

Schlussbericht MICHEL

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Hamburg, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Institut für Flugzeug-Produktionstechnik

Vorhabenbezeichnung:

MICHEL – Multifunktionales Leichtbaudesign für variabel konfigurierbare Monumente

Förderkennzeichen:

20K1708D

Laufzeit des Vorhabens:

33 Monate

Berichtszeitraum:

01.10.2018 – 30.06.2021

Datum:

Hamburg, 17.12.2021

.....
Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

.....
Florian Kalscheuer, M.Sc., M.Sc.

.....
Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

.....
Michael Hanna, M.Sc.

.....
Johann Schwenke, M.Sc.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzung unter denen der FE-Auftrag durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
2	Technischer Bericht	15
2.1	AP 1.1 Lastpfadoptimierte Leichtbaustrukturen für flexible Kabinenmonumente .	15
2.2	AP 2.3 Entwicklung eines Modulbaukastens und eines Modulbaukastenprozesses	18
2.3	AP 3.1 Vernetzte Produktions- und Montagesysteme	24
2.4	AP 3.2 Virtuelle Produktsimulation	39
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	48
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	48
5	Nutzen/Verwertbarkeit	48
6	Fortschritt anderer Stellen	49
7	Veröffentlichungen, Vorträge	49
7.1	Veröffentlichungen und Vorträge, die auf Basis der beschriebenen Projektaktivitäten basieren	49
7.2	Studentische Arbeiten	50
8	Literaturverzeichnis	51

1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, die Planung und der Ablauf sowie der wissenschaftliche und technische Stand und die Zusammenarbeit mit anderen Stellen im Projekt MICHEL erläutert.

1.1 Aufgabenstellung

Aufgabe des Gesamtvorhabens war die Entwicklung eines multifunktionalen Leichtbaudesigns für variabel konfigurierbare Monumente. Im Teilvorhaben ELPHI sollte dabei eine lastpfadoptimierte, produktionsgerechte und modulare Bauweise für hochindividualisierte Kabinen entwickelt werden.

Das Ziel der TUHH im Teilvorhaben ELPHI war die Entwicklung einer neuen Bauweise für lastpfadoptimierte, produktionsgerechte und modulare Flugzeugkabinenmonumente unter Berücksichtigung der Forschungsthemen Automatisierungstechnik, Konstruktionsmethodik (Modulleichtbau) und virtuelle Produktentwicklung. Durch eine Modularisierung entsteht ein Modulbaukasten für variabel konfigurierbare Monumente, mit dem die Forderung der Kunden nach hoch individualisierten Kabinen bei gleichzeitiger Reduzierung der varianteninduzierten Komplexität erfüllt werden kann. Gleichzeitig wird der Produktentstehungsprozess durch einen neuen Prozess zur Pflege, Weiterentwicklung und Anwendung des erzeugten Modulbaukastens optimiert. Die Entwicklung lastpfadoptimierter Monumente bietet ein bisher ungenutztes Leichtbaupotential, mit dem einer möglichen Gewichtssteigerung durch Modularisierung begegnet werden kann. Für die Nutzung dieses Potentials wurde eine neue Bauweise erforscht, unter Zuhilfenahme von virtuellen Simulationsverfahren und unter der Verwendung von Topologieoptimierungen. Um die Produktivität bei der Fertigung der Kabinenmonumente zu erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, wird für die neue Bauweise ein vernetzter, automatisierter Produktionsprozess entwickelt. Eine besondere Herausforderung bestand dabei, die Potentiale einer Vernetzung im Sinne der Industrie 4.0 im Kontext der Werker zentrierten Produktion zu nutzen. Die gleichberechtigte Berücksichtigung von Automatisierungstechnik, Konstruktionsmethodik und virtueller Produktentwicklung bei der gesamten Entwicklung der Bauweise gewährleistet eine ideale Nutzung der Synergien zwischen den Disziplinen der beteiligten TUHH-Institute.

1.2 Voraussetzung unter denen der FE-Auftrag durchgeführt wurde

Der Forschungsschwerpunkt Luftfahrttechnik der TUHH kooperiert seit vielen Jahren intensiv mit den ortsansässigen Großunternehmen AIRBUS, DIEHL Aviation und Lufthansa Technik sowie weiteren Luftfahrttechnik-Spezialisten. Dazu haben sich zahlreiche Institute der TUHH mit unterschiedlichsten Kompetenzen im Forschungsschwerpunkt Luftfahrt zusammengeschlossen. Die Projekte des Forschungsschwerpunktes sind an den internationalen und nationalen Luftfahrt-Forschungsstrategien ausgerichtet und haben das Ziel, vor allem neue Grundlagen und Technologien 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 PKT und IFPT.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Technische Universität Hamburg (TUHH) ist im Vorhaben MICHEL mit dem Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) sowie dem Institut für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT) am Teilprojekt 1: Neue, modulare und produktionsgerechte Bauweise (ELPHI) beteiligt. Innerhalb des Teilprojektes wurden Teile des AP 2.3 Entwicklung eines Modulbaukastens und -prozesses, AP 3.1 Vernetzte Produktions- und Montagesysteme und AP 3.2 Virtuelle Produktsimulation bearbeitet. Darüber hinaus sind dort gewonnene Erkenntnisse in AP 1.1: Lastpfadoptimierte Leichtbaustrukturen für flexible Kabinenmonumente geflossen. Das Projekt startete am 01.10.2018. Das Projektende für das Teilprojekt der TUHH im Forschungsverbund war nach der vom Projektträger genehmigten Laufzeitanpassung der 30.06.2021. Im Zuge der Laufzeitanpassung wurden pandemiebedingte Verzögerungen ausgeglichen.

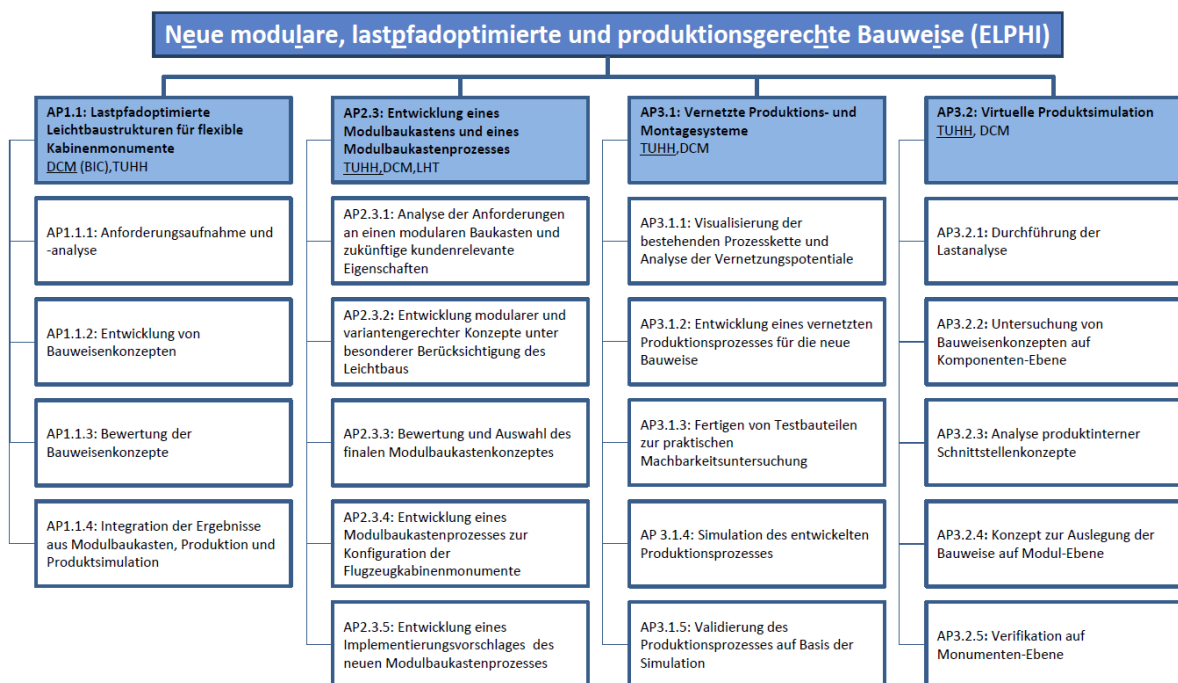


Abbildung 1: Projektstrukturplan - ELPHI

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Modularität

Die Verwendung modularer Produktstrukturen unterstützt verschiedene Entwicklungs- und Unternehmensziele. So führt zum Beispiel die Kommunalität (Wiederverwendung von Modulen) als eine Eigenschaft der Modularität zu einer Komplexitätsreduzierung und der Nutzbarmachung von Skaleneffekten. Technologisch betrachtet, können Einzelziele, wie z.B. verkürzte Durchlaufzeiten, separates Testen oder Modulmontage, unterstützt werden. Kunden erhalten über modulare Produktstrukturen den Vorteil, schnell und kostengünstig ein Produkt aus vordefinierten Modulen zu konfigurieren. Daneben erhalten sie die Möglichkeit, einen späteren Modulaustausch, z.B. für Wartung oder Upgrades, vorzunehmen.

Bei Flugzeug-Interieur Produkten, wie Galleys, müssen weiterhin individuelle Kundenanforderungen, also Abweichungen von vordefinierten Konfigurationen, konstruktiv umsetzbar bleiben. Allerdings ist dies bei der bisherigen mehr integral orientierten Bauweise mit hohen Entwicklungsaufwänden verbunden. Eine einfache Konfiguration der Flugzeugkabinenmonumente ist bisher nicht möglich. Auch die Pflege des Flugzeuginterieurs kann nur dadurch gewährleistet werden, dass die kompletten Monumente ausgetauscht werden müssen. Das Variantenmanagement kann hierbei Abhilfe schaffen.

Um Variantenvielfalt zu beherrschen, wird in der Literatur zwischen produktbasierten Strategien (Funktions- und Variantensicht) und den prozessbasierten Strategien (Fertigungs- und Montagesicht) unterschieden. Modularität zählt dabei zu den produktbasierten Strategien. Allgemein kann man unter einer Modulbauweise ein Zusammenfassen von Funktionen und eine Nutzung standardisierter Schnittstellen verstehen [Ble11]. Modularität ist eine graduelle Eigenschaft eines Produktes, welche charakterisiert wird durch die Eigenschaften kommunale Verwendung von Komponenten, Kombinierbarkeit von Komponenten, Schnittstellenstandardisierung und Entkopplung [Sal07]. Eine Produktfamilie ist modular, wenn ihre Module aus definierten Schnittstellen aufgebaut sind. Durch eine Kombination von Modulen können Produktvarianten innerhalb der Produktfamilie konfiguriert werden. Zur Entwicklung modularer Produktfamilien existieren in der Literatur zahlreiche Methoden, die sich einteilen lassen einerseits in die technisch-funktionale Modularisierung und andererseits in die produktstrategische Modularisierung [Kra18a]. Die Methoden Design Structure Matrices (DSM) [Pim94] und Structural Complexity Management (MDM) [Lin09] sind Beispiele für eine Modularisierung basierend auf technisch-funktionalen Beziehungen. Die Methode Modular Function Deployment (MFD) [Eri98] ist ein Beispiel für eine Modularisierung durch strategische Aspekte.

Eine Verknüpfung des Anforderungsmanagements mit dem Model-based Requirements Engineering (MBRE) ist hilfreich, um für komplizierte Systeme, wie der Flugzeugkabine, funktionale Anforderungen, nicht-funktionale Anforderungen und Geschäftsanforderungen im selben Modell zu beschreiben und darzustellen [Hol12]. Bei der modellbasierten Entwicklung mittels des Model-Based System Engineerings (MBSE) werden aus einem Systemmodell die gewünschten Produkte automatisch abgeleitet. Dafür stehen einige Werkzeuge zur Verfügung, um mit der Modellierungssprache SysML Modelle für eine modellbasierte Entwicklung zu erstellen [Alt12]. Zur Unterstützung einer Produktgenerationsentwicklung wurde eine modellbasierte Baukastenentwicklung entwickelt und an einem Industriebeispiel exemplarisch dargestellt [Bur16].

Leichtbau

In der Luftfahrt hängt der Energieeinsatz des Vortriebes direkt von der zu bewegenden Masse ab. Daher stellt der Leichtbau zur Reduzierung des Eigengewichts der Flugzeuge und deren Komponenten das ökonomische und ökologische Hauptziel dar. Eine Gewichtseinsparung kann durch verschiedene Prinzipien realisiert werden, die unter dem Begriff des Leichtbaus zusammengefasst werden. Im Allgemeinen werden beim Leichtbau die drei Kategorien Material-, Struktur- und Systemleichtbau unterschieden. Beim Materialleichtbau wird das ursprüngliche Material durch ein Material mit besseren spezifischen Eigenschaften ersetzt. Durch den Einsatz des leistungsfähigeren Materials kann Gewicht eingespart werden. Der Strukturleichtbau beschreibt die Reduzierung des Gewichtes durch eine kraftflussgerechte

Konstruktion. Auf diese Weise kann unnötiges Material bei Erfüllung der gleichen Funktion eingespart werden. Als effizientes Hilfsmittel zur Bestimmung idealer Lastpfade hat sich die Topologieoptimierung etabliert. Der Systemleichtbau nimmt eine Funktionsintegration vor, bei der möglichst viele Funktionen in möglichst wenig Teile zusammengefasst werden, so dass das Gesamtgewicht sinkt. Für ein effizientes Leichtbauprodukt ist eine Kombination der verschiedenen Leichtbaukategorien anzustreben, da auf diese Weise möglichst viele Potentiale genutzt werden können. Alle drei Bereiche des Leichtbaus sind allerdings begrenzt durch die Machbarkeit bzw. Umsetzbarkeit in der Fertigung und Produktion, weswegen in diesem Vorhaben schon zu Beginn die Randbedingungen einer effizienten Produktion berücksichtigt werden [Kle13], [Kra18b].

Eine typische Leichtbauweise, die in der Sekundärstruktur von Flugzeugen eingesetzt wird, sind Sandwichstrukturen. Diese sind im Leichtbau aufgrund ihrer sehr guten gewichtsspezifischen Steifigkeit weit verbreitet [Zen97], [Bit97]. Aktuell wird das Kabineninterieur meist in einer Plattenbauweise aus homogenen Wabensandwichpanels hergestellt. Einer der Hauptnachteile dieser Sandwich-Bauweise ist allerdings ihre schlechte Eignung für die lokale Krafteinleitung. An Lasteinleitungsstellen sowie Verbindungsstellen zwischen den Sandwichpaneelen sind lokal Verstärkungen nötig, damit Kräfte adäquat übertragen werden. Dafür werden an den Verbindungsstellen metallische Inserts in die Sandwichstruktur eingesetzt und mit Hilfe einer sogenannten Kernfüllmasse verklebt [Tho98]. Ein größerer Durchmesser des Inserts bzw. der Kernfüllmasse führt im Allgemeinen zwar zu einer höheren Kraftaufnahme gleichzeitig erhöht sich aber auch das Gewicht der Struktur deutlich [Rag08]. Bei mehreren dicht nebeneinanderliegenden Krafteinleitungspunkten werden massive Hartgewebeblöcke verwendet, die die benötigten Inserts beinhalten. Die Optimierung der Verbindungsstellen stellt daher ein Leichtbaupotential bei der klassischen Sandwich-Bauweise dar [Kas10].

Aktuelle Forschungen untersuchen die Verwendung von additive Fertigungsverfahren für die Optimierung der Sandwich-Bauweise. Durch den hohen Freiheitsgrad bei der additiven Fertigung ist es beispielsweise möglich, andere Kerngeometrien anstelle der klassischen Wabenstruktur zu verwenden [Mou15], [Ajd12]. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Optimierung der Inserts in Kombination mit einer additiven Fertigung, wodurch eine verbesserte Krafteinleitung an Verbindungsstellen ermöglicht werden soll [Ris14], [Bre13].

Mensch-Maschine-Kooperation

Die Mensch-Maschine-Kooperation ist ein Gebiet, auf dem in den letzten Jahren intensiv geforscht wird. Im Hinblick auf die immer stärker ausgeprägte Individualisierung von Produkten ist eine Teilautomatisierung einer Vollautomatisierung häufig vorzuziehen. Mensch-Maschine-Systeme, insbesondere Mensch-Roboter-Systeme, bieten die Möglichkeit, die besonderen Fähigkeiten und Vorteile von Mensch (Anpassungsfähigkeit, sensomotorische Fähigkeiten, flexible Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse) und Maschine (Handhabung von schweren Gegenständen, Durchführung von gefährlichen Arbeiten, Durchführung von monotonen Tätigkeiten, hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit) zu vereinen und einen fließenden Übergang zwischen manuellen Tätigkeiten und der Automatisierung zu erreichen. Für die Mensch-Roboter-Kooperation ist es notwendig, dass Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsraum teilen. Sicherheitstechnisch ermöglicht wird dies durch die Entwicklung von Sensorik wie Kraft-Momenten-Sensoren, Sensorhaut oder

Bildverarbeitungssystemen [Hel07], [Sch12], [Bot15], [Wer17], die es erlauben, Roboter ohne Abgrenzung ihres Arbeitsraums durch einen Zaun zu nutzen.

Mensch-Maschine-Kooperation und insbesondere Mensch-Roboter-Kooperation kann in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen. Insbesondere bei Montageprozessen ist häufig eine feste Aufteilung von Arbeitsschritten auf den Menschen und die Maschine sinnvoll. Beispiele hierfür sind die Projekte team@work [Krö09] und RoBaBob [Bot15]. Eine andere Form der Kooperation ist die Führung des Roboters durch den Menschen, die z.B. in den Projekten PowerMate [Krö09] und JILAS erforscht wird [Bot15]. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung intelligenterer Planungssysteme, die die Aufgaben ausgehend von den Fähigkeiten von Mensch und Maschine parallel zum Prozess verteilen [Rie17].

Durch die Entwicklung von inhärent sicheren Leichtbaurobotern, wie dem KUKA LBR, Sawyer der Firma Rethink Robotics oder den Robotern der Firma Universal Robots mit intuitiven Human-Machine-Interfaces, wird die Kooperation von Mensch und Roboter unterstützt. Verschiedene Automobilhersteller, wie VW, BMW oder Mercedes, arbeiten bereits an Forschungsprojekten, die die Integration solcher Leichtbauroboter in die Produktionslinien ermöglichen sollen [Kni13], [Sch15].

Vernetzte Produktion und Selbstorganisation

Der Begriff der Selbstorganisation steht hier für wissenschaftliche Forschungsarbeiten, die erst in den vergangenen Jahren durch die Industrie 4.0-Initiative an Relevanz gewonnen haben. In verschiedenen Forschungsprojekten werden die Grundlagen für eine vernetzte Produktion erforscht. Grundlegend für die Industrie 4.0 ist die Weiterentwicklung klassischer Maschinen, Transportsysteme und Werkstücke durch die Integration von Sensoren, Prozessoren und Netzwerkanbindung zu sogenannten Cyber-Physischen Systemen [Jaz14]. Diese Cyber-Physischen Systeme werden anschließend zu vernetzten Produktionssystemen zusammengeschlossen und in die Lage versetzt Planungs- und Steuerungsaufgaben dezentral durchzuführen. Lee et al. haben eine Architektur für solche vernetzten Produktionssysteme auf Basis Cyber-Physischer Systeme vorgestellt [Lee15]. Wang et al. beschreiben ein Framework zur Integration von Netzwerk, Cloud und Steuerungselementen mit Maschinen, Transfersystemen und Werkstücken zu einer digitalen Fabrik [Wan16]. Barbosa et al. schlagen die Nutzung biologischer und evolutionärer Ansätze zur Optimierung der Selbstorganisation vor und integrieren diese in eine Steuerungsarchitektur [Bar15]. Eine weitere Herausforderung besteht in der Überwachung der verteilten Systeme, bzw. in der Einbindung des Werkers in die digitale Fabrik. Krüger et al. haben hierfür erste vielversprechende Untersuchungen auf Basis von Augmented- und Virtual Reality Technologien durchgeführt [Krö09]. Darüber hinaus existiert eine große Anzahl an Forschungsprojekten, in denen die Realisierung einer vernetzten Produktion im industriellen Umfeld untersucht wird. Im Folgenden werden zwei Exemplarisch dargestellt:

Im Projekt SOPRO [N.A.17a] (Projektpartner u.a. die Fraunhofer Institute IPK, IPA, IITB) wird die Selbstorganisation in unterschiedlichen Anwendungen der Produktion erforscht. Dabei sollen am Produktionsprozess beteiligte Komponenten aktiv miteinander kommunizieren und durch Kooperation in der Lage sein, dezentral mit ihrer Umgebung Planungs-, Koordinierungs- und Überwachungsaufgaben durchzuführen.

Ziel des Projekts IWEPRO [N.A.17b] (Projektpartner u.a. Opel, DMG, Fraunhofer IPK) ist die Erschließung innovativer Produktionskonzepte, wobei die Vision einer flexiblen, smarten Werkstattfertigung mit dezentraler Fertigungssteuerung realisiert werden soll. Dafür werden Lösungen entwickelt, mit denen es möglich wird, dass intelligent vernetzte Produkte, Produktionsmaschinen, Transportsysteme und Fertigungsressourcen untereinander Auftrags- und Fertigungsinformationen austauschen und aufgaben- und situationsorientiert mit den Werkern kooperieren. Im Zentrum steht die Synchronisation von zentralen und dezentralen Steuerungs- und Überwachungsfunktionen durch die Anbindung der virtuellen Welt der Informations- und Kommunikationstechnik mit den realen Objekten in einem Cyber-Physischen Produktionssystem (CPPS).

Vorarbeiten der Institute

Der Forschungsschwerpunkt Luftfahrttechnik der TUHH kooperiert seit vielen Jahren intensiv mit den ansässigen Branchenriesen Airbus und Lufthansa Technik sowie vielen weiteren Luftfahrttechnik-Spezialisten in der Region, wie beispielsweise Diehl Comfort Modules. Dazu haben sich zahlreiche Institute der TUHH mit unterschiedlichsten Kompetenzen im Forschungsschwerpunkt zusammengeschlossen. Die Projekte des Forschungsschwerpunktes sind an den internationalen und nationalen 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 TUHH-Institute in den Bereichen Luftfahrt, Maschinenbau und Elektrotechnik. Auf diese Weise kann das Fachwissen der Wissenschaftler aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, wie beispielsweise Akustik, Thermodynamik, Systemtechnik, Konstruktion und Verbundwerkstoffe effektiv zusammenfließen. Dabei können Synergieeffekte genutzt werden, was zu einer Stärkung der Kompetenzen des Forschungsschwerpunktes nach innen und außen führt.

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)

Das Institut besteht aus den beiden Forschungsgruppen „Entwicklung modularer Produktfamilien“ und „Strukturanalyse und Versuchstechnik“. Eine Besonderheit in der Ausstattung stellt der einzigartige Hexapodprüfstand dar, welcher u.a. dynamische Tests kompletter Monumente unter Windmilling- Bedingungen ermöglicht. Außerdem sind mit dem Hexapod multiaxiale Belastungstests möglich, wodurch sich realistischere Prüfabläufe umsetzen lassen. Insbesondere für Leichtbauprodukte lassen sich so Sicherheitszuschläge bei der Auslegung weiter reduzieren.

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 zu dem „Integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien“ zusammengefasst. Es konnten nicht nur allgemein, sondern auch spezifisch für die Komponenten der Flugzeugkabine appliziert werden. Zusammen mit Firmen, wie Airbus, DIEHL Aviation oder Lufthansa Technik, laufen und liefern mehrere Forschungsprojekte im Bereich der Kabinenentwicklung. In Zusammenarbeit mit DIEHL Aviation wurden bereits Technologien zur Modularisierung einzelner Monumente sowie zur Funktionsintegration in Leichtbauwerkstoffe entwickelt.

Eine Modularisierungs-Methode, die sowohl produktstrategische als auch technisch-funktionale Aspekte berücksichtigt, ist der „Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, der zum Ziel hat, die interne Varianz bei gleichbleibend hoher externer Varianz zu reduzieren. Die Weiterentwicklung der Methode, die methodisch die Modularisierung mit dem Leichtbau verbindet, wurde gerade in den letzten Jahren am Institut forciert und ist so in der Forschungslandschaft nicht bekannt. Ein Modulbaukastenprozess kann den Entwicklungsprozess unterstützen, wenn neue Ideen des Variantenmanagements und methodischen Vorgehensweisen, wie dem Integrierten PKT-Ansatz, in der Praxis umgesetzt werden. Unterstützt kann das Vorgehen durch eine visuelle Beschreibung des neuen Entwicklungsprozesses. Um Änderungen vorzunehmen, können neue Methoden (Arbeitsabläufe und Arbeitswerkzeuge) integriert werden.

Der Bereich Strukturanalyse und Versuchstechnik am Institut beschäftigt sich mit der statischen und dynamischen Analyse von Leichtbau-Sandwichstrukturen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Bestimmung von strukturellen Eigenschaften von Sandwichpaneln sowie auf Monumenten aus der Flugzeugkabine wie Trennwände und Galleys. Darüber hinaus versucht das Institut PKT, seine Kompetenzen zu kombinieren, um Methoden zur Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses zu schaffen.

Das PKT hat Erfahrung auf dem Gebiet der Analyse von Flugzeugmonumenten und der detaillierten hierarchischen Analyse von typischen Verbindungselementen, wie z. B. Inserts, die in der Flugzeugkabine verwendet werden. In diesem Zusammenhang sind Methoden zur Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses mit Hilfe von Hybrid-Simulations- und Testverfahren entwickelt worden.

Im Rahmen des Vorläufer-Projektes FlexGalley¹ wurden Modulkonzepte für verschiedene Galleys und -komponenten ausgearbeitet und in Form von Funktionsdemonstratoren umgesetzt.

Im Projekt SYLVIA² wurden durch eine modulare Produktstruktur Synergieeffekte im Kabineneingangsbereich durch die Verschmelzung von Galley und Lavatory zur sogenannten Gallatory erreicht und ebenfalls eine leichte Konfigurierbarkeit umgesetzt. Dadurch können Schnittstellen eingespart, ein einfacher Modultausch gewährleistet und die Galley entsprechend des Bedarfs komplett ausgestattet, oder für Kurzstrecken mit weniger Equipment versehen werden, was zusätzlichen Platz für weitere Sitze bietet. Eine konsequente Gewichtsreduzierung war aufgrund der nicht veränderten Plattenbauweise aus Sandwichkonstruktionen nicht möglich. Darüber hinaus wurden im Projekt die Anforderungen der unterschiedlichen Monumente für den Türeingangsbereich mit dem modellbasierten Ansatz mittels Cameo System Modeler implementiert und ausgewählte Werkzeuge des Integrierten PKT-Ansatzes erstmals mit SysML modelliert. Eine Durchgängigkeit von Werkzeugen und Prozessen bei der Entwicklung modularer Produktfamilien mithilfe des MBRE ist bisher nicht untersucht worden. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit der modellbasierten Entwicklung soll der Ansatz in dem beantragten Projekt weiterverfolgt werden

¹ FlexGalley – Modulares Konzept für Flugzeug-Bordküchen, in Kooperation mit Diehl Aircabin GmbH LuFo Hamburg

² SYLVIA – Synergetische Architekturen, in Kooperation mit Diehl Aircabin GmbH, Diehl Comfort Modules GmbH und Diehl Service Modules, gefördert durch das BMWi im Rahmen des fünften zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO V-1), 2014-2018.

Im Projekt ModSupport (KMU innovativ) wurde für ein mittelständisches Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau neben der Entwicklung eines Modulbaukastens für die Unternehmensprozesse ein Modulbaukastenentwicklungsprozess entwickelt und eingeführt. Das seit Ende letztem Jahr gestartete Folgeprojekt ProRobust im Verbund mit drei mittelständischen Unternehmen und einer Ausgründung aus der Hochschule konzentriert sich auf die Umsetzung zukunftsrobuster Produktarchitekturen.

Das Vorhaben adressiert die Zielsetzung des Flightpath 2050 Programms und ist in folgende bestehende Projekte eingegliedert:

- FlexGalley – Modulares Konzept für Flugzeug-Bordküchen, LuFo Hamburg (BWVI HH)
- CompoSeat – Entwicklung VIP-Flugzeugsitz aus CFK, LuFo IV (BMW i)
- SimoUNITS – Modulare Kabinen-Units in Simulation, LuFo IV (BMW i)
- GreenUNIT – Entwicklung einer Self-Service Plattform, Spitzencluster “Neues Fliegen” (BMBF)
- SYLVIA – Synergetische Ansätze für neuartige Module, Monumente und Systeme von zukünftigen Flugzeug-Kabinen, LuFo V (BMW i)
- Kabine 4.0 – Holistische Kabineninnovation vom Hangar zur Haustüre, LuFo V (BMW i)

Auswahl bisheriger Veröffentlichungen des Institutes PKT der TUHH zu den Themen der Arbeitspakete 1.1, 2.3 und 3.2 zum Projektstart:

Bahns, T.; Gebhardt, N.; Krause, D.: „A modularization approach for aircraft cabin components”, 4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST), Hamburg 2013.

Beckmann, G.; Gebhardt, T.; Bahns, T.; Krause, D.: „Approach to Transfer Methods for Developing Modular Product Families Into Practice,” International Design Conference – Design2016 - Dubrovnik, 1185-1194, 2016.

Krause, D.; Beckmann, G.; Eilmus, S.; Gebhardt, N.; Jonas, H.; Rettberg, R.: „Integrated Development of Modular Product Families: A Methods Toolkit”, in Simpson, T.W., Jiao, J.R., Siddique, Z. and Hölttä-Otto, K., "Advances in Product Family and Product Platform Design", Springer, New York, pp. 245-270, 2014.

Krause, D.; Gebhardt, N.; Greve, E.; Oltmann, J.; Schwenke, J.; Spallek, J.: „New Trends in the Design Methodology of Modularization. 11th International Workshop on Integrated Design Engineering”, IDE Workshop, Magdeburg, 2017.

Krause, D.; Gumpinger, T.; Plaumann, B.: Kapitel 3 – „Leichtbau“ in: Steinhilper, R.; Rieg, F. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, 2012.

Krause, D.; Oltmann, J.; Seemann, R.; Rasmussen, O.: Produktvalidierung von Leichtbaustrukturen für die Flugzeugkabine. 65. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016, Braunschweig, 2016.

Oltmann, J.; Seemann, R.; Spallek J.; Krause, D.: „Additively Manufactured Components for Structural Applications in Aircraft Interior – Two Case Studies”, Design for X, Beiträge zum 27. DfX-Symposium, Buchholz i.d.N., 2016.

Plaumann, B.; Krause, D.: „A methodical approach for dynamic system analysis & synthesis in the dimensioning of variant lightweight cabin interior“, Proceedings of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS). St. Petersburg, 2014.

Plaumann, B.; Krause, D.: „Reduzierte Systemmodelle für die Auslegung von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten“, Tag des Systems Engineerings 2012 (TdSE), Paderborn, 2012.

Plaumann, B.; Rasmussen, O.; Krause, D.: „System analysis and synthesis for the dimensioning of variant lightweight cabin interior“, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA, Boston, 2013.

Plaumann, B.; Rasmussen, O.; Seemann, R.; Krause, D.: „Dynamic simulation and testing for lighter cabin interior“. 4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST), Hamburg, pp. 211-220, 2013.

Rasmussen, O.; Krause, D.: „Influence of Load Elements on the Dynamic Behaviour of Lightweight Structures“, 6th international Workshop on Aircraft System Technology (AST), Shaker Verlag, Hamburg, pp. 195-204., 2015.

Rasmussen, O.; Plaumann, B.; Krause, D.: Untersuchung von varianten Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten, Design for X, Beiträge zum 23. Symposium, Bamberg, pp. 135-150., 2012.

Seemann, R.; Krause, D.: „Entwicklung von virtuellen Testverfahren für Sandwichstrukturen“, Design for X. Beiträge zum 25. DfX-Symposium. Bamberg, pp. 65-76, 2014.

Seemann, R.; Krause, D.: „Numerical Modeling of Nomex Honeycomb Sandwich Cores at Meso-Scale Level“, Composite Structures 159, pp. 702-718, 2017

Seemann, R.; Krause, D.: „Numerical Modelling of Nomex Honeycomb Cores for Detailed Analyses of Sandwich Panel Joints“, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, 2014.

Seemann, R.; Plaumann, B.; Oltmann, J.; Krause, D.: „FE-Modelling guidelines for the dimensioning of aircraft cabin interior under stationary dynamic loading“. Proceedings of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), St. Petersburg, 2014.

Spallek, J.; Sankowski, O.; Krause, D.: „Influences of Additive Manufacturing on Design Processes for Customised Products“, 14th International Design Conference - DESIGN 2016, Cavtat, Dubrovnik, pp. 513 – 522, 2016.

Institut für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT)

Das IFPT konzentriert sich in der Forschung auf vier Zielfelder – Leichtbau, große Werkstücke, lange Lebensdauer, kleine Serien. Bei der Produktion und Reparatur von Leichtbaustrukturen existiert noch viel Entwicklungspotenzial hinsichtlich Produktivität in der Verarbeitung faserverstärkter Kunststoffe aber auch besondere Herausforderungen aufgrund der typischen

Bauteiltoleranzen und -flexibilität. Große Bauteildimensionen erfordern neue Maschinenkonzepte zur Abdeckung der erforderlichen Arbeitsräume und zur Einbindung in Organisationen mit fließenden Betriebsmitteln. Die Kleinserienfertigung gehört mit ihren hohen Flexibilitätsforderungen zu den klassischen Forschungsfeldern der Produktionstechnik. Bei Produkten mit hoher Wertschöpfung und langer Lebensdauer hat die Wartung, Reparatur und Instandsetzung (MRO) eine ebenso hohe Bedeutung wie die ursprüngliche Produktion, wurde aber in der Forschung bisher eher vernachlässigt.

Das IFPT forscht in der robotergestützten Produktionsautomatisierung für diverse Aufgaben aus Fertigung, Montage und Qualitätskontrolle und hat, als Beitrag zur Lösung der oben skizzierten Problemfelder, vier Kompetenzfelder aufgebaut. Ein Schwerpunkt liegt in der Entwicklung mobiler oder ortsflexibler Roboterlösungen. Daneben beschäftigt sich das Institut mit der Mensch-Maschine-Kooperation und Hybriden, um insbesondere effiziente Lösungen für die flexible Teilautomatisierung zu generieren. Um veränderte Randbedingungen zu erkennen oder den tatsächlichen Ist-Zustand eines Objektes quantitativ zu ermitteln, wird intensiv für die produktionstechnische Nutzung neuartiger Sensorsysteme gearbeitet. Ein verbindendes Element für die genannten Kompetenzfelder stellt das letzte Kompetenzfeld dar. Um mit hochflexiblen, örtlich variablen und teilautomatisierten Lösungsbausteinen tatsächliche Produktionsaufgaben zu lösen, bedarf es der Bündelung aller verteilt vorhandener Informationen in adaptiven Modellen der Umgebung oder des Produktes im Sinne einer digital, vernetzten Produktion.

Das IFPT kann auf umfangreiche Erfahrung aus vorangegangenen und laufenden Projekten im Bereich der Flugzeugkabinenproduktion und dazugehörigen Instandhaltungsprozessen von Leichtbaustrukturen zurückgreifen.

Im Projekt RoboFill³ wurde die automatisierte, flexible Einbringung von Kernfüllmasse in komplexe Sandwichstrukturen erforscht. Diese dient zur Anpassung der Steifigkeit, Erzeugung von dichtenden Kantenabschlüssen oder zur Herstellung von zusätzlichen Strukturelementen. Wesentlicher Bestandteil sind die sensorische Erfassung der Bauteile und Waben sowie die automatische Generierung einer Befüllungsstrategie anhand von Konstruktionsdaten. Hiermit sollen effizient kundenindividuelle Bauteile produziert werden können.

Im Projekt VERONIKA⁴ wird die automatisierte Fertigung von Kabinenelementen in Sandwichbauweise untersucht. Hierbei wird ein Konzept entwickelt, welches den Anteil an manuellen Prozessen im Fertigungsprozess stark reduziert und durch eine Kombination aus Standardisierung und automatisierungsgerechter Gestaltung sowie vollautomatisierten Teilprozessen die wirtschaftliche Produktion von hochindividuellen Sandwichbauteilen ermöglicht.

Auswahl bisheriger Veröffentlichungen des Institutes IFPT der TUHH zu den Themen der Arbeitspakete 1.1, 3.1 zum Projektstart:

³ RoboFill – Robotergestütztes Befüllen von Wabenstrukturen zwecks Automatisierung der Sandwichbauweise, in Kooperation mit 3D ICOM GmbH & Co. KG, gefördert durch das BMWi im Rahmen des fünften zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo V-2, 20Q1525B), 2016 - 2019

⁴ VERONIKA – Vernetzte und effiziente Entwicklungs- und Produktionsprozesse für Passagierkabinen, in Kooperation mit DIEHL Aviation, gefördert durch das BMWi im Rahmen des fünften zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo V-2, 20K1513C), 2016 – 2019.

Eschen, H.; Harnisch, M.; Schüppstuhl, T.: Flexible and automated production of sandwich panels for aircraft interior. In: Procedia Manufacturing. 18. Jg, 2018, S. 35-42

Harnisch, M.; Dammann, M.; Eschen, H.: Automatisierung der Flugzeugproduktion. In: handling. 2018. Jg, 27. September 2018, 02/2018, S. 20. www.handling.de/robotertechnik/der-roboter-erobert-die-luftfahrtbranche.htm

Path Guiding Support for a Semi-automatic System for Scarfing of CFRP Structures. In: Tagungsband zum 3. Kongress Montage Handhabung Industrieroboter. Erlangen, 27.-28.02.2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 261-269

Eschen, H.; Kötter, T.; Rodeck, R.; Harnisch, M.; Schüppstuhl, T.: Augmented and Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry. 6th International Conference on Through - life Engineering Services, Bremen, 08.11.2017

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit im Konsortium 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 Arbeitspaketen dargestellt. Es wird ein Ausschnitt als Gesamtüberblick über das Projekt gegeben, wobei Details den jeweiligen Zwischenberichten zu entnehmen sind.

2.1 AP 1.1 Lastpfadoptimierte Leichtbaustrukturen für flexible Kabinenmonumente

In AP 1.1 erfolgt die Ist-Analyse der aktuellen Sandwichbauweise für die Flugzeugkabinenmonumente (Galley, Lavatory, Partition, Stowage, Hatrack, Crew Rest Compartment etc.). Zur Aufnahme der Ist-Situation wurden mehrere Besichtigungen der Produktionsstätten und Workshops mit den beteiligten Abteilungen durchgeführt. Dadurch wurde am realen Produkt insbesondere der aktuelle Stand der Konstruktion erfasst und durch Befragungen weitere Optimierungspotentiale identifiziert. Des Weiteren wurden in den Workshops neue Ideen mit den Mitarbeitern vor Ort diskutiert. Als Kombination aus Galley und Lavatory wurde ein Kabinenmonument als geeignete Ausgangsbasis für den aktuellen Ist-Stand identifiziert.

Erfassung der aktuellen Bauweise

Bei Flugzeugkabinenmonumenten handelt es sich um Leichtbaustrukturen aus vorrangig ebenen Platten, an die An- oder Einbauten befestigt werden. Als Leichtbaumaterialien werden bei den meisten Flugzeugkabinenherstellern Sandwichpaneele eingesetzt. Hierbei kommt in der Regel eine konventionelle Sandwichbauweise mit Deckschichten aus Glasfaser mit Phenolharzmatrix und einem Wabenkern aus Aramidfasern mit Phenolharz zum Einsatz. Von wenigen Herstellern werden Aluminiumbleche verwendet, die an den Kanten mit Metallprofilen verstärkt werden, denn aufgrund der höheren Dichte des Materials und fehlender Umsetzung einer lastpfadangepassten Gestaltung weisen diese tendenziell eine höhere Masse auf.

Zur Befestigung der Kabinenmonumente an die Primärstruktur werden Attachments genutzt. Im oberen Bereich werden einige wenige Upper Attachments verwendet und im Fußbodenbereich gibt es eine etwas größere Anzahl an Lower Attachments, die ebenfalls der Verbindung zur Flugzeugstruktur dienen. Die An- und Einbauten werden verschraubt, wie bei Öfen oder Getränkezubereitern. Wenn diese temporär lösbar und herausnehmbar sein müssen, wie bei Trolleys oder Standard Units, werden diese über montierte Gleitleisten eingebracht und mittels Retainer und Bumperleisten gesichert. Die internen Verbindungen des Monumentes werden zwischen den einzelnen Sandwichpaneelen flächig verklebt oder punktuell verschraubt. Eine weitere Betrachtung der bestehenden Verbindungstechnik und Diskussion von Konzepten für neuartige Verbindungstechnik findet in HAP 3 statt.

Lasten werden folglich vornehmlich über viele lokale Lasteinleitungspunkte eingebracht, was nicht den idealen Anwendungsfall für eine konventionelle Sandwichbauweise darstellt. Bei der Sandwichbauweise nehmen sehr dünne und steife Deckschichten die Lasten auf, die von einem dazwischen liegenden breiteren und sehr leichten Kern, z.B. in Form einer Wabenstruktur, auf Abstand gehalten werden.

Analyse der aktuellen Bauweise

An dieser Stelle erfolgt eine Zusammenfassung der erkannten Leichtbaupotentiale bei den aktuellen verwendeten konventionellen Sandwichbauweisen bei Flugzeugkabinenmonumenten.

Bei Flugzeugkabinenmonumenten treten viele lokale Lasteinleitungspunkte auf. Gerade über die Attachments zur Primärstruktur wirken sehr hohe Lasten auf die Struktur. Bei der Sandwichbauweise tritt die Problematik auf, dass eine Übertragung der lokalen Kräfte nicht direkt über den Kern erfolgen kann. Daher sind lokale Verstärkung notwendig, um die Lasten aufzunehmen und zu übertragen. Die Einleitung der lokalen Kräfte erfolgt über Inserts. Hauptsächlich durch den Durchmesser (quer zu den Deckschichten) oder Länge (parallel zur Deckschicht) der Inserts und der Füllmasse bestimmt. Dies führt zu einer zusätzlichen Masse und eine großen Steifigkeitssprung beim Übergang vom Kern zur Verstärkung. Sobald das Material und die grundlegende Struktur des Kerns bzw. Wabengeometrie und –größe festgelegt sind, sind die verbleibenden Optimierungsparameter die Höhe des Kerns und der Deckschicht (Anzahl der Lagen). Da sowohl die einzelnen Sandwichmaterialien als auch die Kombination in Form eines Sandwichpaneels einzeln zugelassen werden müssen, stehen nur bestimmte Kombinationen aus vorhandenen Kern- und Lagendicken der Deckschichten als Sandwichpaneel zur Verfügung. Im Paneel gibt dabei der am stärksten belastete Bereich die Dicke vor, was bedeutet, dass alle weniger stark belasteten Bereich überdimensioniert sind. Die konventionelle Bauweise stellt somit keine lastpfadgerechte Gestaltung für den Anwendungsfall der Flugzeugkabinenmonumente da. Daher ergibt sich ein Leichtbaupotential bei der Entwicklung neuer Leichtbauweisen mit Hilfe von Lastpfadoptimierungen.

Harmonisierung von Leichtbau und Modularisierung

In AP1.1. wurde die Harmonisierung von Leichtbau und Modularisierung durch das entwickelte methodische Vorgehen (siehe AP 2.3.2) durchgeführt (siehe Abbildung 2).

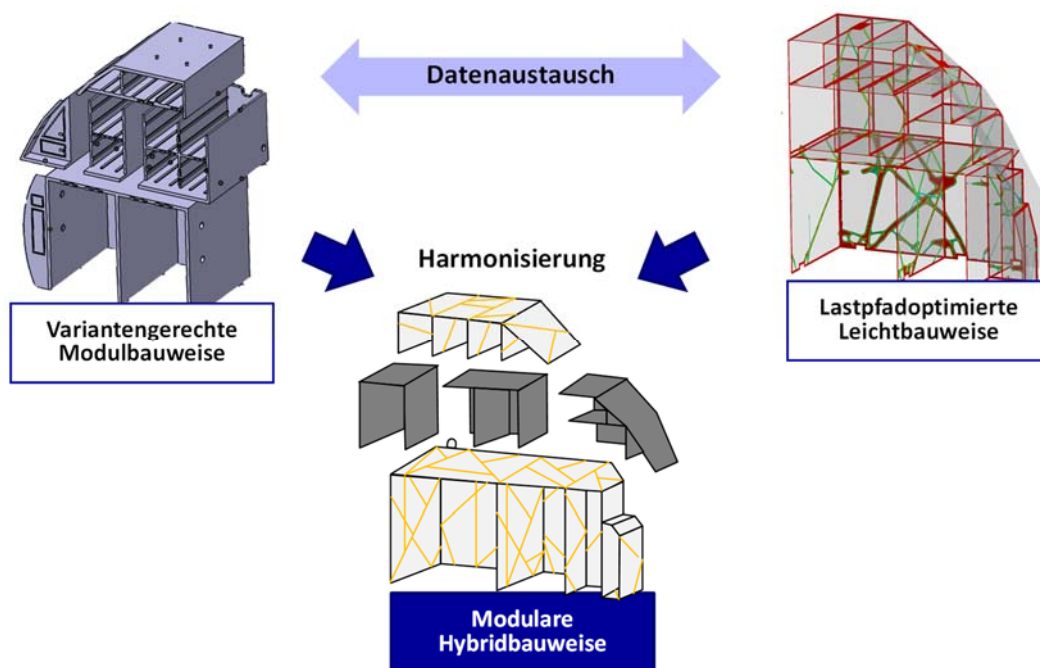


Abbildung 2: Modulare Hybridbauweise einer Flugzeuggalley nach [Han20]

Auf der linken Seite ist die variantengerechte Modulbauweise der Produktfamilie gezeigt, während auf der rechten Seite eine Produktstruktur für eine lastpfadoptimierte Leichtbauweise abgebildet ist. Durch die parallele Entwicklung und den konsistenten Datenaustausch (hellblauer Pfeil) werden die beiden Sichten in der Mitte in eine sogenannte *Modulare Hybridbauweise* zusammengeführt.

Im weiteren Projektverlauf wurden in AP 2.1, in dem die TUHH beteiligt ist, Teilergebnisse der von der TUHH geleiteten APs 2.3, 3.1 und 3.2 zusammengeführt und diskutiert. Die Ergebnisse sind in den entsprechenden Arbeitspaketen eingeflossen und werden daher in den folgenden Kapiteln aufgegriffen und damit die Ergebnisse der TUHH von AP 2.1 dort beschrieben.

2.2 AP 2.3 Entwicklung eines Modulbaukastens und eines Modulbaukastenprozesses

In Arbeitspaket 2.3. entwickelte das PKT einen Modulbaukasten und einen dazu passenden Modulbaukastenprozess. Dabei wurde insbesondere auf die besonderen Herausforderungen des Leichtbaus eingegangen und eine modellbasierte Unterstützung zum durchgängigen Datenmanagement entwickelt.

Analyse der Anforderungen an einen modularen Baukasten und zukünftige kundenrelevante Eigenschaften

Im Arbeitspaket 2.3.1 wurde die Analyse der Anforderungen an einen modularen Baukasten und der zukünftigen kundenrelevanten Eigenschaften durchgeführt. Parallel zur Anforderungsaufnahme im Rahmen eines Design Sprints in AP 1.1 wurden relevante Stakeholder für den Modulbaukasten des zu entwickelnden Monuments identifiziert.

Zusätzlich wurde eine Recherche zum Stand der Anforderungsanalyse im Bereich MBRE vorgenommen, um die aufzunehmenden Anforderungen in einem durchgängigen Datenmodell mit der Produktstrukturierung zu verknüpfen und anschließend ihre Analyse und Auswertung modellbasiert zu unterstützen. Dadurch können die Anforderungen nachverfolgt und verwaltet werden sowie eine durchgängige und konsistente Verknüpfung in einem Datenmodell erfolgen. Unter Einbeziehung der MBSE-Software „Cameo Systems Modeler“ konnten Möglichkeiten zur Modellierung von Modularisierungs-konzepten untersucht werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollten für die Flugzeugvarianten der A320-Familie das hintere Monument betrachtet werden.

Die Anforderungen für einen Modulbaukasten wurden in einer Mind-Map mit den Projektpartnern qualitativ aufgenommen und analysiert, parallel zur Anforderungsaufnahme und Ermittlung der Randbedingungen in AP 1.1. Darüber hinaus sind neben den Airlines und dem OEM die am Produktentstehungsprozess beteiligten Abteilungen Stakeholder. Für den Modulbaukasten sind besonders die Kundenanforderungen relevant, die zur externen Varianz beitragen und somit die interne Varianz auf der Produktstrukturebene verursachen. Dazu zählt beispielsweise der variante Kundenwunsch nach der Anzahl der Öfen, der Lavatories oder der Getränkezubereitern. Zur Aufnahme dieser Anforderungen für den Modulbaukasten wurden mehrere Workshops durchgeführt. Darüber hinaus wurden im Rahmen eines Workshops Kundenwünsche unterschiedlicher Märkte und damit Airlines betrachtet, um die zukünftige externe Vielfalt zu ermitteln. Die Analyse der Anforderungen konnte mit dem MBRE Ansatz weiter unterstützt werden. Dafür wurden die Anforderungen durchgängig mittels SysML modelliert und verknüpft und innerhalb eines Modells konsistent mit weiteren Werkzeugen und Daten der methodischen Produktentwicklung abgelegt. In einem weiteren Workshop wurden vier Szenarien deutlich und ausgestaltet.

Durch die unterschiedlichen Zielstellungen, die an den MICHEL-Verbund herangetragen wurden, wird deutlich, dass nicht eine monolithische Bauweise integraler Form alle Stakeholder-Anforderungen erfüllen kann, sondern nur mit der Betrachtung eines gesamten Produktprogrammes, bestehend aus unterschiedlichen Produktfamilien den Herausforderungen begegnet werden kann. Dabei ermöglicht eine Modulare Hybridbauweise eine effiziente Konfiguration.

Entwicklung modularer und variantengerechter Konzepte unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

Die Entwicklung des Modulbaukastens basiert auf dem *Integrierten PKT Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilie* und dabei insbesondere auf den beiden Methodenbausteinen der *variantengerechten Produktgestaltung* und der *Lebensphasenmodularisierung* [Kra18a].

Zur Analyse der kundenrelevanten Eigenschaften und derer Ausprägungen wurden an dieser Stelle Tools des MBSE-Ansatzes genutzt. Dabei wird auf die Forschungsergebnisse des LuFo-V-3 Vorhabens SYLVIA zurückgegriffen, in der mit der Software Cameo Systems Modeler Modelle zur Entwicklung einer Flugzeugkabine implementiert worden sind. Zur Nachverfolgbarkeit der einzelnen Ausprägungen der kundenrelevanten Eigenschaften zu den Produktvarianten der Produktfamilie wurde eine *Dependency-Matrix* verwendet. Dabei sind die einzelnen kundenrelevanten Eigenschaften als *Pakete* und deren Ausprägungen als *Klassen* modelliert, die in den Zeilen der Matrix dargestellt sind. Die einzelnen Produktvarianten des Vielfaltsbaumes sind in den Spalten als *Blöcke* dargestellt. Durch die *Allocate*-Beziehung werden die Ausprägungen den jeweiligen Produktvarianten zugeteilt. Das automatische aufsummieren der *Allocate*-Beziehungen ermöglicht es, direkt die Anzahl der verwendeten Ausprägungen innerhalb der Produktfamilie zu identifizieren.

Daraus wurde ein erstes Konzept für ein gesamtes Produktprogramm abgeleitet, welches sich aus mehreren Produktfamilien aufbaut. Diese Produktfamilien zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf übergeordneter Ebene unterschiedliche Konfigurationen für den Kunden bieten.

Um die Vielfalt aus AP 2.3.1 umzusetzen, wird eine interne Vielfalt benötigt. Die dazu neu entwickelte Produktstruktur der einzelnen Produktfamilien wird mittels des Module Interface Graph (MIG) des *Integrierten PKT-Ansatzes* ermöglicht. Damit wird die Art der Komponenten (Standard, variant, optional, variante Anzahl), ihre Lage und Größe sowie die Flüsse in einer Visualisierung für die gesamte Produktfamilie dargestellt.

Zur Aufnahme der Funktionen wird sowohl die umsatzorientierte Produktfamilien-funktionsstruktur des *Integrierten PKT-Ansatzes* als auch eine hierarchische Funktionsstruktur verwendet.

Zur variantengerechten Produktgestaltung wird im Rahmen des *Integrierten PKT-Ansatzes* der Variety Allocation Model (VAM) verwendet, in dem die externe zur internen Vielfalt in Beziehung gebracht wird [Kra18a]. Hier wird im Rahmen des Projektes der sogenannte 3-Ebenen-VAM verwendet, bei dem auf oberste Ebene die varianten kundenrelevanten Eigenschaften, auf der mittleren Ebene die varianten technischen Merkmale und auf unterster Ebene die varianten Komponenten dargestellt sind. Im VAM wird ersichtlich, dass die Produktstruktur größtenteils dem Idealbild einer variantengerechten Produktstruktur entspricht, und somit wenig Änderungsbedarf der Produktstruktur aufweist. Durch das initiale Neuentwickeln der Produktstruktur einer Produktfamilie konnte im Gegensatz zur sonst üblichen Weiterentwicklung vorhandener Konzepte bereits bei der Festlegung der internen Vielfalt eine größtenteils variantengerechte Produktstruktur entworfen werden.

Für die anschließend erfolgte Lebensphasenmodularisierung wurden die Prozesse aufgenommen und aus Workshopergebnissen ermittelte Modultreiber, also Wünsche für

Module in einzelnen Lebensphasen, verwendet. Dabei wurde für das neu zu entwickelnde Produktprogramm die Lebensphasen identifiziert. Die Modultreiber beruhen auf dem Methodenbaustein der Lebensphasenmodularisierung [Kra18a]. Der gewünschte modulare Aufbau aus Sicht einzelner Lebensphasen lässt sich mit den Netzplänen visualisieren, in denen die einzelnen Modultreiber über die individuellen Modultreiberausprägungen mit den Komponenten vernetzt werden und diese wiederum zu Modulwünschen zusammengebracht werden. Auf dieser Grundlage wurde eine Harmonisierung der Modulwünsche der einzelnen Lebensphasen vorgenommen und ein erstes Konzept für einen Modulbaukasten entwickelt. Der entwickelte modulare Baukasten lässt sich in verschiedene Module unterteilen. Es wird ein Galleyanteil verwendet, der produktprogrammübergreifend zum Einsatz kommt. Dieser Anteil ist dreigeteilt. Daneben kann optional weitere Galleymodule hinzukonfiguriert werden.

Bewertung und Auswahl des finalen Modulbaukasten-Konzeptes

Um den Zielkonflikt zwischen dem Variantenmanagement durch eine modulare Produktstruktur einerseits und der Gewichtseinsparung durch den Leichtbau andererseits zu lösen, wird eine Weiterentwicklung des integrierten PKT-Ansatzes um eine weitere Methode benötigt. Um somit die modularen Konzepte mit dem Leichtbau abzustimmen (siehe Kap 3.2), wird hier der weiter erforschte Modulare Leichtbau verwendet. Er hat zum Ziel, einerseits ein effizientes Variantenmanagement durch eine Modularisierung zu ermöglichen, andererseits den Leichtbau umzusetzen. Beide Aspekte stehen im Widerspruch zueinander, wie die Betrachtung von Schnittstellen zeigt, die bei einer modularen Struktur häufig überdimensioniert und damit schwerer als nötig sind, wohingegen der Leichtbau gewichtsreduzierte Schnittstellen entwickelt bzw. diese vermeidet.

Das entwickelte methodische Vorgehen des Modularen Leichtbau für die Entwicklung von Flugzeugkabinenkonzepten ist in Abbildung 3 dargestellt.

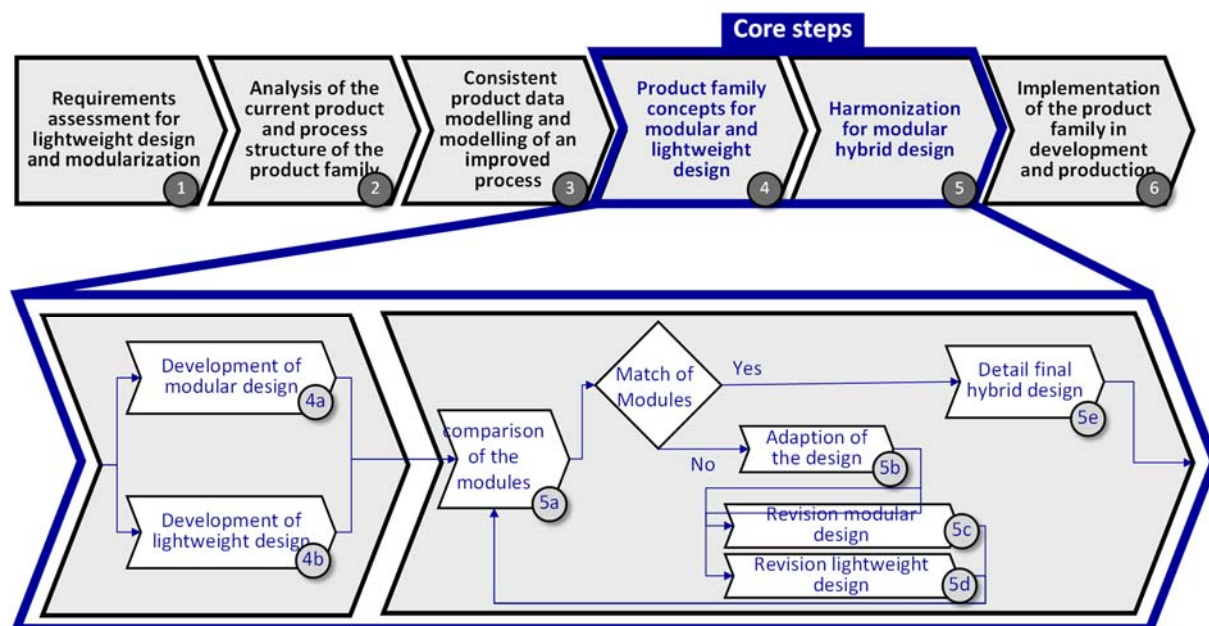


Abbildung 3: Methodisches paralleles Vorgehen zum Modularen Leichtbaus für die Flugzeugkabine [Han21a]

Das methodische Vorgehen zum Modularen Leichtbau wird in 6 Schritte eingeteilt und stellt ein generisches Prozessmodell dar. In diesem werden einerseits die unterschiedlichen Produktdatenmodelle durchgängig verknüpft und andererseits mit einem konkreten Prozessmodell des Anwendungsfalls vernetzt.

Auch im Hinblick auf die Bauweise wurden weitere Erkenntnisse erzielt, die für das Projekt relevant sind. Insbesondere die Menge an unterschiedlichen Anforderungen, die für das in MICHEL betrachtete Monument im bisherigen Projektverlauf ermittelt wurden, motiviert eine modulare Bauweise. Ebenso ist der Leichtbau zu beachten, weswegen das neue Konzept nicht schwerer, sondern leichter sein soll. Der Modulare Leichtbau kann hierbei helfen, sowohl Komplexitäts- als auch Gewichtsreduktion zu ermöglichen. Insofern muss sich das entwickelte MICHEL-Konzept durch eine modulare Hybridbauweise auszeichnen, in dem jedes Modul eine andere Bauweise, angepasst an seine unterschiedlichen Anforderungen, haben kann und Konzeptvorschläge aus dem Leichtbau und der Modularisierung berücksichtigt, um das Potential effizient auszuschöpfen. Beispielsweise sind standardisierte Module für lastpfadoptimierte Leichtbauweisen besser geeignet. Insbesondere durch die Variantenbetrachtung und die Leichtbauoptimierung ist die richtige Betrachtungsebene der Produktstruktur entscheidend, um die Vorteile der neu entwickelten Bauweise voll ausnutzen zu können. Eine schematische Darstellung einer modularen Hybridbauweise für ein Aft-Monument ist in Abbildung 4 dargestellt.

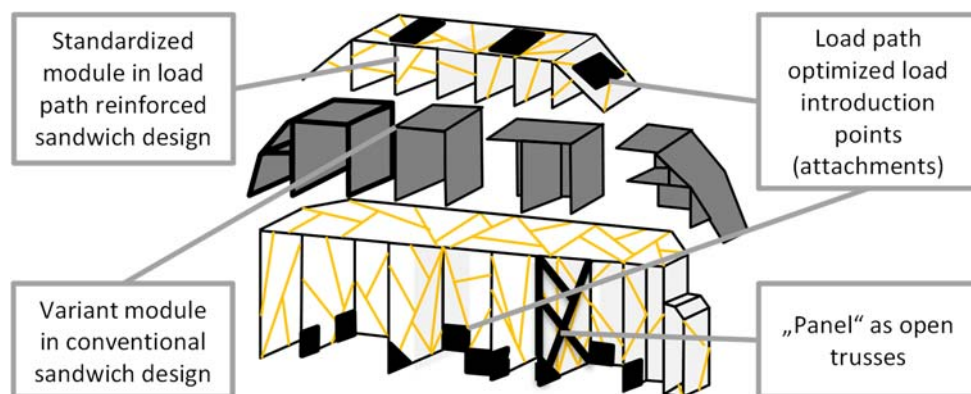


Abbildung 4: Modulare Hybridbauweise für das AFT-Monument [Han21b]

Zur datentechnischen Kombination der modularen Hybridbauweisen wurde im Rahmen des Modularen Leichtbaus eine modellbasierte Unterstützung gewählt. Da zur Harmonisierung der beiden unterschiedlichen Bereiche insbesondere das Management unterschiedlicher Daten und Informationen eine besondere Herausforderung darstellt, wurden diese im Rahmen eines Produktdatenmodells miteinander verknüpft und dadurch eine redundanzfreie und konsistente Basis für die Entwicklung einer modularen Hybridbauweise ermöglicht (siehe Abbildung 5).

Die Implementierung mit Hilfe des Cameo System Modelers kann durch ein mit Aktivitätsdiagrammen modelliertes Prozessmodell weiter erfolgen. Die darin enthaltenen Produktmodelle, wie das MIG, können durch interne Blockdiagramme modelliert werden.

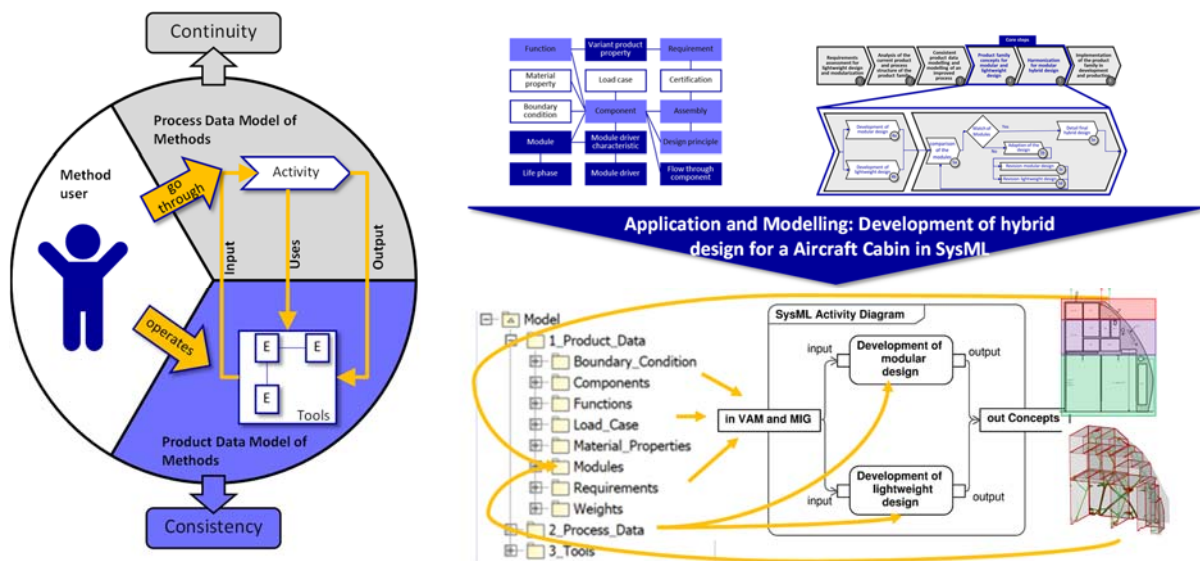


Abbildung 5: Modellbasiertes Produktdaten- und Prozessmodell des Modulare Leichtbaus [Han21b]

Entwicklung eines Modulbaukastenprozesses zur Konfiguration der Flugzeugkabinenmonumente

Für die Aufnahme und Analyse des Entwicklungsprozesses wurde ein vorhandener Prozess aufgenommen.

Diese Schritte wurden dann im AP2.3 von der TUHH analysiert, eingeordnet und klassifiziert. Anschließend erfolgte eine Gegenüberstellung mit der VDI2221 zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, in der ein Entwicklungsprozess definiert und vorgeschlagen wird. Auf Grundlage dieser Gegenüberstellung konnten somit Verbesserungspotentiale beim Prozess identifiziert werden.

Für den analysierten Produktentwicklungsprozess konnte ein Optimierungsvorschlag erarbeitet werden. Dabei wurden insbesondere die Empfehlungen der VDI versucht umzusetzen, dabei aber die vorhandene Visualisierung des Prozesses in einem Flussdiagramm aufgegriffen, um eine möglichst hohe Kompatibilität zum vorhandenen Prozess zu ermöglichen. Neue Prozessschritte, Prozessschritte in einer neuen Position sowie ein höherer Detaillierungsgrad konnten somit umgesetzt werden.

Entwicklung eines Implementierungsvorschlages des neuen Modulbaukastenprozesses

Anschließend wurde eine modellbasierte Implementierung eines Modulbaukastenpflegeprozesses in SysML modelliert (siehe Abbildung 6) und dabei insbesondere auf vorhandene methodische Vorgehen der Pflege modularer Produktfamilien zurückgegriffen [Bah15].

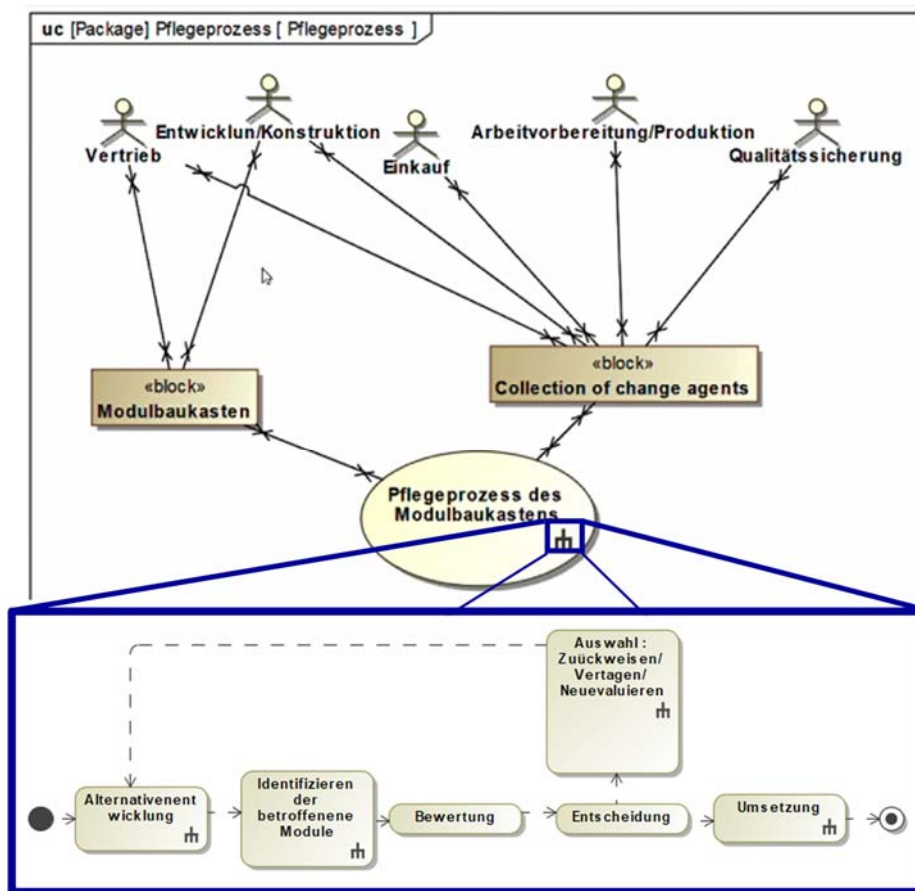


Abbildung 6: Modellierung eines Modulbaukastenpflegetprozess nach [Bah15]

Der für die Modularisierung relevante Prozess konnte mit den Produktdaten detailliert mittels des Cameo Systems Modellers modelliert werden (siehe Abbildung 7).

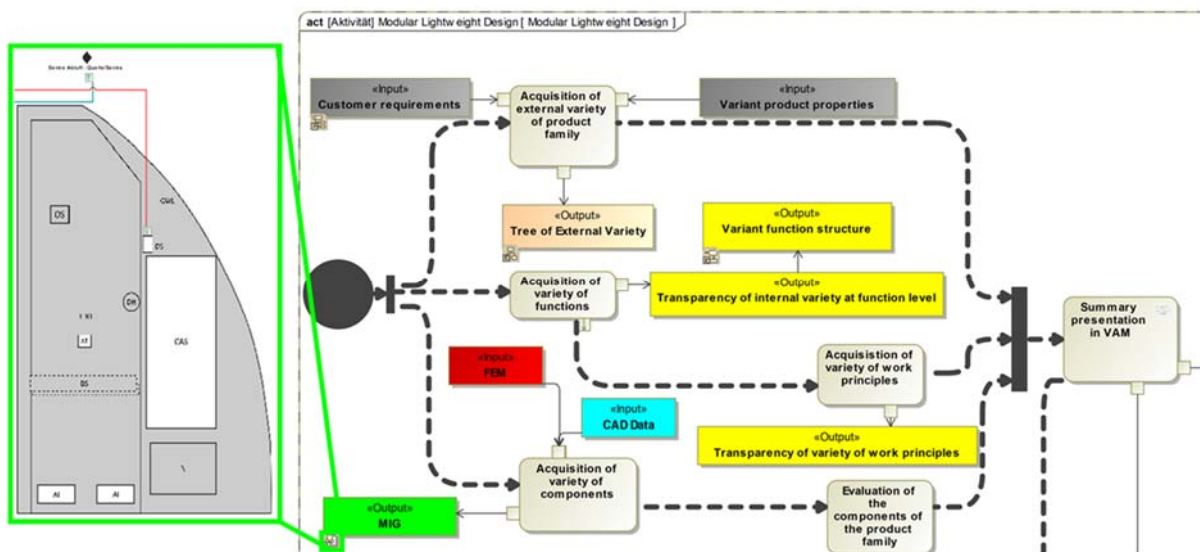


Abbildung 7: Modelliertes Prozessmodell [Han18]

In Abbildung 7 ist auf der linken Seite ein Produktmodell als MIG für ein Flugzeugkabinen-Monument und auf der rechten Seite ist ein Ausschnitt des Entwicklungsprozesses dargestellt. Schnittstelle zu Daten und Modellen können so in das Datenmodell integriert werden.

2.3 AP 3.1 Vernetzte Produktions- und Montagesysteme

Analyse der bestehenden Produktionsprozesse

Den Einstieg in das Vorhaben bildete eine Analyse der bestehenden Prozesskette. Dabei wurde die gesamte Prozesskette von der Lagerung der Halbzeuge, über nachfolgende Fertigungsschritte und Vormontage von Baugruppen bis hin zur Endmontage und Auslieferung an den Kunden betrachtet. Als geeignetes Beispiel wurde die Produktion eines Retrofit-Monumentes, welches sowohl Lavatory als auch Galley beinhaltet, herangezogen, da dort der Großteil der relevanten Prozesse und Bauteile existiert. Somit sollte sichergestellt werden, dass zukünftige Prozess- und Produktverbesserungen eine größere Auswirkung auf die gesamte Produktionskette erzielen. Der Produktionsprozess kann in sieben Abschnitte, von der Bearbeitung über die Vormontage bis zur Endmontage gesamter Monumente mit durchgehender Qualitätssicherung unterteilt werden.

Die Kabinenmonumente bestehen hauptsächlich aus Sandwich-Paneelen mit einer Nomex® Aramid-Wabe als Kernmaterial und Decklagen aus Glasfaser-Prepregs. Diese werden in unterschiedlichen Abmessungen zugeliefert und eingelagert. In einem ersten Bearbeitungsschritt werden die benötigten Taschen, Nuten oder Bohrungen mittels CNC-Fräsen in das Bauteil eingebracht. Die weitere Bearbeitung erfolgt automatisiert.

Der Kantenabschluss der zu diesem Zeitpunkt offenen Sandwich-Platte erfolgt durch mehrere Fertigungsschritte mit unterschiedlicher Fertigungstiefe. Gerade Kanten könnten halbautomatisch mit Umleimern oder manuell mit Kernfüllmasse verschlossen werden. Nach der fertigungstechnischen Bearbeitung folgt die überwiegend durch manuelle Prozesse geprägte Montage der Kabinenmonumente. Als Fügeverfahren in der Vormontage kommen hauptsächlich Kleben und Schrauben zum Einsatz. Durch die lange Prozesszeit beim Aushärten des Klebstoffes, ist eine Art getaktete Montage möglich. Allerdings bringt dieser Prozess auch Defizite mit sich. Durch das geringe Eigengewicht der Sandwich-Bauteile muss während des Klebprozesses Kraft auf die Fügestelle aufgebracht werden. Darüber hinaus ist die Verbindung unlösbar, was eine zukünftige Veränderung bzw. in diesem Projekt angestrebte Rekonfiguration des Kabinen-Monuments ausschließt. Außerdem entsteht so bei variantenreichen Baugruppen eine extrem hohe Rüstzeit mit individueller Arbeitsvorbereitung, welche zusätzliches Expertenwissen voraussetzt. Um Schraubverbindungen zu realisieren werden Gewindeinserts in die Bauteile eingebracht. Der bestehende Prozess der Insert-Montage und dazugehörige Automatisierungsansätze finden sich in nachfolgenden Absätzen. Im Anschluss an die Vormontage findet das sogenannten Finish und Dekor statt, bei dem eine kundenindividuelle Oberfläche geschaffen wird, welche dem auslieferungsfertigen Zustand entspricht.

Vor der Auslieferung findet die Endmontage der Kabinenmonumente statt. Dabei werden die vormontierten Baugruppen gefügt und mit verschiedenen Systemen aufgerüstet. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Entwicklungsprozessen und zahlreichen Verbindungstechnologien, welche aus zwei verschiedenen Monumenten stammen, ist die Komplexität der Montageprozesse besonders hoch. Somit verspricht eine montagegerechte Betrachtung und rationale Verbindungstechnik hohes Verbesserungspotential.

Zusammenfassend lässt sich die Produktion mit folgenden Kriterien beschreiben:

- Fertigung mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad und unterschiedlicher Fertigungstiefe
- Montage in verschiedenen Organisationsformen
- Hoher Anteil an Montage
- Hohe Varianz an Verbindungstechnik

Die Kabinenproduktion lässt sich in die beiden Gewerke Fertigung und Montage aufteilen. In der Fertigung werden individuelle Paneele aus Verbundmaterial gefertigt. Dazu zählen der Aufbau der Decklagen aus Glasfaser-Prepregs, das Befüllen mit Kernfüllmasse und der Randabschluss. Allerdings wurden bereits im LuFo V-2 Projekt VERONIKA Konzepte zur vollautomatisierten Fertigung von ebenen Sandwich-Paneele erarbeitet, bei denen der Legevorgang sowie der Befüllvorgang mit Kernfüllmasse mit Hilfe eines Roboters durchgeführt wird. In MICHEL fokussierten sich weitere Untersuchungen daher auf die Weiterverarbeitung und Montage der automatisiert gefertigten Sandwich-Paneele.

Die Montage der Kabinenmonumente lässt sich in Vormontage und Endmontage aufteilen. In der Vormontage werden Paneele zu Baugruppen gefügt. Im Anschluss daran wird deren Oberfläche schleiftechnisch bearbeitet und mit kundenindividueller Dekorfolie dekoriert. Im Anschluss daran werden die Baugruppen mit weiteren Bauteilen, wie z.B. Haltern und Retainern, aufgerüstet und zu Monumenten gefügt. Darüber hinaus werden elektrische Leitungen und Wasserleitungen montiert. Abschließend findet eine Funktionsprüfung statt.

Die Bauteile lassen sich in drei verschiedene Gruppen aufteilen:

1. Sandwich-Paneel mit Kernfüllmasse und Randabschluss
 - a. Ebene Platten
 - b. Freiformteile
2. Verbindungselemente
 - a. Verbindung zwischen Paneelen
 - b. Verbindung zwischen Paneelen und anderen Bauteilen
3. Sonstige Bauteile

Gruppe eins umfasst alle Platten aus Verbundmaterial. Am häufigsten werden ebene Platten verwendet. Freiformteile kommen nur in geringer Stückzahl vor und werden vor allem zur maximalen Platzausnutzung im Flugzeuginnenraum eingesetzt. Dabei wird die Außenkontur des Flugzeugrumpfes nachgebildet, wobei ausreichend Platz für Leitungen zwischen Außenwand und Flugzeugrumpf erhalten bleibt. Hierzu zählen einerseits individuelle Lavatory und Galley Seitenwände in geringen Stückzahlen und Sidewall-Paneele, welche in sehr hohen Stückzahlen produziert werden.

Verbindungselemente dienen während der Montage zur Verbindung der Paneele untereinander sowie zur Verbindung von weiteren Bauteilen mit dem Paneel wie z.B. Halter, Retainer etc.. Einzelne Paneele werden überwiegend durch Klebstoff miteinander verbunden. Die Positionierung untereinander wird dabei entweder durch Zapfenverbindungen oder Flachdübel realisiert. Baugruppen werden zur Trennung vor dem Einbau im Flugzeugrumpf mit Schraubverbindungen miteinander verbunden. Die Beschläge werden dabei in den Rand der Paneele eingebracht. Um andere Bauteile an den Paneelen zu befestigen, wird in der Regel auf Gewindeinserts zurückgegriffen. Diese werden mittels Klebstoffes mit dem Kernmaterial und der Decklage verbunden. Dabei stehen je nach Belastungsart verschieden dimensionierte Inserts zur Verfügung. Durch den Austausch mit AP 2.4 und Workshops in Zusammenarbeit mit Diehl Aviation im Rahmen von AP 1.1 wurde rationelle Verbindungstechnik zum einfachen Austausch von Kabinenelementen als Lösung zur schnellen Rekonfiguration von Modulen identifiziert. Die Ergebnisse eines innovativen, rationellen Verbindungselementes wird im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchungen vorgestellt.

Konzeptentwicklung für die effiziente Produktion von Kabinenelementen

Auf Basis der Analyse und Ergebnissen aus vorherigen Forschungsprojekten, fiel der Betrachtungsrahmen für die weitere Konzeptentwicklung auf die Montage der Kabinenmonumente. Dabei wurden die Auswirkungen der automatisierten Fertigung auf die Montage näher beleuchtet und ein mögliches Groblayout entwickelt.

Durch eine automatisierte Fertigung von Sandwich-Paneelen kann die Fertigung standortunabhängig stattfinden und die bisherige Produktion auf die Montage von Kabinenmonumenten reduziert werden. Weiterhin lässt sich die Montage in mehrere Vormontagestationen und einen Endmontagebereich unterteilen. Im Bereich der Vormontage können einzelne Baugruppen und Module montiert werden. In der Endmontage entstehen daraufhin die fertigen Monumente. Da die Montage hauptsächlich manuelle Montageaufgaben umfasst, wurden Unterstützungssysteme für den Werker untersucht. Zwei Systeme, welche sich als geeignet herausstellten sind AR-Werkzeuge, wie beispielsweise Laserprojektoren, oder Cobots. Die bearbeitete Oberfläche von Sandwich-Paneelen bietet nach der Fertigung keine optischen oder haptischen Referenzen für nachfolgende Montageprozesse. Montagepositionen oder Bereiche, in denen Klebstoff aufgetragen wird, müssen aufwendig den Bauteilunterlagen entnommen und auf die Bauteiloberfläche übertragen werden. Ein Projektionssystem kann diese Tätigkeit ersetzen und den Fügeprozess beschleunigen (vgl. **Abbildung 8**).

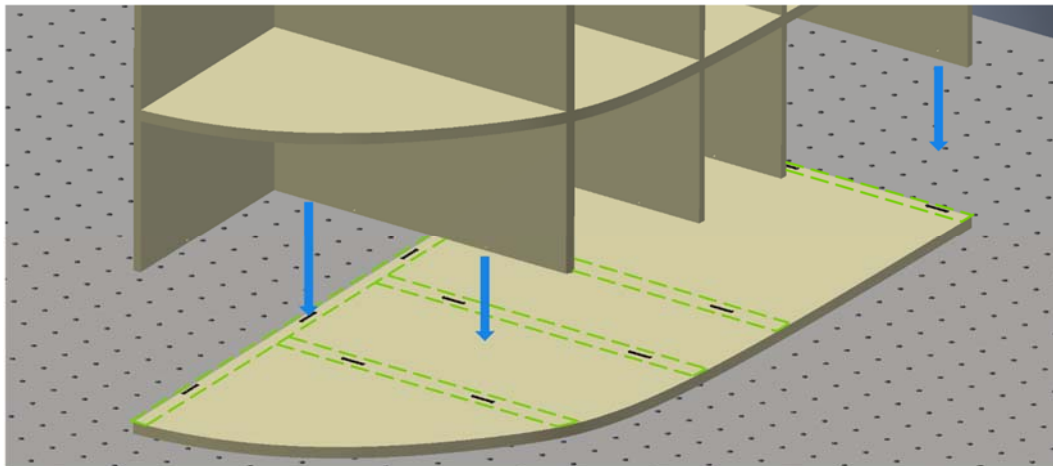


Abbildung 8: Einsatz eines Laserprojektionssystems zur Anzeige der Fügepositionen

Ebenso ist zu erwarten, dass Zeiten zur Kommissionierung reduziert werden können, die Montagereihenfolge flexibel angegeben werden kann und Justageprozesse vereinfacht werden können. Cobots eignen sich insbesondere zur Unterstützung bei Handhabungsaufgaben. Aufgrund der Nähe zum Werker und des Potentials zur Integration in den manuellen Produktionsprozess, stellen sie ein geeignetes System dar. Das niedrige Gewicht der Verbundbauteile ermöglicht auch ein Bauteilhandling mit Leichtbaurobotern in der Vormontage der Monumente. Ebenso lassen sich mit geeigneten Endeffektoren Schraubvorgänge automatisieren und somit Füge-, Handhabungsprozesse und Kommissioniervorgänge parallelisieren.

Zur Konzeptionierung eines neuen Produktionsprozesses wurde in Zusammenarbeit mit Diehl Aviation ein Service-Unit-Shelf als repräsentative Baugruppe identifiziert. Dort kommen die zuvor genannten Verbindungselemente sowie eine hohe Anzahl an varianten Bauteilen zum Einsatz. Zunächst wurden alle Fertigungs- und Montageprozesse zur Herstellung der Baugruppe analysiert. Dabei wurde deutlich, dass die Montage im Vergleich zur vollautomatisierten Fertigung durch manuelle Prozesse geprägt ist. Teilautomatisierte Ansätze werden bisher vernachlässigt. Des Weiteren fällt auf, dass Montageprozesse nur aus drei Montagerichtungen durchgeführt werden – den beiden Oberflächen und einer Stirnfläche. Darüber liegen die Montagepfade eindimensional vor. Eine Ausnahme bildet die Montage des Intermediate-Retainers, währenddessen mehrere Bauteile aus verschiedenen Richtungen zeitgleich montiert werden müssen.

Die automatisierte Fertigung mit Kernfüllmasse-Eintrag und automatisierungsgerechten Fräskonturen bietet mit geringen Toleranzen eine ideale Grundlage für Automatisierungsansätze in der Montage. Darüber hinaus sind die bisher manuell durchgeführten Montageprozesse sehr gut für die Automatisierung geeignet. Ebenso bietet die digitale Bauteilbeschreibung und die Erzeugung von automatisierten Fräs- oder Roboterprogrammen eine gute Ausgangsbasis, um weitere Unterstützungssysteme oder Anlagen zur Montage von Kabinenbauteilen in die bestehende Produktion zu integrieren. Im weiteren Projektverlauf wurde die teilautomatisierte Vormontage von Paneelen vor Zusammenbau der Monumente untersucht. Dabei sind folgende Potentiale und Limitationen zu erwarten:

Potentiale:

- Kürzere Durchlaufzeiten
- Geringere Personalkosten
- Qualitätssteigerung durch eine geringere Anzahl an Fehlern
- Geringere Kosten durch Nacharbeit
- Skaleneffekte durch einheitliche Prozesse für variantenreiche Produkte

Limitationen:

- Hohe Investitionskosten durch neue Anlagentechnik
- Zusätzliche Aufwände in der Erstellung von Produktionsprogrammen
- Zusätzlicher Digitalisierungsaufwand zur Erzeugung von durchgängigen Daten in Konstruktion und Produktion

Die weitere Konzeptentwicklung baut auf die Analyse der bestehenden Prozesskette am Beispiel des ausgewählten Service-Unit Panels auf. Ziel war dabei eine effiziente, teilautomatisierte Vormontage von ebenen Paneelen in Losgröße 1.

Um automatisierbare Prozesse zu identifizieren, wurde die bestehenden Bauteile auf ihre automatisierungsgerechte Produktgestalt analysiert um Bauteilgruppen zu identifizieren, welche besonders für eine Automatisierung in Frage kommen. Daraus sind die in Abbildung 9 dargestellten, notwendigen Prozesse abgeleitet worden.

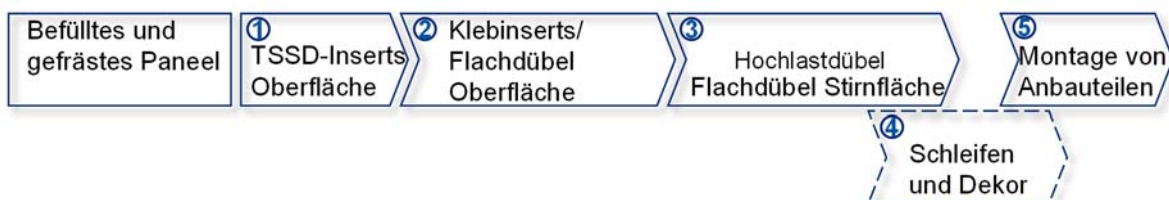


Abbildung 9: Notwendigen Prozesse für die teilautomatisierte Vormontage ebener Paneele

Ausgangsbasis ist ein mit Kernfüllmasse befülltes und gefrästes Sandwich-Paneel mit Nomex®-Wabenkern und Decklagen aus Glasfasern in Phenolharzmatrix. Anbindungspunkte für Schraubverbindungen werden einerseits durch niedrig belastete stoffschlüssige Inserts, andererseits durch hochbelastete Klebinserts hergestellt. Fügstellen zu anderen Paneelen können durch sogenannten Flachdübel erzeugt werden. Bei hochbelasteten Verbindungen kommen zylinderförmige Hochlastdübel zum Einsatz. Nachdem alle Verbindungselemente eingebracht wurden, kann das Paneel geschliffen und dekoriert werden. Dieser Fertigungsschritt wird jedoch im weiteren Projektverlauf nicht berücksichtigt. Im Anschluss folgt die Montage aller Anbauteile. Diese werden überwiegend mittels Schrauben oder Klebstoff gefügt. Hierbei können die Bauteile sowohl in Anzahl als auch Geometrie stark variieren. Bei allen zuvor genannten Prozessschritten muss die Zugänglichkeit aus allen Richtungen gewährleistet sein. Die Schritte 1-3 eignen sich für eine Vollautomatisierung. Die

Fügerichtungen sind geradlinig, die Fügestellen aufgrund der simplen Geometrie des Grundbauteils gut zugänglich und die Position ist meist geometrisch durch Bohrungen bestimmt bzw. wird die Bohrung während des Prozesses erzeugt. Darüber hinaus liegen die Inserts in einer wirtschaftlich automatisierbaren Stückzahl vor. Schritt 5 umfasst eine Vielzahl von Bauteilen unterschiedlichster Geometrien. Ebenso sind die Fügeprozesse komplexer und es werden mehrere Bauteile gleichzeitig gefügt. Diese Prozesse können durch den Einsatz geeigneter Hardware teilautomatisiert werden und der Werker kann durch Assistenzsysteme unterstützt werden, wodurch sich Fehler vermeiden und die Qualität steigern lässt, sowie die Durchlaufzeit reduziert werden kann.

Zur Entwicklung einer digitalen Prozesskette, wurde der notwendige Informationsfluss visualisiert. Ein Ausschnitt ist in **Abbildung 10** dargestellt.

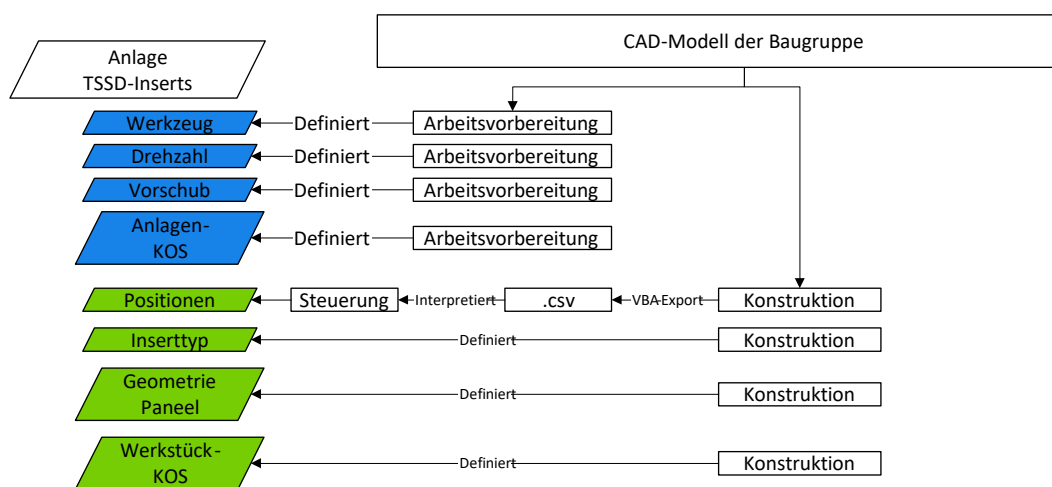


Abbildung 10: Auszug des Informationsflusses zur Generierung von Bauteil- und Prozessinformationen für das neue Produktionskonzept

Durch die digitale Darstellung aller Bauteile, lassen sich aus den CAD-Modellen bauteilspezifische Informationen (grün) ableiten, welche für den jeweiligen Montageprozess notwendig sind. Prozessparameter (blau) werden für jede Anlage definiert und können für anderen Varianten wiederverwendet werden. Durch die Nutzung von Informationen, wie der marker-basierten Bauteilreferenzierung, Fräs- oder Roboterprogrammen sowie bereits definierten Koordinatensystemen lassen sich für die Definition von Montageprogrammen Synergieeffekte erzielen.

Nach der Identifikation der notwendigen Prozesse, wurde das Konzept um Hardware erweitert. Nachfolgend sind drei verschiedene Stationen dargestellt, mit denen die Montage der reibschlüssigen TSSD-Inserts (thermischer Stoffschlussdom), die Montage von Klebinserts sowie die Montage der Anbauteile durchgeführt werden kann. Unter Klebinserts sind hier sowohl Standard Klebinserts, Hochlastdübel als auch Flachdübel zu verstehen. Zu den Anbauteilen gehören beispielsweise Retainer, Bumper, Führungsschienen oder Beschläge. **Abbildung 11** zeigt schematisch eine Anlage zum Setzen von stoffschlüssigen TSSD-Inserts, ein mögliches Anlagenlayout und eine Prozessbeschreibung nach VDI2860.

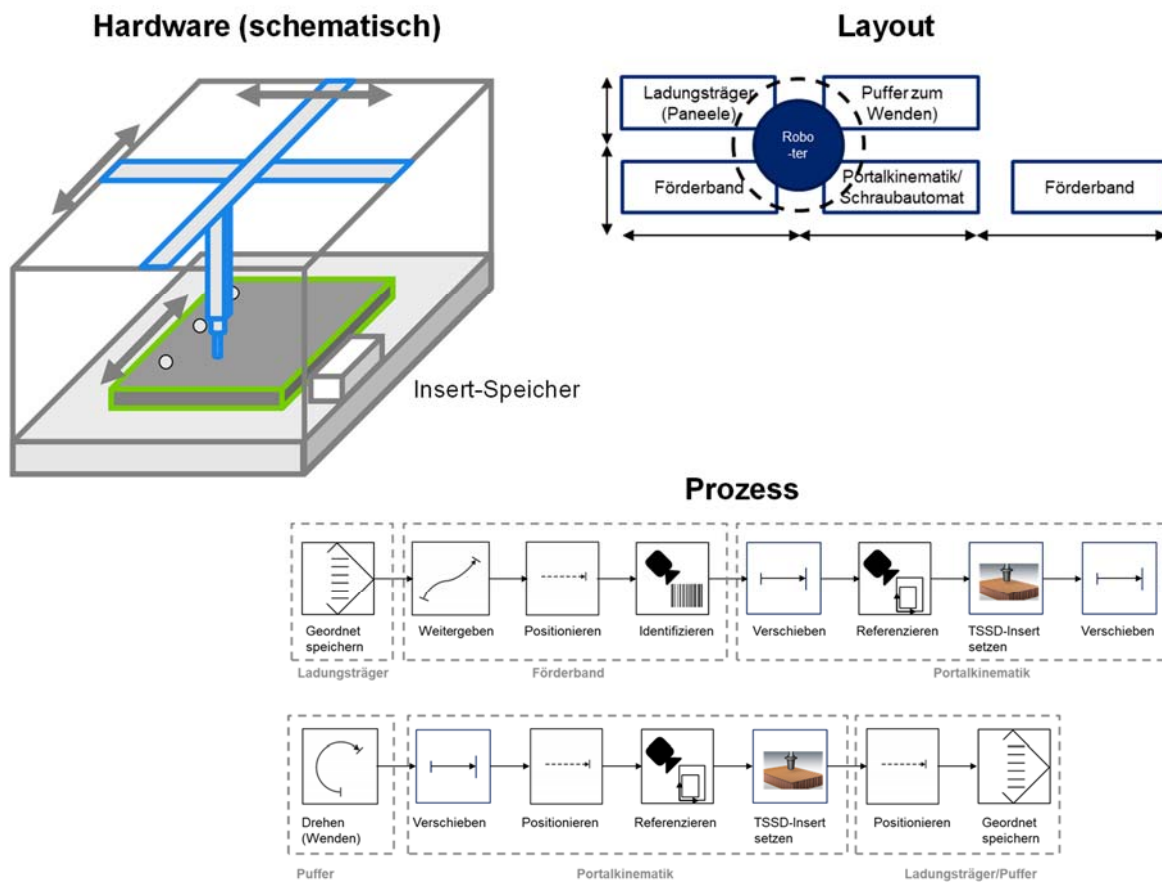


Abbildung 11: Hardware, Layout und Prozessschema für TTSD-Inserts

TSSD-Inserts werden ausschließlich in den Oberflächen der Paneele montiert. Daher eignet sich eine dreiachsige Portalkinematik für die Handhabungs- und Fügeprozesse. Die Zuführung der Inserts erfolgt entweder durch Pick&-Place der Inserts aus einem Speicher oder mittels eines Profilschlauchs. Spindeln zum Setzen sind sowohl mit Portalkinematiken als auch Industrierobotern kompatibel. Für die Handhabung der Paneele zur Entnahme aus dem Ladungsträger kann ein Industrieroboter verwendet werden. Greifkonzepte hierfür existieren bereits. Der Materialtransport wird beispielsweise über Förderbänder oder Rollbahne realisiert. **Abbildung 12** zeigt ein schematisch eine Anlage zum Setzen und Verkleben von Klebinsert, ein mögliches Anlagenlayout und eine Prozessbeschreibung nach VDI2860.

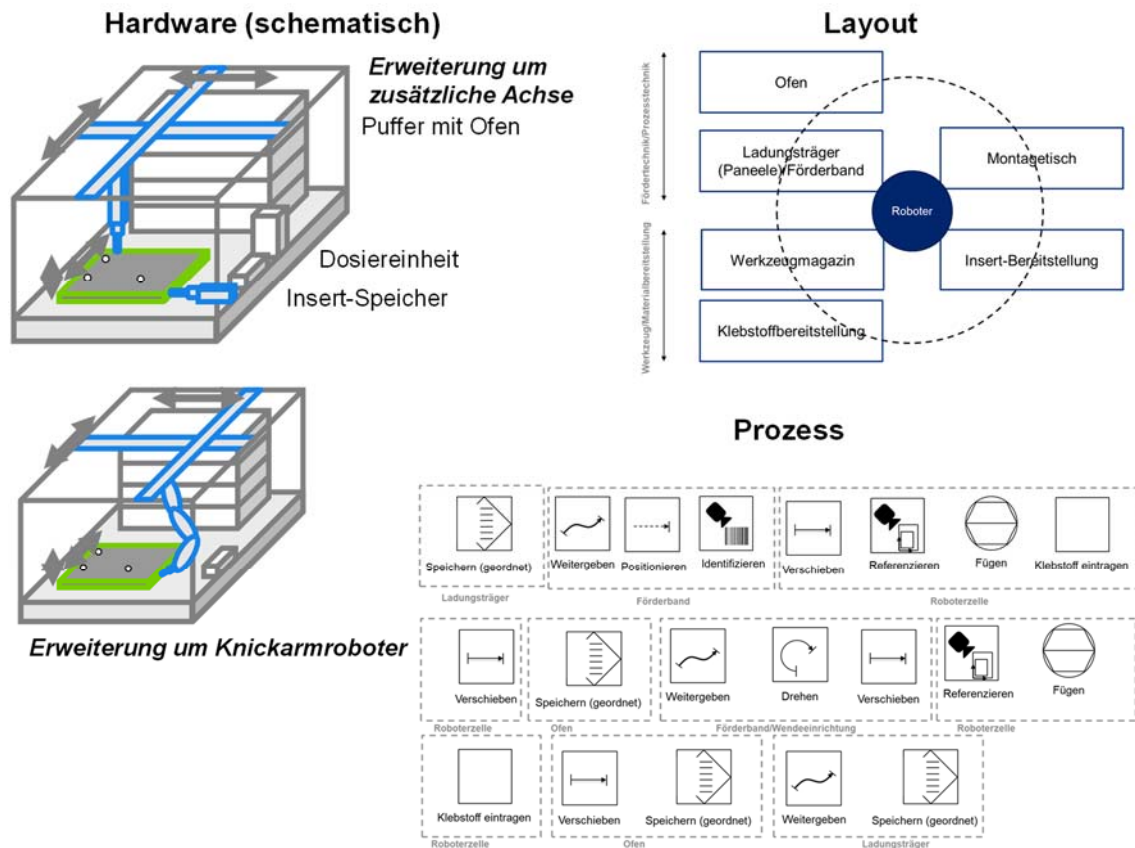


Abbildung 12: Hardware, Layout und Prozessschema für Klebinserts

Klebinserts werden sowohl in Oberflächen als auch in Stirnflächen montiert. Hierzu kann eine Portalkinematik um eine weitere lineare Achse erweitert werden. Darüber hinaus ist es möglich die Freiheitsgrade durch Verwendung eines Industrieroboters zu erhöhen. Zusätzlich kann ein Ofen verwendet werden, welcher die Aushärtezeit der Inserts reduziert. Eine Handfestigkeit, welche eine weitere Montage ermöglicht kann so bereits nach ca. 20min erreicht werden. Alternativ können die Paneele nach einseitiger Bestückung mit Inserts auch in einem Puffer ohne Wärmeeinwirkung gespeichert werden. Der Puffer würde jedoch eine sehr hohe Kapazität benötigen, da die Bestückung der Paneele mit Inserts um ein Vielfaches unter der Aushärtezeit des Klebstoffs liegt.

Die oben dargestellte Hardware stellt nur Beispiele dar. In praktischen Machbarkeitsuntersuchungen wurde das Setzen und Befüllen der Inserts mit Klebstoff mit einem Industrieroboter untersucht und in nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Daher wurde bei der Darstellung des Layouts nur ein einzelner Industrieroboter berücksichtigt. Dieser kann durch Nutzung eines geeigneten Werkzeugmagazins sowohl die Handhabung der Paneele und Inserts als auch den Klebstoffeintrag durchführen. **Abbildung 13** zeigt schematisch eine digitale Montagestation für die Montage von allen fehlenden Anbauteilen, ein mögliches Anlagenlayout und eine Prozessbeschreibung nach VDI2860.

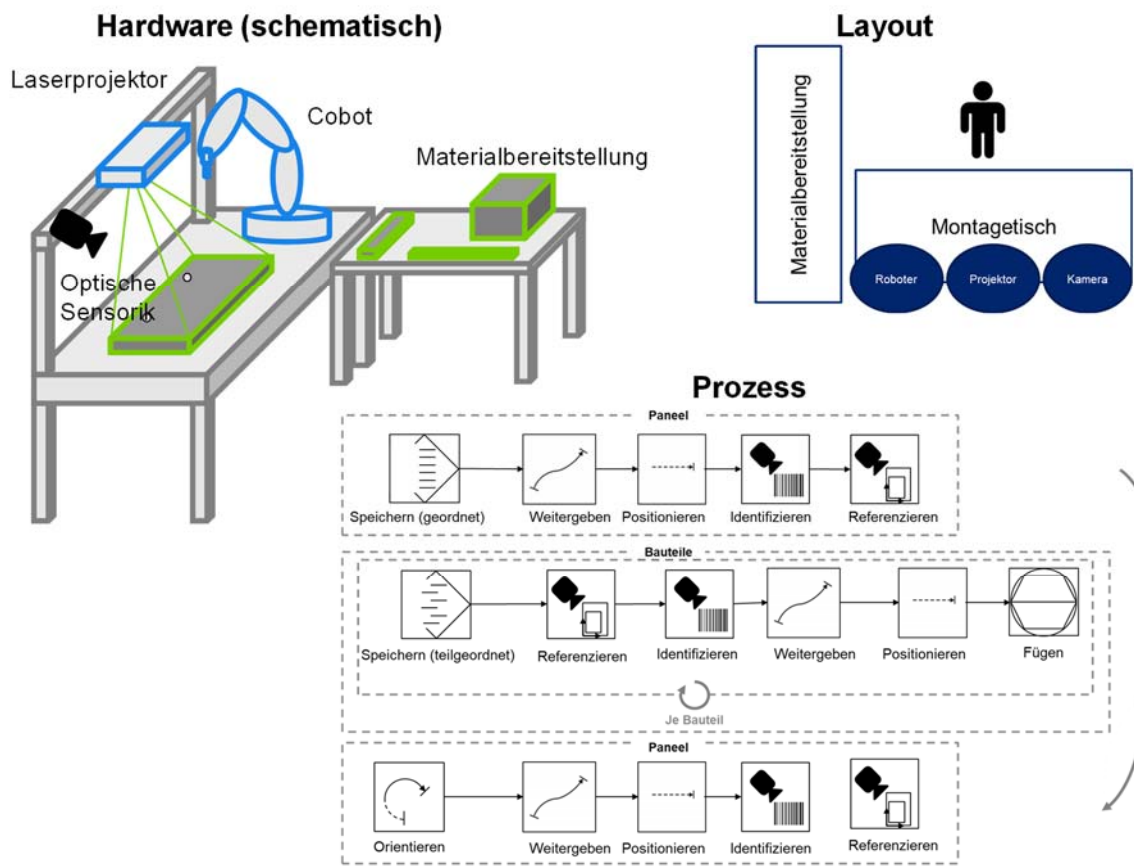


Abbildung 13: Hardware, Layout und Prozessschema für digitale Montagestation zur Montage von Anbauteilen

Die dargestellte digitale Montagestation erlaubt eine kollaborative Montage aller Anbauteile durch den Einsatz eines Laserprojektionssystems, Cobots und optische Sensoren. Die Handhabung komplexer Bauteile und das Fügen mehrerer Bauteile zur gleichen Zeit, übernehmen Mitarbeitende. Der Cobot kann beispielsweise bei der Handhabung simpler Geometrien unterstützen oder Schraubprozesse durchführen. Durch die Parallelisierung von Handhabungsprozessen durch Cobot und Mitarbeitende, können Prozesszeiten reduziert werden. Das Laserprojektionssystem kann beispielsweise für die Anzeige der Montagereihenfolge, die Projektion von Montagepositionen und Bauteilkonturen oder zur Durchführung von Prüfaufgaben verwendet werden. Optische Sensorik kann auf vielfältige Weise genutzt werden, um den Montageprozess zu unterstützen und abzusichern. Beispielsweise können Bauteile identifiziert, deren Position referenziert sowie Montageprozesse überprüft werden. Ebenso lassen sich Ladungsträger zu der eingesetzten Hardware referenzieren. Dies ermöglicht den Datenfluss der hochvarianten Bauteile flexibel zu steuern. Darüber hinaus ist der Einsatz von Motion Tracking der Mitarbeiter*innen möglich, welche eine weitere Eingabe von Informationen in das Montagesystem darstellen.

Zusätzlich zur Konzeptionierung geeigneter Abläufe und Anlagen wurde auch ein Konzept für eine durchgängige, digitale Prozesskette entwickelt. Diese ist in **Abbildung 14** dargestellt. Damit wird der Herausforderung begegnet, kundenindividuelle Produkte stückzahlflexibel produzieren zu können und somit die vollautomatisierte Fertigung aus vorangegangenen Vorhaben um eine teilautomatisierte Montage wirtschaftlich erweitert.

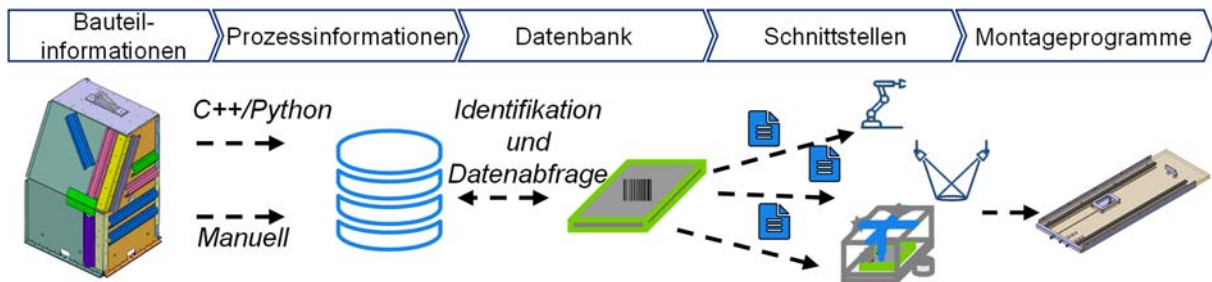


Abbildung 14: Digitale Prozesskette

Zentraler Bestandteil ist eine Produkt- und Prozessdatenbank. Dort sind einerseits Prozessparameter für die zuvor vorgestellten Anlagen und Unterstützungssysteme hinterlegt, andererseits können aus CAD-Informationen automatisiert oder manuell produktspezifische Informationen über Bauteilgeometrien gespeichert werden. Durch eine digitale Identifikation einzelner Paneele lassen sich mit universellen Softwareschnittstellen die teilautomatisierten Systeme steuern und Montageprogramme ableiten. Eine Referenzierung der Bauteile kann markerbasiert oder durch Bildverarbeitung realisiert werden.

Machbarkeitsuntersuchungen und Simulation

Teile des Automatisierungskonzeptes wurden in Robotersimulationen und praktischen Machbarkeitsuntersuchungen validiert, welche im Folgenden beschrieben werden. Dem Wunsch nach rekonfigurierbaren Monumenten wird in AP 2.3 durch Produktmodularisierung begegnet. Dort wird im Gegensatz zur Produktion einzelner Paneele die Gestaltung der gesamten Monumente betrachtet. Um den Austausch einzelner Paneele innerhalb eines Monumentes zu gewährleisten wurde untersucht, welche Fügemitte eine einfache, lösbare Verbindung ermöglichen können, wodurch beispielsweise der Austausch während des Flugbetriebs durchgeführt werden kann. Zunächst wurde ein Modell der Fügestelle erstellt, welches die Paneele aus Wabenkern, Glasfaserdecklage und Kernfüllmasse und die Verbindungselemente sowie deren Verbindungsprinzipien darstellt (vgl. Abbildung 15 (1)).

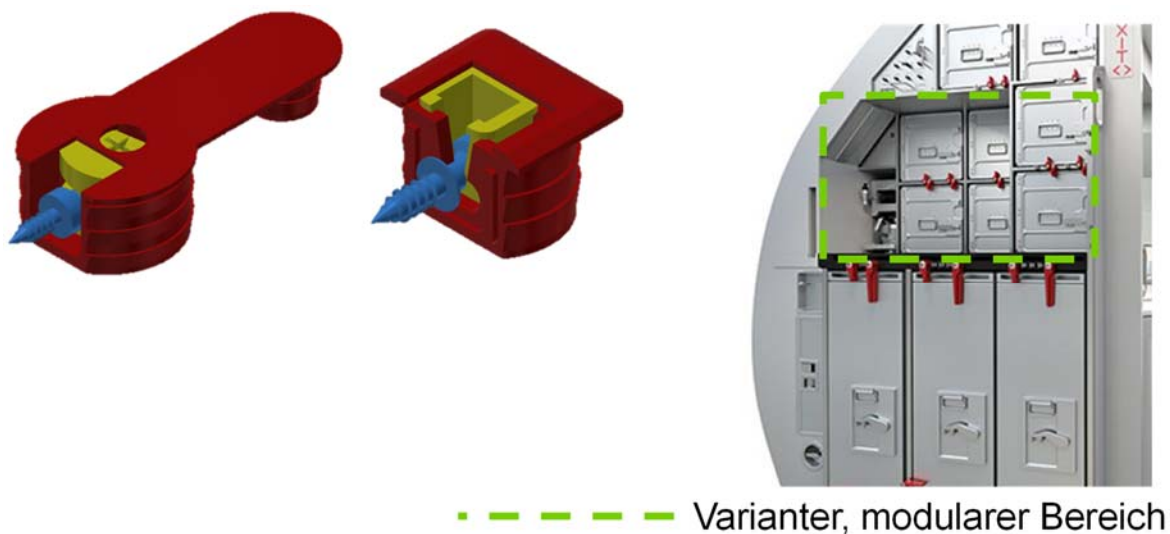


Abbildung 15: CAD-Modell der ausgewählten Lösung und varianter Betrachtungsbereich

Im Anschluss daran wurden potentielle Fugemittel identifiziert, wobei vor allem Lösungen in der verwandten Möbelindustrie gefunden wurden. Nach einer Bewertung wurden für jede Fügestelle geeignete Fugemittel identifiziert und zu einer Gesamtlösung kombiniert (Abbildung 15). Diese ermöglicht die Montage und Demontage gesamter Paneele ohne zusätzliche Justage mit minimalem Werkzeugeinsatz.

Die in sehr hoher Stückzahl auftretenden Klebinserts sollten im zuvor erläuterten Produktionskonzept automatisiert gesetzt und verklebt werden. Hierzu wurde untersucht inwiefern der Prozess des automatisierten Insert-Setzens [Kae20] durch den automatisierten Klebstoffeintrag erweitert und in die bestehende Prozesskette integriert werden kann. Abbildung 16 zeigt das hierzu entwickelte Automatisierungs-Konzept. Die Kinematik des Industrieroboters ermöglicht die flexible Befüllung von Inserts mit Klebstoff sowohl auf ebenen als auch auf gekrümmten Paneelen.

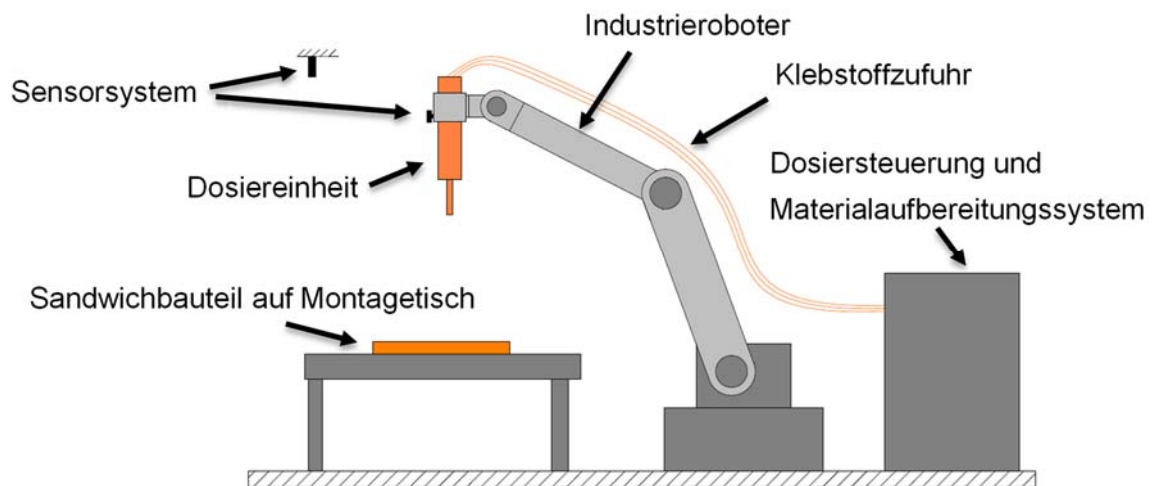


Abbildung 16: Anlage für den automatisierten Klebstoffeintrag in Gewinde-Inserts

In praktischen Versuchsreihen wurden geeignete Prozessparameter, wie z.B. Klebstoffmenge und Dosiergeschwindigkeit, identifiziert, welche für die zukünftige Industrialisierung bei Diehl Aviation als Referenzwerte genutzt werden können. Hierbei wurden unter anderem Dosiergeschwindigkeiten, Anpresskräfte der Düse und Klebstoffvolumen ermittelt, sowie Untersuchungen zu Lufteinschlüssen durchgeführt. Der Befüllprozess, auch Potting genannt, ist in **Abbildung 17** für zwei unterschiedliche Insert-Typen dargestellt.

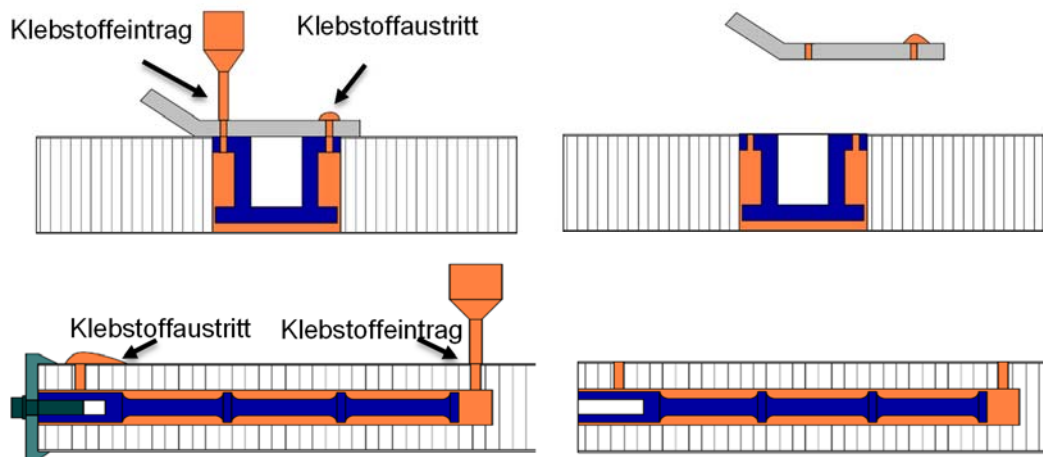


Abbildung 17: Potting von niedrig belasteten (oben) und hoch belasteten Inserts (unten)

Oben ist ein niedrig belastetes Insert mit Montagehilfe dargestellt. Unten ein hoch belastetes Insert, welches in die Stirnfläche der Paneele eingebracht wird.

Analysierte Schnittbilder zeigen auf, wo es zu Luftpfeinschlüssen kam und welche Qualität der Fügestelle bei unterschiedlichen Dosiergeschwindigkeiten zu erwarten ist. Durch zahlreiche Versuchsreihen konnten die optimalen Parameter ermittelt werden, die zu einem schnellen Klebstoffeintrag ohne Luftpfeinschlüssen mit minimalem Materialeinsatz führen. Die bisherige Prozesskette konnte mit dem hier untersuchten Konzept so erweitert werden, dass die Insert-Montage voll automatisierbar ist. Dies führt zu einer erheblichen Reduktion der Prozesszeit auf ca. 1 - 8 Sekunden pro Insert und senkt den Materialverbrauch durch Vermeidung von Klebstoffaustritt um ein Vielfaches.

Des Weiteren wurden zur Absicherung des Montagekonzept verschiedene Aspekte, wie beispielsweise der Datenfluss zwischen den Gewerken und die Programmierung der Betriebsmittel beleuchtet. Hierzu wurde unter anderem die digitale Montagestation innerhalb einer Robotersimulation abgebildet (vgl. Abbildung 18).

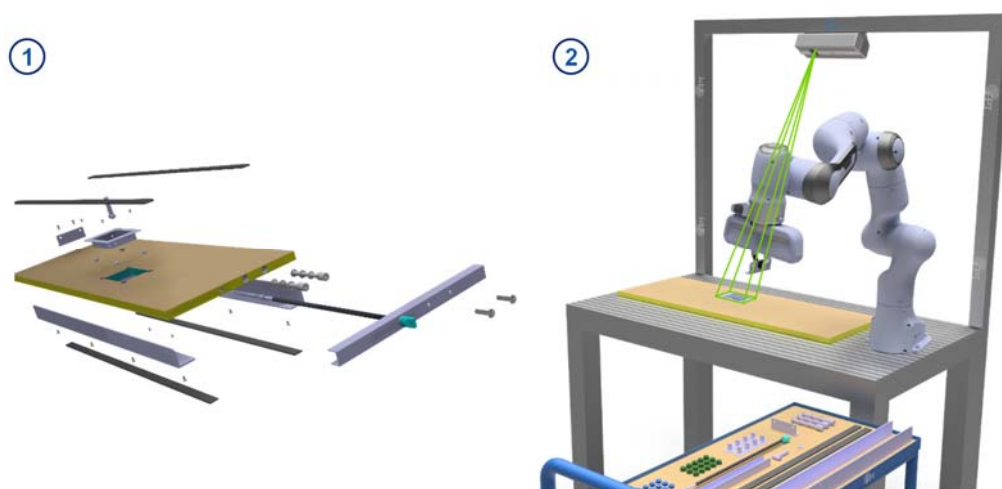


Abbildung 18: (1) Explosionsdarstellung des ausgewählten SU-Panels; (2) Simulation der digitalen Montagestation

Darüber hinaus wurden Versuchsaufbauten zusammen mit bestehender Hardware aufgebaut, um den Menschen in realen Versuchsaufbauten im Montageprozess berücksichtigen zu können (siehe **Abbildung 19**).



Abbildung 19: Digitale Montagestation; Laserprojektionssystem (1); kollaborative Montage (2)

Links ist der Einsatz eines Laserprojektionssystems dargestellt, welches eine Prozesssteuerung und Werkerführung ermöglicht. Rechts ist zusätzlich ein Cobot im Arbeitsbereich, welcher ermöglicht Handhabungsaufgaben zu parallelisieren oder Fügeprozesse zu automatisieren und somit die Prozesszeit zu reduzieren.

Am Beispiel des digitalen Arbeitsplatzes wurden weitere Machbarkeitsuntersuchungen durchgeführt und Teillösungen zur Demonstration praktisch implementiert und validiert. Zunächst wurde hierzu eine Analyse des Informationsflusses durchgeführt. Diese sollte dazu beitragen, den Informationsfluss transparent darzustellen und eine produktflexible Steuerung der Systeme zu gewährleisten. Hierbei wurden Fertigungs- und Montageprozesse am Beispiel des Service-Unit Panels betrachtet, deren Informationsinput und -output aufgenommen sowie Datenquellen und -senken identifiziert (siehe **Abbildung 20**).

Nr.	Prozesse & Teilprozesse	Input-Quelle	Informations-Input	Anz. Input Parameter	Informations-Output
Montage					
Hilfsprozess: Panel auf Bearbeitungsfläche platzieren (Fläche 1 oben)					
1	Panel entnehmen & platzieren		Position und Ausrichtung des gespeicherten Panels	6	Ungefähre Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche
			Position und Ausrichtung der Montagefläche	6	
2	Panel referenzieren	1	Ungefähre Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	3	Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche
		9, 23	Maße des Panels	3	
Inserts einkleben Fläche 1					
3	Inserts in Bohrungen für Anbauteil (1. Hälfte) setzen	2	Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	9	Position und Ausrichtung der eingesetzten Inserts (Anbauteil (1. Hälfte))
		26	Maße, Position und Ausrichtung der Bohrlöcher (Anbauteil (1. Hälfte))	7	Anzahl der eingesetzten Inserts (Anbauteil (1. Hälfte))
			Gewindegröße der einzusetzenden Inserts	1	Art bzw. Maße der benötigten Schrauben für Inserts (Anbauteil (1. Hälfte))
			Position und Ausrichtung der zu entnehmenden Inserts	5	
		26	Anzahl der gebohrten Löcher (Anbauteil (1. Hälfte))	1	
4	Inserts in Bohrungen für kleines L-Profil setzen	2	Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	9	Position und Ausrichtung der eingesetzten Inserts (keines L-Profil)
		27	Maße, Position und Ausrichtung der Bohrlöcher (kleines L-Profil)	7	Anzahl der eingesetzten Inserts (kleines L-Profil)
			Gewindegröße der einzusetzenden Inserts	1	Art bzw. Maße der benötigten Schrauben für Inserts (kleines L-Profil)
			Position und Ausrichtung der zu entnehmenden Inserts	5	
		27	Anzahl der gebohrten Löcher (kleines L-Profil)	1	
5	Inserts in Bohrungen für große L-Profil setzen	2	Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	9	Position und Ausrichtung der eingesetzten Inserts (große L-Profil)
		28	Maße, Position und Ausrichtung der Bohrlöcher (große L-Profil)	7	Anzahl der eingesetzten Inserts (große L-Profil)
			Gewindegröße der einzusetzenden Inserts	1	Art bzw. Maße der benötigten Schrauben für Inserts (große L-Profil)
			Position und Ausrichtung der zu entnehmenden Inserts	5	
		28	Anzahl der gebohrten Löcher (große L-Profil)	1	
6	Klebstoff in Insert eintragen	26-28	Position und Ausrichtung der eingesetzten Inserts (Fläche 1)	5	Position des eingetragenen Klebstoffs (Fläche 1)
		26-28	Anzahl der eingesetzten Inserts (Fläche 1)	1	Anzahl der Klebstoffeinträge (Fläche 1)
			Einzutragene Menge an Klebstoff	1	
7	Klebstoffreste entfernen	26-28	Position des eingetragenen Klebstoffs (Fläche 1)	3	Klebstoffreste von Inserts befreit (Fläche 1)
		26-28	Anzahl der Klebstoffeinträge (Fläche 1)	1	Anzahl der entfernten Klebstoffreste (Fläche 1)
8	Inserts anpressen	26-28	Position und Ausrichtung der eingesetzten Inserts (Fläche 1)	5	Position und Ausrichtung der angepressten Inserts (Fläche 1)
		26-28	Anzahl der eingesetzten Inserts (Fläche 1)	1	Anzahl der angepressten Inserts (Fläche 1)
Hilfsprozess: Panel wenden & referenzieren					
9	Panel wenden 180°	2	Rotationsachse im Raum, Drehrichtung und -winkel	7	Ungefähre Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche
			Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	9	
10	Panel referenzieren	9	Ungefähre Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	3	Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche
		9, 23	Maße des Panels	3	
Inserts einkleben Fläche 2 & Stirnfläche kurz					
11	Inserts in Bohrungen	10	Maße, Position und Ausrichtung des Panels auf Montagefläche	9	Position und Ausrichtung der eingesetzten Inserts (Anbauteil (2. Hälfte))
		31	Maße, Position und Ausrichtung der Bohrlöcher (Anbauteil (2. Hälfte))	7	Anzahl der eingesetzten Inserts (Anbauteil (2. Hälfte))

Abbildung 20: Auszug der Analyse von Prozessinformationen aus Fertigung und Montage des Service-Unit Panels

Die strukturierten Daten wurden anschließend in Kombination mit der Fertigungs- und Montagereihenfolge mit der BPMN 2.0 visualisiert (siehe **Abbildung 21**). Die hiermit geschaffene Transparenz über die Datenflüsse, -quellen und -senken innerhalb der Prozesskette bildet eine Grundlage für die Erzeugung von Montageprogrammen für variantenreiche Produkte im Kabinenbereich.

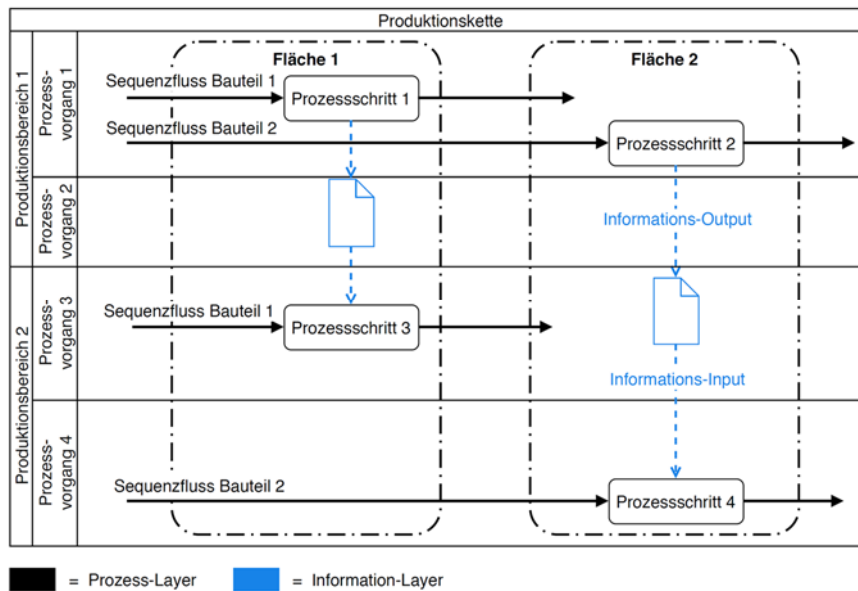


Abbildung 21: Modellierung des Informationsflusses mit BPMN 2.0

Während der Programmierung von Anlagen in den vorgestellten teilautomatisierten Montagesystemen kommt es zu Medienbrüchen innerhalb verschiedener Softwarelösungen und auch an Hardwareschnittstellen. Mittels geeigneter Softwareschnittstellen lassen sie diese Brüche überwinden und Informationen bedarfsgerecht verteilen. Darüber hinaus muss eine eindeutige Referenzierung aller Bauteile sichergestellt und die Daten im richtigen Bezugssystem dargestellt werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Datengrundlage wurde für das Laserprojektionssystem eine Schnittstelle implementiert, die es ermöglicht Informationen aus gängigen CAD-Formaten zu aggregieren, durch geeignete Modellierung zu strukturieren, in das notwendige Bezugssystem und Eingangsformat für den Projektor zu transformieren und somit das Montagesystem flexibles zu steuern. Der grundlegende Aufbau ist in **Abbildung 22** dargestellt.

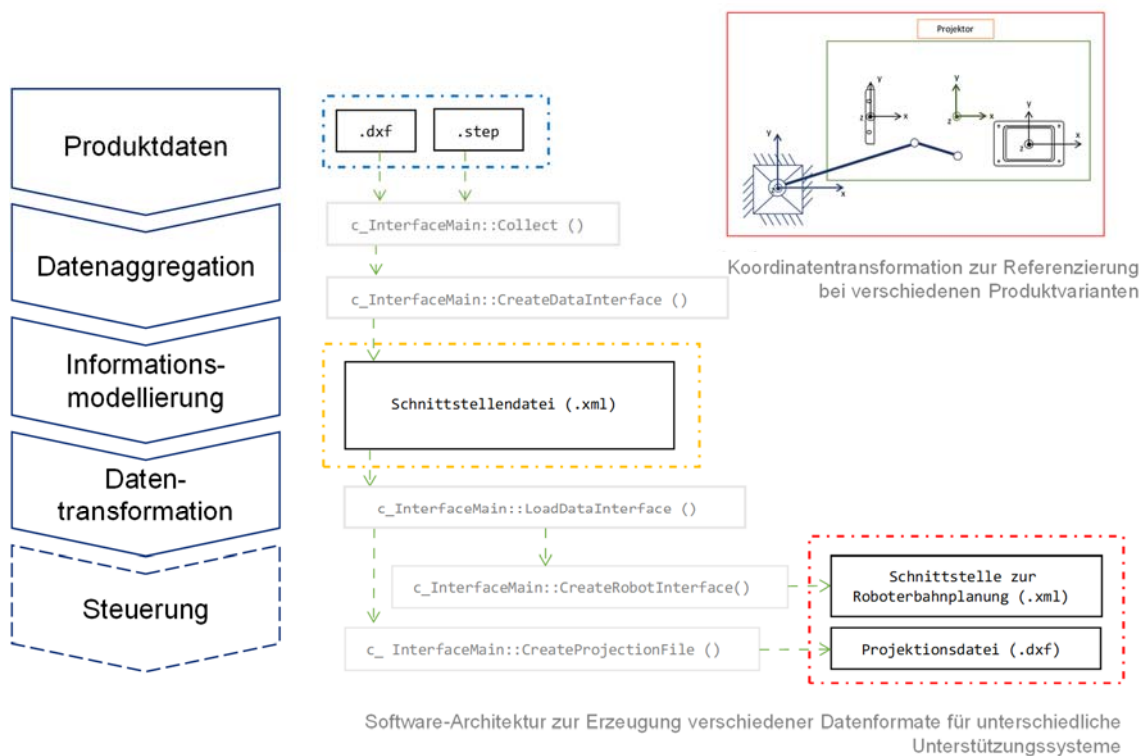


Abbildung 22: Ablauf und Struktur einer Datenschnittstelle für die flexible Steuerung eines Cobots und eines Projektionssystems

Informationen aus .dxf oder step-Files werden hierbei als Grundlage verwendet. Hieraus werden die notwendigen Informationen in einer Schnittstellendatei gesammelt und in xml beschrieben. Mit Hilfe von geeigneten Softwareschnittstellen können einerseits geometrische Parameter für die Roboterbahnplanung als auch Projektionsdateien für den Laserprojektor erzeugt werden und im richtigen Format an die Anlagen übergeben werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde außerdem untersucht, wie Action-Recognition Ansätze in der multivarianten Montage eingesetzt werden können. Hierzu wurde die digitale Montagestation um einen Azure-Kinect Sensor erweitert. In kollaborativen Montageprozessen, in denen Mensch und Cobot zusammenarbeiten, ist ein bidirektionaler Informationsfluss ein relevanter Faktor um Sicherheit und Effizienz zu gewährleisten. Hierzu muss der Cobot kontextabhängig reagieren und sich an den Prozess anpassen können. Normalerweise werden hierzu manuelle Interfaces verwendet um Prozesse als abgeschlossen zu kennzeichnen, welche den Arbeitsfluss unterbrechen.

Eine automatisierte Erkennung von abgeschlossenen Montageprozessen kann dazu beitragen solche Unterbrechungen zu vermeiden und gleichzeitig den Prozess zu dokumentieren. Dafür wurde ein generischer MTM-Arbeitsplan beschrieben, welcher als Grundlage für die Identifikation von Prozessen mittels Action-Recognition dient und auf multivariante Montageprozesse angewendet werden kann. Durch die Verknüpfung von Bewegungsinformationen mit dem MTM-Arbeitsplan können mit Hilfe von neuronalen Netzen Montageschritte automatisiert identifiziert werden. Validiert wurde der Ansatz am Beispiel des Service-Unit Panels. Dieses Vorgehen bildet die Grundlage für eine bauteilunabhängige, automatisierte Identifikation von Montageprozessen.

2.4 AP 3.2 Virtuelle Produktsimulation

In Arbeitspaket 3.2 erfolgte ein enger Austausch mit dem Hauptarbeitspaket 1. Es befasste sich vor allem mit der Entwicklung des methodischen Vorgehens zur Lastpfadanalyse von Flugzeugkabinenmonumenten zur Identifizierung der Lastpfade bzw. Optimierungsbereiche, der Erweiterung des Optimierungsvorgehens, um unterschiedliche Varianten und Modularisierungskonzepte bereits während der Optimierung berücksichtigen zu können, sowie der Entwicklung und numerischen und experimentellen Untersuchung daraus abgeleiteter Bauweisenkonzepte.

Vorgehen zur Lastpfadanalyse und Lastpfadoptimierung

Die Entwicklung des methodischen Vorgehens zur Lastpfadanalyse von Flugzeugkabinenmonumenten zur Identifizierung der Lastpfade bzw. Optimierungsbereiche erfolgte zunächst allgemein an einem vereinfachten Monument und nicht bezogen auf ein konkretes Monument mit seinen Besonderheiten und speziellen Anforderungen u.a. durch die Einbauposition. Das Vorgehen wurde dann zum Projektende auf das neue Kombimonumentenkonzept aus Galley und Lavatory mit mehreren unterschiedlichen Produktfamilien und deren Varianten angewendet. Zur Entwicklung des allgemeinen Vorgehens wurde zunächst ein vereinfachtes Monument definiert. Daran erfolgte die Entwicklung des Optimierungsvorgehens und die weitere Untersuchung der Bauweisenkonzepte. Um die Modellerstellung zu beschleunigen, wurde zusätzlich ein kleiner Produktdemonstrator aus HAP 1 für vorläufige Untersuchungen genutzt.

Bei der Definition wurde darauf geachtet, dass das Monument alle relevanten Hauptfunktionen abbildet. Gleichzeitig besitzt es eine vereinfachte Geometrie und einen vereinfachten Paneelaufbau. Es werden die wichtigsten Funktionen von Galley und Lavatory in einem gemeinsamen Monument unabhängig von der Bauraumposition berücksichtigt. Dadurch ist es weitestgehend lösungsneutral, da keine speziellen Besonderheiten oder Anforderungen des Bauraums oder Monumentes bei der Erstellung des Vorgehens berücksichtigt werden müssen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Lastpfadanalyse zunächst anhand eines reduzierten Modells durchgeführt wird und somit allgemein Bereiche in Monument mit einem hohen Optimierungspotential schneller identifiziert werden können. Durch die Kombination von Galley und Lavatory sind bereits alle grundlegenden Bereiche vorhanden, sodass eine Bewertung von Bauweisenkonzepten für die verschiedenen Bereiche gegeben werden kann.

Die definierte Grundkonfiguration ist in Abbildung 23 dargestellt. Der rechte Teil, der ca. 60% der Breite ausmacht, besteht aus einer Lavatory und der linken Teile aus einem Galleybereich. Dieser besitzt im unteren Bereich eine Trolleybay für zwei Full-Size-Trolleys, im mittleren Bereich zwei Plätzen für Öfen und im oberen Bereich zwei Fächer für Standard Units.

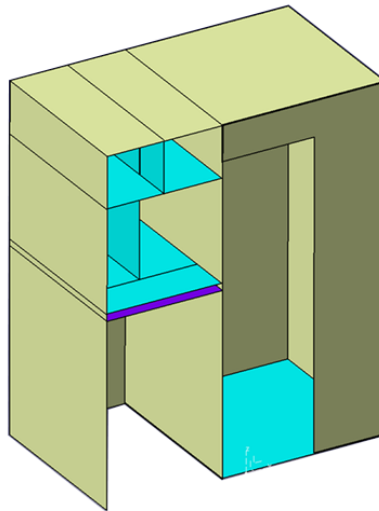


Abbildung 23: CAD-Modell des vereinfachten Monuments

Zur Modellerstellung wurde zusätzlich ein sehr vereinfachter Produktdemonstrator verwendet. Da der Produktdemonstrator ein sehr kleines und ein stark vereinfachtes Monument darstellt, ist er geeignet, um an den Aufbau der Modelle und Parameter der Optimierung zu testen.

Durchführung der Lastpfadoptimierung auf Monumenten-Ebene

Der Modellaufbau und die ersten Optimierungen wurden zunächst anhand des kleinen Demonstrators umgesetzt und getestet. Zunächst wurde eine geeignete Geometrie- und Netzerzeugung der Modelle untersucht. Hierbei wurden sowohl Schalenelemente (2D) als auch Volumenelemente (3D) mit verschiedenen Elementgrößen betrachtet. Ebenfalls wurde die Lagerung für das Upper Attachment und die vier Lower Attachment definiert (siehe Abbildung 24 in blau dargestellt).

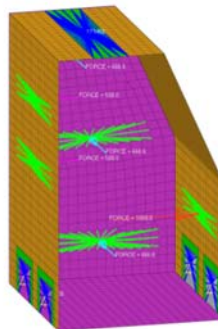


Abbildung 24: FE-Modell des Produktdemonstrators

Mit dem Modell wurden erste Optimierungen durchgeführt. Ein beispielhaftes Ergebnis einer Topologieoptimierung ist in Abbildung 25 dargestellt.

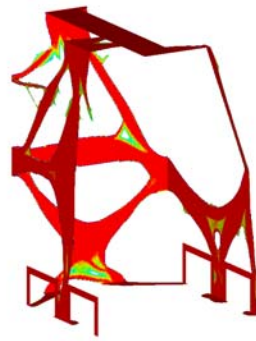


Abbildung 25: Optimierungsergebnis des Produktdemonstrators

Anschließend wurde das Modell des Monumentes aufgebaut. Dabei erfolgte eine Aufnahme der auftretenden Lasten und eine detaillierte Analyse der zu definierenden Randbedingungen, insbesondere bei der Einbringung der Lasten durch die einzelnen Galley- (Trolley, Standard Unit und Öfen) bzw. Lavatoryeinbauten (Toilette, Waschtisch und Spiegelschrank).

Zusätzlich wurden die Ergebnisse verschiedener Optimierungsziele und einzelne Optimierungsparameter analysiert. Die Untersuchung unterschiedlicher Anfangs- und Randbedingungen der Lastpfadoptimierung zeigen in verschiedenen Parameterstudien einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei der Auswahl der Parameter muss darauf geachtet werden, welches Bauweisenkonzept in den einzelnen Bereichen verwendet werden soll. Dies wird beispielhaft an der Untersuchung zweier verschiedener Optimierungsmethoden gezeigt. Dazu wurden die beiden Optimierungsstrategien der Topologie- und Free-Size-Optimierung verwendet. Während die Topologieoptimierung die Dichte der einzelnen Elemente verändert, wird bei der Free-Size-Optimierung die Dicke der Elemente optimiert. Dadurch bietet sich die Möglichkeit in der Free-Size-Optimierung einen Grenzwert für eine minimale Dicke vorzugeben, der nicht unterschritten werden darf. Ist dieser Grenzwert 0 mm, sind die Ergebnisse nahezu identisch zu denen der Topologieoptimierung. Wird dieser jedoch erhöht, zeigt sich eine deutliche Veränderung der Lastpfade, wobei die Verstärkungen weiterhin in ähnlichen Bereichen entstehen. In der folgenden Abbildung 26 ist das Ergebnis einer Topologieoptimierung dargestellt.

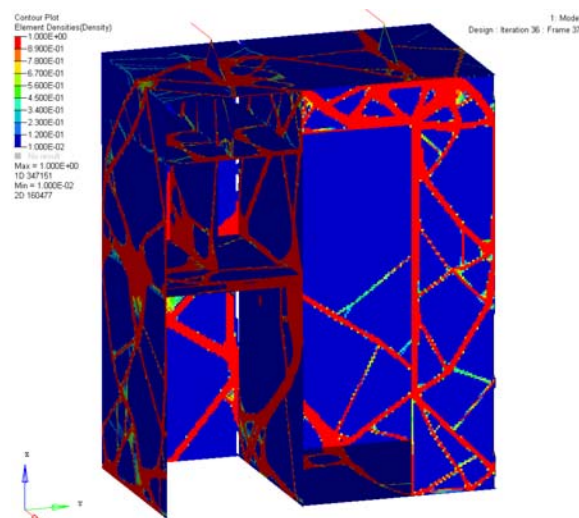


Abbildung 26: Ergebnis der Topologieoptimierung [Han20a]

In Abbildung 27 ist das Ergebnis einer Free-Size-Optimierung dargestellt, bei der eine Elementdicke von mindestens 2 mm gefordert ist und ansonsten die gleichen Anfang- und Randbedingungen gesetzt wurden. Es können auf diese Weise gezielt die Bereiche einzelner Paneele identifiziert werden, die lokal verstärkt werden bzw. die zurzeit überdimensioniert sind. Dieses eignet sich insbesondere für Bereiche, in denen eine geschlossene Bauweise benötigt wird.

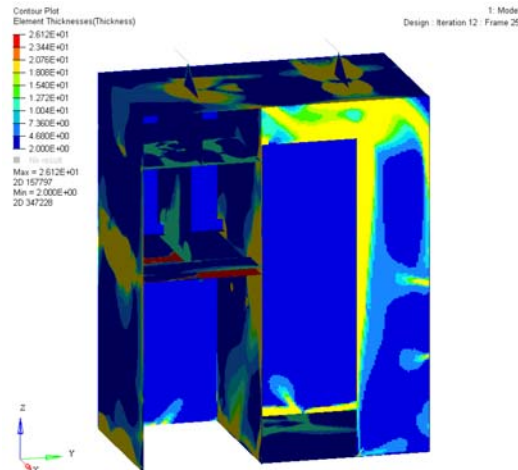


Abbildung 27: Ergebnis der Free-Size Optimierung [Han20a]

Zusätzlich wurde die Möglichkeit einer Kombination mehrerer unterschiedlicher Bauweisen zu einer hybriden Bauweise untersucht. Je nach Anforderungen der einzelnen Bereiche des Flugzeugkabinenmonumentes können dabei unterschiedliche Bauweise kombiniert werden. Dies ist in Abbildung 28 beispielhaft für eine offenen und geschlossenen Bauweise dargestellt.

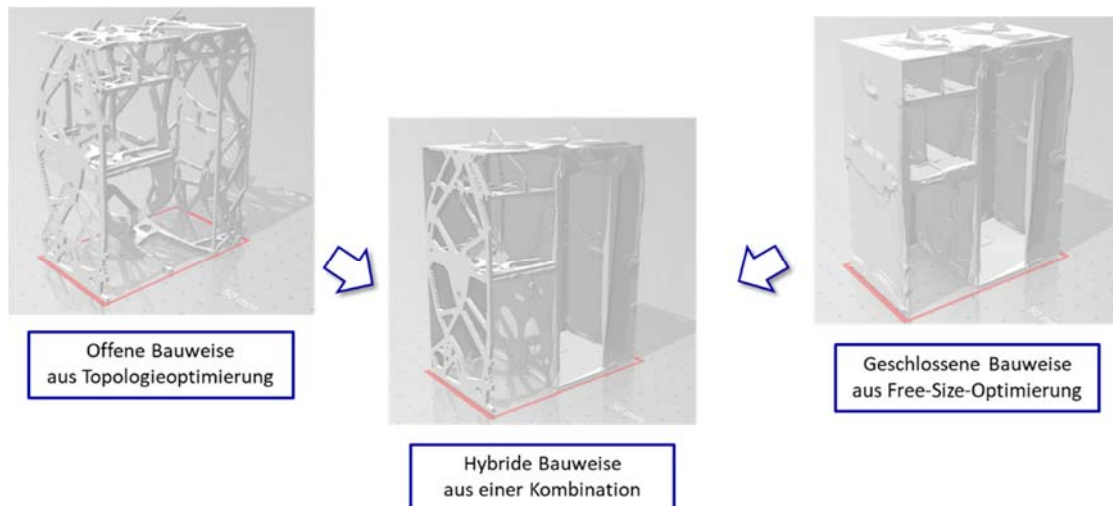


Abbildung 28: CAD-Modelle für verschiedene Bauweisen

Abschließend wurde sowohl der Einfluss einer Mindestwandstärke als auch der Ausrichtung des Monumentes auf die Ergebnisse der Topologieoptimierung detailliert untersucht. Auch anhand dieser Ergebnisse erfolgte die Identifizierung der Hauptlastpfade und der Auswahl der Optimierungsbereiche. Abschließend wurde das Vorgehen auf die in AP 2.3 definierten Produktfamilien angewendet. Es wird deutlich, dass mit dem entwickelten Vorgehen es möglich ist, ein einheitliches Vorgehen zur Lastpfadoptimierung anzuwenden. Dadurch

können zukünftig auch für andere Flugzeugkabinenmonumente Optimierungsmodelle schnell und konsistent erstellt und untersucht werden.

Vorgehen zur Berücksichtigung unterschiedlicher Varianten und Modularisierungskonzepte während der Optimierung

Das Optimierungsvorgehen wurde zusätzlich erweitert, so dass unterschiedliche Varianten und Modularisierungskonzepte bereits während der Optimierung berücksichtigt werden können. Dies erfolgt durch eine gemeinsame Optimierung mehrere Produktfamilien bzw. deren Konfigurationen mittels einer Multi-Model-Optimierung (MMO). Dadurch lassen sich lastpfadverstärkten Module ermitteln, die in mehreren unterschiedlichen Varianten eingesetzt werden können, da die einzelnen Varianten bereits in der leichtbaugerechten Gestaltung berücksichtigt wurden.

Die Entwicklung des Vorgehens erfolgte wiederum beispielhaft an einem vereinfachten Monument. In Abbildung 29 sind die zwei beispielhaft untersuchten Produktfamilien für den gleichen Bauraum des vereinfachten Kabinenmonumentes dargestellt

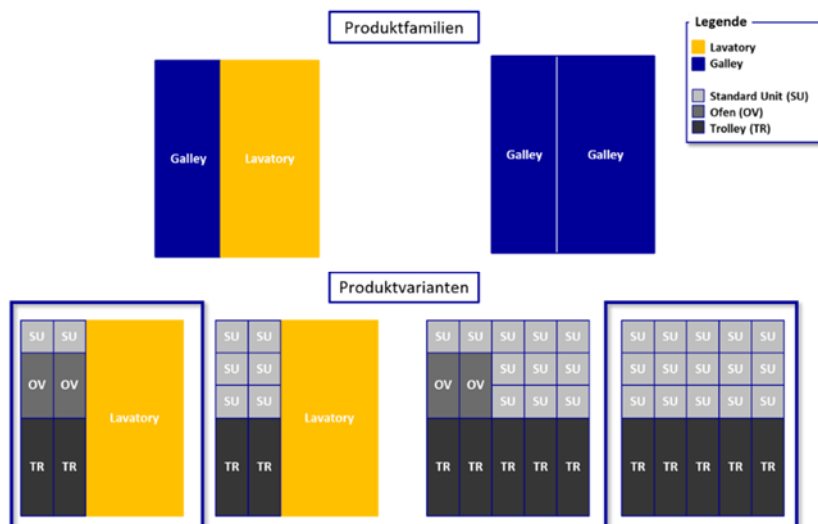


Abbildung 29: Produktfamilien und Produktvarianten eines Monumentes [Han20a]

Bei der ersten Produktfamilie werden ein Galley- und ein Lavatorybereich kombiniert, während die zweite Produktfamilie eine Full-Size Galley abbildet. Die Produktvarianten unterscheiden sich im mittleren Bereich des linken Galleybereiches. Während bei der einen Produktvariante der zwei Produktfamilien dort Öfen eingesetzt werden, sind diese bei der anderen Produktvariante der Produktfamilien jeweils durch zwei SUs übereinander (und zwei SUs hintereinander) ersetzt.

In Abbildung 30 sind die FE-Modelle der zwei markierten Varianten sowie beispielhaft für eine Seitenwand die Ergebnisse der Single-Model-Optimierung (SMO) im Vergleich zum Ergebnis der MMO dargestellt.

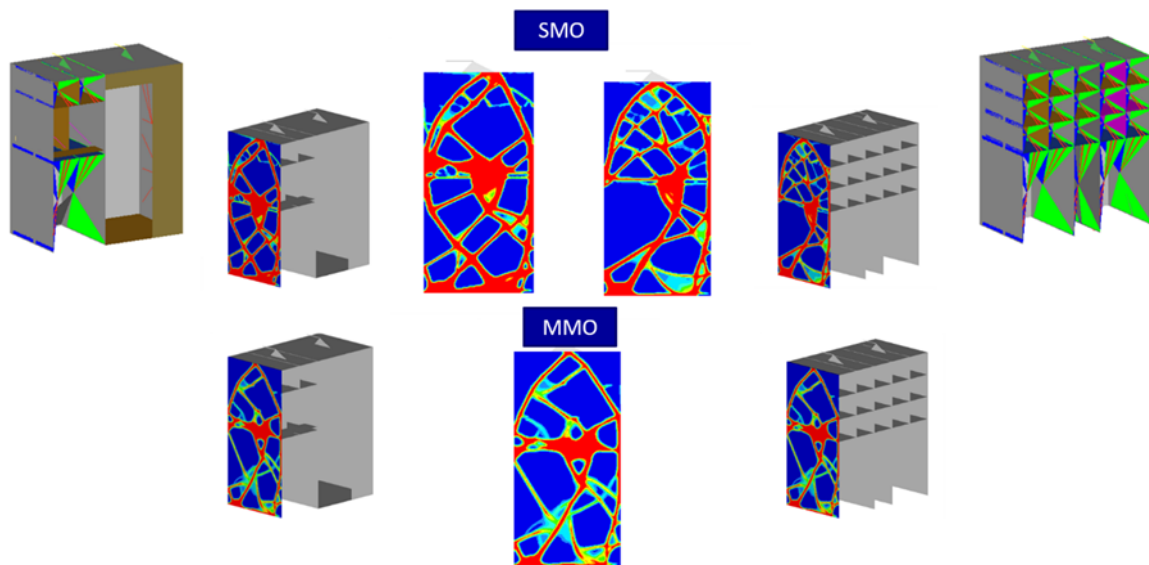


Abbildung 30: FE-Modell und Ergebnisse der SMO sowie der MMO für die linke Seitenwand [Sch22]

Die Ergebnisse der SMO zeigen zunächst, dass sich die Optimierungen je nach Variante deutlich voneinander unterscheiden. Mit Hilfe der MMO ist es aber möglich, variantenübergreifend ein gemeinsam optimiertes Design für die Wände zu erzielen.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Multi-Model-Optimierungen aller Varianten wurde ein Vorgehen für die Multi-Model Optimierung für Produktfamilien von Flugzeugkabinenmonumenten abgeleitet. Das Vorgehen für die Multi-Model Optimierung für Produktfamilien von Flugzeugkabinenmonumenten kann als Grundlage zur Harmonisierung von modularen und leichtbauoptimierten Konzepten zu einer Modularen Hybridbauweise dienen, da untersucht werden kann, für welche Bereiche bzw. Module eine gemeinsame Optimierung sinnvoll ist und wann eine individuelle Optimierung einzelner Varianten zielführend ist.

Ableitung verschiedener Bauweisenkonzepte

Parallel zum Aufbau der Optimierungen wurde die Recherche zu bestehenden und neuen lastpfadoptimierten Bauweisen durchgeführt und aufbauend auf der Ist-Analyse und ersten Optimierungsergebnisse wurden unterschiedliche neue Bauweisenkonzepte entwickelt.

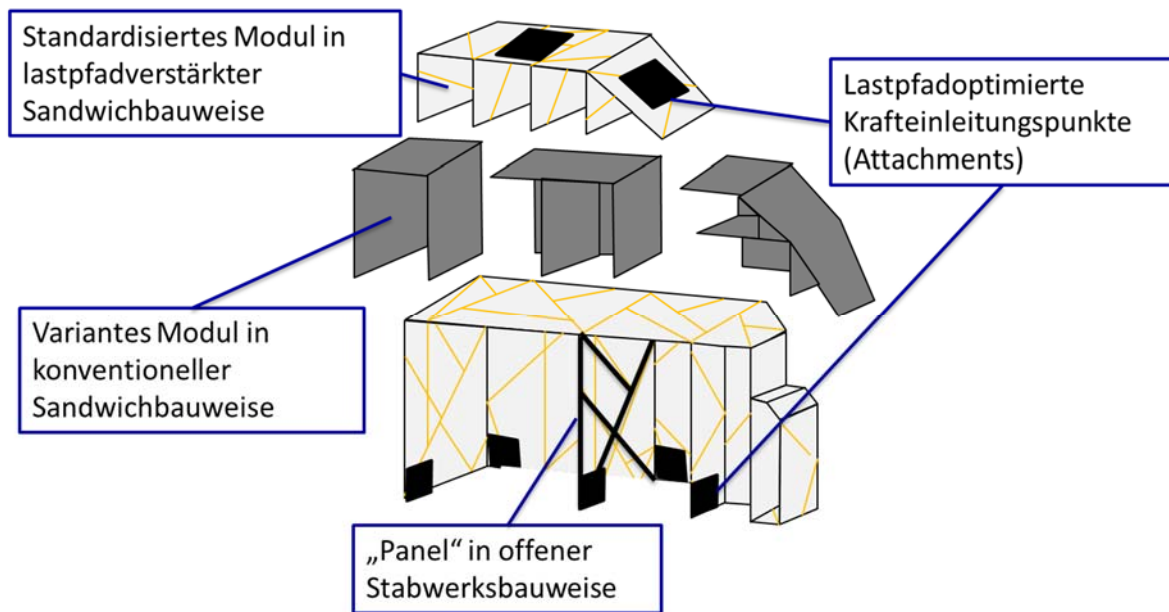


Abbildung 31: Konzept der modularen Hybridbauweise [Han19]

Das Monument besitzt eine modulare Produktstruktur für die unterschiedliche Bauweisen eingesetzt werden, sodass bestimmte Bereiche in einer lastpfadverstärkten oder sogar offenen Bauweise ausgeführt werden können. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf dem Strukturleichtbau, also einer geeigneten Gestaltung der Geometrie anhand der Kraftpfade für ein hohes Tragvermögen der Struktur. Materialeichtbau (Verwendung von Materialien geringer Dichte und möglichst hohen Gütezahlen) und Systemleichtbau (Funktionsintegration bei minimalen Materialeinsatz und minimalen Verbindungsstelle) werden untergeordnet berücksichtigt [Kra18b].

Die entwickelten Bauweisenkonzepte lassen sich vereinfacht in zwei Hauptgruppen zusammenfassen. Zum einen in Konzepte beruhend auf einer Sandwichbauweise und zum anderen auf Konzepte in Form von Profilbauweisen.

Untersuchung von Bauweisenkonzepten und Analyse produktinterner Schnittstellenkonzepte

Da in der aktuellen Bauweise eine konventionelle Sandwichbauweise verwendet wird, für die entsprechende standardisierte Tests definiert sind, wurde zunächst damit begonnen, Komponententests für die lastpfadangepasste Sandwichbauweise durchzuführen. Dazu wird der konventionelle Pull-Out Test verwendet, der zum Testen von Inserts in Sandwichproben verwendet wird (siehe Abbildung 32). Es wurden dazu Versuche an einer einfachen Sandwichprobe mit einer Verstärkung der Deckschicht durchgeführt. Als Referenz wurde ein Sandwichproben mit einer zweilagigen Deckschicht über die gesamte Probe verwendet. Für die verstärkten Proben wurde nur eine durchgängige Lage und zusätzlich streifenförmige Verstärkung auf der Deckschicht angebracht, sodass die Proben insgesamt die gleiche Deckschichtmasse aufweisen (siehe Abbildung 32).

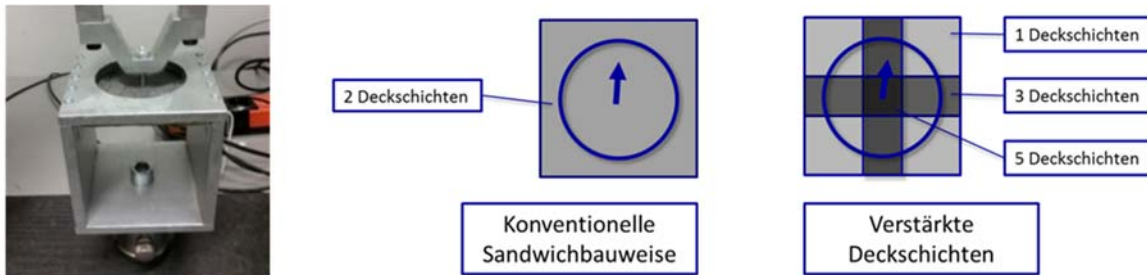


Abbildung 32: Konventioneller Pull-Out Test (links) und schematischer Aufbau der Testkörper (rechts)

Bei der Analyse der Ergebnisse und des Versuchsaufbaus stellte sich heraus, dass die derzeit standardmäßig durchgeführten Versuche nur bedingt geeignet sind, um eine Lastpfadoptimierung zu untersuchen, da die Randbedingungen dieses einfachen Tests nicht die Randbedingungen im Anwendungsfall widerspiegeln. Der oben dargestellt Pull-Out Test ist durch die kreisförmige Einspannung zwar für die Untersuchung von Inserts geeignet, abstrahiert dabei aber die Randbedingungen sehr stark. So wird beispielsweise die Weiterleitung der Kräfte auf den kürzesten Wegen zu weiteren Anbindungspunkten in der Paneelstruktur komplett vernachlässigt. Für die derzeitige Sandwichbauweise sind solche Komponententest völlig ausreichend, weil dort keine Anpassung an die Lastpfade erfolgt, sondern der Aufbau des Sandwichpaneels konstant bleibt. Daher ist auch ein sehr kleiner Ausschnitt der Sandwichprobe ausreichend, da nur der lokale Bereich zwischen Insert und Sandwich untersucht werden muss. Neben den Komponententest für die alle einzelnen Lasteinleitungselemente muss abschließend ein Full-Size Test am gesamten Monument durchgeführt werden, der für den statischen Festigkeitsnachweis für die Zulassung gefordert ist. Es gibt derzeit keine standardmäßigen Tests, bei denen ein einzelnes Sandwichpaneel mit mehreren Lasteinleitungspunkten oder einer Baugruppe (mehrere verbundene Sandwichpaneele) untersucht wird. Für eine lastpfadangepasste Bauweisen bedeutet dies, dass es keinen Testaufbau gibt, um verschiedenen Bauweisen bzw. Gestaltungskonzepte sinnvoll miteinander vergleichen zu können [Sch20]. Zur Untersuchung von Bauweisenkonzepten soll in den Versuchen ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Bauweisenkonzepte ermöglicht werden. Um die Problematik der vereinfachten Testrandbedingungen bei den gängigen Sandwichtest zu lösen, wurden dazu neue Versuchsaufbauten zum realitätsnäher Testen von Sandwichproben entwickelt. Anhand dieser wurde der Einfluss der Testrandbedingungen auf die Testergebnisse näher untersucht.

Des Weiteren wurde zusätzlich ein neuer Testaufbau für größere quadratische Sandwichproben entwickelt, bei dem ebenfalls nur an den vier Ecken eingespannt wird und der einen direkten Vergleich der unterschiedlichen lastpfadoptimierten Bauweisenkonzepte ermöglicht. Die ersten Versuche an vereinfachten Sandwichproben zeigen eine Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit der lastpfadangepassten Proben. Daraufhin wurde der Testaufbau noch einmal überarbeitet, um die Steifigkeit der Vorrichtung zu erhöhen, und sowohl eine Deckplatte mit eckiger als auch runder Einspannung gefertigt, um zusätzlich auch den Einfluss der Panelgröße auf Inserts untersuchen zu können. Der neue größere Pull-Out Test somit einen weiteren Schritt auf dem Weg zu einem Gesamtpaneltest dar. Dabei wurde an einer Vielzahl von Testkörpern aus Sandwichmaterial sowohl das Einbringen von Aussparungen für eine offene Sandwichbauweise, als auch das gezielte Aufbringen von Deckschichtverstärkungen untersucht.

Die Ergebnisse für die Deckschichtverstärkung und die Cut-Outs sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Deckschichtverstärkung zeigt, ein großes Potential, da bei einzelnen Proben deutlich höhere Festigkeiten erreicht werden. Zusätzlich wird aber auch die notwendige Genauigkeit bei der Positionierung der Verstärkungen deutlich. In einigen Fällen führte eine zu kurze Verstärkung in Kombination mit Fertigungsungenauigkeiten zu einem vorzeitigen Versagen der Proben direkt an der Einspannung, da dort die Verstärkungen nicht vollständig auflagen. Für die Cut-Outs sind Ergebnisse des hybriden Testens dargestellt, da sich die realen Versagensarten mit detaillierten FE-Modellen, die im Projekt EFFEKT⁵ entwickelt werden, auch virtuell nachbilden lassen.

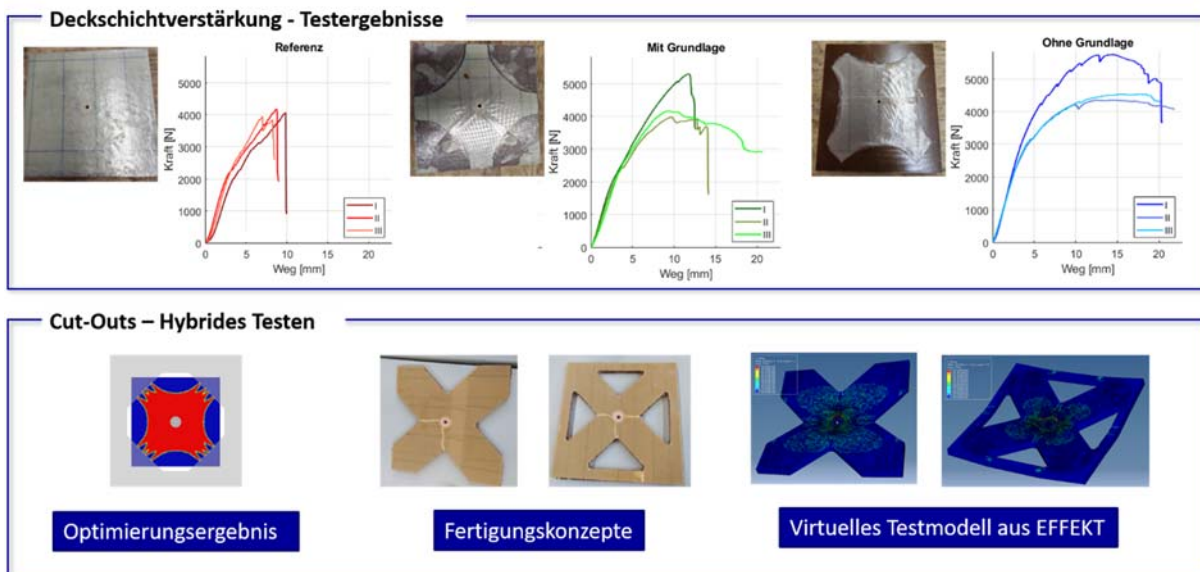


Abbildung 33: Ergebnisse Deckschichtverstärkung und Cut-Outs

Die entwickelten Testaufbauten werden ebenfalls im Projekt EFFEKT verwendet, um die Erhöhung der strukturellen Komplexität bei Zugbelastung untersuchen zu können und anschließend Tests an Substrukturen durchführen zu können. Dazu wurde u.a. gemeinsam ein neuer Testaufbau entwickelt, bei dem die Proben an den Ecken nicht mehr über eine Einspannung, sondern direkt über Sandwichverbindungselemente gelagert werden.

⁵ EFFEKT – Effiziente Kabine durch digitale Vernetzung von Technologien und Systemen, in Kooperation mit DIEHL Aviation, gefördert durch das BMWi im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1, 20D1927B), 2020 – 2022.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind

- Prototyp digitaler Montagearbeitsplatz

Zur prototypischen Umsetzung und praktischen Machbarkeitsuntersuchungen wurden Sensoren, IoT-Komponenten, Elektronik- und Montagematerial angeschafft und in Form von Demonstratoren verarbeitet, sowie bestehende Hardware durch zusätzliche Peripherie erweitert.

- Compute Server

Für die virtuelle Produktsimulation wurde ein leistungsstarker Compute Server benötigt, der die effiziente Berechnung und Analyse der FE-Modelle ermöglicht hat.

- Lizenz Cameo System Modeler

Für den modellbasierten Ansatz zur Analyse der Anforderungen und durchgängigen Entwicklung des Modulbaukastens wird eine SysML-basierte Software benötigt.

- Notwendige Hardware für Laborversuche

Zur Durchführung der Laborversuche wurden bestehende Teststände umgebaut und messtechnisch erweitert.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die Zuwendung wurden die Projektpartner und die 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 forschungsnaher 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 - diskutiert.

Durch eine enge Vernetzung der beiden Institute fließen die Forschungsergebnisse auch in andere weiterführende Projekte in den Themenfeldern Produktionsautomatisierung,

Produktmodularisierung und Simulation, insbesondere in die LuFo VI-1 Projekte EFFEKT, CabinJoint⁶, ANKA⁷, VERDIKA⁸ und InDiCaT⁹ ein.

6 Fortschritt anderer Stellen

Es wurde kein uns bekannter Fortschritt an anderen Stellen erzielt.

7 Veröffentlichungen, Vorträge

7.1 Veröffentlichungen und Vorträge, die auf Basis der beschriebenen Projektaktivitäten basieren

- [Esc20] Eschen, H., Kalscheuer F., Schüppstuhl T.: Optimized process chain for flexible and automated aircraft interior production. In: Procedica Manufacturing, 2020, Volume 51
- [Han19] Hanna, M.; Schwenke J.; Krause, D.: Modularer Leichtbau – Chancen und Herausforderungen im digitalisierten Entwicklungsprozess, Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX 2019), Jesteburg, Germany, 2019, pp. 73-84. <https://doi.org/10.35199/dfx2019.7>
- [Han20a] Hanna, M.; Schwenke, J.; Heyden, E.; Laukotka, F.; Krause, D.: Neue Trends in der Flugzeugkabinenentwicklung, in: Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 207-228. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62393-0_9
- [Han20b] Hanna, M.; Schwenke, J.; Krause, D.: Inconsistency Management for Product Families with many Variants through a Model-Based Approach in Modular Lightweight Design, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1, 2020, pp. 917-926. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.309>
- [Han21a] Hanna, M.; Schwede, L.-N.; Schwenke, J.; Laukotka, F.; Krause, D.: Methodical Modeling of Product and Process Data of Design Methods Using the Example of Modular Lightweight Design, Proceedings of the ASME 2021, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2021), November 1-5, 2021, Virtual, Online.
- [Han21b] Hanna, M.; Schwenke, J.; Schwede, L.-N.; Laukotka, F.; Krause, D.: Model-based application of the methodical process for modular lightweight design of aircraft cabins, Procedia CIRP, Vol. 100, 2021, pp. 637-642. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.136>

⁶ CabinJoint – Numerische Optimierung und automatisierte Fertigung von Lasteinleitungen in Sandwichbauteilen, in Kooperation mit 3Dlcom, gefördert durch das BMWi im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1, 20Q1904B), 2020 – 2023.

⁷ ANKA – Autonome und nachhaltige Kabine, in Kooperation mit AIRBUS Operations GmbH, gefördert durch das BMWi im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1, 20K1902C), 2021 – 2023.

⁸ VERDIKA – Kabinen-Metamodell für das Produkt, die Produktentwicklung und die Produktion, in Kooperation mit AIRBUS Operations GmbH, gefördert durch das BMWi im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1, 20D1923E), 2020 – 2023.

⁹ InDiCaT – Intelligent Digital Cabin Twin, in Kooperation mit Lufthansa Technik und 3D.aero, gefördert durch das BMWi im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1, 20D1902C), 2020 – 2023.

- [Hey20] Heyden, E.; Schwenke, J.; Hartwich, T. S.; Hanna, M.; Krause, D.: Aktuelle Ansätze in der Entwicklung und Auslegung von Leichtbaustrukturen, in: Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 135-157. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62393-0_6
- [Kal21] Kalscheuer F., Eschen, H., Schüppstuhl T.: Towards Semi Automated Pre-assembly for Aircraft Interior Production. In: Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics, 2021 [accepted, not published yet]
- [Kal22] Kalscheuer, F., Müller, T., Gierecker, J., Schüppstuhl, T.: Investigation of an Automated Potting Process for High Volume Insert Assembly in Honeycomb Structures. In: SAE Technical Papers, 2022 [under review]
- [Kal20] Kalscheuer, F.: Digitale Flugzeugproduktion – was steckt hinter der Primärstruktur?. Ingenieurspiegel, Luftfahrt, März 2020
- [Koc22] Koch, J.; Büsch, L.; Gomse, M.; Schüppstuhl, T.: A Methods-Time-Measurement Based Approach To Enable Action Recognition for Multi-Variant Assembly in Human-Robot Collaboration. In: Procedia CIRP, 2022 [accepted, not published yet]
- [Kra21] Krause, D.; Hanna, M.: Aktuelle Trends bei der Produktentwicklung von Flugzeugkabinen. WiGeP News, ISSN 1613-5504, Ausgabe 1/2021.
- [Lau20] Laukotka, F.; Hartwich, T. S.; Hauschild, J.; Heyden, E.; Schmidt, J.; Schwenke, J.; Wegner, M.; Wortmann, N.; Krause, D.: Entwicklung und Anwendung von Sonderprüfständen, in: Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 177-205. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62393-0_8
- [Sch22] Schwan, L.; Hanna, M.; Schwenke, J.; Krause, D.: Modeling of an interface between FEM and SysML for the Support of model-based development in modular lightweight design for aircraft cabins, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 2022. [under review]
- [Sch20] Schwenke, J., & Krause, D.: Optimization of load introduction points in sandwich structures with additively manufactured cores, Design Science, Vol. 6, E13, 2020. <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.10>
- [Sei20] Seiler, F. M.; Hanna, M.; Schwede, L.-N.; Laukotka, F.; Krause, D.: MBSE zur Unterstützung der Produktentwicklung von modularen Produktarchitekturen, in Krause, D.; Hartwich, T. S.; Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungsergebnisse und -projekte der Jahre 2016 bis 2020, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2020, pp. 111-134. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62393-0_5

7.2 Studentische Arbeiten

- Analyse der Funktionen des Trolleybereiches einer Flugzeuggalley und der Auswirkungen der aktuellen Lösungen auf die Bauweise – Bachelorarbeit – PKT – 2020
- Analyse des Potentials von Cyber-physischen Systemen zur Unterstützung von manuellen Fügeprozessen von Sandwich-Bauteilen in der Produktion von Flugzeugkabinenelementen – Bachelorarbeit - 2019
- Analyse und Optimierung des Produktentwicklungsprozesses bei einem Flugzeugkabinenhersteller – Projektarbeit – PKT – 2020

- Bewertung und Auswahl von rationeller Verbindungstechnik zur Erzeugung einer lösbaren Verbindung von Sandwich-Paneelen – Bachelorarbeit - 2020
- Development of an Improved Modular Galley Concept – Bachelorarbeit – PKT – 2020
- Entwicklung einer modularen Produktfamilie eines Kombikabinenmonumentes im hinteren Türeingangsbereiches eines Flugzeuges – Bachelorarbeit – PKT – 2019
- Entwicklung eines FEM Ansatzes für eine lastpfadangepasste Bauweise eines Kabinenmonumentes mit isotropen Materialverhalten – Masterarbeit – PKT – 2020
- Entwicklung eines Testaufbaus für mit Inserts gelagerte und für Zug- und Schubbelastung identische Sandwichproben – Bachelorarbeit – PKT – 2021
- Entwicklung und technische Validierung eines Konzepts zum automatisierten Klebstoffeintrag in Geweideinserts in Sandwichbauteilen – Masterarbeit – 2021
- Entwicklung von Bauweisenkonzepten für Flugzeugkabinenmonumenten unter Berücksichtigung von Leichtbau und Modularisierung – Bachelorarbeit – PKT – 2019
- Feasibility and Benefit of Optimizing Process of Configuration Management until 3D Design Generation in Electrical System Installation for Long Range Aircraft Program – Masterarbeit – PKT – 2020
- FE-Berechnung von Flugzeugkabinenmonumenten unter Berücksichtigung der Variantenvielfalt – Projektarbeit – PKT – 2021
- Implementierung von Softwareschnittstellen zwischen Automatisierungslösungen in der Flugzeugkabinenmontage – Bachelorarbeit – 2020
- Lastpfadoptimierung von Sandwichstrukturen durch lokale Anpassung der Deckschichtdicke – Projektarbeit – PKT – 2019
- Modellierung des Informationsflusses in der teilautomatisierten Produktion von Flugzeugkabinen - Bachelorarbeit – 2020
- Modellierung eines Pflegeprozesses für modulare Produktstrukturen in SysML – Projektarbeit – PKT – 2021
- Numerische Lastpfadoptimierung von Flugzeugkabinenmonumenten – Projektarbeit – PKT – 2020
- Numerische Lastpfadoptimierung von Sandwichstrukturen durch lokale Anpassung der anisotropen Deckschicht – Masterarbeit – PKT – 2021
- Optimierung und Konstruktion von Verbindungselementen für CFK-Stabwerke in Flugzeugkabinenmonumenten – Bachelorarbeit – PKT – 2019
- Parametergesteuerte Konstruktion von Stabwerksverbindern für die additive Fertigung – Bachelorarbeit – PKT – 2020
- Untersuchung des Einflusses von Lagerungsrandbedingungen auf die Lastpfadoptimierung des additiv gefertigten Wabenkerns einer Sandwichstruktur – Masterarbeit – PKT – 2021

8 Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen und Vorträge, die auf Basis der beschriebenen Projektstätigkeiten basieren, siehe Abschnitt 7.1:

- [Ajd12] Ajdari, A., Jahromi, B. H., Papadopoulos, J., Nayeb-Hashemi, H. und Vaziri, A.: „Hierarchical honeycombs with tailorable properties“, in: International Journal of Solids and Structures, Volume 49, Issue 11-12, S. 1413–1419, 2012.
- [Alt12] Alt, O.: „Modellbasierte Systementwicklung mit SysML“, Hanser Verlag, München, 2012.
- [Bah15] Bahns, T.; Beckmann, G.; Gebhardt, N.; Krause, D.: Sustainability of Modular Product Families, 20th International Conference on Engineering Design, ICED15, Mailand (2015).

- [Bar15] Barbosa, J. et al.: „Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems. The ADACOR evolution“, in: Computers in Industry, 66, S. 99–111, 2015.
- [Bit97] Bitzer, T.: „Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing“, Chapman & Hall, London, 1997.
- [Ble11] Blees, C.: „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, Dissertation am Institut PKT, TuTech Verlag, Hamburg, 2011.
- [Bot15] Botthof, A.: „Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0“, Springer, Berlin, 2015.
- [Bre13] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: „Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [Bur16] Bursać, N.: „Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung“, Dissertation am IPEK, Karlsruhe, 2016.
- [Eri98] Erixon, G.: „Modular function deployment: a method for product modularization“, Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.
- [God12] God, R.; Hintze, H.: „Komplexität beherrschen: Methodologie für die modellbasierte Entwicklung von Kabinensystemen“, Ingenieurspiegel 1/2012, 34-36.
- [Hel07] Helms, E.: „Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen“, Universität Stuttgart, 2007.
- [Hol12] Holt, P.; Perry, S., Brownsword M.: „Model-Based Requirements Engineering“, The Institution of Engineering and Technology, Herts, 2012.
- [Jaz14] Jazdi, N.: „Cyber physical systems in the context of Industry 4.0“, in: (Miclea, L. Hrsg.): 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. 22 - 24 May 2014, Cluj-Napoca, Romania. IEEE, Piscataway, NJ, S. 1–4, 2014.
- [Kae20] Kähler, F.; Eschen, H.: „Automated installation of inserts in honeycomb sandwich materials“, Procedia manufacturing 51: 462-469, 2020.
- [Kas10] Kassapoglou, C.: „Design and analysis of composite structures: With applications to aerospace structures“, Wiley (Aero-space series), Chichester, 2010.
- [Kle13] Klein, B.: „Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung“, Springer, Wiesbaden, 2013.
- [Kni13] Knight, W.: „Smart robots can now work right next to auto workers“, in: MIT Technology Review, 17, 2013.
- [Kra18a] Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Springer Verlag, ISBN 978-3-662-53039-9 , 2018
- [Kra18b] Krause, D.; Schwenke, J.; Gumpinger, T.; Plaumann, B.: Leichtbau. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. ISBN 978-3-446-45224-4, Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2018, S. 487-507.
- [Krö09] Kröger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: „Cooperation of human and machines in assembly lines“, in: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58, S. 628–646, 2009.
- [Lee15] Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H.-A.: „A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems“, in: Manufacturing Letters, 3, S. 18–23, 2015.

- [Lin09] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: „Structural complexity management: an approach for the field of product design“, Springer, Berlin, 2009.
- [Mou15] Mousanezhad, D.; Ebrahimi, H.; Haghpanah, B.; Ghosh, R.; Ajdari, A.; Hamouda, A.M.S.; Vaziri, A.: „Spiderweb honeycombs“, in: International Journal of Solids and Structures, Volume 66, S. 218–227, 2015.
- [N.A.17a] Projekt SOPRO - Selbstorganisierende Produktion. www.sopro-projekt.de, 14.06.2017.
- [N.A.17b] Projekt iWePro - Intelligente selbstorganisierende Werkstattproduktion. <http://www.projekt-iwepro.de/>, 14.06.2017.
- [Pim94] Pimmler, T. U.; Eppinger, S. D.: „Integration Analysis of Product Decompositions“, in: Proceedings of the 6th Design Theory and Methodology Conference, New York, pp. 343–351, 1994,
- [Rag08] Raghu, N., Battley, M.; Southward, T.: „Strength variability of inserts in sandwich panels“, 8th International Conference on Sandwich Structures ICSS, 2008.
- [Rie17] Riedelbauch, D.; Henrich, D.; Werner, T.: „Enabling Domain Experts to Model and Execute Tasks in Flexible Human-Robot Teams“, in: Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 2017.
- [Ris14] Riss, F.; Schilp, J.; Reinhart, G.: „Load-dependent Optimization of Honey-combs for Sandwich Components – New Possibilities by Using Additive Layer Manufacturing“ In: Physics Procedia 56, S. 327–335, 2014.
- [Sal07] Salvador, F.; Salvador, F.: „Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization“, IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 54, Madrid, 2007.
- [Sch12] Schenk, M.; Elkmann, N.: „Sichere Mensch-Roboter-Interaktion. Anforderungen, Voraussetzungen, Szenarien und Lösungsansätze“, in: Demografischer Wandel-Herausforderungen für die arbeits-und Betriebsorganisation der Zukunft, S. 109–120, 2012.
- [Sch15] Scholer, M.; Vette, M.; Rainer, M.: „A lightweight robot system designed for the optimisation of an automotive end-off line process station“, in: Industrial Robot: An International Journal, 42; S. 296–305, 2015.
- [Wan16] Wang, S. et al.: „Towards smart factory for industry 4.0. A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination“, in: Computer Networks, 101; S. 158–168, 2016.
- [Wer17] Werner, T.; Henrich, D.; Riedelbauch, D.: „Design and Evaluation of a Multi-Agent Software Architecture for Risk-Minimized Path Planning in Human-Robot Workcells“, in: Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 2017.
- [Zen97] Zenkert, D.: „The Handbook of Sandwich Construction“, Engineering Materials Advisory Services Ltd; Worcestershire, 1997.