

**Entwicklung eines ganzheitlichen Kabinenkonzepts zur
effizienten Energie- und Ressourcennutzung in der
Flugzeugkabine**

RECab

- Resource Efficient Cabin -

Verbundprojekt unter der Führung von

Lufthansa Technik AG



Lufthansa Technik

mit den Partnern

Technische Universität Hamburg, Diehl Aviation Hamburg, Diehl Aviation Gilching, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im
Rahmen des sechsten nationalen Luftfahrtforschungsprogramms

(LuFo VI-2)

Förderkennzeichen: 20K2103E

Abschlussbericht der
Technischen Universität Hamburg

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger	Technische Universität Hamburg		
Förderkennzeichen	20K2103E	Laufzeit	01.07.2022 – 30.09.2025
Berichtszeitraum	01.07.2022 – 30.09.2025		
Erstellt von	Lukas Schwan, M. Sc. Sven Wehrend, M. Sc. Katharina Zumach, M. Sc.	Datum	26.03.2026

Hamburg, 26.03.2026

.....

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

.....

Lukas Schwan, M. Sc.

.....

Sven Wehrend, M. Sc.

.....

Katharina Zumach, M. Sc.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen unter denen der FE-Auftrag durchgeführt wurde	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4	Wissenschaftlicher Stand.....	7
1.4.1	Ökologische Potenziale in der Produktentwicklung	7
1.4.2	Ökologische Produktbewertung (Life Cycle Assessment)	8
1.4.3	Ökoeffizienz in bestehenden Entwicklungsmethoden	8
1.4.4	Leichtbau in Kombination mit Modularisierung.....	9
1.4.5	Qualitative Datenerhebung	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2	Technischer Bericht	11
2.1	AP 1.1: Entwicklung eines ganzheitlichen Kabinen-Konzeptes der Zukunft.....	11
2.2	AP 1.2: Konzeption nachhaltiger Service-Module für ressourcensparende On-Board-Services	12
2.3	AP 1.3: Nachhaltigkeit trifft Design – Anwendungsbezogene Technologieentwicklung..	16
2.4	AP 3.1: Kontinuierliche Technologiewalidierung und Erprobung	28
2.4.1	Herausforderungen bei der Adressierung von Nachhaltigkeit.....	28
2.4.2	Auswahl einer Erhebungsmethode	29
2.4.3	Konzeption des Interviewleitfaden für Experteninterviews	30
2.4.4	Durchführung der Experteninterviews für die Fallbeispiele	31
2.4.5	Auswertung der Experteninterviews	31
2.4.6	Fazit zur kontinuierlichen Technologiewalidierung.....	33
2.5	AP 3.3: Analysen und Auswertungen zu einem klimaneutralen Produktlebenszyklus	34
2.5.1	Analysen und Auswertung der Verwendung alternativer Materialien	34

2.5.2	Analysen und Auswertungen der Grauwasserwiederverwendung.....	36
2.5.3	Tool zur vereinfachten Abschätzung von Emissionen in frühen Entwicklungsphasen	39
2.5.4	Erweiterung des Wirkmodells modularer Eigenschaften	41
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	43
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	44
5	Nutzen/Verwertbarkeit	44
6	Fortschritt anderer Stellen	44
7	Veröffentlichungen, Vorträge	44
7.1	Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts	45
7.2	Studentische Arbeiten	45
7.3	Vorträge und weitere Einbindung in die Lehre.....	46
7.4	Zwischenberichte im Projekt RECab	46
8	Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur	47

1 Zusammenfassung

Im Folgendem werden die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, die Planung und der Ablauf sowie der wissenschaftliche und technische Stand als auch die Zusammenarbeit mit anderen Stellen im Projekt erläutert.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) im Projekt RECab war und ist es, die Ressourceneffizienz von modularen Flugzeugkabinenkonzepten systematisch abzuschätzen und zu optimieren. Dabei soll eine ganzheitliche Betrachtung des Produktlebenszyklus in der Luftfahrt erfolgen, um durch Modularisierung und Leichtbau ökologische Potenziale auszuschöpfen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Abschätzung von Einsparpotenzialen hinsichtlich Zeit, Kosten, Flexibilität, Qualität und Umweltauswirkungen. Die Aufgabenstellung gliedert sich in mehrere zentrale Schwerpunkte innerhalb der Arbeitspakete HAP 1 und HAP 3.

Im Arbeitspaket HAP 1 liegt die Aufgabe darin, neue modulare Kabinenkonzepte zu entwickeln. In AP 1.1 sollen dafür gemeinsam mit den Projektpartnern Anforderungen systematisch analysiert sowie zukunftsweisende, variantengerechte Konzeptalternativen ausgewählt und weiterverfolgt werden. Aufbauend darauf ist es angestrebt, nachhaltige Service-Module unter Anwendung und Weiterentwicklung des *Integrierten PKT-Ansatzes* zu konzipieren (AP 1.2). Hierbei sollen gezielt Nachhaltigkeitsaspekte fokussiert und modulare Vorschläge entworfen werden. Besonderer Wert soll auf eine hohe Standardisierung innerhalb der Produktfamilien gelegt werden, um durch eine verringerte Anzahl unterschiedlicher Komponenten Ressourceneinsparungen und eine Wiederverwendung beziehungsweise -verwertung zu ermöglichen. Parallel dazu ist es Aufgabe in AP 1.3, den Fokus auf die Erforschung und Entwicklung ökoeffizienter Leichtbaukonzepte zu legen.

Zeitgleich soll im Arbeitspaket HAP 3 eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus erfolgen. Anstelle einer ursprünglichen Marktvalidierung solle die Technologievalidierung mithilfe einer Datenerhebungsmethode unterstützt werden, um ein umfassendes Bild der im Projekt entwickelten Konzepte und zugrundeliegenden Technologien zu erlangen (AP 3.1). Ergänzend dazu ist geplant, in AP 3.3 den Produktlebenszyklus umfassend hinsichtlich der Ökobilanzierung zu analysieren. Das bereits bestehende Wirkmodell modularer Produktstrukturen soll um nachhaltigkeitsrelevante Aspekte erweitert werden, um die ökologischen Effekte einzelner Konzeptalternativen fundiert bewerten zu können. Diese neuen Aspekte sollen zudem in das SysML-basierte Wirkmodell integriert werden, das eine transparente Verknüpfung der Auswirkungen auf klassische Zielgrößen wie Zeit, Kosten, Flexibilität und Qualität sowie auf Nachhaltigkeitsaspekte ermöglicht. Durch eine konsistente und nachhaltige Datenspeicherung soll die Abschätzung von Nachhaltigkeitsauswirkungen für aktuelle und zukünftige Maßnahmen vereinfacht und die Umweltwirkungen während der Produktentstehung nachvollziehbar gemacht werden.

Mit dieser Aufgabenstellung verfolgt das PKT das Ziel, innovative und nachhaltige Flugzeugkabinenkonzepte zu entwickeln sowie deren Umweltbilanz und Wirtschaftlichkeit umfassend zu optimieren und zu bewerten.

1.2 Voraussetzungen 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 Kom-

petenzen 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.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Gesamtprojektplan des Projekts RECab ist in Abbildung 1 dargestellt. Das PKT ist an den APs 1.1, 1.2, 1.3 sowie 3.1 und 3.3 beteiligt, die in der Abbildung grün hervorgehoben sind. Das Projekt hat am 01.07.2022 begonnen, wobei das Teilprojekt der TUHH im Forschungsverbund nach einer vom Projektträger genehmigten Laufzeitanpassung am 30.09.2025 geendet hat. Diese Anpassung dient dazu, Verzögerungen bei der Personalrekrutierung sowie die Elternzeit eines Projektbearbeiters auszugleichen. Der Zeitplan des TUHH-Teilvorhabens ist in Abbildung 2 dargestellt.

Projektstrukturplan: RECab, FKZ: 20K2103A

PM: Projektmanagement
 HAP: Hauptarbeitspaket
 AP: Arbeitspaket
 UA: Unterauftragnehmer

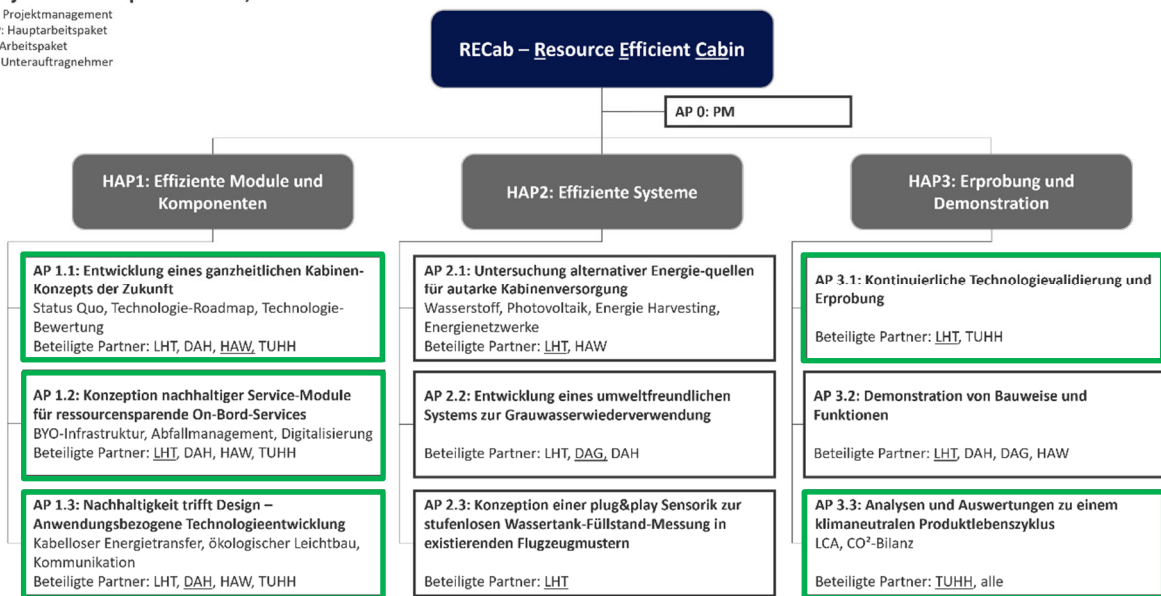


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete im Projektstrukturplan mit farblicher Kennzeichnung (grün) der Pakete mit Beteiligung der TUHH

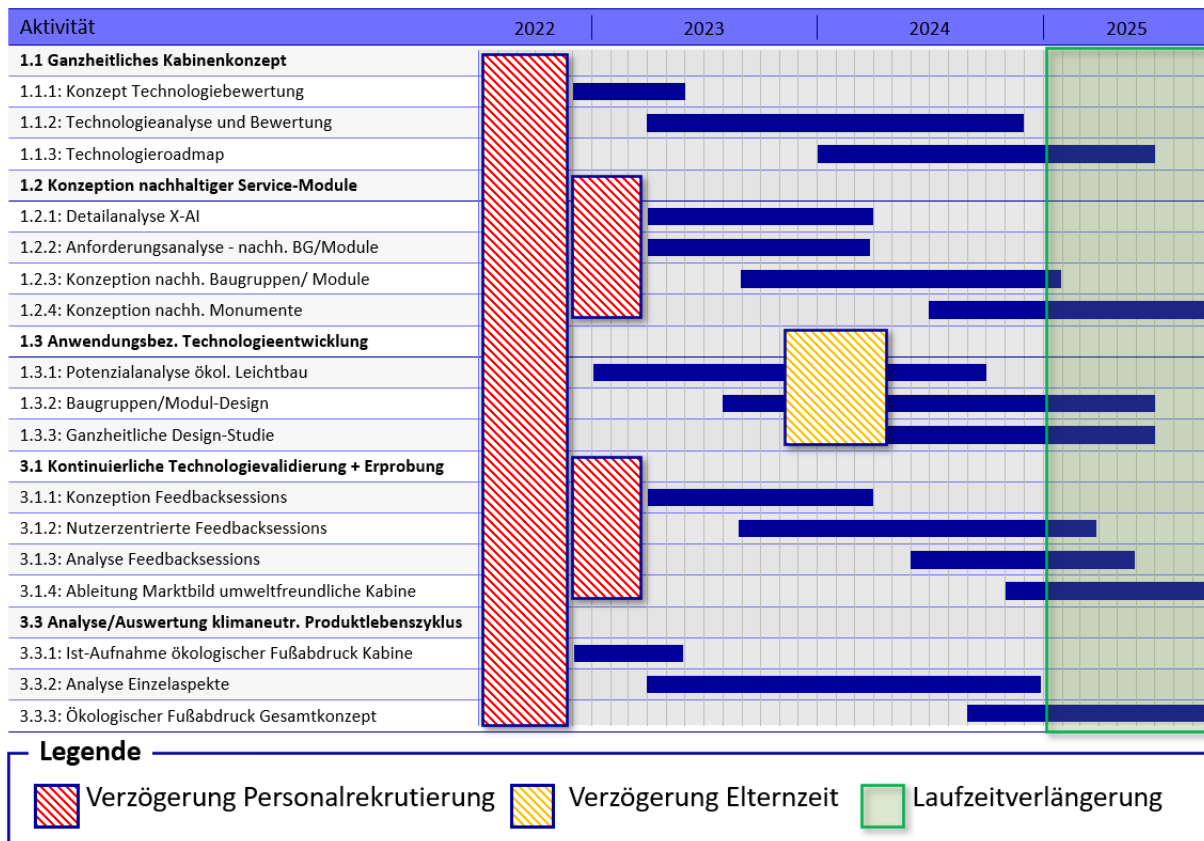


Abbildung 2: Zeitplan des Teilvorhabens der TUHH

1.4 Wissenschaftlicher Stand

Im Folgenden wird der zu Projektbeginn vorliegende Stand der Wissenschaft und Technik sowie die Patentsituation als Ausgangsbasis für die Projektbearbeitung dargestellt.

1.4.1 Ökologische Potenziale in der Produktentwicklung

Unternehmen, die Nachhaltigkeit erfolgreich umsetzen, integrieren entsprechende Informationen bereits in die frühe Produktentwicklung. Dies ermöglicht vorausschauenden Umweltschutz und ist wirksamer als nachgelagerte End-of-Pipe-Maßnahmen [Lut06]. Die Produktentwicklung besitzt das größte Einflusspotenzial auf die Nachhaltigkeit eines Produktes, da hier zentrale Eigenschaften festgelegt werden und damit ein Großteil der späteren Umweltwirkungen bestimmt wird [Pon11]. Es wird angenommen, dass sich die Beeinflussbarkeit der Umweltbelastungen analog zur Kostenbeeinflussung verhält, sodass bis zu 80 % der Umweltauswirkungen bereits in dieser Phase bestimmt werden können [Her10], [Yan06].

Ein nachhaltiges Produktdesign beeinflusst zudem Produktion, Nutzungsdauer, Reparaturfreundlichkeit sowie Demontage- und Recyclingfähigkeit [Wal10]. Daher sollten ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen frühzeitig antizipiert werden, um spätere Folgekosten und Belastungen zu vermeiden [Het13]. Dies ist jedoch herausfordernd, da in frühen Entwicklungsphasen häufig Informationen fehlen und daher Nachhaltigkeitswirkungen schwer bestimmbar sind [Kae03], [Pon11], [Het13].

Da Maßnahmen über die Lebensphasen hinweg miteinander verknüpft sind und ganzheitlich betrachtet werden müssen, können höhere Aufwände oder Umweltwirkungen zu Beginn (z. B. hochwertigere Materialien, modulare Konstruktionen) im weiteren Lebenszyklus geringere Belastungen und Kosten bewirken [Wal10]. Eine Bilanzierung über alle Lebensphasen ist daher unbedingt notwendig.

1.4.2 Ökologische Produktbewertung (Life Cycle Assessment)

Für die ökologische Bewertung von Produkten hat sich die Ökobilanz (Engl. *Life Cycle Assessment* (LCA)) etabliert. Sie betrachtet die Umweltwirkungen eines Produkts über den gesamten Lebenszyklus hinweg und ist in den Normen ISO 14040 und ISO 14044 verankert [Kl09]. Ökonomische und soziale Aspekte gehören nicht zum Standardumfang, können aber über ergänzende Methoden einbezogen werden [ISO06a].

Eine LCA verläuft grundsätzlich iterativ und umfasst die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung sowie die abschließende Auswertung [ISO06a], [Kl09]. Wird auf die Wirkungsabschätzung verzichtet, handelt es sich um eine Sach-Ökobilanz (LCI Study) [ISO06a].

Zu Beginn werden Zweck, Zielgruppe und Systemgrenze definiert, ebenso die funktionelle Einheit als Referenzgröße für die späteren Bilanzierungen. In diesem Schritt werden zudem Anforderungen an Datenqualität, Allokationsmethoden und Wirkungskategorien festgelegt. Anschließend folgt die Sachbilanz, in der alle relevanten Material- und Energieflüsse eines Produktsystems erfasst und bilanziert werden. Die Wirkungsabschätzung ordnet diese Daten geeigneten Wirkungskategorien zu und bewertet die potenziellen Umweltwirkungen. Optionale Schritte wie Normalisierung oder Gewichtung sind nur unter bestimmten Bedingungen zulässig. Den Abschluss bildet die Auswertung, in der Ergebnisse zusammengeführt und Empfehlungen im Einklang mit dem ursprünglichen Untersuchungsziel formuliert werden [ISO06a].

Die Normen beschreiben darüber hinaus Anforderungen an die Berichterstattung und an die kritische Prüfung einer LCA. Unterstützt wird der Prozess durch etablierte Softwarelösungen wie SimaPro¹, Umberto² oder LCA For Experts³ sowie durch Datenbanken, wie Ecoinvent oder BUWAL 250 [Her10], [Wal10].

1.4.3 Ökoeffizienz in bestehenden Entwicklungsmethoden

Bisherige Projekte zur Öko- und Ressourceneffizienz konzentrieren sich überwiegend auf die Bilanzierung einzelner Produkte und darauf, deren Nachhaltigkeit unabhängig von Varianten innerhalb einer Produktfamilie zu verbessern. Häufig liegen die Schwerpunkte dabei entweder auf Ökoeffizienz oder auf Modularisierung. So untersucht das Projekt MaRes⁴ Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz, entwickelt entsprechende Strategien und führt wirtschaftliche Wirkungsanalysen durch

¹ PRé Sustainability, Amersfoort: <https://simapro.com/>

² iPoint-systems GmbH, Reutlingen: <https://www.ipoint-systems.com/de/software/umberto/>

³ Sphera Solutions Inc., Chicago: <https://sphera.com/de/loesungen/life-cycle-assessment-software-and-data/lca-for-experts/>

⁴ MaRes, Materialeffizienz und Ressourcenschonung, Untersuchung von Stoffströmen, Branchen, Bedürfnisfeldern sowie Entwicklung von Strategien und Instrumenten, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und das Umweltbundesamt, Projekt-Nr. 3114, 3238, 3326, 3424, 3707, 7505.

[Wup12]. Das Projekt INAIN⁵ richtet den Blick auf nachhaltiges Wirtschaften im Innovationsprozess, berücksichtigt jedoch – wie MaRes – keine Produktvielfalt [TUD10]. Im Teilprojekt „Modularisierung“⁶ der ENPRO-Initiative⁷ ist ein Baukastensystem entwickelt worden, das Standardkomponenten für die Anlagenplanung bereitstellt und um ein Werkzeug zur Bewertung der Energieeffizienz ergänzt worden ist [EnE14].

Einen ersten Ansatz zur Konfiguration von nachhaltigen Produktfamilien liefern Kim und Moon [Kim17]. Sie modellieren Nachhaltigkeit mathematisch und entwickeln ein Optimierungsmodell, das die Verwendung recycelter Module unter Berücksichtigung räumlicher, funktionaler und schnittstellenbezogener Kompatibilitäten untersucht. Der Fokus bleibt dabei jedoch stark theoretisch und weist eine deutliche Distanz zur industriellen Praxis auf.

Insgesamt zeigt sich, dass die Kombination von Ökoeffizienz und Produktvielfalt bislang nur unzureichend erforscht ist [Son18]. Lediglich der Ansatz von Kim und Moon greift beide Themen auf, ohne jedoch die Gestaltung der Produktarchitektur oder die Integration der Produktfamilienperspektive in die Ökobilanzierung umfassend zu berücksichtigen. Gerade Letztere unterscheidet sich wesentlich von der häufig genutzten Worst-Case-Methodik der *Environmental Product Declarations* (EPD). Eine kombinierte Betrachtung von Produktvielfalt und Ökoeffizienz verspricht daher zusätzliche Einsparpotenziale, die über bestehende Methoden hinausgehen.

1.4.4 Leichtbau in Kombination mit Modularisierung

In der Luftfahrt hängt der Energiebedarf des Vortriebs und des Auftriebs unmittelbar von der zu bewegenden Masse ab. Daher bildet der Leichtbau zur Reduzierung des Eigengewichts von Flugzeugen und deren Komponenten ein zentrales ökonomisches Ziel [Kle13]. Unter dem Begriff Leichtbau werden verschiedene Prinzipien zusammengefasst, die zu Gewichtseinsparungen beitragen. Üblicherweise wird zwischen Spar-, Zweck- und Ökoleichtbau unterschieden [Kra18a], [Wie07]. Ein weit verbreitete Leichtbau-Gestaltungsweise ist das Sandwichprinzip, bei dem ein leichter Kern zwischen zwei steifen Deckschichten eingebettet wird. Diese Strukturform bietet günstige gewichtsspezifische Materialeigenschaften und findet daher in der Flugzeugkabine hohe Anwendung. Weitere Bauweisen unterscheiden sich durch ihre Trageigenschaften: Während Vollwandbauweisen Kräfte punktuell aufnehmen, verteilen Schalenbauweisen, wie sie etwa in modernen Flugzeugprimärstrukturen eingesetzt werden, die Lasten über Stringer und Spante auf eine größere Fläche [Kra18a].

Modulare Produktstrukturen können aufgrund standardisierter Schnittstellen zu Überdimensionierungen und damit zu zusätzlichem Gewicht führen [Kra18b]. Gleichzeitig ermöglicht die Modularisierung jedoch eine effiziente Gestaltung von Produktfamilien und unterstützt die vom Markt geforderte Variantenvielfalt. Der Leichtbau verfolgt hingegen das Ziel, einzelne Varianten möglichst gewichtsoptimiert auszulegen, weshalb Schnittstellen dort auf ein Minimum reduziert werden. Diese unterschiedlichen Zielrichtungen führen dazu, dass modulare Systeme zwar Skaleneffekte durch Wiederverwendung von

⁵ INAIN, Untersuchungen zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in Innovationsprozesse im Maschinen- und Anlagenbau Deutschlands, Zentrum für Produktionstechnik und Organisation und Zentrum für interdisziplinäre Technikforschung der Technischen Universität Dresden, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und VDI/VDE-IT, FKZ: 16I1586.

⁶ Modularisierung, Modular Equipment for Energy Efficient Production, Teilprojekt ENPRO 1.0, Evonik Industries AG, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik der TU Dortmund, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (iPAT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, Siemens, Planting, DBIC, Netzsch, LEWA, Benken, qonqave, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

⁷ ENPRO, Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung für die Chemische Industrie, Gesamtverbund bestehend aus Einzelverbundprojekten und einem durch die DECHEMA durchgeführten Koordinierungsvorhaben, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Modulen bieten, aber tendenziell schwerer ausfallen können, während leichtbauoptimierte Komponenten zwar leichter sind, jedoch oft nur für spezifische Belastungsfälle geeignet bleiben und höheren Erstellungsaufwand verursachen [Kra18a], [Han19].

Um die Vorteile beider Ansätze zu vereinen, wird am PKT der Modulare Leichtbau entwickelt. Dieser Ansatz kombiniert die effiziente Variantenbeherrschung der Modularisierung mit den Potenzialen zur Gewichtsreduktion aus dem Leichtbau. Das Ergebnis ist eine hybride Bauweise, die trotz modularer Struktur gewichtsoptimiert ausgelegt werden kann und damit eine ausgewogene Balance zwischen Flexibilität und Leichtbauperformance schafft [Hey20].

1.4.5 Qualitative Datenerhebung

Im Rahmen der Technologievalidierung soll ein umfassendes Bild der im Projekt entwickelten Konzepte und zugrundeliegenden Technologien generiert werden. Feedback lässt sich auf unterschiedliche Arten und Weisen einholen. Dies ist Teil der qualitativen Forschung, welche sich subjektiv und interpretativ mit vertieften Hintergrundinformationen zu Hypothesen und Theorien beschäftigt [Röb17]. Die Datenerhebung dazu kann beispielsweise durch Umfragen oder durch Interviews geschehen. Die Auswahl der Form der Datenerhebung hängt davon ab, welche Ausprägungen von Wissen abgefragt werden sollen [Bog14]. Mithilfe von Leitfäden und Konzepten lässt sich die Datenerhebung planen [Bog14, Küh09].

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Lufthansa Technik, Diehl Aviation Hamburg und Gilching sowie der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg wurde zusätzlich im Rahmen einer studentischen Arbeit mit der [REDACTED] [REDACTED] zusammengearbeitet. Durch regelmäßige Termine sowie auch Workshops ist ein guter Austausch mit den Projektpartnern sichergestellt worden.

2 Technischer Bericht

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten dargestellt und erläutert. Die durch die TUHH bearbeiteten Arbeitspakete sind folgend im Projektstrukturplan farblich gekennzeichnet. Im technischen Bericht werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeitspakete vorgestellt. Auf die Ergebnisse anderer Arbeitspakete, an denen die TUHH nicht beteiligt ist, wird, soweit nicht erforderlich, nicht eingegangen.

2.1 AP 1.1: Entwicklung eines ganzheitlichen Kabinen-Konzeptes der Zukunft

Im Projekt ist im Rahmen von AP 1.1 ein einheitliches, workshopbasiertes Vorgehen zur Entwicklung nachhaltiger Flugzeugkabinenkonzepte erarbeitet worden. Ziel ist es, einen gemeinsamen Handlungsrahmen für alle Projektpartner zu schaffen und ein einheitliches Verständnis von Nachhaltigkeit im Projektkontext zu etablieren. Hierzu sind zunächst Kriterien und Indikatoren zur Nachhaltigkeitsbewertung systematisch aus der Literatur gesammelt, analysiert und priorisiert worden. Aus über 140 Indikatoren, die den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zugeordnet sind, ist eine auf das Projekt zugeschnittene, reduzierte Auswahl von 24 relevanten Indikatoren definiert worden, die auch den UN Sustainable Development Goals zugeordnet worden ist.

In den Folgearbeiten im Jahr 2025 ist diese Auswahl weiter verfeinert und geclustert worden. Die Anwendbarkeit und Relevanz der Indikatoren sind geprüft worden, und es ist definiert worden, welche Daten und Informationen für deren Bewertung erforderlich sind. Zudem ist eine zeitliche Einordnung der relevanten Daten in die Phasen („Gates“) eines generischen Produktentwicklungsprozesses erfolgt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Luftfahrtspartner unterschiedliche Entwicklungsprozesse nutzen, was die Definition eines einheitlichen, luftfahrtspezifischen Entwicklungsprozesses erschwert. Dieses Thema wird in bilateralen Treffen der Industriepartner weiterverfolgt, während die wissenschaftliche Seite in AP 1.2 bestehende Ansätze und Tools zur Integration von Nachhaltigkeit in Produktentwicklungsprozesse recherchiert und entwickelt.

Insgesamt ist ein gemeinsames Verständnis und eine strukturierte Methodik geschaffen worden, um Nachhaltigkeit systematisch im Entwicklungsprozess von Flugzeugkabinen zu bewerten und schrittweise zu integrieren. Die TUHH ist in diesem Arbeitspaket hauptsächlich zu Projektbeginn unterstützend tätig gewesen.

2.2 AP 1.2: Konzeption nachhaltiger Service-Module für ressourcensparende On-Board-Services

Nachfolgend sind die Ergebnisse aus dem AP 1.2 beschrieben. Hierbei liegt der Schwerpunkt der Beschreibungen auf den Arbeiten aus dem Jahr 2025, da für die detaillierten Ausführungen der Projektarbeiten der vorangegangenen Jahre auf die entsprechenden Zwischenberichte verwiesen werden kann.

Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands der Lavatory-Produktfamilie

Als durchgängiges Produktbeispiel für die Weiterentwicklung der Werkzeuge des *Integrierten PKT-Ansatzes* ist gemeinsam mit den Projektpartnern die Lavatory Produktfamilie des A330 ausgewählt worden. Hierfür wird zunächst der Ist-Zustand der Lavatory workshopbasiert aufgenommen und dabei die interne und externe Vielfalt visualisiert. Als Übersicht über bereits existierende Varianten wird ein Vielfaltsbaum (TEV) erstellt, der die bestehende externe Vielfalt zeigt. Um die interne Vielfalt der Lavatory-Produktfamilie darzustellen, wird der Module Interface Graph (MIG) genutzt. Zudem visualisiert die umsatzorientierte Produktfamilien-Funktionsstruktur (PFS) funktionale Zusammenhänge. Zur Verbindung der internen und externen Varianz wird ein Variety Allocation Model (VAM) erstellt. Die Visualisierungen, vor dem Workshop vorbereitet, dienen während des Workshops als Diskussionsgrundlage und werden gemeinsam mit den Projektpartnern weiterentwickelt. Hierbei werden auch Potentiale und Schwächen der Werkzeuge im Kontext der Nachhaltigkeit diskutiert. Die ausführliche Beschreibung und Visualisierung der Werkzeuge ist im Zwischenbericht 2023 [REC23] zu finden.

Aufnahme von Stakeholder-Bedürfnissen in Bezug zur Flugzeugkabine

Um Feedback zu Abläufen und aktuellen „Pain Points“ in der Kabine sowie unbefriedigter Bedürfnisse aus Passagier- und Crewsicht zu identifizieren, wird gemeinsam mit den Projektpartnern ein Workshop durchgeführt. Teilnehmende aus verschiedenen Bereichen sammeln hierbei zunächst Eindrücke zu aktuell verbesserungsfähigen, aber auch gut umgesetzten Abläufen sowie zu nicht-adressierten Bedürfnissen der Crew und der Passagiere. Die Themen werden anschließend in neun Bereiche geclustert. Nach einer Gewichtung durch die Workshopteilnehmenden werden für die vier meistgewählten Themencluster, im Workshop betitelt als **„Service Müllvermeidung“**, **„Mülltrennung“**, **„Stauraum Crew/PAX“** und **„PAX Experience“**, erste Lösungsideen konzipiert. Die gesammelten Themencluster bieten Anhaltspunkte für Innovationen im Kontext der nachhaltigen Luftfahrt. Eine ausführlichere Beschreibung der Workshopergebnisse ist im Zwischenbericht 2024 [REC24] zu finden.

Berücksichtigung von Nachhaltigkeit im Produktentwicklungsprozess

Für die Entwicklung nachhaltiger Produktfamilien ist eine Integration von Methoden und Werkzeugen der nachhaltigkeitsorientierten Produktentwicklung in den Produktentwicklungsprozess notwendig. Basierend auf einer von Wiesner [Wie22] vorgeschlagenen Methodenkombination entlang der Prozesse der Produktentwicklung ist gemeinsam mit Diehl Aviation ein Konzept für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeit im Produktentwicklungsprozess entwickelt worden, welches ausführlich im Zwischenbericht 2024 [REC24] beschrieben ist.

Zuerst werden verschiedene Nachhaltigkeitswerkzeuge einem möglichen Einsatzzeitpunkte im Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 [VDI19] zugeordnet und anschließend auf den Diehl-Produktentwicklungsprozess (Diehl-PEP) übertragen, um Änderungspotentiale am Diehl-PEP identifizieren zu können. Mithilfe des nachhaltigkeitsorientierten Diehl-PEP wird daraufhin ein [REDACTED] Beispielprodukt entwickelt. Das Ergebnis der Entwicklung wird anschließend mit einem bestehenden Konzept verglichen, um zu beurteilen, ob die Änderungen am Produktentwicklungsprozess zur Entwicklung nachhaltigerer Produkte führen. Für diesen Vergleich der Lösungsalternativen werden die Produktionsphase, die Nutzungsphase sowie die End of Life Phase bewertet, wobei in diesen Lebensphasen jeweils die neu entwickelte Lösungsalternative verglichen mit der Bestehenden als vorteilhafter eingeschätzt wird hinsichtlich der Adressierung von Nachhaltigkeitsaspekten. Dies ist vor allem auf

ein geringeres Gesamtgewicht der Lösungsalternative zurückzuführen. Im Anwendungsbeispiel zeigt sich, dass der nachhaltigkeitsorientierte Produktentwicklungsprozess zu einem nachhaltigeren Produkt führen kann.

Prozessbewertung und Visualisierung

Für die Nachhaltigkeitsbewertung ist die Analyse industrieller Prozesse im Unternehmen ein wichtiger Baustein, um Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Um diese an verschiedene Stakeholder innerhalb des Unternehmens zu kommunizieren, sind entsprechende Visualisierungen hilfreich. Hierfür ist ein Konzept entwickelt worden, um innerhalb eines Ansatzes zur Analyse und Gestaltung industrieller Prozesse, der sogenannten Prozess-Atlas-Systematik (PAS) nach [Köh22], Nachhaltigkeitsaspekte zu bewerten und zu visualisieren.

Für die Erweiterung der PAS werden Methoden und Metriken zur Bewertung von Nachhaltigkeit in Prozessen recherchiert und für die Integration in die Vorgehensschritte der PAS bewertet. Darauf basierend können zu integrierende Methoden ausgewählt werden. Anschließend werden Visualisierungskonzepte für die verschiedenen Ergebnisse aus den Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden erstellt. Die PAS wird um drei Symbole erweitert, die die Ergebnisse der Methoden Life Cycle Assessment (LCA), Social Life Cycle Assessment (SLCA) und Life Cycle Costing (LCC) an den betroffenen Prozessschritten visualisiert. Eine ausführliche Beschreibung der Erweiterung ist im Zwischenbericht 2024 [REC24] und in der Veröffentlichung zu finden [TU-08].

Einordnung der Nachhaltigkeitskriterien im Kontext der Produktarchitekturgestaltung

Die in AP 1.1 gemeinsam mit den Projektpartnern erarbeiteten Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren im Projekt RECab werden im Rahmen des AP 1.2 hinsichtlich des Aspektes der Beeinflussbarkeit durch die modulare Produktarchitektur geclustert. Die Unterscheidung in Kriterien, die durch die modulare Produktarchitektur direkt beeinflussbar sind, und solche, die nicht oder nur indirekt beeinflussbar sind, ermöglicht die Identifikation von Kriterien, die durch eine Umgestaltung der Produktarchitektur adressiert werden können. Werden die Kriterien den verschiedenen Ebenen der Produktarchitektur zugeordnet, wird das Potential einer Adressierung von Nachhaltigkeitskriterien im Rahmen der Gestaltung modularer Produktarchitekturen deutlich. Die Zuordnung von Nachhaltigkeitskriterien ist hierfür im Projektzeitraum auf einer nationalen sowie einer internationalen Konferenz 2024 veröffentlicht [TU-01; TU-04] und diskutiert worden. Bestehende Modularisierungsansätze, wie der *Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien*, müssen entsprechend weiterentwickelt werden, um die Nachhaltigkeitskriterien und -indikatoren bei der Gestaltung der modularen Produktarchitektur adressieren zu können. Um einen Überblick über bestehende Modularisierungsmethoden, die Nachhaltigkeitsaspekte adressieren, zu schaffen, wird ergänzend eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei werden 24 Methoden der Entwicklung nachhaltiger modularer Produktfamilien identifiziert, die je nach Zielstellung der Methode verschiedene Nachhaltigkeitsaspekte fokussieren. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse der Literaturrecherche ist geplant.

Erweiterung des Module Interface Graphs (MIG) und Visualisierung der Lavatory-Ablufthaube im angepassten MIG

Für die Erweiterung der Werkzeuge des *Integrierten PKT-Ansatzes* um die Nachhaltigkeitskriterien, die im Rahmen der Gestaltung modularer Produktarchitekturen adressiert werden können, wird gemeinsam mit Diehl Aviation Hamburg ein Beispiel aus der Lavatory festgelegt. Verschiedene Lösungsalternativen für eine Ablufthaube werden visualisiert und hinsichtlich Nachhaltigkeit bewertet.

Der MIG bildet die interne Varianz einer Produktfamilie ab, behält dabei aber die Form der Komponenten abstrahiert bei [Ble11]. Deshalb wird die abstrahierte Darstellung der Komponenten aus dem MIG als Basis der Visualisierung gewählt. Für jede Lösungsalternative wird ein separater Graph erstellt. Um die Darstellung aufgrund der Vielzahl der zu bewertenden Nachhaltigkeitskriterien nicht zu überladen, wurde die gleichzeitige Visualisierung der Kriterien auf ein Kriterium beschränkt. Dadurch kann das Bewertungsergebnis der Lösungsalternativen qualitativ mithilfe einer Farbskala dargestellt werden. Abbildung 3 zeigt zur Verdeutlichung die Bewertung der Alternative 1 auf den verschiedenen Ebenen

der Produktarchitektur. Die Bewertung ist hierbei von einem Produktexperten qualitativ auf einer Skala von extrem negativ (dunkelrote Färbung) hin zu extrem positiv (dunkelgrüne Färbung) durchgeführt worden und ist entsprechend subjektiv. Über die rechts dargestellten Felder kann das zu betrachtende Kriterium gewählt werden. In Abbildung 3 wird beispielhaft die Recyclingfähigkeit der Alternative angezeigt, verdeutlicht über die blaue Hervorhebung des Feldes. Neben den Nachhaltigkeitskriterien kann hier zudem die Varianzsicht gewählt werden, die der im MIG üblichen Darstellung mit varianten Komponenten in grau und Standardkomponenten in weiß folgt.

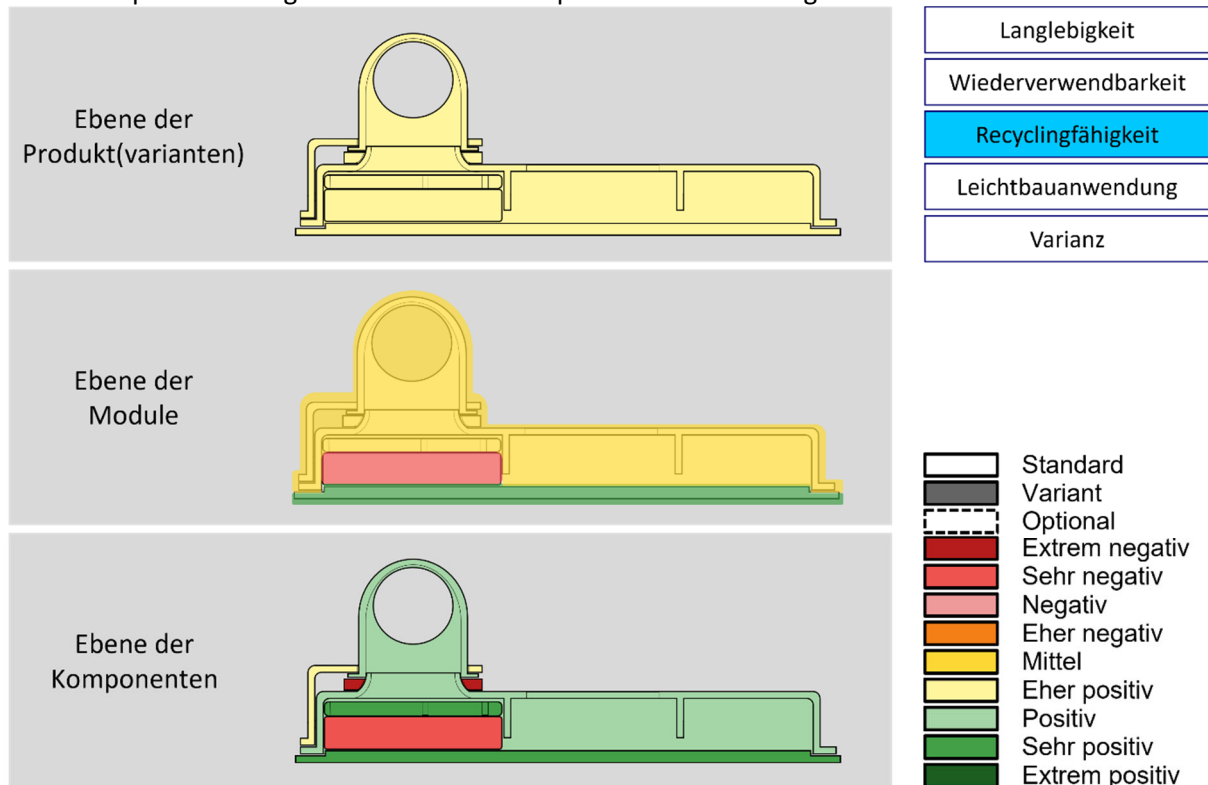


Abbildung 3: Bewertung der Recyclingfähigkeit der Alternative (1) Pre auf den Ebenen der Produktarchitektur

Durch die Visualisierung wird deutlich, dass die Ebene, auf der das Produkt bewertet wird, einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung hat. Werden die verschiedenen Alternativen nebeneinander gestellt und miteinander verglichen, kann über die Farbgebung schnell die zu präferierende Alternative bezogen auf das ausgewählte Kriterium (Recyclingfähigkeit) identifiziert werden. Während die Bewertung der Produktvariante somit bei der Auswahl von Alternativen hilft, kann eine differenziertere Betrachtung die Weiterentwicklung einzelner Alternativen unterstützen. Denn durch die tiefergehende Analyse auf den verschiedenen Ebenen der Produktarchitektur können kritische Komponenten und Module für eine konstruktive Änderung identifiziert werden.

Konzeptvergleich unter Zielkonflikten

Durch die Vielzahl an Nachhaltigkeitskriterien, die sich gegenseitig beeinflussen, bedarf es eines Vorgehens zur Abwägung aufkommender Zielkonflikte bei der Konzeptauswahl. Denn die Visualisierung im MIG unterstützt Entscheidungen bezogen auf einzelne Kriterien, nicht aber das Abwägen unter Zielkonflikten. Deshalb wird im Rahmen des Projekts ein Ansatz zum Umgang mit Zielkonflikten erarbeitet und mithilfe des Anwendungsbeispiels der Ablufthauben-Alternativen evaluiert.

Hierfür wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, bei der Ansätze zum Umgang mit Zielkonflikten identifiziert werden. Die gefundenen Ansätze werden analysiert und miteinander verglichen, um einen oder mehrere geeignete Ansätze als Basis zu finden. Darauf basierend wird ein Vorgehen zur Entscheidungsfindung erarbeitet.

Basierend auf dem Trade-Off-Navigation-Framework von Kravchenko et al. [Kra21] erfolgt die Entscheidungsfindung für die Konzeptauswahl auf Grundlage von Diskussionen, bei denen obere und untere Grenzbereiche für Kriterien festgelegt sowie die Kriterien in Nicht-Verhandelbare und Verhandelbare eingeteilt werden. Die Bewertung der Lösungsalternativen ist hierbei zunächst qualitativ, sofern keine fundierte Datenbasis für eine quantitative Bestimmung von Indikatoren zur Verfügung steht. Um Transparenz über diese qualitative Bewertung zu schaffen, wird der Wissensreifeegrad der Bewerter abgefragt, angelehnt an den Wissensreifeegrad bei Watz et al. [Wat22]. In einer separaten Spalte kann auf mögliche Zielkonflikte zwischen den verschiedenen Kriterien hingewiesen werden, um die Entscheidungsanalyse zu unterstützen.

Die für die Entscheidungsanalyse notwendigen Informationen werden tabellarisch gesammelt. Hierbei wird zunächst definiert, welche (Nachhaltigkeits-)Kriterien in der Analyse betrachtet werden sollen. Anschließend werden für die gewählten Kriterien Ober- und Untergrenze des der akzeptablen Bereiche festgelegt und es wird diskutiert, ob diese Grenzen fixiert und dementsprechend nicht-verhandelbar sind oder ob die Kriterien gegebenenfalls angepasst werden können, also verhandelbar sind. Anschließend werden die verschiedenen Alternativen bezogen auf die einzelnen Kriterien bewertet. Mögliche Zielkonflikte werden vermerkt und der Wissensreifeegrad wird eingetragen.

Sind alle Informationen eingetragen, folgt die Entscheidungsfindung. Hierfür wird, analog zum Vorgehen von Kravchenko et al. [Kra21], zunächst die Bewertung der nicht-verhandelbaren Kriterien ausgewertet. Fällt die Bewertung einer Alternative in einem nicht-verhandelbaren Kriterium außerhalb des akzeptablen Bereichs, erfüllt die Alternative nicht die Anforderungen an ein nachhaltiges Design. Sie wird folglich nicht weiter betrachtet und fällt aus dem Entscheidungsraum. Anschließend werden die verhandelbaren Kriterien analysiert. In der darauffolgenden Entscheidungsanalyse wird die Konzeptauswahl unter Abwägung der Bewertungsergebnisse getroffen.

Das vorgestellte Vorgehen wird mithilfe der Lösungsalternativen für die Lavatory-Ablufthaube evaluiert. Hierfür werden die drei Lösungsalternativen im Hinblick auf zwölf Nachhaltigkeitskriterien auf Ebene der Produktvarianten bewertet. Keine der Alternativen fällt in der Bewertung außerhalb des akzeptablen Bereichs, sodass in der finale Entscheidungsanalyse alle Alternativen weiterhin betrachtet werden. Hierbei zeigt sich, dass der Schritt der Entscheidungsanalyse in solchen Fällen weiter unterstützt werden sollte.

Für das Anwendungsbeispiel der Ablufthauben-Alternativen wird deshalb basierend auf der vorangegangenen qualitativen Bewertung der Kriterien die Methode „Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution“ (TOPSIS) [Hwa81], eine Methode der multikriteriellen Entscheidungsfindung mithilfe derer die mathematisch am nächsten zur idealen Lösung liegende Alternative bestimmt wird, durchgeführt. Durch die Anwendung von TOPSIS wird die Alternative Partikelschaum als die Konzeptalternative identifiziert, die die Zielkonflikte für die betrachteten und gewichteten Kriterien möglichst abwägt.

2.3 AP 1.3: Nachhaltigkeit trifft Design – Anwendungsbezogene Technologieentwicklung

Im Folgenden sind die Ergebnisse des AP 1.3 aufgelistet. Der Schwerpunkt der Beschreibungen liegt auf den Arbeiten aus dem Jahr 2025, weswegen für die detaillierten Ausführungen der Projektarbeiten der letzten Jahre auf die jeweiligen Zwischenberichte [REC22], [REC23], [REC24] verwiesen wird.

Aufnahme von Anforderungen und Analyse von vorhandenen Bauweisen

Als Startpunkt für das AP 1.3 ist in Kooperation mit LHT eine systematische Untersuchung und Analyse der in der Flugzeugkabine eingesetzten Gestaltungsweisen und Werkstoffe sowie der zu erfüllenden Anforderungen durchgeführt worden. Abhängig vom jeweiligen Bauteil müssen dabei sowohl die mechanische Integrität gemäß der relevanten Regularien (u. a. Handlasten, Lastfälle aus der Luftfahrt-Spezifikation CS-25) nachgewiesen, als auch die Fire, Smoke und Toxicity (FST)-Eigenschaften erfüllt werden. Gleichzeitig besteht die übergeordnete Zielsetzung, die Bauteile möglichst leicht auszulegen.

Im Rahmen der Analyse sind Sandwichstrukturen mit Nomex®-Wabenkern und glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK)-Deckschichten als die dominierende Gestaltungsweise in der Flugzeugkabine identifiziert worden. Eine aufbauende Literaturanalyse hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Sandwichstrukturen zeigt jedoch Herausforderungen, unter anderem in der Produktion sowie hinsichtlich der Recyclingfähigkeit und Ressourceneffizienz. Vor diesem Hintergrund sind geeignete ökologische Leichtbaualternativen ermittelt worden, die diese Defizite bei gleichzeitiger Erfüllung der identifizierten Anforderungen kompensieren können. Eine vertiefte Darstellung hierzu ist den vorangegangenen Zwischenberichten [REC23], [REC24] zu entnehmen.

Potentialanalyse des ökologischen Leichtbaus für die Flugzeugkabine

Zur Potentialanalyse der Ökoeffizienz von Leichtbaustrukturen ist ein Ansatz entwickelt worden, der zusammenfassend in Abbildung 4 dargestellt und im Projektverlauf angewendet worden ist. Das Vorgehen baut dabei auf der Produkt-Komponenten-Testpyramide nach Schwan et al. [Sch21] auf und ist im Zwischenbericht des Jahres 2024 [REC24] beschrieben.

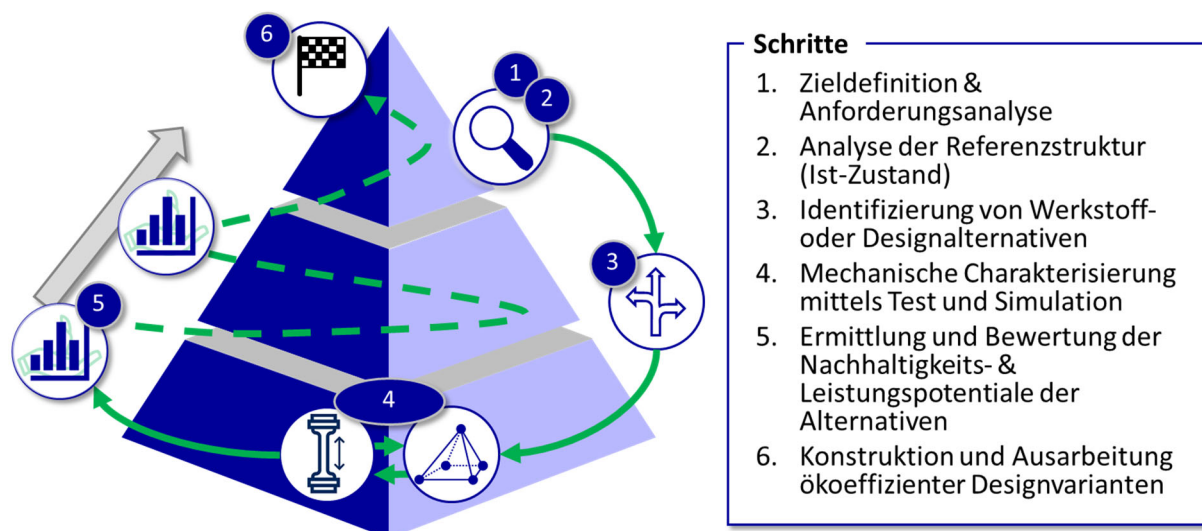


Abbildung 4: Ansatz zur Potentialanalyse der Ökoeffizienz von Leichtbaustrukturen [Weh25]

Einer der ersten Schritte des entwickelten Ansatzes ist die Identifizierung potentiell nachhaltiger Leichtbaulösungen mit hohem Gewichteinsparungspotenzial. Hierzu ist eine systematische Literaturrecherche durchgeführt worden, auf deren Basis geeignete biobasierte Werkstoffe identifiziert wor-

den sind. Diese sind in einem Ashby-Diagramm hinsichtlich ihrer gewichtsspezifischen Materialeigenschaften eingeordnet worden, um vielversprechende Werkstoffe zu selektieren. Dabei sind unter anderem Jute, Hanf und Flachs als geeignete Werkstoffalternativen identifiziert worden. Die Ergebnisse sind als Teil einer Veröffentlichung [TU-04] der Öffentlichkeit verfügbar gemacht worden. Aufgrund der bereits etablierten industriellen Anwendung, beispielsweise im Automobilbau, sowie der parallelen Untersuchung durch den Projektpartner LHT sind Flachs-Komposite als Deckschichtalternativen für den weiteren Projektverlauf zur vertieften Analyse ausgewählt worden. Darüber hinaus sind ein thermoplastischer Wabenkern als potentiell nachhaltige Alternative zu konventionellen Nomex™-Sandwichkernen sowie das [REDACTED] als alternative Gestaltungs- und Fertigungsstrategie gegenüber Sandwichstrukturen identifiziert worden. Bei Letzterem werden harzvorimprägnierte, kontinuierliche Fasern mithilfe eines auf einer flexiblen Plattform montierten Roboterarms kontrolliert über definierte Wickelpunkte (Inserts) lastpfadoptimiert abgelegt. Die aufgeführten Werkstoffe und Ansätze sind im Projektverlauf systematisch untersucht und bewertet worden.

Entwicklung von leichtbaugerechten Bauweisenkonzepten

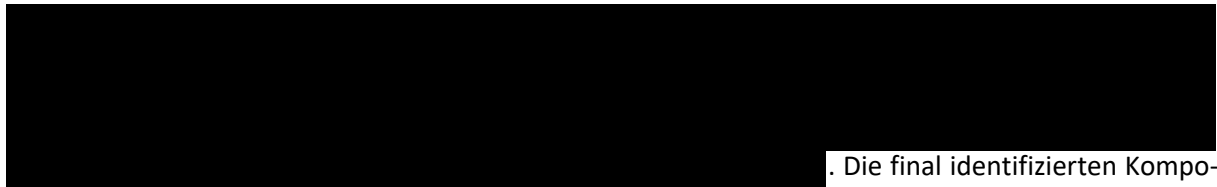
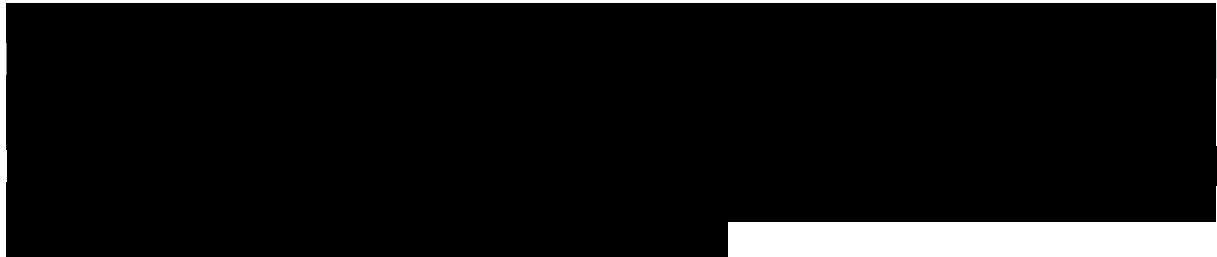
Im Folgenden werden die Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung der drei untersuchten Gestaltungs- und Werkstoffalternativen dargestellt. Der Abschnitt gibt zwar einen übergeordneten Überblick, der Fokus liegt jedoch auf den im Jahr 2025 erzielten Ergebnissen. Detaillierte Ausführungen zu den zuvor erzielten Ergebnissen sind dem Zwischenbericht 2024 [REC24] zu entnehmen.



Deckschicht-Alternative - Biobasierte Flachsfaser-Komposite

Im Rahmen der Untersuchung flachsfaserbasierter Komposite sind Zug- und Biegeversuche an Laminaten mit unterschiedlichem Harzanteil und Flächengewicht durchgeführt worden. Zusätzlich sind sogenannte powerRibs™, bei denen es sich um grobmaschige Verstärkungen aus Flachsfaserbündeln handelt, experimentell in Biegeversuchen untersucht worden. Die Versuche sind in Simulationen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) nachgebildet worden, um geeignete Materialmodelle zu implementieren und zu kalibrieren.





. Die final identifizierten Komponenten sind in Abbildung 5 dargestellt.

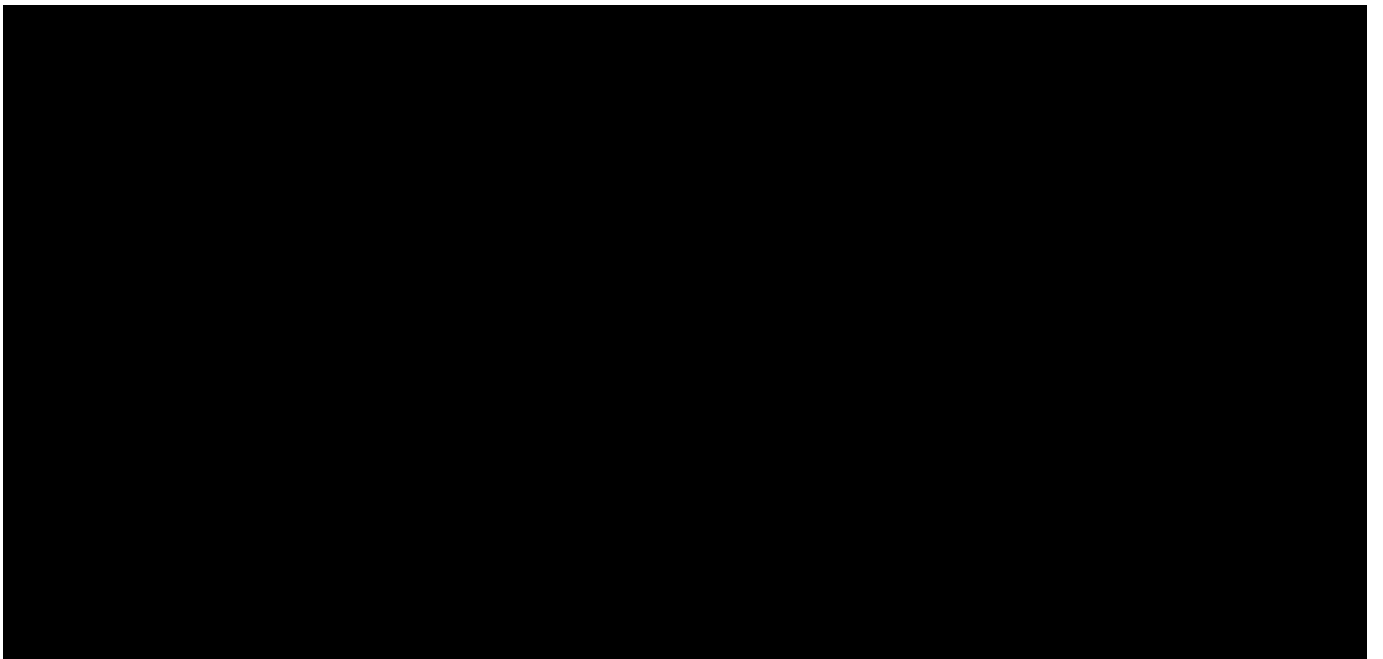
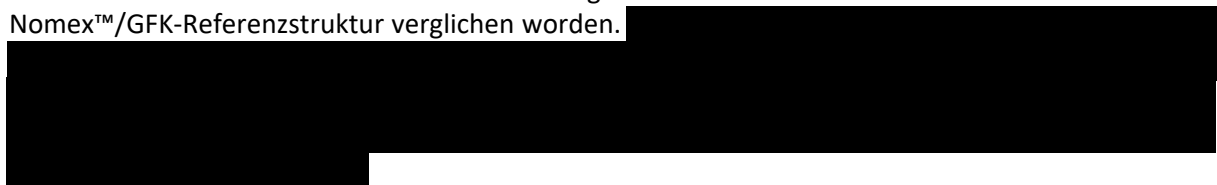


Abbildung 5: Kabinenkomponenten, für welche der Einsatz von Flachsfaser-Kompositen potenziell geeignet ist

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sind weiterführende Untersuchungen an Sandwichstrukturen mit Nomex®-Wabenkern und Flachsfaser-Deckschichten durchgeführt worden. Um einen großen Erkenntnisgewinn zu erzielen, ist dabei mit den Deckschichten gezielt nur eine Konstituente des konventionellen Sandwichverbunds verändert worden. Die Ergebnisse sind dabei mit denen einer konventionellen Nomex™/GFK-Referenzstruktur verglichen worden.





Zunächst ist in Trommelschälversuchen nach DIN 53295 [DIN82] die Deckschichthaftung am Kern untersucht worden, um zu überprüfen, welche Harzanteile in den Flachs-Deckschichten benötigt werden. Die Versuche sind jeweils in W-Orientierung durchgeführt worden, wobei eine Universalprüfmaschine des Typs Galdabini Quasar 100 in Kombination mit einer 10 kN Kraftmessdose verwendet worden sind und die Verschiebung über die Maschinentraverse erfasst worden ist. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 auf der linken Seite dargestellt. Um den Einfluss des Aufrollens der Deckschichten herauszurechnen, ist die mittlere Aufrollkraft der Decklagen an separaten Laminatversuchen ermittelt worden. In Abbildung 6 sind auf der rechten Seite die Ergebnisse aus den Trommelschälversuchen zusammenfassend dargestellt,

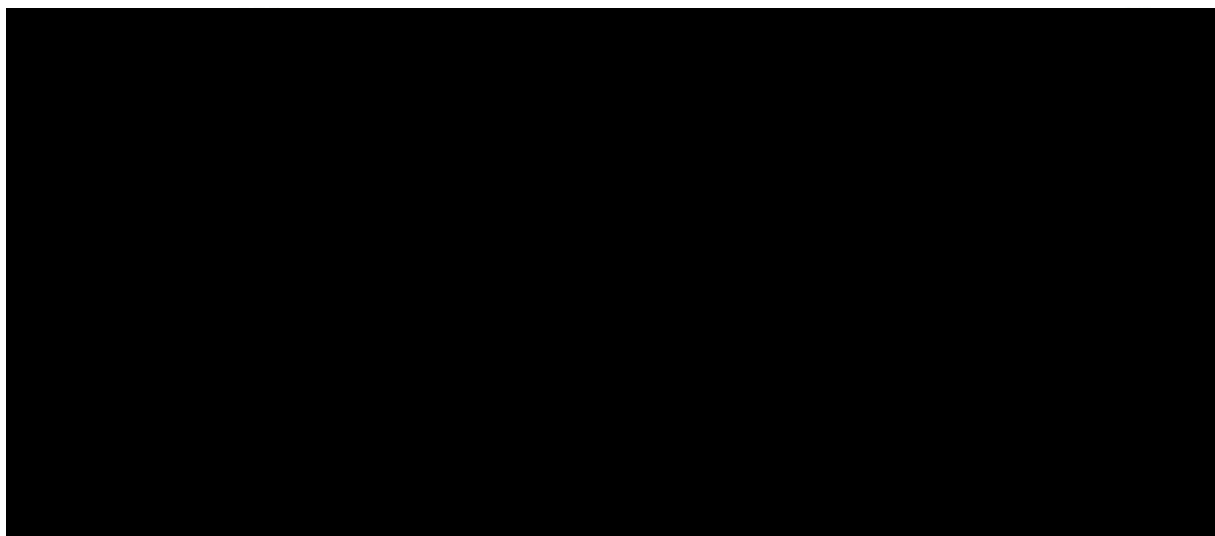
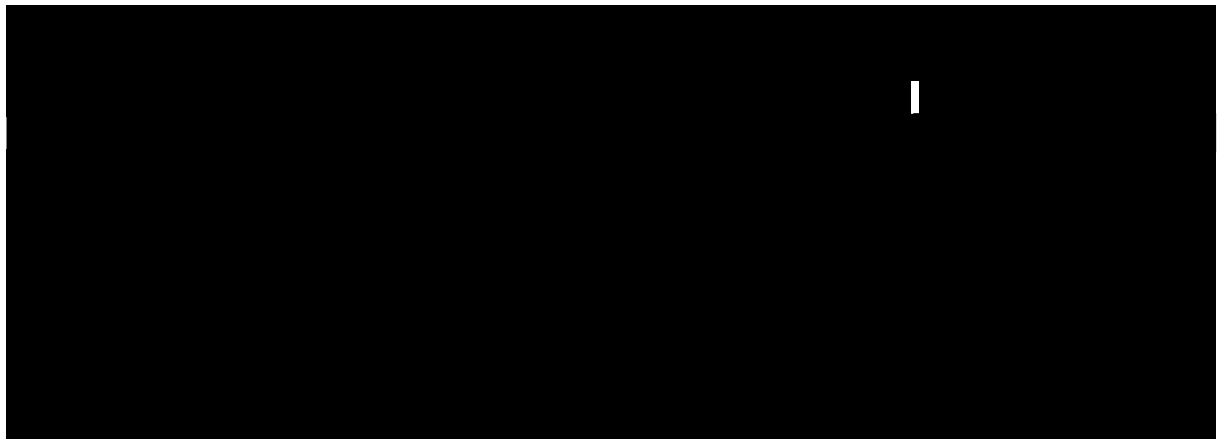
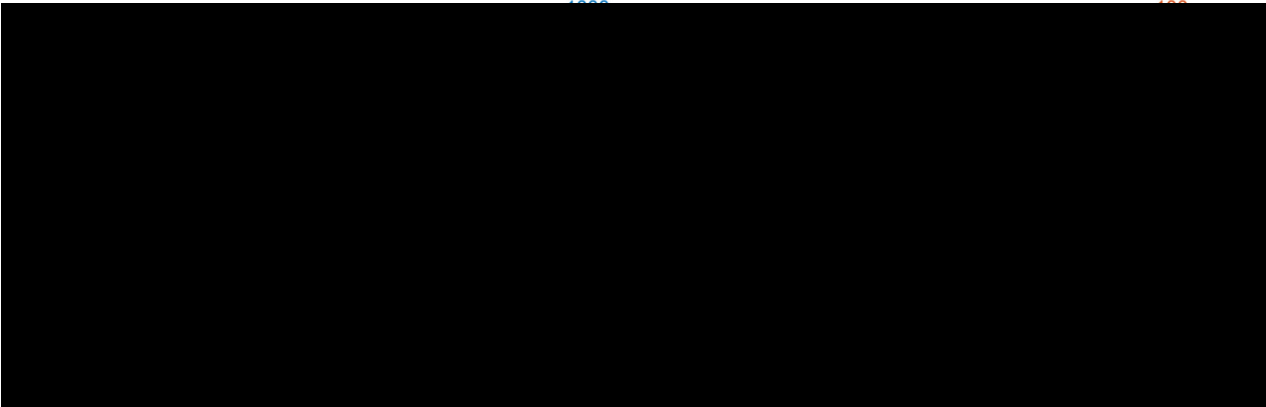


Abbildung 6: Versuchsaufbau des Trommelschälversuchs (links), Versuchsergebnisse (rechts)

Im Anschluss an die Trommelschälversuche sind 4-Punkt-Biegeversuche gemäß des ASTM C393M [AST20a] Standards durchgeführt worden. Auch diese sind an der Universaltestmaschine Galdabini Quasar 100 mit einer 10 kN-Kraftmessdose durchgeführt worden, wobei die Verfahrgeschwindigkeit 20 mm/min betragen hat. Der Testaufbau in Abbildung 7 dargestellt, wobei der obere Abstand der

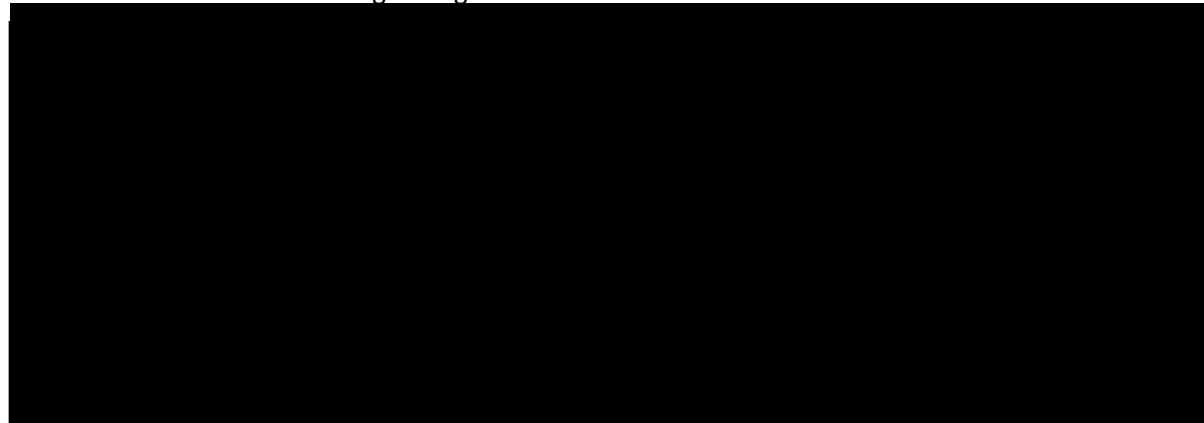
Rollen 254 mm und der Abstand der unteren Rollen 508 mm beträgt. Die Testkonfiguration entspricht somit nahezu einer Langspann-Biegekonfiguration, bei der ein Deckschichtversagen als Initialversagen angestrebt wird. Die Ergebnisse sind zusammenfassend exemplarisch für die L-Orientierung in Abbildung 7 dargestellt,



Es sind zu den Flachsfaser-Kompositen weiterführende Analysen durchgeführt worden, bei denen auch weitere nachhaltige Zielgrößen, wie die CO₂-Äquivalente über den gesamten Lebenszyklus, betrachtet worden sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind am Ende dieses Arbeitspakets sowie in AP 3.3 beschrieben.

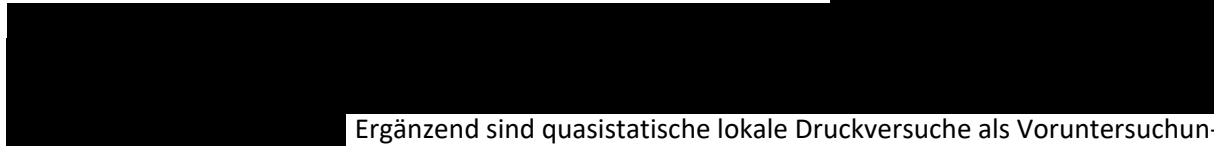
Kernalternative - Thermoplastischer Wabenkern

Auch für den thermoplastischen Wabenkern sind zunächst die maßgebenden Belastungsarten definiert sowie konventionelle Referenzproben festgelegt worden. Analog zu den Flachkompositen erfolgte dabei die Auswahl gering belasteter Bereiche in der Kabine, in denen nur Hand- und Abuse-Lasten auftreten. Neben der bei Sandwichstrukturen im allgemein dominierenden Biegebeanspruchung sind zusätzlich auch der Nachweis gegen lokale Druckbelastungen und Schlagbelastungen von Bedeutung. Die daraus abgeleiteten und durchgeführten Versuche sowie Untersuchungen sind zusammenfassend in Abbildung 8 dargestellt.

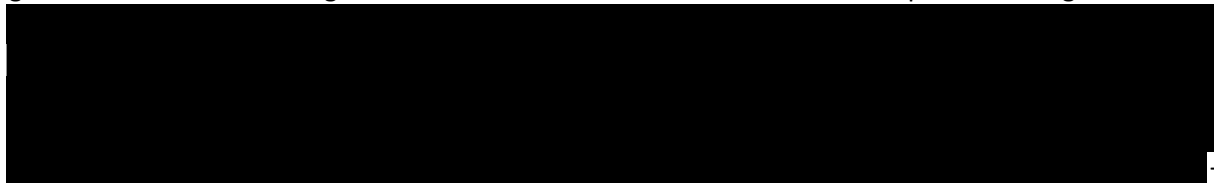


Als Referenzpaneel ist ein 10 mm dickes Sandwichpaneel mit Nomex®-Wabenkern der Spezifikation ABS5035-A4 (Kerndichte: 48 kg/m³, Zellgröße: 3,2 mm) definiert worden. Es sind dabei zwei unterschiedliche Sandwichkonfigurationen herangezogen worden, die eine beziehungsweise zwei duroplastische GFK-Decklagen der Spezifikation ABS5047-07 aufweisen. Um den Einfluss des Kerns isoliert zu untersuchen, ist der Nomex®-Kern durch einen [REDACTED] substituiert worden, der bei gleicher Kerndichte wie der Nomex®-Wabenkern mit 6,4 mm jedoch eine größere Zellgröße aufweist. Diese hybriden Proben sind im gleichen Herstellungsprozess wie die konventionellen Strukturen mit duroplastischen GFK-Deckschichten [REDACTED] verpresst worden. Für die Impact-Versuche haben zusätzlich auch einige rein thermoplastische Proben mit einer thermoplastischen GFK-Decklage nach Airbus-Spezifikation ABS5036 zur Verfügung gestanden, die ebenfalls das gleiche Gewicht wie die Referenzproben und hybriden Proben aufweisen.

Die globalen und lokalen Druckversuche sind an der Universalprüfmaschine Galdabini Quasar 100 unter Verwendung einer 100 kN-Kraftmessdose durchgeführt worden [REDACTED]

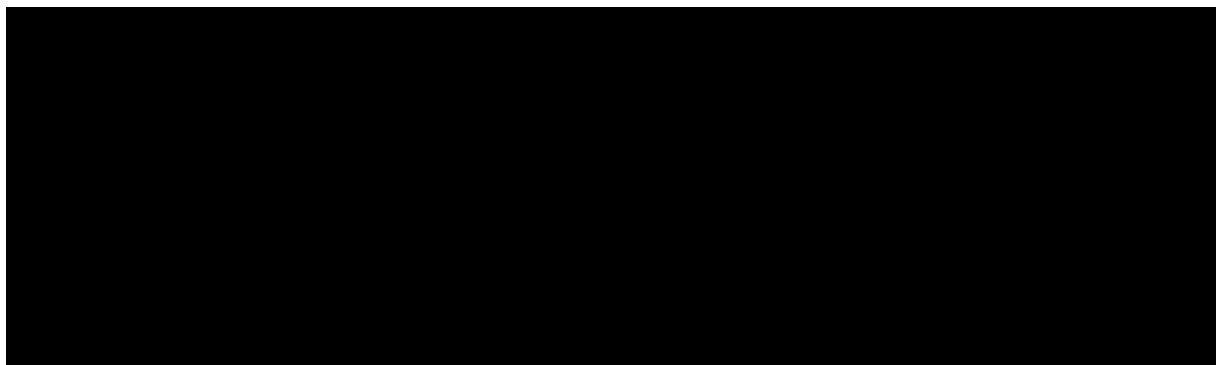
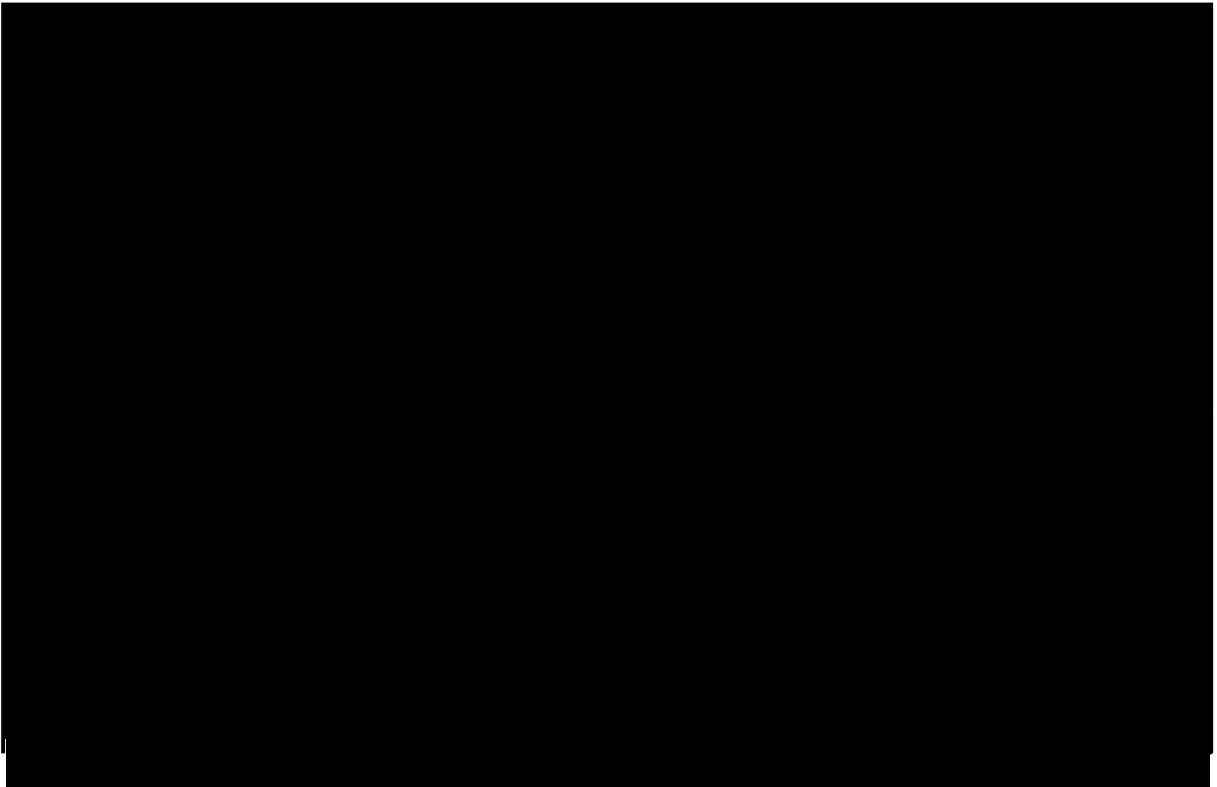


[REDACTED] Ergänzend sind quasistatische lokale Druckversuche als Voruntersuchungen durchgeführt worden, um grundlegende Erkenntnisse zu auftretenden Schadensmechanismen zu gewinnen und daraus mögliche Rückschlüsse auf das Verhalten unter Impactbelastung abzuleiten.





Die anschließenden Impactversuche sind an einem Fallturm Instron CEAST 9350 in Anlehnung an den Teststandard ASTM D7136 [AST20b] durchgeführt worden. Die Proben mit Abmessungen von 150 × 100 mm sind dafür auf einer metallischen Auflage mit rechteckigem Ausschnitt positioniert und von oben mittels Schnellspannern fixiert worden.



[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]



Zusätzlich zu den reinen Impact-Versuchen sind auch Biege- und Restfestigkeitsversuche durchgeführt worden. Die Biegeversuche sind dabei an der Universalprüfmaschine Galdabini Quasar 100 mit einer 10 kN Kraftmessdose durchgeführt worden. Die Biegeversuche sind in Anlehnung an die Prüfvorschriften ASTM D7249 [AST20c] (Langspann) und ASTM C393 [AST20a] (Kurzspann) durchgeführt worden, wobei der obere Rollenabstand stets 100 mm und der untere Abstand für den Langspann-Versuch 500 mm und den Kurzspann-Versuch 200 mm betragen. Die Probenabmessungen sind mit 550 x 90 mm für den Langspann- und 250 x 90 mm für den Kurzspann-Versuch etwas breiter als die Proben typischer Biegeversuche (75 mm). Da aufgrund der Materialverfügbarkeit keine reinen thermoplastischen Proben vorgelegen haben, sind die Referenzproben mit Nomex[®]-Kern sowie die hybriden Proben mit thermoplastischem Wabenkern und duroplastischen GFK-Deckschichten getestet worden. Die Kraft-Weg-Diagramme als Ergebnisse der Biegeversuche sind in Abbildung 11 dargestellt.

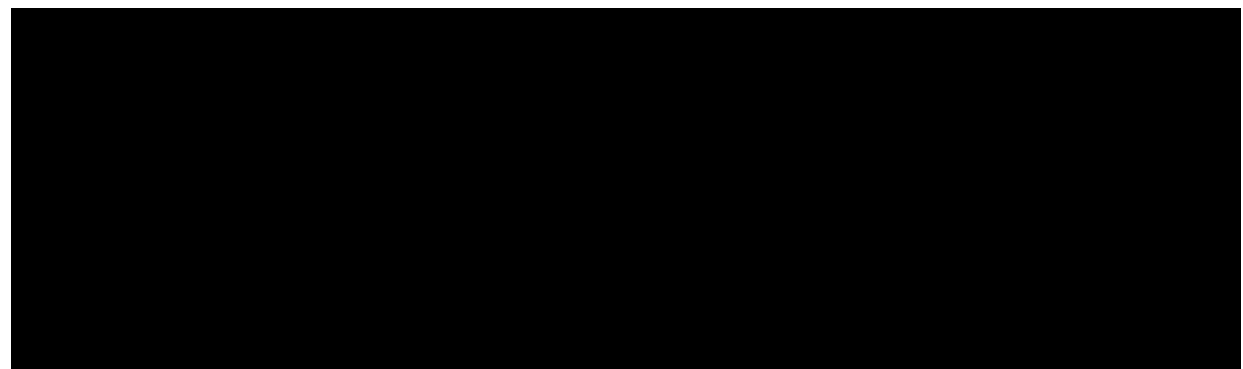


Abbildung 11: Kraft-Weg-Diagramme der Kurzspann- und Langspann-Vierpunkt-Biegeversuche

Für die Tests auf Restfestigkeiten in Anlehnung an ASTM D8388 [AST22] sind dieselben Probenabmessungen und Rollenabstände wie bei den beschriebenen Biegeversuche genutzt worden.

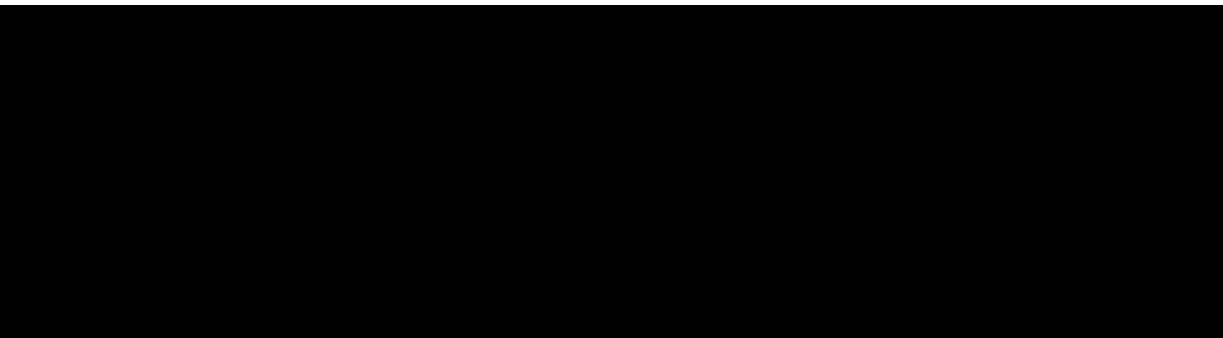


Abbildung 12: Ergebnisse und exemplarische vorgeschädigte Probe beim Restfestigkeitstest – Kurzspann-Biegeversuche (links) und Langspann-Biegeversuche (rechts)



Gestaltung von leichtbaugerechten Strukturen unter Berücksichtigung verschiedener Zielgrößen

Bei der Gestaltung von Leichtbaustrukturen sind im Allgemeinen verschiedene Zielgrößen zu berücksichtigen, die häufig in Wechselwirkung zueinanderstehen. Das Gewicht ist dabei zumeist direkt mit den Emissionen sowie den CO₂-Äquivalenten in der Nutzungsphase verknüpft. Um neben der Nutzungsphase auch den gesamten Lebenszyklus zu erfassen, sind am Beispiel von Flachspaneele für eine Biegebelastung entsprechende Analysen durchgeführt worden. Dabei ist zunächst eine Leichtbauauslegung erfolgt, deren Ergebnisse die Eingangsgrößen für eine anschließende Lebenszyklusanalyse bilden. Die Ergebnisse, die in AP 3.3 ausführlich dargestellt sind, unterstreichen die Bedeutung einer leichtbaugerechten und damit anforderungsnahen Auslegung für die CO₂-Bilanz von Strukturen in der Flugzeugkabine.

Neben der Minimierung des Gewichts bei Einhaltung der mechanischen Anforderungen ist auch die Berücksichtigung ökonomischer Zielgrößen von Bedeutung. Dies ist beispielsweise durch den modularen Leichtbau möglich, bei dem Leichtbau und Modularisierung miteinander harmonisiert werden, mit dem Ziel, eine modulare Hybridbauweise zu etablieren. Die Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Modularisierung wird bereits in AP 1.2 gezeigt und erfolgt typischerweise in frühen Entwicklungsphasen.

Um den modularen Leichtbau auch in späteren Entwicklungsphasen bei der Ausgestaltung der Bauweise zu unterstützen, ist im Rahmen des Projekts ein Ansatz zur multikriteriellen Ökoeffizienzoptimierung entwickelt worden, der in Abbildung 13 links dargestellt ist. Mit diesem Ansatz können Leichtbaustrukturen, die beispielsweise Teil einer modularen Hybridbauweise sind, hinsichtlich ihrer Ökoeffizienz optimiert werden. Dabei werden neben ökonomischen Zielgrößen, wie Fertigungskosten, auch ökologische Zielgrößen, wie Gewicht oder CO₂-Äquivalente, in der Herstellung berücksichtigt, sodass eine harmonisierte Ausgestaltung der Bauweise unter mehreren Kriterien möglich ist. Der Ansatz wurde exemplarisch an einem Sandwichpaneel evaluiert. Die betrachtete Struktur, die zugrunde liegenden Entwurfsvariablen sowie die berücksichtigten Optimierungszielgrößen sind ebenfalls in Abbildung 13 rechts dargestellt.

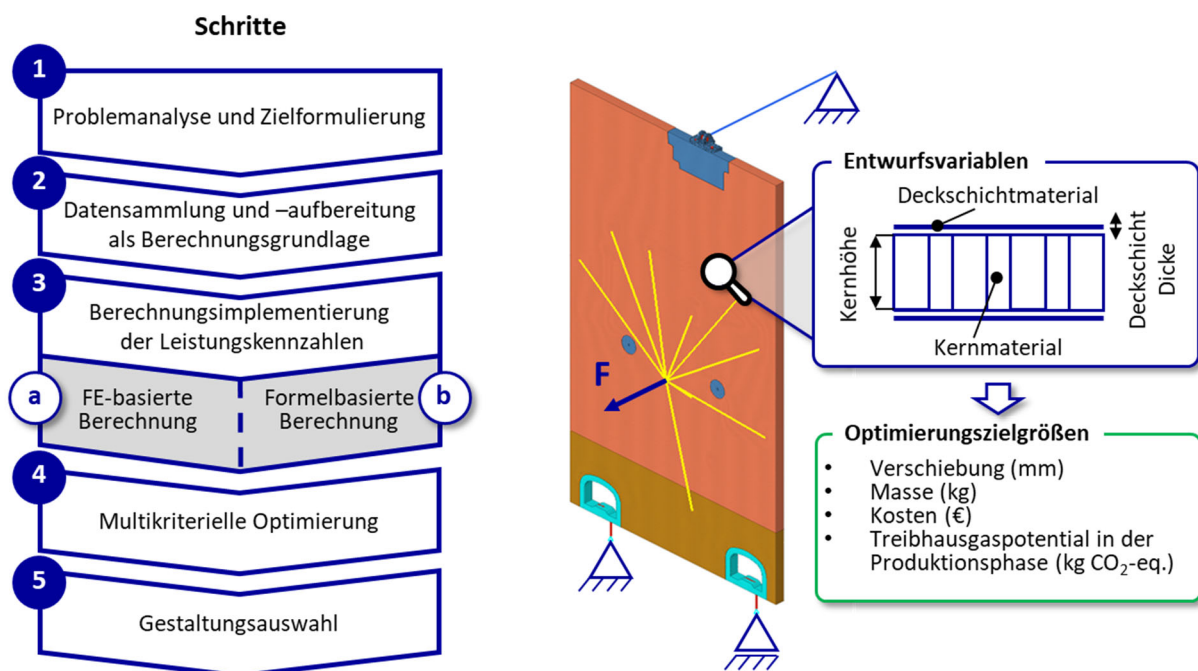


Abbildung 13: Ansatz zur multikriteriellen Optimierung von Sandwichstrukturen (links); Evaluationsbeispiel mit Sandwichpaneel und Randbedingungen sowie Entwurfsvariablen und Optimierungszielgrößen (rechts) [TU-06]

Die einzelnen Schritte des Ansatzes sind im Zwischenbericht des Jahres 2023 [REC23] ausführlich beschrieben worden. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Berechnung der Leistungskennzahlen. Einerseits wird eine FE-Simulation durchgeführt, um die mechanischen Kenngrößen eines spezifischen Entwurfsvektors zu bestimmen. Andererseits erfolgt die Berechnung der weiteren Optimierungszielgrößen formelbasiert mithilfe von Python und hinterlegten Datenbanken. Die berechneten Werte werden mittels genetischen Optimierungsalgorithmus iterativ optimiert, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird.

Der resultierende Lösungsraum ist in Abbildung 14 links dargestellt, wobei die Ausgangslösung rot markiert ist. Durch die Festlegung einer maximal zulässigen Verschiebung kann die Verschiebung als Zielgröße ausgeschlossen werden. Dies entspricht einer Projektion des verbleibenden Lösungsraums auf eine zwei-dimensionale Ebene, wie in Abbildung 14 rechts gezeigt. In dieser Ebene lassen sich dominierende Lösungsalternativen identifizieren, die auf der sogenannten Pareto-Front liegen. Im Rahmen der Lösungsauswahl wurde eine Lösungsalternative ausgewählt, durch welche das Gesamtgewicht um ca. 25 % und die Herstellungskosten um ca. 39 % reduziert werden können. Die Einsparungen sind insbesondere auf die Vermeidung von Überdimensionierung und den damit einhergehenden reduzierten Materialeinsatz zurückzuführen.

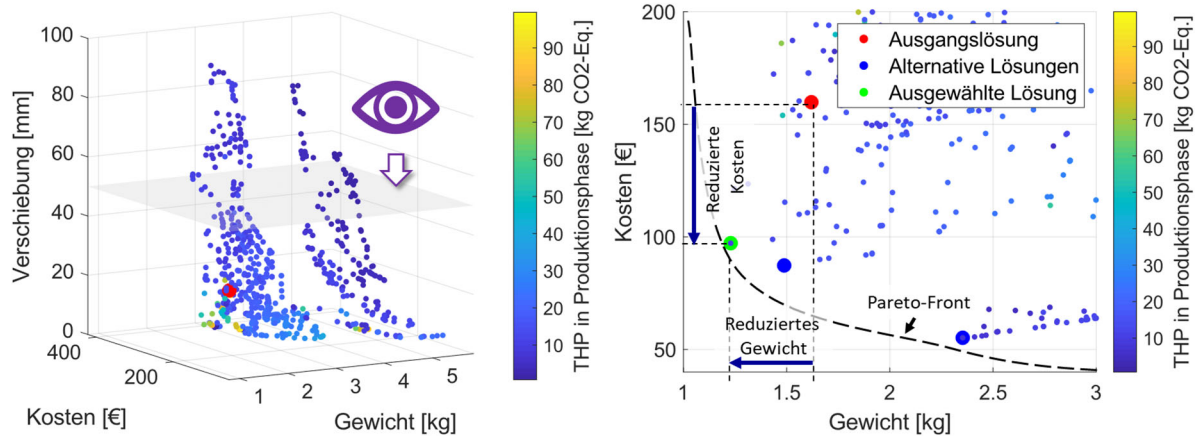


Abbildung 14: Ergebnisraum nach der multikriteriellen Optimierung (links); Pareto-Front hinsichtlich Kosten und Gewicht zur Lösungsauswahl (rechts)

Zusammenfassend ermöglicht der entwickelte Ansatz eine systematische und automatisierte Optimierung von Leichtbaustrukturen im Kontext des modularen Leichtbaus und lässt sich beispielsweise auch bei der Ausgestaltung einer modularen Hybridbauweise anwenden. Dabei werden mechanische, ökologische und ökonomische Kriterien berücksichtigt, wodurch fundierte Designentscheidungen bereits in frühen Entwicklungsphasen unterstützt werden können.

2.4 AP 3.1: Kontinuierliche Technologiewalidierung und Erprobung

Im AP 3.1 wird auf Wunsch des Mittelgebers anstelle der im Projektantrag geplanten Marktvalidierung eine Technologiewalidierung durchgeführt. Dafür wird, basierend auf den in AP 1.1 erarbeiteten Nachhaltigkeitskriterien, ein Interviewleitfaden für Experteninterviews erarbeitet. Die Beschreibung der Technologiewalidierung teilt sich hierbei, angelehnt an die Arbeitsschritte der ursprünglich geplanten Marktvalidierung, in die Arbeitsschritte Konzeption, Durchführung und Auswertung auf. Anstelle eines Marktbildes umweltfreundlicher Kabinen werden Herausforderungen bei der Adressierung von Nachhaltigkeit beleuchtet.

2.4.1 Herausforderungen bei der Adressierung von Nachhaltigkeit

Basierend auf einer Literaturrecherche mit den Suchfeldern Herausforderung, Nachhaltigkeit und Produktentwicklung werden Herausforderungen bei der Adressierung von Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung identifiziert und mit Herausforderungen aus dem Projekt verglichen. Die Ergebnisse sind 2025 auf einer internationalen Konferenz vorgestellt und diskutiert worden [TU-07]. Eine detaillierte Beschreibung ist entsprechend im Zwischenbericht 2024 [REC24] sowie in der Veröffentlichung nachzulesen.

Nach Filterung der Beiträge der Literaturrecherche werden genannte Herausforderungen aus den Beiträgen tabellarisch gesammelt und mehrfach genannte Herausforderungen zusammengeführt. Dadurch können 72 Herausforderungen identifiziert werden, die anschließend in neun Kategorien, teils basierend auf Kategorien von Dekoninck et al. [Dek16], geclustert werden [TU-07]. Diese Clusterung der Herausforderungen aus der Literatur ermöglicht den Vergleich der in der Literatur genannten Herausforderungen mit zehn Herausforderungen, die im Projekt RECab identifiziert worden sind (vgl. Abbildung 15). Hierbei stimmen sieben der Herausforderungen miteinander überein, das heißt diese treten sowohl in der Literatur als auch im Projekt auf und sind in Abbildung 15 mit einem Buch gekennzeichnet. Eine weitere Herausforderung, das Fehlen von Nachhaltigkeitskriterien, wird ebenfalls in der Literatur diskutiert. Jedoch sollte hierbei spezifiziert werden, dass es sich dabei in erster Linie um die Anwendbarkeit der Kriterien handelt, da zwar viele verschiedene Kriterien existieren, diese jedoch nicht direkt für die Entscheidungsfindung anwendbar sind. Um hierbei nicht im Widerspruch mit den zahlreichen in AP 1.1 gesammelten Nachhaltigkeitskriterien zu stehen, wird die Formulierung der Herausforderung im Rahmen der Analyse angepasst und unterscheidet sich somit von der ursprünglich in der Literatur zu findenden. Dies ist in Abbildung 15 durch ein Stiftsymbol gekennzeichnet. Die übrigen zwei Herausforderungen, die im Projekt identifiziert worden sind, sind in der analysierten Literatur nicht zu finden und werden mit einem Sternsymbol markiert.

Durch den Vergleich der Herausforderungen wird deutlich, dass die Adressierung von Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung vielseitige Herausforderungen mit sich bringt. Die Entwicklung nachhaltiger Produkte muss im Rahmen der Methodenentwicklung und -weiterentwicklung zielgerichtet unterstützt und dabei der Transfer in die Industrie ebenfalls fokussiert werden.

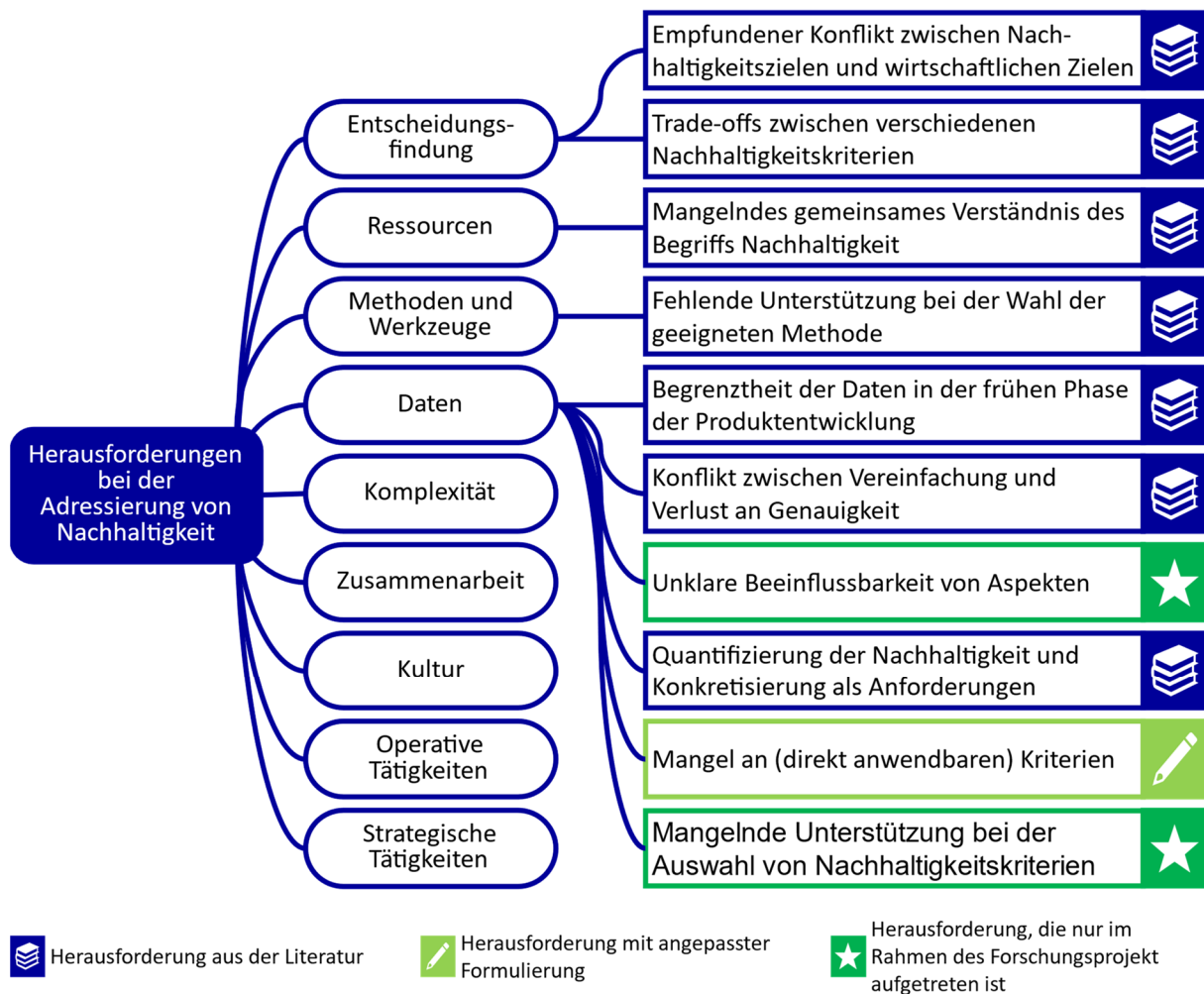


Abbildung 15: Einordnung der im Projekt aufgetretenen Herausforderungen nach Zumach et al. [TU-07]

2.4.2 Auswahl einer Erhebungsmethode

Ziel der Erhebungsmethode für das Projekt RECab ist es, mit deren Hilfe einen tiefgehenden Einblick in die entwickelten Konzepte und die zugrundeliegenden Technologien zu erhalten. Die Technologievalidierung soll somit eine zusammenfassende Betrachtung der Technologien aus Nachhaltigkeitssicht ermöglichen und ergänzt die in AP 3.3 durchgeführten Analysen zum klimaneutralen Produktlebenszyklus. Hierbei ist klar abzugrenzen, dass keine Validierung aus Nutzersicht durchgeführt wird. Als Anwendungsbeispiele aus dem Projekt dienen in Abstimmung mit LHT die Frischwasserbetankung und Aero-FLAX.

Zur Auswahl der Erhebungsmethode werden Vor- und Nachteile verschiedener Erhebungsmethoden verglichen. Da eine geringe Anzahl an Experten für eine Befragung im Hinblick auf die ausgewählten Technologien in Frage kommt und ein vertieftes Verständnis der Technologien für eine Einschätzung in Bezug auf das vielseitige Themenfeld der Nachhaltigkeit notwendig ist, wird als Erhebungsmethode das leitfadengestützte Experteninterview gewählt. Durch diese qualitative primäre Datenerhebung können die Experten persönliche Erfahrungen und Meinungen teilen. Durch Rückfragen und ein individuelles Anpassen der Interviewfragen werden eventuelle Unklarheiten direkt adressiert und geklärt, sodass durch die reichhaltigen, detaillierten Informationen aus den Interviews ein umfassendes Bild zu den Technologien entsteht.

2.4.3 Konzeption des Interviewleitfaden für Experteninterviews

Um ein möglichst differenziertes Bild der Technologien zu erhalten, werden verschiedene Kategorien zur Abfrage in den Experteninterviews definiert, anhand derer sich der Interviewleitfaden strukturiert. Die verschiedenen im Leitfaden adressierten Kategorien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Im Interviewleitfaden thematisierte Kategorien

Kategorien im Interviewleitfaden
Ökologie
Ökonomie
Technik
Gesundheit/Sicherheit
Regulatorik
Stakeholder-Meinung
Innovation

In der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit werden neben spezifischen Fragen zu den Anwendungsbeispielen nach den aus Sicht der Experten zu berücksichtigenden Umweltauswirkungen bei der Bewertung einer Technologie gefragt sowie nach dem Einfluss verschiedener R-Imperative der Kreislaufwirtschaft im Entscheidungsprozess. Die Interviewfragen orientieren sich dabei an den in AP 1.1 definierten Nachhaltigkeitskriterien. In Bezug auf die ökonomische Dimension wird die Marktrelevanz nachhaltiger Kabinentechnologien sowie Hürden für die wirtschaftliche Integration abgefragt. Der Bereich der Gesundheit und Sicherheit, insbesondere inwieweit gesundheitliche oder sicherheitsrelevante Faktoren die Entwicklung und Integration nachhaltiger Kabinensysteme beeinflussen, deckt einen Teil der sozialen Dimension ab. In der Kategorie Technik wird nach besonders relevanten Anforderungen für die Validierung von Kabinensystemen gefragt sowie nach dem Potential von Prozessoptimierungen in Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit. Die Kategorie Regulatorik befasst sich mit Zulassungsthemen in Bezug auf die gewählten Technologiebeispiele. Im Bereich der Stakeholder-Meinung wird nach der Bedeutung von Feedback anderer Akteure bei der Validierung neuer Technologien gefragt. Schließlich wird mit der Kategorie Innovation abgefragt, inwiefern bei der Bewertung neuer Technologien deren Kompatibilität mit zukünftigen technischen Entwicklungen eine Rolle spielt und inwieweit das Technology Readiness Level (TRL) als Einstufung neuer Technologien im Unternehmen genutzt wird.

Innerhalb der Kategorien werden offene und geschlossene Fragentypen kombiniert. Diese Kombination ermöglicht einerseits ein freies Beantworten der Fragen, andererseits eine Vergleichbarkeit der Interviews. Der Interviewleitfaden enthält dabei zum einen allgemeingültige Fragen, die allen Interviewten unabhängig vom Technologiebeispiel gestellt werden, zum anderen an die jeweiligen Anwendungsfälle angepasste Fragen. Zur Prüfung der Fragen innerhalb des Interviewleitfadens ist ein Testlauf mit zwei wissenschaftlichen Mitarbeitenden des PKT, die ebenfalls in Luftfahrtforschungsprojekten tätig sind, durchgeführt worden und der Leitfaden auf deren Feedback basierend weiterentwickelt worden.

2.4.4 Durchführung der Experteninterviews für die Fallbeispiele

Der Leitfaden dient als Basis für die Befragung von Experten der beiden Technologien Frischwasserbetankung und AeroFLAX. Fünf Experten von LHT sind für die Interviews zur Verfügung gestanden, sodass drei Interviews zur Frischwasserbetankung und zwei Interviews zu AeroFLAX durchgeführt werden konnten. Der kleine Expertenkreis verdeutlicht hier noch einmal die Entscheidung für eine qualitative Erhebung, da das Wissen zu den jeweiligen Technologien auf eine geringe Anzahl an Experten beschränkt ist. Die Interviews werden während der Befragung aufgezeichnet, wobei die durchschnittliche Dauer der durchgeführten Interviews 45 Minuten beträgt. Auf Basis der erstellten Tonaufnahmen werden Transkripte der Interviews erstellt. Die Antworten der Experten werden anschließend anonymisiert zusammengefasst und an die interviewten Experten zur Prüfung und Freigabe verschickt.

2.4.5 Auswertung der Experteninterviews

Die Auswertung der Interviews erfolgt entlang der einzelnen Kategorien. Die Antworten auf die allgemeingültigen Fragen werden dabei zunächst unabhängig vom Anwendungsbeispiel gesammelt betrachtet, die fallspezifische Auswertung schließt sich an. Hierbei wird die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring [May94] durchgeführt, mithilfe derer die Interviewdaten strukturiert werden. Dadurch werden den jeweiligen Kategorien des Interviewleitfadens aus den Inhalten der Interviews abgeleitete Unterkategorien mit zugehörigen Kriterien zugeordnet. Im Folgenden wird deshalb je Kategorie zunächst auf die in der Inhaltsanalyse identifizierten Unterkategorien eingegangen, um die Inhalte der Gespräche abzubilden. Hierbei erfolgt eine kurze Einordnung der Hauptaspekte aus den Interviews und sofern möglich auch eine Anwendungsfallbezogene Einordnung.

Auswertung der Kategorie Ökologie

In der Kategorie Ökologie wird besonders über Emissionen und die Klimawirkung, auch durch Non-CO₂-Effekte, diskutiert. Dabei spielt der im Betrieb anfallende Treibstoffverbrauch eine große Rolle, aber auch weitere Ressourcen, zum Beispiel bezogen auf den Materialeinsatz oder Wasserverbrauch. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit werden Lebenszyklusanalysen diskutiert (siehe AP 3.3). Zudem werden Aspekte der Kreislaufwirtschaft, wie Recycling- oder Reparaturfähigkeit, für die beiden Anwendungsbeispiele beurteilt. Durch die teils offene Fragestellung im Leitfaden werden aus den Gesprächen auch Kriterien, wie Schallemissionen oder die Bildung von Kondensstreifen, identifiziert, die nicht gezielt um Leitfaden thematisiert sind. Innerhalb der Interviews wird deutlich und die generelle Erkenntnis bestätigt, dass besonders Gewichtseinsparungen und daraus resultierende Kerosineinsparungen im Betrieb als relevant betrachtet werden. Die dadurch generierten CO₂-Einsparungen stellen aus Sicht der Interviewten aktuell den größten Nachhaltigkeitshebel dar. Andere Aspekte, zum Beispiel in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft, ordnen sich dem unter. Wenngleich langfristig gesehen der Einsatz recycelter bzw. recycelbarer Materialien an Bedeutung gewinnen wird, bleibt das Gewicht der aktuell wichtigste Faktor. Zugleich spielen Reparaturfähigkeit und Langlebigkeit vor dem Hintergrund kostenintensiver Zertifizierungsprozesse laut den Experten bereits eine hohe Rolle in Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Betrieben wie LHT. Für die Frischwasserbetankung wird ökologisches Potential in Bezug auf die Nutzungsphase gesehen, bei AeroFLAX als nachwachsende Alternative zu konventionellen Kabinenmaterialien in Bezug auf die Rohstoffherkunft.

Auswertung der Kategorie Ökonomie

Die Interviews in der Kategorie Ökonomie thematisieren neben wichtiger Entscheidungskennzahlen den Markt und die Zahlungsbereitschaft der Kunden sowie die betriebliche Integration und damit verbundene Risiken. Hierbei wird hervorgehoben, dass neue Technologien in Bezug auf die Zahlungsbereitschaft der Kunden stets mit den bestehenden Lösungen am Markt konkurrieren. Denn nach Ein-

schätzung der Interviewten stehen weiterhin Komfort und Preis im Mittelpunkt einer Kaufentscheidung. Die Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Lösungen wird als eher gering eingeschätzt, sofern der Preis über dem der konventionellen Lösung liegt. Als Bewertungsgröße wird hierbei auch das Gewicht beziehungsweise die durch Gewichtsreduktion geringeren Kosten herangezogen. Die Luftfahrtbranche wird durch die Interviewten als eher zurückhaltend charakterisiert was die Einführung neuer Technologien angeht, da mit der Einführung einer Technologie stets auch ein betriebliches Risiko einhergeht.

Für AeroFLAX wird Potential darin gesehen, wenn Kabinenprodukte aus AeroFLAX als direkte Alternativen zu herkömmlichen Bauteilen angesehen werden, was einen Austausch der Produkte ermöglicht. Eine Voraussetzung hierfür ist aufgrund der geringen Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Lösungen die Konkurrenzfähigkeit von AeroFLAX zu herkömmlichen Werkstoffen hinsichtlich Kosten und mechanischer Eigenschaften. Die Füllstandsmessung ist aktuell als Retrofitlösung geplant, sodass Anpassungen des Konzepts für weitere Flugzeugmodelle noch ausstehen. Die Umsetzbarkeit im Rahmen des Retrofit wird als gut eingeschätzt, da keine umfangreichen Änderungen der bestehenden Architektur notwendig sind. Die Einsparungen der mitzuführenden Frischwassermenge, die durch die Retrofitlösung ermöglicht werden, führen zu einer wirtschaftlichen Attraktivität und einem hohen Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Auswertung der Kategorie Technik

In der Kategorie Technik wird betont, dass zur Bewertung der entwickelten Technologien stets der Vergleich zu bestehenden Lösungen gezogen wird, da diese als Status Quo eine Referenz darstellen. Die Entwicklung erfolgt iterativ, da beispielsweise die Orientierung an bestehenden Spezifikationen nicht immer gegeben ist und je nach Entwicklungsstand geprüft werden muss. Zudem wird der Integrationsaufwand in bestehende Systeme bewertet.

Bezogen auf AeroFLAX werden die mechanischen Eigenschaften von Glasfaserpaneelen als Referenzwerte herangezogen und dienen als Vergleichsgrößen. In Bezug auf die Füllstandsmessung wird Potential in Bezug auf Ressourcenschonung gesehen, da bestehende Prozesse optimiert werden, ohne dass eine grundlegende Änderung am bestehenden System notwendig wird.

Auswertung der Kategorie Gesundheit/Sicherheit

Auch in der Kategorie Gesundheit und Sicherheit wird der Vergleich zu bestehenden Lösungen gezogen, da hier zum einen produkt- und zum anderen prozessbezogene Risiken betrachtet werden müssen. Hierfür werden im Rahmen der Entwicklung und Integration nachhaltiger Systeme entsprechende Schutzmaßnahmen, bezogen auf die Produktionsprozesse v.a. zum Schutz der Mitarbeitenden, definiert.

Im Anwendungsbeispiel AeroFLAX umfassen diese beispielsweise das Tragen von Atemschutzmaske, Schutzbrille sowie Handschuhen, um gesundheitliche Risiken bei der Verarbeitung der Harzsysteme zu minimieren.

Auswertung der Kategorie Regulatorik

Brandschutzanforderungen und erforderliche Systemsicherheitsnachweise bilden zentrale Aspekte der Kategorie Regulatorik. Zur Qualifikation und Nachweisführung müssen entsprechende Tests für die jeweiligen Technologien durchgeführt werden. Der Status der jeweiligen Tests ist hierbei ein Indiz für die Reife der Technologien. Der Qualifikationsaufwand fällt je nach Technologie unterschiedlich aus.

Während AeroFLAX eine Technologie darstellt, für bisher erst wenige Erfahrungswerte vorliegen, können bei der Frischwasserbetankung Anforderungen bestehender Kabinensysteme herangezogen werden. Dennoch ist in beiden Fällen der Nachweis des gesamten Systems erforderlich, bei AeroFLAX der Nachweis des vollständigen Verbundsystems und bei der Füllstandsmessung der Nachweis der Systemsicherheit der Füllstandsmessung inklusive Auswerteeinheit und Funkmodul.

Auswertung der Kategorie Stakeholder-Meinung

Um die Meinung verschiedener Stakeholder einzubeziehen, muss zunächst ein Überblick über die von der Technologieänderung betroffenen Akteure erstellt werden. Relevante Stakeholder sind dabei Akteure der nachgelagerten Wertschöpfungsstufen, deren Prozess sich durch eine Änderung der Technologie ebenfalls ändert. Für Feedback herangezogen werden können beispielsweise Mitarbeitende der Produktion, aber auch das operative Personal in der Nutzungsphase sowie die Passagiere. Betont wird hierfür von den Experten die Notwendigkeit frühzeitiger Zusammenarbeit und kontinuierlicher Kommunikation mit den verschiedenen Stakeholdern.

Im Anwendungsbeispiel AeroFLAX wird deshalb aktuell Feedback aus der Fertigung eingeholt. Zudem werden auch Kabinencrew und für Instandhaltungsmaßnahmen zuständiges, technisches Personal als relevant angesehen. Bei der Füllstandsmessung wird vor allem die Umsetzbarkeit im operativen Feld betrachtet und hierfür bestehende Abläufe analysiert.

Auswertung der Kategorie Innovation

Zur Einschätzung des Reifegrades einer Technologie wird der Technology Readiness Level (TRL) herangezogen, wobei dieser laut Experten primär zur Kommunikation nach außen, insbesondere im amerikanischen Marktumfeld, dient. Intern durchlaufen die Technologien einen Stage-Gate-Prozess und werden zu definierten Zeitpunkten im Unternehmen bewertet. Hierbei spielt im Kontext Retrofit auch die Kompatibilität mit bestehenden Systemen eine Rolle. Nachhaltigkeitskriterien werden zunehmend stärker in die Bewertung der Technologien einbezogen, da dies zum einen regulatorisch gefordert, zum anderen durch die Gesellschaft erwartet wird. Als Hürde für die Einführung innovativer Technologien werden vor allem die hohen Sicherheitsanforderungen der Luftfahrtbranche angesehen, die bei Einführung und Integration berücksichtigt werden müssen.

2.4.6 Fazit zur kontinuierlichen Technologievalidierung

Die verschiedenen Kategorien im Interviewleitfaden verdeutlichen die vielfältigen Aspekte der Nachhaltigkeit sowie die Herausforderungen, die die Adressierung von Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung mit sich bringt. Eine Bewertung der entwickelten nachhaltigen Kabinenlösungen auf Konzeptebene kann zunächst nur qualitativ erfolgen, wobei häufig auch bestehende Lösungen am Markt als Referenz herangezogen werden. Die in AP 1.1 erarbeiteten Nachhaltigkeitskriterien können als Basis für eine Bewertung dienen, wenngleich eine gleichzeitige Betrachtung verschiedener Kriterien zu Zielkonflikten und letztlich zu einem Abwägen der Aspekte führt. Mithilfe des Interviewleitfadens können gezielt verschiedene Aspekte der Anwendungsbeispiele innerhalb der Kategorien abgefragt werden. Durch die Einblicke der Experten entsteht somit ein umfassendes Bild der Technologien. Hierbei handelt es sich allerdings um qualitative Einschätzungen der befragten Experten. Eine Nachhaltigkeitsbewertung sollte stets auf Basis definierter Kriterien und Indikatoren erfolgen. Die Ergebnisse aus dem Interviewleitfaden können diese um inhaltliche Tiefe ergänzen. Eine tatsächliche Validierung der Technologien kann jedoch erst im Marktumfeld erfolgen, da dann die Nutzersicht einbezogen werden kann.

2.5 AP 3.3: Analysen und Auswertungen zu einem klimaneutralen

Produktlebenszyklus

2.5.1 Analysen und Auswertung der Verwendung alternativer Materialien

Dieses Unterkapitel fasst die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher material- und strukturbezogener Gestaltungskonzepte für Kabinenbauteile zusammen. Untersucht wurden Sandwichpaneele, wie sie typischerweise in Flugzeugkabinen eingesetzt werden, sowie deren Potenzial zur Reduktion klimarelevanter Emissionen durch den Einsatz alternativer, insbesondere biobasierter Materialien.

Die Bewertung erfolgt mittels komparativer Ökobilanzierung, die den gesamten Produktlebenszyklus der betrachteten Konzepte berücksichtigen. Auf diese Weise soll aufgezeigt werden, in welchem Umfang alternative Materialkonzepte gegenüber dem Stand der Technik zu einer Verbesserung der Klimabilanz beitragen können und welche Einflussgrößen dabei besonders relevant sind.

Systemgrenzen und funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit wird der fiktive Einsatz der untersuchten Sandwichpaneele als Teile eines Flugzeugkabinenmonuments definiert. Die Nutzungsphase wird über eine Lebensdauer von sieben Jahren mit insgesamt 20 800 Mittelstreckenflügen modelliert. Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen werden nicht berücksichtigt, da es sich bei den untersuchten Komponenten um einfache Strukturbauteile handelt.

Die Systemgrenzen umfassen:

- Rohstoffgewinnung und -verarbeitung,
- Herstellung der Paneele,
- Transporte zwischen den Lebensphasen,
- Nutzung (insbesondere kraftstoffbedingte Emissionen),
- End-of-Life-Szenarien (Verbrennung, Deponie, potenzielles Recycling).

Zur Bewertung der Klimawirkung wird der Indikator Global Warming Potential (GWP 100) gemäß IPCC verwendet, der Emissionen in CO₂-Äquivalente über einen Zeithorizont von 100 Jahren umrechnet.

Untersuche Gestaltungskonzepte

Untersucht werden insgesamt fünf unterschiedliche Sandwichpaneel-Konzepte:

- Referenzpaneel:
Glasfaser-Deckschichten mit Aramid-Wabenkern und phenolischem Harz, entsprechend dem aktuellen Stand der Technik in der Flugzeugkabine.
- Alternative Konzepte:
Paneele mit Flachsfaser-Deckschichten und biobasiertem PFA-Harz, kombiniert entweder mit
 - einem konventionellen Aramid-Wabenkern oder
 - einem biobasierten Flachsfaser-Faltkern.

Zusätzlich werden beide alternativen Kernvarianten jeweils mit einer Powerrib-Verstärkung untersucht. Dabei handelt es sich um ein grobmaschiges Flachsfaser-Netz zur Erhöhung der Biegesteifigkeit der Deckschichten. Neben materialseitigen Nachhaltigkeitspotenzialen bieten Faltkerne zudem funktionale Vorteile, etwa durch offene Strukturen zur Integration von Leitungen oder Sensorik.

Datenbasis und Annahmen

Da es sich bei den alternativen Materialien teilweise um noch nicht industriell etablierte Konzepte handelt, ist die Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Rohstoffdaten können nur teilweise aus der Ecoinvent-Datenbank bezogen werden (z. B. Glasfasern). Für andere Materialien, wie Aramidfasern oder biobasierte Harze, müssen Ersatzprozesse, Literaturwerte oder begründete Annahmen herangezogen werden.

Die Fertigung der Biegebalken wird modellhaft für eine Herstellung in den Laboren der TUHH angenommen. Herstelleranfragen liefern aufgrund des Entwicklungsstands der Materialien keine belastbaren Ökobilanzdaten. Insgesamt ist die Sachbilanz daher mit größeren Unsicherheiten behaftet, erlaubt jedoch einen qualitativen und vergleichenden Überblick.

Ergebnisse der Ökobilanzierung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Referenzpaneel im untersuchten Fall das höchste GWP-100 aufweist. Die alternativen Konzepte mit Flachsfaser-Deckschichten ohne zusätzliche Verstärkung erreichen etwa 95 % des GWP-Werts des Referenzpaneels. Deutlich bessere Ergebnisse zeigen die Varianten mit Powerrib-Verstärkung, die lediglich 81–82 % des Referenzwerts erreichen.

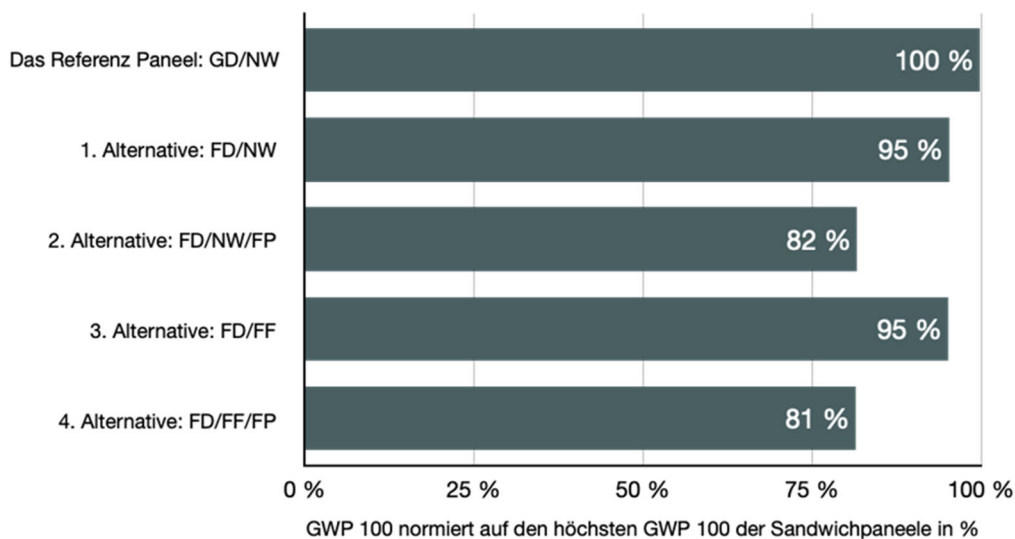


Abbildung 16: Vergleich der Ökobilanz der alternativen Sandwichpaneel für den untersuchten Lastfall

Eine Analyse der Verteilung der Emissionen über die Lebensphasen macht deutlich, dass die Nutzungsphase mit rund 99 % den mit Abstand größten Beitrag zum GWP leistet. Dieses Ergebnis wurde durch externe Quellen abgesichert, unter anderem durch Environmental Product Declarations aus der Luftfahrtindustrie, die ähnliche Anteile ausweisen.

Einfluss nachhaltiger Flugkraftstoffe (SAF)

Um zukünftige Entwicklungen hin zu klimaneutralem Fliegen zu berücksichtigen, wird der Einfluss von Sustainable Aviation Fuels (SAF) untersucht. SAF wird aus biogenen Rohstoffen oder Abfallprodukten hergestellt und kann in bestehenden Triebwerken eingesetzt werden. Obwohl bei der Verbrennung CO₂ entsteht, handelt es sich um biogenes CO₂, das zuvor der Atmosphäre entzogen wurde, und somit als klimaneutral angesehen werden kann.

Untersucht wurden SAF-Anteile von 63 % (entsprechend aktuellen EU-Zielsetzungen) sowie 100 %. Die Ergebnisse zeigen:

- Bei 63 % SAF reduziert sich der GWP-Wert der Nutzungsphase auf etwa 40 % des Ausgangswerts.
- Bei 100 % SAF kann dieser Wert sogar auf etwa 4 % sinken.

Trotz dieser deutlichen Reduktion bleibt die Nutzungsphase selbst bei vollständigem Einsatz von SAF mit 80–85 % der Gesamtemissionen die dominierende Lebensphase. Damit behält das Bauteilgewicht weiterhin den größten Einfluss auf die ökologische Gesamtbewertung.

Vergleich unterschiedlicher Auslegungspunkte

Ein weiterer Vergleich zeigt, dass keine pauschal nachhaltigste Gestaltungsvariante identifiziert werden kann. Je nach mechanischem Auslegungspunkt (z. B. Steifigkeits- und Lastanforderungen) können unterschiedliche Konzepte die besten Ergebnisse erzielen. Ursache hierfür sind materialspezifische Schwellenwerte, ab denen zusätzliche Decklagen erforderlich werden und somit das Gewicht – und damit auch die Emissionen – steigt.

Dies verdeutlicht, dass ökologische Optimierung im betrachteten Fall im Zusammenhang mit der mechanischen Auslegung erfolgen muss und keine isolierte Materialbetrachtung möglich ist.

Zusammenfassung zur Verwendung alternativer Materialien

Die Untersuchungen zeigen, dass alternative, biobasierte Sandwichpaneel-Konzepte Potenziale zur Reduktion klimarelevanter Emissionen aufweisen, insbesondere bei geeigneter struktureller Auslegung mit begleitender Ökobilanzierung. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Nutzungsphase – selbst bei Einsatz nachhaltiger Flugkraftstoffe – den größten Einfluss auf die Klimabilanz besitzt. Eine ganzheitliche Bewertung muss daher stets Gewicht, Materialwahl, Auslegungspunkt und zukünftige Rahmenbedingungen gemeinsam berücksichtigen.

2.5.2 Analysen und Auswertungen der Grauwasserwiederverwendung

Das zweite im Rahmen des Projektes untersuchte Konzept ist die Weiterverwendung von Handwaschwasser zur Spülung der Bordtoiletten mittels einer Grauwasser-Wiederverwendungsanlage (siehe Abbildung 17). Diese besteht aus verschiedenen Komponenten, die sowohl initial in neuen Flugzeugen als auch im Rahmen eines Retrofits in bestehenden Flugzeugen nachgerüstet werden können. Im Rahmen von RECab wird die Retrofit-Lösung, also Nachrüstung in bestehenden Flugzeugen, betrachtet. Nachgerüstet werden hierzu vor allem die Komponenten

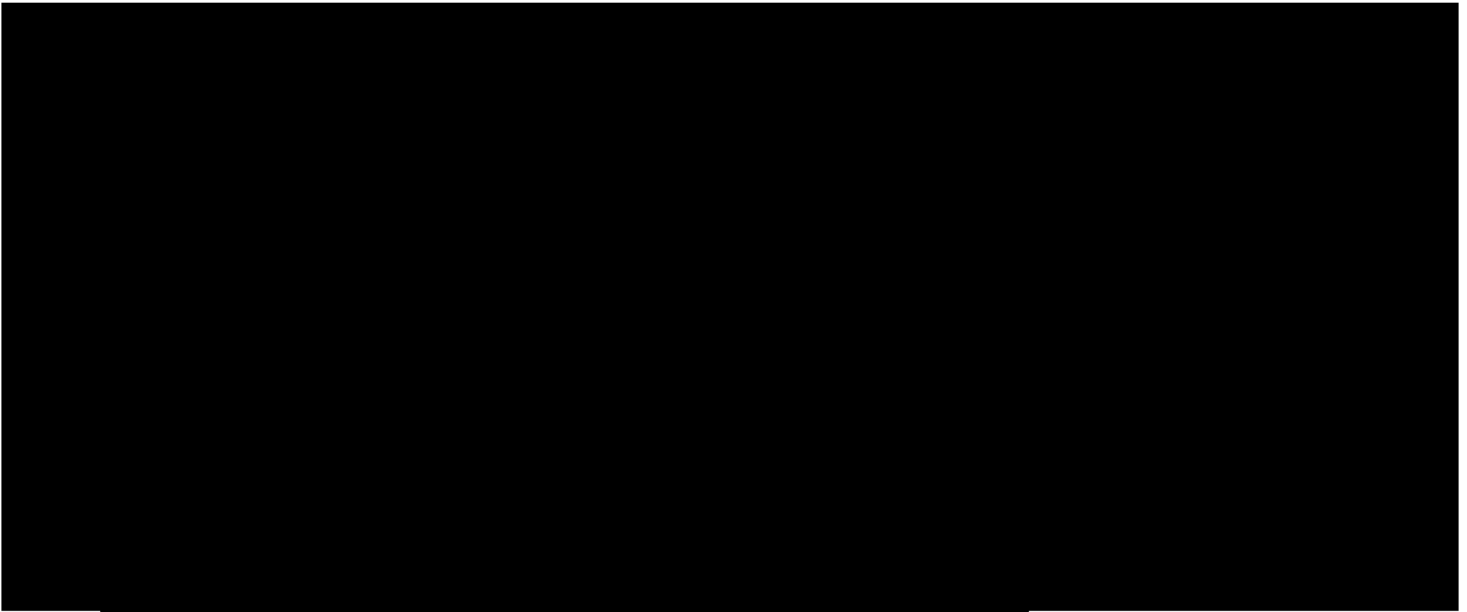


Abbildung 17: Brauchwasser-Wiederverwendungssystem

Systemgrenzen und funktionelle Einheit

Für die Analyse wird grundsätzlich entsprechend eines Cradle-to-Grave Ansatzes der komplette Lebenszyklus des Systems von der Herstellung und Beschaffung der Rohstoffe über die Herstellung und Nutzung des Systems selbst bis hin zur Entsorgung/ Verwertung nach der Nutzung bestmöglich betrachtet. Als funktionelle Einheit wird die Nutzung des Grauwasserwiederverwendungssystems an Bord eines [redacted] auf Langstreckenflügen über einen Zeitraum von sieben Jahren verwendet. Nicht berücksichtigt werden mangels Daten jedoch in der Fertigung Arbeitsschritte zur Herstellung und Beschichtung eingesetzter Metallfilter sowie die Montage.

Datenbasis und Annahmen

Die Ökobilanzierung erfolgte auf Basis der Angaben des Projektpartners hinsichtlich Materialien und Herstellungsverfahren der verschiedenen Komponenten, bei denen es sich jedoch um Annahmen zu einem in Entwicklung befindlichen System handelt.

Rohstoffe



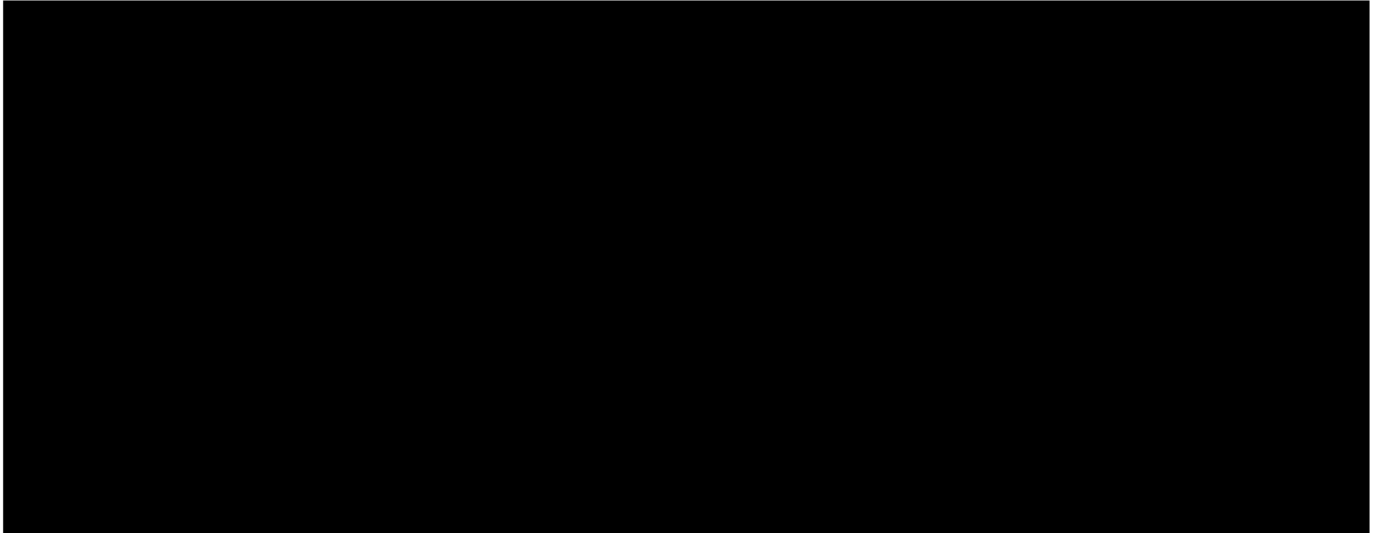
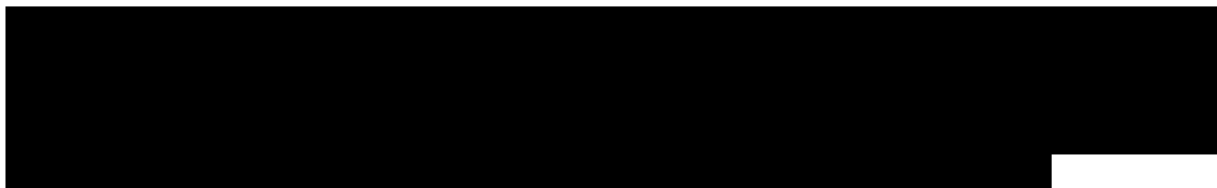


Abbildung 18: Verteilung Gewicht und Material-Emissionen

Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase wird die Nachrüstung des Systems in einen [redacted] angenommen. Zur Ermittlung der möglichen Einsparungen werden Daten für 21 [redacted] im Portal Flightera ausgewertet und die mittlere Flugdistanz sowie die mittlere Anzahl jährlicher Flüge über alle Flugzeuge ermittelt. Für die mittlere Flugdistanz wird anschließend mit Hilfe des „Master emissions calculator 2023“ der European Environment Agency sowie Eurocontrol der Version 1.5 vom 18.09.2024 [Eur23] der Kerosinverbrauch je Flug ermittelt. Auf Basis dieser Verbrauchswerte kann so die Nutzungsphase in Ökobilanzierungssoftware Umberto modelliert werden.

Ergebnisse



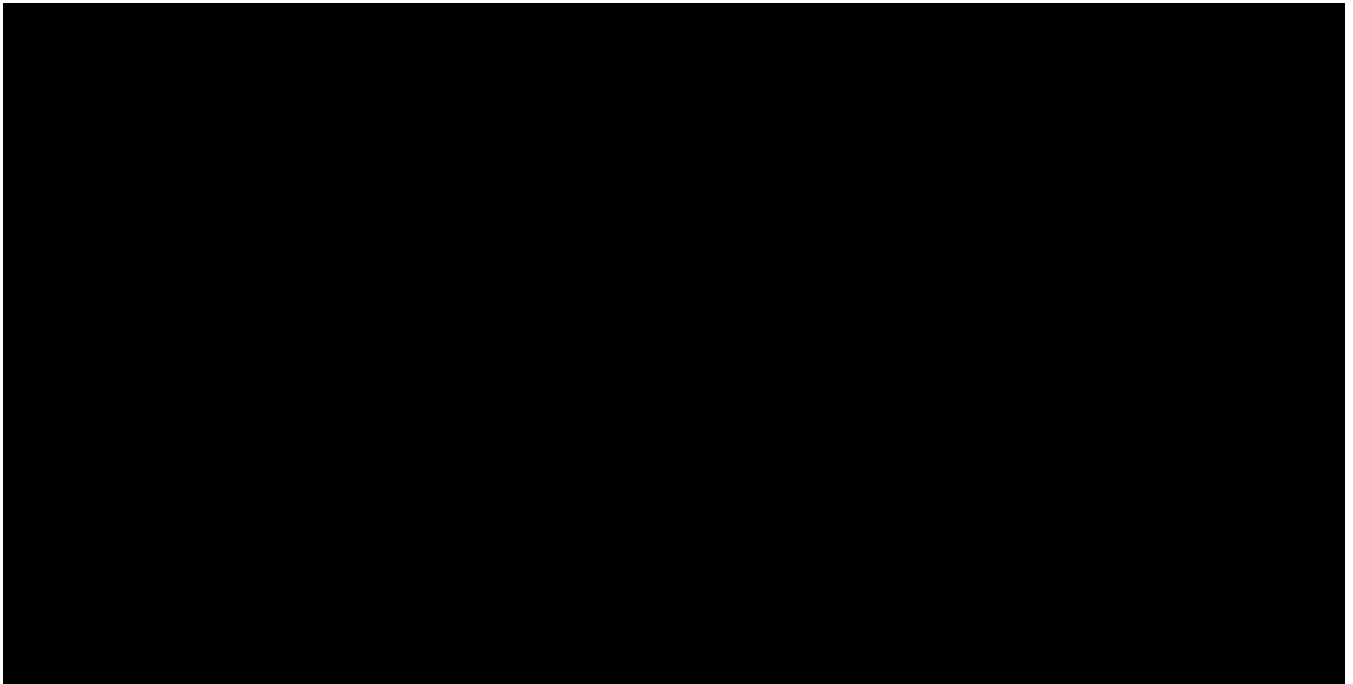


Abbildung 19: Emissionen der Lebensphasen über den Lebenszyklus



2.5.3 Tool zur vereinfachten Abschätzung von Emissionen in frühen Entwicklungsphasen

Im Rahmen des Projektes ist zudem ein Tool zur Nachhaltigkeitsbewertung entwickelt worden, das Entwickler bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung bei fundierten Entscheidungsprozessen unterstützt. Ziel des Tools ist es, ökologische Auswirkungen unterschiedlicher Produkt- oder Bauteil-konzepte in der Luftfahrt vergleichbar und transparent darzustellen, obwohl in der Konzeptphase häufig nur begrenzte Informationen vorliegen. Der entwickelte Ansatz schließt damit eine bestehende Lücke zwischen aufwendigen Lebenszyklusanalysen und rein qualitativen Abschätzungen in frühen Konzept- und Entwicklungsphasen.

Methodisch orientiert sich das Tool an etablierten Standards der Lebenszyklusanalyse, insbesondere an ISO 14044, und nutzt das Treibhauspotenzial über 100 Jahre (GWP100) als zentrale Bewertungsgröße. Die Umweltwirkung wird in Kilogramm CO₂-Äquivalenten ausgedrückt. Betrachtet werden hier im Luftfahrtkontext zwei Hauptphasen: die Rohstoff- bzw. Materialphase sowie die Nutzungsphase. In

der Rohstoffphase werden die Emissionen der eingesetzten Werkstoffe auf Basis öffentlich zugänglicher LCA-Daten aus der Idemat-Datenbank⁸ ermittelt. Dabei können auch Rezyklatanteile berücksichtigt werden. Die Nutzungsphase bildet den Emissionsbeitrag ab, der durch zusätzliches Gewicht oder erzielte Einsparungen im Flugbetrieb entsteht und trägt somit den spezifischen Anforderungen im Luftfahrtkontext Rechnung. Hierfür werden streckenspezifische Emissionskennwerte verwendet, die auf realen Flugbetriebsdaten beruhen.

Der Bewertungsansatz ist bewusst flexibel ausgelegt. Eingangsgrößen, wie Bauteilgewicht, Materialzusammensetzung, Lebensdauer, Einsatzstrecke sowie Reparaturhäufigkeit, lassen sich flexibel anpassen. Dadurch bleibt das Tool auch bei unsicheren oder geschätzten Daten aussagekräftig und ermöglicht einen belastbaren Variantenvergleich.

Die exemplarische Umsetzung erfolgte in Form eines Excel-Tools (siehe Abbildung 20). Dieses ist in mehrere, logisch getrennte Bereiche gegliedert, bestehend aus Eingabe-, Berechnungs- und Ergebnisdarstellung. Die Benutzeroberfläche erlaubt die parallele Bewertung zweier Bauteilvarianten und stellt die Ergebnisse sowohl numerisch als auch grafisch dar. Ein besonderer Fokus liegt auf Transparenz: Sämtliche Berechnungen und Kennwerte sind für den Anwender einsehbar und anpassbar.

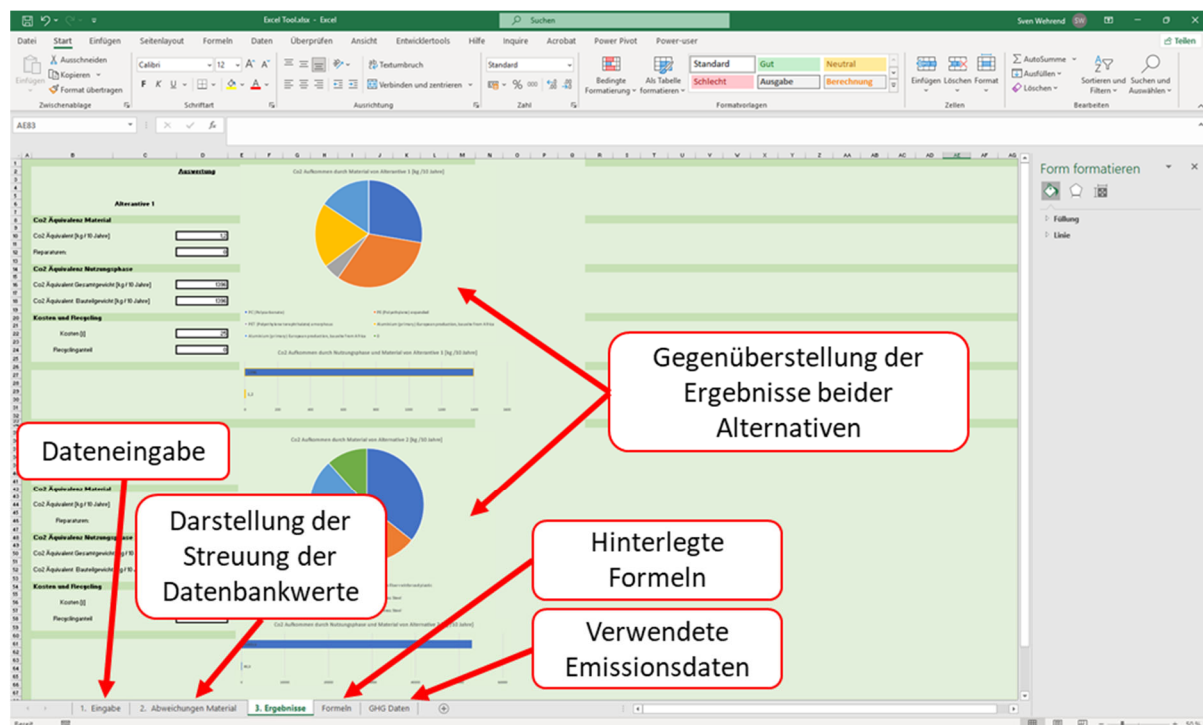


Abbildung 20: Ausschnitt der exemplarischen Umsetzung in Excel

Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass insbesondere das Bauteilgewicht einen dominanten Einfluss auf die Gesamtbilanz besitzt, da die Emissionen der Nutzungsphase die der Materialphase deutlich übersteigen. Das entwickelte Tool erweist sich damit als praxistaugliche Entscheidungshilfe für die frühe Produktentwicklung und liefert eine belastbare Grundlage zur ökologischen Optimierung von Flugzeugkabinenteilen

⁸ Idemat-App: „Materialdaten und dessen CO2-Footprints“, 2024, <https://idematapp.com>, Datensatz verfügbar unter <https://www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/>

2.5.4 Erweiterung des Wirkmodells modularer Eigenschaften

Das am PKT entwickelte Wirkmodell modularer Produktstrukturen zeigt den Zusammenhang zwischen Eigenschaften und Merkmalen von Modularität und den betrieblichen Zielgrößen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* und *Flexibilität* in den verschiedenen Lebensphasen eines Produkts [Sch22]. Im Projekt RECab ist dieses Modell um die Zielgröße *Nachhaltigkeit* erweitert und ein luftfahrtspezifisches Wirkmodell abgeleitet worden.

Hierfür wurden zunächst literaturbasiert Effekte modularer Produkte auf die Nachhaltigkeit untersucht. Darauf aufbauend wurden neue Wirkzusammenhänge mit Bezug zur Nachhaltigkeit erarbeitet. Da viele relevante Effekte erst nach Nutzung auftreten, etwa eine einfachere Wiederverwendung von Modulen, wird das Modell um die Lebensphase „End of Life“ ergänzt, welche an die bestehende Phase „Service“ anschließt. Zudem wird die Benennung der Zielgrößen von „wirtschaftliche Zielgrößen“ auf „betriebliche Zielgrößen“ geändert, um Widersprüche zu den sozialen und ökologischen Aspekten der Nachhaltigkeit zu vermeiden.

Der grundlegende Aufbau des Wirkmodells ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Eigenschaften und Merkmale der Modularität verursachen Primäreffekte in verschiedenen Produktlebensphasen, die über Sekundäreffekte die betrieblichen Zielgrößen beeinflussen. Dabei liegt der Fokus auf den Eigenschaften „Kommunale Verwendung“ und „Kombinierbarkeit“, da die Merkmale vorwiegend einzelne Module beschreiben und deren Ausprägung der Eigenschaften auf übergeordneter Ebene einer ganzen Familie erst ermöglichen. Verschiedene Nachhaltigkeitseffekte werden ergänzt: Einige basieren auf bestehenden Primäreffekten, die um Sekundäreffekte erweitert sind (Kette 1), andere sind neue Primäreffekte, die separat hinzugefügt sind (Kette 2).

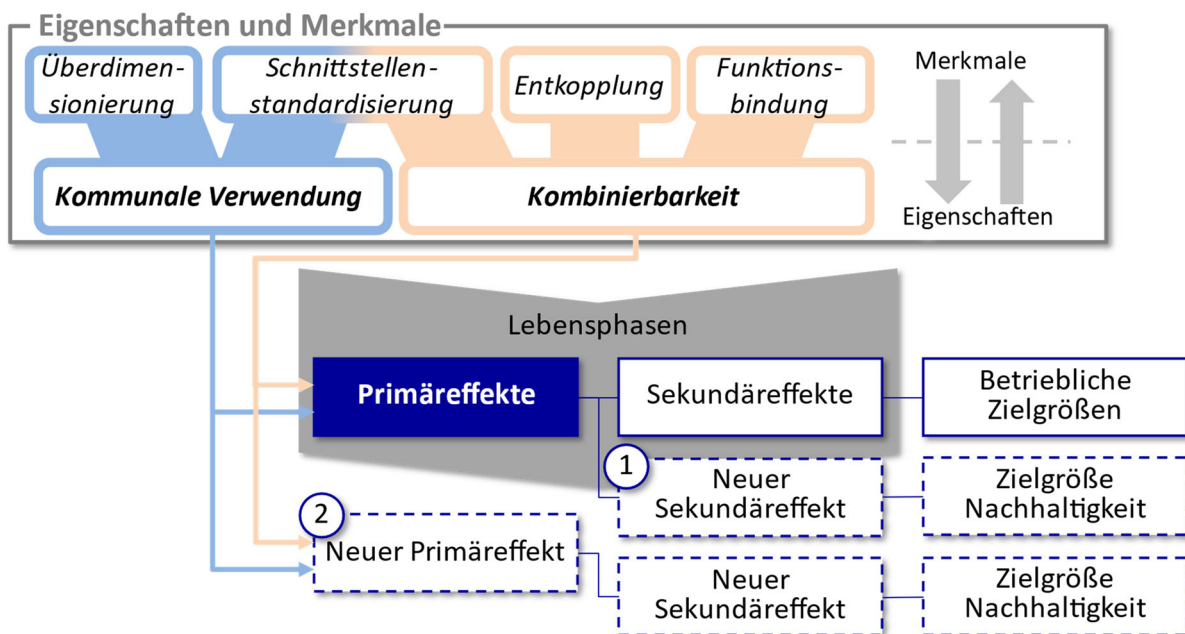


Abbildung 21: Möglichkeiten zur Ergänzung neuer Wirkketten des Wirkmodells in Anlehnung an [Sch22]

Eine explizite Rückführung neuer Primäreffekte auf die Eigenschaften und Merkmale der Modularität ist nicht bei allen recherchierten Effekten explizit angegeben. Oft wird allgemein Modularität genannt, ohne sie weiter zu spezifizieren, und gleiche Effekte werden in verschiedenen Quellen unterschiedlich begründet. Wo keine klare Rückführung möglich ist, erfolgt diese auf Basis institutseigener Erfahrungen aus Anwendungsprojekten oder anhand der Häufigkeit der Nennungen, um die Konsistenz des

Wirkmodells zu gewährleisten. Am häufigsten werden in der Literatur Effekte genannt, die der Kreislaufwirtschaft beziehungsweise den verschiedenen R-Imperativen zugeordnet sind. Diese treten vorwiegend in den Lebensphasen Nutzung, Service und End of Life auf.

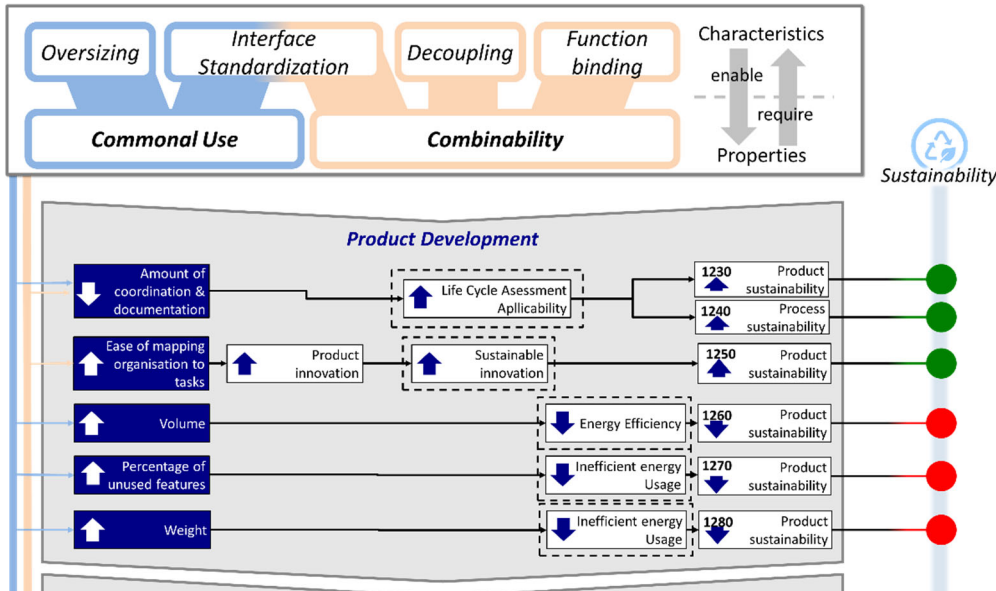


Abbildung 22: Neue Wirkketten der Lebensphase „Produktentwicklung“ zur Zielgröße Nachhaltigkeit

Modularität wirkt sich beispielsweise positiv auf Wartbarkeit und Instandhaltung aus und trägt so zu einer längeren Produktlebensdauer bei. Dieser Effekt wird mehrfach genannt, aber auf unterschiedliche Eigenschaften der Modularität zurückgeführt (siehe Tabelle 2). Die übrigen Effekte wurden ebenfalls mit Anzahl der Nennungen dokumentiert und entsprechend den Eigenschaften und Merkmalen der Modularität zugeordnet, um die Grundlage zur Erweiterung des Wirkmodells um die Nachhaltigkeit zu schaffen.

Merkmale/Eigenschaften	Anzahl der Nennungen	Belege
Entkopplung	6	[Sel08, Ume08, Fuk09, Yan14b, Wan18, Kim20a]
Schnittstellendarstellung	3	[Ülk17, Han20, Ame22]
Kommunalität	3	[Bry04, Tse08, Mes18]
Funktionsbindung	1	[Go15]

Tabelle 2: Verbesserte Instandhaltung

Insgesamt konnte das Wirkmodell so im Rahmen des Projektes um 21 neue Wirkketten für die Zielgröße Nachhaltigkeit ergänzt werden, welche überwiegend die ökologische Nachhaltigkeit adressieren. Die soziale Nachhaltigkeit wird von drei Wirkketten (3190, 3200 sowie 4100) adressiert. Eine mögliche Ursache für die überwiegende Anzahl ökologischer Ketten, liegt in Tatsache, dass ökonomische Aspekte bereits im bestehenden Modell implizit enthalten sind. Ökologische und soziale Dimension hingegen stellen neue Zielgrößen dar, welche durch die neuen Wirkketten erstmals im Wirkmodell erschlossen werden.

Diese neuen Wirkketten wurden in das bestehende SysML-Wirkmodell eingepflegt. Das in SysML umgesetzte Modell dient dabei als zentrale Datenbasis für die Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Konzeptalternativen auf die unternehmerischen Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität und nun auch Nachhaltigkeit in den verschiedenen Lebensphasen eines Produktes. Während für die Arbeit in Workshops das visuellere PowerPoint-Modell genutzt wird, erfolgt die Datenpflege sowie die Verwaltung der in den Workshops gesammelten Use-Cases in SysML. In Abbildung 23 ist ein Ausschnitt des SysML-Wirkmodells mit den neu modellierten Wirkketten für die Zielgröße Nachhaltigkeit der Lebensphase Produktentwicklung zu sehen.

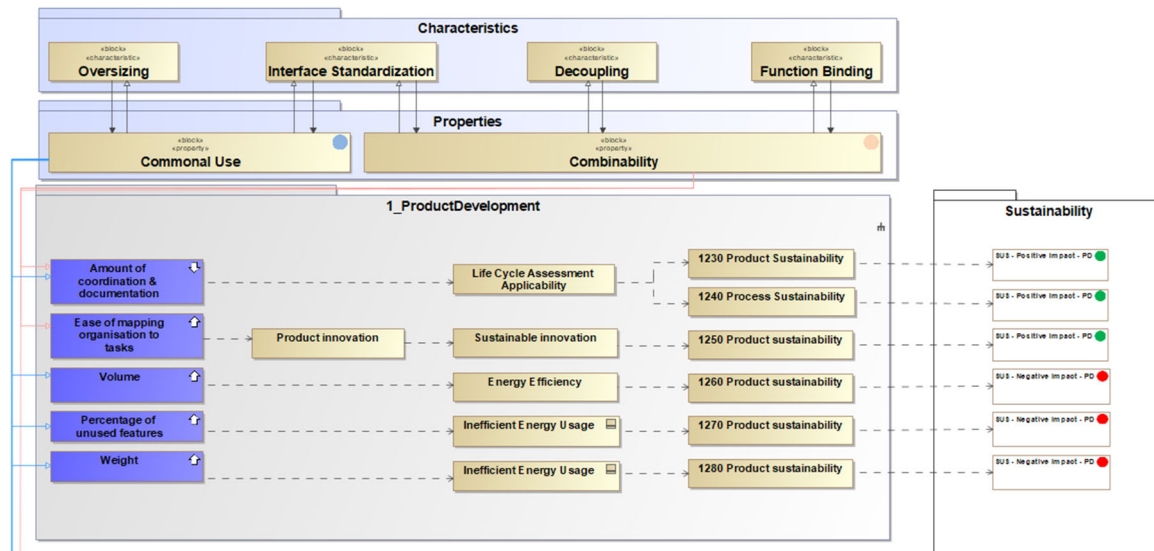


Abbildung 23 : Ausschnitt der neuen Wirkketten zur Zielgröße Nachhaltigkeit in Cameo Systems Modeller

Die neu identifizierten und im Wirkmodell ergänzten Wirkketten zur Zielgröße Nachhaltigkeit wurden anschließend im Rahmen eines Workshops Teilnehmern der Projektpartner Diehl Aviation Hamburg, Lufthansa Technik sowie HAW Hamburg vorgestellt und diskutiert. Im Rahmen der Diskussionen konnte noch einmal wertvolles Feedback gesammelt und direkt diskutiert und dokumentiert werden. So wurden von den Projektpartnern aus ihrer Sicht relevante Wirkketten markiert, Vorschläge zur Streichung und Zusammenführung einiger Wirkketten gemacht und eine Wirkkette hinsichtlich ihrer Auswirkung dahingehend hinterfragt, dass einige Teilnehmer einen Inversen, negativen Effekt sahen. Zudem wurde die Ergänzung weiterer Sekundäreffekte vorgeschlagen sowie luftfahrtspezifische Besonderheiten ergänzt. So werden in der Luftfahrt beispielsweise die Begriffe Overhaul und Reparatur klar unterschieden, Upgradebarkeit macht aus Sicht der Projektpartner in erster Linie im Softwarebereich, sowie auf Ebene ganzer Monumente Sinn, nicht jedoch auf Komponentenebene.

Ergänzend dazu wurden in einem zweiten Teil des Workshops die bestehenden Wirkketten zu den unternehmerischen Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität und Flexibilität mit den Teilnehmern der Projektpartner diskutiert, mit dem Ziel die Relevanz der einzelnen Wirkketten im Luftfahrtkontext zu bewerten. Insgesamt konnte so das Wirkmodell modularer Produktfamilien im Rahmen des Projektes um die Zielgröße Nachhaltigkeit ergänzt und im Luftfahrtkontext relevante Wirkketten identifiziert werden. Die bildet die Ausgangsbasis für weitere Forschung und die Validierung der neuen Wirkketten in weiteren Industrieprojekten.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

- **Lizenzen**
Für die Lebenszyklusanalysen wurden Lizenzen für die Ökobilanzsoftware Umberto sowie für die Lebenszyklus-Datenbank ecoInvent erworben (Position 0850-1). Darüber hinaus wurde der SysML Cameo Systems Modeller in der Vollversion (Position 0850-2) beschafft, um die Erweiterung des Wirkmodells im bestehenden Systemmodell abzubilden und zu modellieren. Zusätzlich wurde für Veröffentlichungen und Lehrzwecke eine Studentenversion (Position 0850-3) erworben.
- **Notwendige Hardware für Laborversuche**
Zur Durchführung von Laborversuchen wurden bestehende Prüfaufbauten umgebaut und neu beschafft (Biegevorrichtung für Laminat, Position 0850-4) und Versuchsmaterialien (u.a. Sandwichstrukturen/Wabenkerne/Faserverbund-Gewebe/Druckmaterial) für die Probenfertigung und Demonstratoren beschafft.

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 Kapitel 7.1 Veröffentlichungen), zugänglich gemacht ist, andererseits aber auch die forschungsnahe Ausbildung von Studierenden. Parallel zum Verlauf des Projektes ist die Einbindung in die Lehre erfolgt, beispielsweise durch die Durchführung studentischer Arbeiten oder die Einführung der neuen Lehreinheit „Modularisierung als Basis für die Circular Economy“ in die neue Ringvorlesung zu dem Thema *Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung*, organisiert von der Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) als online-Veranstaltung für die zwölf beteiligten Universitäten, darunter auch die TUHH (siehe Kapitel 7.2 Studentische Arbeiten & Kapitel 7.3 - Vorträge und weitere Einbindung in die Lehre). Weiterhin wurden die Ergebnisse durch das Mitwirken in Netzwerken und Kompetenzzentren – wie beispielsweise dem Forum des Luftfahrtclusters Hamburg Aviation oder dem Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung (ZAL) – im Rahmen von Vorträgen vorgestellt und diskutiert (siehe Kapitel 7.3 - Vorträge und weitere Einbindung in die Lehre). Die Forschungsergebnisse fließen auch in weiterführende Projekte in den Themenfeldern Entwicklung nachhaltiger Produkte und ökologischer Leichtbau, insbesondere in die LuFo VI-3 Projekte DISKUS und eKabKlima mit ein.

6 Fortschritt anderer Stellen

Es wurde kein uns bekannter Fortschritt an anderen Stellen erzielt.

7 Veröffentlichungen, Vorträge

Im Folgenden sind die im Rahmen des Projekts erfolgten Veröffentlichungen sowie die durchgeführten studentischen Arbeiten, Vorträge und die Einbindung in die Lehre aufgeführt.

7.1 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts

- [TU-01] 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, Italien, 2024. <https://doi.org/10.15480/882.13645>
- [TU-02] Berschik, M. C.; Wehrend, S.; Laukotka, F. N.; Krause, D.: Digitalisation and Sustainability in Cabin Design: Synergies and Dependencies, 34th Congress of the International Council of The Aeronautical Sciences (ICAS 2024), Florenz, Italien, 2024. <https://doi.org/10.15480/882.13381>
- [TU-03] Schellhorn, J.; Schwan, L.; Krause, D.: Optimization of the potting design using an approach for load path optimized designs of sandwich structures, Proceedings of the Design Society 4:3013-3022, May 2024. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.305>
- [TU-04] Wehrend, S.; Schwan, L.; Zumach, K.; Krause, D.: Potenziale zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Flugzeugkabine, 73. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK 2024), Hamburg, 2024. <https://doi.org/10.25967/630191>
- [TU-05] Krause, D.; Schwan, L.; Wehrend, S.; Zumach, K.: Steigerung der Nachhaltigkeit im Luftverkehr - Potentiale rund um die Flugzeugkabine, Luft- & Raumfahrt, ISSN 0173-6264, Ausgabe 46, 2/2025, Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. (DGLR), 2025.
- [TU-06] Schwan, L.; Zumach, K.; Wehrend, S.; Schellhorn, J.; Krause, D.: Procedure for the multi-objective design and sustainability optimization of composite sandwich structures in aircraft cabin applications, Procedia CIRP, 2025, pp. 594-599. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.102>
- [TU-07] Zumach, K.; Wehrend, S.; Krause, D.: Challenges in addressing sustainability within product development, Proceedings of the Design Society, 5, Dallas, USA, 2025, pp. 901-910. <https://www.doi.org/10.1017/pds.2025.10104>
- [TU-08] Al-Ayoubi, R.; Wehrend, S.; Zumach, K.; Krause, D.: Ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung und -optimierung unter Nutzung kartografischer Generalisierung, 36th Symposium Design for X, DFX 2025, pp. 71-80. <https://doi.org/10.35199/dfx2025.08>
- [TU-09] Wehrend, S.; Zumach, K.; Krause, D.: Ansatz zur Berücksichtigung von Obsoleszenz im Rahmen der Entwicklung modularer Produktfamilien, 36th Symposium Design for X, DFX 2025, pp. 11-20. <https://doi.org/10.35199/dfx2025.02>
- [TU-10] Wehrend, S.; Zumach, K.; Schwan, L.; Krause, D.: Innovative Ansätze zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung, in Krause, D.; Bunk, L.; Bishop, F. D.; Christiansen F. H.; Sobirey, E. (Hrsg.): Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Forschungserkenntnisse und -projekte der Jahre 2021 bis 2025, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2025, pp. 75-95. https://doi.org/10.1007/978-3-662-72131-5_4

7.2 Studentische Arbeiten

Nachfolgend sind die studentischen (Abschluss-)Arbeiten aufgelistet, die im Rahmen des Projekts betreut wurden:

1. Onur Alakus, Entwicklung eines Konzepts zum Umgang mit Zielkonflikten in der Produktentwicklung im Kontext der Nachhaltigkeit, Masterarbeit, 2025

2. Omer Suliman, Literaturrecherche von Methoden zur Entwicklung nachhaltiger modularer Produktfamilien, Bachelorarbeit, 2025
3. Lejs Softic, Recherche und Analyse von Kriterien zur Bewertung von Nachhaltigkeit, Projektarbeit, 2025
4. Timo Nickel, Mechanische Charakterisierung von Aramid-Waben Sandwichstrukturen mit AeroFLAX Deckschichten, Projektarbeit, 2025
5. Stephen Andy Ong, Experimentelle Untersuchung des lokalen Druck- und low-velocity Impactverhaltens thermoplastischer Sandwichstrukturen, Masterarbeit, 2025
6. Rita Al-Ayoubi, Konzept zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in einen Ansatz zur Analyse industrieller Prozesse, Masterarbeit, 2024
7. Saurabh Bagwe, Experimentelle und simulative Potenzialanalyse für den Einsatz von AeroFLAX in der Flugzeugkabine, Masterarbeit, 2024
8. Jannik Bürger, Konzept zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeit bei Produktentwicklungsprozessen von Flugzeugkabinenprodukten am Beispiel ██████████, Masterarbeit, 2024
9. Samir Sabah, Analyse von Bewertungsmethoden für Leichtbaustrukturen unter Nachhaltigkeitskriterien, Bachelorarbeit, 2024
10. Umang Gupta, Untersuchung unterschiedlicher Gestaltungskonzepte in der Flugzeugkabine hinsichtlich ihrer Ökobilanz, Masterarbeit, 2024

7.3 Vorträge und weitere Einbindung in die Lehre

1. Wehrend, S.; Zumach, K.; Krause, D.: Ausgewählte Ergebnisse der TUHH im Projekt RECab. Öffentliche Projektvorstellung des Projekts *“RECab – A successful LuFo collaboration at the ZAL, leading industry partners & academic institutions, combining respective knowledge & strengths“*, 11. November 2025, Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung (ZAL), Hamburg.
2. Zumach, K.; Wehrend, S.; Krause, D.: Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung. Lehrinheit im Modul Methoden der Produktentwicklung, 24. Januar 2024, 15. Januar 2025 und 22. Oktober 2025, Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg. Auch geplant für das Wintersemester 2026/2027.
3. Zumach, K.; Wehrend, S.; Krause, D.: Modularisierung als Basis für die Circular Economy. Lehrinheit im Modul Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung – Ringvorlesung der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP), 17. Juni 2025, Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg. Auch geplant für das Sommersemester 2026.
4. Krause, D.; Schwan, L.; Hüttich, P.; Bunk, L.; Christiansen, F. H.: Modular lightweight design for sustainable aircraft cabins and structures, Aircraft Interiors Expo (AIX), Hamburg, 9th April 2025.
5. Schwan, L.; Wehrend, S.; Zumach, K.; Krause, D.: Ausgewählte Ergebnisse der TUHH im Projekt RECab. Vorstellung des Projekts RECab im Rahmen der European Sustainable Development Week (ESDW), 23. September 2024, Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung (ZAL), Hamburg. *Vorge stellt durch den Projektpartner Christoph Lieske (LHT)*.
6. Zumach, K.; Wehrend, S.; Krause, D.: Product Life Cycle and Circularity. Vortrag und Workshop im Rahmen der 6th International Summer School on Product Architecture Design PAD2024, 19. Juni 2024, Graduiertenakademie der Technischen Universität Hamburg (TUHH), Hamburg.

7.4 Zwischenberichte im Projekt RECab

[REC22] RECab. Resource Efficient Cabin. 1. Zwischenbericht der Technischen Universität Hamburg für den Berichtszeitraum 01.07.2022 bis 31.12.2022.

[REC23] RECab. Resource Efficient Cabin. 2. Zwischenbericht der Technischen Universität Hamburg für den Berichtszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023.

[REC24] RECab. Resource Efficient Cabin. 3. Zwischenbericht der Technischen Universität Hamburg für den Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.12.2024.

8 Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

[AST20a] ASTM C393/C393M-20. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2020. Last updated: July 30, 2020.

[AST20b] ASTM D7136/D7136M-15. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2015. Updated Nov 2, 2020.

[AST20c] ASTM D7249/D7249M-20. Standard Test Method for Facesheet Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2020. Updated Feb 19, 2020.

[AST22] ASTM D8388/D8388M-22. Standard Practice for Flexural Residual Strength Testing of Damaged Sandwich Constructions. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022.

[Bac17] Bachmann, J.; Hidalgo, C.; Bricout, S.: Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review, Science China Technological Sciences, 609, 2017, pp. 1301–1317. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9094-y>

[Ble11] Blees, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien, Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2011.

[Bog14] Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Interviews mit Experten: eine praxisorientierte Einführung. Springer-Verlag, 2014.

[Dek16] Dekoninck, E. A., Domingo, L., O'Hare, J. A., Pigosso, D. C., Reyes, T., & Troussier, N.: "Defining the challenges for ecodesign implementation in companies. Development and consolidation of a framework", Journal of Cleaner Production, Vol. 135, 2016, pp. 410–425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.045>

[DIN82] DIN 53295:1982-02. Prüfung von Kernverbunden; Trommel-Schälversuch. Berlin: Beuth Verlag; 1982.

[EnE14] EnEff: Industrie. Forschung für die energieeffiziente Industrie: Chemische Industrie startet ENPRO- Initiative, http://enpro-initiative.de/ENPRO+1_0/Modularisierung.html, (Abruf: 18.03.2026).

[Eur23] European Environment Agency (EEA). (2023). 1.A.3.a Aviation – Annex 1 – Master emissions calculator – 2023. In EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. [https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation.3/view\[SW1\]](https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation.3/view[SW1])

[Fio21] Fiore, V.; Badagliacco, D.; Sanfilippo, C.; Miranda, R.; Valenza, A.: An Innovative Treatment Based on Sodium Citrate for Improving the Mechanical Performances of Flax Fiber Reinforced Composites, Polymers, 134, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13040559>

[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

- [Her10] Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. 1., Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [Het13] Hetterich, J.: Integration von ökologischer Nachhaltigkeit als Kundenbedürfnis. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung von Fahrzeuginnenraum-komponenten. Dissertation, Leuphana Universität Lüneburg, 1. Auflage, Göttingen: Sierke Verlag, 2013.
- [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.
- [Hwa81] Hwang, C.L.; Yoon, K.: Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 186, Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- [ISO06a] ISO – INTERNATIONAL STANDARD: ISO14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2006.
- [ISO06b] ISO – INTERNATIONAL STANDARD: ISO14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, 2006.
- [Kae03] Kaebernick, H.; Kara, S.; Sun, M.: Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements. In: Robotics and Computer Integrated Manufacturing 19, 2003, pp. 461-468.
- [Kim17] Kim, S.; Moon, S.K.: Sustainable product family configuration based on a platform strategy. In: Journal of Engineering Design 2017, Vol. 28 NOS. 10-12, 731-764. <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1393657>
- [Kle13] Klein, B.: „Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 10. Auflage, 2013.
- [Klöß9] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. 1. Auflage, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [Köh22] Köhler, A.; Sandler, M.: „Prozessoptimierung mithilfe der Prozess-Atlas-Systematik“, in: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2022.
- [Kra18a] Krause, D. et al.: Leichtbau. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): „Handbuch Konstruktion“, Carl Hanser Verlag, München, 2018, pp. 487-507.
- [Kra18b] Krause, D., Gebhardt, N.: „Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln“, Springer Verlag, Berlin [u.a.], 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53040-5>
- [Kra21] Kravchenko, M.; Pigosso, D. C. A.; McAloone, T. C.: „A Trade-Off Navigation Framework as a Decision Support for Conflicting Sustainability Indicators within Circular Economy Implementation in the Manufacturing Industry“. in: Sustainability, 2021, 13; S. 314. <https://doi.org/10.3390/su13010314>
- [Küh09] Kühl, S.; Strodholz, P.; Taffertshofer, A.: Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und Qualitative Methoden, Wiesbaden, 2009.
- [Lut06] Luttrupp, C.; Lagerstedt, J.: EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. In: Journal of Cleaner Production 14, 2006, pp. 1396-1408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.022>
- [May94] Mayring, P.: Qualitative Inhaltsanalyse. In: Boehm, A.; Mengel, A. & Muhr, T. (Hrsg.): Texte verstehen. Konzepte, Methoden, Werkzeuge. UVK Univ.-Verl. Konstanz, 1994, S. 159-175.

- [Mod13] Modniks, J.; Andersons, J.: Modeling the non-linear deformation of a short-flax-fiber-reinforced polymer composite by orientation averaging, *Composites Part B: Engineering*, 54, 2013, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.058>
- [Mou19] Moudood, A.; Rahman, A.; Öchsner, A.; Islam, M.; Francucci, G.: Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 38 (7), 2019, pp. 323–339, <https://doi.org/10.1177/0731684418818893>.
- [Pon11] Ponn, J.C.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen. 2. Auflage, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, pp. 273 – 292.
- [Röb17] Röbbken, H.; Wetzel, K.: Qualitative und quantitative Forschungsmethoden. Carl von Ossietzky Universität, 2017.
- [Saw14] Sawi, I. E.; Bougherara, H.; Zitoune, R.; Fawaz, Z.: Influence of the Manufacturing Process on the Mechanical Properties of Flax/Epoxy Composites, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 81, 2014, pp. 69–76. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2014.1410>
- [Sch24] Schulte, S.; Schäfer, H.; Vogel, C.; Shah, V.; Kroll, S.; Siebert-Raths, A.: Environmentally Resistant Flax Fiber-Reinforced Composites for Aircraft Applications: Aviation Stress Tests with Optical and Mechanical Analyses, *Applied Composite Materials*, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10296-z>.
- [Sch22] Schwede, Lea-Nadine; Greve, Erik; Krause, Dieter; Otto, Kevin N.; Moon, Seung Ki; Albers, Albert; Kirchner, Eckhard; Lachmayer, Roland; Bursac, Nikola; Inkermann, David; Rapp, Simon; Hausmann, Maximilian; Schneider, Jannik Alexander How to Use the Levers of Modularity Properly-Linking Modularization to Economic Targets *Journal of Mechanical Design* 144 (7): 071401 (2022-07) <https://doi.org/10.1115/1.4054023>
- [Sch21] 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>
- [Son18] Sonego, M.; Echeveste, M.; Debarba, G. D.: The role of modularity in sustainable design: A systematic review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 176, 2018, pp. 196-209, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106>.
- [TUD10] Technische Universität Dresden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Untersuchungen zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in Innovationsprozesse im Maschinen- und Anlagenbau Deutschlands (INAIN)“, Dresden, 2010, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-84121>, (Abruf: 18.03.2026).
- [VDI19] VDI: VDI-Richtlinie 2221: Entwicklung technischer Produkte und Systeme, Beuth Verlag, 2019.
- [Wal10] Walther, G.: Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke. Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus. 1. Auflage, Wiesbaden: Gabler Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- [Wat22] Watz, M.; Johansson, C; Bertoni, A; Hallstedt, S.: „Investigating effects of group model building on sustainable design decision-making“. In *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33; S. 846–862. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.005>
- [Wie07] Wiedemann, J.: „Leichtbau. Elemente und Konstruktion“, Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2007.

- [Wie22] Wiesner, M.: „Nachhaltige Produktentwicklung“, In: Vajna, S. (Hrsg.): „Integrated Design Engineering“, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2022, pp. 387-428. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60439-7_12
- [Wup12] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH: Materialeffizienz & Ressourcenschonung (Ma-Ress), 2012, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/4468/file/MaRess_final_de.pdf (Abruf: 18.03.2026).
- [Yan06] Yang, QZ; Song, B: Eco-Design for Product Lifecycle Sustainability. In: IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2006, pp. 548-553.
- [Zho16a] Zhong, Y.; Joshi, S. C.: Initiation of structural defects in carbon fiber reinforced polymer composites under hygrothermal environments, Journal of Composite Materials, 508, 2016, pp. 1085–1097. <https://doi.org/10.1177/0021998315587133>
- [Zho16b] Zhong, Y.; Joshi, S. C.: Environmental durability of glassfiber epoxy composites filled with core-shell polymer particles., 2016.
- [Zho17] Zhong, Y.; Le Tran, Q. N.; Kureemun, U.; Lee, H. P.: Prediction of the mechanical behavior of flax polypropylene composites based on multi-scale finite element analysis, Journal of Materials Science, 529, 2017, pp. 4957–4967. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0733-7>