

POTENZIALE ZUR STEIGERUNG DER NACHHALTIGKEIT IN DER FLUGZEUGKABINE

S. Wehrend*; L. Schwan*; K. Zumach*; D. Krause*

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

Zusammenfassung

Weltweit verursacht der Luftverkehr etwa 2% der globalen CO₂-Emissionen, während er gleichzeitig rund 4% zur weltweiten Wirtschaftsleistung beiträgt. Vor diesem Hintergrund und dem ambitionierten Ziel einer klimaneutralen Luftfahrt bis 2050, welches die europäische Union sich gesetzt hat, steht die Luftfahrtindustrie vor der Herausforderung nachhaltiger zu werden.

Bei einer durchschnittlichen Flugzeuglebensdauer von 20-30 Jahren müssen neben neuen, nachhaltigeren Antriebskonzepten auch Lösungen zur Steigerung der Nachhaltigkeit bestehender Flotten erarbeitet werden. Eine Möglichkeit, die Nachhaltigkeit bestehender Flotten zu verbessern, bietet die Flugzeugkabine, welche 10-20% der Emissionen eines Fluges verursacht und vier bis fünf Mal im Laufe eines Flugzeuglebens erneuert wird.

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche Potentiale innerhalb der Kabine zur Verbesserung der Nachhaltigkeit existieren. Es wird dargelegt, welche Möglichkeiten sich einerseits durch modular gestaltete Produktfamilien ergeben und wie sich andererseits die Nachhaltigkeit durch den Einsatz alternativer, biobasierter Materialien zur Herstellung von Faserverbundkomponenten beeinflussen lässt.

Keywords

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

1. EINLEITUNG

Der Luftverkehr hat einen Anteil von etwa 2% an den globalen CO₂-Emissionen, trägt jedoch auch einen Anteil von 4% an der weltweiten Wirtschaftsleistung [1]. In Anbetracht der steigenden Relevanz von Nachhaltigkeit erhöht sich auch für die Luftfahrtbranche der Drang nachhaltiger zu werden und Emissionen zu reduzieren. Die Europäische Union hat diesen Drang zur mehr Nachhaltigkeit in ihrem Flightpath 2050 in konkrete Ziele gefasst und will bis zum Jahr 2050 die CO₂-Emissionen um 75% reduzieren und die Rezyklierbarkeit von Flugzeugen stärken [2].

Aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauer eines Flugzeuges von 20-30 Jahren, sind neben neuen Flugzeug- und Antriebskonzepten auch Lösungen zur mittelfristigen Emissionsreduzierung bestehender Flotten erforderlich, um das gesetzte Ziel zu erreichen. Eine Möglichkeit hierzu bietet die Flugzeugkabine, welche für 10-20% der Emissionen eines Flugzeuges verantwortlich ist und im Laufe eines Flugzeuglebens vier- bis fünfmal ausgetauscht wird [3]. Diese kürzere Lebensdauer ermöglicht eine deutlich schnellere Marktdurchdringung von Maßnahmen in der Kabine.

Für einen ganzheitlichen Ansatz zur Steigerung der Nachhaltigkeit sollten alle drei Strategien der Nachhaltigkeit, Effizienz, Konsistenz sowie Suffizienz berücksichtigt werden [4]. Effizienz zielt dabei auf eine bessere Nutzung eingesetzter Materialien und Rohstoffe ab, beispielsweise durch technische Innovationen. Konsistenz beschreibt eine ökosystemverträgliche Nutzung von Rohstoffen, was beispielsweise auch die Substitution kritischer Rohstoffe durch alternative, weniger schädliche oder geschlossene Materialkreisläufe

beinhaltet. Suffizienz als dritte Strategie beschreibt eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs durch das Hinterfragen von Bedürfnissen. Ein Beispiel hierfür ist die Reparatur einer Komponente anstelle eines vollständigen Ersatzes durch ein Neuteil.

Wendet man diese drei Nachhaltigkeitsstrategien auf die Flugzeugkabine an, so kann die Konsistenz durch die Verwendung biobasierter Materialien anstelle von konventionellen Faserverbundbauteilen erreicht werden. Die Verbesserung des Leichtbaus insgesamt durch neue Bauweisen und die damit verbundene Reduzierung der Emissionen in der Nutzungsphase kann der Effizienz zugeordnet werden. Suffizienz als letzte Strategie wird auf der Ebene des Produktarchitekturdesigns angesprochen. Hier kann die Reparaturfähigkeit und Wiederverwendbarkeit von Kabinenausstattungsmodulen durch einen gezielten, modularen Aufbau verbessert werden.

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche Potentiale innerhalb der Kabine zur Verbesserung der Nachhaltigkeit existieren. Zu Beginn des Beitrags wird hierfür in Kapitel 2 der Stand der Wissenschaft im Bereich Modularisierung und Leichtbau in der Flugzeugkabine vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 3 aufgezeigt, welche Potentiale zur Verbesserung der Nachhaltigkeit sich innerhalb der Kabine durch modular gestaltete Produktfamilien ergeben. In Kapitel 4 wird ein Vorgehen für die Potentialanalyse ökologischer Leichtbaumaßnahmen vorgestellt und am Beispiel von Flachfasern vorgestellt. Ein wichtiger Bestandteil der Potentialanalyse ist die Ökobilanzierung, auf welche im Kapitel 5 detailliert eingegangen wird. In Kapitel 6 erfolgt abschließend die Zusammenfassung und der Ausblick.

2. STAND DER WISSENSCHAFT

Zunächst wird der Stand der Wissenschaft vorgestellt, zum einen bezogen auf Modularisierung, zum anderen bezogen auf Leichtbau in der Flugzeugkabine.

2.1. Modularisierung

Unter Modularisierung wird die zielorientierte Entwicklung der Modularität der Produktstruktur verstanden, die einhergeht mit der konkreten Festlegung von Modulen und deren Schnittstellen [4]. Die Ansätze zur Entwicklung modularer Produktfamilien können nach technisch-funktionalen und produktstrategischen Zielen unterteilt werden. Basierend auf einer systematischen Literaturrecherche identifizieren Sonogo et al. [6] ökologische Vorteile, die aus der Gestaltung der modularen Produktstruktur entstehen, und ordnen diese den Produktlebenszyklusphasen zu. Hiermit zeigen sie, dass Modularität während des gesamten Lebenszyklus Vorteile hinsichtlich Nachhaltigkeit bieten kann, wobei weiterer Forschungsbedarf besteht, um geeignete Modularisierungsstrategien zu identifizieren, die das Erreichen nachhaltiger Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus hinweg unterstützen [6].

Denn die eigentliche Festlegung der modularen Produktstruktur stellt stets eine Kompromisslösung dar [4]. Durch Aspekte der Nachhaltigkeit kommen weitere Zielkonflikte hinzu, die im Rahmen der Modularisierung miteinander abgewogen werden müssen.

2.2. Leichtbau in der Flugzeugkabine

Mit ca. 98-99% wird ein Großteil der Emissionen in der Luftfahrt in der Nutzungsphase emittiert [7]-[10]. Hierbei spielt das Gewicht eine entscheidende Rolle, um Treibstoff und damit CO₂ einzusparen. Aktuell werden in der Flugzeugkabine daher Sandwichstrukturen aufgrund ihrer guten gewichtsspezifischen Materialeigenschaften und ihrer hohen Biegesteifigkeit eingesetzt [7]. Für den leichten Sandwich-Wabenkern wird dabei in der Regel phenolharzimprägniertes Nomex®-Papier und für die Deckschichten Glasfaser-Prepreg verwendet [7], [11]. Jedoch lassen sich die synthetischen Faserverbundstrukturen nur schlecht recyceln und haben auch in der Produktionsphase Nachteile hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit, insbesondere durch die Gewinnung des erdölbasierten duroplastischen Harzes. Biobasierte Verbundmaterialien haben hinsichtlich dieser Aspekte das Potential, Vorteile gegenüber den konventionell eingesetzten Materialien zu generieren. In der Literatur wurden hierfür bspw. Flachs-, Bananen-, Kenaf- sowie weitere Fasermaterialien hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert [7], [12]-[14]. Auch die Erforschung und Entwicklung alternativer, biobasierter Harzsysteme ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten [15], [16]. Da das Gewicht in der Luftfahrtindustrie einen hohen Stellenwert hat, aber auch eine Vielzahl weiterer unterschiedlicher Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren existieren, ist eine Potentialanalyse biobasierter Materialien unabdingbar. In diesem Beitrag wird am Beispiel von Flachsfaser-Sandwichstrukturen ein Vorgehen vorgestellt, wie bei einer Potentialanalyse biobasierter Materialien in der Flugzeugkabine vorgegangen werden kann.

3. POTENTIALE DER PRODUKTARCHITEKTUR

Die folgenden Abschnitte bauen auf Inhalten der englischsprachigen Publikation "Towards A Holistic Approach To Increase Sustainability In Aircraft Cabin Design" [19] auf. Deren Inhalte werden aufgegriffen, fortgeführt und insbesondere um ein strukturiertes Vorgehen zur Potentialabschätzung des ökologischen Leichtbaus ergänzt.

Die Modularität von Produkten beeinflusst die Fähigkeit, die Produkte am Ende des Lebenszyklus zu zerlegen, wodurch es ermöglicht wird, Komponenten und Module am Ende der Lebensdauer nach der für sie am besten geeigneten Behandlung zu sortieren [17]. Bei der Bewertung von modularen Produktfamilien ist deshalb eine Betrachtung auf den verschiedenen Ebenen der Produktarchitektur sinnvoll, um die Potentiale vollständig auszuschöpfen (vgl. BILD 1). Auf oberster Ebene steht die Produktvariante, die aus Modulen gebildet wird. Die Module werden wiederum aus Komponenten zusammengesetzt und die Komponenten selbst sind aus unterschiedlichen Materialien gefertigt.

Zur Bewertung von Nachhaltigkeit kann eine Vielzahl an Kriterien und Indikatoren herangezogen werden [18]. Um bereits bei der Gestaltung der Produktarchitektur Nachhaltigkeit als Zielgröße zu betrachten, sollten Kriterien ausgewählt werden, die durch die Produktarchitektur beeinflussbar sind [19]. Wird beispielsweise langfristig gesehen eine Kreislaufwirtschaft angestrebt, können verschiedene Strategien verfolgt werden. Diese Strategien fokussieren unter anderem die Verlängerung des Lebenszyklus sowie das Schließen der Lücke zwischen Nachnutzung und Produktion [20]. Ermöglicht werden kann dies unter anderem, indem Produkte reparierbar gestaltet werden. Eine Voraussetzung hierfür ist die Demontagefähigkeit des Produktes. Bei modularen Produkten können einzelne (defekte) Module demontiert und entweder selbst repariert oder, falls dies nicht möglich ist, durch neu-produzierte Module ersetzt werden. Das Kriterium Reparierbarkeit kann somit sowohl auf Produktvariantebene, als auch auf Modul- und Komponentenebene betrachtet und bewertet werden (vgl. BILD 1).

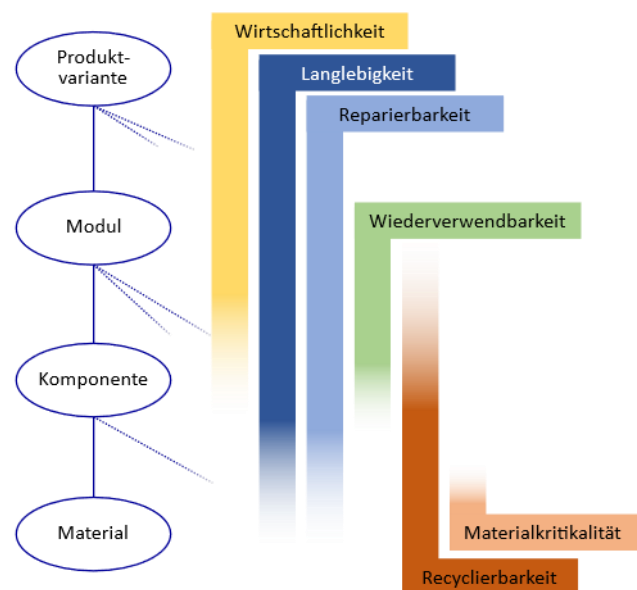


BILD 1. Ebenen der Produktarchitektur und

mögliche zugeordnete Nachhaltigkeitskriterien

Ein zentraler Schritt bei der Modularisierung von Produkten ist die Festlegung der Modulgrenzen. Bei diesem so genannten modulbildendem Schritt können Modultreiber, also technische oder produktstrategische Gründe für die Bildung von Modulen innerhalb der Produktstruktur, eingesetzt werden, um die Potentiale der einzelnen Produktlebensphasen auszuschöpfen [5]. Auch die R-Imperative der Kreislaufwirtschaft können als Modultreiber verstanden werden [21]. Beispielsweise wird die Reparierbarkeit des Produktes weiter fokussiert, indem Komponenten identifiziert werden, deren Lebensende das Ende der Lebensdauer des gesamten Produkts markiert. Diese Komponenten sollten dann in ein Modul zusammengefasst werden, sodass sich der Reparaturaufwand auf dieses einzelne Modul beschränkt [21].

Um Nachhaltigkeit bei der Gestaltung der Produktarchitektur zu fokussieren, sollten zunächst die verschiedenen Ebenen der initialen Produktarchitektur mithilfe von Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren bewertet werden. Auf Basis dieser initialen Bewertung können dann nachhaltigkeitsorientierte Modultreiber abgeleitet werden. Über diese nachhaltigkeitsorientierten Modultreiber kann dann die Nachhaltigkeit im Rahmen der eigentlichen Modulbildung gezielt berücksichtigt und adressiert werden. Die neuen Produktarchitekturalternativen sollten anschließend wiederum mithilfe der Kriterien bewertet und verglichen werden. Herausfordernd bleibt bei der Erstellung der Alternativen das Abwägen zwischen verschiedenen Nachhaltigkeitskriterien, wenn diese gegenteilig beeinflusst werden.

4. POTENTIALE BIOBASIERTER MATERIALIEN

Um Materialien und Gestaltungskonzepte möglichst ganzheitlich hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewerten zu können, müssen wie oben beschrieben eine Vielzahl an Nachhaltigkeitskriterien und deren dazugehörige Indikatoren herangezogen werden. Um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, ist es von Bedeutung die betrachteten Strukturen vorab auszulegen. Um den Aufwand bei der Potentialabschätzung dabei gering zu halten, empfiehlt es sich, entsprechende Untersuchungen zunächst auf geringeren strukturellen Komplexitätsebenen durchzuführen. In BILD 2 ist ein Vorgehen zur Potentialabschätzung ökologischer Leichtbaustrukturen mit Einsatz biobasierter Materialien basierend auf der Produkt-Komponenten-Testpyramide [22] dargestellt. Dieses wird im Folgenden anhand vorläufiger Ergebnisse exemplarisch für die Potentialabschätzung von Flachsfasern in der Flugzeugkabine erklärt.

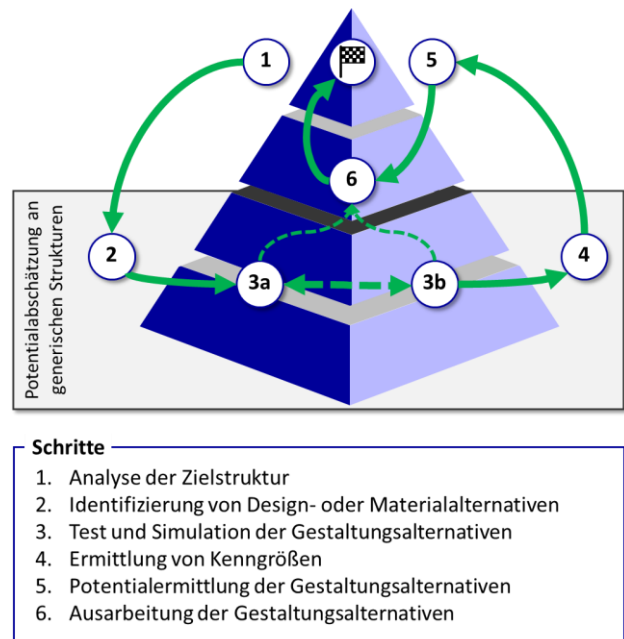


BILD 2. Vorgehen zur Potentialabschätzung des ökologischen Leichtbaus

Der erste Schritt des Vorgehens ist die Analyse der Zielstruktur, in der eine Substitution der aktuell eingesetzten Materialien oder Bauweise angestrebt wird. Die Zielstruktur kann dabei ein spezifisches Kabinenmonument, wie eine Galley oder Lavatory, eine einzelne Komponente, aber auch die komplette Flugzeug-Kabine sein, in der der Einsatz alternativer, nachhaltiger Bauweisen oder Materialien untersucht werden soll. In der Analysephase werden die aktuell eingesetzten Materialien und Bauweisen der Zielstruktur auf Nachteile und Optimierungspotentiale hinsichtlich der Nachhaltigkeit analysiert. Aber auch die zugrundeliegenden mechanischen und luftfahrtspezifischen Anforderungen müssen aufgenommen und analysiert werden, da diese gegebenenfalls eine Restriktion für den Einsatz alternativer, biobasierter Materialien darstellen können. Die Analyse kann dabei durch unterschiedliche Werkzeuge, wie Recherchen, Finite Elemente (FE)-Simulationen, vorläufige Life Cycle Assessment (LCA)-Analysen etc. unterstützt werden. Als Beispiel in diesem Beitrag wurde eine systematische Literaturrecherche zu aktuell eingesetzten Materialien in der Flugzeugkabine und deren Nachteilen hinsichtlich der Nachhaltigkeit durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in BILD 3 zusammengefasst. So werden aktuell in einer Vielzahl von Kabinenmonumenten Sandwichstrukturen mit Nomex®-Wabenkern und Glasfaserdeckschichten eingesetzt. Der Sandwichverbund führt aufgrund seiner guten gewichtsspezifischen Material- und Biegeeigenschaften zu einem geringen Gewicht der Kabinenkomponenten, welches sich positiv in der Nutzungsphase des Flugzeuges niederschlägt. In den anderen Lebensphasen hat die Sandwichbauweise jedoch einige Nachteile.

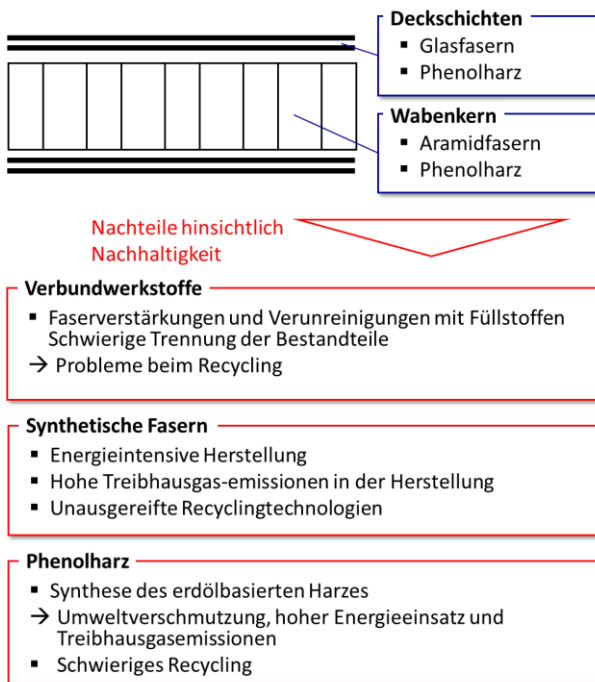


BILD 3. Nachteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit aktuell eingesetzter Sandwichstrukturen

In einem zweiten Schritt erfolgt daher die Identifizierung von Material- und Gestaltungsalternativen. Hierzu können bspw. gezielte Recherchen oder Marktanalysen eingesetzt werden. Mittels Literaturrecherche sind einerseits verschiedene biobasierte und thermoplastische Harzalternativen und andererseits verschiedene biobasierte Fasern als Alternative zu Glasfasern identifiziert worden. Da es sich bei den Matrix-Materialien primär um eine Materialsubstitution mit geringem Leichtbaupotential handelt, wurden nur die Fasermaterialien weiter betrachtet. Nach der Durchführung der systematischen Werkstoffauswahl nach Ashby [23] sind Flachsfasern als vielversprechendes biobasiertes Material ausfindig gemacht worden. In einer anschließend durchgeführten Marktanalyse wurde die Fa. Bcomp als Hersteller von Flachsfaser-Deckschichten identifiziert.

Da die Auslegung und Entwicklung großer Monumente oder Flugzeugkomponenten sehr aufwändig sind, erfolgt die Potentialabschätzung der ökologischen Leichtbaumaterialien zunächst produktunabhängig auf geringerer struktureller Komplexität anhand generischer Strukturen. Im dritten Schritt des Vorgehens werden die verschiedenen Gestaltungs- und Materialalternativen physischen Tests und Simulationen unterzogen. Diese Auslegung dient dazu, die Strukturen vor der Ermittlung verschiedener Kenngrößen vergleichbar zu machen, da bspw. das Gewicht eine bedeutende Rolle bei der LCA spielt und auch andere Kenngrößen erst nach vorheriger Dimensionierung ermittelt werden können. Da in vielen Kabinenmonumenten die Biegebelastung die auslegungskritische Belastung ist, sind im Rahmen der Untersuchung 4-Punkt Biegeversuche betrachtet worden. Der obere Auflagerabstand betrug dabei 60 mm, der untere Auflagerabstand 180 mm und der Auflagerdurchmesser 10 mm. Neben einem Referenzpaneel mit konventionell eingesetzten Sandwichmaterialien wurden vier verschiedene Paneel-Alternativen mit Flachsfaserkonstituenten betrachtet.

Neben der Substitution der Deckschichten wurde auch eine Kernalternative untersucht, bei der ein Faltkern aus Flachsfasern verwendet wird. Auch der Einfluss eines zusätzlich eingebrachten grobmaschigen Flachsfasergewebes an der Außenseite der Deckschichten zur Erhöhung der Biegesteifigkeit (powerRibs™ der Fa. Bcomp [24]) wurde untersucht. Die untersuchten Sandwichstrukturen sind in BILD 4 zusammengefasst. Die Kernhöhe der verschiedenen Paneele wurde bei der Auslegung konstant auf 20 mm gehalten und nur die Anzahl der Deckschichten variiert. Die Länge der Proben wurde jeweils auf 250 mm festgelegt, während die Breite der Proben 50 mm betrug. Die Auslegung erfolgte rein numerisch mit der FEM-Software Abaqus/Explicit, wobei die Anzahl der Deckschichten für jede Paneel-Variante sukzessive erhöht wurde. Die maximale Kraft und die Steifigkeit wurden aus dem jeweiligen Kraft-Weg-Diagramm ermittelt, was ebenfalls in BILD 4 dargestellt ist. Die Materialparameter für die Simulation der konventionellen Sandwichmaterialien wurden von Seemann [25] übernommen, wobei der Kern als 3D-Kontinuumsmodell modelliert wurde. Für die Flachsbestandteile wurden Datenblätter des Herstellers Bcomp [26] verwendet. Da sich der Flachsfaser-Faltkern noch in der Entwicklung befindet, waren keine validen Materialdaten verfügbar. Daher wurden die mechanischen Eigenschaften des Nomex®-Wabenkerns übernommen, wobei der mechanische Einfluss des Kerns im gewählten Auslegungsfall als gering angenommen wird. Die Einflüsse auf die anderen Lebensphasen des neuen Flachsfaserkerns können jedoch in der nachfolgenden Kenngrößenermittlung berücksichtigt werden.

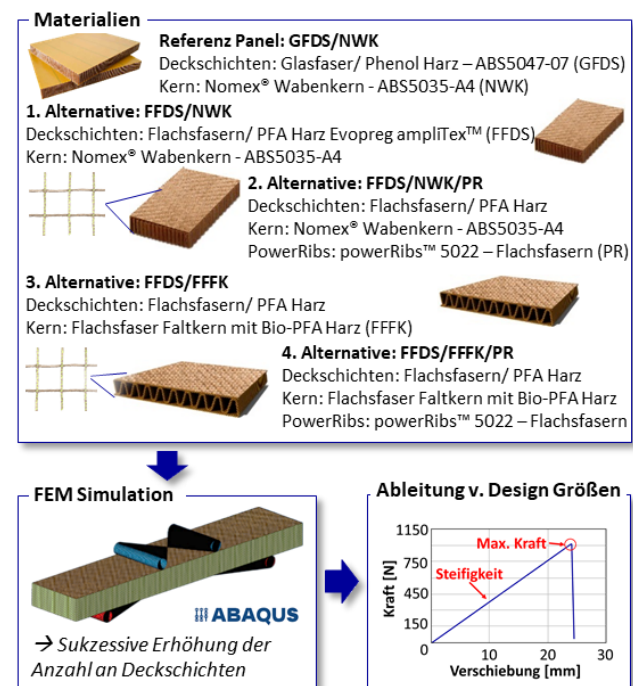


BILD 4. Materialien, Aufbau der FE-Modelle und Ableitung von Auslegungsgrößen

Die maximalen Kräfte und Steifigkeiten, die für die verschiedenen Sandwichkonfigurationen und die Anzahl der Deckschichten ermittelt wurden, wurden in ein Diagramm umgewandelt, das in BILD 5 dargestellt ist.

Nach Angabe einer erforderlichen Kraft und Mindeststeifigkeit kann das Diagramm direkt zur Bestimmung der Anzahl der für die jeweilige Sandwichkonfiguration erforderlichen Deckschichten verwendet werden. Für das Beispiel in der Abbildung, bei dem eine Mindestkraft von 1200 N und eine Mindeststeifigkeit von 600 N/mm erforderlich ist, bedeutet dies, dass für das Referenzpaneel fünf Deckschichten erforderlich sind, während für die erste und dritte Alternative drei Deckschichten und für die zweite und vierte Alternative nur zwei Deckschichten erforderlich wären. Diese Informationen aus dem Entwurf dienen als Input für den nächsten Schritt des Vorgehens.

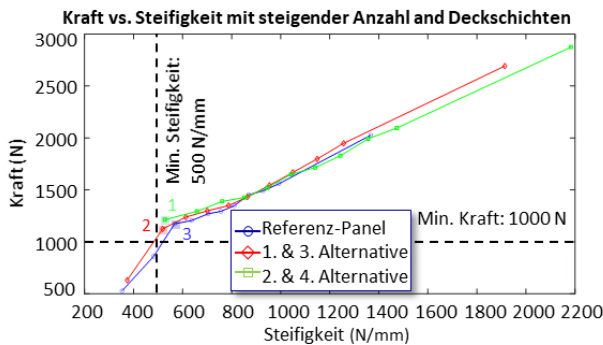


BILD 5. Kraft-Steifigkeitsdiagramm unterschiedlicher Sandwichstrukturen

Im vierten Schritt erfolgt nun die Ermittlung verschiedener Kenngrößen. In Hinblick auf die Nachhaltigkeit existiert eine Vielzahl an Kriterien und Indikatoren, die teilweise unterschiedlichen SDGs zuzuordnen sind. Um die Nachhaltigkeit und seine Dimensionen möglichst ganzheitlich zu erfassen und bewerten zu können, sollten in diesem Schritt möglichst viele dieser Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren ermittelt werden. Jedoch kann in der vorliegenden Entwicklungsphase auf einige Indikatoren kein Einfluss genommen werden kann, da diese bspw. erst im Rahmen der Beschaffung festgelegt werden oder bereits durch die Produktarchitektur determiniert wurden. Die Auswahl der zu bewertenden Kriterien sollte daher spezifisch je nach Problemstellung, Möglichkeiten der Beeinflussung im Rahmen der aktuellen Entwicklungsphase sowie Datenverfügbarkeit erfolgen. In diesem Beitrag werden als Kenngrößen einerseits die mechanischen Kenngrößen und Gewichte als Ergebnis der FE-Simulationen und andererseits die CO₂-Äquivalente als Ergebnis einer LCA-Studie ermittelt. Ökonomische Kenngrößen oder auch Indikatoren für die Recyclierbarkeit könnten nach der Leichtbau-Auslegung ebenfalls grob abgeschätzt werden, lagen jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht vor. Für die konkreten Ergebnisse aus der Ökobilanzierung wird auf das Kapitel 5 verwiesen.

Im fünftten Schritt erfolgt die Potentialabschätzung der ökologischen Material- und Gestaltungsalternativen. Hierfür können die ermittelten Kenngrößen bspw. analysiert und der konventionellen Gestaltungsweise gegenübergestellt werden. Diese geschaffene Datenbasis kann zur Wissensgenerierung genutzt werden und dient der Identifizierung möglicher Anwendungen der Materialalternativen und dem Treffen fundierter Entscheidungen. Gerade bei der Entwicklung nachhaltiger Produkte kann es jedoch auch zu Zielkonflikten kommen, bei denen durch den Einsatz eines Materials oder einer

Bauweise verschiedene Zielgrößen bzw. Kenngrößen, wie das Gewicht, zwar positiv, andere Kenngrößen, wie die Recyclierbarkeit, jedoch negativ beeinflusst werden. In diesem Fall eignen sich Multi Criteria Decision Making (MCDM)-Methoden, um die unterschiedlichen Kriterien vor der Entscheidungsfindung zu gewichten und sich für oder wider der Materialalternative zu entscheiden.

Könnte das grundsätzliche Potential der Materialalternative nachgewiesen werden, erfolgt im sechsten Schritt die Ausgestaltung der Zielstruktur. Hierbei kann zunächst auf den Ergebnissen aus den unteren Komplexitätsebenen aufgebaut und anschließend nach dem Building-Block Approach sukzessive vorgegangen werden. Durch begleitende Simulationen und Experimente sollten hierbei regelmäßige Überprüfungen und Re-Evaluationen durchgeführt und die Ergebnisse aus den unteren Ebenen verifiziert werden, um produktspezifische und skalenbedingte Einflüsse in der Nachhaltigkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

5. ÖKOBLANZIERUNG

Folgend werden die im Rahmen von Schritt vier des vorgestellten Vorgehens durchgeführten Ökobilanzierungen vorgestellt. Ziel dieser Ökobilanzierungen ist der Vergleich verschiedener Sandwichelemente (vergleichende Ökobilanz). Da dieser Vergleich ganzheitlich, unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus erfolgen soll, wird ein Cradle-to-Grave-Ansatz verfolgt (vgl. [27],[25]). Für die verschiedenen Gestaltungsweisen werden entsprechend neben der Herstellung der jeweiligen Paneele auch die Rohstoffgewinnung, die Transportwege zwischen den verschiedenen Lebensphasen, die Nutzungsphase in Form des hier verursachten Kerosinverbrauchs sowie die Entsorgung nach erfolgter Nutzung berücksichtigt. Um dem luftfahrtspezifisch hohen Einfluss der Nutzungsphase Rechnung zu tragen, ist die funktionale Einheit die fiktive Nutzung jedes untersuchten Paneels als Teil eines Flugzeugkabinenelements. Hierfür wird eine Nutzung über 7 Jahre im Mittelstreckenbetrieb angenommen. Wartungs- oder Instandhaltungsaufwände werden für die Paneele nicht berücksichtigt, da es sich um einfache Strukturbauteile handelt.

Zur Abschätzung der Auswirkungen von Emissionen wird der Indikator „Global Warming Potential“ (GWP) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit einem Zeithorizont von 100 Jahren verwendet [28].

Da es sich bei den untersuchten alternativen Gestaltungskonzepten um neue, alternative Werkstoffe handelt, sind zur Erstellung der Sachbilanz Recherchen und Annahmen hinsichtlich der Herstellung der Werkstoffe sowie der Fertigung der Paneele erforderlich, da im Bereich der alternativen Werkstoffe kein industrieller Fertigungsprozess existiert, der mit dem des Referenzpaneels vergleichbar ist. In diesem Fall wurde für die Herstellung die Annahme getroffen, dass die Paneele in den Laboren der TUHH hergestellt wurden. Einige Rohstoffdaten können direkt der Ecoinvent-Datenbank entnommen werden (z.B. Glasfasern), für andere Materialien, z.B. Aramidfasern oder das biobasierte PFA-Harz, sind in der Ecoinvent-Datenbank zum Zeitpunkt der Untersuchung keine Daten enthalten, sodass auf Werte für andere, ähnliche Verfahren oder die Recherche von Werten aus der vorhandenen Literatur zurückgegriffen werden muss. Auch mit den Herstellern wurde Kontakt aufgenommen. Da sich die alternativen Materialien jedoch

noch in der Entwicklung befinden, konnten auch auf diesem Weg keine konkreten Werte zu Ökobilanzen oder zur Produktion ermittelt werden.

In BILD 6 sind für die 5 untersuchten Paneele die Verhältnisse GWP 100-Werte aufgeführt. Wie zu sehen erzeugt für den hier untersuchten Lastfall das Referenzpaneel die meisten Emissionen, gefolgt von den Alternativen eins und drei. Die Alternativen mit den geringsten Emissionen sind hier die Alternativen zwei und vier jeweils mit einer Verstärkung aus powerRibs [19].

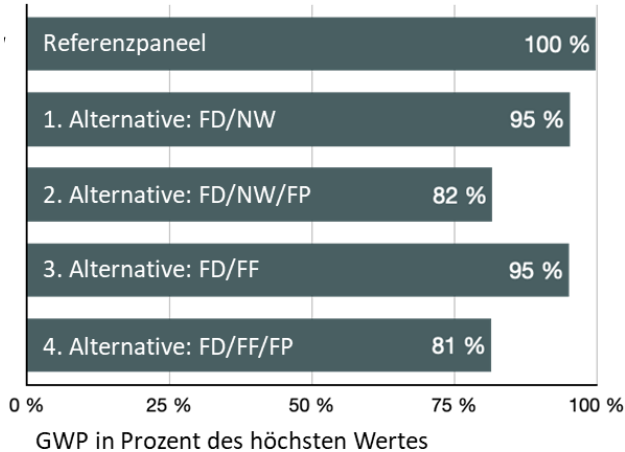


BILD 6. GWP 100 der alternativen Paneele

Hinsichtlich der Verteilung der Emissionen über die verschiedenen Lebensphasen zeigt sich, wie in BILD 7 zu erkennen, dass der mit Abstand größte Anteil der Emissionen mit 98 bis 99 % in der Nutzungsphase durch den Kerosinverbrauch verursacht wird. Entsprechend ist also das Gewicht der Alternativen der maßgeblichste Einflussfaktor hinsichtlich der Nachhaltigkeit.

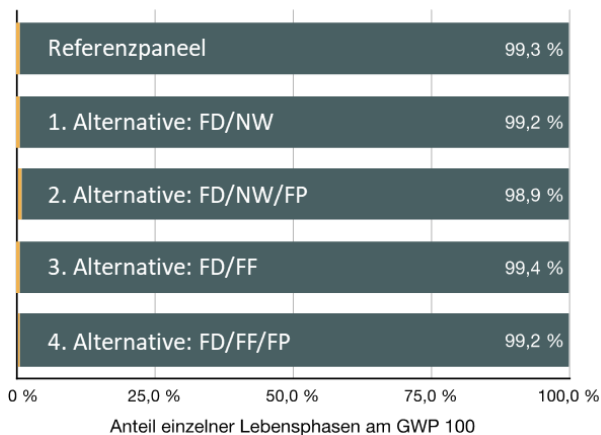


BILD 7. Beitrag der Lebensphasen an den Gesamtemissionen

Für die potentielle Ableitung allgemeingültiger Aussagen für die verschiedenen Alternativen, wurden auch für die anderen in BILD 5 dargestellten Lastkombinationen bzw. die entsprechenden Deckschichtzahlen der Alternativen die Ökobilanzierungen durchgeführt. Diese führen zu dem Ergebnis, dass keine allgemeingültige Aussage im Sinne einer grundsätzlich besseren Eignung einer der untersuchten Alternativen möglich ist. Vielmehr sind das Gewicht und damit auch die Nachhaltigkeit abhängig von der jeweils erforderlichen Last und Steifigkeit. Für verschiedene Lastpunkte variiert also im untersuchten Fall

die jeweils leichteste Alternative.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag werden Potenziale zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Flugzeugkabine untersucht. Hierzu wird einerseits darauf eingegangen, wie sich die Nachhaltigkeit auf Ebene der Produktarchitektur adressieren lässt, andererseits untersucht, wie sich auf Komponentenebene der Einsatz alternativer Materialien in der Kabine auswirkt und frühzeitig abgeschätzt werden kann.

Für die Gestaltung der Produktarchitektur wurde gezeigt, dass zunächst die verschiedenen Ebenen der modularen Architektur mithilfe von Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren bewertet werden sollten. Darauf basierend können anschließend nachhaltigkeitsorientierte Modultreiber eingesetzt werden, um Nachhaltigkeit auch im modulbildenden Schritt zu fokussieren. Herausfordernd bleibt bei der Erstellung von Produktarchitekturkonzepten das Abwägen von Zielkonflikten unter den Nachhaltigkeitskriterien.

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Einsatzes alternativer Materialien, wurde ein generischer Lastfall definiert, und für diesen ein herkömmliches Glasfaserpaneel als Referenz, sowie vier alternative Paneele aus Kombinationen herkömmlicher und alternativer Materialien ausgelegt. Daran anschließend wurden die fünf Paneele hinsichtlich ihrer Ökobilanz über den ganzen Lebenszyklus analysiert.

Bei der Ökobilanzierung stellte sich eine mangelnde Datenverfügbarkeit, insbesondere hinsichtlich der alternativen Materialien, beispielsweise des Flachses, als Hürde heraus. Für die Ökobilanzierung wurde für die Fertigung eine manuelle, wenig automatisierte Fertigung für alle Alternativen angenommen. Zudem mussten für die Herstellung der alternativen Materialien ebenfalls Literaturwerte verwendet und Annahmen getroffen werden, da hier keine Datenbankwerte, wie beispielsweise für Glasfaser verfügbar waren. Mit fortschreitender Industrialisierung auch der Herstellung alternativer Materialien sollte hier entsprechend ein erneuter Vergleich hinsichtlich der Nachhaltigkeit erfolgen. Für die Auslegung der alternativen Bauweisen wurde zudem teilweise auf Datenblattwerte zurückgegriffen, welche in weitere Forschung durch Test verifiziert werden sollen und teilweise bereits werden. Zudem ist die Untersuchung weiterer Lastfälle erforderlich, um ein ganzheitliches Bild über mögliche Vorteile und Nachteile der alternativen Materialien zu erlangen.

Danksagung

Die vorgestellten Forschungsergebnisse sind der Teil des Forschungsprojektes: RECab - Resource Efficient Cabin. Das Projekt ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LUFO VI-2). Förderkennzeichen: 20K2103E

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutzaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Aerospace, Security and Defence Industries Association of Europe. 2022 Facts & figures. Aufgerufen 21 November 2023, https://www.asd-europe.org/sites/default/files/2022-11/ASD_Facts%20%26%20Figures%202022.pdf
- [2] Europäische Kommission, Generaldirektion Mobilität und Verkehr und Generaldirektion Forschung und Innovation, Flightpath 2050 : Europe's vision for aviation : maintaining global leadership and serving society's needs, Publications Office, 2012, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/15458>
- [3] BDLI – Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie: The role of cabin and cargo for sustainable aviation. Abgerufen 21 November 2023
- [4] Franz Josef Radermacher: Nachhaltigkeit, in: S. Vajna (Hrsg.), Integrated Design Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, https://doi.org/10.1007/978-3-642-41104-5_8
- [5] Krause, D., Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln. Berlin: Springer Vieweg; 2018.
- [6] Sonogo, M., Echeveste, M., Debarba, H.: The role of modularity in sustainable design. A systematic review. Journal of Cleaner Production, Vol. 176, pp 196-209, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106>
- [7] Bachmann, J., Hidalgo, C., Bricout, S., Saul: Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review, Sci China Tech Sci, Vol. 60, pp 1301–1317, 2017, <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9094-y>
- [8] Gomez-Campos, A., Vialle, C., Rouilly, A., Hamelin, L., Rogeon, A., Hardy, D., Sablayrolles, C.: Natural Fibre Polymer Composites – A game changer for the aviation sector?, Journal of Cleaner Production, Volume 286, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124986>
- [9] Vidal, R., Moliner, E., Martin, P.P., Fita, S., Wonneberger, M., Verdejo, E., Vanfleteren, F., Lapena, N., Gonzalez: A Life Cycle Assessment of Novel Aircraft Interior Panels Made from Renewable or Recyclable Polymers with Natural Fiber Reinforcements and Non-Halogenated Flame Retardants. Journal of Industrial Ecology, Vol. 22, Issue 1, pp 132-144, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12544>
- [10] Bachmann J, Yi X, Tserpes K, Squazzo C, Barbu LG, Tse B, Soutis C, Ramón E, Linuesa H, Bechtel S.: Towards a Circular Economy in the Aviation Sector Using Eco-Composites for Interior and Secondary Structures. Results and Recommendations from the EU/China Project ECO-COMPASS. Aerospace. 2021; 8(5):131. <https://doi.org/10.3390/aerospace8050131>
- [11] Jerrin, T.V., N.S. Sarath, R., Godwin, J.: Development of biodegradable composites and investigation of mechanical behaviour, Materials Today: Proceedings, Volume 38, Part 5, Pages 3378-3385, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.478>
- [12] Atmakuri A, Palevicius A, Vilkauskas A, Janusas G.: Review of Hybrid Fiber Based Composites with Nano Particles—Material Properties and Applications. Polymers. 2020; 12(9):2088. <https://doi.org/10.3390/polym12092088>
- [13] Debanan, B., Dhar, N.R.: Selection of the natural fiber for sustainable application in aerospace cabin interior using Fuzzy MCDM model, Materialia, Vol. 21, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101270>
- [14] Pickering, K.L., Aruan Efendy, M.G., Le, T.M.: A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 83, pp 98-112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- [15] Eric, R., Carmen, S., Pedro M.G.O., M.: „A Review of Recent Research on Bio-Based Epoxy Systems for Engineering Application and Potentialities in the Aviation Sector“, Barcelona, Spain, 2018. <https://doi.org/10.3390/aerospace5040110>
- [16] Xiao-Su, Y., Xvfeng, Z., Fangbo, D., Jianfeng, T.: „Development of Bio-Sourced Epoxies for Bio-Composites“, Ningbo 315100, China, 2018. <https://doi.org/10.3390/aerospace5020065>
- [17] Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T., Stark, R.: A systematic literature review on modular product design, Journal of Engineering Design, 27:7, 488-514, <https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482>
- [18] Singh, R. K., Murty, H.R., Gupta, S.K., Dikshit, A.K.: „An overview of sustainability assessment methodologies“, Ecological Indicators, Volume 9, Issue 2, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.05.011>
- [19] Wehrend, S., Schwan, L., Zumach, K., Krause, D.: „Towards a holistic approach to increase sustainability in aircraft cabin design“, 34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2024), Florenz, Italia, 2024. <https://doi.org/10.15480/882.13645>
- [20] Konietzko, J., Bocken, N., Hultink, E.: A Tool to Analyze, Ideate and Develop Circular Innovation Ecosystems. Sustainability 2020, 12(1), 417-456, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12010417>
- [21] Breimann R., Rennpferdt C., Wehrend S., Kirchner E., Krause D.: Exploiting the sustainability potential of modular products by integrating R-Imperatives into product life phases. Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED23), Bordeaux, pp 1785-1794, 2023. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.179>
- [22] Schwan, L.; Hüttich, P.; Wegner, M; Krause, D.: Procedure for the transferability of application-specific boundary conditions for the testing of components and products, Proceedings of the 32nd

Symposium Design for X (DFX2021), Tutzing, Germany, 27-28 September 2021.
<https://doi.org/10.35199/dfx2021.04>

- [23] Ashby, M.F.: „Material Selection in Mechanical Design“, Butterworth-Heinemann, 2011, ISBN: 978-1-85617-663-7. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-25539-5>
- [24] Bcomp. powerRibs - Natural fibre reinforcement grid for high performance. Accessed 15 May 2024, <https://www.bcomp.com/products/powerribs/>
- [25] Seemann R.: A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 2020.
- [26] Bcomp. Sustainable Lightweighting to Decarbonise the World. Accessed 15 May 2024, <https://www.bcomp.com/>
- [27] Klöpffer, W., Grahl, B.: Life Cycle Assessment (LCA) A Guide to Best Practice, Wiley, 2014.
- [28] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) 'Annex VII: Glossary', in Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, S. 2215–2256