

# INTEGRATION VON 3D REALGEOMETRIEDATEN IM VIRTUELLEN ZWILLING DES HYDROGEN AVIATION LAB

F. Rauscher<sup>a</sup>, M. Fuchs<sup>a</sup>, K. Ebel<sup>b</sup>, S. Beckmann<sup>b</sup>, R. Schmied-Kowarzik<sup>b</sup>, J. Biedermann<sup>a</sup>,  
F. Meller<sup>a</sup>, R. Rodeck<sup>b</sup>, B. Nagel<sup>a</sup>, G. Wende<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Instandhaltung und Modifikation, Hein-Saß-Weg 22, 21129 Hamburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Im Projekt Hydrogen Aviation Lab wird ein Wasserstoff Bodendemonstrator entwickelt, der die Bodenprozesse für Wasserstoff betriebene Flugzeuge erforschen soll. Neben dem physischen Demonstrator, einem modifizierten Airbus A320-200, wird eine virtuelle Versuchsplattform erstellt, der zur Systemauslegung dient und den realen Demonstrator durch die Erforschung neuer Prozesse digital erweitert. Dazu erfassen hochgenaue 3D Scanner den realen Demonstrator mit all seinen Details und digitalisieren diesen. Die Messungen dienen neben Bauraumdefinitionen für den Entwurf der einzelnen Systeme, auch als detaillierte Grundlage für die virtuellen Zwillinge.

## Keywords

Luftfahrt; Hydrogen Aviation Lab; virtuelles Abbild; 3D-Scan; Digitalisierung; Flüssigwasserstoff

## 1. EINLEITUNG

Durch den fortschreitenden Klimawandel und den damit verbundenen Gefahren für Gesellschaft und Umwelt, werden durch die Politik Ziele gesetzt, um diesen auf zu halten, bzw. seine Effekte zu minimieren. So hat sich die Weltgemeinschaft auf der Pariser Klimakonferenz 2015 verpflichtet, die Erderwärmung auf möglichst unter 1,5 °C zu begrenzen. Dieses Ziel im Hintergrund, strebt die Bundesregierung im Klimaschutzgesetz sogar die Klimaneutralität bis 2045 an [1]. Auch die Luftfahrtbranche hat hier ihren Teil hinzu zu fügen und es wird das emissionsfreie Fliegen angestrebt. Um dies zu bewältigen, wird neben emissionsfreien Antriebstechnologien, auch an digitalen Abbildungen der Systeme geforscht, die diese über den gesamten Lebenszyklus virtuell wiederspiegeln und somit jederzeit Auskunft über das System ermöglichen [2].

Neben elektrischen angetriebenen Flugzeugen eignet sich auch Wasserstoff als Energieträger, der die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr auf null reduzieren kann. Jedoch erfordert dieses, für die Luftfahrt, neue Medium die Erforschung von neuen Tanksystemen inklusive der dazu gehörigen Systemarchitekturen. Die durchgängige Digitalisierung trägt dazu bei, neue Konzepte und Technologien für nachhaltigere Luftfahrzeuge zu erforschen und Betriebsabläufe zu optimieren [3].

Um die Transformation zu einer klimaneutralen Luftfahrt ganzheitlich zu verfolgen, müssen neben der Entwicklung von neuen Antriebskonzepten, wie dem mit Wasserstoff,

insbesondere neue Bodenprozesse zur Abfertigung des Flugzeugs am Flughafen sowie Wartungs- und Reparaturtechnologien und -strategien entwickelt werden. Dies ist Ziel des Projektes *Hydrogen Aviation Lab* (Abk. HAL), in dem eine Entwicklungsplattform für den Bodenbetrieb sowie die Wartung von Flugzeugen mit Wasserstoffantrieb entwickelt wird. Dazu wird neben dem Reallabor, dem HAL in einem modifizierten Airbus A320-200, eine digitale Plattform entwickelt. Zur Erstellung der der Plattform wird der A320 durch hochgenaue 3D Scanner digitalisiert und dieser Vorgang im Lebenszyklus des Labors bei Veränderungen wiederholt. Diese Messungen liefern geometrische Informationen von Komponenten und Flugzeug, zu denen keine CAD-Daten vorliegen und zeigen Details der Flugzeuggeometrie und -systeme auf, die durch die idealisierten CAD-Daten der Hersteller nicht ausreichend genau abgebildet werden. Für die Integration der Subsystemkomponenten, wie LH2-Tank, Rohrleitungen, Brennstoffzellensystem und Sensoren in die bestehende A320 Struktur, werden auf Basis der 3D-Informationen freie Bauräume identifiziert und für die Strukturintegration verwendet. Diese Baurauminformationen, sowie die dadurch ermittelten Subsystemmodelle, werden in die virtuelle Umgebung implementiert, sodass es eine genaue Abbildung des Reallabors in der virtuellen Umgebung gibt. Neben den geometrischen Informationen aller Systeme werden diese durch ihre Funktionsweise sowie den Beziehungen zueinander ergänzt, in die virtuelle Umgebung integriert und durch die experimentellen Daten, von bspw. Sensoren erweitert. Die einzelnen Systeme, deren Architekturen sowie Abhängigkeiten untereinander, werden auf Grundlage von Vorentwurfsdaten und P&IDs miteinander verknüpft, sodass eine virtuelle Systemarchitektur entsteht.

Zur Identifizierung und Analyse von Wechselwirkungen der Modelle und Systeme, werden die Modelle mit den Meta-Daten der Sensoren verknüpft und in die virtuelle Umgebung integriert. Dies geschieht durch ein neues „Smartes Wasserstoff Sensor-Monitoring Konzept“, welches nicht nur einen sicheren Betrieb der Wasserstoffanlage im Flugzeug garantiert, sondern gleichzeitig die Leckage bei Wasserstoffaustritt lokalisiert. Dabei sollen der Aufbau, sowie die Daten zeitgleich für die virtuelle Umgebung generiert werden, um einen schnellen Überblick zu erhalten und effizientes Handeln zu ermöglichen. Der virtuelle Zwilling des A320 mit seinen Subsystemen erweitert den realen Demonstrator um die digitale Erforschung weiterer Aspekte, wie der Skalierbarkeit der Ergebnisse auf weitere Flugzeugtypen, und erlaubt die interaktive Begegnung mit den Komponenten und Systemen. Die Kombination aus einer virtuellen Umgebung und dem mit Wasserstofftank und Brennstoffzelle modifiziertem A320 ermöglicht das Schaffen von Grundlagen für die Entwicklung neuer Flugzeuge, sowie das Entwickeln von Boden- und Wartungsprozessen mit dem Medium Wasserstoff und beschleunigt so maßgeblich die Transformation der Luftfahrt hin zu deren Klimaneutralität.

Dieser Beitrag beschreibt in Kapitel 2 die Gewinnung der Realgeometriedaten und wie diese in der Entwicklung des Hydrogen Aviation Lab, sowie für dessen virtuellen Zwilling verwendet werden. Die automatisierte Modellgenerierung des virtuellen Zwillings, sowie der Aufbau der virtuellen Plattform wird in Kapitel 3 dargestellt. Die Einbindung der Sensordaten, am Beispiel eines neu entwickelten Sensorsystem, erfolgt in Kapitel 4.

## 2. DIGITALISIERUNG DER REALGEOMETRIEDATEN

Ein signifikanter Baustein des virtuellen Zwillings sind die 3D-Informationen der Realgeometriedaten des Hydrogen Aviation Labs. Diese werden sowohl für die Erstellung des 3D-Modelles, als auch zur Bauraumbestimmung für die einzelnen Subsysteme benötigt. Die Realgeometriedaten werden durch hochgenaue 3D-Scanner erfasst und zu einem Oberflächenmodell weiterverarbeitet, welches die Objekte als Oberflächennetz repräsentiert.

### 2.1. Datenerfassung

Die Datenerfassung erfolgt durch zwei verschiedenen Systeme, die sich für unterschiedliche Anforderungen und Anwendungsfälle eignen.

Für die schnelle Erfassung mittlerer sowie großer Objekte und Bereiche, für z.B. die Bauraumerfassung, eignet sich terrestrische Laserscanner. Für dieses Projekt wird das System Leica RTC360, welcher in BILD 1 zu sehen ist, verwendet [4]. Dieses erfasst in kurzer Zeit den gesamten Raum um den Scanner herum, wobei der Abstand zwischen System und der Oberfläche des Messobjektes erfasst wird. Durch das Umsetzen des Systems, lassen sich Hinterschneidungen, oder auch die Außenfläche von z.B. Luftfahrzeugen komplett erfassen. Die Registrierung der einzelnen Aufnahmen erfolgt bei dem hier verwendeten System durch ein visuelles Inertialsystem, welches ein Echtzeit-Tracking der Scannerbewegungen zwischen den einzelnen Aufnahmestationen ermöglicht. Zusätzliche

Farbsensoren versehen die Messpunkte mit einem RGB-Farbwert, wodurch als Ergebnis farbige Punktwolken vorliegen. In nachfolgenden Arbeitsschritten lassen sich die Punktwolken zu einem geschlossenen Oberflächennetz aufbereiten.

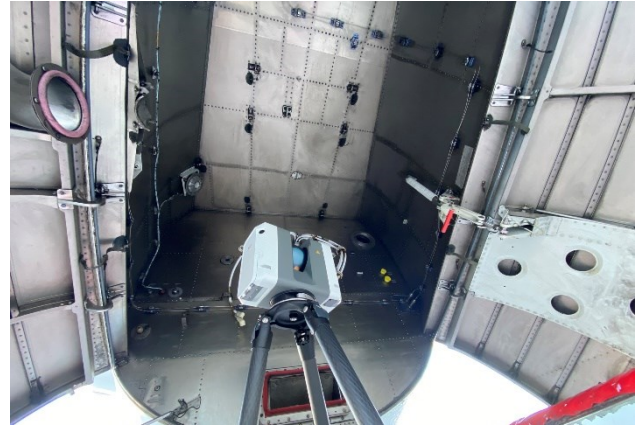


BILD 1. Der Leica Laserscanner RTC360 für Aufnahmen im leeren Raum des Hilfstriebwerks

Als zweites System wird der ATOS Compact Scan von Carl Zeiss GOM Metrology verwendet [5], welches mit dem Streifenprojektionsverfahren arbeitet und in BILD 2 dargestellt ist. Es eignet sich besonders für detaillierte Aufnahmen von kleinen bis mittelgroßen Objekten und Szenen. Da bei diesem Verfahren pro Aufnahme nur ein Bereich in der Größe des montierten Messvolumens erfasst wird, kann der Zeitaufwand bei größeren Objekten stark zunehmen, sodass hier zwischen maximal zu erfassender Genauigkeit und zeitlichem Einsatz abzuwägen gilt, wobei letztendlich alle Bereiche von Interesse mit diesem Scanner erfasst werden. Dem System stehen Messvolumen (L x B x H) [mm] 350 x 250 x 250 bis 1200 x 900 x 880 zur Verfügung. Der ATOS Compact Scan wird durch das Photogrammetriesystem TRITOP [6], ebenfalls von Carl Zeiss GOM Metrology, ergänzt. Durch die Verwendung des Photogrammetriesystems wird ein fortlaufender Fehler, vor allem bei größeren Objekten, durch Überlagerung gleicher Referenzpunkte in beiden Aufnahmen, verhindert. Farbinformationen und -texturen der Oberflächen werden mittels der Farbsensoren in der Spiegelreflexkamera, wie sie im TRITOP System verwendet wird, erfasst, wodurch ein realitätsnahes Abbild der gescannten Objekte entsteht.



BILD 2. Der ATOS Compact Scan für Scansarbeiten in der Kabine des Hydrogen Aviation Lab

Die genauen Funktionsweisen der Systeme sowie die Abfolge der Arbeitsprozesse kann weiterführender Literatur wie [7]-[10] entnommen werden.

## 2.2. Verwendung der 3D-Daten

Die durch die 3D Scanner erfassten Daten geben dem Projektteam eine Vielzahl an Informationen zur Systemarchitektur des A320-200 und werden unter anderem bei der Bauraumdefinition der einzelnen Subsysteme verwendet. So dienen die schnellen Aufnahmen des Laserscanners für erste grobe Abschätzungen des zur Verfügung stehenden Platzes, wie es zum Beispiel in BILD 3 zu sehen ist. Dort ist die Punktwolke als Begrenzung der Kabine und des Hilfstriebwerks im hinteren Bereich des Flugzeugs in braun zu erkennen. Erste Größendefinitionen der Subsysteme, in einfachen Begrenzungsblöcken, erfolgen. Auch die Frage der Integration und eines möglichen Standorts des Inntanks, einem Standard Industrieprodukt, ließ sich auf Grundlage der 3D-Daten lösen.

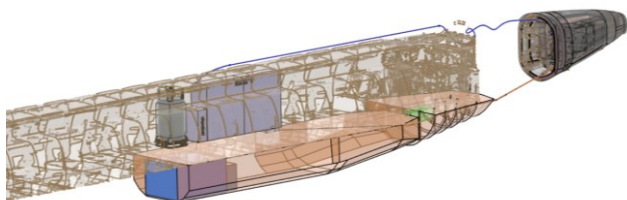


BILD 3. Laserscanner Aufnahmen und teilweise Rekonstruktion zur Bauraumdefinition für Inntank- und Brennstoffzellensystem

Die durch die 3D Scanner erfassten Bereiche sind in BILD 4 zu erkennen. Beginnend mit Aufnahmen aus dem hinteren Bereich der Kabine, in dem die Installation des Inntanksystems mit Verdampfeinheit erfolgt, und dem hinteren Frachtbereich, durch den die Zuleitung zur Betankung des Inntanks verlegt wird, sind 3D Modelle aller Bereiche bis zum Heck des Flugzeugs erzeugt worden. Im Fach für das Hilfstriebwerk wird das Brennstoffzellensystem integriert. Aufnahmen aus dem Bereich zwischen Kabine und Heck sind ebenfalls digitalisiert, um die Zuleitungen zur Brennstoffzelle planen zu können.

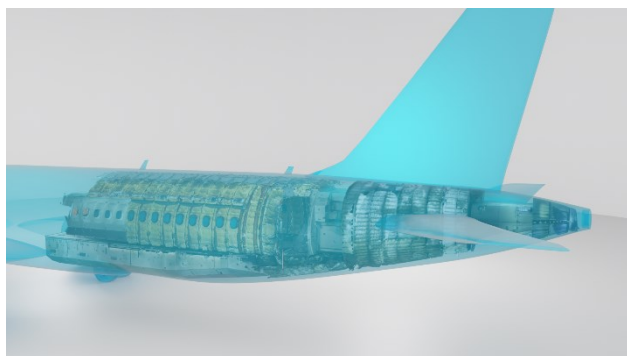


BILD 4. Alle erfassten Bereiche im virtuellen Flugzeugmodell integriert

Auf Grundlage dieser Informationen erfolgt die weitere Ausarbeitung der einzelnen Subsysteme. Dies ist nun am

Beispiel des Brennstoffzellen Systems im ehemaligen Fach für das Hilfstriebwerk exemplarisch in BILD 5 dargestellt. Die durch den Laserscanner generierte Punktwolke (in braun dargestellt) wurde für den Entwurf in eine CAD Software importiert. Zunächst wurden grobe Abschätzungen der einen Subsysteme wie Brennstoffzellen Stack, Kühlung oder Luftzufuhr getroffen. Nach der Identifizierung der Befestigungspunkte im Deckenbereich des Fachs, erfolgt die detaillierte Ausarbeitung des gesamten Brennstoffzellensystem, wie es in BILD 5 c) durch die transparent gehaltene Punktwolke zu erkennen ist. BILD 5 d) zeigt eine finale Darstellung des eingebauten Brennstoffzellensystems, mit 3D Aufnahmen durch das ATOS System.

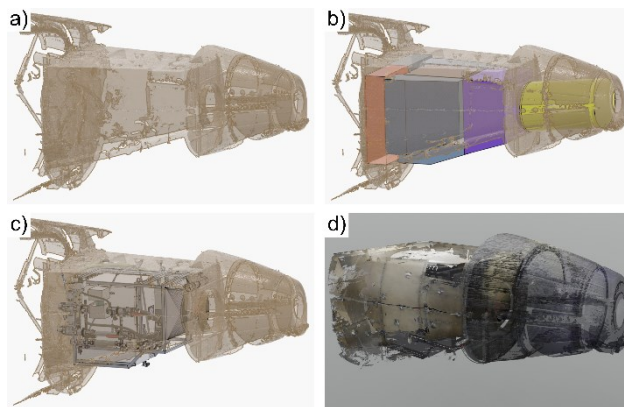


BILD 5. Entwicklungsprozess des Brennstoffzellensystems im Fach des Hilfstriebwerkes

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, zeigt das ATOS System eine höhere Genauigkeit auf, daher können die Aufnahmen zur Validierung der Konzepte herangezogen werden. In BILD 6 a) und b) sind die Befestigungen des Brennstoffzellensystems in dem ehemaligen Fach des Hilfstriebwerks zu erkennen. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit, in diesem Fall Aluminium, und dem geringen Platz im Fach, ließen sich die Anbringungspunkte nicht komplett erfassen. Jedoch lassen sich einzelne Flächen identifizieren und somit die Positionen bestätigen.

Ähnlich erfolgt auch die Ausarbeitung des Inntanksystems mit Verdampfeinheit, um den flüssigen in gasförmigen Wasserstoff um zu wandeln. Dieses gesamte System befindet sich im hinteren Bereich der Flugzeugkabine. Erste Abschätzungen sind bereits in BILD 3 zu erkennen. Die Ausarbeitung und Integration des Systems in die 3D-Scan Daten sind in BILD 7 a), mit der Begrenzungsbox der Verdampfeinheit und b) dem detaillierteren Modell zu sehen.



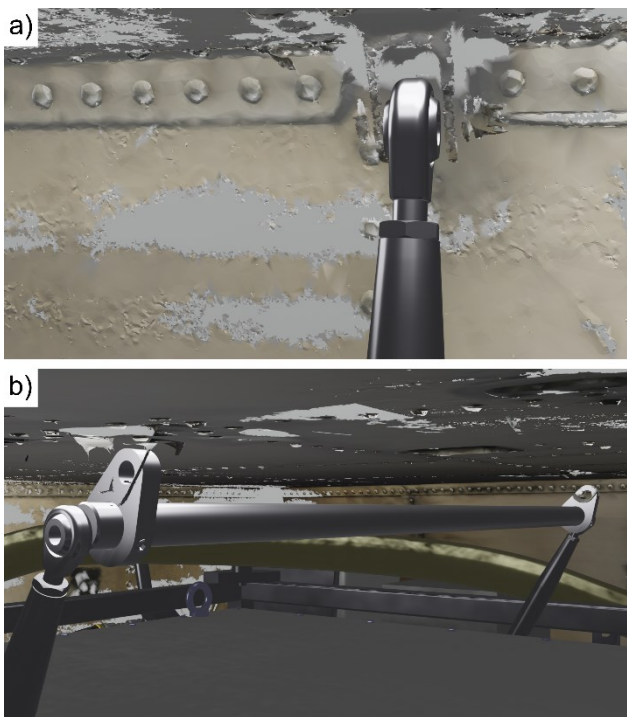


BILD 6. Validierung der Anbringungs- punkte der Brennstoffzellensystems im Fach des Hilfstriebwerks

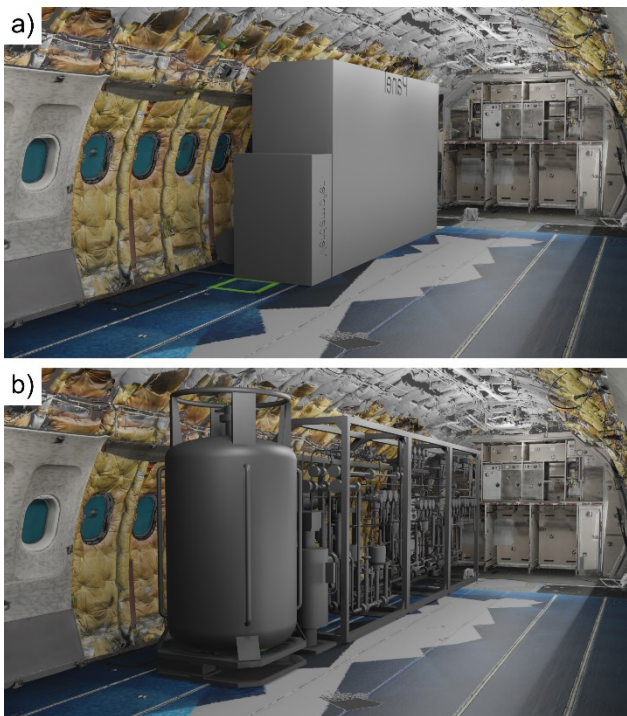


BILD 7. Aufnahme aus der Kabine des Hydrogen Aviation Lab mit a) der Bauraumbegrenzung und b) der Ausarbeitung des Panels und dem Innentank

Details aus den 3D-Aufnahmen fließen in die Ausarbeitung der 3D Geometrien für die virtuelle Testplattform, welche in

Kapitel 3 näher beschrieben wird, ein. So sind die Anordnung der Bordküche oder auch Details der Kabine übernommen.

### 3. VIRTUELLER ZWILLING DES HYDROGEN AVIATION LABS

Für das Reallabor wird eine virtuelle Plattform entwickelt, in der eine digitale Kopie des modifizierten Airbus A320-200 dargestellt wird. Zusätzlich zu dem hochauflösendem 3D Modell wird dieses um die experimentellen Daten aus den verbauten Sensoren im HALs erweitert. Der virtuelle Zwilling des HALs kann mit einem VR-Headset und zwei Controllern erkundet und interaktiv erforscht werden. Die folgenden Abschnitte geben einen Einblick in den Aufbau der Plattform und in die Integration der 3D-Modelle.

#### 3.1. Automatisierte 3D Modellgenerierung des A320-Flugzeugs

Das virtuelle Flugzeug besteht aus drei Kategorien. Die erste Kategorie umfasst die Außenhülle des Flugzeugs. Es handelt sich bei der Kategorie um ein starres Objekt ohne Interaktion mit dem Nutzer. Allerdings verfügt das Objekt um spezifische Materialwerte. Damit der virtuelle Flieger eine exakte Kopie des physischen Originals darstellt, wird die Lackierung auf die Außenhülle des digitalen 3D Modells übertragen. BILD 8 zeigt die Livery des virtuellen Fliegers.



BILD 8. 3D Modell der A320-200 Außenhülle mit Livery.

Die zweite Kategorie beinhaltet Strukturelemente, die Verkleidung und weitere Flugzeugelemente, die keine Interaktion erleben, wie z.B. das Cockpit. BILD 9 zeigt die Kabinenstruktur und -verkleidung für den virtuellen Flieger. Im Gegensatz zu der Außenhülle des Flugzeugs erhalten diese Komponenten einfache Materialien, um die benötigte Rechenleistung für die Ausführung der virtuellen Plattform zu reduzieren.



BILD 9. 3D Modell der Verkleidung, Struktur und weiterer (starrer) Elemente.

Die dritte Kategorie umfasst die interaktiven Kabinenkomponenten sowie die Elemente des integrierten Wasserstoffsystems. Zu den interaktiven Kabinenkomponenten gehören die Monumente, bestehend aus den Sitzen, Galleys und Lavatories. Das Wasserstoffsystem umfasst die Subsystemkomponenten

wie Tank, Rohrleitungen, Brennstoffzellenstacks und Sensoren. BILD 10 zeigt die interaktiven Kabinen- und Wasserstoffsystemkomponenten.



BILD 10. 3D Kabinenlayoutmodell inklusive des Wasserstoffsystems.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Kategorien werden für diese Komponenten Aktionen programmiert, damit der Nutzer mit diesen interagieren kann, und es werden Informationen für diese hinterlegt. Die Informationen umfassen einerseits die Eigenschaften der einzelnen Systemkomponenten und andererseits die Beziehungen zwischen den Komponenten. Zu den Eigenschaften gehören unter anderem die geometrischen Daten (Bauraum und Position), der Objektname, der Type und die Systemgruppenzugehörigkeit. Mit den Beziehungen können direkte Verbindungen zwischen einzelnen Systemkomponenten und die Zugehörigkeit zu einer Systemgruppe abgebildet werden. Ein Einblick in die Aktionen und die Weiterverarbeitung der Eigenschaften/Beziehungen erfolgt in Abschnitt 3.2.

Die Generierung der vollständigen Kabine (Kategorie zwei und drei) erfolgt automatisiert. Dafür werden Algorithmen und Regeln genutzt, die eine Platzierung der Komponenten innerhalb des vorgegebenen Bauraums des Fliegers ermöglichen. Dabei wird der am DLR entwickelte Auslegungsprozess für die Kabine und dessen Systeme um die Baumraum- sowie Platzierungserkenntnisse aus dem Reallabor erweitert. Der Prozess startet mit einer parametrischen Auslegung, bei der die Komponenten durch einfache geometrische Formen dargestellt werden. Anschließend werden die Basisformen durch die hochauflösenden 3D Modelle der Einzelkomponenten ersetzt. Ein detaillierter Einblick in den Aufbau der automatisierten Platzierung und Auslegung der Kabine kann [10] entnommen werden.

### 3.2. Aufbau der virtuellen Plattform

Die virtuelle Plattform wird mit Unity, einer Laufzeit- und Entwicklungsumgebung, aufgebaut. Diese ermöglicht die Entwicklung einer Plattform mit Virtueller Realität, bei der der Nutzer mit einem VR-fähigen Headset und zwei Controllern den Virtuellen Zwilling des Hydrogen Aviation Labs interaktiv erkunden kann. Für den Demonstrator wird eine HTC Vive Pro Eye verwendet.

BILD 11a zeigt den Nutzer mit dem HTC Headset und der Interaktion mit den Controllern. BILD 11b zeigt die virtuelle Plattform aus Sicht des Nutzers. Der Nutzer kann sich frei bewegen und wird in einer 1:1 Skalierung in der virtuellen Umgebung wiedergegeben. Darüber hinaus kann sich der Nutzer mit den Controllern teleportieren oder über ein virtuell eingeblendetes Interaktionspaneel verschiedene Funktionen nutzen. Dazu gehören bei der Interaktion mit den Systemkomponenten die Anzeige der Objekteigenschaften, der Verbindungen zu anderen Systemkomponenten oder das Hervorheben aller weiteren Komponenten einer zugehörigen Systemgruppe.



BILD 11. a) Nutzer mit dem VR Headset und b) View des Nutzers auf den Virtuellen Zwilling.

In BILD 12 ist die Aktion *Highlight Systemgruppe* dargestellt. Dafür wählt der Nutzer zuerst eine der Komponenten (z.B. Tank) in der Kabine an und wählt über das Interaktionspaneel das Hervorheben der gesamten Systemgruppe aus. Anschließend werden die zugehörigen Systemkomponenten farblich hervorgehoben und die nicht zugehörigen Kabinenkomponenten semi-transparent geschaltet. Dadurch kann der Nutzer die gesamte Systemgruppe einsehen und die Zusammenhänge besser nachvollziehen.



BILD 12. Highlight der Systemgruppe Wasserstoffsystem.

## 4. INTEGRATION DER SENSORWERTE IN DEN VIRTUELLEN ZWILLING

Auch die experimentellen Daten sowie die aktuellen Zustandsdaten sollen im virtuellen Zwilling dargestellt werden. Dazu werden die Sensorinformationen im virtuellen Zwilling integriert und dargestellt. Zur Veranschaulichung dieses Vorgangs wird das durch das DLR in Hamburg entwickelte neue Smarte Wasserstoff Sensor-Monitoring Konzept vorgestellt und die Einbindung der ermittelten Werte vorgestellt.

#### 4.1. Smartes Wasserstoff Sensor-Monitoring Konzept

Eine große Herausforderung bei der Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt ist die hohe Explosivität, denn ein Wasserstoff-Luft-Gemisch ist zwischen 4 und 75 Volumenprozent Wasserstoff in Luft zündfähig. Diese Explosivität führt zu Sicherheitsbedenken, insbesondere im Hinblick auf Leckagen aller wasserstoffführenden Systeme.

Das Ziel im Bereich des „Wasserstoff Sensor-Monitoring Konzepts“, ist es daher, ein neues smartes Wasserstoff-Leckagedetektions-System so zu entwickeln, dass:

- 1) Ein sicherer Betrieb möglicher Wasserstoffsysteme in Flugzeugen gewährleistet ist.
- 2) Bei unkontrollierten Wasserstoffemissionen die Leckage möglichst schnell lokalisiert werden kann.
- 3) Sich die Messdiagnose flexibel an die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, denen Flugzeuge ausgesetzt sind, anpasst.
- 4) Der Messaufbau leicht im A320 Hydrogen Aviation Lab integrierbar und flexibel bei der Positionierung sowie Umpositionierung ist.

Um dies zu erreichen, wurde ein digitales, busbasiertes intelligentes Sensornetzwerk entwickelt. Es kombiniert eine Vielzahl von Sensoren wie Gas-, Feuchte-, Temperatur- und Luftstromsensoren, die jeweils um eine eigene Recheneinheit erweitert sind. Diese können spezifisch auf den zugeordneten Sensor und dessen aktuelle Positionierung, Betriebsbedingungen, Messanforderungen und Zustand programmiert und durch die übergeordnete Steuereinheit auch jederzeit umkonfiguriert werden. Dadurch, dass jede einzelne Recheneinheit basierend auf ihrer Parametrierung selbst die Wasserstoffkonzentration ermittelt und über eine Busschnittstelle mit den anderen Recheneinheiten verbunden ist, benötigt das gesamte Sensornetz nur ein gemeinsames Kabel. Dies führt zu erheblichen Gewichtseinsparungen sowie geringere Komplexität gegenüber einzeln verkabelten Sensoren. Nur im Ereignisfall werden Daten auf der Bus-Kommunikationsleitung gesendet, woraus sich ein hohes Maß an Freiheit und Flexibilität in der Datenkommunikation ergibt. Ein solches Ereignis wäre in erster Linie die Erkennung einer Wasserstoffkonzentration, die einen vordefinierten Grenzwert überschreitet. Im Falle eines Ereignisses kann eine zusätzliche übergeordnete Steuereinheit die Rohdaten der aktuellen Messung, die in der Vergangenheit aufgezeichneten Daten sowie die Daten der umliegenden Sensoren abfragen.

Die Lokalisierung einer möglichen Leckage erfolgt durch Auswertung der erzeugten Daten. Anhand der zeitlichen Abweichungen der Wasserstoffdetektion der einzelnen Sensoren und der Kenntnis ihrer Positionierung können verschiedene Methoden zur Lokalisierung der Leckage eingesetzt werden, z.B. solche, die auf maschinellem Lernen oder geometriebasierten Ansätzen beruhen. Die Verwendung zusätzlicher Daten wie Luftgeschwindigkeiten, die von den Luftstromsensoren

generiert werden, kann zur Optimierung des Ergebnisses genutzt werden.

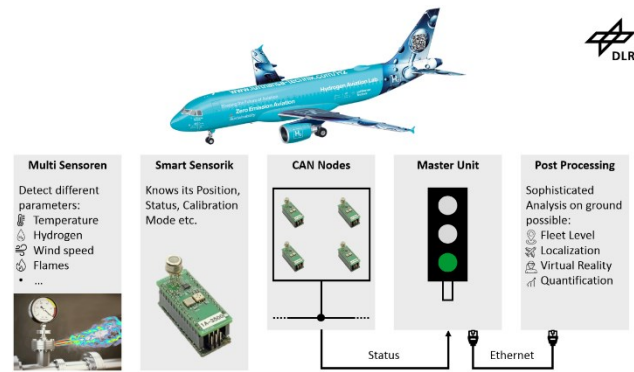


BILD 13. „Smartes Wasserstoff Sensor-Monitoring Konzept“

Das vorgeschlagene Konzept hat neben der schnellen Leckagelokalisierung verschiedene Vorteile. Zum Beispiel kann durch lokaler Parametrierter Messung und anschließende Signalanalyse der Status aller Sensoren mit einer einfachen Ampelanzeige überwacht werden. Es ermöglicht auch die Nutzung einer hohen Anzahl von Sensorknoten (125) pro Bus und bietet die Flexibilität, Sensoren ohne größeren Aufwand hinzuzufügen oder zu entfernen. Um eine Verfälschung der aufgezeichneten Daten zu vermeiden, können außerdem Änderungen in der Umgebung (z.B. der Flugphase) an die intelligenten Sensoren weitergegeben werden, so dass diese sich dezentral neu kalibrieren können.

#### 4.2. Kopplung der Sensordaten und Visualisierung

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen für die Übertragung von Realdaten aus dem Hydrogen Aviation Lab an die virtuelle Plattform beschrieben. Die Kopplung der Sensordaten erfolgt in mehreren Schritten. Die Sensoren messen dynamische Daten (Druck, Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit) und übertragen diese an einen Sensornode. Für jeden Sensor wird eine Historie der Sensordaten gespeichert, auf die in der virtuellen Plattform zugegriffen werden kann. Anschließend sammelt ein Datenserver (Multi-Channel Control Unit, MCCU) die Daten und stellt diese zusammen mit weiteren konstanten Daten (Sensortyp, Genauigkeit) anderen Teilnehmern im Netzwerk zur Verfügung. Mit der MCCU werden die Daten an die virtuelle Plattform weitergeleitet. Als Client für die Einbindung der Daten in die virtuelle Plattform wird als Direktanbindung OPCUA4Unity verwendet. BILD 14 zeigt die Darstellung der Sensordaten in der virtuellen Kabine. Über das Nutzerpaneel (schwarzes Tablet) können die virtuellen Sensoren ausgewählt und dessen Daten dargestellt werden. Im gezeigten Beispiel sind einmal die



Temperatur und die Luftfeuchtigkeit wiedergegeben.

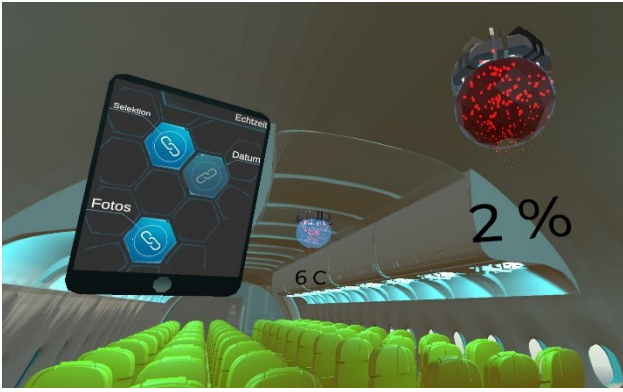


BILD 14. Darstellung der Sensordaten und des Nutzer-Panels im virtuellen Flieger.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit beschreibt die Implementierung des virtuellen Zwilling für das Hydrogen Aviation Lab in Hamburg. Sie zeigt die auf, wie die realen Geometrien des für den physischen Demonstrator zur Verfügung stehende Airbus A320-200 mit all seinen Details erfasst. Dazu werden hochgenauen 3D-Sensoren verwendet, die die erfassten Systeme und Objekte als ein Oberflächennetz beschreiben. Diese Informationen dienen zunächst der Identifikation von möglichen Bauräumen für zu integrierende Subsysteme wie der Verdampferinheit oder dem Brennstoffzellensystem. Nach dem Definieren von Begrenzungsblöcken der Subsysteme und der Identifizierung möglicher Verbindungspunkte erfolgte die Ausarbeitung der Systeme durch die Projektpartner. Die hochgenauen 3D-Daten dienen anschließend für eine Validierung der entwickelten Systeme. Neben der Nutzung der Geometriemodelle für die Entwicklung der Systeme, dienen die Informationen auch für die Erstellung des virtuellen Zwilling. So wurden einzelne Details aus den Aufnahmen identifiziert und in das Modell des Zwilling übernommen. Für die virtuelle Plattform wird das hochauflösende 3D-Modell mit experimentellen Daten aus den verbauten Sensoren erweitert und es lässt sich mit einer VR-Ausstattung interaktiv erkunden. Neben Elementen der virtuellen Plattform, die keine Interaktion herbeiführen, umfasst eine dritte Kategorie interaktive Komponente der Kabine und des Wasserstoffsystems zu denen Aktionen programmiert sind, wie das Anzeigen der Eigenschaften der einzelnen Systeme und die Beziehungen der Systeme zueinander. Auch das Einbinden der Sensorinformationen in die virtuelle Umgebung wird beschrieben, sowie das neu entwickelte smarte Wasserstoff Sensor Monitoring Konzept zur Detektion von Leckagen erläutert.

Da sich der physische Demonstrator des Hydrogen Aviation Lab noch im Aufbau befindet und nicht alle Systeme vollends entworfen sind, gilt es den virtuellen Zwilling bei Bedarf an diese anzupassen. Dazu werden die 3D-Modelle, durch CAD erstellt oder durch die 3D Sensoren digitalisiert, in die bestehende virtuelle Umgebung integriert.

Durch die Digitalisierung des Demonstrators lassen sich etwaige Umbauten und Veränderungen seines physischen

Gegenübers digital planen, Versuchsparameter vorab identifizieren und eine Skalierung der Ergebnisse auf andere Flugzeugtypen durchführen. Da sich der virtuelle Zwilling immer den realen Demonstrator widerspiegeln soll, gilt es alle Umbauten zu integrieren. So können auf der virtuellen Testplattform Versuche durchgeführt und Prozesse erforscht werden, die am realen Demonstrator nicht, bzw. erst nach aufwendigen Umbauarbeiten umgesetzt werden können.

## Referenzen

- [1] Die Bundesregierung. *Klimaneutrale Luftfahrt – Gemeinsames Papier der Bundesregierung*, 21.06.2022, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/220621-Klimaneutrale-Luftfahrt-Juni-22-Vfin-Anlage-BR.pdf?blob=publicationFile&v=1>, abgerufen: 08.2023
- [2] Helmholtz-Gemeinschaft. *Luftfahrt - den Luftverkehr von morgen gestalten*, <https://www.helmholtz.de/forschung/forschungsbereich/luftfahrt-raumfahrt-und-verkehr/luftfahrt/>, Abgerufen: 08.2023
- [3] 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*. (12.2021) <https://www.dlr.de/de/medien/publikationen/broschueren/2021/auf-dem-weg-zu-einer-emissionsfreien-luftfahrt/@@download/file>, abgerufen: 08.2023
- [4] Leica Geosystems. *Leica RTC360 3D-Laserscanner*. <https://leica-geosystems.com/de-ch/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360> (abgerufen 07.2023)
- [5] Zeiss GOM-Metrology. *ATOS Compact Scan*. <https://www.gom.com/de-de/produkte/3d-scanning/atos-compact-scan> (abgerufen 07.2023)
- [6] Zeiss GOM Metrology. *TRITOP*. <https://www.gom.com/de-de/produkte/3d-scanning/tritop> (abgerufen 07.2023)
- [7] Schuth, M., Buerakov, W.: *Handbuch optische Messtechnik*, Carl-Hanser-Verlag, München, 2017 – ISBN 978-3-446-43634-3
- [8] Rauscher, F.; Biedermann, J.; Gindorf, A.; Meller, F.; Nagel, B.: *Permanente Geometrische Digitalisierung der Flugzeugkabine zur Änderungsnachverfolgung*. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. 2020, <https://doi.org/10.25967/530008>
- [9] Rauscher, F., Fuchs, M., Ghanjaoui, Y., Markusheska, N., Biedermann, J., Meller, F., Nagel, B.: *Permanently updated 3D-model of actual geometries of research environments*. CEAS Aeronaut J (2023). <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00661-2>
- [10] Rauscher, F.; Allebrodt, P.; Biedermann, J.; Pätzold, C.; Meller, F.; Nagel, B.: (2023): Permanent aktualisierte 3D-Realgeometrie des ISTAR im Digitalen Zwilling. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. (Text). <https://doi.org/10.25967/570374>

- [11] Fuchs, M.; Beckert, F.; Biedermann, J.; Nagel, B. (2021) *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. AIAA AVIATION 2021 Forum, 02. - 06. August 2021, Virtual Event. doi: [10.2514/6.2021-2773](https://doi.org/10.2514/6.2021-2773). ISBN 978-162410598-2.

**Kontaktadresse:**

Fiete.Rauscher@dlr.de