

ENTWICKLUNG VON NEUARTIGEN GEWICHTSOPTIMIERTEN KABINENMONUMENTEN

M. C. Berschik*, F. H. Christiansen*, D. Krause*

* Technische Universität Hamburg: Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, 21073 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Entwicklung neuer Kabinenmonumente steht vor der Herausforderung, das Streben nach CO₂-Neutralität in der Luftfahrt mit den immer kundenindividuelleren Anforderungen an die Kabinenausstattung in Einklang zu bringen. Zu diesem Zweck wird eine parallele Betrachtung der Produktstruktur und der Bauweise von Kabinenmonumenten vorgeschlagen, wobei zusätzlich Nachhaltigkeitsaspekte in beiden Bereichen mitberücksichtigt werden. Die Anwendung dieses ganzheitlichen Ansatzes ermöglicht die Entwicklung disruptiver und gewichtsoptimierter Lösungen für umweltfreundliche Kabinenmonumente.

Keywords

Aircraft Cabin; MBSE; Product Development; Lightweight Design; Sustainability

1. EINLEITUNG

Das Ziel der Europäischen Union, die Luftfahrt bis 2050 CO₂-neutral zu gestalten, ist mit den bisher eingesetzten Technologien nicht umsetzbar [1]. Um den Innovationsbedarf für die bevorstehenden Herausforderungen zu decken, sind neue disruptive und innovative Ideen erforderlich. Bei Flugzeugen hängen der Kraftstoffverbrauch und die zu bewegendende Gesamtmasse direkt voneinander ab. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Flugzeugen ist der Betrieb des Flugzeugs die Phase, in welcher durch eine Reduktion der Gesamtmasse eine erhebliche Senkung der CO₂-Emissionen erreicht werden kann. Die Flugzeugkabine ist für ungefähr 20-30% des Gesamtgewichtes des Flugzeugs verantwortlich, daher ist eine Reduktion des Eigengewichts der Kabine aus ökologischen und ökonomischen Gründen erstrebenswert.

Gleichzeitig erwartet der Markt immer neue Komfortstandards, die durch den direkten Kontakt zwischen Kunden und Airline, insbesondere in der Gestaltung der Kabine entstehen. Durch diese stetig steigende Anzahl an individuellen Kundenwünschen erhöht sich insgesamt die zu handhabende Komplexität innerhalb der angebotenen Produkte. Die steigende Anzahl an Anforderungen ist eine zusätzliche Herausforderung, die mit der gewünschten reduzierten Entwicklungszeit für kundenindividuelle Produkte in Einklang gebracht werden muss [2].

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, soll in diesem Beitrag ein Ansatz zur Entwicklung dieser neuartigen gewichtsoptimierten Lösungen in der Flugzeugkabine vorgestellt werden, welcher die verschiedenen Anforderungen und Perspektiven vereint und berücksichtigt. Durch die holistische Betrachtung der Problemstellung einer umweltschonenden Kabine sollen bisher ungenutzte Potentiale identifiziert und daraufhin mittels neuer Ansätze nutzbar gemacht werden.

2. STAND DER WISSENSCHAFT

Die komplexesten Systeme sind häufig im Bereich der Raumfahrt und des Militärs zu finden. Diese Systeme sind zugleich allerdings häufig keine Produkte, die in großer Anzahl gefertigt werden, sondern meist Einzelstücke oder Kleinstserien. Das Flugzeug hingegen ist eines der wenigen komplizierten Produkte, welches in großen Mengen hergestellt wird. Deshalb ist das Flugzeug insbesondere aus Sicht der Produktentwicklung ein interessantes Produkt, bei dem die unterschiedlichsten Stakeholderanforderungen umgesetzt und zusätzlich strikte Qualitätsstandards eingehalten werden müssen. Im Folgenden werden die drei fundamentalen Themen der modellbasierten Entwicklung (Abschnitt 2.1), dem Leichtbau in der Flugzeugkabine (Abschnitt 2.2) und der Nachhaltigkeit und Ökoeffizienz im Produktlebenszyklus (Abschnitt 2.3) betrachtet und beschrieben.

2.1. Modellbasierte Entwicklung

In der Entwicklung von großen und interdisziplinären Produkten wie einem Flugzeug, existieren viele verschiedener Treiber von Komplexität. Die Komplexität entsteht unter anderem durch den Umfang an Komponenten des Produkts, aber auch durch die vielen Kundenforderungen und Stakeholder die an der Entwicklung beteiligt sind. Megatrends wie die fortlaufende Digitalisierung des Produkts und der Entwicklungsprozesse oder der Individualisierung der Produkte führen zu einer weiter ansteigenden Komplexität [3]. Diese Komplexität geht mit einer steigenden Anzahl an anfallenden, verknüpften Daten einher, die klassischerweise in digitalen Werkzeugen wie PLM oder ERP-Systemen gehandhabt werden [4]. Diese Systeme ermöglichen das Handhaben großer Datenmengen im interdisziplinären Entwicklungskontext, lösen jedoch häufig nur anteilig die auftretenden Datensilos in der Entwicklung auf.

In diesem Spannungsfeld wurde im Systems Engineering (SE) ein modellbasierter Ansatz entwickelt, der ein zentrales Systemmodell in das Zentrum, für eine ganzheitlich verknüpften Entwicklung, stellt. Das SE kann als interdisziplinärer Ansatz für das Entwickeln von Systemen verstanden werden, der die Perspektiven der Ingenieurwissenschaften und des Managements unter Verwendung eines konsequenten Systemdenkens integriert [5]. Das Model-Based Systems Engineering (MBSE) bietet dabei einen Ansatz zur modellbasierten Entwicklung aus Sicht des SE. Durch die Verknüpfung der Entwicklungsdaten mithilfe deren Metainformation, wie Abhängigkeiten oder der gegenseitigen Beeinflussung, in einem zentralen Systemmodell, lässt sich eine bessere Durchgängigkeit der Daten erreichen, eine gesteigerte Nachvollziehbarkeit aufbauen und die Änderungsauswirkung besser darstellen [6].

Das Arbeiten im Systemmodell baut grundlegend auf drei Säulen auf, der Modellierungsmethode, der Modellierungssprache und dem Modellierungstool [7]. Die drei Säulen bilden zusammen das Systemmodell, in welchem die verschiedenen Modellierungselemente miteinander verknüpft modelliert sind [6].

Das Systemmodell verbindet die Aspekte der Anforderung, des Verhaltens, der Struktur und der Parametrisierung der drei vorhergenannten Aspekte für das modellierte System und kann somit beispielsweise für die Definition der Produktstruktur, der Beschreibung des Verhaltens oder der Aufnahme von Use-Cases genutzt werden [5, 8].

Die Modellierungsmethode gibt einen Leitfaden wie die bestehenden Entwicklungsdaten modelliert werden können. Es existieren verschiedene Modellierungsmethode die für jeden Anwendungsfall spezifisch angepasst werden können.

Die Modellierungssprache beschreibt die verfügbaren Modellierungselemente (Syntax) und ihre Semantik in einer semiformalen Sprache wie beispielsweise SysML. Die verwendete standardisierte Sprache ist die Grundlage für die Kommunikation und den Informationsaustausch im Modell.

Modellierungswerkzeuge sind eine spezielle Art von Autorensoftware, die die Regeln für die Modellierung und Visualisierung auf der Grundlage von Modellierungssprachen zur Erstellung und Bearbeitung des zugrunde liegenden Datenmodells enthält [7].

Im Einklang miteinander bilden diese vier Teile die Grundlage für eine modellbasierte Entwicklung.

Wie eingangs erwähnt entwickelte sich das MBSE aus dem SE und fokussiert auf die modellbasierte Umsetzung der Methodenbausteinen des SE. Es hat sich gezeigt, dass darüber hinaus in der Literatur und Praxis verschiedene Anwendungsfälle existieren bei denen die Anwendung der modellbasierten Ansätze die beschriebenen Vorteile liefert. Dementsprechend ist der Anwendungsbereich nicht nur auf die Nutzung im Kontext des SE begrenzt [9].

Im Bereich der Luftfahrt bzw. der Kabinenentwicklung konnte in verschiedenen Projekten gezeigt werden, dass der modellbasierte Ansatz einen Mehrwert bietet. So kann beispielsweise die interdisziplinäre Zusammenarbeit von verschiedenen Lebensphasen mithilfe eines ganzheitlichen Metamodells verbessert werden [10]. Ein weiteres Beispiel ist die Modellierung von Daten der Flugzeugkabine, die in verschiedenen Retrofit-Dokumenten aufgegriffen werden. Die Modellierung der Daten in einem verknüpften

Systemmodell ermöglicht den späteren Zugriff auf die vorhandenen Informationen [11]. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass mithilfe der Modellierung der anfallenden Daten im Kontext des modularen Leichtbaus, das Datenmanagement und somit die Entscheidungsgrundlage deutlich besser aufbereitet werden konnte [11].

2.2. Leichtbau in der Flugzeugkabine

Die Flugzeugkabine ist, neben der Primärstruktur, einer der Bausteine um mithilfe einer Gewichtsreduktion das Gesamtgewicht des Flugzeugs zu reduzieren [12]. In der Luftfahrt existieren strenge Vorschriften, wodurch die Zertifizierung von neuen Bauteilen besonders aufwendig ist. Für die Sekundärstruktur, wozu alle Elemente der Flugzeugkabine gehören, legt die EASA mit der CS-25 fest, welche Anforderungen als zulassungsrelevant betrachtet werden [13]. Neben den Sitzen, welche einen Hauptteil der Kabinenmasse ausmachen, kommen dazu noch die Kabinenmonumente, wie beispielsweise die Bordküchen (Galley) oder die Bordtoiletten (Lavatory). Ein Großteil dieser Elemente werden aus Sandwich-Verbundwerkstoffen hergestellt [14]. Diese Verbundwerkstoffe bestehen aus einem leichten Kern und faserverstärkten Decklagen, wodurch das Material eine besonders hohe gewichtsspezifische Steifigkeit und Biegesteifigkeit erreicht [14]. Aktuelle Sandwich-Werkstoffe bestehen meist aus einem Wabenkern, welcher aus aramidfaserverstärktem Kunststoff besteht, welcher zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in Phenolharz getränkt wird [15]. Für die Decklagen des Verbunds werden zumeist glasfaserverstärkte Lamine verwendet.

Insbesondere ein Großteil der Kabinenmonumente wird aktuell aus Sandwichmaterial hergestellt, wobei auch für diese Strukturen noch Potential zur Optimierung steckt. Dies kann zum Beispiel durch die Optimierung von hochbelasteten Lasteinleitungspunkten gezeigt werden [16]. Die hochbelasteten Lasteinleitungspunkte liegen beispielhaft bei der CAS-Kabinentrennwand, den Galleys oder den Lavatories vor. Ein weiterer Faktor, der beim Einsatz von Sandwichstrukturen zu berücksichtigen ist, ist die Überdimensionierung. Diese ist in vielen Fällen auf die konservativen Auslegungsrichtlinien zurückzuführen, welche aufgrund des komplizierten Materialverhaltens entsteht [14].

Eine andere Möglichkeit die Gewichtsreduktion in der Kabine voranzutreiben ist der Einsatz von additiver Fertigung (AM). Die allgemeinen Vorteile von AM, wie beispielsweise die Designfreiheit, erweisen sich insbesondere vor dem Hintergrund der Herausforderungen, die bei der Entwicklung von Kabinenausrüstung zu bewältigen sind, als besonders vorteilhaft. Eine der größten Herausforderungen liegt dabei in der Zertifizierung neuer Materialien und AM-Prozesse [17, 18]. Für diesen umfassenden Zertifizierungsprozess gibt es ein eigenes Unterkapitel der CS 25, das zu berücksichtigen ist [13]. Potential zur Massenreduktion kann zum Beispiel an vollständig additiv gefertigten Kabinenstrukturen, wie einer CAS-Kabinentrennwand, aufgezeigt werden [19]. Dabei kann im Vergleich zu der Kabinentrennwand aus Sandwich-Verbundwerkstoff, durch die lastpfadoptimierte Struktur bis zu 20 % der Gesamtmasse eingespart werden [19].

Neben den genannten Prinzipien des Leichtbaus ist der Systemleichtbau eine weitere Herangehensweise, um die Masse der Kabine zu reduzieren. Für die Umsetzung wird eine möglichst vollständige Funktionsintegration angestrebt. Dabei werden die Funktionen von Komponenten neben ihren lasttragenden Eigenschaften erweitert, um dadurch die Gesamtanzahl an Komponenten zu reduzieren und damit die Gesamtmasse des Systems zu minimieren [20].

2.3. Nachhaltigkeit und Ökoeffizienz im Produktlebenszyklus

Um eine Bewertung von Produkten und Prozessen nach ökologischen Parametern durchzuführen ist die Ökobilanzierung (LCA: Life Cycle Assessment) eine etablierte Methode. Die LCA bietet unterschiedliche Ansätze zur Bilanzierung von verschiedenen Betrachtungsräumen, durch die Anpassung der Systemgrenzen können Bilanzen zu Betrieben, Prozessen oder einzelnen Produkten aufgestellt werden [21]. Eine LCA setzt sich grundlegend aus vier Schritten zusammen: *Festlegung des Ziels und des Unternehmensrahmens*, *Sachbilanz*, *Wirkungsabschätzung* und *Auswertung* [22]. Die *Wirkungsabschätzung* ist der Schritt, welcher die Ökobilanz elementar von einer reinen Sachbilanz unterscheidet [22].

Die Wirkungsabschätzung beinhaltet die Quantifizierung wesentlicher Umweltaspekte [23]. Außerdem erfolgt die Betrachtung von Massenströmen, Emissionen, Ressourcenverbrauch und dem Energiebedarf gesamtheitlich, um die Umwelteinflüsse über den gesamten Lebenszyklus zu quantifizieren [23, 24]. Darauf aufbauend ist das Verhältnis von Ressourceneinsatz zu Performance, also der Effizienz des Produktes, zu quantifizieren, da ein bloßer Mehrverbrauch an Ressourcen nicht unbedingt ein ökologisch schlechteres Produkt bedeutet. Um die Einflüsse zu kategorisieren, existieren Schadenskategorien, welche den Einfluss eines Produktes oder Prozesses in Bezug auf die Kategorie darstellen [23]. Dazu zählen: menschliche Gesundheit, Qualität der Ökosysteme, Klimawandel und Ressourcen [25]. Bei der Aufnahme einer Wirkungsabschätzung sind diese Kategorien zu betrachten und die zu betreffenden Auswirkungen zuzuordnen.

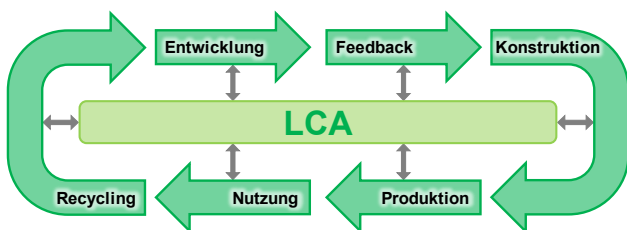


BILD 1. Produktlebenszyklus übergreifende LCA

Im Rahmen der Produktentwicklung nach der Lebensphasenentwicklung, siehe BILD 1, ist die LCA über den gesamten Zeitraum, von der Entwicklung bis zur Entsorgung, zu erstellen [26]. Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes in der Entwicklung ist in der Betrachtung der Ökoeffizienz besonders wichtig, und wird in der traditionellen Produktentwicklung nicht mitbetrachtet [21]. Insbesondere

bei Produkten mit einer langen Nutzungsphase ist die Ökoeffizienz im Betrieb besonders relevant. Aspekte wie die Betrachtung der Entsorgung bzw. des Recyclings sollten dabei ebenfalls mitbetrachtet werden.

Bei Flugzeugen, welche eine lange Nutzungsdauer aufweisen, entstehen die CO₂-Emissionen zu über 99 % in der Nutzungsphase durch die Verbrennung der fossilen Kraftstoffe [27].

3. METHODISCHER ANSATZ

Im Folgenden wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, welcher die systematische Entwicklung neuartiger und ökoeffizienter Kabinenmonumente unterstützt. Dabei werden Aspekte der Nachhaltigkeit, Produktstrukturierung und Leichtbau simultan betrachtet und in einem ganzheitlichen Entwicklungsansatz mit einbezogen.

3.1. Bestehende Herausforderungen

Die Entwicklung neuartiger Kabinenmonumente erweist sich mit etablierten Entwicklungsphilosophien als anspruchsvoll. Speziell das generieren von disruptiven Lösungen ist schwierig, wenn auf bestehende Konzepte aufgebaut wird und die aktuellen Lösungen in marginalen Iterationszyklen verbessert werden.

Des Weiteren liegen große Potentiale in einem holistischen Gestaltungsansatz. Werden die Disziplinen der Produktstrukturierung und des Leichtbaus getrennt betrachtet, führen diese zu widersprüchlichen Lösungsansätzen. Dadurch bleiben Optimierungspotentiale ungenutzt, da in keinem der Aspekte das Optimum erreicht werden kann.

Die dritte Herausforderung liegt in der steigenden Nachfrage nach Individualisierung und Anpassung der Produkte zur Befriedigung spezieller Kundenbedürfnisse. Im Beispiel der Luftfahrt, sind für unterschiedliche Kabinenkonfigurationen verschiedenste Varianten von Monumenten notwendig, außerdem haben die Airlines differierende Anforderungen bspw. hinsichtlich der Farbgebung und Konfiguration der Kabinenausstattung. Diese Anforderungen sollten, wenn möglich, im Entwicklungsprozess direkt mitberücksichtigt werden.

3.2. Angedachter holistischer Optimierungsansatz

Im Folgenden wird der angedachte Ansatz kurz vorgestellt und im Anschluss die Teilbereiche des Ansatzes in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben. Der beschriebene Ansatz ist die Grundlage für die ganzheitliche Optimierung disruptiver Monument-Varianten. Der Ansatz ist in BILD 2 dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert.

Der Ansatz begegnet den beschriebenen Herausforderungen, in dem er beide Optimierungsbereiche, der Produktstrukturierung und des Leichtbaus, in einem holistischen Ansatz mit Aspekten der Nachhaltigkeitsbetrachtung zusammenbringt. Dabei werden mithilfe eines modellbasierten Ansatzes die Produktstruktur aufgenommen und ganzheitlich abgebildet.

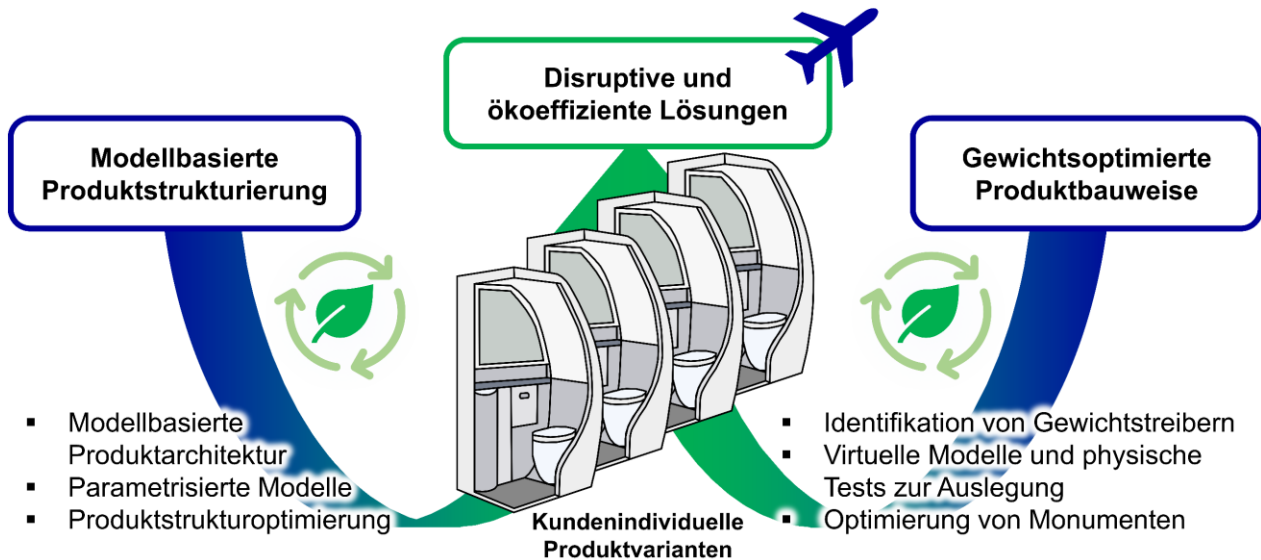


BILD 2. Abstrakter Ansatz zur disruptiven ökoeffizienten Kabinenmonumentoptimierung

Die Modellierung, der in der Produktfamilie existierende Monument-Varianten, in einem Systemmodell wird parametrisiert und bildet die Grundlage für die anschließende Optimierung. Durch den vielseitig anwendbaren modellbasierten Ansatz, kann die Parametrisierung für verschiedene Bereiche angepasst werden. Betrachtete Parameter sind unter anderem das Gewicht, Kosten oder Nachhaltigkeitsaspekte. Nachhaltigkeitsaspekte können in bestehende Optimierungsprozessen oftmals nur schwer inkludiert werden, da die benötigten Informationen nicht zur Verfügung stehen, oder in anderen Systemen abliegen. Durch den modellbasierten Ansatz sollten diese Informationen direkt mit den Komponenten verknüpft in der Entwicklung mit modelliert werden. Somit können beispielsweise Parameter wie der CO₂-Fußabdruck, Prozesskosten oder die Wiederverwendbarkeit von Komponenten direkt im Modell hinterlegt werden. Aufbauend auf der Parametrisierung werden verschiedene multikriterielle Optimierungsstudien durchgeführt, um verschiedene Produktstrukturalternativen für die Produktvarianten der Produktfamilie zu bewerten.

Auf der anderen Seite wird parallel zur Produktstrukturierung die gewichtorientierte Optimierung der Monumente realisiert. Dabei werden sowohl physische Tests wie auch virtuelle Tests durchgeführt. Die Validierung der Simulationsmodelle erfolgt durch den Abgleich mit den physischen Tests ausgehend von der Material Ebene bis zur Komponenten Ebene. Mithilfe der Multi-Model Optimierung werden verschiedene Lastfälle für die einzelnen Produktvarianten analysiert.

Die Ergebnisse der Optimierung werden zusammen mit den optimierten Produktstrukturen zu einer Gesamtlösung harmonisiert, vgl. BILD 3. Dabei werden die für die einzelnen Produktvarianten existierenden kundenrelevanten Anforderungen mit einbezogen und spezifisch den einzelnen Varianten der Produktfamilie zugeordnet. Entsprechend kann die Einteilung in Standard und variante Komponenten auf Grundlage der Optimierungsergebnisse in den Produktfamilien analysiert werden. Es wird in der Harmonisierung eine darüber

hinauslaufende LCA-Analyse auf Basis der harmonisierten Produktstruktur mit einbezogen, sodass auch lebensphasenübergreifend eine Aussage über die Optimierungsergebnisse gegeben werden kann. Insgesamt kann so die Ökoeffizienz der einzelnen Optimierungsergebnisse sichergestellt werden.

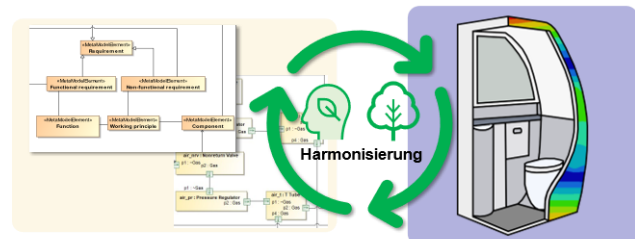


BILD 3. Harmonisierung der Gesamtlösung aufbauend auf Multikriteriellen Optimierung, numerischen Simulation, Topologieoptimierung und Nachhaltigkeitsanalyse

3.3. Erweiterte modellbasierte Produktstrukturierung

Die Optimierung der Produktstruktur bietet einige Möglichkeiten die Produkteigenschaften und deren Aufbau bestmöglich zu verändern. Ziel der multikriteriellen Optimierung ist es, die Optimierung nicht nur auf ein bis zwei Parameter, wie das Gewicht und Kosten, zu beziehen, sondern auch weitere Parameter und Abhängigkeiten parallel mit zu berücksichtigen. Dafür soll als Grundlage eine geeignete Datenbasis geschaffen und diese in einem ganzheitlichen Systemmodell abgebildet werden.

Dazu wird in das grundlegende Systemmodell, eine geeignete Parametrisierung integriert. Die so verknüpften parametrisierten Modelldaten werden anschließend mithilfe von verschiedenen Algorithmen analysiert und multikriteriell optimiert.

Wie in BILD 4 dargestellt, wird zunächst ein ganzheitliches Systemmodell der zu betrachteten Monumentenfamilie

aufgebaut. Das Systemmodell wird dabei mit der Modellierungssprache SysML und dem Modellierungstool Cameo Systems Modeler modelliert. Um das Systemmodell zu füllen, werden die relevanten Entwicklungsdaten abgebildet und die einzelnen Monumentvarianten im Modell definiert. Darauf aufbauend wird eine Parametrisierung festgelegt, welche für die anschließende Optimierung benötigte Daten umfasst. Die Parameter werden im Systemmodell modelliert und bilden im parametrischen Modell die Datengrundlage für die weitere Optimierung. Die Sprache SysML bietet durch ihre gute Erweiterbarkeit eine optimale Voraussetzung für die grundsätzliche Nutzung als standardisierter Datenspeicher.

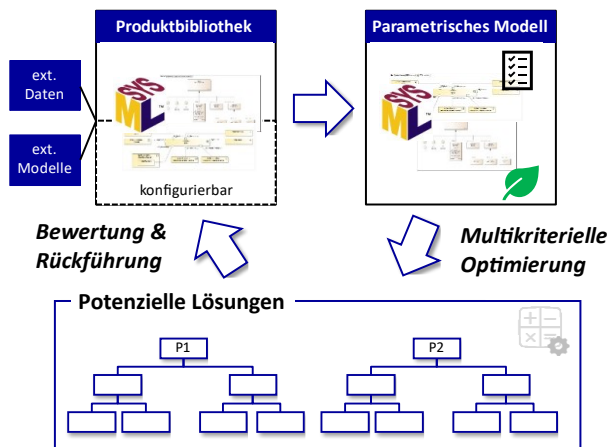


BILD 4. Grundlegendes Vorgehen zur multikriteriellen Optimierung

Die beschriebene Datengrundlage wird im nächsten Schritt aus dem Modellierungstool mithilfe einer CSV-Schnittstelle ausgeleitet und anschließend für die Optimierung aufbereitet. Die anstehende Optimierung wird mithilfe verschiedener Algorithmen durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse der multikriteriellen Optimierung in das Systemmodell zurücküberführt und damit dem Optimierungsprozess wieder zugeführt. Durch die Untersuchung der verschiedenen Varianten lassen sich somit nicht nur Aussagen zu einzelnen Varianten, sondern zum Aufbau der gesamten Produktfamilie ableiten. Die gewonnenen Informationen sind insbesondere im Schritt der anschließenden Harmonisierung wichtig und können hier einen großen Mehrwert bieten, da die Kommunalität von Komponenten ausgenutzt und die Varianz anhand der Ergebnisse insgesamt verringert werden kann.

3.4. Gewichtsoptimierte Monumentbauweise

Die gewichtsorientierte Optimierung von Monumenten ist ein umfassender Prozess. Dabei kann auf der Betrachtungsebene der Komponenten begonnen werden, um bspw. einzelne Verbindungselemente zwischen Sandwichpanelen zu optimieren, oder eine gesamtheitliche Optimierung des Monuments auf Produktebene durchgeführt werden.

In dem hier beschriebenen Auslegungsansatz sollen physische und virtuelle Tests genutzt werden, um den Aufwand in der Auslegung zu reduzieren. Aktuell sind für die Entwicklung und Auslegung eine Vielzahl an Tests notwendig, diese fallen auch bereits in der Entwicklung an. Durch validierte virtuelle Testmodelle sollen die Tests in der

Entwicklungsphase zu einem großen Teil substituiert werden. Damit können optimierte Kabinenmonumente effizienter entwickelt werden, da die Zahl der in der Entwicklung benötigten physischen Tests sinkt.

Eine effektive Maßnahme zur systematischen Reduktion der Masse von Kabinenmonumenten ist die Minimierung von Sicherheitsfaktoren. Diese Minimierung kann durch eine anwendungsnahe Auslegung erreicht werden, um konservative Sicherheitsfaktoren zu reduzieren. Für diese gezielte Reduktion sind physische Versuche notwendig, um die signifikanten Einflüsse auf Full-Size Tests zu identifizieren und diese in der Auslegung bereits vorbereitend berücksichtigen zu können. Die Messdaten aus verschiedenen physischen Versuchen können des Weiteren zur Identifikation von überdimensionierten Bereichen genutzt werden, welche Bereiche weiterer potentieller Massenreduktion sind. Mithilfe der Messdaten lassen sich außerdem die virtuellen Testmodelle validieren und detaillieren. Dazu kann es im Sinne des Building-Block-Approaches ebenfalls hilfreich sein, zusätzliche Tests auf Komponentenebene durchzuführen [28].

Zur Optimierung der Kabinenmonumente können etablierte Verfahren der Topologieoptimierung eingesetzt werden, wodurch bspw. eine lastpfadoptimierte Geometrie realisiert werden kann. Ein anderer Ansatz ist die Multi-model Optimierung auf Basis welcher, die Betrachtung unterschiedlicher Varianten und Lastfälle parallel möglich ist [29]. Dabei ist es möglich, kommunale Komponenten und Bereiche in den Kabinenmonumenten zu identifizieren, um dadurch eine Produktfamilie übergreifende Optimierung durchführen zu können. Dadurch kann zum einen Rechenzeit für die Optimierung eingespart werden, zum anderen ist die Minimierung von unterschiedlichen Komponenten über die Produktfamilie möglich.

3.5. Systematische Berücksichtigung von Nachhaltigkeit

Wie in Kapitel 3.3 und 3.4 beschrieben, muss für den angedachten ganzheitlichen Optimierungsansatz auch der Aspekt der Nachhaltigkeit von vornherein mitgedacht werden. Somit können Nachhaltigkeitsaspekte frühzeitig mit in die Betrachtungsweise inkludiert und ein ganzheitlicher Entwicklungsansatz überhaupt erst realisiert werden.

Entsprechend dient die Ökobilanzierung als Grundstein für eine Nachhaltigkeitsbewertung der erarbeiteten Konzepte. Wie in BILD 5 dargestellt, wird das ganzheitliche Produktstruktur- und Gestaltungskonzept der Kabinenmonumente anhand der Ergebnisse dieses systematischen Gesamtansatzes entwickelt. Die beschriebenen Treiber der Nachhaltigkeit können so identifiziert und deren Auswirkungen auf den Leichtbau und die Produktstrukturierung explizit bestimmt werden.

Weiterhin können die Ergebnisse einer Ökobilanzierung mit in die Harmonisierung aufgenommen werden. Dazu wird die erarbeitete Produktstruktur unter Annahme bestehender Daten neu bewertet und Aspekte die in den einzelnen Teilbereichen des Ansatzes noch nicht vollständig betrachtet wurden mit einbezogen. Somit ist auch wenn nicht alle Nachhaltigkeitsaspekte in der Produktstrukturierung und der Gewichtsoptimierung

betrachtet wurden, eine Miteinbeziehung in der Harmonisierung möglich.

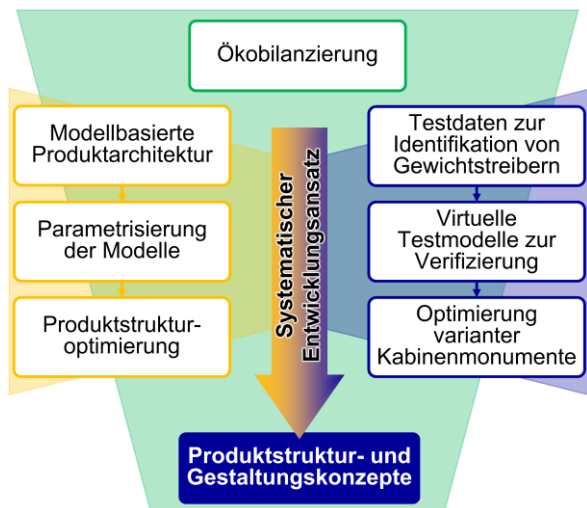


BILD 5. Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in den ganzheitlichen Entwicklungsansatz

Insgesamt bildet dieser Entwicklungsansatz die Möglichkeit ein ausgewogenes und unter allen Teilaspekten abgestimmtes Produktstruktur- und Gestaltungskonzept für neuartige gewichtsoptimierte Kabinenmonumente zu erarbeiten.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Flugzeug- und vor allem die Kabinenentwicklung steht mit den heutigen Herausforderungen in Bereich der Nachhaltigkeit und der starken Individualisierung vor großen Aufgaben, die mit bestehenden Entwicklungsansätzen nur schwer umzusetzen sind. Insbesondere bei der Entwicklung neuartiger disruptiver Entwürfe kommen viele Ansätze, die auf einer iterative aber nur minimalen Optimierung bestehender Entwürfe aufbaut, an ihre Grenzen. Dementsprechend bedarf es neuartiger Ansätze, die nicht nur einzelne Teilbereiche betrachten, sondern einen ganzheitlichen Entwicklungsansatz bieten.

Der hier vorgestellte Ansatz erlaubt eine Harmonisierung der Anforderungen und Ergebnisse der unterschiedlichen Aspekte. Die zu hebenden Potentiale können durch die Analyse und Optimierung der Produktstruktur sowie einer Gewichtsoptimierung der Monumente unter Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit identifiziert werden. Folglich lässt sich festhalten, dass jeder der drei Teilaspekte für sich genommen von Relevanz ist. Erst in ihrer gesamtheitlichen, kombinierten Betrachtung erlangen sie jedoch Aussagekraft im Hinblick auf die Findung neuartiger und disruptiver Lösungen.

In einem nächsten Schritt muss die Ausarbeitung der drei Teilansätze erfolgen, um diese anschließend im Rahmen des ganzheitlichen Ansatzes zusammenführen zu können. Im Anschluss erfolgt die Anwendung des formulierten Ansatzes auf eine Produktfamilie der Lavatories, um dessen Wirksamkeit zu untersuchen und mit bestehenden Entwicklungsansätzen zu vergleichen.

DANKSAGUNG

Die vorgestellten Forschungsergebnisse sind der Teil des Forschungsprojektes: *Disruptive Kabine für umweltschonendes Lufttransportsystem*. Das Projekt ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-3). Förderkennzeichen: 20K2292.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literaturangaben

- [1] European Commission: Directorate - General for Research and Innovation: Fly the Green Deal. Europe's vision for sustainable aviation. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.
- [2] Hanna, M., Schwenke, J., Heyden, E., Laukotka, F. u. Krause, D.: Neue Trends in der Flugzeugkabinenentwicklung. In: Krause, D., Hartwich, T. S. u. Rennpferdt, C. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020, S. 207–228. DOI: 10.1007/978-3-662-62393-0_9
- [3] Krause, D. u. Gebhardt, N.: Methodical Development of Modular Product Families. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2023. DOI: 10.1007/978-3-662-65680-8
- [4] Eigner, M., Koch, W. u. Muggeo, C. (Hrsg.): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-55124-0
- [5] Walden, D. D., Roedler, G. J., Forsberg, K. J., Hamelin, R. D., Shortell, T. M. u. Kaffenberger, R. (Hrsg.): INCOSE Systems Engineering Handbuch: Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten. Titel des englischen Originals: INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. INCOSE Systems Engineering Handbuch // Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten : INCOSE-TP-2003-002-04 2015. San Diego: GfSE Verlag; GfSE e.V, 2017.
- [6] Friedenthal, S., Moore, A. u. Steiner, R.: A Practical Guide to SysML. Elsevier 2015.
- [7] Delligatti, L.: SysML Distilled: A Brief Guide to the Systems Modeling Language. Boston: Addison-Wesley, 2013.
- [8] Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. München: Hanser, 2012.
- [9] Berschik, M. C., Schumacher, T., Laukotka, F. N., Krause, D. u. Inkermann, D.: MBSE within the Engineering Design Community - an exploratory

- study. *Proceedings of the Design Society* 3, (2023), S. 2595–2604. DOI: 10.1017/pds.2023.260
- [10] Berschik, M. C., Blecken, M., Kumawat, H., Rath, J.-E., Krause, D., God, R. u. Schüppstuhl, T.: A holistic aircraft cabin metamodel as an approach towards an interconnected digitised cabin lifecycle. *The International Council of the Aeronautical Sciences. 33rd Congress of the International Council of The Aeronautical Sciences (ICAS 2022)*, (2022). DOI: 10.15480/882.4757
- [11] Berschik, M. C., Laukotka, F., Hanna, M., Schwan, L. u. Krause, D.: Digitale Innovationen in der Flugzeugkabinenentwicklung. *Tagungsband 71. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK 2022)*, (2022). DOI: 10.25967/570357
- [12] Schwan, L., Hanna, M., Hartwich, T. S., Heyden, E., Hüttich, P., Sankowski, O., Schwenke, J., Wehrend, S. u. Krause, D.: Neue Ansätze zur Entwicklung innovativer und nachhaltiger Bauweisen in der Flugzeugkabine, (2021). DOI: 10.25967/570398
- [13] European Union Aviation Safety Agency: *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS -25*. 2020.
- [14] Zenkert, D. (Hrsg.): *The handbook of sandwich construction. North European engineering and science conference series*. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997.
- [15] Heimbs, S.: *Sandwichstrukturen mit Wabenkern. Experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2008. IVW-Schriftenreihe, Bd. 77. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2008.
- [16] Schwenke, J. u. Krause, D.: Optimization of load introduction points in sandwich structures with additively manufactured cores. *Design Science* 6, (2020). DOI: 10.1017/dsj.2020.10
- [17] Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A. u. Bil, C.: Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering* 6 (2019) 4, S. 516–526. DOI: 10.1016/j.jcde.2019.02.001
- [18] Singamneni, S., LV, Y., Hewitt, A., Chalk, R., Thomas, W. u. Jordison, D.: Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering* 08, (2019). DOI: 10.35248/2168-9792.19.8.215
- [19] Christiansen, F. H., Hartwich, T. S., Schellhorn, J., Schwan, L. u. Krause, D.: Design Optimization of Aircraft Cabin Panels by Additive Manufacturing. In: Endress, F., Rieser, J., Horoschenkoff, A., Höfer, P., Dickhut, T. u. Zimmermann, M. (Hrsg.): *Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2023*. Cham: Springer Nature Switzerland 2024, S. 91–102. DOI: 10.1007/978-3-031-64669-0_9
- [20] Alber-Laukant, B.: *Handbuch Konstruktion*. Hanser eLibrary. München: Hanser, 2018. DOI: 10.3139/9783446456198
- [21] Herrmann, C.: *Ganzheitliches Life Cycle Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-01421-5
- [22] Europäische Norm 14040:2006:2006. *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. ISO 14040:2006 + Amd 1:2020, 2022.
- [23] Klöpffer, W. u. Grahl, B.: *Life Cycle Assessment (LCA). A guide to best practice*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2014. DOI: 10.1002/9783527655625
- [24] Owens, J. W.: Life cycle impact assessment: The use of subjective judgements in classification and characterization. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3, (1998), S. 43–46. DOI: 10.1007/BF02978451
- [25] Joliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. u. Rosenbaum, R.: IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8, (2003) 6. DOI: 10.1007/BF02978505
- [26] Mansour, M.: *Informations- und Wissensbereitstellung für die lebenszyklusorientierte Produktentwicklung*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2006. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Essen: Vulkan-Verl. 2006.
- [27] Howe, S., Kolios, A. J. u. Brennan, F. P.: Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 19, (2013), S. 34–41. DOI: 10.1016/j.trd.2012.12.004
- [28] Department of Defense: *Composite Materials Handbook, Volume 3, Polymer matrix composites materials usage, design and analysis*. 2002.
- [29] Zagorski, N., Nelson, E., Caliskan, A. u. Li, A.: *Design of Automotive Structures Using Multi-Model Optimization*. SAE Technical Paper Series. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2017. DOI: 10.4271/2017-01-1342