

# Abstraktion von hochauflösenden 3D Ist-Daten in einen konsistenten und systemübergreifenden Datensatz für die Bewertung des DLR Forschungsflugzeugs ISTAR

F. Rauscher, P. Allebrodt, 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

Digitale Zwillinge von physischen Systemen müssen kontinuierlich mit Daten und Informationen versorgt werden, die den aktuellen Ist-Zustand der Flugzeuge widerspiegeln. Dabei helfen detaillierte Geometriemodelle bei der Gesamtbewertung von Flugzeugen und der Zustände. Um einen Mehrwert aus den regelmäßig erfassten hochdetaillierten geometrischen Ist-Daten zu erzielen, die nach Umbauten und Modifikationen am DLR Forschungsflugzeug ISTAR (In-flight Systems & Technology Airborne Research) durch 3D Scanner erstellt werden, gilt es diese in ein standardisiertes Format, wie dem Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS), zu abstrahieren. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der die 3D-Scan Daten, die als polygonisierte Oberflächennetze vorliegen, nahtlos in CPACS Datensätze überführt. Mit diesem grundlegenden Daten- und Parametersatz ist dann der Aufbau von Simulationsmodellen, wie Analysen der Akustik, Aeroelastik oder Aerodynamik möglich, um die existierenden Systeme jederzeit während des Betriebs evaluieren zu können.

## Keywords

Luftfahrt; 3D-Scan; Digitaler Zwilling; ISTAR; CPACS; twinstash

## 1. EINLEITUNG

Der fortschreitende Klimawandel und der gesellschaftliche Druck zu mehr Nachhaltigkeit stellen die Luftfahrtbranche vor die große Herausforderung, klimaneutraler und energieeffizienter Luftfahrtsysteme zu entwickeln. Um diesen Wandel voranzutreiben, verfolgt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) als virtueller OEM<sup>1</sup> neue Forschungsstrategien, die auf der vollständigen Digitalisierung des Lebenszyklus von Flugzeugen basieren. Dabei soll die Luftfahrt durch innovative Technologien und die Integration neuer Energiequellen, wie Brennstoffzellen, zukunftsfähig und klimafreundlich gestaltet werden [1]. Die Vision des DLR ist es, durch die Bündelung seiner Kompetenzen den gesamten End-to-End-Prozess, von der Entwicklung über den Betrieb bis hin zur Außer-Dienststellung, der Luftfahrt zu transformieren. Eine zentrale Rolle spielt dabei die vollständige digitale Durchgängigkeit, die es ermöglicht, alle Prozesse virtuell abzubilden, zu überwachen und zu optimieren.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser digitalen Transformation ist die Digitalisierung der Luftfahrt angefangen vom Entwurf, über die virtuelle Zulassung, Produktion und Wartung. Diese geht auch aus der Luftfahrtstrategie der Deutschen Bundesregierung [2] und der Helmholtz Gemeinschaft [3] hervor. Die Entwicklung des Digitalen Zwillings, ein digitales Abbild des realen

Flugzeugs, das während seines gesamten Lebenszyklus kontinuierlich mit aktuellen Daten gespeist wird, spielt dabei eine Hauptrolle. Diese virtuelle Kopie erlaubt es, Flugzeuge und deren Komponenten in Echtzeit zu analysieren, Modifikationen und Betriebszustände zu bewerten und frühzeitig Fehler zu erkennen. Besonders das hochkomplexe Gesamtsystem Flugzeug, mit seinen Komponenten wie Rumpf, Kabine, Tragflächen und Triebwerken, profitiert von der stetigen Verknüpfung physischer und digitaler Daten.

Im Rahmen des Projektes DigECAT<sup>2</sup> arbeitet das DLR an der Umsetzung des Digitalen Zwillings für das Forschungsflugzeug ISTAR<sup>3</sup>. Aufgrund der Vielzahl wissenschaftlicher Experimente, die am und mit dem ISTAR durchgeführt werden, erfolgen regelmäßig Umbauten und Anpassungen, die durch optische Messtechnik erfasst und in Form hochpräziser 3D-Daten digitalisiert werden. Die 3D-Scan Kampagnen sind nötig, um unvollständige, inkonsistente oder nicht vorhandene 3D Informationen zu generieren, die bspw. Modifikationen durch Versuchsumbauten darstellen. Diese 3D-Daten bilden die Grundlage für eine detaillierte, dreidimensionale Darstellung des Flugzeugs und ermöglichen exakte Bauraumanalysen, wie für die Planung zukünftiger Installationen und Modifikationen [4]. Jedoch stellen diese 3D-Daten nur die, durch die Sensoren sichtbaren Oberflächen in einem triangulierten Netz dar, welches nicht weiter parametrisierbar ist. Daher werden diese

<sup>1</sup> Original Equipment Manufacturer

<sup>2</sup> Digital Twin for Engine, Component and Aircraft Technology

<sup>3</sup> In-flight Systems & Technology Airborne Research

Geometrien auch als „tote“ Geometrien bezeichnet. Um jedoch einen Mehrwert aus diesen Oberflächennetzen zu ziehen und sicherzustellen, dass diese Daten im gesamten Entwicklungsprozess und während des Betriebs des Flugzeugs konsistent und kompatibel sind, müssen diese in ein standardisiertes Format, wie dem Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS), überführt werden.

Die Überführung der hochauflösenden 3D-Daten in CPACS stellt eine Herausforderung dar, da die hochauflösenden Daten die Komplexität des Flugzeugs mit allen Details widerspiegeln. Durch die Abstraktion wird sichergestellt, dass die Daten über verschiedene Disziplinen hinweg nutzbar werden und in diverse Simulations- und Analyseumgebungen integriert werden können. Dies betrifft unter anderem Fachbereiche wie der Akustik, Aeroelastik oder Aerodynamik, die von den standardisierten Darstellungen der Flugzeuggeometrie Gebrauch machen. Darüber hinaus ermöglicht die Abstraktion der Daten und eine konsistente Versionierung, Änderungen im Flugzeugdesign über den gesamten Lebenszyklus hinweg nachvollziehbar zu machen. Die digitale Plattform twinstash, die im DLR entwickelt wurde, dient dabei als zentrales System zur Verwaltung und Versionierung der Daten für den Digitalen Zwilling [5].

In dieser Arbeit wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, hochpräzise Oberflächenmodelle nahtlos und automatisiert in CPACS-Datensätze zu überführen. Durch diese Abstraktion kann der Digitale Zwilling nicht nur für Strukturanalysen und Installationsplanungen genutzt werden, sondern auch für simulationsbasierte Vorhersagemodelle, die beispielsweise die Akustik und Aerodynamik während des Flugbetriebs bewerten. Dieser Ansatz trägt wesentlich dazu bei, die Innovationszyklen in der Luftfahrt zu beschleunigen und die Risiken und Vorlaufzeiten für neue, umweltfreundliche Flugzeugkonzepte zu minimieren.

Nach einer Einführung des digitalen End-to-End Ansatzes mit der Erläuterung der Begriffe des Digitalen Fadens und des Digitalen Zwillings (Kapitel 2), erfolgt in Kapitel 3.1 eine Vorstellung in CPACS, sowie deren Struktur und Aufbau. Die Beschreibung von Flugzeugrümpfen in der CPACS Definition wird in Kapitel 3.2 dargestellt. Kapitel 4 erläutert die Hintergründe und Maßnahmen zur Vorbereitung des 3D-Oberflächenmodells, damit anschließend in Kapitel 5 die Methode zur Abstraktion beschrieben wird. Kapitel 6.1 zeigt die Ergebnisse der Abstraktion auf und analysiert diese. Um die Umbauten und Modifikationen am ISTAR abzubilden, erfolgt in Kapitel 6.2 der Versuch, den ISTAR mit installiertem Nasenmast in CPACS darzustellen. Auch der 3D-Scan der Kabinenelemente ist Bestandteil des Projektes. Eine Möglichkeit der Abstraktion dieser ist in 7 beschrieben. Da nicht immer 3D-Scan Daten vorhanden sind, werden Daten aus unterschiedlichen Quellen herangezogen, darauf geht Kapitel 8 ein. Um die Veränderungen über der Zeit zu verfolgen und die unterschiedlichen Geometriemodelle zu differenzieren, gilt

es die Datensätze zu versionieren. Die Möglichkeit zur eindeutigen Unterscheidung wird in Kapitel 9 beschrieben.

## 2. DIGITALER END-TO-END ANSATZ IN DER LUFTFAHRT

Der digitale End-to-End Ansatz in der Luftfahrt beschreibt die durchgängige Digitalisierung über den gesamten Lebenszyklus eines Flugzeugs. Er stellt einen zentralen Baustein dar, um das komplexe Gesamtsystem wirksamer zu verstehen. Dabei umfasst der Ansatz zwei Hauptkomponenten, den Digitalen Zwilling und den Digitalen Faden. Der Digitale Zwilling ist eine präzise digitale Nachbildung des physischen Systems, die Betriebsfälle, Simulationen und Optimierungen widerspiegelt. Er stellt eine ständig aktualisierte Sammlung von Daten und Modellen aus Betriebszuständen dar, die sich vom physischen Modell erfassen lassen. Dabei zeigt der Digitale Zwilling immer nur den gerade aktuellen Zustand des Flugzeugs auf. [6]

Der Digitale Faden wiederum fasst alle Daten und Informationen zusammen, die sich über alle Phasen des Lebenszyklus eines physischen Systems kumulieren. Der Digitale Faden analysiert und verknüpft dieses Wissen intelligent miteinander, um den Digitalen Zwilling zu erzeugen und kontinuierlich zu aktualisieren. Der Datenfluss erfolgt dabei bidirektional, was eine Rückkopplung der Informationen und einen Feedback-Loop ermöglicht, um Innovationen zu beschleunigen und Risiken für Unternehmen zu minimieren. [7] Ziel des Digitalen Fadens ist es, eine reibungslose Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachabteilungen zu fördern, um die komplexen, interdisziplinären Eigenschaften des Flugzeugentwurfs zu beherrschen. Hierfür werden geeignete Schnittstellen, wie das Luftfahrzeug-Datenschema CPACS, genutzt, das Wissen aus verschiedenen Disziplinen wie dem Vorentwurf, der Strukturanalyse oder der Kabinenkonstruktion sammelt und verteilt [8]. So wird die digitale Konsistenz aller erfassten Daten sichergestellt, und dem Digitalen Zwilling steht stets die aktuellste Version zur Verfügung.

## 3. STANDARDISIERTES DATEN AUSTAUSCHFORMAT

Als standardisiertes Austauschformat wird ein Format bezeichnet, welches es Wissenschaftlern und Ingenieuren ermöglicht Informationen zwischen verschiedenen Fachbereichen und deren spezifischen Anwendungen auszutauschen. Im DLR wird dazu das Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) verwendet, welches seit 2005 ständig weiterentwickelt wird [9].

### 3.1. Einführung in das CPACS-Datenschema

CPACS ermöglicht als datenzentrisches Modell die Speicherung beliebiger Daten, die über die Flugzeuggeometrie hinaus gehen. Dabei werden die Informationen, die das Luftfahrzeug beschreiben sowie weitere Aspekte der Flugzeugkonfiguration, in einem hierarchisch strukturierten XML<sup>4</sup>-Datensatz gespeichert.

<sup>4</sup> eXtensible Markup Language

Ein Ausschnitt der XML-Struktur ist in BILD 1 zu sehen. Diese sind so konzipiert, dass sie Schrittweise befüllt werden können und neben Disziplinen des Flugzeugdesigns auch verschiedene Genauigkeitsstufen unterstützen. Das ermöglicht unterschiedlichen Disziplinen der Flugzeugentwicklung, wie der Strukturmechanik, Aerodynamik oder Flugmechanik, auf Basis eines vollumfänglichen Datenmodell zu arbeiten [9][10][11][12].

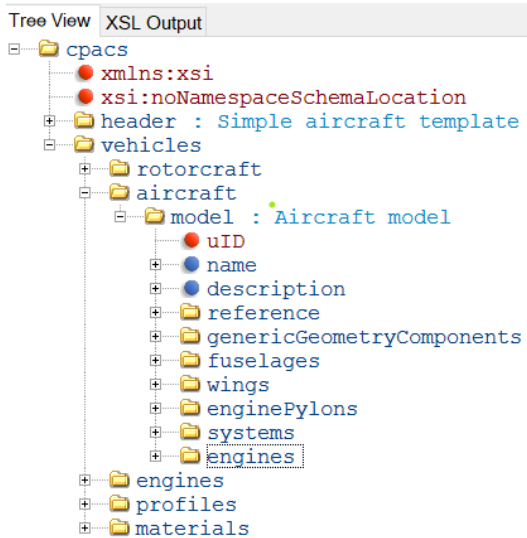


BILD 1. Beispiel einer CPACS XML-Struktur anhand der Vorlagedatei *simpleAircraft.xml* [10]

Zur visuellen Betrachtung der geometrischen Informationen aus den XML-Dateien dient die externe Geometriebibliothek TiGL [13]. Sie bietet einen umfangreichen Satz von Funktionen zur Erstellung von Rumpf, Tragflächen und Triebwerken [11]. Einen wissenschaftlichen Ansatz zur Initialisierung von Kabinenkomponenten innerhalb der Rumpfsektionen, stellt das Werkzeug FUGA (Fuselage Geometry Assembler) dar [14][15]. Dabei werden konsistente Geometriemodelle erstellt, die auf die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Disziplinen, vom Vorentwurf bis zur Industrialisierung, zugeschnitten sind.

### 3.2. Beschreibung von Rumpfsegmenten in CPACS Datensätzen

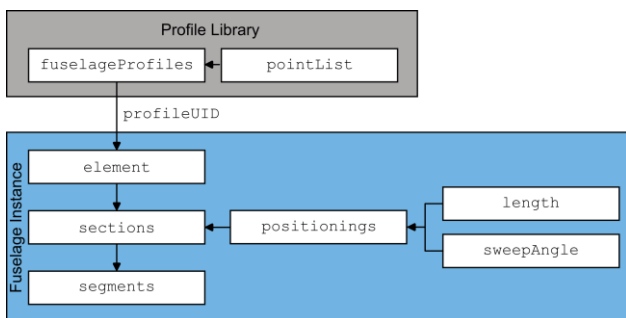


BILD 2. Prinzipielle Struktur der Rumpfbeschreibung in CPACS

Die Beschreibung der Rumpfsegmente innerhalb von CPACS erfolgt in zwei Bereichen, wie es in BILD 2 zu sehen

ist. Um Duplikationen zu vermeiden, werden die Profile in einer Art Bibliothek außerhalb der eigentlichen Flugzeugbeschreibung im *aircraft*-Knoten definiert. Diese Bibliothek beinhaltet alle für die Beschreibung des Flugzeugs in CPACS nötigen Profile.

Für den Rumpfbereich erfolgt die Eintragung der Profile im Knoten *fuselageProfiles* anhand einer Punkteliste in y- und z-Koordinaten. Durch einen eindeutigen Bezeichner (*uID*<sup>5</sup>) können die Profile für die Rumpfbeschreibung beliebig oft referenziert werden. Ein Beispiel für ein Rumpfprofil ist in BILD 3 gezeigt.

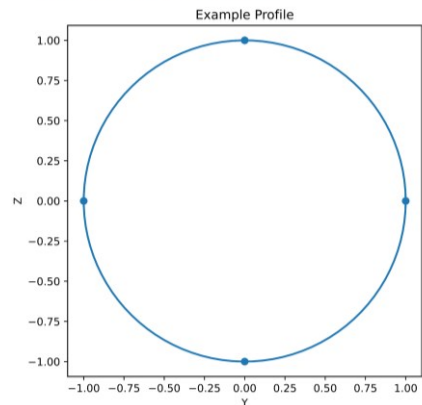
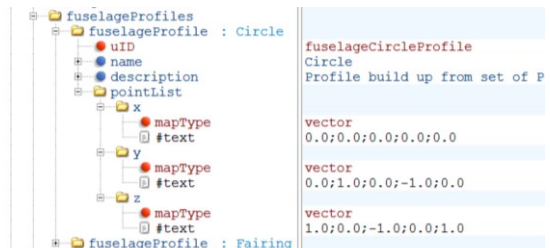


BILD 3. Rumpfprofil aus der CPACS Vorlage Datei *simpleAircraft.xml* [10]

Die so erstellten Profile werden im *fuselage*-Knoten in *elements* transformiert und skaliert. So entstehen *sections*, welche die Querschnitte des Rumpfes darstellen, die über eine Positionierung eine zusätzliche Verschiebung erhalten. Über den Winkel *sweepAngle* erfolgt eine Orientierung des Profils und über den Vektor *length* werden die Sektionen entlang der positiven y-Achse verschoben, wobei die Verschiebung zwischen den Parametern *fromSectionUID* hin zur *toSectionUID* erfolgt.

Die anschließende Beschreibung des Rumpfsegments erfolgt in der Transformation im *segment*-Knoten, wobei hier durch die *from*- und *toElementUID* definiert wird, zwischen welchen Elementen das Segment aufgespannt wird.

## 4. VORBEREITUNG DER 3D OBERFLÄCHENNETZE

Die Erfassung und Aufbereitung von 3D Scandaten wird von Rauscher et.al in [4] hinreichend erläutert. Dabei wird der Fokus auf die Aufbereitung der Daten zu

<sup>5</sup> Unique Identifier

polygonisierten Oberflächenmodellen beschrieben, welche sich für Visualisierungen und zur Bauraumbestimmung eignen. Zur Überführung der hochauflösenden 3D-Daten in das standardisierte CPACS Format gilt es jedoch noch einige Anpassungen an dem Oberflächenmodell vorzunehmen. Wie in BILD 1 zu erkennen, erfolgt die Beschreibung des Flugzeugs entlang verschiedener Bereiche. So wird das Modell zunächst wie in BILD 4 gezeigt in einzelne Bereiche, wie den Rumpf, der Tragflächen, Triebwerke, Höhen- und Seitenleitwerk und dem Fahrwerk zerlegt.

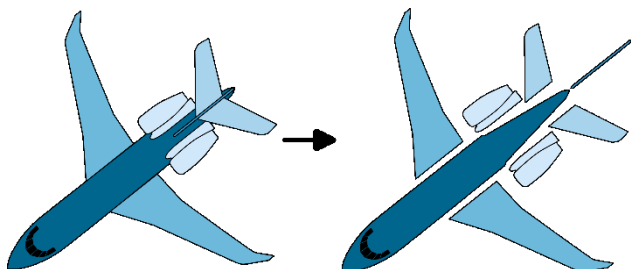


BILD 4. Zerlegung des Flugzeugs in einzelne Bereiche

In dieser Arbeit wird der Prozess beispielsweise anhand des Rumpfes beschrieben, sodass hierauf der Fokus in der weiteren Ausarbeitung liegt. Für die Tests des Algorithmus werden 3D-Scan Aufnahmen von November 2022 verwendet, wie sie in BILD 5 a) zu sehen sind. Durch Fensterscheiben und offene Fahrwerksschächte entstehen Messpunkte im Inneren des Rumpfes. Da im Folgenden nur die äußere Kontur des Rumpfes benötigt wird, gilt es in einem weiteren vorbereitenden Arbeitsschritt das Modell zu bereinigen und diese Messpunkte mit den Netzfragmenten zu löschen. Dieser Arbeitsschritt ist exemplarisch an den Fenstern des Cockpits gezeigt. Der Laserstrahl des 3D-Scanners kann tief in das Cockpit und in die Kabine des Flugzeugs eindringen, wodurch es zu Fehlern bei der Ausgabe kommt. Des Weiteren wurden die Bereiche der Fenster der Kabine, beim vorderen Fahrwerksschacht und die Anschlussstellen von Tragflächen, Triebwerken und Seitenleitwerk bereinigt, sodass die äußere Hülle des Rumpfes zur Abstraktion bereitsteht.



BILD 5. Rumpfaufnahmen des ISTAR vom November 2022

## 5. METHODISCHER ANSATZ DER ABSTRAKTION VON SCAN-DATEN IN EINEN CPACS DATENSATZ

CPACS wurde für den interdisziplinären Austausch von Produktdaten im Flugzeugvorentwurf entwickelt, erweist

sich aber auch mit der Möglichkeit von weiterführenden Analysen und zur Verifizierung von bestehen Flugzeugen als sinnvoll. Dazu können die CPACS-Datensätze aus unterschiedlichen Datenquellen, wie CAD-Modelle oder 3D-Scan Daten, erstellt und hier zusammengefügt werden. Ein erster Ansatz mit dem Erstellen von CPACS Datensätzen aus CAD- und Scan-Daten erfolgte in Rauscher et al. [4], wobei es sich bei den Scan-Daten hauptsächlich um das Einfügen der hochdetaillierten Oberflächenmodelle in die Kabine des ISTARs handelt.

Wie bereits in Abschnitt 3.1 ausgeführt, werden Flugzeuge mittels einer hierarchischen Datenstruktur in CPACS beschrieben. Dabei sind im Datenschema Knoten definiert, in denen Daten oder Parameter abgelegt werden können. Grundlage zur detaillierten Überführung eines Luftfahrzeugs in das CPACS-Schema bildet die parametrische Erfassung der Außengeometrie. Dazu wird der Rumpf, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, in CPACS mittels Profile definiert, die die äußere Form wiedergeben. Um diese Profile zu bestimmen, wurde ein Programm in Python erstellt, das die Koordinaten der Profilpunkte ermittelt und diese in das CPACS Schema überführt. Um die maximalen Abmaße des Rumpfes zu bestimmen, wird zunächst eine Begrenzungsbox um diesen gelegt, wie es in BILD 6 a) zu sehen ist. Mit Hilfe dieser Informationen werden der Anfangspunkt  $minX_{bbox}$  und Endpunkt  $maxX_{bbox}$  des Rumpfes bestimmt, die für die Positionierung und Verteilung der Schnittebenen benötigt werden. Mittels eines Operators werden die zuvor definierte Anzahl  $n$  an Schnittebenen gleichmäßig im Bereich der Begrenzungsbox verteilt. Um an der Nasenspitze und am Heck des Flugzeugs als Schnittstelle nicht nur einem Punkt zu erhalten, beginnen und enden die Ebene innerhalb der Box mit geringen Abständen unter Berücksichtigung kleiner Toleranzen zu  $minX_{bbox}$  und  $maxX_{bbox}$ . In BILD 6 b) sind die Schnittebenen exemplarisch mit einer Anzahl von  $n = 60$  dargestellt.

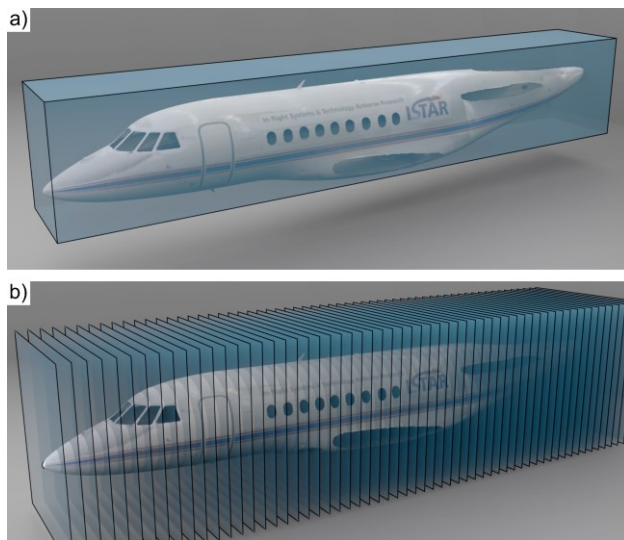


BILD 6. Der Rumpf des ISTARs mit a) der Begrenzungsbox und b) der Darstellung der Schnittebenen

Das Ergebnis der 3D-Scans ist ein polygonisiertes Oberflächennetz, bei dem die Messpunkte durch Linien miteinander verbunden sind und die so eingeschlossenen Bereiche durch eine ebene Fläche gefüllt ist.

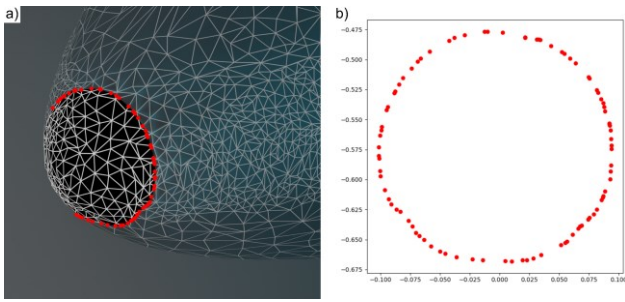


BILD 7. a) Oberflächennetz mit erster Schnittebene und den Schnittpunkten; b) extrahierte Schnittpunkte des ersten Profils

Mittels einer Schnittmengen Funktion werden nun an jeder Ebene Schnittpunkte bestimmt - an den Stellen, an denen sich die Linien mit der Schnittebene schneiden, wie es in BILD 7 a) mit den rot hervorgehobenen Punkten zu sehen ist. Die Koordinaten dieser Punkte werden in eine Liste herausgeschrieben. Aufgrund dieses Vorgehens befinden sich in jedem Schnittprofil eine unterschiedliche Anzahl an Punkten wieder. Zudem sind die Punkte innerhalb der Listen in einer unstrukturierten Reihenfolge angeordnet. Diese zwei Begebenheiten führen zu Problemen in der CPACS Definition, die zur Interpolation der Rumpfgeometrie zwischen den Sektionen eine gleiche Anzahl an Punkten in jedem Profil, sowie eine bestimmte Reihenfolge dieser vorsieht. Daher erfolgt eine Re-Parametrisierung der Punkte, sowie die geordnete und gleichmäßige Verteilung der Punkte auf dem Profil.

Die Sortierung der Punkte erfolgt durch eine Winkelbestimmung, wie sie in BILD 8 zu sehen ist. Dabei wird der Winkel zwischen der z-Achse und dem Vektor zum Punkt hin bestimmt und so sortiert, dass die Punktlisten, gemäß CPACS-Definition [16], unten beginnen und dann gegen den Uhrzeigersinn herum ansteigen. Um für jedes Profil eine gleiche Anzahl an Punkten zu erstellen, wird eine B-Spline Kurve durch die Schnittpunkte gelegt und eine zuvor definierte Anzahl an Punkten über die Kurve gleichmäßig verteilt. B-Spline Kurven eignen sich zur Erzeugung glatter Kurven, wobei sie durch eine Reihe von Kontrollpunkten beeinflusst und gesteuert werden können. In BILD 9 sind die gleichmäßig verteilten Punkte im ersten Profil an der Nase des Flugzeugs als Kreuze zu sehen. Dieser Vorgang wird über alle Profile des Rumpfes vorgeführt, sodass anschließend eine Beschreibung dieser in Punkten vorliegt.

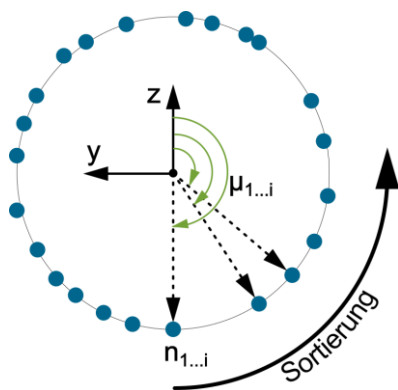


BILD 8. Sortierung der Profilpunkte anhand einer Winkelbestimmung

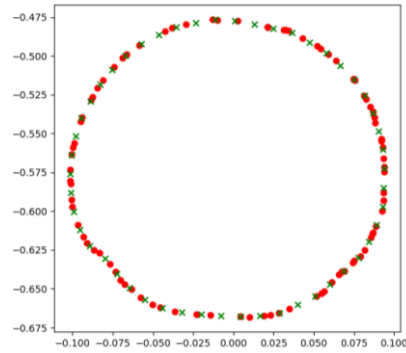


BILD 9. Darstellung der unsortierten und ungleichmäßig verteilten Profilpunkte (rote Punkte), sowie der sortierten und gleichmäßig verteilten Profilpunkte (grüne Kreuze).

Abschließend erfolgt das Generieren eines CPACS Datensatzes aus den Profildaten. Dazu werden die Informationen der Punkte in die dafür definierten Knoten im CPACS Datenschema überführt.

## 6. ERGEBNISSE UND ANALYSE DER TRANSFORMATION VON OBERFLÄCHENNETZEN IN CPACS-DATENSÄTZE

Die Ergebnisse der Abstraktion werden in einer, dem CPACS-Schema konformen, XML-Datei ausgegeben. Eine Betrachtung des so generierten Datensatzes kann in der in Abschnitt 3.1 genannten Geometriebibliothek TiGL erfolgen, welches sich auch als Kontrolle der erzeugten Daten eignet.

### 6.1. Analyse der durch das Abstraktionsverfahren erstellten CPACS-Datensätze

Im Folgenden werden die 3D-Daten aus der Scan Kampagne von November 2022 verwendet, welche nach dem in Abschnitt 5 beschriebenen Verfahren zu einem CPACS-Datensatz konvertiert werden. BILD 10 a) zeigt die Rumpfstruktur, wobei der CPACS-Datensatz durch 60 Profile beschrieben wird. In der Betrachtung des Datensatz im TiGL-Viewer sind Verzerrungen im Rumpf zu erkennen. Bei einem Soll-Ist-Vergleich, bei dem der CPACS-Datensatz mit den 3D-Scandaten verglichen wird (BILD 10 b)) sind in rot und blau deutlichere Unterschiede zu erkennen.

In einem weiteren Vorgang, wurde ein CPACS-Datensatz mit mehr Profilebenen erzeugt, um die Detailgenauigkeit zu untersuchen. BILD 11 a) zeigt einen CPACS-Datensatz im TiGL-Viewer mit 200 Schnittebenen und den daraus resultierenden Profilen. Auch hier sind Verzerrungen in der Oberfläche der Rumpfstruktur zu erkennen. BILD 11 b) zeigt wiederum einen Soll-Ist-Vergleich zwischen dem Resultat aus dem CPACS-Datensatz und den Daten aus dem 3D-Scan. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen geringer werden, jedoch in selben Bereichen stattfinden.

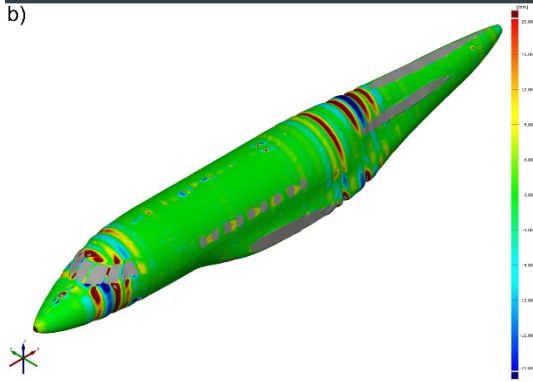
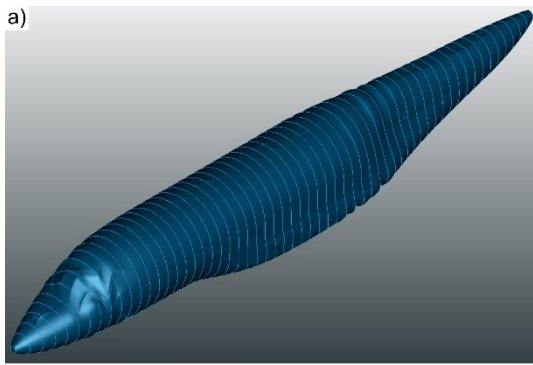


BILD 10. Abstrahiertes 3D-Modell aus dem CPACS-Datensatz von der 3D-Scan Kampagne im November 2022 mit 60 Schnittebenen; a) Darstellung im TiGL-Viewer; b) Abweichungsvergleich CPACS-Datensatz zu 3D-Scandaten

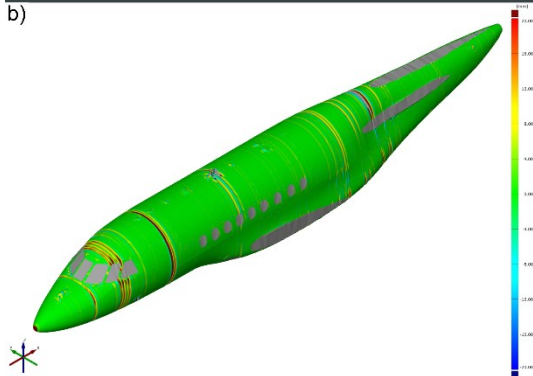
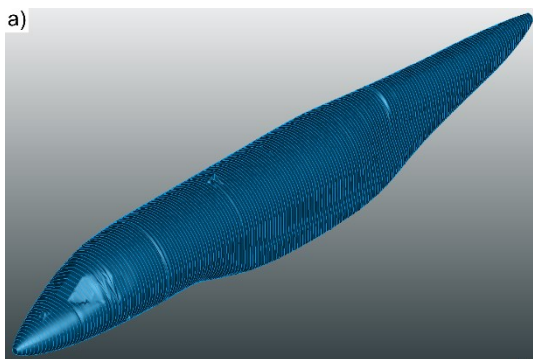


BILD 11. Abstrahiertes 3D-Modell aus dem CPACS-Datensatz von der 3D-Scan Kampagne im November 2022 mit 200 Schnittebenen; a) Darstellung im TiGL-Viewer; b) Abweichungsvergleich CPACS-Datensatz zu 3D-Scandaten

Eine genauere Betrachtung der Bereiche mit Deformationen zeigt die Gründe für diese Verzerrungen auf. Außen am Rumpf angebrachte Sensoren und Antennen führen zu Profilpunkten auf den Schnittebenen, die beim Zusammensetzen des Rumpfsegments und dem Verbinden der Punkte zu Unregelmäßigkeiten führen. In BILD 12 a) ist eine Detailansicht aus dem Bereich des Cockpits zu sehen. Das grau gehaltene Oberflächenmodell, welches aus den Daten des 3D-Scans resultiert, zeigt die Herkunft der Deformationen auf. Die Linien zeigen, wie die einzelnen Punkte der Profile miteinander verbunden sind. Dort ist zu erkennen, dass der Einfluss einzelner Punkte die vom Rumpf abstehen, sich um den gesamten Querschnitt des Segments fortziehen. BILD 12 b) zeigt dieselben Detailansichten im hinteren Bereich des ISTARs, wo die einzelnen Punkte des Profils, welche die Antenne beschreiben, zu starken Verzerrungen über den gesamten Querschnitt des Rumpfes ziehen.

Diese Deformationen beruhen auf der Annahme von CPACS, dass die Liste der Punkte zu einer B-Spline Kurve interpoliert wird. Diese hat die Eigenschaft, eine kontinuierliche und fortlaufende Kurve durch die Punkte zu legen. Jedoch besteht innerhalb der CPACS-Definition die Möglichkeit, einzelne Punkte als Knick-Punkte zu definieren, an denen die Stetigkeit der Kurve unterbrochen wird [10]. Hier wird weiter untersucht, wie die Definition der Knick-Punkte in das Abstraktionsverfahren integriert werden kann, so dass die Verzerrungen ausbleiben. Auch eine Glättung der Kurven, vor dem Überschreiben der Punktkoordinaten in das CPACS-Format, könnte eine Besserung der Oberflächenverzerrungen hervorrufen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Sensoren und Antennen vom Rumpf zu trennen und außerhalb der Rumpfbeschreibung in CPACS anzugeben. Da die Integration der Sensoren noch Stand der Untersuchungen ist, werden zunächst Sensoren und Antennen als Teil des Rumpfes betrachtet.

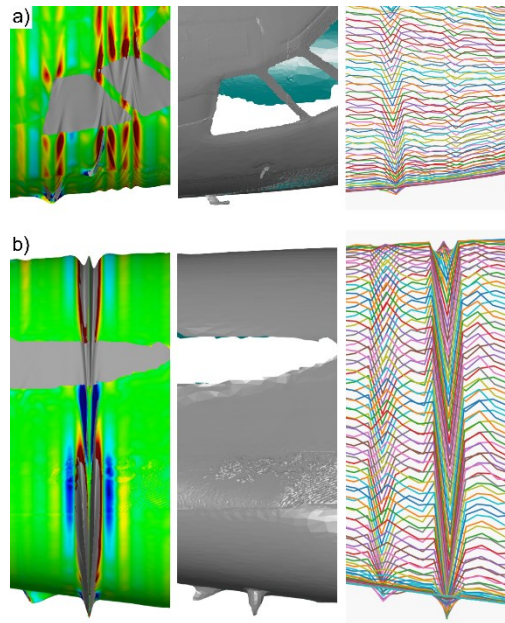


BILD 12. Detailansichten mit Deformationen in der CPACS-Ansicht im Vergleich zu den 3D Scandaten, a) im Bereich des Cockpits aufgrund von Sensoren; b) im hinteren Bereich durch Antennen

## 6.2. Automatisiertes Abbilden von Modifikationen an dem ISTAR

Im Rahmen des Projektes DigECAT gilt es die Modifikationen am ISTAR drei-dimensional zu erfassen und aufzubereiten. So wurden während der Projektlaufzeit mehrere Scan-Kampagnen vor Ort in Braunschweig durchgeführt. All diese 3D-Aufnahmen sollen mittels dem im Abschnitt 5 vorgestellten Verfahren in einen CPACS-Datensatz übertragen werden. Dazu wird neben den Aufnahmen vom November 2022, eine Aufnahme aus dem Mai 2022 herangezogen, die den ISTAR mit einem Nasenmast zeigt, der zu diesem Zeitpunkt installiert war. BILD 13 zeigt, dass auch der Nasenmast aus den Scan-Daten mit in den CPACS-Datensatz überführt wurde und so diese Modifikationen widerspiegeln kann.

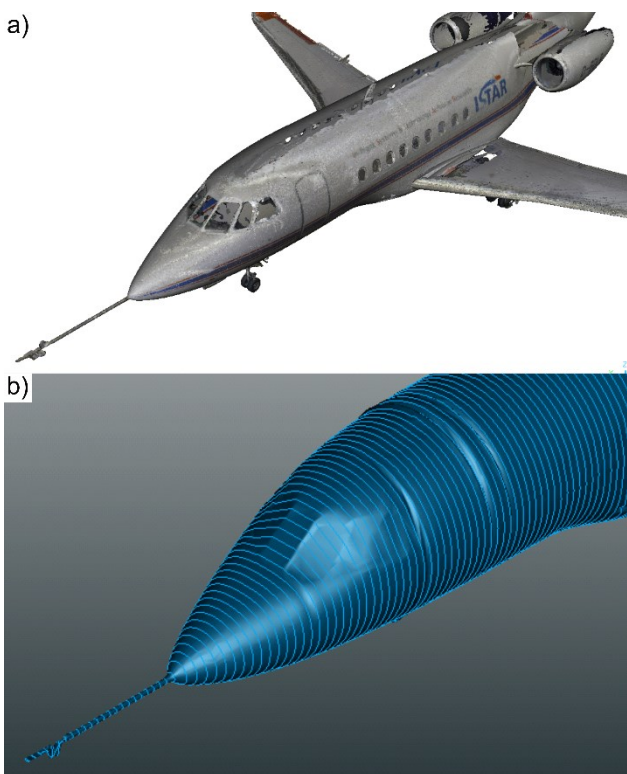


BILD 13. CPACS-Datensatz der ISTAR Scan-Kampagne vom Mai 2022

## 7. ABSTRAKTION UND DATENREDUKTION VON KABINENELEMENTEN IM CPACS-DATENSHEMA

Neben den Aufnahmen des Äußeren des ISTARs erfolgen auch 3D-Aufnahmen aus der Kabine, um die Modifikationen in dieser zu dokumentieren und nachzuverfolgen. Wie in Rauscher et al. [4] beschrieben, ermöglicht CPACS mit der Kabineninstanz 3D-Modelle von Kabinenelementen mittels einer Verlinkung zu integrieren. Dies erfolgt in über den Knoten `genericGeometryComponent`. Jedoch sind diese hochdetaillierten Daten für viele Anwendungen zu nicht geeignet, bzw. nicht nötig. Beispielsweise sind für Analysen der Raumaufteilung oder Crashesimulationen Daten mit einem geringeren Fidelitätsgrad ausreichend [14]. Dazu werden, wie in BILD 14 b) am Beispiel des Sitzes

gezeigt, die detaillierten Modelle durch Begrenzungsboxen oder Massenpunkte ersetzt. Auf diese Weise lassen sich auch die hochgenauen Oberflächennetze der Kabinenelemente abstrahieren und so ein Mehrwert aus den Geometrien ziehen.

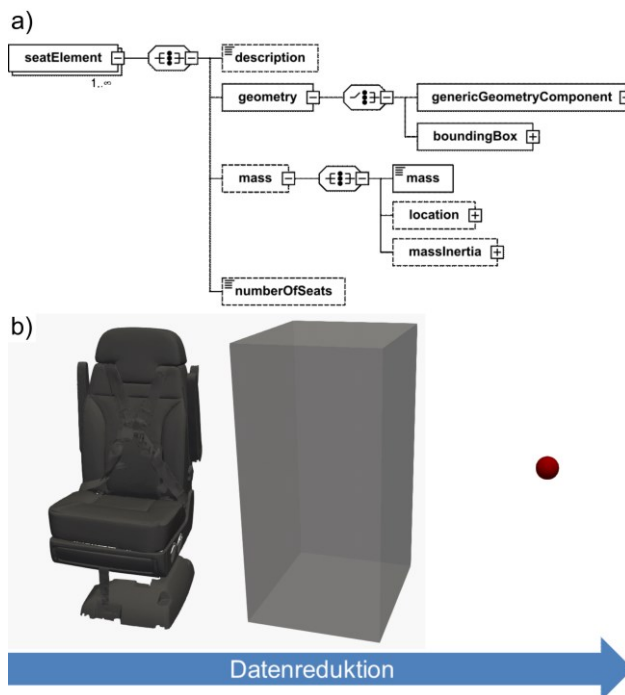


BILD 14. Abstraktion von Kabinenelementen, a) Auszug aus dem `deckElements`-Knoten am Beispiel eines Sitzes; b) Datenreduktion eines Sitzelements als detailliertes 3D-Modell, Begrenzungsbox und Massenschwerpunkt

## 8. VERKNÜPFEN VON CPACS DATENSÄTZEN UNTERSCHIEDLICHER QUELLEN

Bis zu diesem Zeitpunkt ist lediglich der Rumpf des ISTARs aus 3D-Scan Daten zu einem CPACS-Datensatz konvertiert. Um jedoch ein komplettes Abbild des ISTARs zu generieren, können auch die schon bestehenden Daten, abgeleitet von einem CAD-Modell, in den CPACS-Datensatz überführt werden. In BILD 15 wird ein Datensatz gezeigt, bei dem die Profilinformationen für den Rumpf aus den 3D-Scan Daten generiert sind. Die Informationen für Tragflächen, Höhen- und Seitenleitwerk sowie Triebwerke sind aus einem Datensatz herangezogen worden, der aus CAD-Daten erstellt ist [4]. In Zukunft wird das Abstraktionsverfahren auch auf diese Bereiche angewendet. Jedoch ermöglicht der 3D-Scanner nur die Oberflächen zu erfassen, die sichtbar sind. Die geometrischen Formen von verdeckten Elementen, wie beispielsweise Spante und Holme, können nicht aufgenommen werden. Um diese jedoch auch in CPACS abzubilden, wird auf CAD-Daten zurückgegriffen und so

eine Kopplung aus Informationen beider Quellen entstehen.

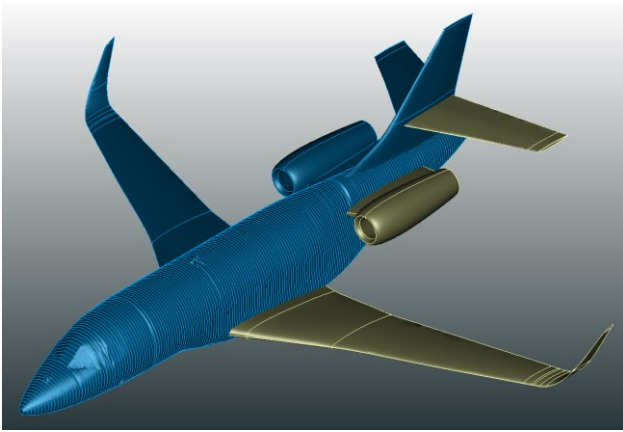


BILD 15. Ein CPACS-Datensatz bestehend aus Ableitungen aus 3D-Scan Daten und CAD-Daten

## 9. VERSIONIERUNG DER DATENSÄTZE AUF TWINSTASH

Da der ISTAR im Laufe seiner Einsatzzeit ständigen Modifikationen und Veränderungen unterliegt, gibt es verschiedene 3D-Aufnahmen der Außenhülle, aber auch der Kabine. Um die, wie zuvor beschrieben, generierten CPACS-Datensätze eindeutig zu Versionieren, kann eine Differenzierung im Datenkopf der xml-Datei unter dem Knoten `version`, sowie eine Beschreibung unter dem Knoten `description` erfolgen, wie es in BILD 16 dargestellt ist.

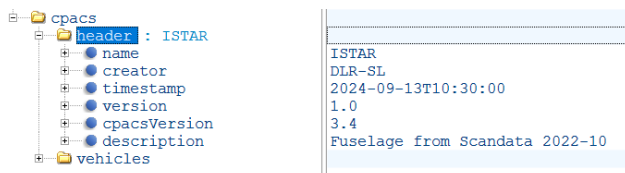


BILD 16. Versionsangabe in Datenkopf der CPACS-Datei

Eine eindeutigere Versionierung und Ablage der Datensätze erfolgt in der vom DLR entwickelten Digitale Zwillingplattform `twinstash` (digital Twin storage and application service hub). `Twinstash` bildet die Grundlage für Digitale Zwillinge der DLR-Forschungsflugzeuge und unterstützt den Upload, Download und die Suche nach Flugzeugsensordaten und Metadaten [5]. Hier können die Datensätze durch eine beliebige Anzahl an Informationen beschrieben werden, wie zum Beispiel das Aufnahme datum der 3D-Scans, Projektnamen zu den Umbauten oder besondere Konfigurationen am Flugzeug. Einem jeden Datensatz können eine beliebige Anzahl an

Informationen, sogenannte `user_tags` hinzugefügt werden, wodurch sie sich eindeutig identifizieren lassen.

## 10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die hochdetaillierte Oberflächennetze, wie sie durch 3D-Scan Kampagnen entstehen, automatisiert in einen konsistenten Datensatz überführt. Triangulierte Oberflächennetze dienen nur der Betrachtung und Visualisierung, eine Parametrisierung dieser ist nicht möglich, wodurch sie auch als „tote“ Geometrien beschrieben werden können. Um einen Mehrwert aus diesen Daten zu generieren, ist das Umwandeln in einen parametrisierbaren Datensatz nötig. Für diesen Datensatz wird das im DLR verbreitete Austauschformat CPACS verwendet. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Beschreibung des ISTAR Rumpfes, da dort die ersten Umbauten durch das Anbringen eines Nasenmast stattfanden. CPACS sieht die Beschreibung eines Rumpfes durch Profile vor, die den Querschnitt darstellen. Dazu wurde eine Methode vorgestellt, die die Rumpfprofile durch Schnittebenen ermittelt und automatisiert in das CPACS-Format überführt. Die Ergebnisse des Verfahrens werden hinsichtlich ihrer Genauigkeit analysiert und Fehlerquellen identifiziert, die es gilt, in nachfolgenden Arbeiten zu minimieren. Neben der Erfassung des Flugzeugrumpfes durch die 3D-Scanner, werden auch die Modifikationen und Umbauten in der ISTAR-Kabine digitalisiert. Auch die Informationen sollen in das CPACS-Datenformat integriert werden. Dazu wird die Möglichkeit der Datenreduktion von Kabinenelementen innerhalb des CPACS-Schemas beschrieben.

Das beschriebene Verfahren soll auf die weiteren Bereiche des ISTARs, wie Tragflächen, Höhen- und Seitenleitwerk sowie den Triebwerken, erweitert werden, um auch Modifikationen an diesen Elementen, wie künstliche Vereisung, in das CPACS-Format zu überführen. Dazu soll aus den regelmäßig aktualisierten Realgeometriedaten mit der vorgestellten Methode automatisiert eine CPACS-Datei erstellt werden. Diese Datensätze gilt es mit weiteren Strukturinformationen, die für die Simulationen notwendig sind, aus anderen Quellen, wie CAD-Modellen, zu ergänzen. Auch die Kabineninformationen müssen einem gemeinsamen Datensatz hinzugefügt werden. So kann für jede ISTAR Konfiguration eine CPACS-Datei für die Digitale Zwillinge Plattform `twinstash` zur Verfügung gestellt werden.

Diese so generierten Datensätze können, dann z.B. als Ausgangspunkt für den Auslegeprozess in FUGA [14] betrachtet werden, um neue Kabinenvarianten abzuleiten. Insgesamt kann in CPACS Datenschema weit mehr Wissen als die Geometrie, Material und Massen eines Flugzeugs eingetragen werden. Auch Informationen zu bspw. Airline, Flotte, Flüge oder Analysen können in dem Datenschema integriert werden. Durch die Verknüpfung all dieser Daten und Wissen, aus Sensoren und Simulationen, wird es zu einem Beispiel des digitalen End-to-End Prozess in der Luftfahrt und es wird gezeigt, dass sich das CPACS-Schema nicht nur für den Vorentwurf neuer Luftfahrtsysteme eignet, sondern auch zur Verifikation und Validierung sich in Betrieb befindlichen Flugzeugen beiträgt.



## Referenzen

- [1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Programmstrategie Luftfahrt. Auf dem Weg zu einer Emissionsfreien Luftfahrt – Luftfahrtstrategie des DLR zum European Green Deal, <https://event.dlr.de/downloads/ila22/de/auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt.pdf> (abgerufen September 2024)
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Die Luftfahrtstrategie der Bundesregierung*, 2014, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/luftfahrtstrategie-der-bundesregierung.html>
- [3] Helmholtz-Gemeinschaft. *Die Luftfahrt von morgen gestalten – Das Programm Luftfahrt*, August 2020, <https://www.helmholtz.de/forschung/luftfahrt-raumfahrt-und-verkehr/luftfahrt/>.
- [4] Rauscher, F.; Allebrodt, P.; Biedermann, J.; Pätzold, C.; Meller, F.; Nagel, B.: Permanent aktualisierte 3D-Realgeometrie des ISTAR im Digitalen Zwilling. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilientahl-Oberth e.V. (2023). <https://doi.org/10.25967/570374>
- [5] Haufe, S., Bäßler, M., Pätzold, C., Tchorzewski, M., Meyer, H., Arts, E., Kamtsiuris, A., Digital Twins Storage and Application Service Hub (TWINSTASH). In Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022, Sept. 2022, Dresden. doi: [10.25967/570104](https://doi.org/10.25967/570104)
- [6] Schleich, B.; Anwer, N. et al. *Shaping the digital twin for design and production engineering*. In CIRP Annals, Nr. 66. 2017
- [7] Fuchs, M., Beckert, F., Biedermann, J., Nagel, B.: *Experience of Conceptual Designs and System Interactions for the Aircraft Cabin in Virtual Reality*. In: AIAA Aviation 2021 Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA AVIATION 2021 Forum, 02. - 06. August 2021, Virtual Event. doi: [10.2514/6.2021-2773](https://doi.org/10.2514/6.2021-2773).
- [8] Walther, J.-N., Hesse, C., Alder, M. et al. Expansion of the cabin description within the CPACS air vehicle data schema to support detailed analyses. *CEAS Aeronautical Journal* (2022). <https://doi.org/10.1007/s13272-022-00610-5>
- [9] M. Alder, E. Moerland, J. Jepsen and B. Nagel. *Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS*. Aerospace Europe Conference 2020, Bordeaux, France, 2020.
- [10] DLR Institute for System Architectures in Aeronautics. CPACS Website. (2022). <http://cpacs.de>
- [11] Walther, J.-N., Hesse, C., Biedermann, J., Nagel, B. *High Fidelity Digital Cabin Mock-Up based on Preliminary Aircraft Design Data for Virtual Reality Applications and Beyond*. AIAA Aviation Forum and Exposition, 2.-6. Aug. 2021, Washington, D.C., USA. doi: [10.2514/6.2021-2775](https://doi.org/10.2514/6.2021-2775)
- [12] Hesse, C.; Walther, J.-N.; Allebrodt, P.; Wandel, M.: (2021) *Integration of multi-physics analysis into the cabin design process using virtual reality*. AIAA Aviation Forum and Exposition, 2.-6. Aug. 2021, Washington, D.C., USA. doi: [10.2514/6.2021-2776](https://doi.org/10.2514/6.2021-2776)
- [13] Siggel, M., Kleinert, J., Stollenwerk, T. et al.: *TiGL: An Open Source Computational Geometry Library for Parametric Aircraft Design*, Math.Comput.Sci. (2019). <https://doi.org/10.1007/s11786-019-00401-y>
- [14] Walther, J.-N., Hesse, C., Biedermann, J., Nagel, B., *Extensible Aircraft Fuselage Model Generation for a Multidisciplinary, Multi-Fidelity Context*. 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Series (ICAS 2022), Stockholm, Sweden, 4.-9. Sept. 2022, [https://icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2022\\_preliminary/data/papers/ICAS2022\\_0254\\_paper.pdf](https://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2022_preliminary/data/papers/ICAS2022_0254_paper.pdf), 2022
- [15] Walter, J.-N.: *Knowledge-based Engineering to provide Aircraft Fuselage Design Details for Multidisciplinary and Multifidelity Analysis Model Generation*. Dissertation. Technische Universität Berlin, 2024, doi: <https://doi.org/10.14279/depositonce-20898>
- [16] DLR Institute for System Architectures in Aeronautics. CPACS Definition V3.5 [https://dlr-sl.github.io/cpacs-website/documentation/CPACS\\_3\\_5\\_0\\_Docs/html/c0ba9e4f-907d-6cd2-42c4-d4ed9179a9dd.htm](https://dlr-sl.github.io/cpacs-website/documentation/CPACS_3_5_0_Docs/html/c0ba9e4f-907d-6cd2-42c4-d4ed9179a9dd.htm) (abgerufen 09.2023)

## Kontaktadresse:

Fiete.Rauscher@dlr.de