



Holistische Kabineninnovation vom Hangar zur Haustüre

Kabine 4.0

**- Methoden und Konzepte
für den schnellen, modularen Kabinenaustausch
unter Kabine 4.0 Aspekten -**

Verbundprojekt unter der Führung von
Lufthansa Technik AG



Lufthansa Technik

mit dem Partner
Technische Universität Hamburg

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im
Rahmen des fünften zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo V-2)

Förderkennzeichen: 20K1512B

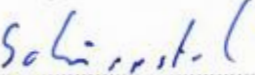
Schlussbericht der
Technischen Universität Hamburg

Projektlaufzeit: 01.07.2016 – 31.08.2019

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger	Technische Universität Hamburg		
Förderkennzeichen	20K1512B	Laufzeit	01.07.2016 – 31.08.2019
Berichtszeitraum	01.07.2016 – 31.08.2019		
Erstellt von	Jan Oltmann, M. Sc., Constantin Deneke, M. Sc.	Datum	24.02.2020

Hamburg, 24.02.2020

 Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause	 Jan Oltmann, M. Sc.
 Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl	 Constantin Deneke, M. Sc.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4	Wissenschaftlicher/technischer Stand	8
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2	Technischer Bericht.....	10
2.1	AP1 - Entwicklung alternativer Gesamtkonzepte für den schnellen Kabinenaustausch..	10
2.2	AP2 - Entwicklung eines Justagesystems zur Kompensation der geometrischen Toleranzen bei der Montage von Kabinenelementen	17
2.3	AP3 - Entwicklung einer flugzeughersteller-unabhängigen, montagegerechten, leichtbaugerechten und modularen Kabinenstruktur	41
3	Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	49
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	50
5	Nutzen/Verwertbarkeit.....	50
6	Fortschritt anderer Stellen.....	51
7	Veröffentlichungen, Vorträge	51
8	Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur	51

1 Zusammenfassung

Während der Umrüstung von Flugzeugkabinen kommt es oft zu Schwierigkeiten beim Einbau von Kabinenbauteilen, weil Positionen von Elementen in der Umgebung, wie z. B. Strukturelemente, entweder nicht bekannt sind oder aufgrund von früheren Kabinenanpassungen nicht dem erwarteten Sollzustand aus den vorliegenden Flugzeugdokumenten entsprechen. Das Forschungsprojekt Kabine 4.0 hatte zum Ziel, Hindernisse eines effizienten Umrüstungsprozess aufzudecken und mittels innovativer Technologien und Verfahren zu beseitigen, um so insbesondere die Liegezeiten von Flugzeugen und die damit verbundenen hohen Kosten zu reduzieren.

Das Projekt Kabine 4.0 startete für die Technische Universität Hamburg (TUHH) nicht wie in der Projektskizze geplant am 01.01.2016 sondern am 01.07.2016. Die Zeitplanung ist im Zeitplan entsprechend angepasst (siehe Bild 1-1). Projektende für das Teilprojekt der TUHH im Forschungsverbund war nach der vom Projektträger genehmigten Laufzeitanpassung der 31.08.2019.

1.1 Aufgabenstellung

Die beiden Institute PKT und IFPT der TUHH entwickelten als Verbundpartner Gesamtkonzepte zum schnellen, effizienten Austausch der Flugzeugkabine als Alternative zu dem bisherigen, zeitaufwendigen Prozess. Gesamtziel des Forschungsvorhabens war es, die Möglichkeiten aufzuzeigen, die Liegezeiten des Flugzeuges beim Austausch der Flugzeugkabine zu reduzieren. Dabei wurde das Ziel verfolgt, sowohl bestehende als auch neue Kabinenelemente (Modifikationen) der zukünftigen digitalisierten und individualisierten Kabine in die Entwicklung zu integrieren und Methoden und Tools zu entwickeln, um die Fehlererfassung und Behebung zu beschleunigen sowie langfristig Fehler zu vermeiden.

1.2 Voraussetzungen

Der Forschungsschwerpunkt Luftfahrttechnik der TUHH kooperiert seit vielen Jahren intensiv mit den ortsansässigen Großunternehmen Airbus und Lufthansa Technik sowie weiteren Luftfahrttechnik-Spezialisten, wie beispielsweise DIEHL Aerosystems. Dazu haben sich zahlreiche Institute der TUHH mit unterschiedlichsten Kompetenzen im Forschungsschwerpunkt Luftfahrt zusammengeschlossen. Die Projekte des Forschungsschwerpunktes sind an den internationalen Luftfahrt-Forschungsstrategien ausgerichtet und haben das Ziel, vor allem neue Grundlagen und Techniken für die Entwicklung, die Herstellung, den Betrieb und die Nutzung von Luftfahrtsystemen zu erarbeiten. Von besonderem Vorteil für die Arbeiten ist die intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit der beiden TUHH-Institute.

Institut für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT)

Das IFPT hat in diversen Forschungsvorhaben seine Kompetenzen im Bereich Automatisierung von Prozessen in der Luftfahrt erfolgreich bewiesen. So wurde in Zusammenarbeit mit der Lufthansa Technik AG ein mobiler Roboter zur automatisierten Inspektion von Flugzeugrümpfen entwickelt. Hier konnte u. a. auf die Expertise in den Bereichen der Positionsbestimmung und Navigation im Umfeld der Flugzeugwartung aufgebaut werden. In weiteren Projekten ging es um die automatisierte Inspektion und Reparatur von Triebwerkskomponenten. Hier wurde u.a. ein umfangreiches Know-How im Bereich von hochauflösender optischer Messtechnik und Digitalisierung von Bauteilen erarbeitet. In der Datenauswertung waren hier beispielsweise geometrische Merkmale der Triebwerksteile automatisch zu identifizieren, um so eine Referenzierung der Bauteilkoordinatensysteme zu realisieren. Ein weiteres Forschungsfeld des IFPT beschäftigt sich mit dem Einsatz von Industrie 4.0-Technologien im Bereich der MRO und deren Anwendungen. Hier werden durch zielgerichtete Automation von granularen Teilprozessen innerhalb der manuellen Prozessketten, deutliche Zugewinne an Ergonomie und Produktivität erreicht. So wurde in einem Projekt beispielsweise ein Cyber-Physischen-

Unterstützungssystem (CPSS) entwickelt, das den Mitarbeiter bei der Präzisionsbearbeitung von Schäftungen für die CFK-Reparatur entlastet. In diesen und weiteren Projekten wurden neben den projektspezifischen Kompetenzen auch umfangreiche grundlegende Kompetenzen im Bereich der Prozessautomatisierung im Kontext der Flugzeugwartung und –Instandhaltung sowie der organisatorischen Besonderheiten dieser Branche aufgebaut.

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)

Das Institut PKT verfügt über umfangreiche Erfahrungen und Kenntnisse im Bereich der Produktentwicklungsmethoden, insbesondere zur Entwicklung modularer Produktfamilien und der variantengerechten Produktgestaltung. Diese wurden im Rahmen verschiedener Projekte und Forschungsarbeiten am Institut entwickelt und konnten nicht nur allgemein, sondern auch spezifisch für die Komponenten der Flugzeugkabine appliziert werden. Zusammen mit Firmen wie Airbus, DIEHL Aerosystems oder Lufthansa Technik, werden seit Jahren diverse Forschungsprojekte im Bereich der Kabinensystemkomponentenentwicklung durchgeführt. Das Institut besteht aus den beiden Forschungsgruppen „Methoden der Produktentwicklung“ und „Strukturanalyse und Versuchstechnik“.

Das Projekt ist an der TUHH weiterhin in folgende Forschungsprojekte eingebunden oder baut auf deren Ergebnissen auf.

PKT

- **SimoUNITS** – Modulare Kabinen-Units in Simulation, Validierung und Produktfamilienarchitektur, in Kooperation mit DSM, LuFo IV (BMW) [2012-2014],
- **FlexGalley** – Modulares und verschiebbares Konzept für Flugzeug-Bordküchen, in Kooperation mit DSM, LuFo Hamburg (BWVI HH) [2008-2013],
- **GreenUNIT** – Entwicklung einer konfigurierbaren und umweltgerechten Self-Service Plattform, Spitzencluster, in Kooperation mit DSM, (BMBF) [2011-2013],
- **SMART Ramp-up** – Effizienter Serienanlauf in der Flugzeugindustrie, in Kooperation mit Airbus, Spitzencluster (BMBF) [2009-2013],
- **CompoSeat** – Entwicklung eines neuen VIP-Flugzeugsitzes aus CFK, in Kooperation mit Lufthansa Technik, LuFo IV (BMW) [2010-2013],
- **EFTEC** – Effiziente Technologien auf Basis neuer Sandwichstrukturen für Kabinenausstattungen, in Kooperation mit Mühlenberg, LuFo Hamburg (BWVI HH) [2007-2009],
- **SINTEG A2** – Variantenreiche Serienproduktion von Kabinen, in Kooperation mit Airbus, LuFo IV (BMW) [2009-2011],
- **Proteg** – Montagehilfsmittel und Automatisierungstechnik in der Kabinenmontage, in Kooperation mit Airbus, LuFo IV (BMW) [2010-2013].
- **SILVIA** – Synergetische Ansätze für neuartige Module, Monumente und Systeme von zukünftigen Flugzeugkabinen (BMW) [2014-2018]
- **MICHEL** – Multifunktionales Leichtbaudesign für variabel konfigurierbare Monumente, (BMW) [2018-2021]
-

IFPT

- **RoboFill** – Automatisiertes Befüllen einzelner Wabenzellen mit hochreaktiven Materialien unter Hochgeschwindigkeit, in Kooperation mit 3D ICOM, LuFo V2 (BMW) [2016-2019]
- **Veronika** – Vernetzte und effiziente Entwicklungs- und Produktionsprozesse für Passagierkabinen, in Kooperation mit Diehl, LuFo V2 (BMW) [2016-2019]
- **AutoPro** – Entwicklung eines universell einsetzbaren mobilen Inspektionsroboter, in Kooperation LHT, Airbus, ZAL, u.a. Hamburger LuFo (HH BWVI) [2014-2016]

- **AutoInspect** – Automatisierte Rissprüfung von Brennkammerbauteilen der Flugzeugturbine, in Kooperation mit LHT, VMT und IBG, LuFo II (BMWi) [2011-2015]
- **AutoRep** – Automatisierte Reparatur von Brennkammerbauteilen, Anschlussprojekt von AutoInspect, in Kooperation mit LHT, IBG und ILT Aachen, LuFo IV (BMWi) [2012 – 2015]
- **SubCrafted** – Entwicklung eines CPSS für die semiautomatisierte Digitalisierung und Bearbeitung an CFK-Großstrukturen, in Kooperation mit ISAM, ZIM (BMWi) [2014-2016]
- **MiReP** - Schnellere Integration der Automatisierung durch Verschmelzung von Prozess und Simulation mittels AR, in Kooperation mit Icarus Consulting GmbH, LuFo V-3, (BMWi) [2018-2021]
- **Industrielle Indoor-Lokalisierung (IIL)** – Erfassung und Aufbereitung ortsbezogener Daten zur Befähigung von Location-Based Services in der Intralogistik, EFRE, 2017 - 2020

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Bild 1-1 wird eine Gesamtübersicht aller Arbeitspakete und Meilensteine gegeben.

Kostenplan

Der Kostenplan seitens der TUHH wird eingehalten.

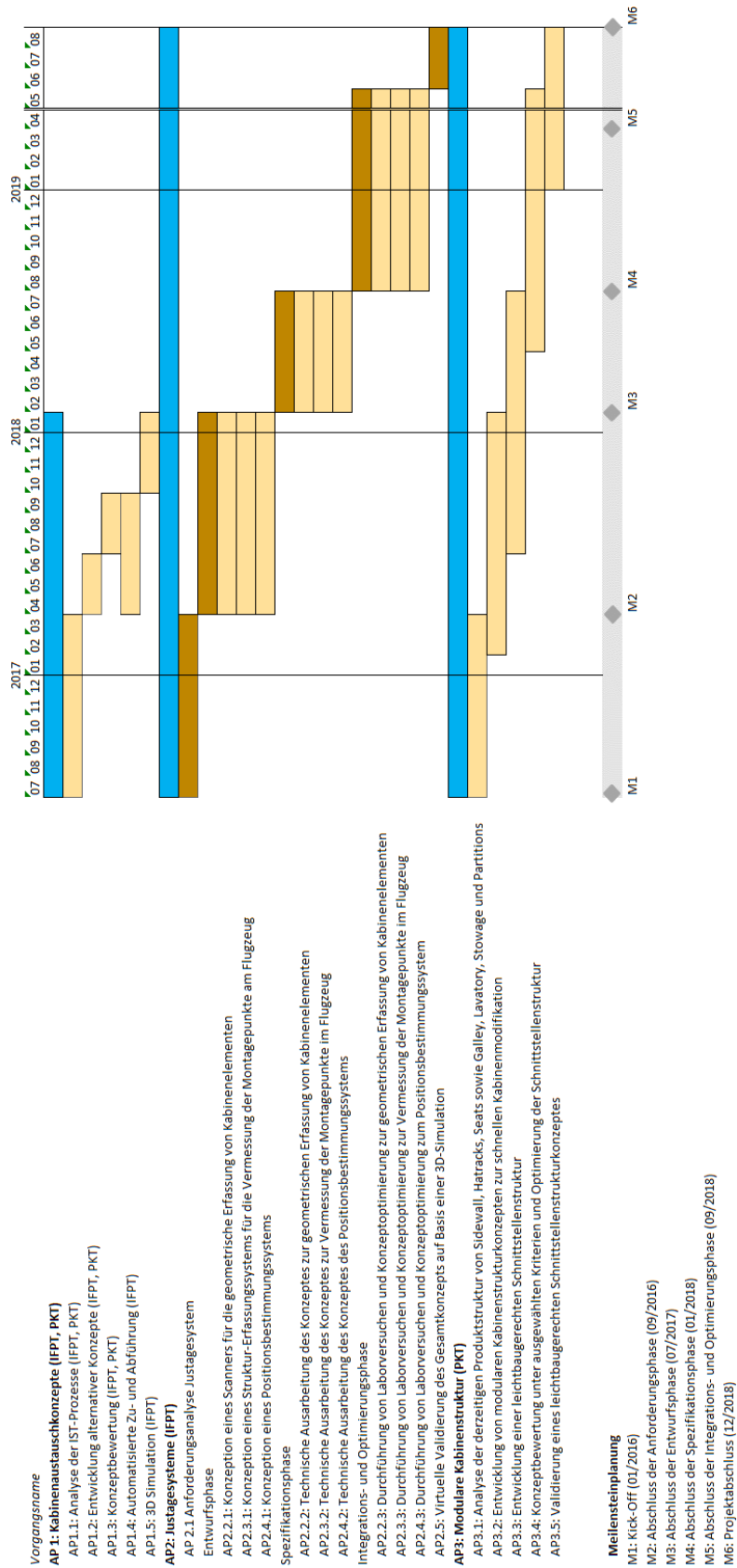


Bild 1-1: Zeitplan und Meilensteine

1.4 Wissenschaftlicher/technischer Stand

Die Kabineninnenausstattung im Lebenszyklus eines Passagierflugzeuges wird in regelmäßigen Abständen von im Durchschnitt 5-7 Jahren ausgetauscht. Dabei werden Neuentwicklungen in die Kabine integriert und sich den stetig verändernden individuellen Anforderungen der Kunden angepasst. LHT führt sowohl diese Kabinenumrüstung als auch die dazugehörigen Instandhaltungsarbeiten durch.

Die Kabine von Passagierflugzeugen besteht dabei aus den Grundelementen: Sitze, Ablagefächer (Hat-racks), Küchen (Galleys), Toiletten (Lavatories) und Seiten- bzw. Deckenverkleidungen (Panels).

Tabelle 1: Grundelemente in einer Flugzeugkabine

		
Sitze[Tel 2015]	Ablagefach[Die 2015]	Küche[Air 2015]
		
Toilette[Wik 2015]	Seitenwandverkleidung[Die 2015]	Deckenverkleidung[Die 2015]

Bei der Umrüstung der Kabine eines Flugzeugs kommt es immer wieder zu Verzögerungen beim Einbau einzelner Elemente. Dies führt zu einer Verlängerung der Liegezeit eines Flugzeugs bis zu mehreren Wochen, wodurch hohe Kosten entstehen.

Die einzelnen Gründe, die zu diesen Verzögerungen führen, galten es in dem Projekt zu identifizieren und Konzeptlösungen für eine effizientere Umrüstung sowie Planung aufzuzeigen. Ein wesentlicher Grund, der zu den Verzögerungen führt, ist, dass Einbauschwierigkeiten häufig erst während der Montage im Flugzeug auftreten. In der Folge können auch anschließende Bauteile nicht eingebaut werden, und es kommt zu einem Montagestau. Weiter müssen Modifikationen durchgeführt oder Ersatzteile beschafft werden, die in vielen Fällen aufgrund vielen Einzelteile und Sonderanfertigungen nicht auf Lager sind.

Für die Vermeidung von Montageproblemen sowie Zeitverzögerungen werden Ansätze und Unterstützungselemente entwickelt, die zu einer Fehlervermeidung sowie Prozessbeschleunigung führen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit mit LHT wird zu dieser Thematik derzeit mit keiner anderen Stelle zusammengearbeitet.

2 Technischer Bericht

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Projektes in Anlehnung an die Planungsstruktur des Projekts in den 3 Arbeitspaketen dargestellt. Es wird ein Ausschnitt als Gesamtüberblick über das Projekt gegeben, wobei Details den jeweiligen Zwischenberichten zu entnehmen sind oder bei der TU angefordert werden können.

2.1 AP1 - Entwicklung alternativer Gesamtkonzepte für den schnellen Kabinenaustausch

Problemanalyse

Die Kabineninnenausstattung im Lebenszyklus eines Passagierflugzeuges wird in regelmäßigen Abständen von im Durchschnitt 5-7 Jahren ausgetauscht. Dabei werden Neuentwicklungen in die Kabine integriert und sich den stetig verändernden individuellen Anforderungen der Kunden angepasst. LHT führt sowohl diese Kabinenumrüstung als auch die dazugehörigen Instandhaltungsarbeiten durch.

Das Arbeitspaket AP 1 umfasst die Entwicklung alternativer Gesamtkonzepte, welche den schnellen Kabinenaustausch ermöglichen. Dies bildet die Grundlage zur Entwicklung neuer Konzepte für einen effizienteren Austauschprozess. Wie in der Vorhabensbeschreibung beschrieben, dient die IST-Analyse zudem dazu, die Forschungsrichtung für die darauffolgenden Arbeitspakete zu definieren. (siehe Vorhabensbeschreibung, S. 17). Der Umrüstprozess lässt sich wie in Bild 2-1 dargestellt, in zwei unterschiedlichen Hauptphasen einteilen.

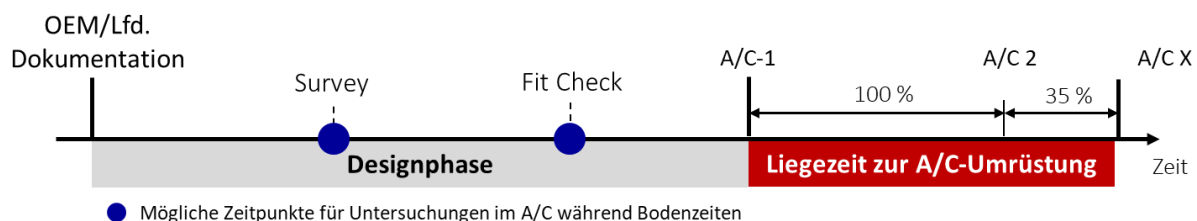


Bild 2-1: Kabinenaustauschprozess bei Lufthansa Technik

Designphase

Bei LHT beginnt die Umrüstung mit dem Design Engineering in der hier benannten Designphase. In der Designphase besteht das Ziel, eine zukünftige Flugzeugumrüstung vorzubereiten und Modifikationen am Kabineninterieur nach Wunsch von z.B. Airlines durchzuführen. Im Idealfall ist diese Phase bis zum Beginn der Liegezeit eines Flugzeugs abgeschlossen.

Ausgangspunkt für die Integration einer Modifikation von Kabinenelementen sind in der Regel Dokumente sowie technische Zeichnungen im 2D-Format. Diese umfassen den idealen Flugzeugzustand, wie er durch den OEM ausgeliefert wird. Weiter sind darunter auch in einzelnen Dokumenten die bei einem Flugzeug bereits stattgefundenen Modifikationen dokumentiert. Digitale CAD-Daten sind kaum verfügbar und vor allem nicht durchgängig für unterschiedliche Flugzeugausstattungen. Diese Daten könnten zum Teil zwar von LHT bei dem entsprechenden OEM erworben werden, was jedoch bei stetiger Durchführung die Wirtschaftlichkeit der Leistung durch LHT verringert. Außerdem repräsentieren diese Daten lediglich den idealen Auslieferungszustand ohne die Dokumentation flugzeugindividueller Modifikationen und Toleranzen. Hinzu kommen fehlerhafte Dokumentationen z. B. nicht angegebene Maße in den technischen Zeichnungen, die weitere Hindernisse und Informationsmängel darstellen.

Weitere Möglichkeiten seitens LHT an technische Informationen zu gelangen, bestehen durch sogenannte Surveys oder Fit Checks. Bei einem Survey erfolgt, wenn das Flugzeug für ein paar Stunden

(z. B. in der Nacht) steht, eine Untersuchung vor Ort durch einen Techniker mit Anweisung eines LHT-Ingenieurs. Die erhaltenen Informationen werden direkt telefonisch weitergeleitet oder ggf. durch Fotodokumentation festgehalten. Etwas ausführlicher hingegen ist der sogenannte Fit-Check. Dieser kann durchgeführt werden, wenn sich das Flugzeug in einem mehrere Tage dauernden Stopp, wie einer technischen Prüfung, befindet. Dann gibt es die Möglichkeit, dass LHT zum Standort reist und sogar kleinere Teilausbauten durchführt, um Informationen über Komponenten zwischen Rumpf und Kabinenstruktur zu erhalten.

Die beschriebene Ausgangssituation definiert wesentliche Prozesse zu Beginn der Designphase bei LHT. Die einzelnen Prozesse wurden in einem gemeinsamen Workshop mit Mitarbeitern von LHT erarbeitet. Die wesentlichen Prozesse in der Designphase sind:

- Recherche Flugzeugdokumentation inkl. OEM-Dokumente
- Bauzustand (Stand nach Modifikationen)
- Erstellung neuer Zeichnungen
- Bauteilqualifikation/Testen zur Nachweisführung
- Neu-/Eigenentwicklungen

Dabei stellen Rechercharbeiten bei LHT neben Konstruktion und Entwicklung in dieser Phase jedoch einen wesentlichen Teil dieser Phase aufgrund einer unzureichenden Informationslage dar. Ein wichtiges Problem, welches analysiert wurde, war die Beurteilung der zu notwendigen Datengenauigkeit. Es gibt Szenarien in denen eine Genauigkeit bei Positionsabgeben über 10 mm ausreichend ist, aber genauso bestehen Szenarien, z.B. für Spaltmaße, bei denen Genauigkeiten schätzungsweise im geringen Millimeterbereich gefordert sind. Beide Angaben sind allerdings Schätzwerte, da keine Erfahrung mit der Konstruktion auf Basis von 3D-Scan-Daten besteht.

Liegezeit

Die Liegezeit wird als die Zeit bezeichnet, in der das umzurüstende Flugzeug bei LHT vor Ort verfügbar ist. Zu Beginn der Liegezeit wird das Flugzeuginterieur zunächst in bis zu 5 Tagen ausgebaut. Die ausgebauten Teile werden analysiert und beschädigte Komponenten werden ausgetauscht. In der Folge werden im leeren Flugzeug Stellproben großer Kabinenkomponenten, wie der neu einzubauenden Momente, durchgeführt. Dadurch sollen schon frühzeitig Fehler erkannt und ein u. U. nötiger Änderungsprozess angestoßen werden.

Grundsätzlich erfolgt die Montage durch manuelle Arbeitsschritte. Die Einbausituation ist in Bild 2-2 dargestellt. Im Flugzeug entstehen während des Einbaus viele verschiedene Arbeitsplätze, an denen die Monteure parallel den Ausbau und Einbau manuell durchführen.



Bild 2-2: Analyse der Montageprozesse bei LHT - A330

Aufgrund der bei LHT teilweise unvollständig vorliegenden Datenbasis, mit der die Kabinenumrüstung geplant wird, kommt es häufig zu Problemen beim Einbau von Kabinenausstattungen während der Liegezeit. Dabei werden Fehler häufig erst bei der Montage durch physikalischen Kollisionsanalysen im Flugzeug entdeckt.

Die Monumente, wie z.B. eine Lavatory, müssen dazu in die Kabine gebracht werden, was einen erheblichen Mehraufwand darstellt, wenn das Monument in der ursprünglichen Form nicht eingebaut werden kann. Erst während der Liegezeit können auf diese Weise Fehler entdeckt und Änderungsprozesse angestoßen werden. Dies führt zu einer Verlängerung der Liegezeit. Wie in Bild 2-1 angedeutet, verkürzt sich jedoch die Planliegezeit mit steigender Anzahl an Umrüstungen der gleichen Flugzeugvariante einer Airline wie hier im Beispiel um 65%. Änderungen können für weitere Umrüstungen der Kabine des gleichen Flugzeug- und Kabinentyps übernommen werden und neue Änderungen sind nur noch in geringer Anzahl notwendig. In dem analysierten Beispiel überstieg die Dauer der ersten Liegezeit jedoch die Planliegezeit um ca. 50%.

Entwicklung von Lösungsansätzen

Für neue Lösungskonzepte ergeben sich verschiedene Anforderungen, die je nach Modifikationsprojekt variieren können. Dies resultiert zum einen aus den begrenzten Zugangsmöglichkeiten und -zeiten, die z.B. je Airline variieren. Zum anderen können je nach Modifikationsgrad unterschiedliche Anforderungen an die Messgenauigkeit vorliegen.

Für unterschiedliche Szenarien mit jeweils anderen Anforderungen wurden in dem Vorhaben zwei Ansätze verfolgt und entwickelt. Die entwickelte Grundidee beider Ansätze basiert darauf, moderne 3D-Scanner als Messgeräte für die Aufnahme des Ist-Zustandes eines Flugzeugs zu verwenden. Der Einsatz mobiler Geräte flexibilisiert die Verwendung und erhöht damit die Erfolgsaussichten für die Anwendung bei der Flugzeugmodifikation. Die Unterschiede der beiden empfohlenen Ansätze werden im Folgenden erläutert und zielen darauf ab, bedarfsgerecht neue Informationsmöglichkeiten für die Kabinenplanung zu bieten. Beide Ansätze fokussieren die Umsetzung mobiler Detailscans, wobei sich die Einsatzmöglichkeiten nicht widersprechen, sondern komplementär sind und sich entsprechend bedarfsabhängig gegenseitig ergänzen.





Ansatz 1: AR Digitalisierungssystem	Ansatz 2: HQ Digitalisierungssystem
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frühzeitige und schnelle Problemdetektion mittels Augmented Reality ▪ Frühzeitige und schnelle Informationsbeschaffung und Digitalisierung <p>  Hohe Verfügbarkeit, schnell  Begrenzte Genauigkeit </p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hochauflösender 3D-Scan zur Problemdetektion ▪ CAD-unterstützte Interferenzanalyse für Konstruktionsänderungen <p>  Hohe Genauigkeit  Geringere Verfügbarkeit </p>

Bild 2-3: Lösungskonzepte zur Verbesserung und Beschleunigung des gesamten Umrüstprozesses

AR Digitalisierungssystem - Ansatz 1:

Im ersten Ansatz kommt ein Augmented Reality-System zum Einsatz, mit dem in der Flugzeugkabine virtuell überprüft werden kann, ob sich Komponenten wie Anschlusselemente an der richtigen Position befinden oder ob der Bauraum für ein einzubauendes Kabinenelement zur Verfügung steht. Voraussetzung dafür ist ein digitales 3D-Planungsmodell. Mit dem System können schnell und frühzeitig auftretende Probleme erkannt und digital dokumentiert werden. Diese Dokumentation kann durch 3D-Scans, die mittels des AR-Systems aufgenommen werden können, ergänzt werden. Die anschließende Modifikations- und Umrüstungsplanung kann dann auf aktuellen Ist-Daten in 3D stattfinden, was die

Planungssicherheit deutlich erhöht. In einer anschließenden Bauraumanalyse können damit alternative Lösungskonzepte erarbeitet werden.

Damit das System möglichst frühzeitig einsetzbar ist, auch bereits während der Designphase z.B. in den Surveys, ist das System hochmobil. So kann es an vielen Standorten verfügbar sein. Daher fokussiert sich der Ansatz auf kostengünstige, hochmobile Systeme. Im Abschnitt zu AP 2 wird der Ansatz im Detail erläutert.

Prinzipbedingt kann der AR-Ansatz nur eine begrenzte Genauigkeit aufweisen. Ein Ansatz, mit dem sich lokal hochgenaue Daten erfassen lassen, aber aufgrund der Randbedingungen (Kosten, Zeit) nur ergänzend zu Ansatz 1 in den Gesamtprozess integrieren lässt, bietet der Einsatz von hochgenauen (HQ) Digitalisierungssystemen.

HQ Digitalisierungssystem - Ansatz 2:

Beim zweiten Ansatz kommt ein hochauflösendes 3D-Scan-System zum Einsatz, der eine wesentliche höhere Genauigkeit hat. Allerdings kann mithilfe dieser Technologie keine parallele AR-Funktion realisiert werden, um z. B. parallele Kollisionsanalysen vor Ort durchzuführen. Diese erfolgen im Post-Processing. Im Anschluss daran ist für konstruktive Änderungen eine höhere Datensicherheit gegeben, für die fallabhängig dann eine exakte Konstruktion mit geringerem Änderungsgrad als in Ansatz 1 durchgeführt werden kann. Allerdings sind diese hochauflösenden Scanner sehr hochpreisig und deren Anwendung erfordert mehr Vorkenntnis, so dass die Wirtschaftlichkeit der Verfügbarkeit an mehreren Standorten bedarfsabhängig geprüft werden muss. Für die Bearbeitung und Analyse der Messdaten sind zusätzliche Schritte und Tools notwendig. Dies wird in AP 3 näher dargestellt und erläutert.

Digitale Bibliothek

Zusammen mit den entwickelten Lösungsansätzen bestätigten die Ergebnisse aus der IST-Analyse insgesamt noch einmal deutlich, wie wichtig zentralisierte 3D Daten für die Kabinenmodifikation sind. Bei LHT gibt es noch weitere Quellen von digitalen 3D-Daten. Dabei handelt es sich insbesondere um stationäre Großraumscans, die LHT schon in anderen Fachbereichen und mittlerweile in geringem Maße auch schon für Linienflugzeug durchführt. Zudem existieren partiell 3D-CAD-Daten von Kabinenbauteilen oder Rumpfsegmenten, die für die Erzeugung von Planmodellen verwendet werden können. Ziel ist es daher, alle Daten zentral zur Verfügung zu stellen und für eine flexible Erweiterungsmöglichkeit zu sorgen. In der folgenden Abbildung sind die nach aktuellem Stand bereitgestellten Daten dargestellt.

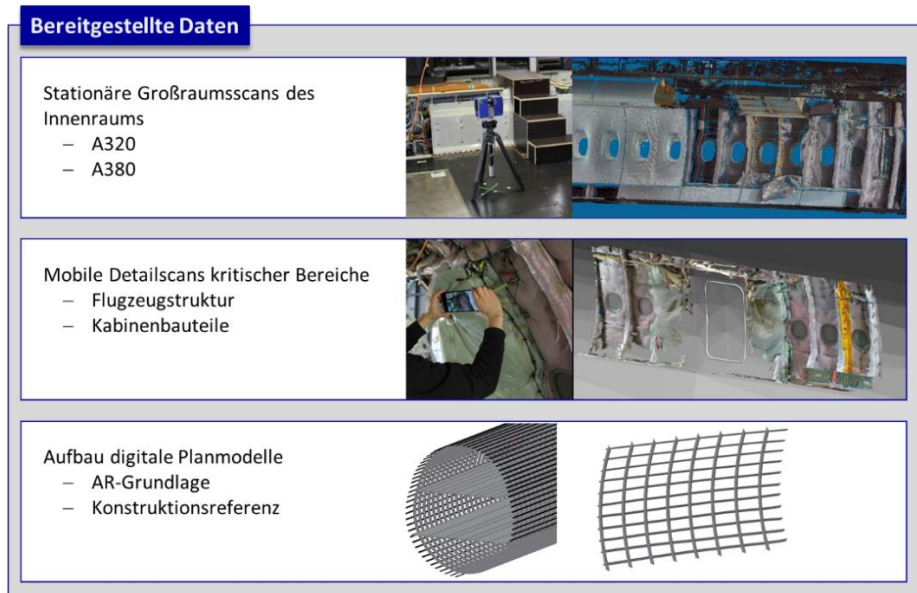


Bild 2-4: Digitale Datenbibliothek – Darstellung möglicher 3D-Daten als Grundlage für die Planung der Kabinenumrüstung

Automatische Zu- und Abführung

In diesem Arbeitspaket ging es darum, ein Konzept zu entwickeln, mit dem die Zu- und Abführung von Kabinenelementen durch Automatisierung optimiert werden kann. Dazu wurden zunächst die bestehenden Transportprozesse bei LHT analysiert.

Bei LHT wird bereits ein System eingesetzt, mit dem Kabinenelemente autonom von einem zentralen Lager auf Abstellbereiche in der Nähe des Flugzeugs transportiert, und von dort aus wieder abtransportiert werden.

Folgende Abbildung zeigt eines der verwendeten autonomen Transportfahrzeuge für die Zu- und Abführung von Kabinenelementen. Außerdem ist das zentrale Lager für Kabinenelemente dargestellt.



Bild 2-5: Autonomes Transportfahrzeug bei LHT (links); zentrales Lager für Kabinenelemente (rechts)

Die Abstellbereiche, auf denen die Kabinenelemente in der Nähe des Flugzeugs abgestellt werden, sind in folgender Abbildung dargestellt.



Bild 2-6: Abstellbereiche für Kabinenelemente

Von den in diesen Abstellbereichen abgestellten Transportwagen, auf denen sich die Kabinenelemente befinden (nicht in der Abbildung), werden die Kabinenelemente manuell entnommen, ausgepackt und in das Flugzeug getragen bzw. geschoben.

Die in der Analyse der aktuellen Transportprozesse ergebenden Transportwege sind in folgenden Abbildungen dargestellt:

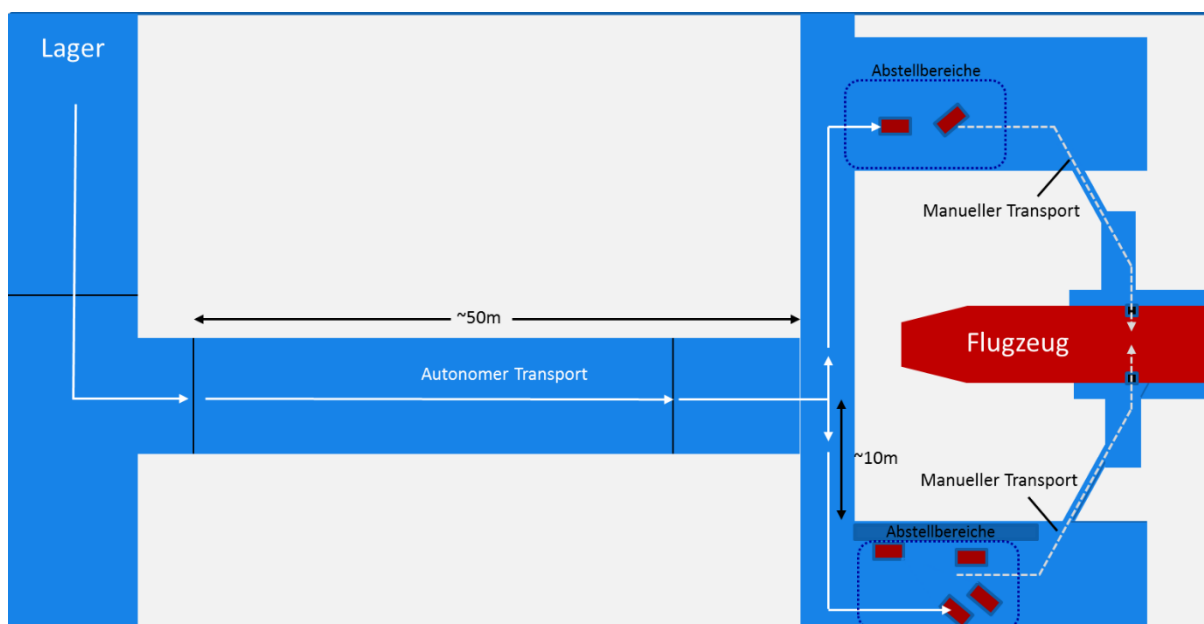


Bild 2-7: Transportwege für die Zuführung von Kabinenelementen

Wie in der Abbildung dargestellt, ist der Transport der Kabinenelemente bereits weitgehend automatisiert. Lediglich auf den letzten ca. 15-20% der Transportwege, zwischen den Abstellbereichen und dem Flugzeug, erfolgt der Transport manuell.

Damit autonome Transportfahrzeuge direkt ans oder ins Flugzeug fahren können, müssen zunächst Hindernisse beseitigt werden. Derzeit befinden sich z. B. Treppen auf dem Weg zwischen den Abstellbereichen zum Flugzeug. Für die Verwendung von autonomen Transportfahrzeuge muss somit die Infrastruktur angepasst werden

Die derzeitig verwendeten Transportfahrzeuge sind aufgrund des schmalen Zugangs zum Flugzeug und dem begrenzten verfügbaren Raum nicht geeignet, die Kabinenelemente signifikant näher an das Flugzeug zu transportieren. Es ist somit notwendig, für den letzten Transportabschnitt kleinere Transportfahrzeuge zu verwenden. Dies erfordert ein manuelles Umladen der Kabinenelemente von dem bisherigen Transportfahrzeug auf das kleinere Transportfahrzeug.

Da die Kabinenelemente in der Regel zum Schutz verpackt sind und somit ausgepackt werden müssen, bleibt dieser manuelle Prozessschritt bestehen.

Dass ein autonomer Transport des letzten Abschnitts die Prozesszeit der Zu- und Abführung signifikant verkürzt, wenn dabei eine manuelle Entnahme vom bisherigen Transportfahrzeug, manuelles Auspacken von Kabinenelementen und manuelles Beladen der benötigten kleineren Transportfahrzeuge vorgenommen werden muss, wird als nicht realistisch bewertet.

Aus den Gründen, dass für die Automatisierung des letzten Transportabschnittes zum einen ein hoher Umrüstaufwand entsteht (Anpassung der Infrastruktur, Beschaffung und Einrichtung neuer Transportfahrzeuge), zum anderen die Automatisierung wenn überhaupt nur geringen Mehrwert liefert, wurde auf eine weitere Ausarbeitung eines Automatisierungskonzeptes verzichtet. Anstatt dessen soll das bestehende autonome Transportsystem in das in diesem Projekt entwickelte Konzept der schnellen Kabinenumrüstung integriert werden.

Wie beschrieben, soll mittels mobilem AR-Digitalisierungssystem in der Flugzeugkabine virtuell überprüft werden können, ob es zu Problemen beim Einbau von Kabinenelementen kommt. Wird festgestellt, dass ein Einbau ohne Modifikation durchgeführt werden kann, soll über das verwendete mobile Endgerät das Kabinenelement für den Einbau angefordert werden können. So kann das Kabinenelement dann bereitgestellt werden, wenn es in die Flugzeugkabine eingebaut werden soll.

Auch für den Fall, dass es auf Basis der Ergebnisse des AR-Digitalisierungssystems notwendig ist, ein Kabinenelement zu vermessen oder zu modifizieren, kann über die Anwendung eine automatisierte Bereitstellung eines Kabinenelements angefordert werden.

Entwicklung einer 3D-Simulation

Im diesem Arbeitspaket ging es darum, das erarbeitete Konzept zu visualisieren und die mögliche Umsetzbarkeit zu zeigen. Das auf Grundlage der Prozessanalyse in AP 1.2 und 1.3 erarbeitete Konzept zum schnelleren Kabinenaustausch basiert auf einer schnellen Fehlererkennung mittels Augmented Reality und 3D-Scanning-Verfahren. Zur Validierung der Umsetzbarkeit des Konzepts sind 3D-Simulationen nicht ausreichend. Zentrale Komponenten wie die Lokalisierung des Endgerätes in der Flugzeugkabine sowie der menschenzentrierte Vergleich von angezeigtem Planungsmodell mit dem Istzustand und seine Bewertung können durch 3D-Simulationen nur unzureichend abgedeckt werden. Somit wird der Fokus der Validierung auf realitätsnahe Praxisversuche gelegt.

Zur Durchführung der Versuche wurde an der TUHH ein Flugzeug-Kabinendemonstrator aufgebaut. Dieser soll die relevanten Komponenten in der Kabine möglichst real nachbilden und dazu dienen, Versuche zu den einzelnen Arbeitspunkten durchführen zu können und entwickelte Lösungen validieren und optimieren zu können.

Nachfolgende Abbildung zeigt den Kabinendemonstrator.



Bild 2-8: Kabinendemonstrator an der TUHH

Der Kabinendemonstrator besteht zu großen Teilen aus bereits vorhandenen Komponenten (Rumpf-Grundgerüst, Flugzeugpanel sowie Kabinenelementen). Für den Aufbau des Demonstrators wurde das Flugzeugpanel in das Rumpfgrundgerüst integriert und ein dem Flugzeugboden nachgebildeter Boden inklusive Sitzschienen installiert.

2.2 AP2 - Entwicklung eines Justagesystems zur Kompensation der geometrischen Toleranzen bei der Montage von Kabinenelementen

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass der aus dem Projektantrag stammende Begriff „Justagesystem“ nach der Analyse- und Konzeptphase nicht mehr passend für das Arbeitspaket ist. Ein besserer Begriff lautet „AR-Digitalisierungssystem“, welcher in diesem Bericht verwendet wird.

Das in dem Forschungsprojekt adressierte Kernproblem lässt sich auf den nicht genau bekannten Ist-Zustand der Flugzeugstruktur zurückführen. Aufgrund dieser Abweichungen kann keine fehlerfreie Planung der Kabinenumrüstung erfolgen, sodass letztendlich zeitaufwendige und kostenintensive Nacharbeiten erforderlich werden.

Ziel von AP2 ist die Entwicklung eines Systems, mit dem die Abweichungen frühzeitig erkannt werden können und die relevanten Informationen über den Ist-Zustand in die Planungsdatenbasis zurückgeführt werden können.

Aufgrund der spezifischen Randbedingungen dieser frühzeitigen Informationsgewinnung (kurze Liegezeiten, hohe Mobilität etc.) ist ein hocheffizientes System erforderlich. Dazu wurde in diesem AP ein AR-Digitalisierungssystem entwickelt, das die Anforderungen und Randbedingungen der Anwendung erfüllt.

2.2.1 Systems zur Erfassung der Flugzeugkabinenstruktur

Um die Qualität der Planungsdatenbasis zu verbessern, sieht das erarbeitete Konzept vor, mittels eines Augmented Reality-Systems Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Zustand zu ermitteln und Informationen über den tatsächlichen Ist-Zustand zu gewinnen. Die einzelnen Funktionalitäten werden anhand folgender Abbildungen erläutert.



Bild 2-9: Visualisierung des Augmented Reality-Konzeptes

Zunächst sollen dem Anwender mittels Augmented Reality auf dem Bildschirm des Endgerätes Modelle von Kabinenelementen (z. B. Flugzeugküchen) oder das Planungsmodell des erwarteten Zustands ortsbezogen mit dem Kamerabild überlagert angezeigt werden können.

Durch die Überlagerung eines virtuellen Modells eines Kabinenelementes kann der Anwender prüfen, ob und wo es zu Einbauproblemen z. B. durch Kollisionen kommen kann (visuelle Kollisionskontrolle), und somit einen virtuelle Stellprobe (virtueller Fit Check) vor Ort durchführen (siehe Bild 2-9 a)).

Durch die Überlagerung des Planungsmodells des erwarteten Zustands können weiterhin Abweichungen zwischen erwarteten und Ist-Zustand identifiziert werden (siehe Bild 2-9 b) und c)).

So kann er z. B. erkennen, ob Elemente in der Realität vorhanden sind, die im Planungsmodell fehlen. Umgekehrt kann er erkennen, ob im Planungsmodell Elemente vorhanden sind, die in der Realität fehlen (Anwesenheitskontrolle).

Weiterhin kann er durch die Überlagerung des Planungsmodells mit der Realität erkennen, ob die Positionen von erwarteten Elementen in der Flugzeugkabine mit der Realität übereinstimmen (Positionskontrolle).

Das Konzept sieht vor, dass der Anwender vor Ort das erwartete Planungsmodell verifizieren, korrigieren und ergänzen kann. Dazu ist eine Reihe von Funktionen vorgesehen.

Verifikation

Damit nach der Informationsaufnahme bekannt ist, welche Elemente des Planungsmodells mit dem Ist-Zustand übereinstimmen, soll der Anwender diese Information hinterlegen können. In der Benutzeroberfläche des Endgerätes kann dies über einfache Text- oder Button-Eingabe erfolgen.

Korrektur und Ergänzung

Für Bereiche des Planungsmodells, die nicht mit der Realität übereinstimmen, gibt es verschiedene Ansätze zur Korrektur und Ergänzung.

Für Strukturelemente, wie Halter, deren Geometrien in 3D-Modellen hinterlegt sind, kann bei Positionsabweichungen das Modell über geometrische Transformationen manuell durch den Anwender an die korrekte Position des Ist-Zustandes positioniert werden.

Fehlt ein solches Element im Planungsmodell, kann der Anwender dieses ebenfalls durch eine geometrische Transformation des 3D-Modells im Planungsmodell an der korrekten Position ergänzen (siehe Bild 2-9 d)).

Objekte oder Bereiche, zu denen keine 3D-Modelle verfügbar sind, lassen sich mittels 3D-Scans durch die im Endgerät integrierte 3D-Sensorik erfassen. Die aufgenommenen 3D-Scans müssen mit Ortsbezug aufgenommen werden, sodass sie in der späteren Planung konsistent mit bestehenden Planungsmodellen und der Flugzeugdokumentation sind.

Objekte, die aufgrund ihrer Komplexität weder durch das virtuelle Positionieren von 3D-Modellen noch durch das Aufnehmen von 3D-Scans zuverlässig erfasst werden können, wie z. B. elektrische Leitungen, können mittels AR nachmodelliert, und so im Planungsmodell hinterlegt werden. Dazu können durch den Anwender z. B. virtuelle 3D-Punkte an die Objekte konstruiert werden, die die Geometrie des Objektes nachbilden. Im Falle von elektrischen Leitungen kann so ihr Verlauf nachgebildet werden (siehe Bild 2-9 e)). Durch weitere Eingaben soll der Anwender Zusatzinformationen hinterlegen können, im Fall von Leitungen z. B. ihre Durchmesser.

Als zusätzliche unterstützende Maßnahme für die Planung ist das Hinterlegen von Fotos vorgesehen, sodass der planende Ingenieur eine visuelle Referenz von Objekten hat. Mit jedem Foto sollte auch eine Ortsinformation gespeichert werden, sodass bekannt ist, aus welcher Position im Flugzeug das Foto aufgenommen wurde (siehe Bild 2-9 f)).

Die beschriebenen Funktionen wurden zunächst in einer Applikation für das mobile Endgerät Lenovo Phab2 umgesetzt. Das Endgerät läuft mit einem Android-Betriebssystem. Es ist mit der *Google Tango*-Technologie ausgestattet, welche die kontinuierliche Positionsverfolgung („Tracking“) mittels visueller Odometrie ermöglicht, und somit die Grundvoraussetzung für Augmented Reality-Anwendungen erfüllt. Zudem ist es mit einem 3D-Sensor ausgestattet, mit dem in der Umgebung 3D-Scans durchgeführt werden können.

Die Applikation greift auf eine Vielzahl von Bibliotheken zurück. So dient die OpenGL-Bibliothek z. B. unter anderem dazu, 3D-Modelle während der Bewegung des Anwenders perspektivisch korrekt an ihren Positionen darzustellen. Für die Verarbeitung von aufgenommenen 3D-Punktwolken wird die Point Cloud-Bibliothek (PCL – *Point Cloud Library*) eingesetzt.

Die Benutzerinteraktion erfolgt in der ersten Version hauptsächlich anhand von sogenannten Radio-Buttons und Schaltflächen, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt.

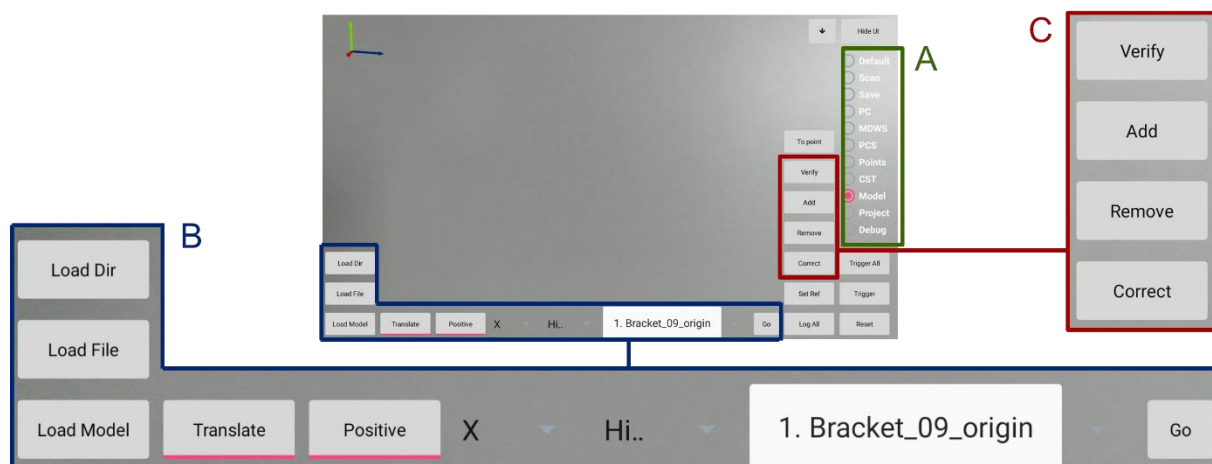


Bild 2-10: Benutzeroberfläche der AR-Applikation [Den20]

Mit den Radio-Buttons in Bereich (A) können verschiedene Funktionen der Anwendung aufgerufen werden, wie z. B. zur Einmessung oder zur Planungsmodell-Überprüfung. Letzteres ist in der Abbildung ausgewählt. Die Teilfunktionen zum Laden und Manipulieren eines Modells sind in Bereich (B) dargestellt. Mit den Schaltflächen in Bereich (C) kann der Anwender das ausgewählte Objekt entsprechend seinem Zustand in der Planungsdatenbasis dokumentieren. So kann er z. B. ein dort hinterlegtes Objekt verifizieren oder der Planungsdatenbasis hinzufügen.

Im Verlauf des Projekts wurde weiterhin eine Benutzerführung integriert, durch die die Benutzerfreundlichkeit und Effizienz des AR-Digitalisierungssystems erhöht wurde.

Die beschriebene Durchführung von virtuellen Fit Checks ist in der folgenden Bildschirmaufnahme der AR-Applikation dargestellt.

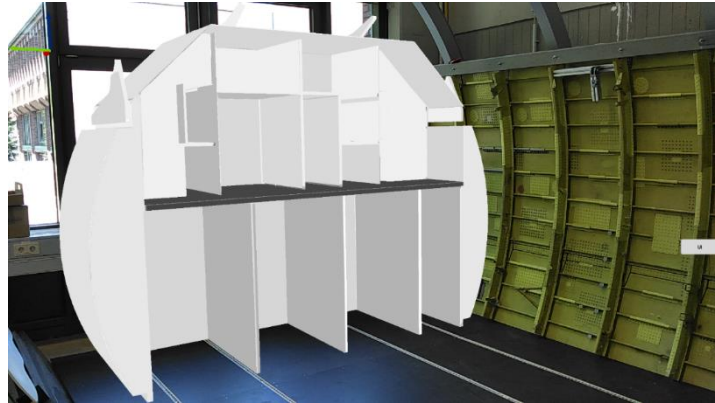


Bild 2-11: Überlagerung der Realität mit einem Galley-Modell zur Durchführung von virtuellen Fit Checks [Den20]

Der Anwender kann auf dem Gerät überprüfen, ob und wenn wo es zu Einbauproblemen kommen könnte, und dies entsprechend dokumentieren. Eine beispielhafte Durchführung und Auswertung des virtuellen Fit Checks wird im Abschnitt 2.2.5 dargestellt.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Umsetzung von Funktionen des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Konzeptes zur Abweichungserkennung und Ergänzung des Planungsmodells

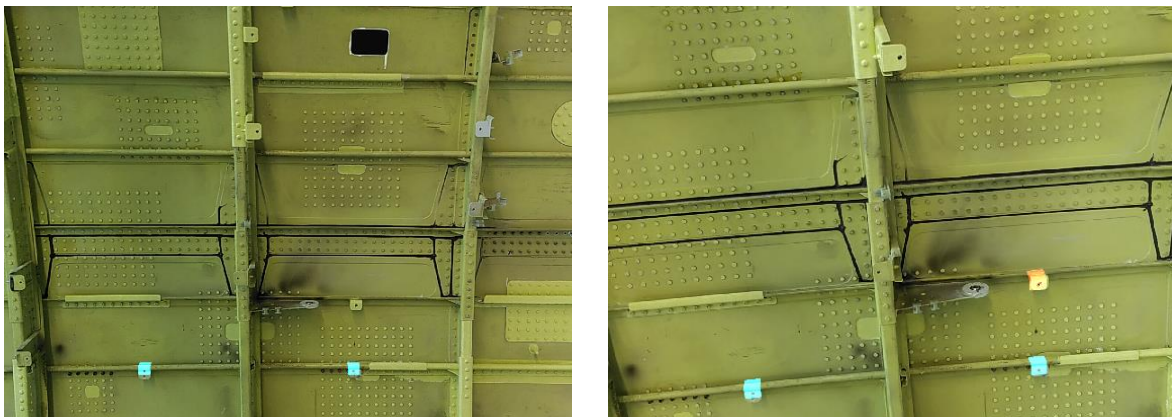


Bild 2-12: Überlagerung der Realität mit Halter-Modellen (links); Ergänzung des Planungsmodells um fehlenden Halter (rechts)

Auf der linken Bildschirmaufnahme der AR-Anwendung in Bild 2-12 ist die Einblendung von erwarteten Haltern an der Flugzeugstruktur dargestellt. Da sich in dem dargestellten Szenario ein Halter in der Realität befindet, welches nicht im Planungsmodell enthalten ist, wurde dieses durch den Anwender ergänzt (siehe Bild 2-12 rechts).

2.2.2 Geometrische Erfassung von Kabinenelementen

Die geometrische Erfassung von Kabinenelementen hat für die adressierte Problemstellung verschiedene Zwecke. Zum einen kann das aus der geometrischen Erfassung aufbereitete Modell von Kabinenelementen direkt für die konstruktive Planung verwendet werden. So kann z. B. die Einbauposition des Elements und die benötigten Modifikationen geplant werden.

Weiterhin kann das Modell zur Visualisierung in Augmented Reality verwendet werden. So können Stellproben im Flugzeug virtuell durchgeführt werden, ohne dass das Kabinenelement vor Ort sein muss. Dies würde zu deutlichen Zeit- und Kosteneinsparungen führen, welche derzeit ein großes Hindernis für die Durchführung von physischen Stellproben ist.

Die im Projekt erarbeiteten und ausgewählten Digitalisierungsansätze basieren auf mobile Systeme, die ein markerloses Tracking verwenden. Dies ist sowohl beim AR-Digitalisierungsansatz als auch bei dem ausgewählten und beschafften handgeführten 3D-Scan-System *Artec EVA* der Fall, bei dem das Tracking dafür verwendet wird, die laufend aufgenommenen 3D-Scans zueinander registrieren zu können. Das markerlose Tracking erlaubt eine sehr flexible Einsetzbarkeit und geringe Einrichtzeiten, wie sie für die adressierte Problemstellung benötigt wird. Für die geometrische Erfassung der Kabinenelemente bringt dieses Trackingverfahren einige Herausforderungen mit sich. So müssen Kabinenelemente von allen Seiten erfasst werden, um diese zu digitalisieren. Auch beim Übergang zwischen den Seiten des Kabinenelement, z. B. wenn der Anwender beim kontinuierlichen Scanvorgang von der Fronseite zur linken Seite des Kabinenelements übergeht, sollte robustes und genaues Tracking gewährleistet sein, damit es zu keinen Verzerrungen der Scandaten kommt, und die benötigten Nacharbeitungsschritte zur Modellaufbereitung effizient durchgeführt werden können. Außerdem sind größere einfarbige Flächen für markerloses Tracking problematisch, da dort kaum natürliche Merkmale für das Tracking herangezogen werden können.

Für die geometrische Erfassung der Kabinenelemente kommt einerseits das entwickelte AR-Digitalisierungssystem in Frage. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Funktionen können neben der Erfassung des Istzustands der Flugzeugstruktur auch zur Erfassung von Kabinenelementen genutzt werden. Für die Erfassung von Kabinenelementen sind vor allem die Vermessung der Schnittstellen-Positionen sowie die Bauteil-Kontur relevant. Mit dem AR-System, das um einen 3D-Scan-Sensor erweitert ist, kann das Bauteil in 3D eingescannt und so die Bauteil-Kontur erfasst werden. Zusätzlich kann der Anwender die Schnittstellenpositionen separat mit einer integrierten interaktiven Messfunktion ableiten und dokumentieren.

Andererseits wurde auch der hochauflösende Digitalisierungsansatz auf Basis von 3D-Scan-Systemen betrachtet. Die geometrische Erfassung von Kabinenelementen kann ggf. auch unabhängig von der Begehbarkeit eines Flugzeuges erfolgen, z. B. wenn diese eingelagert sind oder sich im Bereitstellungsprozess befinden, sodass hier die Randbedingungen den Einsatz dieses Digitalisierungssystems zulassen. Mit diesem ist eine signifikante höhere Genauigkeit zu erwarten (eine Analyse der Genauigkeiten von 3D-Scan-Systemen wird im Abschnitt zu AP3 vorgestellt).

Im Rahmen des Projekts wurde für beide Ansätze erprobt, ob die jeweils eingesetzten Trackingverfahren einen effizienten Scanvorgang ermöglichen. Für die Aufbereitung der Scandaten zu den 3D-Modellen wurden Datenaufbereitungsverfahren untersucht und angewendet. Zu der Aufbereitung gehört u. a. die Reduzierung von Rauschen und Fehlstellen in Scan-Rohdaten, die Vernetzung zur Generierung eines Oberflächenmodells, die Ausrichtung und Texturierung. Insbesondere für Kabinenmodelle, die mit dem hochauflösenden Digitalisierungsansatz erstellt wurden, wurde weiterhin erprobt, ob sich diese dann im entwickelten AR-Digitalisierungssystem nutzen lassen.

Bei der Durchführung des Scanvorgangs stellte sich heraus, dass die ebenen Flächen durchaus ein Problem für das Tracking der eingesetzten Systeme darstellten. Die Anbringung einiger farbiger Aufkleber schaffte hier Abhilfe. Der Übergang zwischen den einzelnen Seiten dagegen verlief ohne Probleme.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Durchführung des Scanvorgangs am Beispiel eines Flugzeugküchen-Mockups, welches von LHT für die Erprobung der Digitalisierungsverfahren zur Verfügung gestellt wurde.

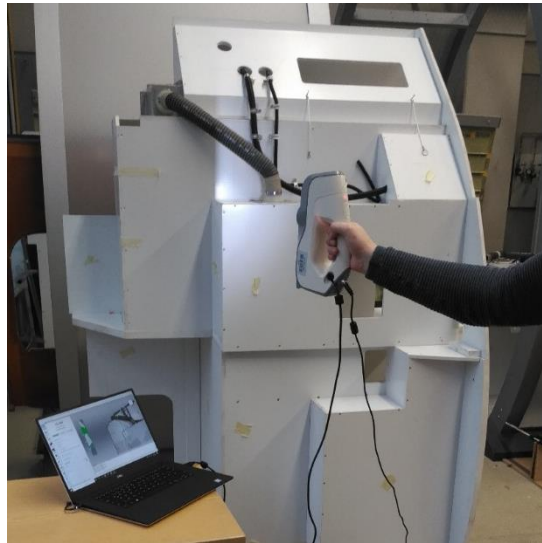


Bild 2-13: Durchführung des Scanvorgangs zur geometrischen Erfassung des Kabinenelements

Zur Durchführung des Scanvorgangs ist noch anzumerken, dass man mit den verwendeten Geräten nicht die kleineren Fächer des Kabinenelements erreichen kann, sodass diese nur unvollständig erfasst werden. Dies ist allerdings für die vorliegende Anwendung unproblematisch, da vor allem die Außenkontur und außenliegende Elemente für die Planung und Überprüfung der Einbaubarkeit von Bedeutung sind.

Nachfolgende Abbildung zeigt das nach dem Datenaufbereitungsprozess resultierende 3D-Modell.

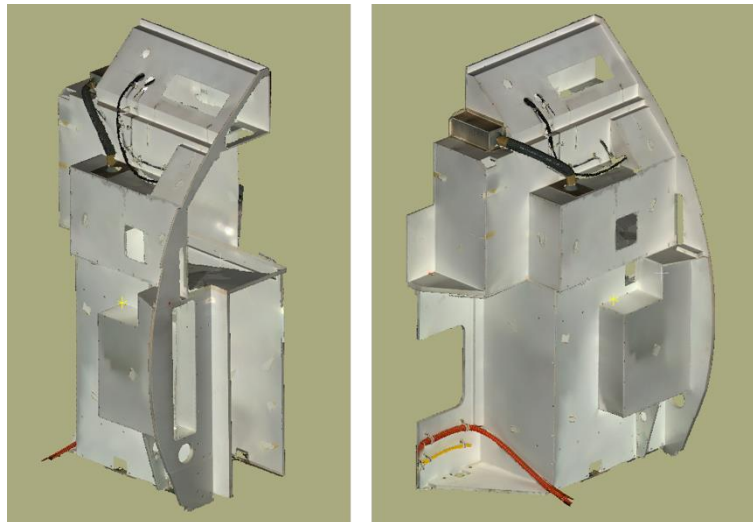


Bild 2-14: Aufbereitetes 3D-Modell des mit dem 3D-Scan-System digitalisierten Kabinenelements

Zum Vergleich sind in der nachfolgenden Abbildung z. T. bereinigte, aber nicht aufbereitete Rohdaten desselben Kabinenelements zu sehen, das hier mit dem AR-Digitalisierungsansatz erfasst wurde.

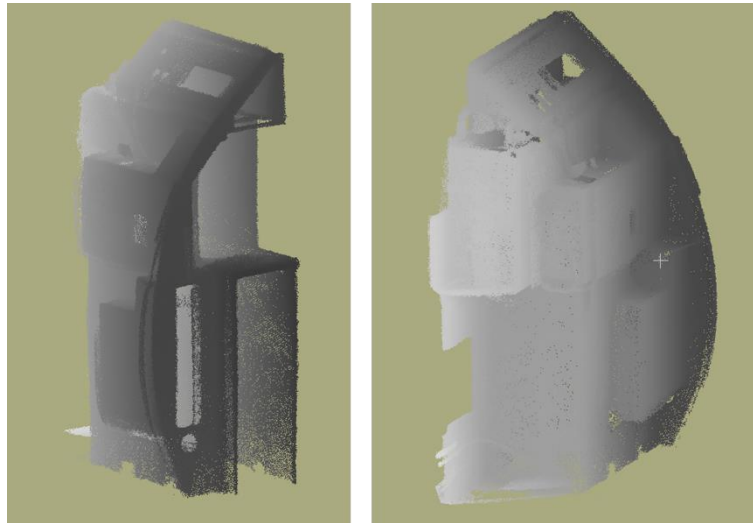


Bild 2-15: Rohdaten (z. T. bereinigte Punktwolke) des mit dem AR-Digitalisierungssystem erfassten Kabinenelements

Die Nutzbarkeit des in Bild 2-14 dargestellten Modells im AR-Digitalisierungssystem, z. B. zur Durchführung von virtuellen Stellproben im Flugzeug, wurde erprobt.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Visualisierung des Modells im AR-System.



Bild 2-16: Darstellung des 3D-Modells im AR-Digitalisierungssystem

In Bild 2-16 sieht man außerdem direkten Vergleich des 3D-Modells mit realen Kabinenelementen.

Die Versuche zeigten, dass das 3D-Modell für die Verwendung im AR-Digitalisierungssystem genutzt werden können. Auch bei der Visualisierung des komplexen 3D-Modells funktioniert die Anwendung stabil und flüssig. Zudem erlaubt die Texturierung des Modells eine annähernd realistische Darstellung, was in der Abbildung besonders an den Schläuchen erkennbar ist.

2.2.3 Positionsbestimmung / Lokalisierung

Die Positionsbestimmung des AR-Digitalisierungssystems lässt sich in Absoluteinmessung und Positionsverfolgung einteilen. Bei der Absoluteinmessung wird das System in das Flugzeugkoordinatensystem eingemessen, sodass Planungsmodelle an ihrer korrekten Position im Flugzeug eingeblendet und alle aufgenommenen Informationen in Bezug auf das Flugzeugkoordinatensystem gewonnen werden können.

Nachfolgende Abbildung zeigt die grundsätzliche Ausrichtung der Koordinatenachsen des Flugzeugkoordinatensystems, wie es in der Flugzeug-Wartung verwendet wird. Zusätzlich sind die Bezeichnungen von Orientierungswinkel eingezeichnet, die bei der weiter unten beschriebenen Evaluation von Bedeutung sind.



Bild 2-17: Ausrichtung der Koordinatenachsen des Flugzeugkoordinatensystems

Die X-Achse verläuft mittig entlang der Flugzeug-Längsachse und zeigt in Richtung des Flugzeug-Hecks. Die Z-Achse steht senkrecht auf der Ebene des Flugzeugbodens und zeigt nach oben. Die Y-Achse ergänzt entsprechend das Koordinatensystem.

Die Positionsverfolgung ist notwendig, damit das mobile Endgerät seine Position verändern kann und dabei seinen Bezug zum eingemessenen Flugzeugkoordinatensystem beibehält.

Das zu entwickelnde Positionsbestimmungssystem sollte eine genaue, aber auch schnelle und benutzerfreundliche Lokalisierung im Flugzeug ermöglichen. Das erarbeitete Konzept zur Absoluteinmessung sieht zunächst eine Grobeinmessung in das Flugzeugkoordinatensystem vor. Nach der Analyse- und Konzeptionsphase wurden vor allem zwei Konzepte für die Grobeinmessung ausgearbeitet und umgesetzt.

Konzept 1: Einmessung anhand von bekannten Referenzpunkten

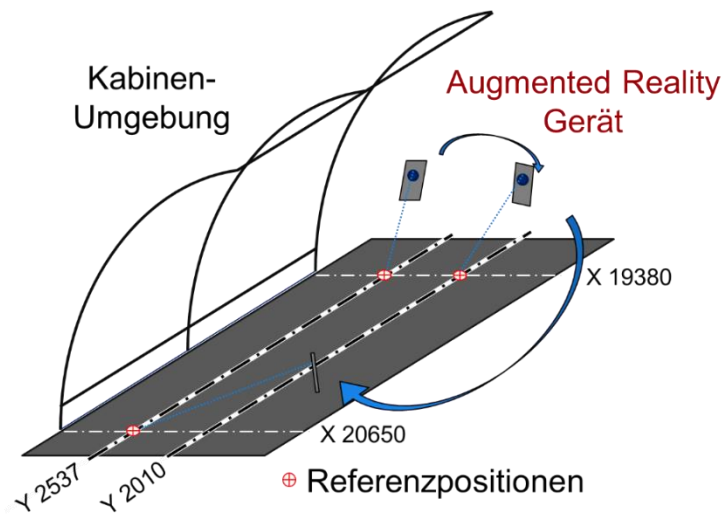


Bild 2-18: Manuelle Einmessung in der Flugzeugkabine anhand von Referenzpositionen [Den20]

Der Anwender wählt auf dem Endgerät verschiedene 3D-Positionen im Raum aus, deren Positionen im Flugzeugkoordinatensystem bekannt sind. Hierzu eignen sich z. B. die Datumspunkte auf den Sitzschienen, oder Bodenankerbündel für Kabinenelemente. Der Anwender weist den ausgewählten Positionen die Koordinaten dieser Referenzpunkte zu. Durch die Berechnung einer Transformation kann nun das Koordinatensystem des Endgerätes in das Flugzeugkoordinatensystem überführt werden.

Konzept 2: Wieder-Einmessung von einer zuvor eingemessenen Geräteposition

Das Koordinatensystem des Endgerätes in Bezug zum Raum hängt von seiner Position bei der Initialisierung der Positionsverfolgung (Tracking) ab, die beginnt, sobald eine AR-Anwendung startet. Das Konzept sieht vor, dass sich die Transformation aus dem oben genannten Konzept für eine Wiedereinmessung nutzt. Positioniert man das Endgerät zu einem späteren Zeitpunkt an derselben Position wie bei der vorherigen Initialisierung der Positionsverfolgung, lässt sich die gespeicherte Transformation dazu nutzen, wieder den Bezug des Gerätekoordinatensystems zum Flugzeugkoordinatensystem herzustellen. Durch diese Methode kann bei dem eigentlichen Erfassungsprozess im Flugzeug weitere Zeit eingespart werden, da die benötigten Einmessdaten, die aus Konzept 1 hervorgehen, a-priori erstellt werden können, und kein tatsächliches Flugzeug benötigen.

Die Genauigkeit der Grobeinmessung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum Beispiel wird diese in Konzept 1 davon beeinflusst, wie gut der Anwender die Referenzpositionen auswählen kann.

Konzept: Feineinmessung

Nach der Grobeinmessung erfolgt eine Phase der Feineinmessung. Hier sieht das Konzept vor, dass dem Anwender ein Referenzmodell eingeblendet wird. Durch die vorangegangene Grobeinmessung überlagert das Referenzmodell in der AR-Anwendung die Realität annähernd. Mittels Nutzerinteraktion bewegt der Anwender das Referenzmodell, sodass es deckungsgleich mit der Realität wird.

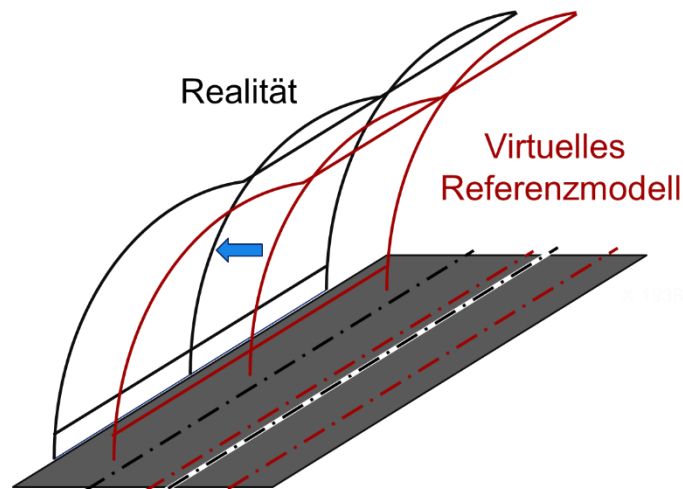


Bild 2-19: Feinpositionierung durch die Adaption eines Referenzmodells an die Realität [Den20]

Die dabei entstehende Transformation wird bei der Transformation des Geräte-Koordinatensystems in das Flugzeugkoordinatensystems berücksichtigt, sodass alle folgenden Modell-Einblendungen und gewonnenen Informationen möglichst genau im Flugzeugkoordinatensystem erfolgen.

Weiterhin kann der Anwender für den Fall, dass es während der Anwendung des AR-Digitalisierungssystems zu Trackingungenauigkeiten kommt, dies anhand des Referenzmodells, welches dann nicht mehr präzise mit der Realität überlagert wird, erkennen. Mit den Funktionen zur Feineinmessung ist es dann möglich, den Bezug des AR-Digitalisierungssystems zu dem Flugzeugkoordinatensystem zu korrigieren.

Bei der Positionsverfolgung wird das interne, markerlos arbeitende Trackingsystem des verwendeten Endgerätes zurückgegriffen.

Die Konzepte zur Lokalisierung wurden umgesetzt. Für die Grobeinmessung wurde in der AR-Applikation implementiert, dass eine Datei mit Referenzpositionen eingelesen werden kann. Die vom Anwender an beliebigen Positionen generierbaren 3D-Punkte können ihren Referenzpositionen zugeordnet werden. Sind mindestens drei Referenzpositionen eingemessen, lässt sich eine Transformation zwischen den Koordinaten des Endgerätes und des Referenzsystems, im betrachteten Anwendungsfall das Flugzeugkoordinatensystem berechnen.

Nachfolgende Abbildung zeigt eine Bildschirmaufnahme der AR-Anwendung zur Zuordnung von 3D-Positionen zu Referenzpositionen.

X Reference	Y Reference	Z Reference	X Selected	Y Selected	Z Selected	Matched	Name
+3549.35010	-1043.81006	+0.00000	-1.93321	-1.39230	-1.98254	matched	Punkt 1
0.61000	-516.46002	+3.45000				free	Punkt 2
+3548.32007	-516.10999	-0.47000				free	Punkt 3
+0.70000	+515.76001	+1.90000				free	Punkt 4
+3549.35009	-1043.81000	+0.78000				free	Punkt 5
-0.43000	+1043.81006	+0.00000	+1.39548	-1.40383	+0.39247	matched	Punkt 6
+3549.20996	+1043.51001	+3.10000	-2.15668	-1.43018	+0.05967	matched	Punkt 7

Bild 2-20: Zuordnung von 3D-Positionen zu Referenzpositionen

Bei der Zuordnung von weiteren 3D-Positionen lässt sich mithilfe von Best-Fit-Verfahren die Genauigkeit steigern. Weiterhin wurde umgesetzt, dass sich die Transformationsmatrizen zur Grobeinmessung, die in Konzept 1 bestimmt werden, in der AR-Applikation laden lassen und zur Festlegung der Transformation zwischen Gerätekoordinatensystem und Flugzeugkoordinatensystem nutzen lassen. Startet der Anwender die Grobeinmessung von einer definierten Position, kann er die dadurch bestimmten Transformationsmatrizen zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwenden. Dies erspart Zeit bei der Einmessung in das Flugzeug-Koordinatensystem. Zur praktischen Durchführung wird vorgeschlagen, das Endgerät mittels eines Halters an bestimmten, wiederfindbaren Positionen der Sitzschienen möglichst definiert und spielfrei zu positionieren.

Eine entsprechende Halterung wurde konstruiert und gefertigt. Diese ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



Bild 2-21: Halterung zur schnellen Wieder-Einmessung (Grobeinmessung) des AR-Digitalisierungssystems

Das Konzept der Feineinmessung durch ein vom Anwender an die Realität adaptiertes Referenzmodell wurde umgesetzt. Dazu stehen dem Anwender nach dem Laden eines solchen Modells Interaktionsmöglichkeiten zu dessen Feinpositionierung zur Verfügung. Sobald für den Anwender eine möglichst gute Überlagerung erreicht wurde, kann er in der Anwendung bestätigen, dass die Feinpositionierung abgeschlossen ist.

Nachfolgende Bildschirmaufnahmen veranschaulichen die Feineinmessung. Nach der Grobeinmessung ist noch eine deutliche Abweichung zwischen dem Referenzmodell, welches hier auf einem 3D-Scan basiert, und der Realität zu erkennen (siehe Bild 2-22 oben). Insbesondere gibt es einen deutlichen Versatz in der Vertikalachse, welcher durch den Versatz zwischen virtuellen und realen Stringern erkennbar ist. Nach der Feinpositionierung des Referenzmodells ist eine gute Übereinstimmung des Referenzmodells mit der Realität gegeben (siehe Bild 2-22 unten).



Bild 2-22: Referenzmodell nach der Grobpositionierung (oben) und nach der Feinpositionierung (unten)

Alle nachfolgend geladenen Modelle und aufgenommenen Informationen werden in dem so korrigierten Koordinatensystem angezeigt bzw. hinterlegt.

2.2.4 Zusammenführung und Verarbeitung von aufgenommenen Daten

Mit dem AR-Digitalisierungssystem lassen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Informationsarten speichern (z. B. Modell-Positionen und -Orientierungen, Statusinformationen, 3D-Scan-Daten, Messdaten, Fotos, nachmodellierte Objekte). Außerdem gibt es weitere Daten, z. B. existierende 3D-Modelle oder 3D-Scans, die z. B. mit dem eingangs vorgestellten hochauflösenden Digitalisierungsverfahren aus Ansatz 2 aufgenommen werden. Um diese Informationen zusammenzuführen und für die Weiterverarbeitung zugänglich zu machen, wurde am IFPT ein Software-Tool entwickelt. Nachfolgende Abbildung zeigt die Benutzeroberfläche des Software-Tools. Das Software-Tool kann die Daten, die innerhalb einer Sitzung mit dem AR-Digitalisierungssystem erfasst werden, mit einem Klick laden.

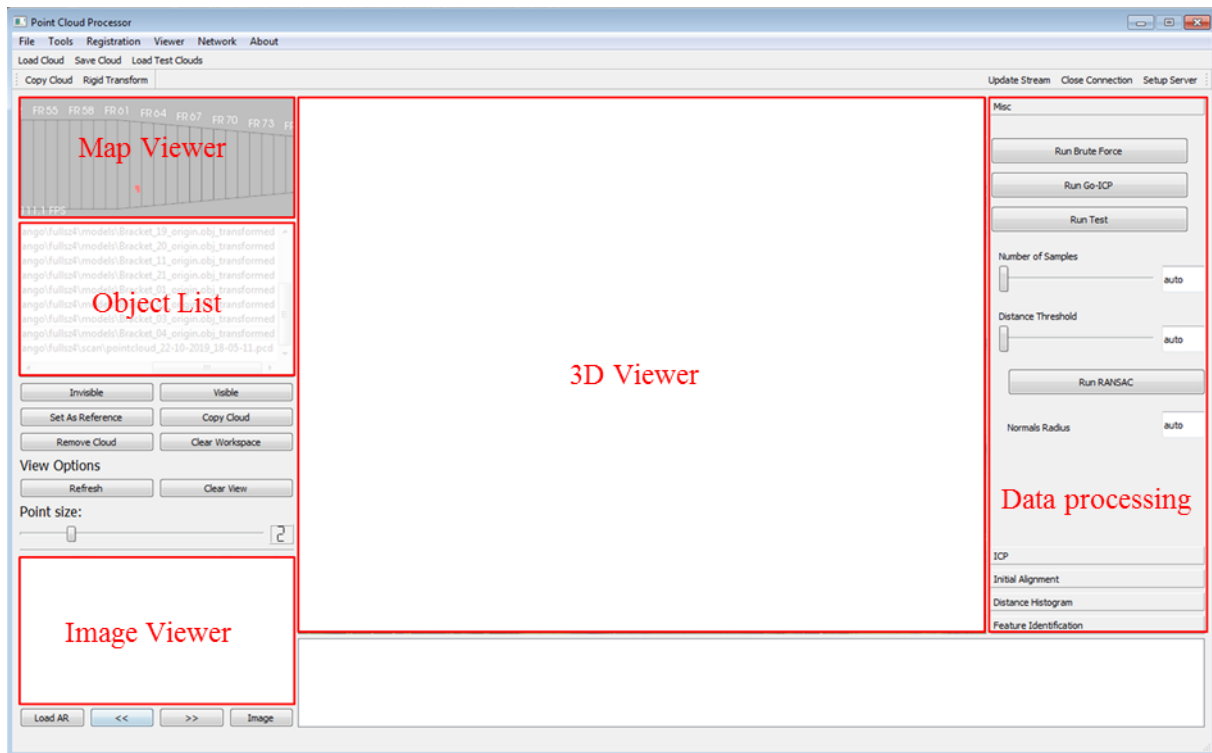


Bild 2-23: Benutzeroberfläche des entwickelten Softwaretools [Den20]

Im Zentrum der Benutzeroberfläche befindet sich ein 3D-Viewer, in dem ähnlich wie in CAD-Programmen die aufgenommenen 3D-Daten visualisiert werden. Oben links befindet sich eine Kartenansicht, in der visualisiert wird, wo im Flugzeug die angezeigten Daten aufgenommen wurden. Darunter befindet sich eine Liste mit geladenen Daten. Unten links können aufgenommene Fotos angezeigt werden. Wechselt der Anwender zwischen verschiedenen Fotos, verändert sich automatisch die Perspektive im 3D-Viewer, sodass ein direkter Vergleich zwischen dem Foto und den aufgenommenen 3D-Daten möglich ist. Rechts auf der Benutzeroberfläche befindet sich ein Panel, das die Weiterverarbeitung von geladenen Daten ermöglicht. So werden eine automatisierte Kollisionserkennung und eine automatisierte Objekterkennung ermöglicht, die in Abschnitt 2.2.7 erläutert werden.

Das Softwaretool basiert weitgehend auf OpenSource-Bibliotheken und ist hinsichtlich weiterer Funktionalitäten beliebig erweiterbar.

2.2.5 Evaluierung

Während der Projektlaufzeit wurden die erarbeiteten Konzepte iterativ mittels praktischen Versuchen evaluiert und optimiert. Dazu wurden z. B. Halter und andere Elemente an dem Strukturpanel installiert, und in einem nachfolgenden Schritt erprobt, wie der Nutzer der AR-Anwendung diese „neuen“ Elemente mit dem AR-Digitalisierungssystem erkennen, und in die Planungsdatenbasis zurückführen kann.

Zu den praktischen Versuchen gehört auch die Durchführung von virtuellen Stellproben (Virtuelle Fit Checks), während denen mittels des AR-Unterstützungsystems u. a. potentielle Kollisionen zwischen geplante Kabineneinbauten und der Einbaumgebung erkannt werden sollen.

Für den im Folgenden beschriebenen Versuch wurde eine Kollision von 20mm zwischen einer Schiene und einem geplanten Kabinenelement simuliert. Dieser Versuch sollte folgendes in der Realität aufgetretene, in der Analysephase des Projekts untersuchte, Problem nachstellen, welches in nachfolgender Abbildung dargestellt ist.

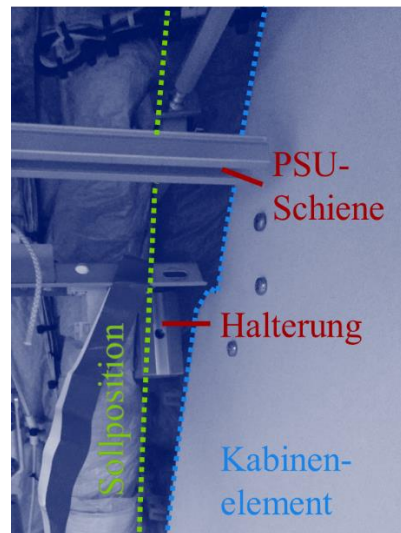


Bild 2-24: Kollision zwischen Kabinenelement und Elementen in der Umgebung [Den19]

Ein einzubauendes Kabinenelement konnte nicht wie vorgesehen im Flugzeug eingebaut werden, da u. a. die PSU-Schiene (*Passenger Service Unit*) zu lang war.

Bei dem Versuch wurde nach der Einmessung das Kabinenelement eingeblendet, wie nachfolgende Abbildung zeigt.



Bild 2-25: AR-Visualisierung eines Kabinenelements in der Umgebung

Die Kollision zwischen der Schiene und dem Kabinenelement ist deutlich erkennbar. Die Abschlusskante der Schiene ist nicht zu sehen, da sie von dem Kabinenelement überdeckt wird. Zur Dokumentation der Kollision stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. So können neben dem Aufnehmen von Screenshots Abstände zwischen der Schiene und dem Kabinenelement gemessen und so auch

die Überschneidung dokumentiert werden. Zudem kann der Anwender das Kabinenelement soweit manipulieren, dass die Abschlusskante der Schiene gerade nicht mehr von dem Kabinenelement verdeckt wird. Dies ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



Bild 2-26: Manipulation des Kabinenelements zur Dokumentation der Eindringtiefe

Aus der Manipulation geht die Eindringtiefe der Kollision hervor. Im dargestellten Versuch wurde so eine Eindringtiefe von ca. 10mm bestimmt. Die Abweichung zwischen dieser gemessenen von der eigentlichen Eindringtiefe von 20mm ist auf Ungenauigkeiten der AR-Lokalisierung und der individuellen Sichtbarkeit und Manipulation durch den Nutzer zurückzuführen. Beide dieser Einflussarten lassen sich nicht vollständig eliminieren, sodass in der Praxis ein Toleranzfeld berücksichtigt werden sollte. Kann durch das AR-Digitalisierungssystem eine Kollision nicht eindeutig identifiziert werden, da es in dem zu definierenden Toleranzfeld liegt (zwischen „definitiv eine Kollision“ und „definitiv keine Kollision“) macht es Sinn, wenn möglich lokal einen hochgenauen 3D-Scan mittels des ergänzenden hochauflösenden Digitalisierungsansatzes durchzuführen.

Abschließend wurde das Gesamtkonzept des AR-Digitalisierungssystems anhand eines Szenarios am Flugzeugkabinendemonstrator evaluiert.

Bei dem Szenario wurde zunächst das Strukturpanel mit dem im Projekt beschafften 3D-Scan-System „Artec Eva“ eingescannt. Die 3D-Scans ermöglichen exakte Referenzdaten des aktuellen Zustands des Panels mit aktuell angebrachten Haltern und anderen Strukturelementen zu erhalten. Mithilfe zuvor mit einem Lasertracker bestimmte Halterpositionen wurden die 3D-Scans in das verwendete Referenzkoordinatensystem überführt. Der Fokus des Szenarios liegt vornehmlich in der Überprüfung der Korrektheit von Haltern, die hier als Beispielelement dienen sollten, und gemäß der Problemanalyse aus AP1 häufig beim Auftreten von Montageproblemen eine Rolle spielen. Aus den aufgenommenen 3D-Scans können neben den Positionen der Halter auch ihre Orientierungen in allen drei Raumrichtungen abgeleitet werden. In komplexen Umgebungen wie der Flugzeugkabine ist neben der Positionsinformation von Elementen auch die Information über ihre Orientierung von hoher Bedeutung.

Nachfolgende Abbildung zeigt den aufgenommenen Gesamtscan des Strukturpanels und ein Detailscan eines der in diesem Szenario verwendeten Halter.

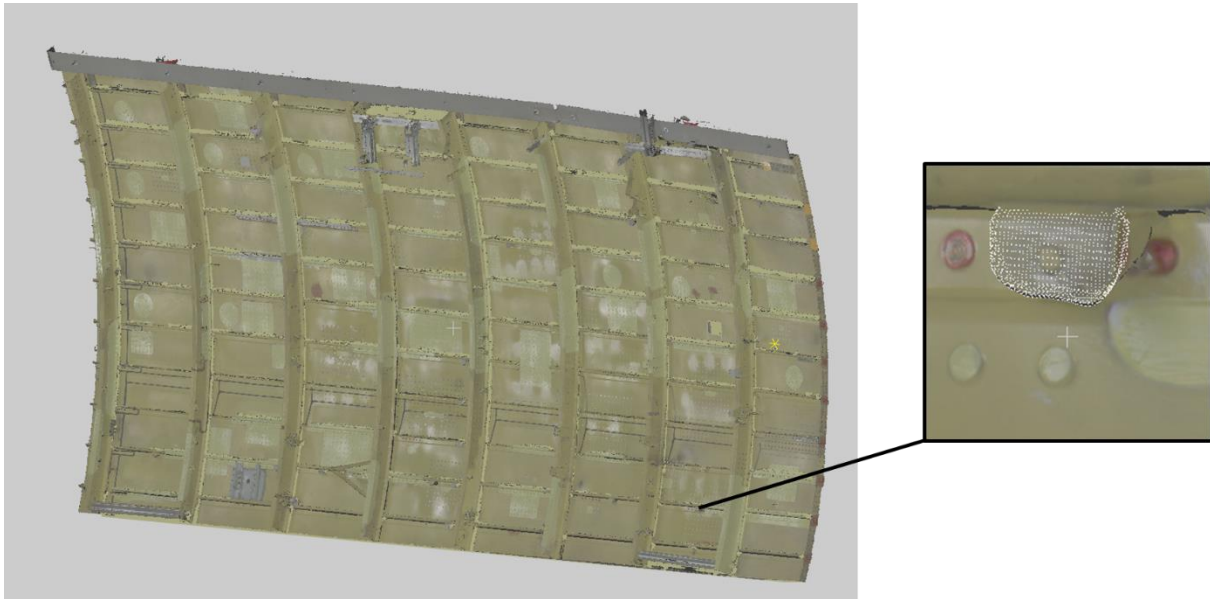


Bild 2-27: Aufgenommener Gesamtscan und beispielhafter Detailscan eines Halters

Dabei wurde für die Detailscans der Halter eine signifikant höhere Auflösung als für den dargestellten Gesamtscan gewählt, damit die aus ihnen abgeleiteten Referenzwerte eine hohe Genauigkeit aufweisen.

Um eine unzureichende Planungsdatenbasis gemäß der identifizierten Hauptursache von Planungsfehlern nachzubilden, wurden verschiedene Fehlerzustände simuliert (siehe dazu auch Bild 2-28). Dazu wurden vier der 10 in diesem Szenario berücksichtigten Halter aus der Planungsdatenbasis entfernt. Diese stellten nicht dokumentierte Elemente dar, und sollten durch den Anwender mit dem AR-Digitalisierungssystem identifiziert und in die Planungsdatenbasis integriert werden. Weiterhin wurde die Position von vier Haltern im Bereich von bis zu $\pm 20\text{mm}$ in allen Raumrichtungen, sowie um bis zu $\pm 15^\circ$ in allen Orientierungen variiert. Diese Halter stellen fehlerhaft dokumentierte Halter dar, deren Positionen und Orientierungen mittels des AR-Digitalisierungssystems in der Planungsdatenbasis korrigiert werden sollten. Die Position zweier Halter wurde nicht verändert. Diese stellen korrekt dokumentierte Elemente dar, die mittels des AR-Digitalisierungssystems verifiziert werden sollten. Weiterhin wurden in der Planungsdatenbasis vier zusätzliche Halter hinzugefügt, zu denen es kein Pendant in der realen Umgebung gab. Dies sollte nachstellen, dass Halter bei Modifikationsarbeiten in der Umgebung entfernt wurden, dies aber nicht in der aktuell zugänglichen Planungsdatenbasis nachgehalten wurde.

Die hier beschriebene Planungsdatenbasis wurde für die Visualisierung mit dem AR-Digitalisierungssystem als 3D-Planungsmodell aufbereitet.

Zusätzlich sollte in dem Szenario ein Kabel mit dem AR-Digitalisierungssystem nachmodelliert und in die Planungsdatenbasis zurückgeführt werden. Um im Verlauf des weiteren Planungsprozess weitere Analysen der Umgebung zu ermöglichen, wie z. B. der Messung beliebiger Abstände oder eine Kollisionsanalyse mit einzubauenden Kabinenelementen, sollte im Anschluss mittels der 3D-Scan-Sensorik des AR-Digitalisierungssystems ein 3D-Scan des Strukturpanels durchgeführt werden.

Durchführung

Zunächst musste das AR-Digitalisierungssystem in das Referenzkoordinatensystem des Kabinendemonstrators eingemessen werden. Dazu wurden die beschriebenen Verfahren zur Lokalisierung verwendet. Zur Grobeinmessung dienten drei Referenzpunkte in den Sitzschienen und zwei Referenzpositionen auf dem Strukturpanel, deren Positionen im Referenzkoordinatensystem bekannt waren.

Die Feineinmessung erfolgte anschließend anhand eines geladenen Referenzmodells, das ähnlich wie in Bild 2-22 dargestellt, interaktiv so durch den Nutzer manipuliert wurde, dass es möglichst gut mit der Realität überlagert wird.

Nach dem Einmessvorgang wurde das Planungsmodell geladen, so dass es im AR-Digitalisierungssystem mit der Realität überlagert dargestellt wird. Eine mit Anmerkung versehene Bildschirmaufnahme zur Beschreibung der verschiedenen Fehlerzustände wird in Bild 2-28 dargestellt. Der Nutzer kann nun mit den implementierten Verfahren im Planungsmodell fehlende Halter (A) interaktiv an der korrekten Position hinzufügen, fehlerhaft positionierte Halter (B) korrigieren, nicht in der Realität befindliche Halter (C) aus dem Planungsmodell entfernen sowie korrekt im Planungsmodell hinterlegte Halter (D) als „verifiziert“ dokumentieren (D).

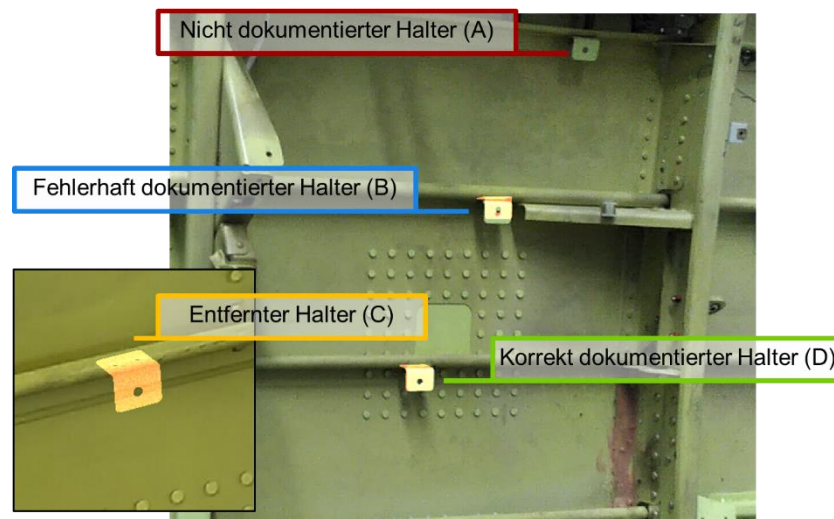


Bild 2-28: Fehlerzustände der nachgebildeten Planungsdatenbasis [Den20]

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Lage eines fehlerhaft hinterlegten Halters vor und nach der Korrektur mit dem AR-Digitalisierungssystem.



Bild 2-29: Fehlerhaft dokumentierter Halter vor und nach der Korrektur mittels des AR-Digitalisierungssystems [Den20]

Weiterhin wurde das fehlende Kabel nachmodelliert, und der 3D-Scan durchgeführt. Dies ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

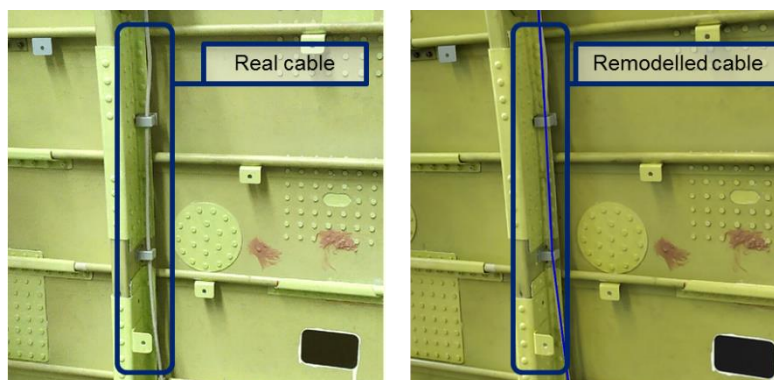


Bild 2-30: Nachmodellierung eines Kabels. Reales Kabel (links). Nachmodelliertes Kabel (rechts) [Den20]

Die Daten, die mit dem AR-Digitalisierungssystem aufgenommen wurden, wurden auf den PC mit dem entwickelten Softwaretool übertragen, und dort importiert.

Bild 2-31 zeigt die Benutzeroberfläche des Softwaretools mit den geladenen Daten. Der 3D-Viewer (B) zeigt die mit dem AR-Digitalisierungssystem aufgenommene 3D-Punktwolke. Die hinzugefügten, korrigierten, verifizierten, oder aus der Planungsdatenbasis entfernten Halter, deren Zustand im Planungsmodell sowohl farblich als auch mit einem Textlabel gekennzeichnet ist, werden ebenfalls dargestellt. Weiterhin ist das mit dem AR-Digitalisierungssystem nachmodellierte Kabel zu sehen.

Der Image-Viewer (C) zeigt als Referenz ein Foto des im 3D-Viewer dargestellten Bereichs.

Die Kartenansicht (D) zeigt den Standort und die Blickrichtung der aktuellen Perspektive, sodass der Nutzer weiß, wo das Foto aufgenommen wurde bzw. welchen Bereich die aktuelle Ansicht im 3D-Viewer darstellt.

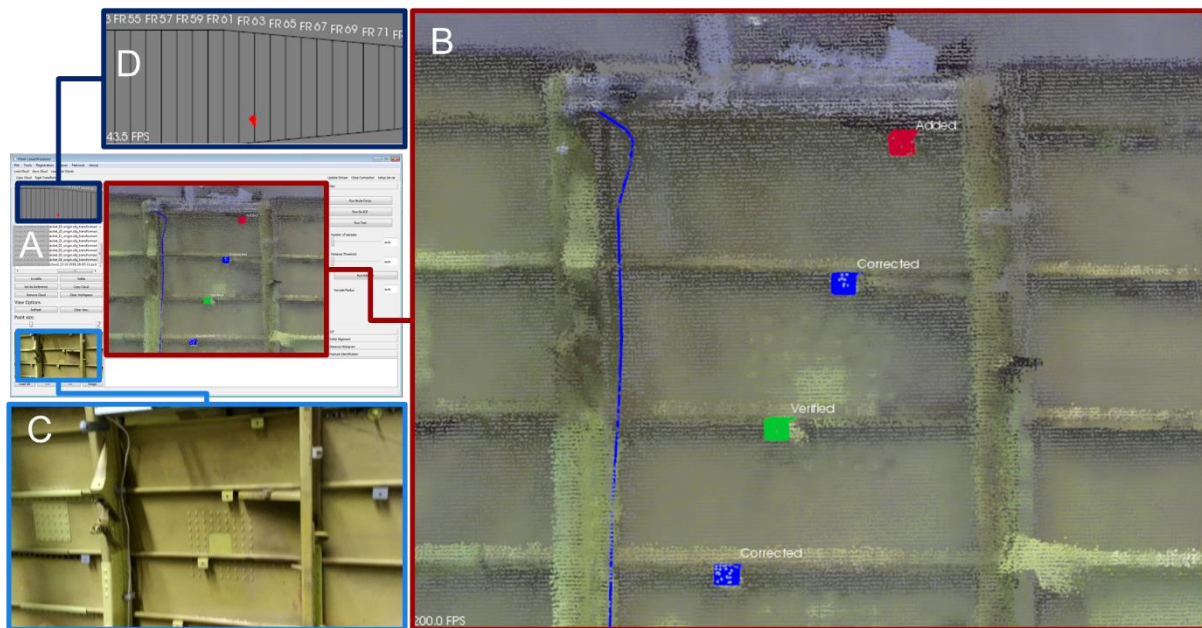


Bild 2-31: Benutzeroberfläche des Softwaretools nach dem Import der aufgenommenen Daten [Den20]

Evaluierung

Mit dem AR-Digitalisierungssystem konnte das Planungsmodell ergänzt und aktualisiert werden, wie in Bild 2-31 zu sehen ist. Zur präziseren Evaluierung wurde die Genauigkeit der Elemente des aktualisierten Planungsmodells bestimmt. Dazu wurden die mit dem AR-Digitalisierungssystem dokumentierten Positionen und Orientierungen mit den Referenzwerten aus den ursprünglichen, mit dem Artec EVA-Scanner aufgenommenen 3D-Scans verglichen (siehe Tabelle 2). Zur Veranschaulichung der Achsen- und Orientierungsbezeichnungen wird an dieser Stelle auf Bild 2-17 verwiesen.

Weiterhin wurde die benötigte Zeit bestimmt, die für die einzelnen Schritte und Korrekturen notwendig waren (siehe Tabelle 3).

Tabelle 2: Positions- und Orientierungsabweichungen nach der Aktualisierung der Planungsdatenbasis

ID	Positionsabweichung [mm]				ID	Orientierungs-Abweichung [°]		
	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta Tot.$		$\Delta \psi$	$\Delta \vartheta$	$\Delta \Phi$
1	11.9	3.5	1.0	12.4	1	3.4	0.7	4.1
2	10.0	0.0	1.0	10.0	2	1.0	0.1	0.0
3	9.0	3.0	4.0	10.3	3	3.1	0.7	0.8
4	6.2	4.4	3.0	8.2	4	1.9	1.1	6.1
5	10.0	3.0	7.0	12.6	5	2.6	6.6	6.2
6	3.1	4.3	0.5	5.3	6	2.8	0.0	0.4
7	3.0	5.0	1.0	5.9	7	2.9	2.0	0.4
8	1.5	5.8	2.4	6.4	8	0.5	0.3	1.8
∅	6.8	3.6	2.5	8.9	∅	2.3	1.5	2.5

Tabelle 3: Evaluierung der benötigten Dauer für die einzelnen Prozessschritte

Prozess	Dauer [min:sek]
Einrichtung	
Grobeinmessung	03:38
Feineinmessung	02:18
Aktualisierung der Planungsdatenbasis	
Hinzufügen eines Elements	01:38 (durchschnittlich pro Element)
Korrektur eines Elements	01:51 (durchschnittlich pro Element)
Verifizierung eines Elements	<00:05 (durchschnittlich pro Element)
Entfernen eines Elements	<00:05 (durchschnittlich pro Element)
Hinzufügen verorteter Annotationen	00:25 (durchschnittlich pro Element)
Aufnahme verorteter Fotos	<00:05
Nachmodellierung des Kabels	03:57
Aufnahme des 3D-Scans	01:28 (Fläche: 3m x 2.1m)

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, mit dem entwickelten System die Planungsdatenbasis mit einer hohen Genauigkeit an den Ist-Zustand anzupassen. Von einem Low-Cost-AR-System kann, wie eingangs beschrieben, nicht die Genauigkeit von High-End-Digitalisierungsverfahren erwartet werden.

Das System wurde in weniger als 6 Minuten eingerichtet. In der Praxis kann, wie beschrieben, der Prozess der Grobeinmessung vorverlagert werden, sodass die tatsächliche Einrichtzeit im Flugzeug auf weniger als 3 Minuten reduziert werden kann.

Es ist anzumerken, dass es bei der Aktualisierung der Planungsdatenbasis es eine starke Korrelation zwischen der jeweiligen Genauigkeit und der benötigten Prozesszeit gibt. So kann der Benutzer mit höherem Zeitaufwand z. B. ein fehlendes Element mit einer höheren Genauigkeit in der Planungsdatenbasis ergänzen. Andersherum kann, wenn die Geschwindigkeit einen größeren Stellenwert hat als die Genauigkeit, die Aktualisierung der Planungsdatenbasis schneller, aber ungenauer, erfolgen. In der Praxis sollte dies je nach verfügbarer Einsatzzeit im Flugzeug berücksichtigt werden.

2.2.6 Entwicklung von AR-Applikation für aktuelle Endgeräte

Da der Support für die eingesetzte AR-Technologie *Tango* im Frühjahr 2018 seitens *Google* eingestellt wurde, wurde im Rahmen des Projekts eine weitere AR-Applikation entwickelt, die ein breiteres Spektrum an AR-Endgeräten und abdeckt. Als Basis dazu diente die Entwicklungsumgebung *Unity3D*. Mittels der Integration von AR-SDKs lässt sich auf die neueren AR-Tracking-Technologien, z. B. *ARCore* von Google und *ARKit* von Apple zurückgreifen.

Zur Entwicklung und Evaluierung dieser Applikation wurde weitere Hardware beschafft, u. a. mobile Endgeräte, die o. g. Tracking-Technologien unterstützen. Zur 3D-Scandaten-Erfassung lassen sich mobile Sensoren verwenden, die an den Endgeräten angebracht werden können, wie z. B. die Sensoren *Structure Sensor* bzw. *Structure Core* der Firma Occipital.

Die entwickelte Applikation enthält wesentliche Funktionalitäten wie die eingangs beschriebene Anwendung, z. B. die Einmessungsverfahren zur Lokalisierung im Flugzeugkoordinatensystem, das Positionieren von Objekten und die Korrektur der Planungsdaten.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Benutzeroberfläche der Applikation während der Einblendung eines Referenzmodells.

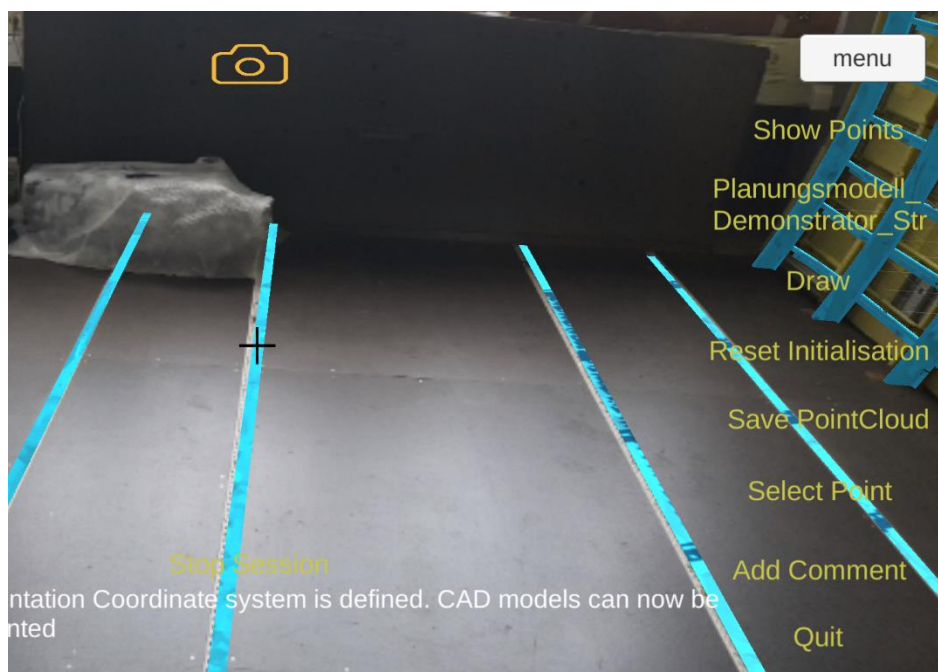


Bild 2-32: Benutzeroberfläche der AR-Applikation bei der Visualisierung des Referenzmodells

Rechts in der Benutzeroberfläche sind wiederum einzelne Funktionen zu sehen, bei deren Auswahl weitere Elemente wie Schaltflächen eingeblendet werden. Im unteren Bereich lassen sich Informationen und Anweisungen anzeigen.

Die Evaluation erfolgte u. a. anhand der mit der Anwendung durchgeführten Vermessung von 3D-Positionen in dem Kabinendemonstrator und dem Vergleich mit Referenzpositionen.

Nachfolgende Tabelle zeigt die ermittelten Genauigkeiten von einem Android-Endgerät mit AR Core-Tracking Technologie und einem iOS-Endgerät mit ARKit-Tracking-Technologie.

Tabelle 4: Ermittelte Positionsabweichungen bei den verschiedenen Endgeräten

Positionsreferenz-ID	Absolute Abweichung (Android-Endgerät)	Absolute Abweichung (iOS-Endgerät)
9	16.9	39.9
13	23.2	32.7
14	34.9	20.6
17	35.0	23.6
23	70.8	70.8
28	50.6	29.2
30	38.5	75.7
32	32.7	70.5
Mittlere Abweichung	37.8	45.4

Die Ergebnisse zeigen für beide Endgerät-Typen wesentlich höhere Ungenauigkeiten als die Ergebnisse, die in dem oben beschriebenen Szenario mit der ursprünglichen Tracking-Technologie *Google Tango* erzielt wurden. Zurückzuführen ist dies einerseits darauf, dass die Google Tango-Technologie zusätzliche, für das Tracking optimierte, Hardware verwendet. So bestätigen auch andere Forschungsarbeiten, dass das Tracking mittels AR-Core und AR-Kit ungenauer als das Tracking mittels Google Tango ist [Cor18].

Andererseits konnte die neu entwickelte Applikation aufgrund der bereits fortgeschrittenen Projektlaufzeit innerhalb des Projekts nicht mehr dasselbe Entwicklungslevel erreichen, wie die ursprüngliche Applikation, sodass durch weiteren Entwicklungsaufwand eine Verbesserung der Genauigkeit zu erwarten ist.

2.2.7 Weitere in AP2 durchgeführte Arbeiten

Der folgende Abschnitt wird ein Ausschnitt weiterer im AP2 durchgeführten Arbeiten dargestellt.

Automatisierte Kollisionsanalyse

In AP2 wurde sich weiterhin mit der automatisierten Kollisionsüberwachung von 3D-Daten befasst. Hintergrund waren die bereits beschriebenen Kollisionen bei der Montage neuer Kabinenelemente. 3D-Daten, die mit dem AR-Digitalisierungssystem, aber auch aus anderen Quellen hervorgehenden Scandaten, wie dem ergänzenden hochauflösenden Digitalisierungsansatz des Projekts, sollten für eine nachgeschaltete digitale Kollisionsüberprüfung genutzt werden können. In das beschriebene Softwaretool wurden Algorithmen implementiert, die die 3D-Daten zunächst mittels Octree-Strukturierung

für eine effiziente Kollisionsanalyse aufbereiten. Anschließend kann mittels entwickelter und implementierter Algorithmen eine automatisierte Kollisionsanalyse erfolgen.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft eine durchgeführte Kollisionsanalyse zwischen einem Kabinenelement-Modell (blau) und einer Schiene, die in einem 3D-Scan erfasst wurde.

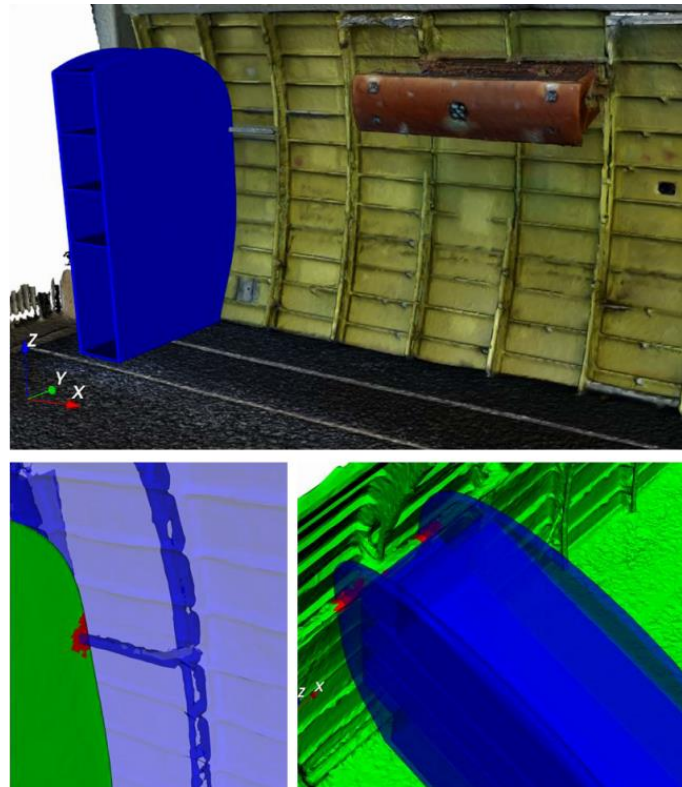


Bild 2-33: Automatisierte Kollisionsanalyse auf Basis von 3D-Daten

Zur schnellen Visualisierung von Kollisionen werden die entsprechenden Bereiche rot eingefärbt.

Objekterkennung in 3D-Scandaten

Weiterhin wurde sich in AP2 mit der automatisierten Erkennung von Objekten in 3D-Scandaten befasst. Diese Objekterkennung sollte einerseits 3D-Scandaten, die nicht mit Bezug zum Flugzeugkoordinatensystem vorliegen, effizient in dieses überführen lassen. Andererseits sollten 3D-Scandaten, die möglicherweise ungenau im Flugzeugkoordinatensystem eingemessen wurden, so automatisiert evaluiert und ggf. korrigiert werden können.

Für die Objekterkennung wurde insbesondere Sitzschienen, Spanten und Fenster als relevante und nutzbare Referenzelemente identifiziert. Mit der Erkennung und der automatischen Zuordnung zu ihren Referenzpositionen ließen sich die 3D-Scandaten weitgehend automatisiert in allen Freiheitsgraden ins Flugzeugkoordinatensystem überführen.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Schritte zur automatisierten Erkennung von Sitzschienen in einem 3D-Scan und seine Ausrichtung anhand diesen.

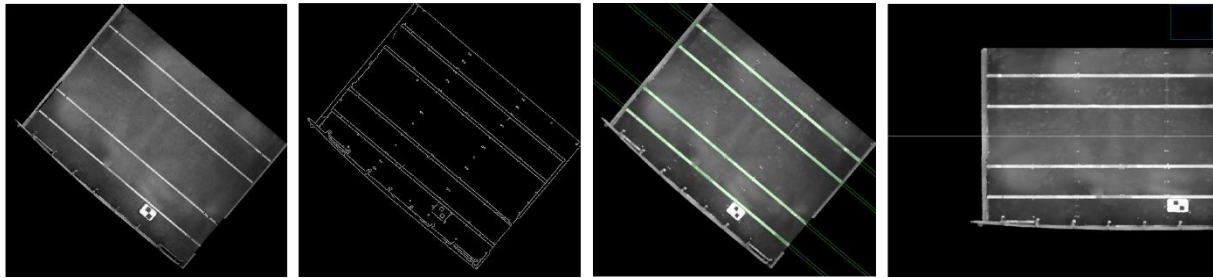


Bild 2-34: Automatisierte Objekterkennung und Ausrichtung des 3D-Scans

Bei dem Verfahren werden die Scandaten zunächst auf eine 2D-Ebene projiziert. Anschließend werden Bildverarbeitungsalgorithmen angewendet, um letztendlich Kanten zu finden. Eine Filterung der gefundenen Kanten ermöglicht die Zuordnung zu den Sitzschienen. Aus deren Positionen und der Orientierung lassen sich dann die Freiheitsgrade für die Überführung ins Flugzeugkoordinatensystem bestimmen. So können sich anhand der Sitzschienen die Freiheitsgrade in Y- und Z-Richtung sowie die Orientierung um die X-, Y- und Z-Achse bestimmen, und der 3D-Scan entsprechend transformieren. Mit ähnlichen Verfahren zur Objekterkennung lassen sich Spante oder Fenster dazu nutzen, den noch nicht definierten Freiheitsgrad in X-Richtung zu bestimmen.

Die Algorithmen zur Objekterkennung wurden in dem beschriebenen Softwaretool implementiert.

2.3 AP3 - Entwicklung einer flugzeughersteller-unabhängigen, montagegerechten, leichtbaugerechten und modularen Kabinenstruktur

In diesem Arbeitspaket sind Konzepte zur schnellen Kollisionserfassung und -behebung entwickelt worden. Diese stellen eine Unterstützung für den Konstrukteur dar, um 3D Messdaten direkt in einer CAD-Umgebung verarbeiten und Einbausituationen analysieren zu können. Der Fokus liegt darin für die Bereiche Konstruktion und Entwicklung ein Unterstützungskonzept zu entwickeln. Die Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket werden daher in drei Schritten vorgestellt. Zunächst wird die Einbausituation untersucht, um die für Änderungen relevanten Problemstellen zu identifizieren. In der Folge ist die Datenaufnahme mithilfe von 3D Scannern an einem realitätsnahen Demonstrator erforscht worden. Abschließend wurde auf Basis dieser Ergebnisse eine Softwareunterstützung entwickelt sowie deren Anwendung validiert.

Analyse der Einbausituation

Im ersten Schritt wurden in Ergänzung zur Prozessanalyse aus AP 1 Einbauschwierigkeiten aufgrund von Kabinenmodifikationen untersucht, die während der Umrüstung vor Ort bei LHT aufgetreten sind. Die Daten sind ebenso auf Basis der A330-Umrüstung bei LHT in Hamburg von Juli bis Oktober 2016 aufgenommen worden. Da LHT selbst kein Hersteller von Kabineninterieur ist, sondern an dieser Stelle mit Zulieferern zusammenarbeitet, bestehen die Probleme gerade bei der Integration der Sekundär- in die Primärstruktur. In der Folge wurde aufgrund der Problemanalyse bei LHT zunächst nicht die gesamte Produktstruktur analysiert, sondern der Fokus auf die Analyse von Verzögerungen während der Liegezeiten des Kabineninterieurs wie Sidewalls, Hatracks, Galleys, Lavatories etc., gelegt.

Die Studie der Umrüstung der A330 Flotte zeigt im Wesentlichen auf, dass die meisten Einbauschwierigkeiten lokal in Bereichen mit vielen neuen Kabinenelementen vorkommen. Dabei treten sowohl Kollisionen mit großen Überschneidungen als auch Kollisionen mit geringen Überschneidungen unterhalb von 10 mm auf. Schnittstellenbereiche zur Struktur und Systemen bilden dabei Problemzonen. In der

folgenden Abbildung sind dazu Positionen, an denen konstruktive Änderungen umgesetzt werden mussten, am Beispiel des A330 dargestellt. Zudem ist farblich markiert, welche Monumente neu sind oder verändert wurden.

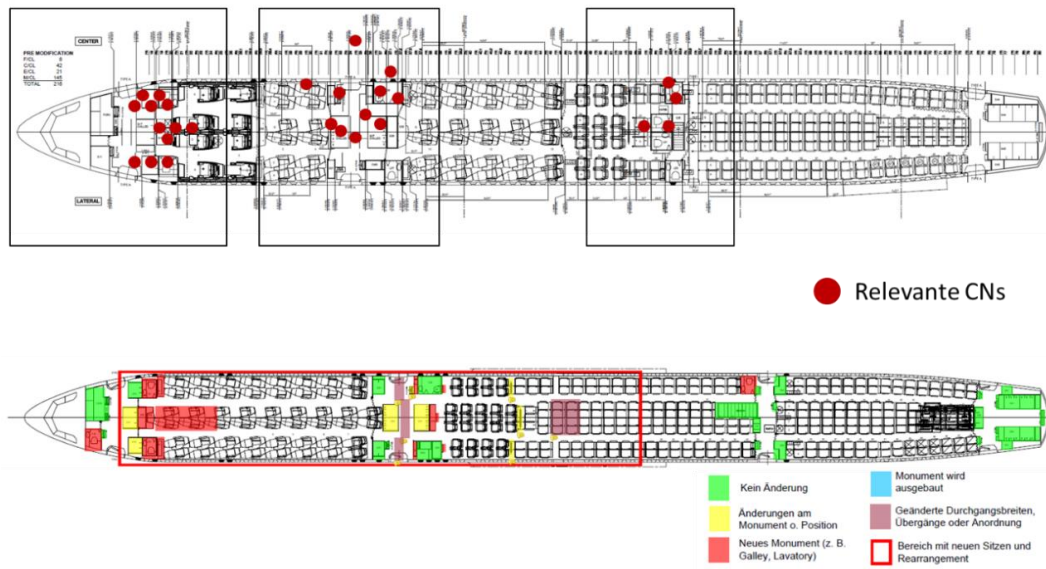


Bild 2-35: Aufkommen konstruktiver Änderungen während der Liegezeit zugeordnet zur Flugzeugposition (oben); Flugzeuglayout vor, der Umrüstung mit Kennzeichnung von modifizierten Kabinenbereichen (unten)

Verwendung von 3D Scanner zur Kollisionsanalyse

Im nächsten Schritt ist der Einsatz unterschiedlicher 3D Scanner sowie deren Genauigkeiten untersucht worden. Dabei ist insbesondere die Genauigkeit verfügbarer 3D Scanner sowie die damit einhergehende Verwendbarkeit für die Kabinenplanung in einer realitätsnahen Umgebung untersucht worden. Die Messungen erfolgten im Kabinendemonstrator der TUHH, siehe Bild 2-36.



Bild 2-36: TUHH Kabinendemonstrator mit Angabe des Messvolumens sowie verwendete Messpunkte für die Genauigkeitsuntersuchung [Den19]

Die für die Messungen verwendeten Auswertepunkte sind in Bild 2-36 (rechts) dargestellt. Dabei handelt es sich um unterschiedliche Anschlusspunkte für Halter. In Bild 2-37 sind die untersuchten 3D Scanner abgebildet. Die Auswahl entspricht dabei dem aktuellen Stand unterschiedlicher Klassen von auf dem Markt verfügbarer Messgeräte für große Messvolumina. Sowohl günstige mobile Endgeräte als auch hochpreisige 3D Scanner (z. B. *Creaform Handyscan* oder *Artec Eva*) sind erprobt worden.

Einige wichtige Eigenschaften seien hier erwähnt. Der Handyscan von Fa. Creaform nutzt ein markerbasiertes Lokalisierungssystem. Das Artec Eva von Fa. Artec 3D ist nicht vollständig mobil, sondern benötigt einen angeschlossenen PC/Laptop während der Messung. Das Lenovo Phab 2 ist ein kommerziell erwerbbares Mobiltelefon (Phablet). Es besitzt allerdings im Gegensatz zu anderen Mobiltelefonen eine Time-of-Flight-Kamera zur Aufnahme von 3D Scans.



Bild 2-37: Untersuchte 3D Scanner [Den19]

In der folgenden Tabelle 5 sind die Messergebnisse zu den Genauigkeitsuntersuchungen der am Markt verfügbaren Scanner zusammengefasst. Als Referenz wurden die 28 Messpunkte mit einem Lasertracker (Leica LTD 800) mit einer Genauigkeit im geringen Submillimeterbereich. Die Längen zwischen den einzelnen Messpunkten werden in den Messdaten des jeweiligen Gerätes bestimmt und mit den Messdaten des Lasertrackers verglichen.

Die Messergebnisse sind sowohl prozentual bezogen auf die unterschiedlichen Referenzlängen sowie in absoluten Messabweichungen angegeben. Der Creaform Scanner liefert mit einer mittleren Abweichung von 2,94 mm sehr gute Ergebnisse. Für diesen Scanner sind allerdings Marker notwendig, wodurch das Verfahren für den vorliegenden Anwendungsfall nur einschränkt verwendbar ist. Der Creaform-Scanner wurde dennoch für die Studie herangezogen, damit ein Vergleich zu der erreichbaren Genauigkeit mit einem hochauflösenden Scanner am Markt ermöglicht wird. Der Artec EVA Scanner arbeitet hingegen markerlos. Die Genauigkeiten des Artec Eva sowie des Faro Focus Scanners sind, auch ohne die Marker, mit einer mittleren Abweichung von 4 mm in einer ähnlichen Größenordnung zu der des Creaforms. Mit einem Phablet, dem Lenovo Phab 2 wurden weitere Messungen durchgeführt. Dabei kamen zwei unterschiedliche Messauflösungen zum Einsatz. Mit einer Auflösung von 10 mm erreicht das Lenovo-Endgerät eine mittlere Abweichung von 10,6 mm. Durch die Verwendung einer höheren Auflösung kann eine mittlere Abweichung von 5,9 mm erreicht werden, wobei diese höhere Auflösung hier eine Verkleinerung des Messvolumens zur Folge hat. Diese Genauigkeit liegt dann in der gleichen Größenordnung wie die der hochauflösenden Geräte. Die präsentierten Ergebnisse müssen immer in Bezug auf das Messobjekt bewertet werden. Messvolumen, Oberflächenmaterial sowie weitere Handhabung haben Einfluss auf das Ergebnis, so dass die ermittelten Ergebnisse nicht unmittelbar auf andere Anwendungsszenarien übertragbar sind.

Tabelle 5: Messergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung [Den19]

	mobil		terrestrisch	
	Creaform Handyscan 3D 700	Artec Eva	Lenovo Phab 2 (res. 10 mm)	Faro Focus 3D X130
Anzahl Referenzpunkte	18	18	28	28
Mittlere Abweichung [mm]	2,94	4,36	12,67	4,19
Standardabweichung [mm]	2,01	2,62	10,57	3,07
Min. Abweichung [mm]	0,06	0,05	0,08	0,01
Max. Abweichung [mm]	9,54	10,57	45,36	10,81
Messvolumen [mm]	L: 4310 H: 2160 D: 530	L: 4310 H: 2160 D: 530	L: 4310 H: 2160 D: 3340	L: 4310 H: 2160 D: 3340

Was in dieser Hinsicht bemerkenswert ist, ist dass die ermittelten Messdaten dieser mobilen Geräte vergleichbar sind mit den der stationären, terrestrischen Geräte.

Auch hochmobile Smartphones wie das Lenovo Phab 2 können zum 3D Scannen verwendet werden. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit müssen für solche Geräte Anwendungsfälle präzise definiert werden. Der in AP2 vorgestellte Ansatz 1 zur Anzeige und Korrektur von Planungsdaten sowie der AR-basierten Detektion von Kollisionen ist so eine Anwendungsmöglichkeit. Bei der Verwendung für detaillierte Konstruktionsänderungen sind jedoch möglichst präzise Messdaten notwendig. Lokal können diese durch mobile hochauflösende 3D Scanner bereitgestellt werden.

Insgesamt liefern die am Markt verfügbaren mobilen Geräte eine Genauigkeit im Millimeterbereich. Hochauflösende 3D Scans können sehr hilfreich für die Konstruktion sein. Je nach Detailgrad der Problemstellung liefern sie unterschiedlich zu bewertende Messdaten. Analysen zum verfügbaren Bauraum sowie zur Kollisionsvermeidung großer Baugruppen sind möglich. Insbesondere durch farbige Texturen der Scanergebnisse wird dies vereinfacht. Detaillierte Konstruktionen zum präzisen Einbau müssen je nach Scanqualität sowie Messtoleranz bewertet werden. Grundsätzlich liegt die Messabweichung hochauflösender 3D Scanner allerdings im gleichen Bereich wie die vorhandenen Toleranzen, die im Allgemeinen für den Einbau berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde können 3D Scans eine große Hilfe für die Flugzeugumrüstung sein und ein System zur Unterstützung der Verarbeitung und Analyse von 3D Scan Daten in CAD-Software ist entwickelt worden.

Entwicklung einer Softwareunterstützung zur virtuellen Kollisionsanalyse

Bei einer virtuellen Kollisionsanalyse sind mehrere Vorgehen basierend auf der verfügbaren Datengrundlage möglich. Wie unter AP1 verdeutlicht gibt es dazu bei LHT unterschiedliche Datenquellen. Auf der einen Seite sind für Kabinenelemente, wie Lavatories, Hatracks etc., 3D CAD-Daten verfügbar. Auf der anderen Seite stehen für die Planung des Einbaus in das Flugzeug jedoch kaum 3D Daten zur Verfügung. Zudem können die Daten von 3D Messungen unterschiedliche Formate haben. Eine Übersicht der unterschiedlichen möglichen Datenmodelle und Kollisionsanalyse sind in Bild 2-38 dargestellt und im Folgenden erläutert.

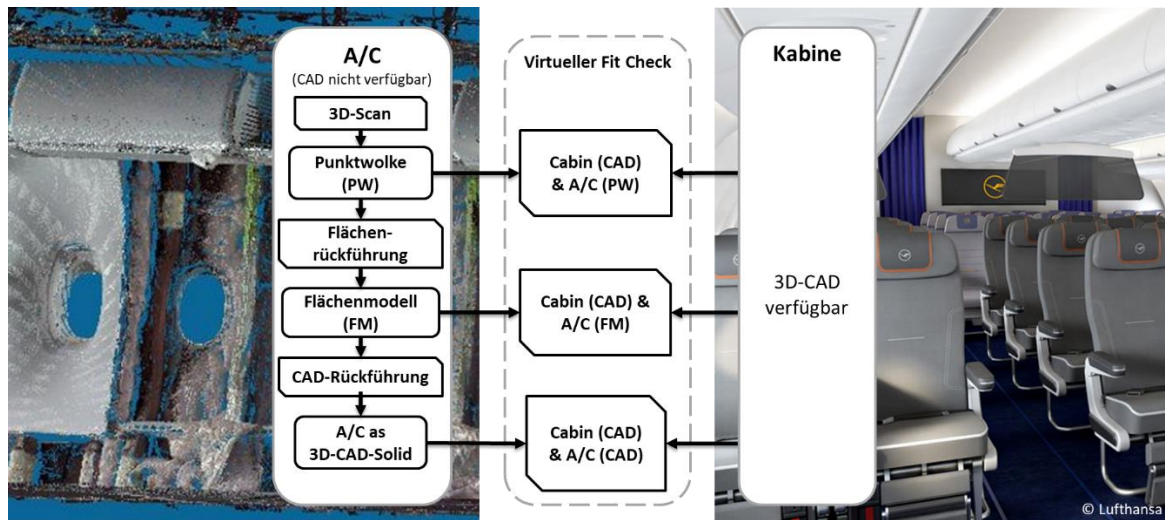


Bild 2-38: Übersicht – Mögliche Schritte zum virtuellen Fit Check

Grundsätzlich können je nach vorliegendem Datensatz unterschiedliche Kollisionsanalysen durchgeführt werden. Basierend auf der Annahme, dass für die Kabinenausstattung 3D CAD-Daten vorliegen, sind Vergleiche zwischen CAD-Daten der Kabine sowie CAD-, Flächen- oder Punktdaten des Flugzeuginnenraumes möglich.

Großraummessungen mit stationären (terrestrischen) 3D Scannern liefern für gewöhnlich Punktwolken als Messdaten. Mobile 3D Scanner wiederum können Flächendaten liefern, die aufgrund der flexiblen Positionierung schon während des Messvorgangs generiert werden. Bei den Punktwolken von Großraumscans müssen zur Erstellung von Flächenmodellen die Messdaten zunächst aufwendig bearbeitet werden sowie nachträglich mithilfe von 3D-Software in Flächenmodelle rückgeführt werden. Aufgrund der stationären Messdatenaufnahme können dabei verdeckte Bereiche nur schwer erfasst werden, was zu Informationsverlust führt. Nur eine große Anzahl von Messungen an unterschiedlichen Positionen durch erheblichen Mehraufwand in der Nachbearbeitung können diese Daten generiert werden. Für einen Raum mit den Dimensionen einer Flugzeugkabine und der Vielzahl an Befestigungselementen ist dies jedoch nicht effizient durchführbar. Des Weiteren sind Flächenrückführungsverfahren lediglich Approximationsalgorithmen, die insbesondere bei großen Modellen lokal zu ungenauen Geometrieabbildungen führen können, was jedoch bei großen Modellen aus Effizienzgründen nicht anders umsetzbar ist. Aus diesen Gründen ist die direkte Verwendung von Punktdaten sinnvoll und macht eine Kollisionsanalyse in jeden Fall unabhängig von Flächen- und 3D Modellen sowie nötigen Modellaufwertungen, wie einer Flächenrückführung.

Hinsichtlich der Messgeschwindigkeit weisen terrestrische 3D Scanner allerdings wesentliche Vorteile bei der Erfassung großer Messvolumina auf. Mobile 3D Scanner hingegen können nur kleinere Bereiche, wie z.B. 2-3 Frameabschnitte, erfassen. Mobile Scanner können im Gegensatz zu terrestrischen Scannern bereits während des Scanvorgangs sehr gute Flächenmodelle erzeugen. Für die Verwendung von Flächenmodellen sind Ansätze zur Kollisionsprüfung zwischen nicht-geschlossenen Flächenobjekten sowie CAD-Modellen erprobt worden.

Grundsätzlich wird deutlich, dass in Abhängigkeit der Daten unterschiedliche Schritte zur virtuellen Kollisionsanalyse nötig sind. Es muss dazu erläutert werden, dass die zusätzlichen Schritte einer theoretisch möglichen Rückführung von Scandaten in 3D CAD- Modelle zwar die Kollisionsanalyse vereinfacht, der Mehraufwand für Datenaufwertung doch in Relation dazu überproportional steigt. Außerdem muss beachtet werden, dass die aufgewerteten Daten weiterhin nur ein um Messungenauigkeiten sowie um die Ungenauigkeiten bei der Weiterverarbeitung abweichendes Modell darstellen.

Um daher die Verwendung von Punktwolken sowie Flächenmodellen innerhalb des CAD-Systems für Kollisionsanalysen zu ermöglichen, wurde ein Add-In für die CAD-Software SolidWorks entwickelt. Vergleiche zwischen CAD-Modellen sind grundsätzlich schon implementiert. Der Vergleich von Punktwolken und 3D CAD-Daten ist allerdings gänzlich neu für CAD-Systeme. Die Verwendung von Flächenmodellen hingegen ist auch schon aber eingeschränkt möglich. Kollisionsanalysen lassen sich allerdings nur für geschlossene Flächen anwenden, wobei der Scan von Kabinenbauteilen allerdings immer nur einseitig erfolgen kann.

Das entwickelte Add-In stellt dabei eine Art Demonstrationsplattform dar, die zur Weiterentwicklung und Test von Prozessen und Algorithmen verwendet werden kann. Das Software-Tool ist in C# programmiert und nutzt die öffentlich zugänglich Programmierschnittstelle (API) von SolidWorks. In Bild 2-39 ist die Nutzeroberfläche sowie die drei grundsätzlichen Anwendungsschritte des Add-Ins dargestellt.

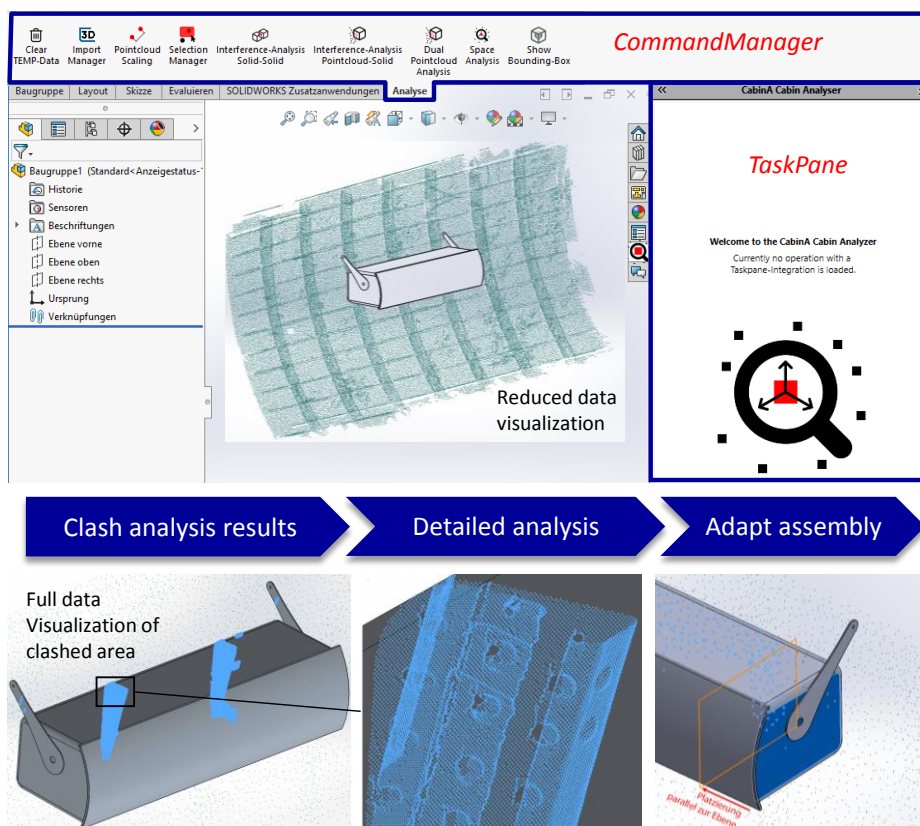


Bild 2-39: Übersicht des Software Add-Ins für SolidWorks

Die Punktanalyse ist als sog. Interferenzanalyse implementiert [Ake08]. Dazu wird ein Ray-Casting-Algorithmus verwendet. Beim Ray Casting wird gezählt, wie oft ein semi-infiniter Strahl eine Kante des zu untersuchenden 3D Körpers trifft. Ist diese Anzahl 0 oder eine gerade Zahl, liegt der Testpunkt außerhalb des Körpers. Der Strahl trifft dann entweder gar nicht auf den Körper, oder betritt und verlässt ihn einmalig oder auch mehrmals. Ist die Anzahl hingegen eine ungerade Zahl, liegt der Testpunkt innerhalb des Körpers. Beim ersten Treffen auf eine Fläche des Körpers verlässt der Strahl dabei den Körper. Jede Erhöhung um zwei bedeutet, dass der Körper wieder betreten und verlassen wurde. Eine ungerade Anzahl lässt daher auf einen Ursprung des semi-infiniten Strahls im inneren des Körpers

schließen. Ein weiteres Ergebnis ist $i = \infty$ für den Fall, dass der Strahl genau auf einer Kante entlang verläuft. Theoretisch können dabei unendlich viele Schnittpunkte gezählt werden.

Möglichkeiten zur Kollisionsanalyse unter Verwendung von Flächenmodellen wurden mithilfe des Separating Axes Verfahrens implementiert [Ebe03]. Bei diesem Verfahren wird eine Achse gesucht, die die zu testenden Polygonflächen separiert. Dazu werden zunächst die Polygone auf eine Achse projiziert. Ist eine klare Trennung zwischen den projizierten Punkten des einen Polygons und denen des anderen möglich, ist diese Achse separierend, und es liegt keine Interferenz vor. Überschneiden sich die Bereiche der projizierten Punkte, ist diese Achse keine separierende, was jedoch nicht bedeutet, dass keine Interferenz vorliegt. Stattdessen kann die separierende Achse auch anders im Raum liegen.

In Bild 2-39 ist ein anschauliches Ergebnis der Interferenzanalyse am Beispiel eines Hatracks an dem Strukturpanel des Kabinendemonstrators in Form einer Punktwolke dargestellt. Die gefundenen Interferenzpunkte sind dabei in blau markiert. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Verwendung des Dual-Point-Cloud Verfahrens. Dabei wird dieselbe Komponente (hier: das Strukturpanel) durch unterschiedliche große Punktwolken repräsentiert. Eine reduzierte Punktwolke ist dazu zur Verifikation und Bearbeitung in SolidWorks nötig, da die CAD-Software nicht für die Darstellung von Punktwolken optimiert ist. Die nicht reduzierte, volle Datenmenge wird für die Interferenzberechnung verwendet.

Man kann die unterschiedliche Punktdichte in Bild 2-39 im Interferenzbereich im Vergleich zum Demonstrator erkennen. Die Interferenzpunkte sind hier in vollem Umfang dargestellt und nicht reduziert, wie die Punktwolke des gesamten Demonstrators. Dadurch kann ohne Informationsverlust eine konstruktive Gestaltung beginnen. Im Anschluss an die Interferenzanalyse kann, basierend auf den Ergebnissen, eine weitere Analyse des Bauraums durchgeführt werden.

Insgesamt sind für die Nutzung für die Kabinenumrüstung insbesondere die folgenden Funktionen implementiert und durch das Benutzerinterface verfügbar.

- Verarbeitung von Punktwolken, Translation, Rotation,
- Auswahl des Untersuchungsraumes in CAD-Umgebung,
- Durchführung der Interferenzanalyse,
- Entfernungsmessung der Eindringtiefe von Kollision,
- Export von Punktwolken in xyz-Datei,
- Weiterarbeit mit Punktwolken, Erstellen von Konstruktionsebenen sowie
- Möglichkeiten Verarbeitung von Flächenmodellen.

Zur Geschwindigkeitsoptimierung sowie zur Verarbeitung von Punktwolken sind folgende Funktionen implementiert

- Verwendung von Bounding Boxen,
- Octree-Strukturierung der Punktdaten und
- Manuelle Bereichsauswahl im SolidWorks Bearbeitungsraum.

Die Verifikation und Validierung der Software fand mithilfe des Kabinendemonstrators an der TUHH statt. Mit den durchgeführten 3D-Messungen konnten in unterschiedlichen Szenarien die Verwendung von 3D Scannern und die Kollisionsanalyse in einer realistischen Umgebung geprüft werden.

Dazu ist der Einbau eines Hatracks als Szenario gewählt worden (Bild 2-40). Zur Variation der Einbausituation wurde der Abstand des Hatracks zur Partition durch Verschieben der Hatrackhalter am Flugzeugrumpf in den Schritten 5 mm, 10 mm 20 mm in Richtung der Partition verändert.

Für alle Positionen wurde mit dem Creaform Handyscan ein 3D-Scan ohne eingebautes Hatrack (Bild 2-40, links) sowie ein Scan mit montiertem Hatrack in Ausgangsposition durchgeführt (Bild 2-40,

Mitte). In der Ausgangslage ohne Verschiebung beträgt der Abstand zur Partition 7 mm und wird als Referenz für die Eindringtiefe bei der Kollisionsanalyse verwendet. Im Anschluss wurde virtuell mithilfe der Messdaten der Einbau eines Hatracks (CAD) geprüft (Bild 2-40, rechts). Dazu wurde, wie im Bild 2-40 (rechts) dargestellt, die Eindringtiefe bzw. der Abstand des Hatracks als CAD-Modell in die Punktwolke der Partition bestimmt.

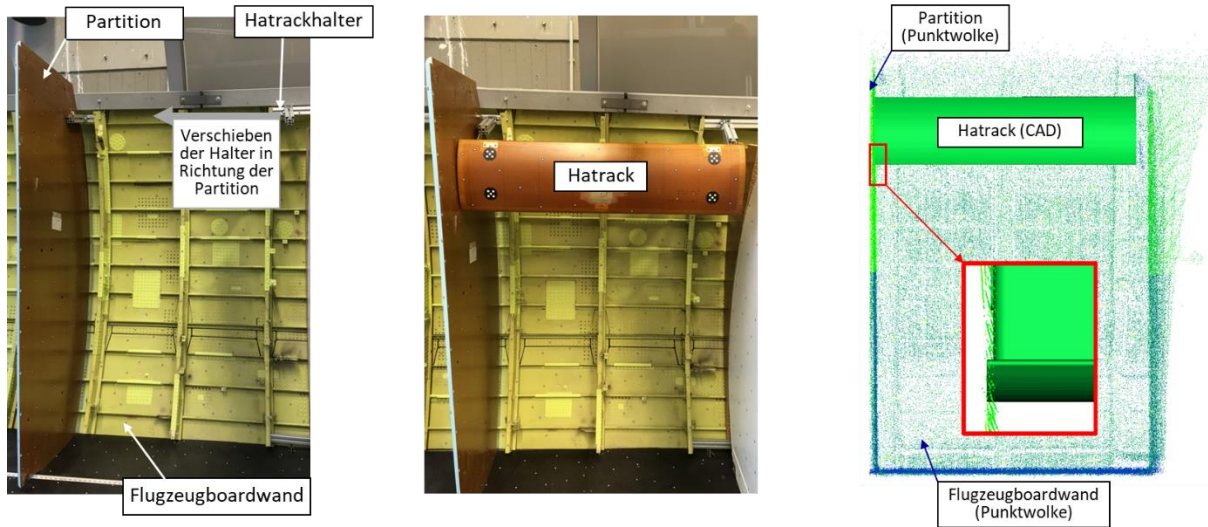


Bild 2-40: Validierungsszenario ‚Hatrack-Montage‘ im Kabinendemonstrator der TUHH

Die Ergebnisse sind im folgenden Bild 2-41 dargestellt. Zum einen ist die Abweichung der Messung zur realen Eindringtiefe gegeben und zum anderen die absolute Abweichung in Abhängigkeit von der Position der Hatrackhalter, wobei der Wert Null die Ausgangslage darstellt, in der ein verfügbarer Spalt von 7 mm vorliegt. In dem Fall von 10 mm und 20 mm Verschiebung lässt sich die eintretende Kollision sowie im Fall von 5 mm Verschiebung der geringe verfügbare Spalt von 2 mm (=keine Kollision) korrekt erkennen. Insgesamt weisen die Ergebnisse absolute Abweichungen von weniger als 5 mm auf. Spaltmaße zu prüfen ist daher auf diese Weise nicht möglich. Die Kollisionsdetektion, vor dem Hintergrund vorhandener Flugzeugtoleranzen, die beim Design nicht berücksichtigt werden können, liefern die 3D-Scans eine sehr gute Datengrundlage.

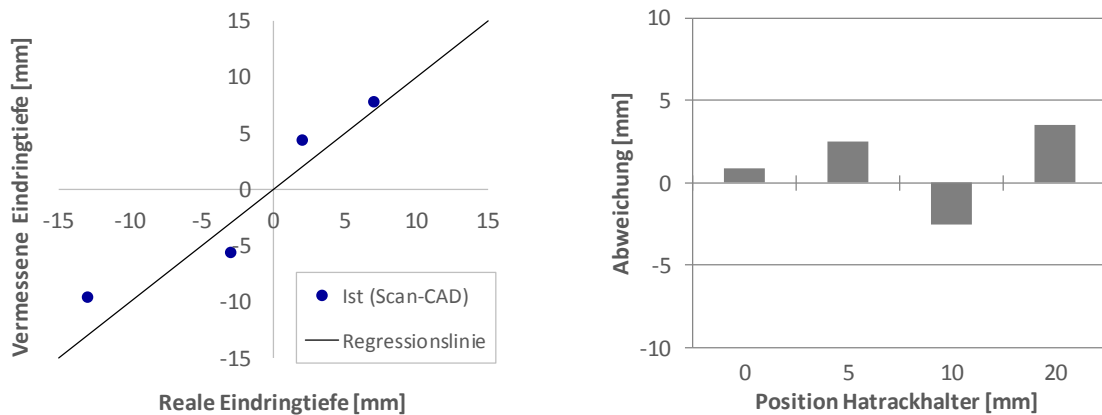


Bild 2-41: Ergebnisse der virtuellen Kollisionsanalyse – Vergleich CAD-Modell (Hatrack) und Punktwolke (Partition und Flugzeugrumpf)

Die Verwendung des Add-Ins unterstützte im Projekt zudem die Kollisionsanalyse zum Einbau von Kabinenkomponenten. Die Ergebnisse der Analyse sollen im weiteren Verlauf der Entwicklung bei LHT berücksichtigt werden. Ein dazu verwendete Datensatz eines Kabinenscans ist beispielhaft in Bild 2-42 dargestellt. Das Modell umfasst eine Punktwolke mit 16 Mio. Messdaten bei einer Punktdichte von ca. 5 mm.

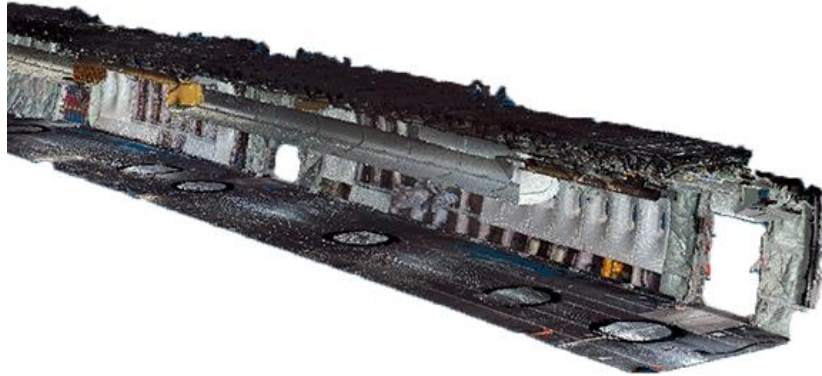


Bild 2-42: 3D Scan einer Flugzeugkabine vor der Umrüstung

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises waren

- Compute Server zur Messdatenverarbeitung

Diese Hardware wurde unter anderem für die Verarbeitung der Daten im Zuge der Entwicklung und Evaluierung der Softwareunterstützung zur virtuellen Kollisionsanalyse verwendet (siehe auch S. 44).

- 3D-Scan-System (Artec Eva sowie Zubehör)

Die Auswahl des beschafften 3D-Scan-Systems (bestehend aus dem 3D-Scanner, einem leistungsfähigen Notebook zur Scandatenaufnahme und der Scandaten-Verarbeitungssoftware *Geomagic Wrap*) basierte auf die zu AP3 beschriebenen Genauigkeitsuntersuchungen. Das System wurde im Projekt für verschiedene Zwecke benötigt, z. B. zur:

- Entwicklung und Erprobung von Verfahren des betrachteten hochauflösenden Ansatzes des Projekts und Evaluierung ihrer praktischen Einsetzbarkeit für die adressierte Problemstellung
- Erprobung und Evaluierung der praktischen Einsetzbarkeit des Systems zur geometrischen Erfassung von Kabinenelementen, um die generierten Modelle einerseits direkt in der Konstruktion, andererseits für virtuelle Stellproben mittels des AR-Digitalisierungssystems einsetzen zu können (siehe auch S. 21)
- Generierung von Referenzdaten zur Evaluierung des entwickelten AR-Digitalisierungssystems (siehe auch S. 32)
- Generierung von Referenzdaten zur Evaluierung der Softwareunterstützung zur virtuellen Kollisionsanalyse (siehe auch S. 44)

Erst durch den Einsatz dieses Scanners wurde die Evaluierung der zuvor genannten Entwicklungen durch die zeitnahe Aufnahme von Daten in dem notwendigen Umfang ermöglicht.

Die bereits beschriebene Analyse der verschiedenen 3D-Scanner hat gezeigt, dass der Artec Eva eine sehr gute Genauigkeit aufweist. Durch dessen markerlosen Einsatz ist er für die Verwendung im Kontext der Flugzeugkabinen zudem besser geeignet, als beispielsweise der Creaform (siehe auch S. 42ff.).

- Macbook, mobile Endgeräte und mobile 3D-Sensoren

Diese Hardware wurde insbesondere für die Entwicklung und Evaluierung der zweiten AR-Applikation benötigt, die sich an den Entwicklungen des im Projektverlauf veränderten Technikstands (*State-of-the-Art*) orientiert und ein breiteres Spektrum an mobilen Endgeräten abdeckt (siehe auch S.38)

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die Zuwendung wurden die Projektpartner Lufthansa Technik und TUHH in die Lage versetzt, die oben vorgestellten Forschungsthemen zu bearbeiten. Dies wäre ohne die Zuwendung nicht möglich.

5 Nutzen/Verwertbarkeit

Die Verwertbarkeit für die TUHH sind einerseits der wissenschaftliche Fortschritt, der der Fachwelt durch Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projektes entstanden sind (siehe Auflistung Veröffentlichungen), zugänglich gemacht ist, andererseits aber auch die forschungsnahe Ausbildung von Studierenden. Parallel zum Verlauf des Projektes ist die Einbindung in die Lehre erfolgt, wie z.B. der Durchführung studentischer Arbeiten. Weiterhin werden die Ergebnisse durch das Mitwirken in Netzwerken und Kompetenzzentren - wie beispielsweise dem Forum des Luftfahrtclusters Hamburg Aviation oder dem Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung - präsentiert.

In dem Projekt wurden Ansätze, Methoden und Verfahren zur Erfassung der Flugzeugkabine und zur Unterstützung der Umrüstungsplanung entwickelt und evaluiert. Es konnte aufgezeigt werden, dass die entwickelten Ansätze ein hohes Potenzial zur Erhöhung der Planungssicherheit beim Kabinenaustausch ausweisen. Des Weiteren wurden exemplarisch erste Ansätze verfolgt, unterschiedliche Daten und Datentypen der entwickelten Digitalisierungsansätze zusammenzuführen um sie für die Umrüstungsplanung zu nutzen. Dies ist der Anknüpfungspunkt für das LuFo VI-Forschungsprojekt *InDiCaT* („*Intelligent Digital Cabin Twin*“), das auf Basis der Projekterkenntnisse beantragt wurde. In diesem sollen Ansätze zur durchgängigen Abbildung des Ist-Zustands der Flugzeugkabine in einem digitalen Zwilling erforscht werden (über die gesamte Lebensdauer eines Flugzeuges), um einerseits das Auftreten von Planungsfehlern gänzlich und nachhaltig vermeiden zu können, andererseits sollen mit diesem zu entwickelnden digitalen Zwilling auch weitere Anwendungsfelder im Bereich der Flugzeugwartung, -Reparatur und -Überholung erschlossen werden. Für das beantragte Projekt konnte bei Lufthansa Technik eine immer größer werdende Unterstützerzahl sowie verschiedene Fachbereiche für die weitere Zusammenarbeit gewonnen werden.

Durch eine enge Vernetzung der beiden Institute fließen die Forschungsergebnisse auch in andere weiterführende Projekte in den Themenfeldern Automatisierung der Großstruktur- und Kleinserienmontage, Modularisierung und Leichtbau von Kabineninterieur ein.

6 Fortschritt anderer Stellen

Es wurde kein uns bekannter Fortschritt an anderen Stellen erzielt.

7 Veröffentlichungen, Vorträge

Konferenzbeiträge, die auf Basis der beschriebenen Projektaktivitäten basieren:

- Deneke, C.; Oltmann, J. Schüppstuhl, T.; Krause, D.: Technology Innovations for Faster Aircraft Cabin Conversion, 8th international Workshop on Aircraft System Technology (AST), Hamburg (2019)
- Laukotka, F.; Oltmann, J.; Krause, D: A digitized approach to reduce assembly conflicts during aircraft cabin conversions, Design for X, Beiträge zum 28. DfX-Symposium, Hamburg (2019)
- Deneke, C.; Moenck, K.; Schüppstuhl, T.: Augmented Reality based data improvement for the planning of aircraft cabin conversions, International Conference on Industrial Engineering and Applications (Europe), Paris (2020)

Studentische Arbeiten

- „Untersuchung der Genauigkeiten von mobilen 3D-Sensoren und Anwendung in der Flugzeugkabine“, Bachelorarbeit TU Hamburg (2017)
- „Bauraum- und Kollisionsanalysen unter Verwendung von 3D-Scans zur Beschleunigung der Kabinenumrüstung“, Masterarbeit TU Hamburg (2018)
- „Verwendung von 3D-Scanning zur Lokalisierung der Einbauposition bei Änderungskonstruktionen in der Flugzeugkabine“, Masterarbeit TU Hamburg (2018)
- „Konzeption eines Systems zur Unterstützung der Flugzeugkabinen-Wartung durch Augmented Reality“, Bachelorarbeit TU Hamburg (2018)
- „Entwicklung von Best-Fit-Verfahren zur Überlagerung von Punktwolken mit Referenzmodellen als Bestandteil von Digitalisierungs-Prozessen in der Flugzeugwartung“, Projektarbeit TU Hamburg (2018)
- „Konzeption einer automatisierten Kollisionsanalyse auf Basis von 3D-Daten zur Unterstützung der Austauschprozesse von Flugzeugkabinen“, Projektarbeit TU Hamburg (2018)
- „Development of an automatic method to align 3D aircraft cabin scans with the aircraft coordinate system using natural features“, Projektarbeit TU Hamburg (2018)
- “Conception, development and evaluation of an AR application to reduce planning errors of cabin conversion processes“, Masterarbeit TU Hamburg (2019)
- “Development of a Sensor-Based Digitalization System to Support Aircraft Cabin MRO Processes“, Masterarbeit TU Hamburg (2019)

8 Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

- [Air 2015] Airwaysnews.com: Küche.<http://airwaysnews.com/html/cabins-and-cockpits/lufthansa-airbus-a380/lufthansa-airbus-a380-city-of-brussels-business-class-galley-december-2012/25753>.
- [Ake08] Akenine-Möller, T., Haines, E., & Hoffman, N.: „Real-Time Rendering - Third Edition“. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2008.
- [Art17] Artec 3D: „Profi-Lösungen für 3D-Scanning“, 2017.

- [Cor18] Cortés, Santiago, et al. "ADVIO: An authentic dataset for visual-inertial odometry", Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018.
- [Cre17] Creaform Inc.: „Handyscan 3D-Die Einzig Portablen 3D-Scanner für die Messtechnik“, 2017.
- [Die 2015] Diehl: Ablagefach. http://www.diehl.com/uploads/pics/2_movable_bin.jpg.
- [Die 2015] Diehl: Deckenverkleidung. <http://www.diehl.com/de/diehl-aerosystems/cabin-interiors/floor-to-floor-lining.html>.
- [Die 2015] Diehl: Seitenwandverkleidung.http://www.diehl.com/uploads/pics/1_airbus_opq_1_0.jpg.
- [Den19] Deneke, C.; Oltmann, J. Schüppstuhl, T.; Krause, D.: Technology Innovations for Faster Aircraft Cabin Conversion, 8th international Workshop on Aircraft System Technology (AST), Hamburg (2019)
- [Den20] Deneke, C.; Moenck, K.; Schüppstuhl, T.: Augmented Reality based data improvement for the planning of aircraft cabin conversions, International Conference on Industrial Engineering and Applications (Europe), Paris (2020)
- [Ebe03] Eberly, D. H., & Schneider, P. J.: „Geometric Tools for Computer Graphics“, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2003
- [Fig12] Figueiredo, M., Oliveira, J., Araújo, B., & Pereira, J.: „Collision Detection for Point Cloud Models With Bounding Spheres Hierarchies“, Faro - Portugal: Uni-versidade do Algarve, 2012.
- [Gom14] Gomeringer, R. (Hrsg): Tabellenbuch Metall: Mit Formelsammlung (46. Aufl.), Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2014.
- [Pah07] Pahl, G.; Beitz, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Springer Verlag, Berlin (2007).
- [Kle04] Klein, J., & Zachmann, G.: „Point Cloud Collision Detection“, The Eurographics Association and Blackwell Publishing, New Jersey, 2004.
- [Lia17] Liang, J., & Gong, J.: „A Sparse Voxel Octree-Based Framework for Computing Solar Radiation Using 3D City Models“, ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017
- [VDI2634-2] VDI/VDE-Richtlinie 2634-Blatt 2: “Optische 3-D-Messsysteme: Bildgebene System mit flächenhafter Antastung“, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 2012
- [VDI93] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth Verlag, Berlin (1993).
- [Von18] Vonásek, L.: „Open Constructor“, <https://github.com/lvonasek/tango/wiki/Open-Constructor>, abgerufen 30.01.2018
- [Sch17] Schuth, M., Buerakov, W.: „Handbuch optische Messtechnik“, Carl-Hanser-Verlag, München, 2017 – ISBN 978-3-446-43634-3
- [Tel 2015] Telegraph.co.uk: Sitze.http://i.telegraph.co.uk/multimedia/archive/02521/seat2_2521789b.jpg
- [Wik 2015] Wikipedia: Toilette. https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_lavatory.