegende Arbeit stellt eine solche Integrationsmethode vor, die werkzeugagnostisch konzipiert ist und auf alle CAD-Systeme übertragbar ist, die grundlegende Konzepte wie Blockdefinitionen, Instanziierung, benutzerdefinierte Attribute und API-Zugriff unterstützen.

2. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

2.1. Bestehender Lösungsansatz

Mit der am DLR entwickelten Python-basierten wissensbasierten Entwurfsmethode FUGA (*Fuselage Geometry Assembler*) steht bereits eine leistungsfähige Lösung zur Verfügung, um auf der Grundlage von CPACS-Vorentwurfsdaten Modelle mit hoher geometrischer Fidelität wissens- und regelbasiert zu erstellen. FUGA implementiert Knowledge-Based Engineering (KBE) Methoden und kann sowohl für die Flugzeugstruktur als auch für Kabinenlayouts eingesetzt werden. Die Methode erstellt aus Kabinenmonumenten durch definierte Entwurfsregeln regelmäßige LOPA (*Layout of Passenger Accommodation*) und speichert die erzeugten Daten in einem erweiterten CPACS-Dokument.

Die Stärke von FUGA liegt in der systematischen, regelbasierten Erzeugung von Kabinenlayouts, die etablierten Entwurfsrichtlinien und Zertifizierungsanforderungen folgen. Dieser Ansatz ist besonders effektiv bei konventionellen Kabinenkonfigurationen, bei denen bewährte Entwurfsmuster und parametrische Beziehungen angewendet werden können.

2.2. Identifikation der methodischen Lücke

Die regelbasierte Herangehensweise von FUGA stößt jedoch bei disruptiven, unregelmäßigen Kabinenlayouts an ihre Grenzen. Erste Entwicklungen diesen Bereich auf Grundlage wissensbasierter Methoden in FUGA abzudecken, finden sich bei Zemke et al (Zemke, 2025). Innovative Kabinenkonzepte, die etablierte Entwurfsmuster durchbrechen oder neue räumliche Anordnungen erkunden, lassen sich jedoch bisher nur unzureichend durch vordefinierte Regeln und Parameter beschreiben. Solche Konzepte entstehen typischerweise in einem iterativen, kreativen Entwurfsprozess, bei dem Designer verschiedene Lösungsansätze explorieren und dabei sowohl funktionale als auch ästhetische Aspekte berücksichtigen.

Bei einem manuellen, CAD-basierten Entwurfsprozess, in dem solche disruptiven Kabinenlayouts entwickelt werden, erweist sich eine nachträgliche Beschreibung nach wissensbasierten, mathematischen Regelmethoden als wenig praktikabel. Die geometrischen Beziehungen und Entwurfsentscheidungen sind in der CAD-Umgebung oft implizit vorhanden und nicht in der formalisierten Form verfügbar, die für eine regelbasierte Beschreibung erforderlich wäre.

2.3. Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die es ermöglicht, CAD-basierte, rein geometrisch erstellte

Kabinenlayouts automatisiert in das Datenformat CPACS zu übertragen. Dabei soll die methodische Freiheit des Designprozesses erhalten bleiben, während gleichzeitig die Integration in die bestehende digitale Prozesskette gewährleistet wird. (Abbildung 1)

Die zu entwickelnde Methode soll dabei folgende Anforderungen erfüllen:

Bewahrung der Designfreiheit: Der kreative Entwurfsprozess soll nicht durch vorgegebene Regeln oder Parameter eingeschränkt werden. Designer sollen weiterhin die Möglichkeit haben, innovative und disruptive Lösungen zu erkunden.

Automatisierte Datenextraktion: Aus den in der CAD-Umgebung erstellten geometrischen Modellen sollen automatisiert die für CPACS relevanten Informationen extrahiert werden, ohne dass manuelle Übertragungsschritte erforderlich sind.

Werkzeugagnostik: Die Methode soll nicht ausschließlich auf ein spezifisches CAD-System beschränkt sein, sondern auf verschiedene Softwarelösungen übertragbar sein, die grundlegende Konzepte als Voraussetzung unterstützen.

Bidirektionale Integration: Neben dem Export von Designdaten zu CPACS soll auch die Möglichkeit geschaffen werden, CPACS-basierte Vorentwurfsdaten als Ausgangspunkt für den Designprozess zu nutzen.

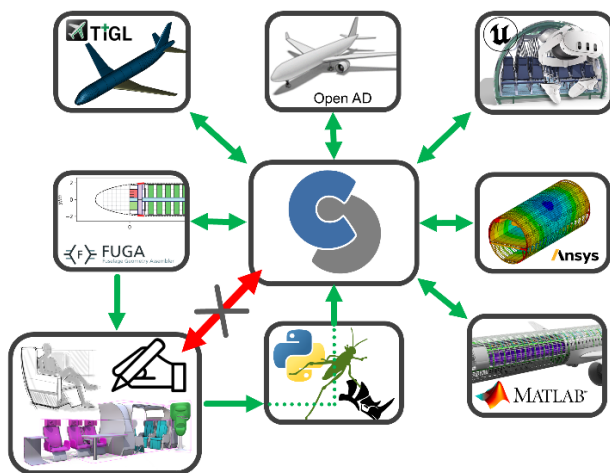


BILD 1. Diagramm Motivation Schließung einer Lücke in der digitalen Planungskette.

2.4. Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen

Die vorgestellte Methode ergänzt bestehende Ansätze wie FUGA, anstatt sie zu ersetzen. Während FUGA optimal für die regelbasierte Erzeugung konventioneller Layouts geeignet ist, schließt die neue Methode die Lücke bei der Integration frei gestalteter, disruptiver Entwürfe. Beide Ansätze können parallel verwendet werden und decken damit das gesamte Spektrum von regelbasierten bis hin zu vollständig freien Entwurfsprozessen ab.

Die Kombination beider Ansätze ermöglicht es, sowohl die Effizienz automatisierter Generierung als auch die Innovationskraft manueller Gestaltung im Digitalen Faden zu

nutzen und somit eine umfassende Abdeckung unterschiedlicher Entwurfsanforderungen zu erreichen. (Abbildung 1)

3. STAND DER FORSCHUNG

3.1. Entwicklung und aktuelle Fortschritte von CPACS

Das Common Parametric Aircraft Configuration Schema feiert 2025 sein 20-jähriges Jubiläum als zentrale Schnittstelle im Flugzeugentwurf und hat sich zu einem Standard für den Datenaustausch in der kollaborativen Forschung entwickelt (Alder, 2022). Die kontinuierliche Weiterentwicklung von CPACS zeigt sich in der aktuellen Version 3.4, die Revisionen in der Missionsdefinition, Punktleistungsdefinition und Fahrwerksdarstellung einführt (DLR-SL, 2024).

Eine relevante Entwicklung für die vorliegende Arbeit ist die Erweiterung der Kabinenbeschreibung innerhalb des CPACS-Luftfahrzeugdatenschemas zur Unterstützung detaillierter Analysen. Walther et al. (2022) stellten eine überarbeitete Definition für Kabinen vor, die als CPACS Version 3.4 übernommen wurde. Ein Hauptziel der neuen Definition ist die Integration hochauflösender Komponentengeometriemodelle, die sowohl als polygonale 3D-Netze als auch als (NURBS-)CAD-Geometrie bereitgestellt werden.

3.2. FUGA und wissensbasierte Entwurfsmethoden

Walther et al. haben in den letzten Jahren umfassende Arbeiten zur Entwicklung vollautomatisierter Transport-Flugzeugrumpf-Modellierungs- und Auslegungswerkzeuge unter Verwendung von Python publiziert (Walther et al., 2020; Walther et al., 2021).

Die wissensbasierte Entwurfsmethodik, die in FUGA implementiert ist, umfasst drei wesentliche Bausteine: ein Datenrepositorium für Produktdaten, ein Wissensrepositorium für Entwurfsregeln und einen Regelinterpreter für die Ausführungsreihenfolge (Hesse et al., 2023). CPACS übernimmt dabei die Rolle des Datenrepositoriums, während Entwurfsregeln in ausführbaren Python-Klassen implementiert werden.

Die Forschungsarbeiten zeigen, dass FUGA für die Modellierung CPACS-basierter Rumpfstrukturen unter Verwendung von Python eingesetzt wird und neue Ansätze im CPACS-basierten Vorentwurf von Flugzeugrumpfstrukturen ermöglicht (Walther et al., 2022).

3.3. Visuelles Programmieren und Parametrisches Design

Für die Entwicklung einer Methodik wird in dieser Arbeit Grasshopper als Umgebung für das visuelle Scripting in der gewählten CAD-Anwendungen Rhino3D untersucht. Grasshopper ist eine der ältesten visuellen Scripting-Umgebungen, die in einem CAD-Tool implementiert wurden. Es hat sich seither als Standard-Tool in der Forschung zu Parametrischen Design etabliert. Durch visuelles Echtzeitfeedback eignet es sich zur experimentellen Erarbeitung neuer Methoden gut. In den vergangenen Jahren

implementierten vermehrt weitere CAD-Softwareanbieter vergleichbare Schnittstellen. Während für die wissenschaftliche Entwicklung von CPACS und FUGA umfangreiche Literatur vorliegt, ist die Quellenlage mit Fokus auf Grasshopper und visuellem Programmieren als Methode deutlich begrenzter. Grasshopper wurde als visuelle Programmiersprache und -umgebung von David Rutten bei Robert McNeel & Associates entwickelt und wird primär für die Entwicklung generative Algorithmen verwendet (Rutten, 2007).

Die Literatur zu Grasshopper konzentriert sich insgesamt hauptsächlich auf Anwendungsfälle in Architektur und Produktdesign, während systematische Untersuchungen zur Integration in ingenieurwissenschaftliche Workflows bisher weitgehend fehlen.

Eine für den Kontext dieser Arbeit im weiteren Sinne auswertbare aktuelle Studie untersuchte die Kapazität und Anpassungsfähigkeit von Grasshopper als parametrisches

2. die flexible Erstellung skalierbarer, angepasster Designalternativen zu ermöglichen und
3. die Effizienz im Plattformdesignprozess in Bezug auf Zeit und technische Ressourcen zu verbessern:

Für die vorliegende Arbeit ist die Feststellung der Autoren relevant, dass es für in ihrer Arbeit methodisch notwendig ist, "die visuellen Abläufe mit Skripting unter Verwendung von Sprachen wie Python oder C# zu ergänzen, die in GH integriert sind. Dies ermöglicht es, anspruchsvollere CAD-Modelle unter Verwendung von Strukturen wie Bedingungen zu erstellen[...] Durch Skripting ist es auch möglich, auf externe Daten zuzugreifen, um das Design automatisch an technische, wirtschaftliche oder kontextuelle Kriterien anzupassen" (Martín-Mariscal et al., 2025). Die hier im anderen Kontext erwähnte Erweiterungsmöglichkeiten mittels Python-Integration stellt den Schlüssel für die Integration von

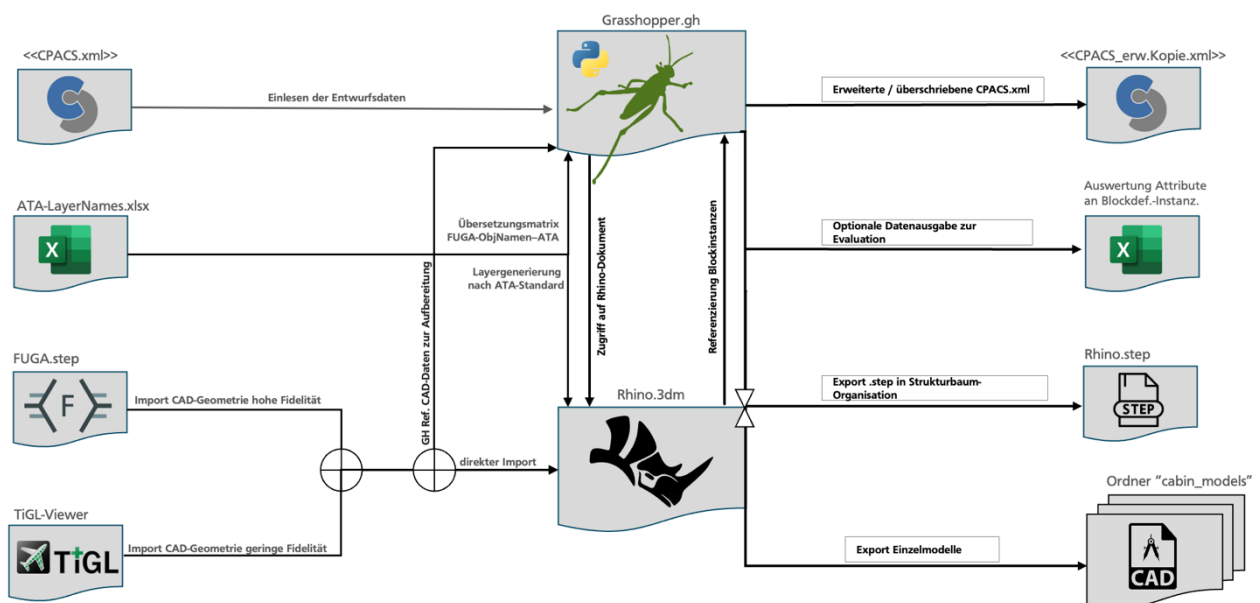


BILD 2. Flussdiagramm zur Übersicht der entwickelten Methode für die Datenextraktion von CAD-modellierten Kabinenmonumenten und Transfer nach XML im CPACS-Schema.

Entwurfswerkzeug für die Entwicklung von Produktplattformen anhand von drei Fallstudien (Martín-Mariscal et al., 2025):

1. Parfümflaschen,
2. Outdoor-Möbel

und

3. Schreibtisch-Organizer.

Die Ergebnisse zeigen, dass Grasshopper starke Fähigkeiten zur Anpassung geometrischer Parameter im Vergleich zur traditionellen Modellierung in Rhinoceros 3D bietet.

Die Analyse ergab Einblicke in die Fähigkeit von Grasshopper (Martín-Mariscal et al., 2025).

1. die Generierung von Produktvarianten innerhalb von Plattformen zu automatisieren,

Grasshopper in ingenieurwissenschaftliche Workflows durch CPACS dar, da sie den Zugriff auf externe Datenformate und die Implementierung komplexer Datenverarbeitungslogik ermöglichen.

4. METHODE

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode ermöglicht die bidirektionale Integration von CAD-basierten Kabinen-Designs in den Digitalen Faden der Flugzeugentwicklung durch automatisierte Konvertierung zu CPACS-konformen Datensätzen. Der Ansatz ist werkzeugagnostisch konzipiert, wird jedoch exemplarisch anhand der Integration von Rhinoceros3D und Grasshopper demonstriert. Die im folgenden beschriebenen Einzelaspekte des Ansatzes sind in Abbildung 2 dargestellt. (Abbildung 2)

4.1 Systemvoraussetzungen und Grundprinzipien

Die Methode setzt voraus, dass die verwendete CAD-Software folgende Funktionalitäten unterstützt:

Master-Objekte und Instanzen: Das System muss die Konzepte von wiederverwendbaren Master-Definitionen und deren Instanziierung in verschiedenen Positionen und Orientierungen unterstützen. Dieses fundamentale Prinzip wurde bereits 1963 in der ersten CAD-Software "Sketchpad" von Ivan Sutherland am MIT eingeführt, wo "Master-Zeichnungen realisiert wurden, die in viele Duplikate instanziiert werden können" (Sutherland, 1963). Die innovative Art, wie das Programm seine geometrischen Daten organisierte, begründete die Verwendung von "Master-Objekten" und "Instanzen" in der Informatik und wies den Weg zur objektorientierten Programmierung. Dieses Konzept findet sich seither in nahezu allen CAD-Programmen unter verschiedenen Namen und Varianten wieder - sei es als "Blockdefinitionen und Instanzen" in Rhinoceros3D und AutoCAD, "Komponenten" in SketchUp, "Familien" in Revit oder "Bauteile" in SolidWorks.

Benutzerdefinierte Attribute: An CAD-Objekten und Blockinstanzen müssen benutzerdefinierte Attribute definiert und gespeichert werden können. Diese Attribute enthalten die für CPACS relevanten Metadaten wie Komponentenbezeichnungen, Positionsdaten, Translationen und Anzahl Passagiere pro Sitzeinheit. Darüber hinaus können durch diese Attributfunktionalität beliebige weitere Datenfelder wie Materialdefinitionen, Massen, Life-Cycle-Assessment-Daten oder andere projektspezifische Informationen erstellt werden, die für die umfassende Dokumentation im CPACS-Format genutzt werden könnten.

Programmierschnittstelle (API): Eine umfassende API muss den programmatischen Zugriff auf Geometriedaten, Objektattribute und Dokumentstrukturen ermöglichen. Dies ist essentiell für die automatisierte Datenextraktion und -verarbeitung.

Layer- und Hierarchiemanagement: Das System muss strukturierte Layer-Organisationen unterstützen, die eine systematische Kategorisierung der Kabinenkomponenten nach Industriestandards ermöglichen.

4.1. Datenimport und Strukturaufbau

4.1.1. Generierung der Layerstruktur

Der erste Schritt etabliert eine standardisierte Dokumentstruktur im CAD-System. Basierend auf dem ATA-Spec-Standard (*Air Transport Association Specification*) wird eine hierarchische Layerstruktur automatisch generiert. Ein spezialisiertes Tool liest Standardnamen aus einer Excel-Datei und erstellt entsprechende Layer mit konfigurierbarer Hierarchietiefe (Abbildung 3 und 7). Diese Struktur ermöglicht die systematische Zuordnung von Kabinenkomponenten zu definierten Kategorien und erleichtert die spätere Datenextraktion.

4.1.2. Import von Flugzeugstrukturdaten

Für die Integration der Kabinen-Designs in den Gesamtkontext des Flugzeugentwurfs werden verschiedene

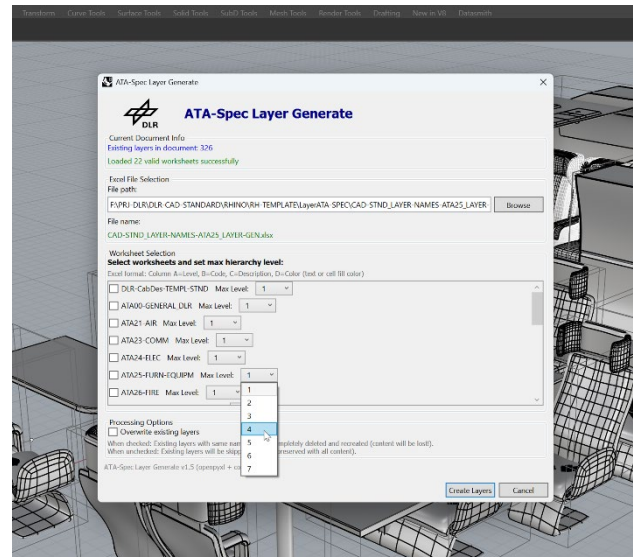


BILD 3. Graphische Benutzeroberfläche zur Generierung von Layern/Ebenen nach ATA-Standard.

Importoptionen bereitgestellt:

1. Direkte CPACS-Integration: Über die direkte Anbindung der TiGL/TiXi-Bibliotheken in Grasshopper erfolgt der Import der Basisstruktur-geometrie in niedriger Fidelität.
2. FUGA-basierter Import: Geometriedaten mit hoher Fidelität werden als STEP-Dateien aus FUGA importiert.
3. Parametrische Rekonstruktion: Basierend auf direkt aus CPACS ausgelesenen Daten werden Sektionskurven generiert und mittels RhinoCommons-API-Funktionen zu vollständigen Geometriemodellen entwickelt. Dieser Ansatz nutzt NURBS-Kurven, Loft-Operationen und boolesche Operationen direkt in der CAD-Umgebung Rhino3D.

4.2. Kabinen-Design-Integration

4.2.1. Komponentenreferenzierung

Manuell erstellte Kabinenkomponenten, exemplarisch dargestellt anhand von Passagiersitzen, werden über ihre Layer-Zugehörigkeit automatisch identifiziert und referenziert. Das System liest systematisch alle Objekte der relevanten Layer aus und extrahiert sowohl geometrische als auch attributive Informationen (Abbildung 7 und 8).

4.2.2. Datenextraktion für CPACS-Konformität

Für die CPACS-konforme Darstellung der Kabinenkomponenten werden spezifische Informationen extrahiert:

Geometrische Daten: Koordinaten der Einfügepunkte (relativ zum Kabinenursprungspunkt), Rotationswinkel um die lokale Z-Achse und Skalierungsfaktoren der Blockinstanzen werden automatisch ausgelesen und in CPACS-konforme Koordinatensysteme transformiert.

Attributive Daten: Benutzerdefinierte Attribute wie die Minimalanforderung der "Passagieranzahl pro Sitzmodell", optional weitere Angaben wie Masse, Materialspezifikationen etc. werden aus den CAD-Objekten extrahiert und in entsprechende CPACS-Datenfelder (oder optional in ein Tabellenformat wie *.csv) überführt.

Komponententypisierung: Jede Komponente wird basierend auf ihrer Layer-Zugehörigkeit und den definierten Attributen einem CPACS-Komponententyp zugeordnet.

4.2.3. Automatisierte Modellgenerierung

Ein Python-Skript im Grasshopper-Graphen generiert automatisch einzelne CAD-Modelle für jede Komponentendefinition und speichert diese in einem dedizierten Ordner "cabin_models" im Projektverzeichnis. Die relativen Pfadangaben zu diesen Modellen werden in den entsprechenden XML-Knoten der CPACS-Datei gespeichert, wodurch eine bidirektionale Verknüpfung zwischen CPACS-Daten und CAD-Geometrie etabliert wird. (Abbildung 9)

4.2.4. CPACS-Datei-Aktualisierung

Die referenzierte CPACS-Datei wird erweitert oder überschrieben, wobei eine neue Version mit Namensänderung und optionalem Zeitstempel gespeichert wird.

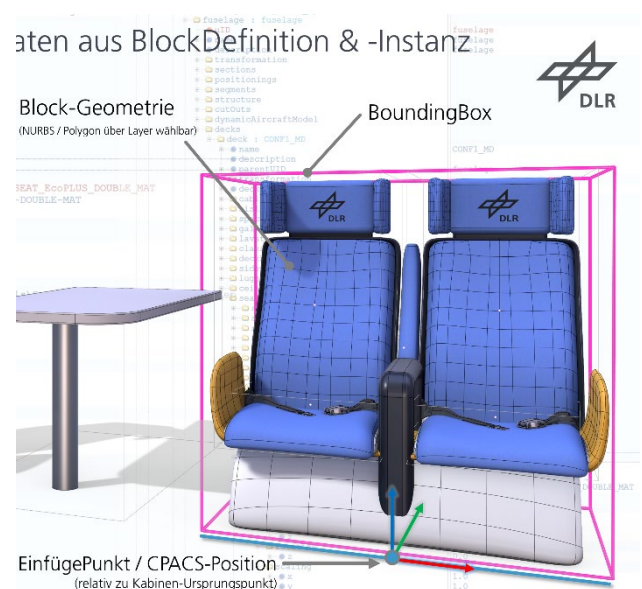


BILD 4. Einer der prozessierten Sitzmodelle in schematischer Darstellung mit automatisch ausgelesenen fixen Attributdaten.

verschachtelten Blockstruktur mit hierarchischer Organisation unter einem benannten Root-Block.

Die beschriebene Methode stellt eine systematische Brücke zwischen designorientierten CAD-Workflows und ingenieurwissenschaftlichen Datenformaten dar und ermöglicht die nahtlose Integration kreativer Entwurfsprozesse in den digitalen Faden der Flugzeugentwicklung.

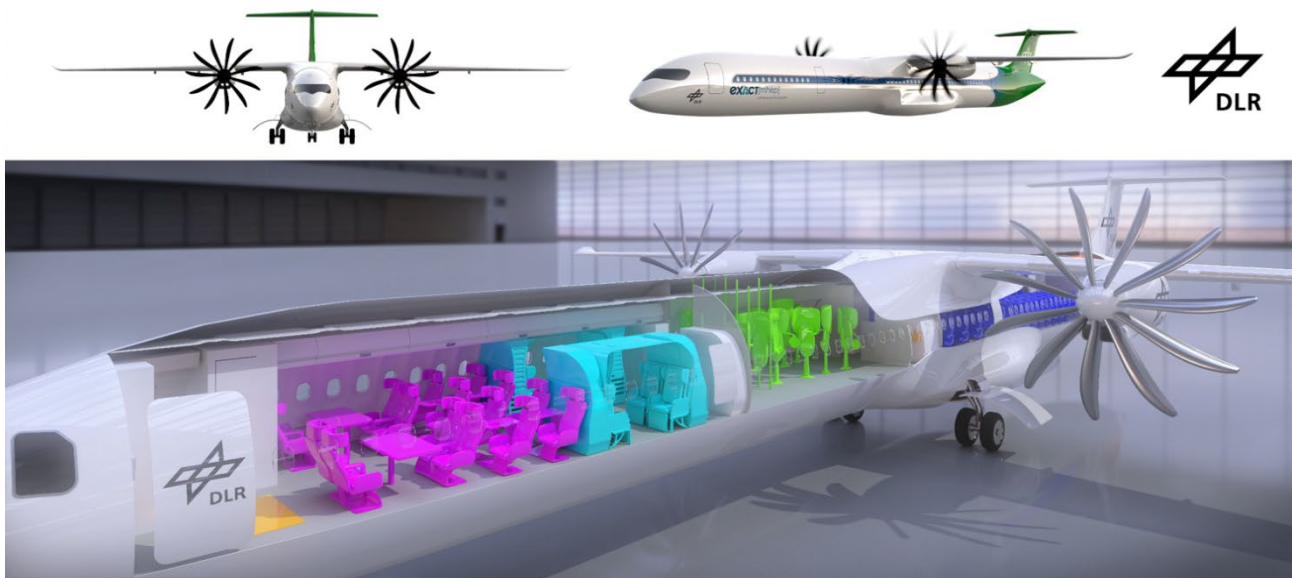


BILD 5. Anwendungsbeispiel Sitzmonumente in disruptiven Kabinenlayout (DLR-Projekt EXACT).

4.3. Export für Engineering CAD-Dateiformate

Für den Austausch mit etablierten Engineering-Software-Lösungen kann zusätzlich eine Reorganisation der Dokumentstruktur für den STEP-Export durchgeführt werden. Dieser Prozess umfasst die Umbenennung aller Objekte nach ihren Layer-Namen, die Generierung von Blockdefinitionen je Layer und die Erstellung einer singulären

5. ANWENDUNGSBEISPIEL: INTEGRATION DISRUPTIVER KABINENLAYOUTS

Der entwickelte methodische Ansatz wird im Folgenden an einem Beispiel eines disruptiven Kabinenlayouts untersucht. Dabei werden zunächst exemplarisch Passagiersitze in verschiedenen Konfigurationen betrachtet.

5.1. Projektkontext und Ausgangssituation

Das DLR-Projekt EXACT (*Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies*) befasst sich mit der Erforschung und Entwicklung neuer, klimaeffizienter Flugzeugkonfigurationen, insbesondere mit flüssigwasserstoffbetriebenen Turboprop-Konzepten. In diesem digital integrierten Forschungsverbund arbeiten mehr als 60 Teilnehmer aus 20 DLR-Instituten an der Entwicklung von 10 zukünftigen Flugzeugkonfigurationen und deren Varianten. Im Rahmen verschiedener DLR-Kabinen-Design-Projekte, insbesondere dem Projekt Arcadia, wurden innovative Sitzkonzepte entwickelt, die von konventionellen LOPA-Standards (*Layout of Passenger Accommodation*) abweichen und zur Integration in die EXACT-Flugzeugentwürfe vorgesehen sind. Die Abbildung 5 zeigt den dieser Studie zugrunde liegenden Entwurf „D250-TPLH2-MHEP-2040“ von 2020 aus dem Projekt EXACT mit einem experimentellen Kabinenlayout aus dem DLR-Projekt „Arcadia“. (Abbildung 5)

Diese disruptiven Entwürfe umfassen unter anderem:

Abteilmodule: Vierer-Sitzgruppen in räumlich abgetrennten Bereichen für eine erhöhte Privatsphäre

Rotierte Einzelsitze: Schräg orientierte, versetzt angeordnete Sitze im Mittelgang für eine verbesserte Beinfreiheit

Asymmetrische Layouts: Von der standardisierten 3-3-Sitzanordnung abweichende Konfigurationen

Für die Untersuchung disruptiver Kabinenkonzepte wird in dieser Arbeit eine heterogene Konfiguration verschiedener experimenteller Sitzkonzepte aus dem Projekt EXACT (*Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies*) verwendet (Atanasov, 2024). Das Projekt untersucht eine nachhaltige Luftfahrt und wie Klimaauswirkungen des

Luftverkehrs drastisch reduziert werden können und gleichzeitig die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleibt.

5.2. Methodische Umsetzung

5.2.1. CAD-Modellierung der Sitzkomponenten

Die vorgestellten innovativen Sitzmodelle wurden in Rhinoceros3D als detaillierte NURBS-Geometrie erstellt. Jeder Sitztyp wurde als Block-Definition modelliert und mit spezifischen Attributen versehen. (Abbildung 6 und 7)

5.2.2. Automatisierte Attributextraktion

Das entwickelte Grasshopper-Skript extrahierte systematisch die erforderlichen CPACS-Daten:

Geometrische Informationen:

Einfügapunkte der Sitzinstanzen im Kabinenkoordinatensystem.

Rotationswinkel um die lokale Z-Achse (0°, 45°, 90° je nach Sitztyp). Bounding-Box-Dimensionen für abstrakte Definition des Bauraums in CPACS (evtl. Kollisionserkennung).

Attributive Daten:

Passagieranzahl pro Sitzeinheit (1-4 je nach Typ).

Komponentenbezeichnungen nach ATA-Kapitel 25 (Ausstattung/Einrichtung).

Sitzklassifizierung (Economy, Business, First Class).

Tische als den Sitzen zugeordnete Objekte mit Passagierzahl "0".

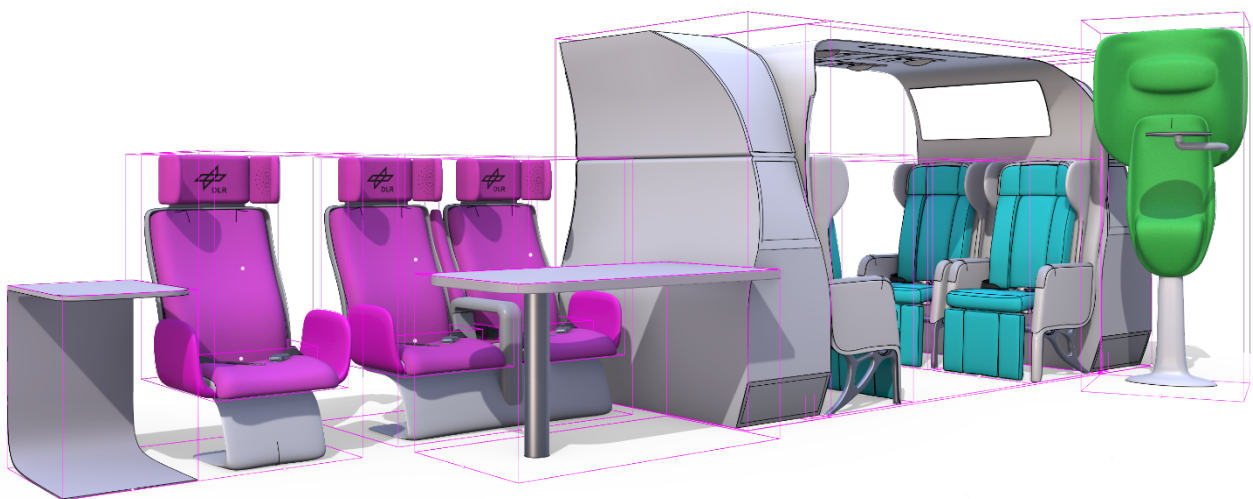


BILD 6. CAD-Modelle der betrachteten Passagiersitzmodelle als „Blockinstanzen“ in Rhino3D.

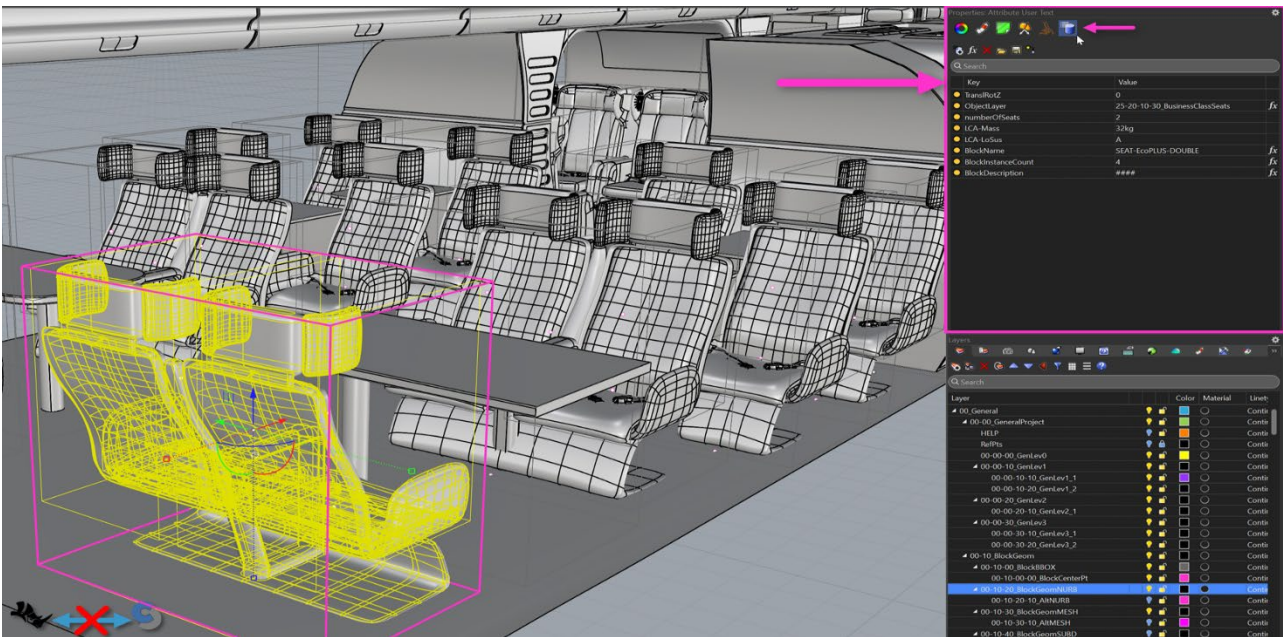


BILD 7. Rhino3D Benutzeroberfläche mit Blockinstanz und Panel "Blockattribute".

5.2.3. CPACS-Integration

Die extrahierten Daten wurden automatisch in die CPACS-Datenstruktur integriert. Dabei wurden neue „deckElement“-Knoten für jeden Sitztyp erstellt und die entsprechenden Geometriereferenzen auf die automatisch generierten CAD-Modelle im "cabin_models"-Ordner gesetzt.

5.3. Datenintegration und -validierung

Die automatisierte Konvertierung führte zu einer vollständig CPACS-konformen Darstellung des disruptiven Kabinenlayouts mit verschiedenen Sitzinstanzen unterschiedlicher Typen und einer Gesamtpassagierkapazität.

Das Anwendungsbeispiel demonstriert die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der entwickelten Methode zur Integration innovativer Kabinenentwürfe in den Digitalen Faden der Flugzeugentwicklung.

6. ERGEBNISSE UND BEWERTUNG

6.1. Workflow-Effizienz

Der automatisierte Konvertierungsprozess vom CAD-Modell zur CPACS-Integration zeigte eine erhebliche Zeitersparnis für das komplette Kabinenlayout im Vergleich zu einem geschätzten manuellen Aufwand. Die Methode ermöglicht schnelle Iterationen und reduziert das Risiko manueller Übertragungsfehler signifikant. Durch die entwickelte Methode konnte der Entwicklungsprozess beschleunigt und die Effizienz gesteigert werden. Im Vergleich zu den vorher notwendigen manuellen Anpassungen und händischen 3D Integrationen neuartiger disruptiver Konzepte, können nun diese innerhalb von fünf Minuten generiert und integriert werden. Die Daten sind im Anschluss durch die standardisierte Anbindung an CPACS direkt an weitere Fachdisziplinen für weiterführende Analysen anschlussfähig.

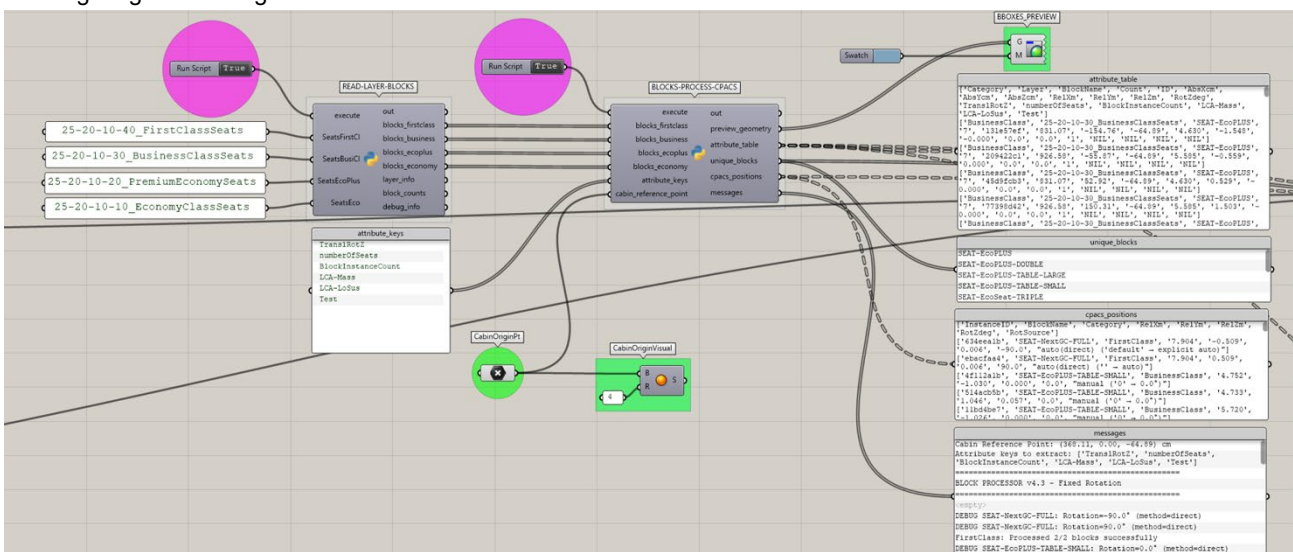


BILD 8. Teilansicht Grasshopper Graph/Visuelles Skript mit Python-Knoten.

6.2. Potentielle nachgelagerte Verwendung

Die CPACS-integrierten Daten können in verschiedene DLR-Analysewerkzeuge übertragen werden:

Strukturanalyse: Integration in FE-Berechnungsnetze für vibroakustische Analysen sind möglich. Hesse et al. (2023) zeigen in ihrer Arbeit zur wissensbasierten Rumpf- und Kabinenmodellierung, dass für eine vollständige Lärmprognose innerhalb der Kabine "zusätzliche Strukturen und Geometrien (bspw. Sitze, Monumente, Systeme und weitere Anbauteile) innerhalb der Kabine notwendig" sind. Die durch die vorgestellte Methode generierten CPACS-konformen Sitzdaten können direkt in solche gekoppelten FE-Modelle mit Fluid-Struktur-Interaktion integriert werden.

VR/AR-Visualisierung: Automatische Geometrieaufbereitung für immersive Bewertungen kann realisiert werden. Beckert (2020) demonstriert in seiner Arbeit zur "Automatisierten Kabinendarstellung der CPACS-Flugzeugdefinition in der Virtuellen Realität", wie CPACS-Daten systematisch in VR-Umgebungen übertragen werden. Die vorgestellte Methode ermöglicht auch disruptive Kabinenlayouts automatisiert in solche VR-Darstellungen zu integrieren, was eine deutliche Verringerung der Prozesszeiten zur Folge hätte.

6.3. Methodenbewertung

Die praktische Anwendung bestätigte die Funktionsfähigkeit der entwickelten Integrationsmethode zwischen designorientierten CAD-Workflows und ingenieurwissenschaftlichen Datenformaten. Besonders hervorzuheben ist:

Designfreiheit erhalten: Die kreativen, disruptiven Aspekte der Entwürfe konnten vollständig bewahrt werden, während gleichzeitig die Integration in den Digitalen Faden erfolgte.

Automatisierungsgrad: Der hohe Automatisierungsgrad reduzierte das Risiko manueller Übertragungsfehler und ermöglichte schnelle Iterationen des Kabinenlayouts.

Werkzeugagnostik: Die erfolgreiche Integration zeigt, dass die Methode prinzipiell auf andere CAD-Systeme übertragbar ist, die die identifizierten Grundfunktionalitäten unterstützen.

Skalierbarkeit: Die Methode lässt sich auf weitere Kabinenkomponenten wie Galleys, Lavatories oder Lining-Elemente erweitern.

7. DISKUSSION

Die vorliegende Arbeit demonstriert, dass im Konzept des Digitalen Fadens und dem Prinzip der "Single Source of Truth" auch ingenieursfernere Methodiken wie das Kabinen-Design rationell an die intendierte lückenlose digitale Datenkette integrierbar sind. Damit können die Vorteile und Stärken dieser Disziplin im Gesamtprozess der Entwicklung neuer Flugzeugkonzepte produktiv zur Geltung kommen.

7.1. Methodische Erkenntnisse

Die entwickelte Integrationsmethode zeigt, dass die unterschiedlichen methodischen Ansätze zwischen designorientierten und ingenieurwissenschaftlichen Arbeitsweisen nicht unvereinbar sind, sondern durch geeignete Schnittstellen produktiv miteinander verknüpft werden können. Durch die systematische Nutzung gemeinsamer Datenstrukturen und standardisierter Schnittstellen lassen sich die Stärken beider Ansätze kombinieren, ohne ihre jeweilige methodische Eigenständigkeit zu kompromittieren.

Besonders bedeutsam ist die Erkenntnis, dass die Integration nicht über eine Vereinheitlichung der Werkzeuge, sondern über die Standardisierung des Datenaustauschs und der Datenkonvertierung erfolgen kann. Dies ermöglicht es Designern, weiterhin ihre bevorzugten, auf visuelles Feedback und kreative Exploration ausgelegten Tools zu verwenden, während Ingenieure ihre etablierten, auf Präzision und Nachvollziehbarkeit optimierten Systeme beibehalten können.

Die Methode demonstriert, dass die Kooperation zwischen unterschiedlichen Disziplinen durch die Definition geeigneter Schnittstellen und Transformationsregeln systematisch unterstützt werden kann, ohne die spezifischen Arbeitsweisen der beteiligten Fachbereiche zu beeinträchtigen.

7.2. Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess

Die Automatisierung der Datenkonvertierung reduziert nicht nur den zeitlichen Aufwand, sondern verändert auch qualitativ die Möglichkeiten des iterativen Entwurfs. Designänderungen können nun ohne manuelle Übertragungsschritte direkt in nachgelagerte Analysen einfließen, was eine engere Kopplung zwischen konzeptioneller Gestaltung und technischer Bewertung ermöglicht.

Dies ist besonders relevant für die Entwicklung disruptiver Kabinenkonzepte, die sich nicht in vordefinierte regelbasierte Systeme wie FUGA einordnen lassen. Die vorgestellte Methode schließt damit eine wichtige Lücke im Spektrum verfügbarer Entwurfswerkzeuge und erweitert die Möglichkeiten des Digitalen Fadens um eine bisher unterrepräsentierte, aber essenzielle Perspektive.

7.3. Grenzen und Herausforderungen

Die werkzeugagnostische Konzeption der Methode ist sowohl Stärke als auch Herausforderung. Während sie prinzipiell auf verschiedene CAD-Systeme übertragbar ist, erfordert jede Implementierung eine spezifische Anpassung an die jeweiligen API-Strukturen und Datenmodelle. Die

Die vorgestellte Methode stellt einen wichtigen Baustein für die vollständige Digitalisierung der Flugzeugentwicklung dar und eröffnet neue Perspektiven für die Integration menschenzentrierter Designansätze in technische Entwicklungsprozesse.

9. QUELLENVERZEICHNIS

Alder, M.; Moerland, E.; Jepsen, J.; Nagel, B. (2022). Recent Advances in Establishing a Common Language for Air-craft Design with CPACS. <https://elib.dlr.de/134341/>

Atanasov, G.; Silberhorn, D (2024). EXACT Sustainable Aircraft Concepts Results and Comparison. <https://www.dglr.de/publikationen/2025/630388.pdf>

Beckert, F. (2020). Automatisierte Kabinendarstellung der CPACS-Flugzeugdefinition in der Virtuellen Realität. <https://elib.dlr.de/139090/>

CPACS Development Team (2024). CPACS - Common Parametric Aircraft Configuration Schema. <https://cpacs.de/> (zuletzt aufgerufen: 15.09.2025).

DLR-SL (2024). CPACS Releases - Version 3.4. GitHub Repository. <https://github.com/DLR-SL/CPACS/releases> (zuletzt aufgerufen: 15.09.2025).

García-López, M.; Rodríguez-Santos, C.; Martínez-Pérez, A. (2025). Grasshopper Algorithmic Modelling: Parametric Design for Product Platform Customisation. Applied Sciences, 15(11), 6243. <https://doi.org/10.3390/app15116243>

Hesse, C.; Walther, J.N.; Biedermann, J. (2023). Wissensbasierte Methodik für Rumpf- und Kabinenentwurf. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Hamburg. <https://elib.dlr.de/194485/> (zuletzt aufgerufen: 15.09.2025).

Lawson, B. (2004). What Designers Know (1. Auflage). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080481722>

Rauscher, F. (2022). Permanent aktualisierte 3D-Realgeometrie des Istar im Digitalen Zwilling. <https://doi.org/10.25967/570374>

Rutten, D. (2007). Explicit History - Grasshopper for Rhinoceros. Robert McNeel & Associates. First released September 2007. <https://www.grasshopper3d.com/> (zuletzt aufgerufen: 15.09.2025).

Sutherland, I.E. (1963). Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology. Technical Report No. 296, Lincoln Laboratory. <https://doi.org/10.1145/1461551.1461591>

Walther, J.N.; Petsch, M.; Kohlgrüber, D. (2020). Development of a Fully Automated Transport Aircraft Fuselage Modelling and Sizing Tool Using Python. AIAA Aviation Forum. <https://elib.dlr.de/116430/>

Walther, J.N.; Petsch, M.; Kohlgrüber, D. (2021). New Approaches in CPACS-based Preliminary Design of Aircraft Fuselage Structures Using Python. CEAS Aeronautical Journal. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2017-0028>

Walther, J.N.; Hesse, C.; Alder, M.; Biedermann, J.Y.C.; Nagel, B. (2022). Expansion of the cabin description within the CPACS air vehicle data schema to support detailed analyses. CEAS Aeronautical Journal, 13, 1119–1132. <https://doi.org/10.1007/s13272-022-00610-5>

Zemke, P.; Hellbrück, S.; Hesse, C.; Biedermann, J.; Fuchs, M.; Nagel, B.(2025). Erweiterung eines Wissensbasierten Entwurfssystems zur Rumpfindegration zukünftiger Frachtflugzeuge im Gesamtflugzeugentwurf.