



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

IWAR



ÖKOBILANZ-BERICHT FÜR DEN FLUGZEUGVORENTWURF VON FLUGTRANSPORTALTERNATIVEN EINES 19-SITZER KLEINFLUGZEUGS

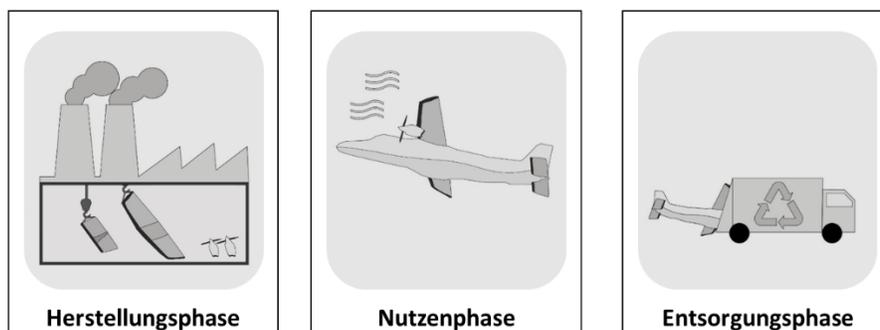
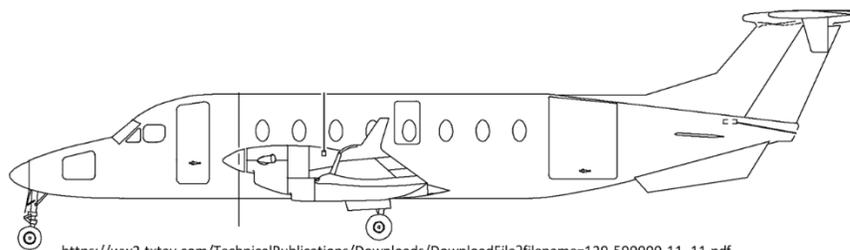
Im Projekt GNOSIS

FG Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft
M.Sc. Susanne Hanesch und Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
19.10.2023

Zusammenfassung

Die Ausgangslage des Ökobilanz-Berichts stellt die lebenswegbezogene Umweltbetrachtung des 19-Sitzer Kleinflugzeugs Beechcraft 1900D im Forschungsprojekt GNOSIS dar, für welches einsatzbereite und zuverlässige Elektrifizierungsoptionen unter der Prämisse von gesteigerter Effizienz und Nachhaltigkeit im Rahmen eines Flugzeugvorentwurfs entwickelt und untersucht werden. Das übergeordnete Ziel dieses Vorhabens ist die Reduktion der schadhafte Auswirkungen des Flugverkehrs, um innerhalb der nächsten Jahrzehnte ein umweltverträgliches Luftverkehrssystem sicherzustellen. Der Bericht basiert auf der Anwendung der systemanalytischen Methode der Ökobilanzierung und wird anhand einer Untersuchung und Bewertung des Austauschs von Stoffen zwischen natürlicher Umwelt und Technosphäre durchgeführt. Hieraus lassen sich die Umweltwirkungen für die beiden elektrifizierten Flugtransportalternativen partiell-turboelektrisches 19-Sitzer Kleinflugzeug mit der Marktreife im Jahr 2025 und brennstoffzellenbetriebenes 19-Sitzer Kleinflugzeug mit der Marktreife im Jahr 2050 ermitteln. Mit dieser Auswertung von spezifischen Umweltwirkungen für die verschiedenen Flugtransportalternativen werden vergleichende Aussagen über die Vorteilhaftigkeit der neuartigen Technologie in ihrer Systemumwelt gegenüber der konventionellen Technologie hinsichtlich ausgewählter Wirkungskategorien erzeugt. Die mit diesem Ökobilanz-Bericht erzeugten Resultate sollen bei der langfristigen Umgestaltung des Flugverkehrssektors unterstützen, um einerseits Verbesserungspotenziale zur Verringerung des Schadstoff-Eintrags bzw. der Wirkungen auf die Umwelt über den Flugzeuglebensweg aufzuzeigen und andererseits die unter Umweltgesichtspunkten vorteilhafteste Variante der Flugtransportalternativen zu identifizieren, die im Markthochlauf der Technologieentwicklung weiter erforscht werden sollte.

GNOSIS – Holistische Bewertung des elektrischen Fliegens



Ökobilanz über den Lebensweg (Life Cycle Assessment)

Abkürzungen

THG	Treibhausgas
LCA	Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment)
CONV	Konventionelles 19-Sitzer Flugzeug
PTE	Neuartiges 19-Sitzer Flugzeug der Variante „partiell-turboelektrisch“
FCB	Neuartiges 19-Sitzer Flugzeug der Variante „brennstoffzellenbetrieben“
CO ₂ -eq	Kohlendioxid-Äquivalent
NO _x -eq	Stickoxide-Äquivalent
Cu-eq	Kupfer-Äquivalent
TRL	Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level)
FU	Funktionelle Einheit
pkm	Personenkilometer
EOL	Lebensende (End-of-Life)
A1	Konventioneller Antrieb Herstellung
A2	Elektrischer Antrieb Herstellung
A3	Propeller Herstellung
A4	Antriebssystem Transport
A5	Tragstruktur Herstellung
A6	Flugzeug Montage
A7	Flugzeugsysteme Herstellung
A8	Kabinenausrüstung Herstellung
B1	Energieträger Bereitstellung
B2	Energieträger Nutzung
C1	Flugzeug Beseitigung
C2	Komponenten Verbrennung
C3	Komponenten Recycling
C4	Sekundärrohstoffe Bereitstellung
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
WtT	Well-to-Tank
TtW	Tank- to-Wake
REF	Referenzzustand
FUT	Zukunftszustand
AP	Advance Parameter
UP	Upscaling Parameter
OP	Overall Parameter
BAU	Business-as-usual
PRE	prädiktive Entwicklung im nahen Zeithorizont
EXP	explorative Entwicklung im entfernten Zeithorizont
KMF	2025 Szenario “Keep moving forward”
WOC	2050 Szenario “Wind of change”
FP	2050 Szenario “Fast progress”
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
HOFP	Ozonbildungspotenzial (Photochemical oxidant formation potential, humans)
SOP	Zusätzliches Erzpotenzial (Surplus ore potential)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff

1. Einleitung

Für den Flugverkehr müssen die Emissionen von Treibhausgasen (THG) signifikant reduziert werden, um die globalen und nationalen Klimaziele langfristig zu erfüllen, die im Abkommen von Paris beschlossen und von den Mitgliedsstaaten festgelegt wurden (United Nations, 2015). Da die aktuelle Klimawirkung des deutschen Verkehrssektors konträr zu den Zielvorgaben verläuft – im Jahr 2019 vor Corona entfielen auf den Sektor 163 Millionen Tonnen THG-Emissionen, welches dem Ausgangswert von 1990 entspricht und einen stetigen Anstieg der Emissionen seit 2010 aufzeigt (BMU, 2020) – müssen Lösungsansätze u.a. für den Flugtransport gefunden werden, um ein langfristiges Erreichen der Klimaziele zu ermöglichen.

Infolgedessen wird anstelle der Verwendung von fossilen Kraftstoffen ein auf alternativen Kraftstoffen oder auf regenerativem Strom basierender Transport als potentieller Lösungsansatz angestrebt. Dieser erfolgt anhand eines Energieträgerwechsels in der Betriebsphase oder einer neuen Flugzeugkonfiguration, die einen Antriebstechnologiewechsel auf Basis eines veränderten Antriebsstrangs sowie strukturelle Veränderungen am gesamten Flugzeug beinhaltet. Aus Vorgängerstudien von anderen Verkehrsmitteln wie Pkw oder Lkw kann entnommen werden, dass eine Umstellung auf den Energieträger Strom für den Transport in einem Verkehrsmittel eine Verringerung der THG-Emissionen ermöglichen kann (Cerdas et al., 2017; Helms et al., 2011). Ebenfalls können biobasierte und synthetische Kraftstoffe zu einer Reduktion der THG-Emissionen führen, wobei für die vorgelagerten Prozesse der Kraftstoffherstellung eine große Variation existiert und auch höhere Umweltwirkungen auftreten können (Naumann et al., 2019). Um die Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg des Flugzeugs zu berücksichtigen und hinreichend zu überprüfen, wird das mehrstufige Verfahren der standardisierten ISO-Norm zur Ökobilanzierung (LCA, Life Cycle Assessment) innerhalb dieser Ökobilanz-Studie durchgeführt (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044).

Der vorliegende Bericht beschäftigt sich mit der Fragestellung: *Welche Umweltwirkungen entstehen bei verschiedenen Flugtransportalternativen gegenüber einem konventionellen Kleinflugzeug und welche Veränderungen können sich bis zur Marktabtastung nach erfolgtem Markteintritt der neuartigen Flugzeuge einstellen?*

In dieser LCA-Studie soll im Anschluss an einen softwarebasierten Flugzeugvorentwurf aus dem GNOSIS Projekt im Rahmen der Ökobilanz ermittelt werden, welche Umweltauswirkungen aus dem Flugtransport innerhalb einer bestimmten Flugmission zur Durchführung eines nationalen Personentransports entstehen und wie auf Grundlage von Zukunftsbetrachtungen bis zu den Jahren 2025 und 2050 ein Beitrag zur Dekarbonisierung des Flugverkehrssektors geleistet werden kann. Dies wird mit einer ganzheitlichen lebenswegbezogenen Evaluation des *konventionellen 19-Sitzer Flugzeugs Beechcraft 1900D (CONV)* und zwei darauf basierenden *neuartigen Flugtransportalternativen partiell-turboelektrisches Kleinflugzeug (PTE) und brennstoffzellenbetriebenes Kleinflugzeug (FCB)* umgesetzt. Der Bericht stellt die Ökobilanz für das konventionelle Flugzeug und die zwei neuartigen Varianten sukzessive vor und integriert verschiedene Zukunftsentwicklungen der betrachteten Flugzeuge. Die LCA wird anhand der in der ISO-Norm definierten vier Phasen Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen (Kapitel 2), Sachbilanz (Kapitel 3), Wirkungsabschätzung (Kapitel 4) und Auswertung (Kapitel 5) durchgeführt. Nachfolgend wird die Ökobilanz des Flugtransports von den zwei Flugtransportalternativen im Vergleich zur Beechcraft 1900D detailliert vorgestellt und erläutert.

2. Ziel und Untersuchungsrahmen

Für die erste Phase der Ökobilanzierung sind in diesem Bericht zunächst das Ziel und die wissenschaftliche Fragestellung sowie der Anwendungsbereich der Studie herauszuarbeiten. Daraufhin werden die Funktion, die funktionelle Einheit und die Systemgrenzen definiert sowie abschließend die Anforderungen an die Datenqualität und die zeitliche, geographische und technologische Repräsentativität dieser Studie bestimmt.

2.1. Ziele und Anwendungsbereich der Studie

Diese Ökobilanz-Studie soll als oberstes Ziel einer Entscheidungsunterstützung dienen, einerseits für Forscher und Praktiker des Flugsektors, was an Technik und Konzeption der in Entwicklung befindlichen Flugtransportalternativen verbessert werden kann, um die Einsparung von Klimagasen, Luftschadstoffen und Materialnutzung zu optimieren. Und andererseits für Politiker bezüglich der Abwägung, unter welchen Voraussetzungen sich diese Technologie eignet, um die Klima- und Nachhaltigkeitsziele zu erfüllen und einen ökologisch nachhaltigen Flugverkehr zu ermöglichen. Diese Empfehlungen werden durch eine vergleichende LCA-Studie von mehreren Personentransportalternativen in Bezug zum konventionellen Flugzeug erzeugt. In einem ersten Schritt soll mit einer Status-Quo Betrachtung die Frage beantwortet werden, welche Umweltauswirkungen für die neuartigen Flugzeugvarianten PTE und FCB gegenüber dem Vergleichsflugzeug entstehen. In einem zweiten Schritt soll die zeitliche Entwicklung Berücksichtigung finden und für den Zustand der erfolgten Marktetablierung die Frage beantwortet werden, welche zukünftigen Umweltauswirkungen von neuartigen Transporttechnologien gegenüber der etablierten Technologie entstehen können. Ausdrücklich nicht Ziel dieser Studie ist es, die erzeugten Ergebnisse mit anderen Flugzeugtypen und Verkehrsmitteln zu vergleichen, da die LCA-Studie für die spezifischen Gegebenheiten des Kleinflugzeugs Beechcraft 1900D ausgelegt und im Rahmen des GNOSIS Projektabschlussberichts zur Veröffentlichung von vergleichenden Aussagen dieses Kleinflugzeugtyps bestimmt ist. Die Zielgruppe sind die Bundesregierung, allem voran das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (ehemals BMWi) als Projekt-Fördergeber sowie der beauftragte Projektträger der Luftfahrtforschung, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Die Studie kann aber ebenso für alle am Transformationsprozess des Verkehrssektors beteiligten wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Akteure zweckmäßig sein.

Die Anwendung der Ökobilanz-Studie ist für einen Vergleich der elektrischen Flugtransportalternativen *partiell-turboelektrisch (PTE)* im Jahr 2025 und *brennstoffzellenbetrieben (FCB)* im Jahr 2050 mit dem konventionellen Kleinflugzeug *Beechcraft 1900D (CONV)* innerhalb einer definierten durchschnittlichen Flugmission zur Identifikation der ökologisch vorteilhaftesten Technologie für den regionalen Personenflugtransport bestimmt. Hierbei sollen die Flugzeuge über den Lebensweg modelliert werden, um deren ganzheitliche Umweltwirkungen für den Transport auswerten zu können. Die Gründe zur Durchführung dieser Studie ergeben sich aus den Umweltwirkungen des Flugsektors, welche in naher Zukunft zur Erfüllung von Klima- und Nachhaltigkeitszielen reduziert werden sollen. Bei den untersuchten globalen Emissionen handelt es sich um die ausgestoßenen THG in der Wirkungskategorie „Klimawandel“,

die in Kohlendioxid-Äquivalent (CO₂-eq) angegeben werden und einen Beitrag zur Erderwärmung haben. Die zweite Output-bezogene Umweltwirkung, die in dieser Ökobilanz-Studie betrachtet wird, ist die der Wirkungskategorie „Photochemische Ozonbildung“, welche als sogenannter Sommersmog eine lokale Auswirkung auf die Humangesundheit hat und in Stickoxide-Äquivalent (NO_x-eq) gemessen wird. Als Input-bezogene Umweltwirkung wird die Wirkungskategorie „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ gewählt, in der die Ressourcenknappheit bewertet wird und die den erhöhten Abbau von Ressourcen auf ein Kupfer-Äquivalent (Cu-eq) bezieht. Eine Betrachtung der durch die elektrifizierten Technologien induzierten Bedarfsänderung an Rohstoffen stellt für die Ökobilanz mit der verursachten Ressourcenknappheit ein relevantes Teilergebnis dar. Eine weitere Ursache zur Notwendigkeit dieser Studie stellt die Untersuchung und Bewertung von neuartigen Technologien dar, welche sich noch im Entwicklungsprozess befinden und innerhalb der Technologie-Reifegrad (TRL, Technology Readiness Level) Stufen der NASA Bewertungsskala einzuordnen sind (NASA, 2012). Für das konventionelle Flugzeug kann die letzte Stufe von TRL 9 „Ist-System *flugerprobt* durch erfolgreichen Missionsbetrieb“ nachgewiesen werden, während sich die neu entwickelten Flugtransportalternativen im GNOSIS Projekt zwischen TRL 2 „Technologiekonzept formuliert“ und TRL 3 „Technologiekonzept nachgewiesen/demonstriert“ befinden (DIN EN 16603). Zum Ende des Forschungsprojekts haben zwei von drei entworfenen Flugzeugvarianten die Produktentwicklung im Flugzeugvorentwurf von TRL 3 erfolgreich abgeschlossen. Der dritte Entwurf eines batterieelektrischen Flugzeugs wurde aufgrund des hohen Gewichts verworfen, da dieser keine Verbesserung gegenüber der Beechcraft 1900D hinsichtlich des Energieverbrauchs ermöglicht hat. Da die Ergebnisse der Ökobilanz-Studie zur Bewertung dienen sollen, ob einerseits gegenüber der konventionellen Technologie eine ökologische Vorteilhaftigkeit hinsichtlich der CO₂-eq, NO_x-eq und Cu-eq erzeugt werden kann und andererseits welche der Flugzeugalternativen das größte Verbesserungspotenzial bis zur Marktablierung liefern kann, soll die Entscheidung unterstützt werden, welche Technologie weiter erforscht werden soll und welche Verbesserungen bis zum Zukunftszustand nach erfolgreichem Markteintritt durchzuführen sind. Auch kann die Studie als Wissensgrundlage genutzt werden, um neue Erkenntnisse in die Entwicklung von politischen Strategien einfließen zu lassen. Demnach kann durch die in dieser LCA-Studie durchgeführten Evaluation ein wissenschaftlicher Neuwert erreicht werden, da eine lebenswegbezogene Untersuchung und Umweltbewertung dieser zwei in Entwicklung befindlichen Flugtransportalternativen auf TRL 3 noch nicht existiert.

2.2. Untersuchungsrahmen und funktionelle Einheit

Für die Festlegung des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz-Studie sind zunächst die berücksichtigten Prozesse und die funktionelle Einheit (FU) für den Untersuchungsgegenstand zu bestimmen. Das zu untersuchende Flugtransportsystem kann sowohl für das konventionelle Flugzeug Beechcraft 1900D als auch für die neuartigen Varianten partiell-turboelektrisches und brennstoffzellenbetriebenes Flugzeug definiert werden als das Produktsystem „19-Sitzer Kleinflugzeug“, welches eine Transport-Dienstleistung erfüllt. Das Produktsystem wird unterteilt in die drei Lebensphasen Flugzeugherstellung, Flugbetrieb und Flugzeuglebensende, die in den nachfolgenden Phasen der Ökobilanz genauer betrachtet werden. Die Funktion des Produktsystems ist „Regionaler Personentransport mit einem Kleinflugzeug“. Die FU stellt als Quantifizierung der Funktion den Transport von einer Person über einen Kilometer dar, welche in einem

Personenkilometer (pkm) ausgedrückt werden kann. Auf diese Einheit werden alle Prozesse des Flugzeugs und die resultierenden Umweltwirkungen normiert. Die Referenzflüsse für die funktionelle Einheit stellen die Bereitstellung jeweils eines Flugzeugs in Abhängigkeit der heruntergerechneten Menge für einen pkm sowie die benötigte Energieträgermenge zur Durchführung dieses Transports dar. Als Teilprodukte der Flugzeugherstellung werden die Tragstruktur, die Flugsysteme und die Innenausstattung sowie die Antriebsanlage und alle relevanten Transportprozesse betrachtet. Nicht berücksichtigte Prozesse im Rahmen dieser Untersuchung stellen die technische Infrastruktur sowie der Bau und Betrieb von Flughäfen dar, da die Zuordnung dieser Umweltwirkungen auf eine hohe Anzahl an nutzenden Flugzeugen erfolgen würde, sodass die Umweltrelevanz dieser Prozesse pro Flugzeugtransport sehr gering und somit vernachlässigbar wird. Die in der Ökobilanz berücksichtigten Prozesse des Produktsystems Kleinflugzeug werden dem Vordergrundsystem zugerechnet, während dieses mit vorgelagerten und nachgelagerten Prozessen des Hintergrundsystems verknüpft wird.

Als Abschneidekriterien für den Input der Ökobilanzprozesse im Vordergrundsystem wird die Masse an natürlichen Ressourcen mit dem Fokus auf Rohstoffe und Energie berücksichtigt, die über den Lebensweg von jeweils einem Flugzeug und dem gesamten Energieträgereinsatz dieses Flugzeugs entsteht. Aufgrund der Komplexität des Produktsystems basiert die Materialzusammensetzung auf den wichtigsten Rohstoffen und vernachlässigt in den Teilprodukten geringe Mengen von weiteren Rohstoffen, um jeweils das Gesamtgewicht der Komponente vollständig nachzubilden. Zudem wird der Energieeinsatz nur in den relevantesten Prozessen berücksichtigt und beispielsweise zur Herstellung der Antriebsanlage vernachlässigt. Als Output des Produktsystems werden Abfälle und jeweils die Emissionen betrachtet, die einen Beitrag auf die Klimawirkung und auf die für den Menschen schädlichen Luftschadstoffe haben. Eine Besonderheit des Flugtransports stellt die Multifunktionalität des Transportprozesses dar, da im Flugzeug üblicherweise sowohl Personen als auch Güter transportiert werden, sodass eine Allokation für die entstehenden Umweltwirkungen auf Personenkilometer und Tonnenkilometer durchgeführt werden müsste. Jedoch wird in der Studie angenommen, dass bei einem 19-Sitzer Kleinflugzeug keine zusätzlichen Güter transportiert werden, da die Maximalbeladung des Flugzeugs gering ist und das Gesamtgewicht des Flugzeugs beim Start die höchstzulässige Startmasse nicht überschreiten darf. Des Weiteren stellt das Recycling einen multifunktionalen Prozess dar, für welchen es unterschiedliche Modellierungsansätze gibt. Der Allokationsansatz für das Lebensende (EOL, End-of-Life) des Flugzeugs dieser LCA-Studie ist die Substitution mit Korrekturfaktor (Rohstoffbetrachtungs-Methode), bei der eine Gutschrift für die vermiedene Primärproduktion aufgrund der Bereitstellung von recycelbarem Material erfolgt und etwaige Qualitätsverluste in Form von einer Mengenreduktion des Rohstoffs durch das Recycling berücksichtigt werden (Schrijvers et al., 2016).

Der umgebende Untersuchungsrahmen ist für das Produktsystem Kleinflugzeug bezüglich technologischer, geographischer und zeitlicher Systemgrenzen definiert. Die technologischen Systemgrenzen beinhalten den kompletten Lebensweg des Flugzeugs (cradle-to-grave bzw. cradle-to-cradle) und sind in dieser LCA-Studie für die geographische Grenze Deutschlands festgelegt. Dies resultiert aus der kurzen Distanz von 476 km pro Flugmission. Die zeitliche Abgrenzung umfasst den Bilanzierungszeitraum von knapp 30 Jahren zwischen der Datenaufnahme (2020-2023), dem aktuellen Bilanzierungsjahr des Status Quo (2023) und der künftigen Entwicklung im Rahmen von Zukunftsszenarien bis zur jeweiligen Marktetablierung (2025 bzw. 2050). Zudem beträgt die durchschnittliche Lebensdauer des Flugzeugs ab Markteintritt 20 Jahre und

der Zeitraum der möglichen Umweltwirkungen wird auf 100 Jahre beschränkt. Dies gilt als die mittlere Verweildauer von THG-Emissionen in der Atmosphäre, welche durch das IPCC zur Bestimmung des Treibhauspotenzials (GWP, Global Warming Potential) innerhalb von Modellen für die Zeithorizonte von 20, 100 und 500 Jahren umgerechnet wird (IPCC, 2013).

Die Systemgrenzen bilden das Ziel der Studie ab und teilen die Modellierung auf in eine Umweltbewertung, welche das aktuelle Modellierungsjahr widerspiegelt und eine zukünftige Umweltbewertung, welche die beiden Zeithorizonte 2025 und 2050 berücksichtigt. Diese zwei Modellierungen werden jeweils für das konventionelle Flugzeug und die beiden neuartigen Varianten PTE und FCB in Abhängigkeit ihres Marktreifejahres durchgeführt, um einen passgenauen Vergleich zu erzielen. Zur Bewertung der Umweltwirkungen der drei Flugzeuge für die drei Wirkungskategorien (Klimawandel, photochemische Ozonbildung, mineralischer Ressourcenverbrauch) wird die Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 (Huijbregts et al., 2017) verwendet und daraus die Wirkung am mittleren Schadenspunkt berechnet. Dieser Ansatz stellt die gängige Praxis von LCA-Studien in der dritten Phase der Wirkungsabschätzung dar und bietet eine gute Vergleichbarkeit zu anderen Studienergebnissen. Weitere Wirkungskategorien werden in der LCA-Studie nicht berücksichtigt, da sie nicht mit dem Ziel des GNOSIS Forschungsprojekts übereinstimmen. Da das Bewertungsziel der LCA-Studie sich nur auf die Ermittlung der emittierten THG und der stickoxidbasierten Luftschadstoffe sowie der Materialnutzung beschränkt, wird nicht das gesamte Ausmaß betrachtet, welches der Flugtransport auf die Umwelt hat, und andere Auswirkungen, die für den Flugsektor von Relevanz sind wie z.B. der fossile Ressourcenverbrauch oder die Feinstaubbildung, werden vernachlässigt. Die abschließende Auswertung der LCA-Studie in Phase vier erfolgt anhand einer Beitragsanalyse dieser Umweltwirkungen über den Lebensweg sowie einer Bewertung von Sensitivität, Konsistenz und Vollständigkeit der durchgeführten Ökobilanz. Der festgelegte Rahmen der LCA-Studie in der ersten und letzten Phase der LCA soll den Untersuchungsgegenstand des Flugzeugtransports in bestmöglicher Form erfassen, um diesen in Phase zwei und drei möglichst realitätsnah nachzubilden. Diese nachfolgende Phase zwei der Sachbilanz wird in enger Zusammenarbeit mit den verschiedenen Experten des Projekts ausgebildet, sodass am Ende der Ökobilanz neben der internen Prüfung keine weitere externe kritische Prüfung nach ISO-Norm durchgeführt wird.

2.3. Informationen zur Datenqualität

Um die Ökobilanz in den weiteren Phasen durchzuführen, muss die Datenqualität eingeordnet werden, die für die Datenerhebung der Sachbilanz und der Umweltbewertung der Produktsysteme auftritt. Zur Nachbildung der drei Produktsysteme des Flugzeugtransports wird jeweils ein Sachbilanzmodell in Kapitel 3 ausgebildet. Die Vordergrunddaten des konventionellen Flugzeugs basieren auf der Auswertung von flugzeugspezifischen Unterlagen in Kombination mit eigenen Berechnungen und Expertenschätzungen. Messungen in Produktionsstätten konnten nicht durchgeführt werden, da die Beechcraft 1900D im Jahr 2002 zum letzten Mal produziert wurde. Für die elektrifizierten Flugzeugentwürfe PTE und FCB auf TRL 3 existieren ebenfalls keine gemessenen Daten, da sich die Flugzeuge noch im Labormaßstab befinden. Die Datenerhebung der Primärdaten erfolgt anhand einer Computersimulation der entwickelten Flugzeuge und ihrem elektrifizierten Betrieb, die mit Literaturdaten u.a. zu den elektrifizierten Komponenten ergänzt

werden. Für die zukunftsgerichtete Umweltbewertung basiert ein Großteil der modifizierten Daten auf Literaturannahmen und eigenen Annahmen, die mit einer Expertenbefragung validiert werden. Neben spezifischen Vordergrunddaten für die Produktsysteme werden für das Hintergrundsystem hauptsächlich Datenbanken verwendet, die als qualitativ gesichert und repräsentativ gelten. Die generischen Mittelwerte von Referenzprodukten in den Datensätzen werden aufgrund fehlender Datensätze oder höherer Passgenauigkeit durch repräsentative Einzelwerte aus Sekundärquellen der Literatur ergänzt. In allen Flugzeugmodellen werden für das verknüpfte Hintergrundsystem, das alle vor- und nachgelagerten Prozessketten wie z.B. Rohstoffmärkte enthält und in Ausnahmen auch für das Vordergrundsystem, das alle Prozesse des Produktsystems enthält, Datensätze der Datenbankecoinvent Version 3.8 verwendet. Zusätzlich werden neue Datensätze erstellt, die mit projektspezifischen Rohdaten oder Literaturdaten gespeist werden. Die erzeugten Datensätze und die Datensätze aus derecoinvent Datenbank werden mit dem Systemmodell APOS (Allocation at the point of substitution) modelliert (Wernet et al., 2016) und die Umweltwirkungen mit der Ökobilanzsoftware openLCA ermittelt. Die Ergebnisse für den Referenzzustand und den Zukunftszustand werden in einer produktbasierten Ökobilanz des Typs ‚Attributional-LCA‘ dargestellt, bei welcher die Umweltauswirkungen proportional zum Produkt und seinem Lebensweg zugeordnet werden (UNEP, 2011a).

Für eine Ökobilanz können vielfältige Unsicherheiten auftreten, die grundsätzlich daraus resultieren, dass das Modell für den Untersuchungsgegenstand zwar ein Abbild der Realität darstellt, welches zur besseren Handhabbarkeit jedoch Vereinfachungen und Vernachlässigungen enthält. Die Modellierung dieser LCA-Studie wird in einer dreistufigen Sachbilanz durchgeführt, bei der zunächst das konventionelle Flugzeug als Modell ausgebildet wird, daraufhin die beiden elektrifizierten Varianten generiert werden und abschließend am jeweiligen Modell Modifikationen zur Ausbildung des Zukunftszustandes umgesetzt werden. Die generelle Unsicherheit von LCA-Studien besteht einerseits in der Entwicklung des Sachbilanzmodells und den ausgebildeten inhärenten Prozessen hinsichtlich einer Modellunsicherheit. Andererseits können die in das Modell eingepflegten Daten hinsichtlich ihrer Werte fehlerhaft sein, sodass die Quantifizierung des jeweiligen Modells eine Datenunsicherheit darstellt. Hierbei gilt es in der Studie, die Datendokumentation transparent zu gestalten und Blackbox-Datensätze zur Modellierung des gesamten Produktsystems zu vermeiden, um Umweltwirkungen auf signifikante Prozesse zurückzuführen. Zudem soll der Datenunsicherheit begegnet werden, indem die beschafften Vordergrunddaten hinsichtlich ihrer Datenqualität validiert und Datenlücken, die mit Schätzungen ergänzt bzw. vernachlässigt wurden, kenntlich gemacht werden. Eine zusätzliche Unsicherheit, welche aufgrund des prospektiven Charakters für zukunftsgerichtete Ökobilanz-Studien auftritt, ist die fehlende Gewissheit über die zeitliche Entwicklung. Diese kann allgemein als epistemologische Zukunftsunsicherheit eingeordnet werden und zeigt sich spezifisch in der „unbekannten Unbekannte“ aller modifizierten Datenwerte zur Ausbildung zukünftiger Entwicklungspfade. Demnach beinhaltet diese LCA-Studie neben der Modellunsicherheit und der Datenunsicherheit eine Zukunftsunsicherheit hinsichtlich eines kurzen Zeithorizonts bis 2025 in geringerer Intensität und eines langen Zeithorizonts bis 2050 in größerer Intensität.

Für in dieser LCA-Studie ermittelte gegebene Datenunsicherheiten des Forschungsprojekts wird nach Abschluss der Sachbilanz eine Analyse der Datenqualität mit anschließender Sensitivitätsanalyse und abschließender Sensitivitätsprüfung durchgeführt. Auf die Phase zwei der Ökobilanzierung mit der Ausbildung der Sachbilanz wird nachfolgend detailliert eingegangen.

3. Sachbilanz

In der Sachbilanz werden die drei Flugzeugvarianten Beechcraft 1900D, PTE und FCB näher hinsichtlich ihrer Prozesse über den Lebensweg betrachtet, um ein Ökobilanzmodell aufzubauen. Im ersten Schritt erfolgt die Vorbereitung der Datenerhebung mit der qualitativen Ausbildung der Modellstruktur anhand einer Beschreibung der Produktsysteme. Im nächsten Schritt der Datenerhebung werden für alle Modellbausteine Daten anhand einer Parameter-Generierung für den Referenzzustand beschafft und selektive Veränderungen anhand einer Parameter-Modifizierung für den Zukunftszustand vorgenommen. Abschließend wird mit der Datenberechnung anhand der Berechnung der Produktsysteme und der Bewertung der Datenqualität die Sachbilanz abgeschlossen.

3.1. Vorbereitung der Datenerhebung

Zur Bewertung der Umweltauswirkungen, die aus dem Personentransport entstehen, muss ein Inventar über die benötigten natürlichen Ressourcen über die drei Lebensphasen A, B und C des Produktsystems angelegt werden. Hierfür wird zunächst ein Fließbild erstellt, welches alle Prozesse abbildet, die Teil der LCA sind und im Folgenden genauer untersucht werden sollen.

Abbildung 1 zeigt für die CONV die Prozesse und Produktflüsse der Lebensphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung, die zur Bereitstellung der FU „Regionaler Personentransport mit einem Kleinflugzeug“ notwendig sind. Die Prozesse der ersten Phase A beinhalten die Herstellung (Konventioneller Antrieb, Propeller, Tragstruktur, Flugzeugsysteme und Kabinenausrüstung), den Transport (Antriebssystem) und das Zusammenfügen (Montage) zur Herstellung des kompletten Flugzeugs. Der Betrieb des Flugzeugs in Phase B teilt sich in zwei Energie-Prozesse (Energieträger Bereitstellung und Energieträger Nutzung) auf. In der Phase C wird das Flugzeug in vier Prozessen beseitigt bzw. die Komponenten verbrannt oder recycelt und als Sekundärrohstoffe bereitgestellt (Beseitigung, Verbrennung, Recycling und Sekundärrohstoffe). Die dreizehn Prozesse enthalten als kleinste Einheit Prozessmodule, für welche die Elementarflüsse bestimmt werden, die aus der Umwelt kommen oder in sie zurück gelangen, um die Umweltwirkungen zu ermitteln.

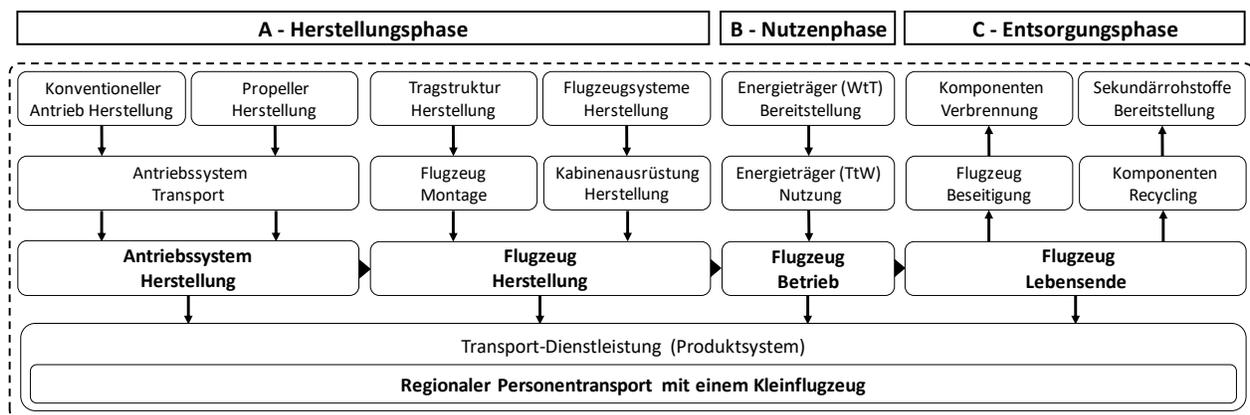


Abbildung 1 Grafische Darstellung des Produktsystems Beechcraft 1900D-CONV und der Systemgrenzen über den Lebensweg.

Die beiden elektrifizierten 19-Sitzer Flugzeuge haben als veränderter Technologietyp die gleichbleibende Technologiefunktion des Personentransports. Abbildungen 2 und 3 zeigen zur Bereitstellung der FU „Regionaler Personentransport mit einem elektrifizierten Kleinflugzeug“ den geringfügig geänderten Produktsystemaufbau. Aus den beiden neuartigen Technologieveränderungen resultiert jeweils ein verändertes grafisches Systemfließbild mit zwölf bzw. 14 Prozessen. Als Transformationstyp entsteht eine große Veränderungsintensität aufgrund einer ganzheitlichen Formänderung, die farblich mit veränderten Prozessen der CONV in grau und linkschraffiert sowie in neuen Prozessen für die PTE bzw. FCB in blau und rechtsschraffiert markiert sind. Es sind vielfältige neue Parameter notwendig wie elektrischer Fahranteil, Batterie Ladezyklen Anzahl, Materialsubstitutionsmenge, etc., für die neue Daten zu beschaffen sind. Zusätzlich entstehen in den lebenswegbezogenen Standardparametern weitere Veränderungen an den Prozessmodulen, welche aus der Elektrifizierung der Flugzeuge und dem neuen Entwurf resultiert. Bei gleichgebliebenen Bestandteilen kann auf die Daten der CONV zurückgegriffen werden.

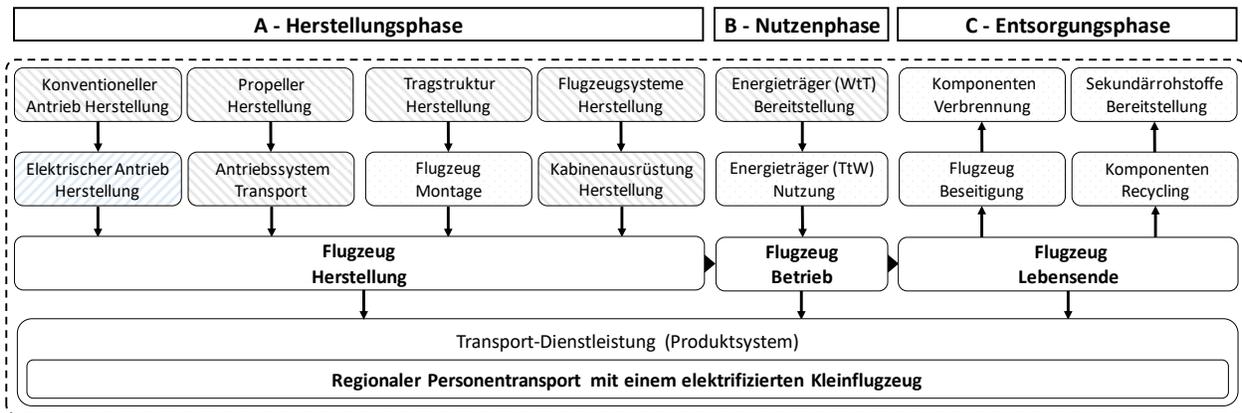


Abbildung 2 Grafische Darstellung des Produktsystems Beechcraft 1900D-PTE und der Systemgrenzen über den Lebensweg.

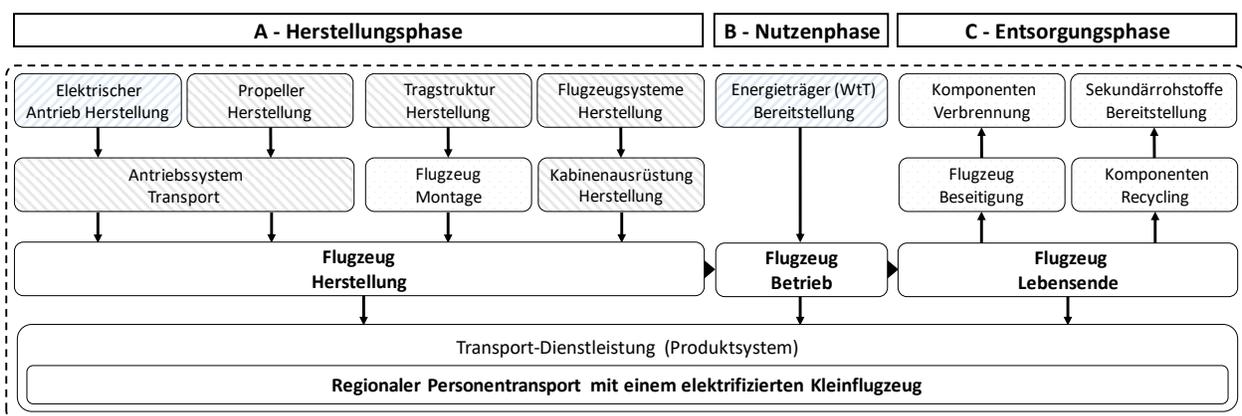


Abbildung 3 Grafische Darstellung des Produktsystems Beechcraft 1900D-FCB und der Systemgrenzen über den Lebensweg.

Eine notwendige Festlegung für die Zukunftsbetrachtung stellt die Modifikationsfunktion dar, die aufgrund des Flugzeugvergleichs das Ziel des erfolgten Markteintritts mit industrieller Reife für alle Flugzeuge im

gleichen Jahr darstellt. Weiterhin sollen diese in Konformität zu den europäischen Sektorenzielsetzungen mit dem Flightpath 2050 (EU COM, 2011) gegenübergestellt werden. Szenariotyp sind ein prädiktives Szenario als BAU Ausprägung mit nahem Zeithorizont als moderate Intensität und zwei explorative Szenarien als BETTER und FASTER Ausprägungen mit entferntem Zeithorizont als extremere Intensität. Für den künftigen Zustand entstehen prospektive Parameter wie die Herstellungsinputreduktion oder die Recyclinginputrateerhöhung. Zusätzlich sind externe Faktoren zu definieren, bei denen in dieser Studie die externen PESTEL Hauptfaktoren Klimapolitik, Innovation und Kreislauffähigkeit bestimmt werden. In Konformität mit diesen Faktoren in qualitativen Veränderungstendenzen müssen die ausgewählten internen prospektiven Parameter für den Zukunftszustand im Rahmen von technologischem und zeitlichem Fortschritt modifiziert werden, um zu quantitativen Daten zu gelangen.

Für alle dargestellten Prozesse und jeweiligen Prozessmodule mit den inhärenten Parametern muss im nächsten Schritt die Menge an natürlichen Ressourcen ermittelt werden, hauptsächlich anhand von Daten zu mineralischen und fossilen Rohstoffen. Nachfolgend wird der jeweilige Datenbedarf für die Lebensphasen des Referenzflugzeugs und der Flugtransportalternativen dargestellt sowie die vorgenommene Datenerhebung transparent erläutert.

3.2. Datenerhebung

Aus den in den Fließbildern abgebildeten Prozessen für die konventionellen und elektrifizierten Flugzeuge kann der Datenbedarf ermittelt werden. Für diese Prozesse und Prozessmodule werden nun die Energie- und Masseströme anhand von Primärdaten und Sekundärdaten wie Schätzungen erfasst. Alle Daten wurden im Zeitraum 2020 bis 2023 gesammelt und verarbeitet. Das Bilanzierungsjahr der drei Flugzeuge im Referenzzustand ist 2023, während im Zukunftszustand die Daten auf die Jahre 2025 und 2050 angepasst werden. Da die Beechcraft 1900D heutzutage nicht mehr gebaut wird, konnte zur Modellierung mittels Primärdaten nur auf veraltete Herstellerinformation zurückgegriffen werden. Die übergeordnete Struktur der Prozesse im Modell für die verbauten Komponenten wie der konventionelle Antrieb oder Propeller wird dem Piloten-Trainingshandbuch entnommen (Flight Safety International Inc., 2000), während technische Systeme wie Enteisungsanlage bzw. Elektrik in der Herstellersystembeschreibung aufgeführt wurden (Ratheon Aircraft, 2000). Die Zusammensetzung der Prozessmodule wie beispielsweise eines Flügels im Prozess der Tragstruktur Herstellung des Produktsystems konnte den Bauteilzeichnungen des illustrierten Teilekatalogs entnommen werden (Textron Aviation, 2019). Die detaillierte Nachbildung der drei Flugzeugvarianten erfolgt in drei Abschnitten für die Datenbeschaffung der zwei zeitlichen Betrachtungshorizonte anhand einer Parameter-Generierung im Referenzzustand für die CONV und daraufhin für die elektrischen Flugzeuge PTE und FCB und einer anschließenden Parameter-Modifikation im Zukunftszustand für alle Flugzeuge. Der Datenursprung sowie die jeweilige Erhebungstechnik wird nachfolgend erläutert und kann als Datenerhebungsblätter sowie als Datengenerierungslisten zusammengefasst dem Anhang entnommen werden.

3.2.1. Parameter-Generierung für den Referenzzustand: Beechcraft 1900D CONV-2002

Die Daten des konventionellen Flugzeugs bilden das Kleinflugzeug Beechcraft 1900D ab. Dieses ist ein zweimotoriges Kurzstreckenflugzeug mit Turboprop-Antrieb für 19 Passagiere, das in Wichita vom US-amerikanischen Flugzeughersteller Raytheon Aircraft zwischen 1982 und 2002 gebaut wurde. Insgesamt verließen 695 Exemplare den Produktionsstandort mit einer jährlichen Flugzeugproduktionsmenge von durchschnittlich 34 Maschinen. Obwohl diese zum Teil bis heute im Einsatz sind, wird für das LCA-Modell die Lebensdauer der Flugzeuge auf 20 Jahre begrenzt. Die Flugzeugherstellung wird auf das Jahr 2002 festgelegt als das letzte Jahr, in dem die Beechcraft 1900D in der Fabrik gefertigt wurde, sodass das Lebensende im Jahr 2022 erreicht wurde. Weitere Spezifikationen des Flugzeugtransports sind, dass die durchschnittliche Transportdistanz auf 476 km pro Mission und die Jahresfahrzyklen auf 630 Missionen pro Jahr festgelegt werden. Dies stellt die Auswertung der europäischen Flugplandaten für das Jahr 2018 auf Basis von einem Official-Airline-Guide-Datensatz dar. Hieraus ergibt sich für die Beechcraft 1900D eine Jahresflugleistung von 299.880 km pro Jahr. Weiterhin wird für die LCA angenommen, dass die Personenauslastung pro Flug bei 75% liegt, woraus sich eine durchschnittliche Transportgutmenge von gerundet 14 Personen pro Mission ergibt. Aus den Parametern Jahresflugleistung, Flugzeuglebensdauer und durchschnittliche Transportgutmenge wird die funktionelle Einheit berechnet. Anhand dieser werden für die nachfolgend beschafften Daten über den Lebensweg des Flugzeugs alle Mengen auf einen pkm heruntergerechnet, woraus sich z.B. für die Herstellung eines Flugzeugs normiert auf die FU eine Menge von $1,19E-08$ Stück pro pkm ergibt. Der gesammelte Dateninput für die Sachbilanz des konventionellen Flugzeugs Beechcraft 1900D kann Anhang 1 – 8 entnommen werden und wird für die drei Lebensphasen nachfolgend genauer erläutert.

A – Herstellungsphase

Das Produktsystem der CONV teilt sich in der ersten Lebensphase in sieben Prozesse auf, wobei fünf den Komponentenherstellungsprozessen des Flugzeugs zugeordnet werden können. Zur Nachbildung der Herstellungsprozesse wird die Standard-Leermasse des Flugzeugs gemäß (DIN 9020-1) in die Massehauptgruppen Antriebsanlage, Struktur und Standardausrüstung unterteilt. Für alle diese Prozesse muss jeweils das Komponentengewicht und die Materialverteilung bestimmt werden.

Die Antriebsanlage beinhaltet alle zur Fortbewegung notwendigen physischen Komponenten, welche die im Flugzeug erzeugte Antriebsleistung in Bewegung umsetzen. Für die **Herstellung des konventionellen Antriebs (A1)**, der sich aus zwei Gasturbinen des Typs PT6A-67D mit den Komponenten Getriebe, Verdichter, Brennkammer, Hochdruckturbine, Freie Nutzturbine, Auspuff, Welle und Struktur zusammensetzt, wird das Gewicht der einzelnen Komponenten anhand einer Software-Modellierung auf Basis von Herstellerangaben bestimmt (Pratt & Whitney Canada, 2007). Die Materialverteilung, bestehend hauptsächlich aus den Rohstoffen Stahl und Nickel, sowie Anteilen von Aluminium, Titan und Kobalt, wurde anhand von Literaturangaben den einzelnen Komponenten zugeordnet (Ngoret & Kommula, 2019). Die spezifischen Werte sind Anhang 1 zu entnehmen. Die **Herstellung des elektrischen Antriebs (A2)** entfällt. Für die **Herstellung des Propellers (A3)** erfolgt der Dateninput anhand einer geometrischen Berechnung der Komponenten Nabe, Nabenabdeckung, Metallschaft und Blätter. Diese können dem Herstellerdatenblatt entnommen werden (Hartzell Propeller Inc., 2010). Die Materialzusammensetzung,

bestehend aus Aluminium und GFK, wird der Literatur entnommen (Harlamert & Edinger, 1979). In Anhang 2 sind die Werte des Propellers gegeben.

Die Struktur des Flugzeugs beinhaltet alle tragenden Bauteile, in welche die Antriebsanlage und Standardausrüstung eingebaut wird. Die **Herstellung der Tragstruktur (A5)** kann laut DIN-Norm zur Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft in die Rohstoffe Aluminium, Stahl und Titan unterteilt werden, da das Flugzeug aufgrund des Alters in reiner Metallbauweise konstruiert wurde, entfällt der Verbundwerkstoff kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) (DIN 9020-5). Die Bauteilzeichnung von Flügel, Rumpf, Höhenleitwerk, Seitenleitwerk, Fahrwerk, Triebwerkseinbau und Gondel, aus denen auf das Gewicht geschlossen werden kann, können dem Teilekatalog entnommen werden (Textron Aviation, 2019). Das Komponentenmaterial wird auf Grundlage von Literatur und einer Experteneinschätzung für das spezifische Flugzeug zugeordnet (Schäfer, 2017). Alle Strukturdaten sind Anhang 3 zu entnehmen.

Die Standardausrüstung integriert in das Flugzeug die gesetzlich notwendige Grundausrüstung sowie zusätzliche Herstellerausrüstung und beinhaltet neben den technischen Systemen alle Ausstattung und Einrichtung im Innenraum des Flugzeugs. Die **Herstellung der Flugzeugsysteme (A7)** besteht aus den Systemen Steuerungsanlage, Instrumentenanlage, Hydraulische und pneumatische Anlagen, elektrische Anlage, Klimaanlage und Enteisungsanlage. Die Materialverteilung der Systeme kann einer beim Hersteller Airbus durchgeführten Masterarbeit entnommen werden (Arzdorf, 2014), bezieht sich jedoch primär auf die von diesem Hersteller gebauten Flugzeugtypen (Niedzinski, o.D.). Zudem sind Brandschutz, Treibstoffsystem und Zapfluftanlage dem Prozess zugeordnet, für diese werden Annahmen zum Komponentenmaterial getätigt. Die Werte für die Flugzeugsysteme der CONV sind in Anhang 4 gegeben. Die **Herstellung der Kabinenausrüstung (A8)** setzt sich aus allen weiteren Komponenten des Innenraums zusammen. Informationen zum Flugzeugsitz stammen aus einer Broschüre des Vertriebspartners (Aviation Fabricators, o.D.), während die restliche Innenausstattung und die zugehörigen Materialien dem technischen Bericht des U.S. Department of Transportation entnommen werden können (Clarke et al., 1988). Anhang 5 bildet die gesammelten Daten der Kabinenausrüstung ab.

Zur ersten Lebensphase des Flugzeugs zählt des Weiteren der Transportprozess der Komponenten, welcher für die Antriebsanlage nachverfolgt wurde. Der **Transport des Antriebssystems (A4)** unterteilt sich einerseits in den Transport des konventionellen Antriebs, der auf dem recherchierten Produktionsort der Gasturbine (Lethbridge, Alberta, Canada) sowie dem Produktionsort des Kleinflugzeugs (Wichita, Kansas, USA) basiert und für den internationalen Versand in die USA über einen Straßentransport erfolgt (Hawker Beechcraft, 2008a). Andererseits wird der Transport der Propeller berücksichtigt, welcher vom Standort des Herstellers (Piqua, Ohio, USA) zur Flugzeugfabrik anhand eines Inlandsversands innerhalb Nordamerikas über einen Straßentransport erfolgt (Hawker Beechcraft, 2008b). Die Transportdaten sind Anhang 6 zu entnehmen.

Die Herstellungsphase endet mit der **Montage des Flugzeugs (A6)**. Für diesen Prozess können aufgrund der seit 20 Jahren nicht mehr hergestellten Flugzeuge keine spezifischen Daten gesammelt werden. Um den hohen Detailgrad der Sachbilanz für die Ökobilanz-Studie beizubehalten, wurden rechnerische Abschätzungen vorgenommen. Diese beinhalten den Energieeinsatz für die Herstellungsprozesse der Unterkomponenten des Flügels und werden auf das Gesamtflugzeug mittels einer Hochrechnung übertragen. Betrachtet wurden die Unterkomponenten Standardrippe, Sonderrippe, Flügelhaut sowie

weitere Blechteile wie Stringer und Holme, aus welchen sich der Flügel zusammensetzt. Da der Flügel zu ca. 90% aus Aluminium besteht, wird dieser Rohstoff ausschließlich bei den Energieberechnungen berücksichtigt. Die Literatur gibt eine Übersicht zu den durchzuführenden Fertigungsprozessen (Koehler et al., 2001; Mouritz, 2012), spezifische Werte können einem Umweltbericht entnommen werden (European Aluminium, 2018) und Formeln und thermodynamische Naturgesetze einem Physikfachbuch (Kuchling, 2011). Anhand dieser Informationen und durchgeführten Berechnungen wurde der Energiebedarf zu den Fertigungsarten Walzen und Stanzen für die Standardrippe, spanende Bearbeitung der Sonderrippe, Walzen und Creep age forming für die Flügelhaut sowie Strangpressen und Ablängen für die Blechteile bestimmt. Neben dem Einsatz von Wärme und Strom bei der Flugzeugherstellung wurde eine Annahme über die Menge an Lackierung pro Flugzeug getätigt. Die Daten zu den Energieprozessen sind Anhang 7 zu entnehmen.

B – Nutzenphase

Zur Modellierung der zweiten Lebensphase werden Daten für zwei Energieprozesse des Produktsystems benötigt. Die Nutzenphase bildet den Zeitraum ab nach dem Flug vom Werk zum Startflughafen mit dem Beginn des Regelflugbetriebs und bis zum letzten Flug vom Zielflughafen zum Ort der Demontage, bevor die Beseitigung bzw. das Recycling des Flugzeugs erfolgt. Da die Lebensdauer eines Flugzeugs auf 20 Jahre festgelegt wurde, wird der Dateninput, der sich auf eine Flugmission von 476 km bzw. 257 nautische Meilen bezieht, für die LCA im Nachgang auf die Gesamtmenge für 20 Jahre Flugbetrieb hochgerechnet. Für diese Prozesse muss jeweils der Gesamtenergieeinsatz über eine Mission ermittelt werden.

Für den Flugzeugbetrieb stellt die **Bereitstellung der Energieträger (B1)** den ersten Prozess von Relevanz dar. Dieser bildet die Well-to-Tank (WtT) Aufwendungen vom Bohrloch bis in den Fahrzeugtank ab und integriert alle Schritte zur Herstellung des Energieträgers Kerosin, der für den Transport eingesetzt wird. Die zu bestimmende Energiemenge für den Fahrzeugtransport kann in die einzelnen Flugphasen des Fahrzyklus unterteilt werden und variiert zwischen dem LTO-Zyklus und Reiseflug. Der Flugbetrieb im LTO-Zyklus beinhaltet die Flugzeugbewegungen Rollen, Abflug und Anflug, während der Reiseflug die Fortbewegung über 3000 Fuß bzw. 914,4 m Höhe darstellt. Der Energieverbrauch kann für die CONV-2002 zu mehr als zwei Dritteln auf den Reiseflug zurückgeführt werden, bei den elektrischen Varianten steigt der Anteil auf über vier Fünftel an, sodass der Hauptanteil des Energieträgerverbrauchs der Kleinflugzeuge trotz der kurzen Flugdistanz durch den Reiseflug verursacht wird. Für diese zwei Zustände LTO-Zyklus und Reiseflug während einer Flugmission wurde der durchschnittliche Kraftstoffbedarf der Beechcraft 1900D anhand eines Handbuchs gesammelt (EMEP/EEA, 2019). Die **Nutzung der Energieträger (B2)** erfolgt daraufhin als der Prozess, welcher die Tank-to-Wake (TtW) Auswirkungen vom Fahrzeugtank zur geleisteten Transportarbeit mittels Kraftstoffverbrennung darstellt. Die Verbrennung der Kraftstoffe ist abhängig vom eingesetzten Verbrennungsmotor, welcher die im Verbrennungsprozess spezifischen Emissionen wie u.a. Kohlendioxid, Stickoxide und Schwefeloxide aus dem Kraftstoff erzeugt. Die spezifischen Emissionen des Kerosinverbrennungsprozesses können ebenfalls anhand des Handbuchs in einem Berechnungsprogramm für Luftfahrtemissionen zur Bestandsaufnahme der Luftschadstoffe ermittelt werden. Da die Gasturbine im LTO-Zyklus und im Reiseflug unterschiedliche Emissionsmengen ausstößt, müssen die durchschnittlich emittierten Schadstoffe ebenfalls in die zwei Zustände unterteilt werden. Für den LTO-Zyklus werden auf 26 km Transport 131,8 kg Kerosin verbrannt und für den Reiseflug

auf 450 km Transport 280,7 kg Kerosin, woraus eine Gesamtverbrennungsmenge von 412,5 kg Kerosin entsteht, für welche eine durchschnittliche Menge von 3,15 kg CO₂-eq pro kg Kerosin resultiert und eine verschiedene Menge an weiteren Luftschadstoffen (EMEP/EEA, 2019). Die beschafften Daten für den Flugzeugbetrieb sind in Anhang 7 aufgelistet.

C – Entsorgungsphase

Das Lebensende stellt die letzte Phase über den Lebensweg des Flugzeugs dar und befasst sich mit der Rückführung des kompletten Produktsystems in die einzelnen Bestandteile, welche in die Biosphäre zurück überführt oder in der Technosphäre erneut genutzt werden. Da die Prozesse der Betriebsphase keine physisch zu behandelnden Komponenten am Flugzeug hinterlassen, bezieht sich die EOL-Phase ausschließlich auf das hergestellte Flugzeug zum Ende der ersten Lebensphase. Dieses wird nach 20 Jahren Flugbetrieb in einzelnen Behandlungsschritten in die jeweiligen Verwertungswege unterteilt, wobei die in den Komponenten inhärenten Rohstoffe entweder beseitigt, verbrannt oder recycelt und dann als Sekundärrohstoffe wiederaufbereitet werden können. Für diese Prozesse müssen die Transportdistanz, der Energieeinsatz und der Behandlungsanteil bestimmt werden.

Für das Lebensende stellt die **Beseitigung des Flugzeugs (C1)** den ersten Verwertungsweg dar. Hierbei müssen Annahmen getätigt werden, da wenige spezifische Informationen zur Beechcraft 1900D existieren. Auf Basis der aktuellen Recyclingquoten von Rohstoffen und einer Fallstudie, die Recyclingaktivitäten von Flugzeugherstellern in Wichita evaluiert, wird übernommen, dass 20% der Rohstoffe weiterverarbeitet werden können (Asmatulu et al., 2013a; EU COM, 2020). Hieraus folgt, dass 80% der Rohstoffe im Flugzeug verbleiben und einem Flugzeugfriedhof überführt werden müssen. Eine Recherche ergab, dass in unmittelbarer Nähe der Stadt Kansas City, nahe dem Fertigungsstandort Wichita, der Harry S Truman Regionalflughafen existiert, auf dem im direkten Umfeld ausrangierte Flugzeuge und Komponenten deponiert werden. Diesem wird der Beseitigungsanteil der CONV zugeordnet, während 20% des Flugzeugs weiterverarbeitet werden. Der Energieeinsatz zur Demontage der verschiedenen Rohstoffe wird der Fallstudie entnommen. Die Daten zum Transport können Anhang 6 entnommen werden und der Energieeinsatz zur Demontage des Flugzeugs ist in Anhang 7 dargestellt. Die **Verbrennung der Komponenten (C2)** erfolgt über die Annahme, dass aktuell nur Metalle im Recycling aufgrund ihres Rohstoffwertes Berücksichtigung finden. Folglich werden alle Verbundwerkstoffe und sonstigen Polymere des Flugzeugs bezogen auf die 20% Weiterverwertungsanteil in einem städtischen Müllheizkraftwerk verbrannt und als nutzbare Energie dem System zurückgeführt. Das **Recycling der Komponenten (C3)** wird in drei verschiedene Recyclingmaßnahmen unterteilt und für die Rohstoffe Aluminium, Stahl und Edelmetalle in Abhängigkeit des Recyclinganteils von 20% durchgeführt. Hieraus ergibt sich eine Degradierung am Material, sodass, gemäß dem verwendeten Recyclingansatz der Substitution mit Korrekturfaktor, aufgrund von Qualitätsverlusten eine geringere Menge an Rohstoffen dem System im Prozess **Bereitstellung der Sekundärrohstoffe (C4)** zurückgeführt werden kann. Die Daten für die EOL-Prozesse sind in Anhang 8 gegeben.

Die Referenzen zu den verwendeten Daten und die jeweilige Datengenerierungstechnik sind gesammelt in Anhang 9 für alle Herstellungsprozesse und in Anhang 10 für alle Transport-, Energie- und EOL-Prozesse dargestellt. Alle diese Daten und beschafften Werte dienen der Nachbildung des Produktsystems des

konventionellen Flugzeugs. Weiterhin soll auf die Daten der beiden elektrifizierten Flugzeuge eingegangen werden und ihre Veränderungen zum herkömmlichen Produktsystem der CONV herausgearbeitet werden.

3.2.2. Parameter-Generierung für den Referenzzustand: PTE und FCB

Die Daten der beiden elektrifizierten Flugzeuge bilden in ihren Grundsätzen das Kleinflugzeug Beechcraft 1900D ab. Übernommene identische Daten sind der Transport von 19 Personen über eine Missionsdistanz von 476 km und die funktionelle Einheit mit den Spezifikationen Jahresflugleistung, Flugzeuglebensdauer und durchschnittliche Transportgutmenge bleibt dieselbe wie für das konventionelle Flugzeug. Jedoch zeigen Abbildungen 2 und 3, dass verschiedene Änderungen bzw. Neuerungen am Flugzeugentwurf hinsichtlich Energieeinsatz, Antriebsstrang und umgebender Hüllkörper entstehen. Aus den zwei Propellern des Turboprop-Antriebs entstehen verteilte Antriebe von je einem Hauptpropeller nahe des Rumpfes und einem Nebenpropeller an der Flügelspitze. Es ergeben sich Veränderungen für vielfältige zu beschaffende Daten der Sachbilanz, die als Datenerhebungsblätter Anhang 11-19 für die PTE-Maschine sowie Anhang 20-27 für die FCB-Maschine entnommen werden können und im Folgenden für die Datengenerierung über den Lebensweg beschrieben werden soll.

A – Herstellungsphase

Die Antriebsanlage ist für die elektrifizierten Flugzeuge einmal in partiell-turboelektrischer Antriebsweise auf Basis eines hybriden Antriebsstrangs mit einer konventionellen und elektrischen Einheit für die PTE ausgefertigt sowie einmal für die FCB in seriell hybrid-elektrischer Antriebsweise auf Basis eines rein elektrischen Antriebsstrangs, welcher sich aus einer batterieelektrischen Stromzufuhr und einem brennstoffzellenbasierten Flüssigwasserstoffeinsatz zusammensetzt. Zur **Herstellung des konventionellen Antriebs (A1)** werden für die PTE zwei Gasturbinen eingesetzt, für die alle veränderten Daten über die Modellierungs-Software MICADO/UNICADO bereitgestellt werden. Für die FCB entfällt dieser Prozess. Die **Herstellung des elektrischen Antriebs (A2)** als neuer Prozess setzt sich für die PTE in jeweils zwei Elektromotoren, Generatoren, Gleichrichter, Wechselrichter, Kupferkabel, Schutzschalter und Getriebe zusammen. Dagegen werden für die FCB vier Elektromotoren, vier Wechselrichter und vier Getriebe, ein Kupferkabel, Schutzschalter und eine Lithium-Schwefel-Batterie, zwei Brennstoffzellen-Stacks, zwei Verdichter, zwei Wärmetauscher sowie ein Flüssigwasserstofftank eingesetzt. Diese neuen Daten werden in Anzahl und Gewicht im Flugzeugvorentwurf über die Modellierungs-Software MICADO/UNICADO generiert. Für die **Herstellung des Propellers (A3)** erfolgt der veränderte Dateninput der vier Propeller und dem Gewicht ebenfalls über MICADO/UNICADO. Die Materialzusammensetzung basiert für den ersten und dritten Prozess auf den beschafften Daten des konventionellen Flugzeugs auf Basis von Berechnungen projektbeteiligter Luftfahrtingenieure und für den zweiten Prozess zum Großteil aus Produktdatensätzen der Datenbank ecoinvent.

Die Struktur der elektrischen Flugzeuge differenziert sich in die der PTE, welche eine Tragstruktur in Metallbauweise hat und in die der FCB, bei der die Tragstruktur in leichterem Verbundbauweise gefertigt wird. Die Daten zur **Herstellung der Tragstruktur (A5)** werden für die PTE und die FCB in den Komponentengewichten über die Modellierungs-Software MICADO/UNICADO bereitgestellt. Die

Materialzusammensetzung für die PTE wird von der CONV übernommen, während für die FCB zu dem Anteil des Verbundwerkstoffs CFK in den Komponenten Flügel, Rumpf, Höhenleitwerk und Seitenleitwerk eine neue Expertenschätzung vorgenommen wird. Die Prozentverteilungen basieren auf Literaturwerten von Masterarbeiten der Cranfield University (Howe, 2011; Liu, 2013) und sind mit verschiedenen Studien abgeglichen worden.

Die Standardausrüstung ändert sich im Vergleich zur konventionellen Beechcraft 1900D ebenfalls. Die **Herstellung der Flugzeugsysteme (A7)** besteht neben den zuvor genannten Komponenten aus einer zusätzlichen Batterie, die ein elektrisches Rollen vor und nach dem Flug ermöglicht. Die Zusammensetzung der neuen Lithium-Ionen-Batterie des Typs NMC811 wird als Produktdatensatz der Datenbank ecoinvent entnommen. Die **Herstellung der Kabinenausrüstung (A8)** basiert auf denselben Komponenten des Innenraums wie im konventionellen Flugzeug, allerdings wird eine andere Materialzusammensetzung für die elektrischen Flugzeuge angenommen. Aufgrund des veralteten Flugzeugentwurfs der CONV wird ein Flugzeugsitz berücksichtigt, der zu zwei Dritteln aus CFK und nur noch zu einem Drittel aus Stahl besteht.

Für den **Transport des Antriebssystems (A4)** werden die Transportdistanzen des konventionellen Antriebs und des Propellers von der CONV direkt übernommen und verbleiben als Proxy Daten in den neuen Entwürfen zwecks nicht vorhandener realer Daten. Dies führt zu keiner Vernachlässigung von Prozessen für eine hohe Vollständigkeit trotz TRL 3. Zusätzlich entsteht ein neues Prozessmodul für den Transport des elektrischen Antriebs. Dieses basiert für die PTE auf der eigenen Schätzung, dass alle Komponenten des elektrischen Antriebs in China gefertigt werden und nach Deutschland im Rahmen eines Flugtransports geliefert werden müssen. Für die FCB wird aufgrund des späteren Einsatzjahres geschätzt, dass ein Fertigungswerk für Elektromotoren, Batterien, Brennstoffzellen sowie weitere Leistungselektronik in Deutschland eröffnet hat, sodass hierbei mit einem Straßentransport aller Komponenten des Prozesses von dem fiktiven Standort in 350 km Entfernung gerechnet wird.

Die Herstellungsphase endet für beide Flugzeuge wiederum mit der **Montage des Flugzeugs (A6)**. Da bereits für das nicht mehr gefertigte konventionelle Flugzeug keine Daten aus der Produktion gesammelt werden können, sind auch für die über eine Computersimulation entstandenen elektrischen Flugzeuge auf TRL 3 keine Fertigungsdaten zu beschaffen. Aus diesem Grund wird mit denselben Energiedaten aus den Fertigungsprozessen der CONV als Proxy gerechnet und diese in Abhängigkeit des Flügelgewichts skaliert. Dies stellt insbesondere für das Flugzeug FCB eine grobe Verallgemeinerung der Produktionsdaten dar, da sich für einen Wechsel von Metallbauweise zu Verbundbauweise ebenfalls die Fertigungsarten ändern. Da die neue Zusammensetzung der Tragstruktur der FCB eine ungesicherte Expertenschätzung darstellt und keine Informationen und Ressourcen bereitstehen, um die Energieeinsätze zur Montage des Flugzeugs in den thermodynamischen Grundannahmen neu zu berechnen, wird bei den Stellvertreterdaten verblieben.

B – Nutzenphase

Für den Betrieb der elektrifizierten Flugzeuge bildet der erste Prozess wiederum die **Bereitstellung der Energieträger (B1)** ab. Hierbei werden für die PTE-Maschine die WtT-Aufwendungen für die Herstellung der Energieträger Kerosin sowie Strom berücksichtigt, während für die FCB-Maschine sich der neue Energieträgereinsatz aus der Herstellung von flüssigem Wasserstoff und Strom zusammensetzt. Die Menge an Energieträgern entstammt aus der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO, während die Vorketten

der aktuellen Stromerzeugung in Deutschland dem Datensatz vonecoinvent v3.8 entnommen wird und die detaillierte Prozessnachbildung der Wasserstoffbereitstellung anhand von Informationen des Ffe Open Data Portals (Ffe, 2020) sowie die Verflüssigung anhand der Projektstudie (Strathoff et al., 2022) modelliert wird. Der Prozess zur **Nutzung der Energieträger (B2)** ist nur für die PTE von Relevanz und berücksichtigt die TtW-Wirkungen aus der Verbrennung der Kraftstoffe, die für Kerosin aus dem Berechnungsprogramm für Luftfahrtemissionen zur Bestandsaufnahme der Luftschadstoffe entnommen werden (EMEP/EEA, 2019). Für die Nutzung von Strom und Wasserstoff entstehen keine schädlichen Umweltwirkungen aus Verbrennungsprozessen, sodass diese zu vernachlässigen sind.

C – Entsorgungsphase

Das Lebensende der elektrischen Flugzeuge basiert zu großen Teilen auf den beschafften Daten für die CONV und wird in den gleichen Datenwerten für den aktuellen Zustand in den Prozessen **Beseitigung des Flugzeugs (C1), Verbrennung der Komponenten (C2), Recycling der Komponenten (C3) und Bereitstellung der Sekundärrohstoffe (C4)** nachmodelliert. Jedoch erreichen die elektrischen Komponenten ein früheres Lebensende als das Flugzeug, sodass diese häufiger ausgetauscht und den Verwertungswegen zugeführt werden müssen. Anhand der Zyklenanzahl auf Basis von Expertenschätzungen und Literaturwerten sind die Lebensdauern von 6,8 Jahren für den Elektromotor (Pipistrel, 2017), 0,8 Jahre für die Lithium-Schwefel-Batterie (Oxis Energy, 2017), 2,9 Jahren für die Lithium-Ionen-Batterie (Schneider et al., 2020), 4,8 Jahren für die Brennstoffzelle sowie 8 Jahren für den Flüssigwasserstofftank (Verstraete, 2009) zum Einsatz im Flugzeug bestimmt worden. Alle relevanten Rohstoffe der elektrischen Komponenten sowie kritische Rohstoffe wie Neodym, Lithium und Graphit werden als Proxy Daten Verwertungsanteil von 20% den drei verschiedenen Recyclingmaßnahmen für die Rohstoffe Aluminium, Stahl und Edelmetalle zugeordnet und die eingesetzten Verbundwerkstoffe sowie weiteren Polymere verbrannt.

Die Referenzen zu den beschafften Daten und die jeweilige Datengenerierungstechnik sind gesammelt in Anhang 28 für alle Herstellungsprozesse und in Anhang 29 für alle Transport-, Energie- und EOL-Prozesse dargestellt, mit denen die beiden Produktsysteme der elektrifizierten Flugzeuge vollständig nachgebildet werden können. Die detaillierte Datengenerierung neuartiger Bestandteile konnte durch eine Reduktion der neu zu beschaffenden Parameter mittels einer geringen Menge an Proxy Daten erfolgen. Abschließend wird auf selektive Veränderungen, die aus dem späteren Markteintrittsjahr der elektrischen Flugzeuge resultieren, näher eingegangen, um im Rahmen von Szenarien beispielsweise eine Erhöhung des Recyclinganteils oder eine veränderte Zusammensetzung des zukünftigen Strommix zu berücksichtigen.

3.2.3. Parameter-Modifizierung für den Zukunftszustand: CONV, PTE, FCB

Für die neu entwickelten Flugzeugalternativen müssen vielfältige Annahmen für den Zukunftszustand vorgenommen werden, die auch für das konventionelle Flugzeug umzusetzen sind. Die Betrachtungsjahre 2025 und 2050, in denen die PTE und die FCB Marktreife erlangen, benötigen eine zusätzliche Datenerhebung in Form einer Parameter-Modifizierung von ausgewählten generierten Werten, um zu konsistenten Zukunftsszenarien zu gelangen. Dies stellt die letzte Erweiterung der Sachbilanz-Phase von der retrospektiven LCA im Referenzzustand (REF) zu der prospektiven LCA im Zukunftszustand (FUT) dar

und ist von Relevanz, um zukunftsgerichtete LCA-Ergebnisse zu erhalten, welche den technologischen und zeitlichen Fortschritt hinreichend abbilden.

Für die zwei Zeithorizonte 2025 und 2050 wird sich auf signifikante und unsicherheitsbehaftete Parameter fokussiert, die sich in ihrem Modifikationszweck unterscheiden. Die erste Kategorie von Parametern bildet entwurfsbedingte Veränderungen ab, die für die PTE und die FCB für einen zukünftigen Markteintritt bereits umgesetzt wurden und für die CONV angepasst werden müssen, um in Übereinstimmung mit der Entwicklung zu stehen. Sie stellen technologischen Fortschritt für die konventionelle Technologie in Form von Advance Parametern (AP) dar. Aus den AP Materialartveränderung von reduziertem Materialeinsatz in der Herstellungsphase und Energieverbrauchsreduktion von reduziertem Kraftstoffeinsatz in der Nutzenphase entstehen die beiden neuen Flugzeugentwürfe Beechcraft 1900D-2025 und Beechcraft 1900D-2050, mit denen die PTE und die FCB jeweils im gleichen Zukunftszustand verglichen werden können. Die zweite Kategorie von Parametern stellt hochskalierte Verbesserungen dar, welche sich für neuartige Zukunftstechnologien wie Batterien, Elektromotoren, etc. ergeben, die in den elektrifizierten Flugzeugen zum Zeitpunkt der Marktreife eingesetzt werden. Sie stellen technologischen Fortschritt der neuartigen Technologien in Form von Upscaling Parametern (UP) dar. Die UP Herstellungsinputreduktion, Materialeffizienzerhöhung und Lebensdauererhöhung berücksichtigen Verbesserungen in Abhängigkeit des Markthochlaufs, sodass mit Erreichen von TRL 9 und einem industriellen Maßstab eine zusätzliche Verringerung von Energieeinsatz, Materialeinsatz bzw. Austauschhäufigkeit für diese Komponenten im elektrischen Antrieb angenommen wird. Die letzte Kategorie von Parametern beinhaltet umgebende Zukunftsveränderungen in meist mehreren Ausprägungen, welche sich in Abhängigkeit einer zeitlich konsistenten Entwicklung ändern müssen. Sie stellen Veränderungen nicht am Vordergrundsystem des Produktsystems selber, sondern im übergeordneten Markt des Hintergrundsystems dar. Daher sind sie schwieriger zu modifizieren, da aufgrund fehlender Expertise in dem breiteren Feld unsicher ist, wie stark die Veränderung ausfallen kann. Sie stellen zeitlichen Fortschritt für die konventionelle und neuartige Technologie in Form von Overall Parametern (OP) dar. Die OP Herstellungspfadverbesserung, Regenerative Energien Anteilserhöhung und Recyclinginputrateerhöhung sind pro Szenario für alle Technologien gleich zu modifizieren, wenn der Parameter enthalten ist.

Die Umsetzung der Modifikation erfolgt anhand verschiedener Datenmodifikationstechniken. Alle berücksichtigten Parameter und deren quantitative Modifikation für die drei Szenarien befinden sich in Tabelle 1. Für die meisten Parameter wurde eine zusätzliche Expertenumfrage durchgeführt, um die prospektiven Datenwerte einer Expertengruppe vorzustellen und durch diese zu validieren bzw. letzte Veränderungsvorschläge einzuholen. Die Ergebnisse der Umfrage mit einem Rücklauf von 13 Experten aus verschiedenen Fachdisziplinen können Anhang 30 und 31 entnommen werden.

Die Zukunftsveränderungen können unterteilt werden in die Veränderung für den nahen Zukunftszustand im Jahr 2025, welche als moderate, prädiktive (PRE) Entwicklung in einem Business-as-usual (BAU) Szenario mit dem Namen „Keep moving forward (KMF)“ ausgebildet wird, sowie in die zwei Szenario-Veränderungen für den entfernten Zukunftszustand im Jahr 2050, welche eine extremere, explorative (EXP) Entwicklung des heutigen Zustands darstellen. Die Szenarien bilden zwar keinen Bestfall ab, jedoch werden sie in den Varianten BETTER für das Szenario „Wind of change (WOC)“ und FASTER für das Szenario „Fast progress (FP)“ als sehr positive Zukunftsentwicklungen ausgearbeitet.

Tabelle 1 Szenario-Parameter für die drei Szenarien der LCA im Zukunftszustand.

Szenario-Parameter	Prädiktives Szenario	Exploratives Szenario	Exploratives Szenario
	2025A	2050B	2050C
	Keep moving forward (KMF)	Wind of change (WOC)	Fast progress (FP)
	PTE-/CONV-2025A	FCB-/CONV-2050B	FCB-/CONV-2050C
Energieverbrauchs- reduktion Kerosin	-20% (ATAG, 2010)	-33% (ATAG, 2010)	-33% (ATAG, 2010)
Materialartveränderung CFK	-2% (Annahme)	-25% (Annahme)	-25% (Annahme)
Herstellungsinput- reduktion Batterie	-17,5% (Wright, 1936)	-17,5% (Wright, 1936)	-17,5% (Wright, 1936)
Materialeffizienz- erhöhung Batterie	-10% (Wright, 1936)	-10% (Wright, 1936)	-10% (Wright, 1936)
Materialeffizienz- erhöhung E-Motor	-	-10% (Wright, 1936)	-10% (Wright, 1936)
Lebensdauererhöhung E-Motor	-	9 Jahre (+30%) (Annahme)	11,3 Jahre (+65%) (Annahme)
Lebensdauererhöhung Lithium-Ionen-Batterie	-	4,8 Jahre (+70%) (Annahme)	6,4 Jahre (+130%) (Annahme)
Lebensdauererhöhung Lithium-Schwefel-Batterie	-	1,6 Jahre (+100%) (Annahme)	2,4 Jahre (+200%) (Samaniego et al., 2017)
Lebensdauererhöhung Brennstoffzelle	-	6 Jahre (+25%) (Annahme)	6,8 Jahre (+40%) (Annahme)
Lebensdauererhöhung Wasserstofftank	-	8,7 Jahre (+10%) (Annahme)	9,5 Jahre (+20%) (Annahme)
Herstellungspfadver- besserung CFK	-	-12,5% (Nunna et al., 2019)	-12,5% (Nunna et al., 2019)
Herstellungspfadver- besserung Wasserstoff	-	-5% (Annahme)	-20% (Bauer et al., 2022)
Regenerative Energien Anteilerhöhung	+25% (Jöhrens et al., 2020)	+51% (Jöhrens et al., 2020)	+49% (Agora/Stiftung Klimaneutralität, 2021)
Recyclinginputrate- erhöhung	+22% (Asmatulu et al., 2013b)	+45% (Oliveira Fernandes Lopes, 2010; UNEP, 2011b)	+70% (Fishman et al., 2021)
Externer PESTEL Faktor Klimapolitik	mittel	sehr groß	sehr groß
Externer PESTEL Faktor Innovation	mittel	groß	sehr groß
Externer PESTEL Faktor Kreislauffähigkeit	wenig	groß	sehr groß

Die zwei zeitlich veränderten Entwürfe der Beechcraft 1900D sind anhand des historischen Trends wie die PTE und die FCB mit der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO entworfen worden und führen zu Modifikationen an dem Produktsystem der CONV, auf die aus Effizienzgründen in dieser LCA-Studie nicht weiter eingegangen wird. Aufgrund des Vergleichs mit der PTE in 2025 und der FCB in 2050 sind jedoch die gleichen Verbesserungen wie für die elektrifizierten Flugzeuge angenommen worden. Die Skalierung der Flugzeuge auf industriellen Maßstab wird mit Lernkurven und Annahmen umgesetzt. Der Autor Wright entdeckte, dass bei einer Fertigungserhöhung von einem Flugzeug auf 32, welches in etwa der jährlichen Produktionsmenge von 34 Stück der Beechcraft 1900D entspricht, sich eine Lernkurve für die Kosten einstellt, die zu einer Reduktion von 17,6% Arbeitsleistung und von 10,3% zugekauftem Material führt (1936). Diese Reduktionen stellen die Ausgangslage für Änderungen ausgewählter Komponenten des Flugzeugs wie Batterien bezüglich Energieeinsatz und Materialeinsatz in der Produktion dar. Die Szenarien werden anhand der zeitlichen Entwicklung differenziert in unterschiedliche Werte für Marktprozesse wie die Veränderung des Strommix, des Recyclinganteils oder Herstellungspfadverbesserungen von CFK und Wasserstoff, wenn sie für den Entwurf von Relevanz sind. Das finalisierte Parametermodifikationsregister mit allen Informationen für das jeweilige gebündelte Zukunftsszenario kann Anhang 32, 34 und 35 entnommen werden, demgegenüber ist der Referenzzustand in Anhang 32 und 33 gezeigt.

Alle generierten und modifizierten Daten müssen im nächsten Schritt der Sachbilanz in den Modellen der drei Produktsysteme verrechnet und gekennzeichnet werden, um zu abschließenden Werten der Sachbilanz für die Verknüpfung mit der dritten LCA-Phase der Wirkungsabschätzung zu gelangen. Auf Umweltwirkungsveränderungen einiger Szenario-Parameter im direkten Vergleich zum Referenzzustand und deren begründeter Zuordnung zu dem jeweiligen Szenario wird nach der Wirkungsabschätzung für den Status Quo in einer Sensitivitätsanalyse in Kap 4.3 genauer eingegangen.

3.3. Datenberechnung

Nachdem alle notwendigen Daten über den Lebensweg des Flugzeugs beschafft werden konnten, müssen diese nun in das Sachbilanzmodell integriert werden, um daraus die Umweltwirkungen zu ermitteln. Das Sachbilanzmodell für die drei Flugzeugvarianten im Vordergrundsystem, welches alle Prozesse des Produktsystems darstellt, wird in Excel aufgesetzt. Es basiert auf den gesammelten Daten für das konventionelle Flugzeug CONV und den Daten von den Flugzeugvorentwürfen PTE und FCB sowie allen zeitlich veränderten Daten der drei Flugzeuge für die Jahre 2025 und 2050. Diese Werte werden in der Modellstruktur einem einzelnen Prozessmodul wie beispielsweise dem Flügel zugeordnet. Die Berechnung des Produktsystems erfolgt daraufhin, indem die Werte der einzelnen Prozessmodule in jedem Prozess zu den drei Lebensphasen und daraufhin zu dem gesamten Personentransportprozess des Flugzeugs zusammengefasst werden. Die Ergebnisse werden anschließend auf die funktionelle Einheit normiert und bezogen auf einen pkm angegeben. Die Verrechnung der Werte auf die FU (pro 1 pkm) erfolgt durch Herunterrechnen der Gesamtwerte anhand der Summe von den drei Parametern Jahresfahrleistung (299880 km/a), Flugzeuglebensdauer (20 a) und durchschnittlicher Transportgutmenge (14 Personen).

Im Anschluss an die Verrechnung müssen die Daten des Vordergrundsystems mit dem Hintergrundsystem verknüpft werden, um vorgelagerte Prozessketten wie Rohstoffmärkte oder nachgelagerte Prozessketten wie die EOL-Behandlung zu berücksichtigen. Hierfür werden dem Produktsystem verschiedene Datensätze zugeordnet, wobei jeder Input- bzw. Outputfluss einem spezifischen Datensatz zugehörig ist wie z.B. das Material Aluminium der Bereitstellung auf dem Aluminiummarkt zugeordnet werden kann. Die Datensätze erhalten wiederum Flussmengen von Herstellungs-, Transport-, Energie- und EOL-Prozessen und werden als aggregierte Mengen z.B. pro ein Kilogramm angegeben. Die Zusammenstellung aller verwendeten Datensätze befindet sich in Anhang 36 – 38. Die aufgelisteten Datensätze aus ecoinvent sind aufgrund von Allgemeingültigkeit durch die Nutzung in vielfältigen LCA-Studien oder aufgrund von Passgenauigkeit für den Untersuchungsrahmen beispielsweise hinsichtlich der geografischen Grenzen ausgewählt worden. Zudem wurden weitere Datensätze anhand von Literaturdaten erstellt.

Im letzten Schritt werden die im Excel-Modell verrechneten Sachbilanzdaten des Vordergrundsystems auf Grundlage der verknüpften Datensätze mit einer Ökobilanzsoftware berechnet, um die Umweltwirkung des Produktsystems pro Wirkungskategorie zu erhalten. Hierfür kann einerseits anhand jedes einzelnen Prozessmoduls zu einem Wert gelangt werden, indem das Produktsystem als Whitebox in mehreren Schritten modelliert wird oder es kann als Blackbox im Rahmen eines einzigen Systemprozesses im Gesamten berechnet werden. Aufgrund von der Zuordnung der Umweltwirkungen zu den verschiedenen Lebensphasen und Prozessen werden die Produktsysteme dieser LCA-Studie in der Ökobilanzsoftware als Whitebox anhand der einzelnen Prozessmodule modelliert.

Zusätzlich zur Modellverrechnung werden die Ergebnisse für die LCA im Referenzzustand und die LCA im Zukunftszustand gekennzeichnet. Abbildung 4 zeigt oben die relevantesten Spezifikationen der CONV, PTE und FCB von Gesamtfahrzeugmasse und Leistung in Abhängigkeit des Betrachtungsjahres, in der Mitte die wichtigsten Veränderungen des Transformationstyps für die elektrifizierten Flugzeuge und unten die Einordnung in die Entwicklungszustände mit und ohne technologischen Fortschritt sowie in die Zukunftszustände bzw. dem Referenzzustand mit und ohne zeitlichen Fortschritt.

Weiterhin sind die konsistent gebildeten Zukunftsszenarien, die in den Parametermodifikationsregistern von Anhang 32, 34 und 35 in den jeweiligen Parameterwerten aufgelistet sind, als abschließendes Resultat in einer Szenario-Narrative ausgebildet. Hieraus können inhärente Unsicherheiten in den angenommenen Zukunftsentwicklungen kommuniziert werden und mit einer Übersetzung der Zukunftsannahmen in einen symbiotischen Szenariotext größtmöglich verständliche Resultate der prospektiven LCA erzeugt werden. Die Ergebnisvisualisierung der Kernelemente ist in den drei Narrativen von Abbildung 5 – 6 dargestellt. Mit der Ausbildung verschiedener interner Szenario-Parameter und drei externen Hauptfaktoren entstehen in unterschiedlichen Ausprägungen die Szenarien „Keep moving forward“ im nahen Zukunftszustand sowie im entfernten Zukunftszustand „Wind of change“, einer Fokussierung auf Windkraft im Strommix, und „Fast progress“, einer schnelleren Umsetzung der Energiewende und höherem technologischen Fortschritt mit längeren Lebensdauern. Die Bündelung von Entwicklungspfaden zu zwei spezifischen Zukunftsbildern im langen Zeithorizont adressiert die große Unsicherheit, mit der die zukünftige Entwicklung ablaufen kann, da jedes Zukunftsbild nur eine von vielen Möglichkeiten darstellt. Bevor in der Wirkungsabschätzung zu den resultierenden LCA-Ergebnissen gelangt wird, sind zuvor die unterschiedlichen Modelle der drei Flugzeugvarianten hinsichtlich der Datenqualität zu bewerten, um die Sachbilanz abzuschließen.

Konventionelles Flugzeug „CONV“	Partiell-Turboelektrisches Flugzeug „PTE“	Brennstoffzellenbetriebenes Flugzeug „FCB“
CONV-2002: Fahrzeugmasse (OEM) = 4919 kg Konventionelle Leistung = 2x954 kW CONV-2025: Fahrzeugmasse (OEM) = 4589 kg Konventionelle Leistung = 2x1196 kW CONV-2050: Fahrzeugmasse (OEM) = 3726 kg Konventionelle Leistung = 2x702 kW	PTE-2025: Fahrzeugmasse (OEM) = 4983 kg Konventionelle Leistung = 2x1308 kW Elektrische Leistung = 2x347 kW Elektrischer Fluganteil = 0%	FCB-2050: Fahrzeugmasse (OEM) = 6283 kg Elektrische Leistung Batterie = 467 kW Elektrische Leistung Brennstoffzelle = 2x779 kW Elektrischer Fluganteil = 100%
2 Gasturbinen	2 Gasturbinen	2 Brennstoffzellen
2 Propeller	4 Propeller	4 Propeller
Kerosineinsatz (während Boden- und Flugbetrieb)	2 Elektromotoren	4 Elektromotoren
Industrielle Reife	Stromeinsatz (während Bodenbetrieb), Kerosineinsatz (während Flugbetrieb)	1 Batterie
Referenzzustand 2023	Strom- und Flüssigwasserstoffeinsatz während Boden- und Flugbetrieb	Referenzzustand 2023
Zukunftszustand (prädiktiv) 2025-KMF	Laborreife (TRL 3)	Laborreife (TRL 3)
Zukunftszustand (explorativ) 2050-WOC	Referenzzustand 2023	Referenzzustand 2023
Zukunftszustand (explorativ) 2050-FP	Industrielle Reife	Industrielle Reife
	Zukunftszustand (prädiktiv) 2025-KMF	Zukunftszustand (explorativ) 2050-WOC
		Zukunftszustand (explorativ) 2050-FP

Abbildung 4 Spezifikationen von den konventionellen und elektrifizierten Flugzeugen und Kennzeichnung der technologischen und zeitlichen Veränderungen für die LCA-Bewertung im Referenzzustand und im Zukunftszustand.

2025 - Keep moving forward (KMF)

PESTEL - Klimapolitik	<p>Die globale Entwicklung zum Klimaschutz folgt dem Pfad, auf dem sich technologische, wirtschaftlichen und soziale Trends kaum von historischen Mustern unterscheiden. Der europäische Luftfahrtsektor entspricht dem Trend der wenig ehrgeizigen Reduzierung von Klimagasen und Luftschadstoffen, sodass bei der Fortführung alle Ziele langfristig verfehlt werden. Die Anstrengung zur Dekarbonisierung des deutschen Energiesektors ist mit 70% regenerativen Energien moderat und ausbaufähig durch den steigenden Strombedarf und stetigen Transportbedarf mit der voranschreitenden Transformation des Verkehrssektors.</p> <p>Trotz der wachsenden zivilgesellschaftlichen Nachfragereduktion nehmen technologischer Fortschritt und Innovation ausgewählter Schlüsseltechnologien moderat zu. Die vielseitig eingesetzte Lithium-Ionen-Batterie kann mit 17,5% weniger Prozessenergie und weniger 10% Materialeinsatz im Ressourcenverbrauch reduziert werden. Fehlender inkrementeller Durchbruch der Batterieforschung kann jedoch die steigende Ressourcenknappheit durch die eingesetzten Materialien nicht aufhalten und elektrische Transportdistanzen erweitern.</p> <p>Gesetzliche Regulierungen zur Kreislaufführung für Produkte und verbaute Komponenten erfolgen nicht. Hieraus resultiert keine gesteigerte sozioökonomische Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit und der Anstieg der Recyclingrate auf 42% zum Produktlebensende ermöglicht noch keine Hinbewegung zur geschlossenen Kreislaufwirtschaft. Die hohen Umweltwirkungen aus dem Einsatz von Primärmaterial bleiben weiterhin bestehen und stehen dem allumfassenden Ziel der Klimakonformität entgegen.</p>
Regenerative Energien Anteilserhöhung	
PESTEL - Innovation	
Herstellungsinputreduktion	
Materialeffizienzerhöhung	
PESTEL - Kreislauffähigkeit	
Recyclinginputrateerhöhung	

Vielsprechende Entwicklung

Neutrale Entwicklung

Besorgniserregende Entwicklung

Abbildung 5 Narrative des prädiktiven Szenarios KMF zur Szenario-Ergebnis Dokumentation der Beechcraft 1900D-PTE.

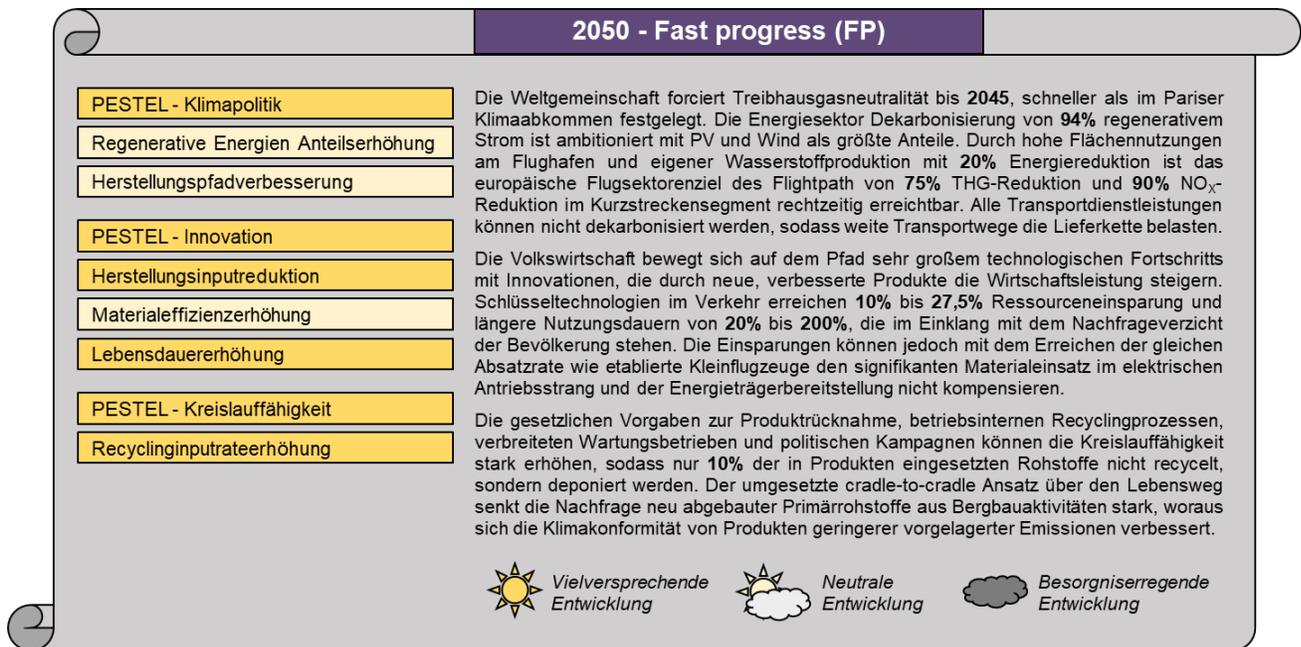
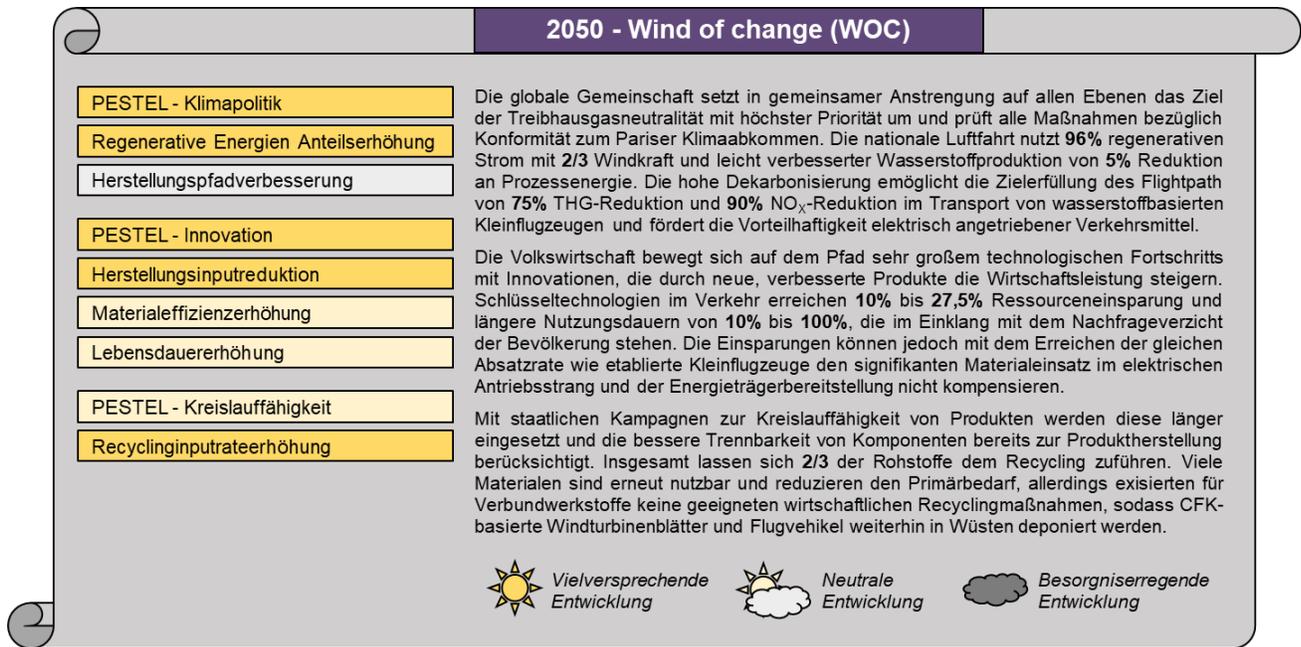


Abbildung 6 Narrative der explorativen Szenarien WOC und FP zur Szenario-Ergebnis Dokumentation der Beechcraft 1900D-FCB.

3.4. Bewertung der Datenqualität

Für die Bewertung der Datenqualität und die Unsicherheit der Sachbilanzdaten muss die Passgenauigkeit der Datensätze hinsichtlich der technologischen, geographischen und zeitlichen Systemgrenzen bewertet werden. Die technologische Repräsentativität für das Sachbilanzmodell der konventionellen Technologie

und der Zukunftsbetrachtung aller Technologien ist hoch, da die beschafften Daten der spezifischen Maschine Beechcraft 1900D in ihrem marktreifen Zustand entsprechen bzw. die zukünftige Marktreife der neuartigen Technologien für PTE in 2025 und für FCB in 2050 berücksichtigt werden. Dagegen ist für die Bewertung im Status Quo das TRL zwischen konventionellen und neuartigen Flugzeugen nicht einheitlich, da für die beiden Sachbilanzmodelle von PTE und FCB die Daten im Labormaßstab erhoben wurden. Weiterhin ist die geographische Repräsentativität der Sachbilanzmodelle mit Einschränkungen verbunden. Die Beechcraft 1900D wurde in den USA hergestellt, jedoch bezieht sich der geographische Rahmen im GNOSIS Projekt und in dieser LCA-Studie auf Deutschland. Die beschafften Daten entsprechen für das erste Sachbilanzmodell dem Produktionsort der Vereinigten Staaten, sodass zur Modellierung eine Anpassung der Datensätze auf den deutschen Bezugsraum und Technologiemix wie z.B. den deutschen Strommix vorgenommen wurde, um den geographischen Erfassungsbereich dieser Studie bestmöglich abzubilden. Die zeitliche Repräsentativität der Datensätze ist für das konventionelle Flugzeug in Marktreife ebenfalls nicht gegeben, da das Flugzeug im Jahr 2002 zum letzten Mal produziert wurde, die Datenbankecoinvent v3.8 jedoch für das Systemmodell APOS die aktuellsten Datensätze aufweist, welche zur Modellierung verwendet werden können. Dagegen ist die Modellierung für die PTE im Referenzzustand mit den Datensätzen gut durchführbar, da bis zum Bilanzierungsjahr weniger als drei Jahre Unterschied sind und nur punktuell zeitlich passgenauere Datensätze erzeugt werden müssen. Die zeitliche Repräsentativität für die FCB im Referenzzustand ist anhand der aktuellen Datenbank wiederum nicht gegeben. Daher müssen vielfältige Anpassungen an den Vordergrund- und Hintergrunddatensätzen für den Zukunftszustand vorgenommen werden, um die zeitliche Korrelation der Modelle mit dem Betrachtungsjahr zu verbessern. Größtenteils basieren die prospektiven Modelle auf beschafften Daten der elektrifizierten Flugzeuge des Reifegrads TRL 3, da nur selektive Modifikationen durchgeführt wurden. Daher sollten bei einem höheren TRL neue Daten aus dem Pilotbetrieb von PTE und FCB in die Sachbilanz integriert werden. Demnach ist die Gültigkeit der LCA-Studie nur bis zu einer technologischen Weiterentwicklung der Flugzeuge gegeben. Die Datenqualität der drei Produktsysteme sowie deren Ausprägung in den Zukunftsszenarien wird abschließend in Tabelle 2 anhand der Pedigree-Matrix in fünf Aspekten im Rahmen von fünf Indikatorwerten bewertet.

Tabelle 2 Bewertung der Datenqualität anhand der unsicherheitsfaktorenbasierten Pedigree-Matrix (Ciroth et al., 2016).

Produktsystem	Zuverlässigkeit der Daten	Vollständigkeit der Daten	Zeitlich korrekte Daten	Geographisch korrekte Daten	Technologisch korrekte Daten
Beechcraft 1900D	2	1	5	4	1
CONV-2025	3	1	1	1	1
CONV-2050	4	1	2	1	1
PTE	3	1	2	1	5
PTE-2025	4	1	1	1	1
FCB	4	1	5	1	5
FCB-2050	4	1	2	1	1

Bewertungsskala Datenqualität: 1 = hohe Datenqualität, 5 = geringe Datenqualität

Alle nachgebildeten Flugzeugmodelle zeigen aufgrund verschiedener Möglichkeiten zur Datenbeschaffung Auswirkungen auf die Datenqualität. Die Produktsysteme im Referenzzustand bilden für das konventionelle Kleinflugzeug Beechcraft 1900D den kompletten Lebensweg ab anhand einer hohen Menge an Primärdaten, einigen Sekundärdaten und einzelnen zur Vollständigkeit durchgeführten Schätzungen. Hieraus wird insgesamt eine hohe Datenqualität erzeugt. Die zwei neuartigen Flugzeugentwürfe PTE und FCB sind im Labormaßstab dargestellt und basieren auf Daten der CONV und eigenen Simulationen. Durch den Entwicklungsstand der Entwürfe auf TRL 3 konnten Daten wie Komponentengewichte oder Energieverbräuche aus den Computersimulationen nur auf Basis größerer Unsicherheiten aufgenommen werden. Unter Berücksichtigung einer reduzierteren Datenqualität können die elektrifizierten Flugzeuge ebenfalls über ihren gesamten Lebensweg nachgebildet werden, um zum Abschluss der LCA vergleichende Aussagen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit zu treffen und den weiteren Flugzeugentwicklungsprozess zu unterstützen. Jedoch wird mit den nachfolgenden Ökobilanzergebnissen im Referenzzustand noch kein Vergleich durchgeführt. Der Vergleich basiert auf einer höheren Datenqualität von PTE und FCB im Zukunftszustand, sodass die bewertende Gegenüberstellung aufgrund einer besseren zeitlichen und technologischen Passgenauigkeit der Modelle für alle drei Flugzeugvarianten erst auf Basis von Zukunftsveränderungen für die modifizierten Ergebnisse durchgeführt wird.

Als Ergebnis der Datenqualitätsbewertung können technologische Unsicherheiten der Flugzeugentwürfe auf TRL 3 für den Referenzzustand reduziert werden, indem die industrielle Reife für allen Flugzeuge in den Zukunftsszenarien berücksichtigt wird. Hieraus kann die Datenqualität verbessert werden, aufgrund der Eintrittswahrscheinlichkeit der Zukunftsänderungen treten jedoch neue Unsicherheiten auf, woraus sich die Zuverlässigkeit der Daten reduziert. Dennoch kann eine große Vollständigkeit und Passgenauigkeit der verwendeten Daten und Datensätze nachgewiesen werden und insbesondere die Zukunftsbewertung kann die Robustheit gegenüber der zeitlichen Entwicklung und den technologisch korrekten Daten für die LCA erhöhen. Nachdem die Daten einer Analyse ihrer Qualität unterzogen wurden, wird nachfolgend das Gesamtergebnis für die LCA-Studie im Rahmen der Wirkungsabschätzung gezeigt. Dieses wird zunächst für den Referenzzustand abgebildet und daraufhin in der finalen Umweltbewertung für den Zukunftszustand dargelegt. Eine umfangreiche Datenvalidierung ausgewählter signifikanter Parameter wird innerhalb einer Sensitivitätsanalyse durchgeführt und anhand einer abschließenden Sensitivitätsprüfung untersucht.

4. Wirkungsabschätzung

Auf Grundlage der Datenerhebung sind für die Sachbilanz Inventare des natürlichen Ressourceneinsatzes erstellt worden. Diese müssen nun in Phase 3 mit den entstehenden Umweltwirkungen verknüpft werden, um einen funktionalen Zusammenhang herzustellen und zu fundierten Ergebnissen zu gelangen. Zur Modellierung der Umweltwirkungen wird die gängige Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 genutzt, die Input- bzw. Outputflüsse der Sachbilanz in 17 Midpoint und drei Endpoint Wirkungskategorien umwandelt (Huijbregts et al., 2017). Die für diese Studie gewählten Kategorien sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Auswahl der Midpoint-Wirkungskategorien für die Ökobilanz-Studie.

Wirkungskategorie	Indikator	Charakterisierungsfaktor	Einheit
Klimawandel	Zunahme des Infrarot-Strahlungsantriebs	GWP (Global warming potential)	g CO ₂ -eq
Photochemische Ozonbildung	Zunahme der Aufnahme von troposphärischem Ozon in der Bevölkerung	HOFPP (Photochemical oxidant formation potential, humans)	g NO _x -eq
Mineralischer Ressourcenverbrauch	Zunahme der Fördermenge von Erzen	SOP (Surplus ore potential)	g Cu-eq

Für die ausgewählte Wirkungskategorie „Klimawandel“ mit der Einheit Kohlendioxid-Äquivalent (CO₂-eq) können alle klimawirksamen Emissionen mithilfe des Charakterisierungsmodells des IPCC ermittelt werden. Dieses ordnet alle während Industrieprozessen, der Brennstoffumwandlung und der Brennstoffverbrennung resultierenden THG-Emissionen (wie Kohlenstoffdioxid, Methan, Distickstoffoxid, etc.) eine Gewichtung anhand ihrer Verweilzeit in der Atmosphäre zu; für die Ergebnisse der Arbeit wird die Summe dieser Emissionen für den Horizont von 100 Jahren (GWP 100) berücksichtigt (IPCC, 2013, 2019). Neben der für den Treibhauseffekt aufgrund einer Erhöhung des Infrarot-Strahlungsantriebs verantwortlichen Wirkungskategorie wird die Midpoint-Kategorie „Photochemische Ozonbildung“ mit der Einheit Stickoxide-Äquivalent (NO_x-eq) betrachtet. Der Wirkungsindikator ist das Ozonbildungspotenzial, bei welchem die emittierten Stickoxide unter Sonneneinstrahlung zur Bildung von bodennahem Ozon führen, das als Folgewirkung mittels Aufnahme durch den Menschen zu einer Reizung der Atemwege und einer erhöhten Mortalität führen kann. Für diese die menschliche Gesundheit betreffende Wirkungskategorie werden alle Emissionen der Substanzen aufsummiert, die einen Schaden am Menschen bei deren Aufnahme erzeugen. Hierbei spielt die direkte Umgebungskonzentration eine Rolle, längerfristige Verweilzeiten der Emissionen werden nicht berücksichtigt. Als letzte Midpoint-Kategorie wird der „Mineralische Ressourcenverbrauch“ mit der Einheit Kupfer-Äquivalent (Cu-eq) untersucht. Dieser stellt als Art des Umwelteingriffs keine Stoffemission dar, sondern betrachtet die Materialnutzung als Knappheit mineralischer Bodenschätze. Der Charakterisierungsfaktor für die Ressourcenknappheit ist das zusätzliche Erzpotezial, das über die Menge an Kupfer ausgedrückt wird. Dieses berücksichtigt den Abbau einer mineralischen Ressource, der zum Rückgang des Erzgehalts führt und die globale Rohstoffkonzentration in den Erzen reduziert, wodurch sich die Menge des pro Kilogramm Rohstoff produzierten Erzes erhöht. Als Folge des mineralischen Ressourcenverbrauchs entsteht eine zusätzliche Menge an Erz, die künftig durch den Abbau der mineralischen Ressource produziert werden muss, das wiederum negative Wirkungen auf den Rohstoffförderungsaufwand hat. (Huijbregts et al., 2017)

Während die Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 für die Kategorie Klimawandel grundsätzlich ausgereift ist, da auf ein gängiges Modell des IPCC zurückgegriffen wird, sowie für die zweite Kategorie photochemische Ozonbildung weitestgehend ein Konsens zu den Charakterisierungsfaktoren in der Forschung besteht, existieren für die letzte Kategorie in verschiedenen Wirkungsabschätzungsmethoden unterschiedliche Ansätze zur Bewertung der Ressourcenknappheit. Demnach wird bei den Ergebnissen für die Kategorie mineralischer Ressourcenverbrauch auf den noch nicht ausgereiften Entwicklungsstand der Bewertung verwiesen. Zwischen den drei Wirkungskategorien besteht zudem der Unterschied, dass die höchsten Umweltwirkungsergebnisse für die beiden Emissionskategorien hauptsächlich durch fossile Energieträger erzeugt werden. Dagegen stellt für die Materialkategorie die Art des Abbaus von Ressourcen das Bewertungsmaß dar und erzeugt umso höhere Ergebnisse, je schwerer ein Rohstoff abgebaut werden kann, wie beispielsweise bei Koppelproduktionen von kritischen Rohstoffen wie Neodym oder Kobalt, die im Antriebsstrang in Energiewandlern und Speichern Verwendung finden.

In der nachfolgenden Darstellung der Teilergebnisse werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zunächst insgesamt gezeigt und diese normiert für den Referenzzustand abgebildet, um daraufhin eine Sensitivitätsanalyse der relevantesten Dateninputs durchzuführen, bevor auf die abschließende Ergebnisdarstellung für den Zukunftszustand der drei Flugzeugtypen näher eingegangen wird.

4.1. Ergebnisdarstellung der Produktsysteme für den Referenzzustand

Die Ergebnisse der LCA werden nun für die drei Produktsysteme und ihre lebenswegbezogenen Prozesse separat für jede Wirkungskategorie angegeben. Hierbei werden die Stoffemissionen für den Klimawandel in CO₂-eq und für die photochemische Ozonbildung in NO_x-eq abgebildet sowie die Materialnutzung für den mineralischen Ressourcenverbrauch in Cu-eq. Die Beiträge der Prozesse setzen sich aus den jeweiligen Inventaren der einzelnen Prozessmodule zusammen, die für die Lebensdauer von 20 Jahren gezeigt sind.

In Tabelle 4 werden zunächst die kompletten Umweltwirkungen vor der Normierung auf die FU von 1 pkm aufgelistet, die sich für den Personentransport in einem (elektrifizierten) 19-Sitzer Kleinflugzeug über die gesamte Lebensdauer ergeben. Auffällig am Beitrag jeder Lebensphase zu den Gesamtauswirkungen ist, dass die Nutzenphase die größten Umweltwirkungen insgesamt in allen drei Kategorien erzeugt. Während sich die Herstellungs- und die Entsorgungsphase für die Stoffemissionskategorien nur marginal auf die insgesamt entstehenden Umweltwirkungen auswirken, zeigt der Ressourcenverbrauch von der Herstellung des konventionellen bzw. elektrischen Antriebs und der Tragstruktur eine messbare Auswirkung auf die Materialnutzungskategorie. Die Herstellung der Materialien Kupfer, Nickel und kritische Rohstoffe wie Titan, Kobalt, Neodym und Lithium tragen hierbei am meisten zur Umweltwirkung in den Prozessen bei. Die höchste Klimawirkung in der Nutzenphase kann auf die Verbrennung von Kerosin zurückgeführt werden, bei der 3,15 kg CO₂-eq pro Kilogramm verbranntem Kerosin entstehen, woraus ebenfalls die höchste Gesundheitswirkung resultiert. Im Falle der FCB, bei der kein Kerosin verbrannt wird, resultieren die höchsten Emissionen aus der Herstellung von flüssigem Wasserstoff und dem Strommix, welche den aktuellen Zustand wiedergeben.

Table 4 Lebenswegbezogene Umweltwirkungen der drei Produktsysteme vor der Normierung auf 1 pkm.

Produkt-system	Einheit [in kg]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	4015,9	-	1378,0	105,4	36259,3	2544,8	10597,9	4079,9
1900D-	NO _x -eq	12,2	-	3,1	0,2	94,5	5,2	27,0	10,3
CONV-2002	Cu-eq	495,2	-	10,3	0,2	734,5	12,8	222,6	57,1
	Gesamt [in t]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
		18966,1	2538799,4	16372125,0		926,8	139,0	3570,9	-8409,1
		38,0	11131,5	26689,3		1,0	0,0	11,3	-24,5
		6,3	4951,0	0,0		1,2	0,0	35,6	-203,1
Produkt-system	Einheit [in kg]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	5334,8	2762,5	1508,7	1583,3	34237,4	2424,7	11582,9	11636,8
1900D-	NO _x -eq	16,2	10,4	3,4	7,4	89,2	4,9	32,7	26,1
PTE-2025	Cu-eq	657,8	268,3	11,3	0,6	680,8	12,0	511,2	50,1
	Gesamt [in t]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
		13457,5	1844409,5	11545424,1		1122,9	202,6	4333,9	-9095,5
		28,2	7908,9	20122,1		1,2	0,1	13,7	-28,1
		5,5	3562,5	0,0		1,5	0,0	44,4	-273,4
Produkt-system	Einheit [in kg]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	-	410491,0	1230,3	91,3	126901,2	2126,5	16884,5	10075,3
1900D-	NO _x -eq	-	1051,5	2,8	0,2	272,8	4,3	44,8	22,6
FCB-2050	Cu-eq	-	10473,3	9,2	0,2	389,8	8,9	750,5	43,4
	Gesamt [in t]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
		33759,7	33193408,7	-		7815,9	2024,0	36678,5	-47979,8
		40,6	39221,5	-		8,5	0,6	116,7	-196,2
		77,7	68614,2	-		10,3	0,4	405,4	-2977,9

4.2. Gesamtergebnisse der Produktsysteme für den Referenzzustand

Weiterführend werden die Ergebnisse für den Personentransport auf die funktionelle Einheit von einem pkm normiert, um nach den Umweltwirkungen insgesamt nun die Gesamtergebnisse der Produktsysteme bezogen auf ihre Funktion für den aktuellen Referenzzustand aufzuzeigen. In den folgenden Abbildungen 7 – 9 sind die Umweltwirkungen über den Lebensweg dargestellt und für die CONV, PTE und FCB graphisch aufbereitet. Hierbei werden im oberen Teil der Abbildung die jeweiligen Umweltwirkungen detailliert auf die verwendeten Materialien in den Herstellungsprozessen des Flugzeugs zurückgeführt, während im unteren Teil die Gesamtergebnisse der drei Lebensphasen, mit einer Fokussierung auf die Nutzenphase, für den entsprechenden Flugzeugtyp zusammengefasst sind.

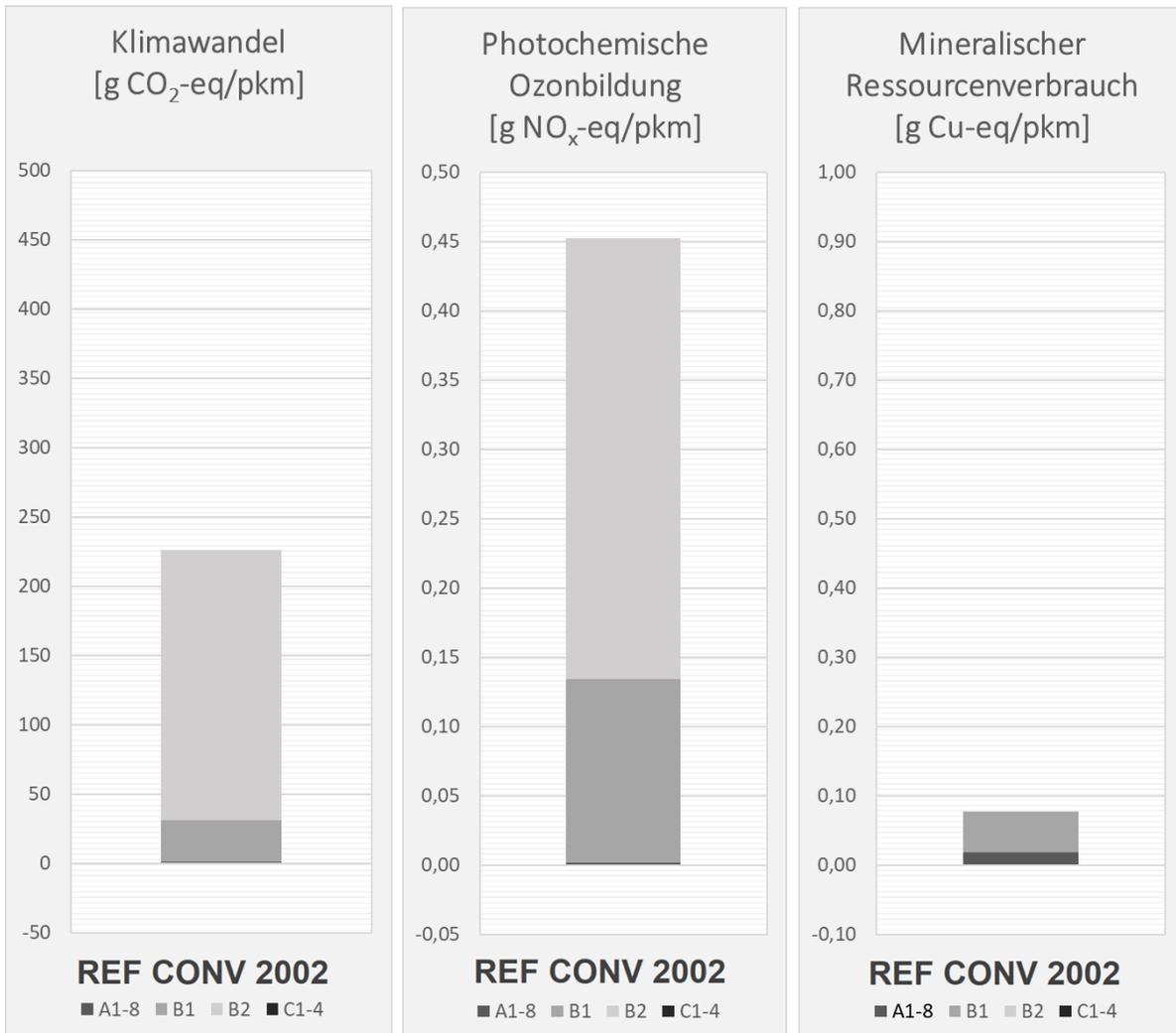
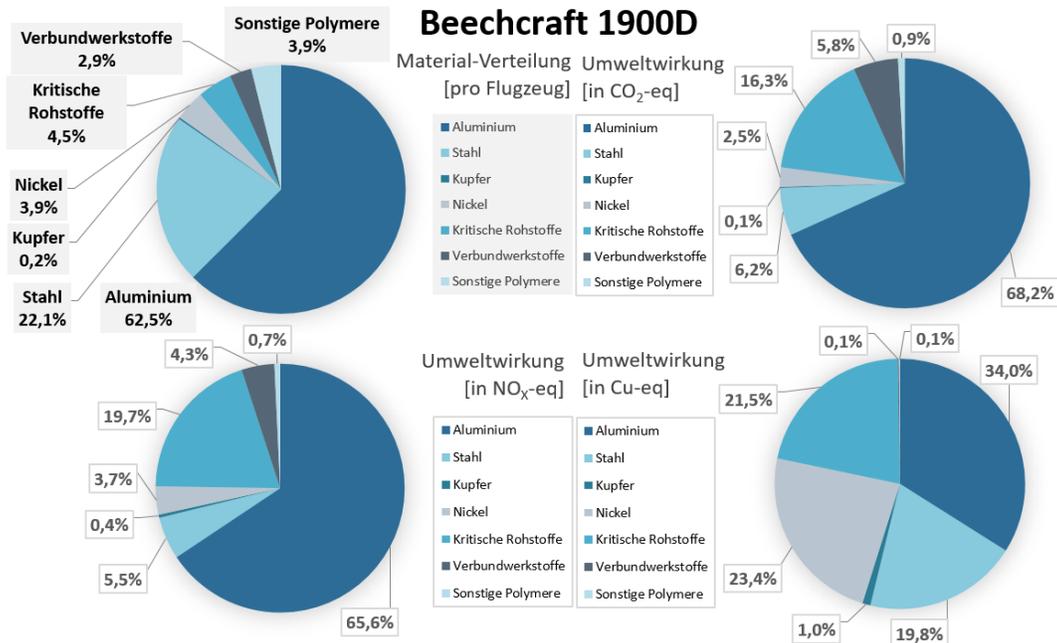


Abbildung 7 Umweltwirkungen der Beechcraft 1900D-CONV pro Lebensphase im Referenzzustand.

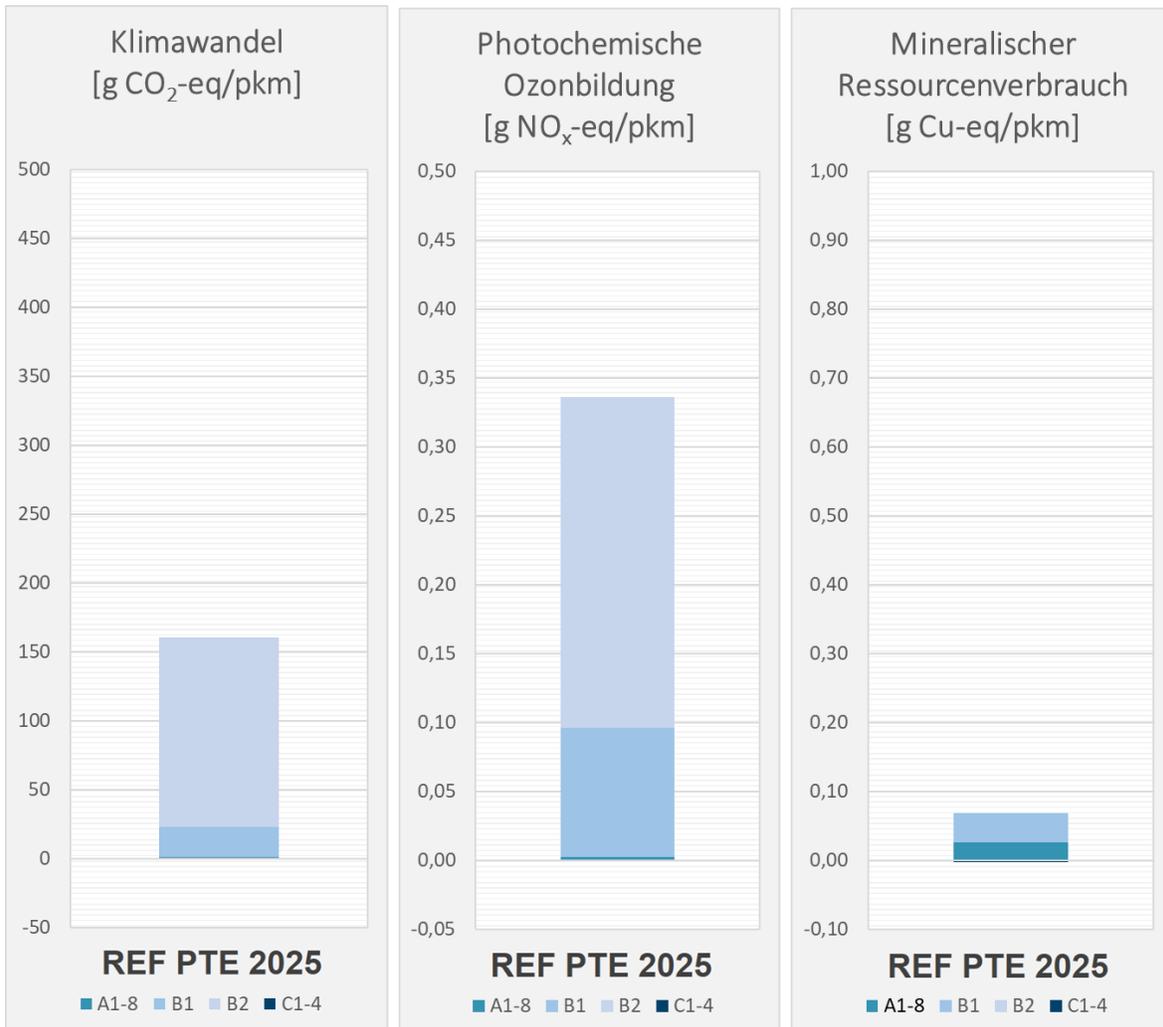
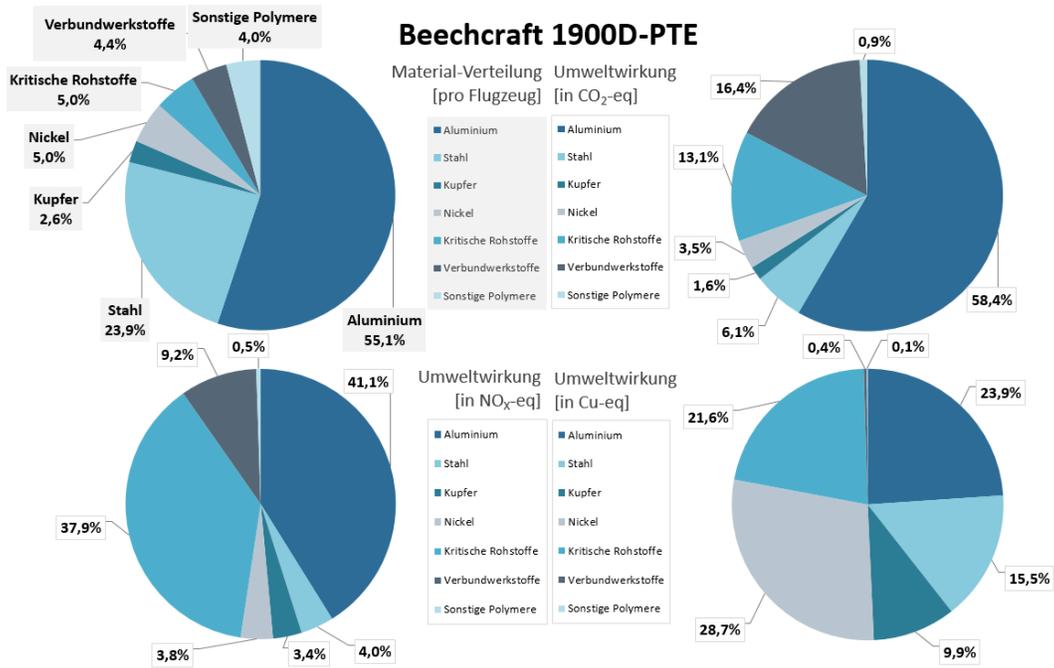


Abbildung 8 Umweltwirkungen der Beechcraft 1900D-PTE pro Lebensphase im Referenzzustand.

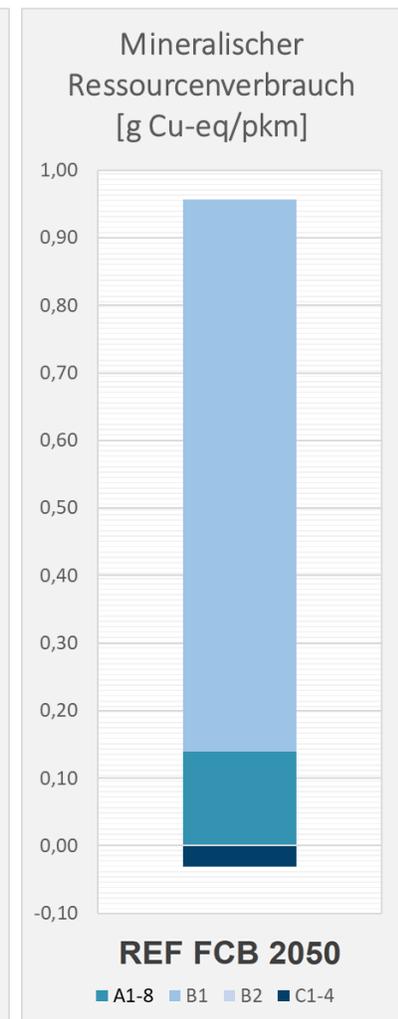
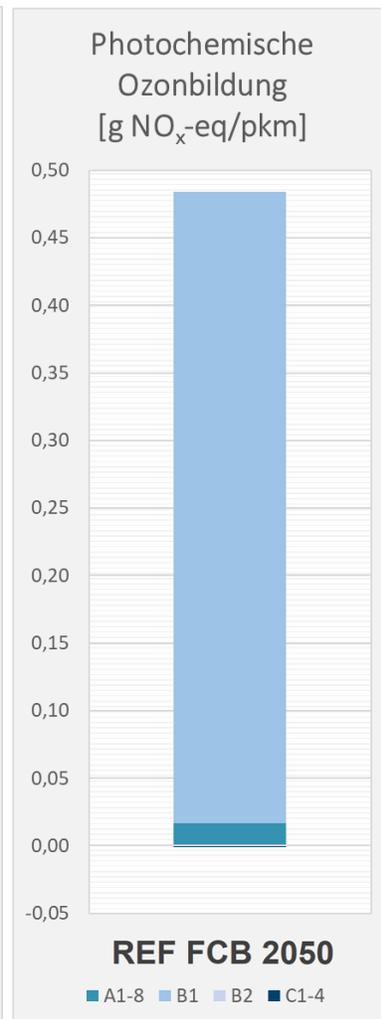
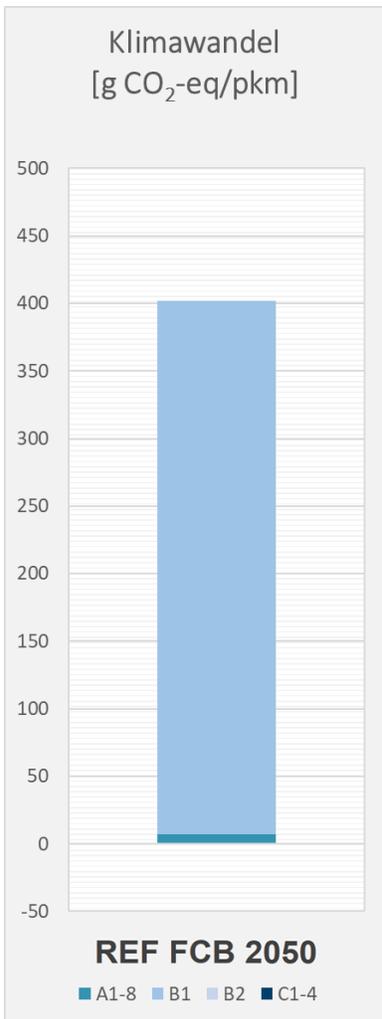
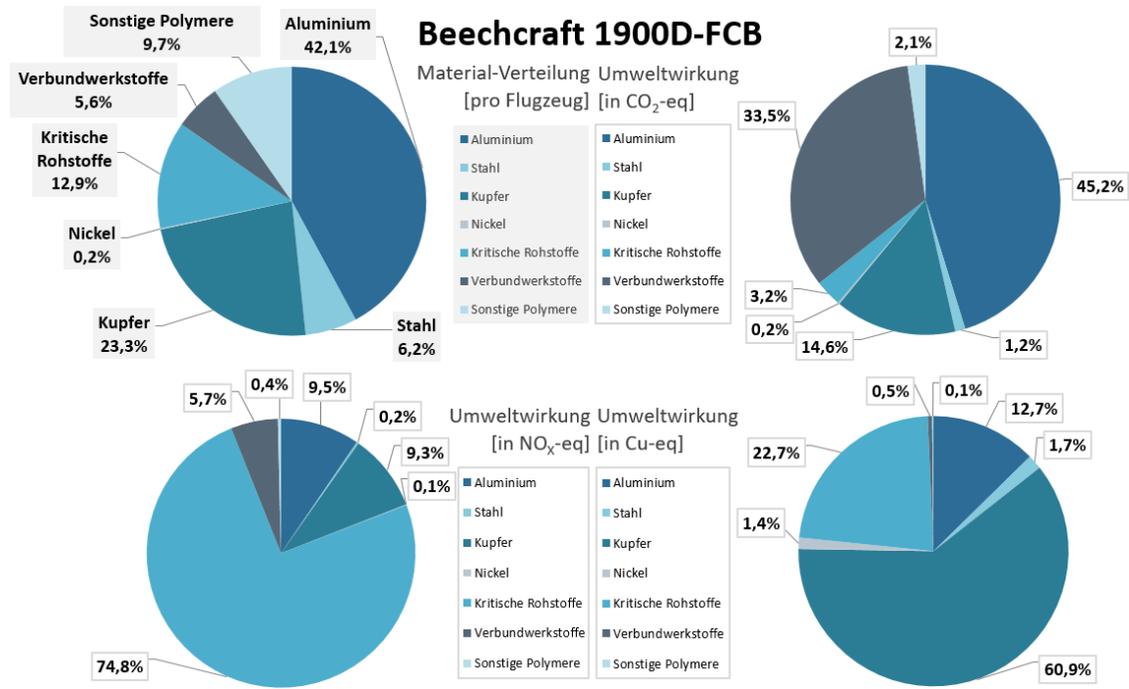


Abbildung 9 Umweltwirkungen der Beechcraft 1900D-FCB pro Lebensphase im Referenzzustand.

Die in Abbildung 7 – 9 dargestellten Ergebnisse, geordnet nach Wirkungskategorien und Lebensphasen, zeigen im Referenzzustand große Unterschiede für alle Flugzeuge auf. Das konventionelle Kleinflugzeug Beechcraft 1900D hat einen höheren Anteil an metallischen Rohstoffen wie Aluminium und Stahl und einen geringeren Anteil an kritischen Rohstoffen und Polymeren. Durch den ausschließlichen Einsatz an Kerosin in der Nutzenphase entstehen hierbei die höchsten Umweltwirkungen in allen drei Kategorien. Über den Lebensweg treten 225,88 g CO₂-eq pro pkm, 0,452 g NO_x-eq pro pkm und 0,075 g Cu-eq pro pkm auf.

Das elektrifizierte Kleinflugzeug PTE erzeugt im Gesamten 160,35 g CO₂-eq pro pkm, 0,336 g NO_x-eq pro pkm sowie 0,070 g Cu-eq pro pkm und hat in jeder der drei Kategorien eine geringere Auswirkung als das konventionelle Flugzeug. Die Umweltwirkungen werden hauptsächlich in der Nutzenphase erzeugt, bei der durch den hybridelektrischen Betrieb ein geringerer Kerosineinsatz entsteht. In den Herstellungsprozessen werden ca. 55% Aluminium, ca. 24% Stahl, ca. 13% Edelmetalle und ca. 8% Polymere eingesetzt. Hierbei ist der Austausch von zwei Elektromotoren nach je 6,8 Jahren und einer Lithium-Ionen-Batterie für die elektrischen Rollvorgänge alle 2,9 Jahre berücksichtigt. Die in der PTE-Maschine verwendeten Materialien haben Auswirkungen auf die Klimawirkung in Beiträgen von ca. 59% Aluminium, ca. 6% Stahl, ca. 18% Edelmetalle und ca. 17% Polymere, auf die Gesundheitswirkung von ca. 41% Aluminium, ca. 4% Stahl, ca. 45% Edelmetalle und ca. 10% Polymere sowie auf die Ressourcenwirkung von ca. 24% Aluminium, ca. 16% Stahl, ca. 60% Edelmetalle und unter 1% Polymere.

Für das elektrifizierte Kleinflugzeug FCB, welches ausschließlich im elektrischen Betrieb mit Strom und Wasserstoff angetrieben wird, entstehen 402,06 g CO₂-eq pro pkm, 0,483 g NO_x-eq pro pkm und 0,926 g Cu-eq pro pkm. Diese in jeder Wirkungskategorie höheren Umweltwirkungen entstehen aufgrund der Betrachtung im aktuellen Zustand, bei der die Bereitstellung von flüssigem Wasserstoff aufgrund des geringen Anteils an regenerativen Energien im Strommix über 30 kg CO₂-eq pro Kilogramm eingesetzten Kraftstoff erzeugt. Demnach zeigt sich gegenüber der CONV fast die doppelte Klimawirkung. Die hohe Ressourcenwirkung lässt sich neben der Wasserstoffherstellung, für die eine Vielzahl rohstoffnutzender Energieerzeugungstechnologien eingesetzt werden, auf den häufigen Austausch der Komponenten im elektrischen Antrieb zurückführen. Dies resultiert daher, dass Elektromotoren, Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftank nach Erreichen einer bestimmten Zyklanzahl aus Sicherheitsgründen im Flugzeug getauscht werden müssen. Hieraus erfolgt ein hoher Einsatz an Kupfer und kritischen Rohstoffen. Zudem ist der Anteil an Verbundwerkstoffen gestiegen, da um ein geringeres Flugzeuggewicht zu erreichen, in der Tragstruktur Aluminium mit CFK substituiert wird, welches trotz knapp der Hälfte weniger Materialeinsatz dennoch dreifach höheren THG-Emissionen zur Herstellung gegenüber der benötigten Aluminiummenge erzeugt.

Als Gesamtergebnis zeigt sich, dass die größten Beiträge aller drei Produktsysteme auf die Nutzenphasen und den daraus resultierenden Energieverbrauch zurückzuführen sind. Die hohe Relevanz der Energieträgerherstellung (Prozess B1) und Kerosinverbrennung (Prozess B2) ergibt sich aufgrund der langen Lebensdauer der Flugzeuge von 20 Jahren und der hohen Menge von 1,7 Flugmissionen pro Tag. Die Umweltbewertung im Referenzzustand stellt aufgrund einer geringeren Datenzuverlässigkeit durch die unabgeschlossene Marktreife noch keinen Vergleich zwischen den drei Flugzeugen dar. Die PTE und FCB haben durch den Rückgriff auf vielfältige Daten eine hohe Datenvollständigkeit, sodass sie nach der Bewertung im Zukunftszustand mit der CONV vergleichbar sind. Dennoch ergibt sich in einer ersten noch

nicht bewertenden Gegenüberstellung zwischen allen drei Flugzeugen das Ergebnis für den Referenzzustand, dass das partiell-turboelektrische Flugzeug Einsparungen von -29% CO₂-eq, -26% NO_x-eq sowie -7% Cu-eq gegenüber der Beechcraft 1900D erreichen würde. Demgegenüber würden für das brennstoffzellenbetriebene Flugzeug im Vergleich Erhöhungen von +78% CO₂-eq, +7% NO_x-eq sowie +1130% Cu-eq entstehen. Somit würde sich der Einsatz der PTE bereits im aktuellen Zustand in allen drei Wirkungskategorien lohnen, ein Personentransport in der FCB jedoch noch nicht. Dadurch, dass für beide Flugzeuge die Marktreife in 2025 bzw. 2050 anvisiert ist, müssen das elektrifizierte und konventionelle Flugzeug jeweils in diesem Jahr unter Zukunftsveränderungen betrachtet werden, um zu aussagekräftigen Ergebnissen für die vergleichende LCA-Studie zu gelangen. Die ermittelten Umweltwirkungen im Referenzzustand können genutzt werden, um Analysen von Sensitivität und Unsicherheit von Parametern durchzuführen, die als einflussreiche Treiber zur Modifikation in der prospektiven Ökobilanz geeignet sind. Hierfür werden ausgewählte Veränderungen im Rahmen von einer Sensitivitätsanalyse untersucht, bevor die finalen Ergebnisse für die LCA im Zukunftszustand vorgestellt werden.

4.3. Sensitivitätsanalyse

Bevor das Gesamtergebnis der LCA für diese Studie abgebildet wird, werden ausgewählte Parameter aus den Prozessen auf deren Sensitivität geprüft. Die tiefergehende Analyse soll aufzeigen, wie stark einzelne Prozessinputs zu den Umweltwirkungs-Ergebnissen beitragen und welche Umweltwirkung durch eine Variation entsteht. Dies kann ein besseres Verständnis von Signifikanz und Unsicherheit der erzeugten Ergebnisse für die Parameterauswahl in den Zukunftsszenarien gewährleisten. Die Sensitivitätsanalyse wird für die Prozessinputs durchgeführt, für die eine größere Unsicherheit zur Datenqualität bei der Datenerhebung aufgetreten ist bzw. für die eine große Wahrscheinlichkeit für eine zukünftige Veränderung besteht. Hieraus kann einerseits die Robustheit von Veränderungen der Dateninputs und deren Wirkung auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung im Referenzzustand überprüft werden. Und andererseits können die schlüssigsten Szenario-Parameter identifiziert und als Folge der Überprüfung jeweils eine Entscheidung des zu wählenden Dateninputs getroffen werden, um diese für die LCA im Zukunftszustand zu übernehmen.

Die geringste Datenqualität wird in der zweiten und dritten Lebensphase sowie im Prozess der Flugzeugmontage in der ersten Lebensphase erreicht. Demnach werden diese für die Untersuchung der Sensitivität fokussiert. Die Prozesse müssen in ihre einzelnen Bestandteile der Dateninputs zerlegt werden, um einen detaillierteren Einblick in den Ursprung der Umweltwirkung wiederzugeben. Bei den Dateninputs werden die Parameter Strommix und Recyclinganteil als die größten unsicheren Zukunftstreiber aufgrund von politischen Maßnahmen und Sektorenentwicklung angesehen. Eine weitere Unsicherheit stellt der Einsatz von alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff oder Kerosinsubstituten dar, die in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden sollen. In Abbildung 10 sind anhand von je zwei für die Untersuchung relevanten Wirkungskategorien die Sensitivitäten dieser ausgewählten Parameter für die PTE und FCB aufgezeigt.

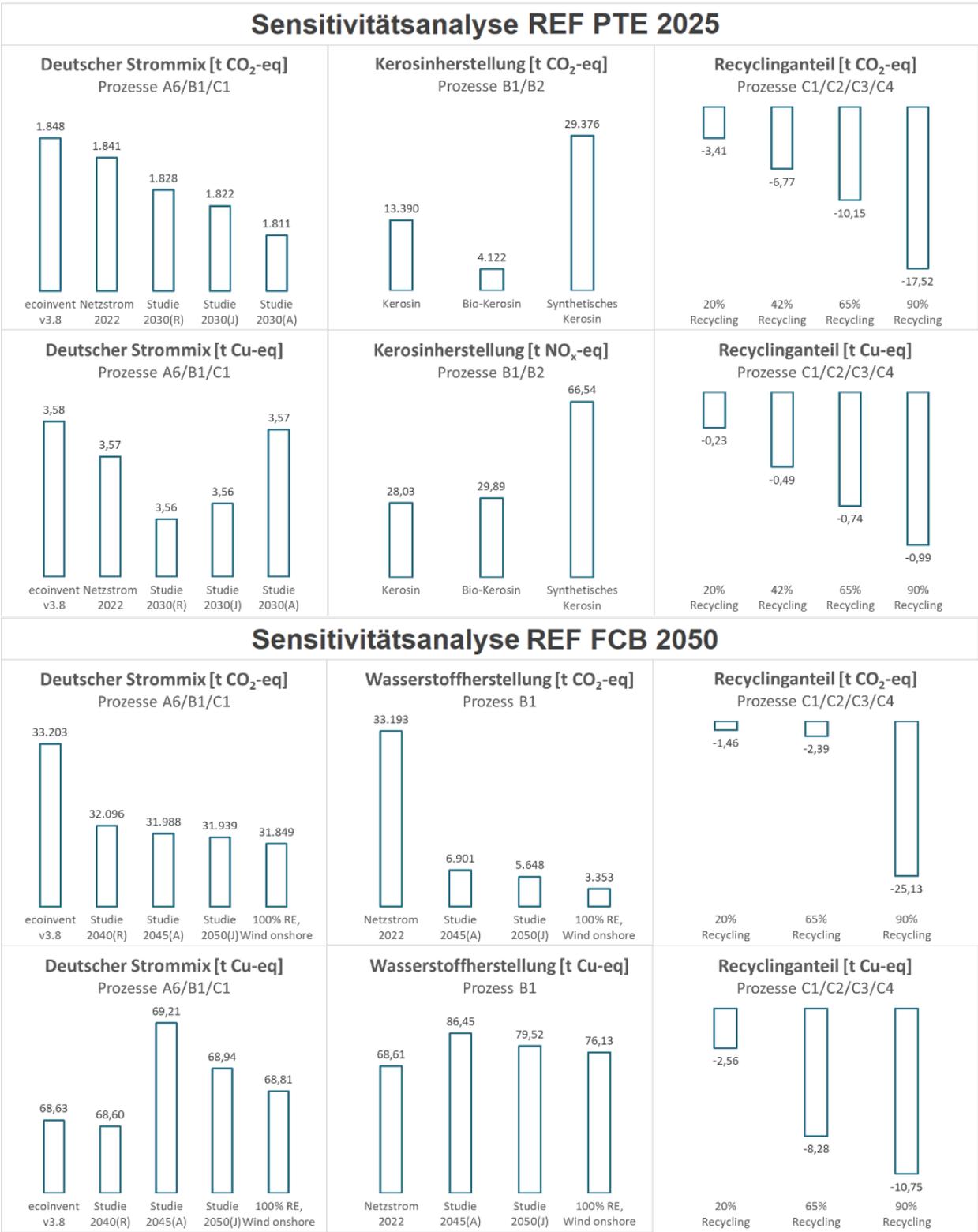


Abbildung 10 Sensitivitäten ausgewählter umweltrelevanter Parameter für die PTE und FCB im Vergleich.

Der erste Parameter in beiden elektrifizierten Flugzeugen ist der **deutsche Strommix**, der für den in der LCA-Studie gewählten Dateninput und in vier Variationen aufgezeigt wird. Es lässt sich erkennen, dass, wenn der bisherige Datensatz der Datenbank ecoinvent genutzt wird, die Klima- und Ressourcenwirkung am höchsten sind. Für eine Untersuchung im aktuellen Zustand ist die Wahl nachvollziehbar, jedoch zeigt bereits der deutsche Netzstrom ein Jahr vor der Ökobilanzuntersuchung auf, dass in der Realität mehr regenerative Energien wie PV und Wind sowie mehr Gas anstelle von Kohle genutzt wurden, wodurch die THG-Emissionen und der Ressourceneinsatz sinken (Fraunhofer ISE, 2022). Zudem werden drei weitere Forschungsstudien untersucht, die für den Anteil der Energieerzeugungstechnologien zu verschiedenen Strommix-Szenarien für Deutschland im Jahr 2030 sowie in 2040, 2045 bzw. 2050 gekommen sind (Agora/Stiftung Klimaneutralität, 2021; Jöhrens et al., 2020; Repenning et al., 2021). Abschließend wird eine bestmögliche Entwicklung von 100% regenerativen Energien anhand der Energiegewinnung von Wind auf dem Festland für die FCB im Jahr 2050 gegenübergestellt.

Um eine Auswahl bezüglich des veränderten Szenario-Parameterwertes für die PTE im Szenario „Keep moving forward“ in 2025 zu treffen, wird sich für den mittleren Wert dieser Studien von Jöhrens et al. entschieden. Dieser weist zwar weniger hohe THG-Emissionsreduktionen, aber gleichzeitig geringere Ressourcenverbräuche als die Agora Studie auf. Denn während in der Agora Studie mehr PV sowie mehr Gas und geringe Kohleanteile angenommen werden, berücksichtigt die Studie von Jöhrens et al. mehr Windkraftanlagen sowie weniger Gas und mehr Kohleinsatz, welches eine größere Korrelation mit der aktuellen Strommix-Entwicklung hat. Für die Dateninputs der FCB in 2050 werden ebenfalls diese beiden Studien berücksichtigt und in den zwei verschiedenen Szenarien „Wind of change“ die Studie von Jöhrens et al. für das Jahr 2050 und „Fast progress“ die Agora Studie für das Jahr 2045 verwendet. Auf die Nutzung von 100% regenerativen Energien wird verzichtet, da kein Best-Case Szenario, sondern nur zwei mögliche positive Szenarien im breiten Entwicklungsraum für das Jahr 2050 abgebildet werden sollen.

Als weiterer Parameter wird die **Herstellung alternativer Kraftstoffe** einmal für die Kerosinherstellung der PTE und einmal für die Wasserstoffherstellung der FCB hinsichtlich der Sensitivität in der Betriebsphase untersucht. Zur Herstellung des konventionellen Kraftstoffs werden die projektinternen Kerosinstitute Bio-Kerosin auf Basis einer hydrothermalen Verflüssigung von Gülle und synthetisches Kerosin aus dem Herstellungsprozess Power-to-Liquid auf Basis des gewählten Strommix von Jöhrens et al. berücksichtigt (Strathoff et al., 2022). Diese werden der Herstellung von konventionellem Kerosin gegenübergestellt. Während in der Klimawirkung Bio-Kerosin gegenüber konventionellem Kerosin deutliche Verbesserungen aufzeigt, entstehen für synthetisches Kerosin höhere THG-Emissionen. In der Gesundheitswirkung treten sowohl für Bio-Kerosin als auch für synthetisches Kerosin höhere Luftschadstoff-Emissionen als für konventionelles Kerosin auf. Für die Ressourcenwirkung dieser beiden alternativen Kraftstoffpfade konnte projektintern kein Wert überliefert werden. Die Wasserstoffherstellung erfolgt zunächst auf Basis des aktuellen Netzstroms im Jahr 2022 und wird daraufhin in drei Variationen basierend auf dem Strommix von Jöhrens et al., der Agora Studie und 100% Windenergie gegenübergestellt. Während sich in allen drei Varianten die THG-Emissionen signifikant reduzieren, wird ein höherer Ressourcenverbrauch erzeugt, der auf den größeren Anteil von regenerativen Energieerzeugungstechnologien und deren erhöhten Einsatz von Rohstoffen beispielsweise für die Bereitstellung von Neodym in Windkraftanlagen zurückzuführen ist.

Zur Zukunftsbetrachtung der PTE werden die Kraftstoffsubstitute Bio-Kerosin und synthetisches Kerosin aufgrund der unsicheren Datenlage und der Verschlechterung in der Wirkungskategorie photochemische Ozonbildung nicht weiter betrachtet und weiterhin konventionelles Kerosin im KMF-Szenario im Jahr 2025 eingesetzt. Für die Wasserstoffherstellung der FCB im Jahr 2050 wird im WOC-Szenario der Strommix 2050 der Studie von Jöhrens et al. und im FP-Szenario der Strommix 2045 von der Agora Studie in die Sachbilanz dieser LCA-Studie für den Zukunftszustand integriert.

Der letzte Parameter ist der **Recyclinganteil** zum Lebensende des Flugzeugs hin, der für die PTE und FCB in drei bzw. zwei Variationen aufgezeigt wird. Die Wahl von 20% Recyclingmenge für den Referenzzustand stellt einen konservativen, jedoch begründeten Wert dar, der sich in der Literatur wiederfindet (Asmatulu et al., 2013a; EU COM, 2020). Im Möglichkeitsraum des zukünftigen Recyclings liegt der Anteil von zusammengefasst etwa 65% Recycling, entnommen aus Literaturquellen von vor mehr als zehn Jahren (Oliveira Fernandes Lopes, 2010; UNEP, 2011b), sowie der Anteil von etwa 90% Recycling, welcher in einer aktuellen Forschungsstudie für den Mobilitätsbereich angenommen wird (Fishman et al., 2021). Aufgrund der hohen Recyclingmengen in den Studien und dem aktuell geringen Recycling von etwa 20% wird für eine Trend-Entwicklung der nächsten Jahre die Annahme von 42% Recyclinganteil getätigt, die auf Literaturannahmen basiert (Asmatulu et al., 2013b). Die erreichten Verbesserungen von Klimawirkung und Ressourcenwirkung korrelieren mit der stetigen Erhöhung des Recyclinganteils und der daraus wiedergewonnenen Sekundärrohstoffmenge. Im fast vollständig durchgeführten 90% Recycling, das als technisch höchstmögliche Umsetzung angesehen werden kann, wird eine hohe Menge an Polymeren, die zuvor dem Verbrennungsprozess zugeführt wurden, nun recycelt, mit der Ausnahme der von Experten eingeschätzten nicht möglichen Rezyklierbarkeit der Verbundwerkstoffe kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Hieraus werden die größten Einsparungen erzeugt.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Zeithorizonte wird für die PTE im KMF-Szenario der Szenario-Parameter von 42% Recycling gewählt, während für die FCB aufgrund des zeitlich weit entfernten Eintretens des Recyclings die zwei Szenario-Parameter von 65% Recyclinganteil für das WOC-Szenario und 90% Recyclinganteil für das FP-Szenario in die LCA integriert werden. Im Anschluss an die Parameterwahl für die Jahre 2025 und 2050 wird, zusammen mit den weiteren Zukunftsveränderungen, welche in Kapitel 3.2.3 erläutert wurden, nachfolgend auf die finalen Ergebnisse der LCA für den Personentransportvergleich eingegangen.

4.4. Gesamtergebnisse der Produktsysteme für den Zukunftszustand

In diesem Abschnitt werden die Endergebnisse der Ökobilanz anhand der Modelle aller Produktsysteme im Zukunftszustand dargestellt. Die LCA zielt darauf ab, im Vergleich der Produktsysteme „konventionelles Kleinflugzeug“, „partiell-turboelektrisches Kleinflugzeug“ und „brennstoffzellenbetriebenes Kleinflugzeug“ zu abschließenden Gesamtergebnissen für den regionalen Personentransport bezüglich der ökologischen Vorteilhaftigkeit in den Jahren 2025 und 2050 zu gelangen. Aus der Umweltbewertung jedes Szenarios entsteht ein prospektives Wirkungsabschätzungsprofil. Zunächst werden die drei Flugzeugtypen in einem

internen Vergleich zur Technologieentwicklung in allen ihren Zukunftsveränderungen separat untersucht und modifizierte Bestandteile mit unsicherem Veränderungspotenzial gegenüber den nicht-modifizierten Daten aufgezeigt. Daraufhin wird in einem externen Vergleich auf die Gegenüberstellung zwischen konventionellen und elektrifizierten Flugzeugen und deren Umweltwirkungen unter Berücksichtigung von den Zukunftsveränderungen im jeweiligen Marktetablierungsjahr näher eingegangen, um pro Szenario die ökologische Vorteilhaftigkeit zu bestimmen. Hieraus kann im Transfer ein Benchmarking zu Sektorenzielsetzungen durchgeführt werden. In Abbildung 11 werden als abschließendes Ökobilanz-Gesamtergebnis die Umweltwirkungsergebnisse sowohl im Referenzzustand als auch im Zukunftszustand für die drei Flugzeuge dargestellt.

Für die **Beechcraft 1900D** im oberen Drittel der Abbildung ist ersichtlich, dass im Zukunftszustand in allen drei Wirkungskategorien große Reduktionen der Umweltwirkungen gegenüber dem Referenzzustand auftreten. Die Verbesserungen resultieren nicht nur daraus, dass die CONV die gleichen übergeordneten Zukunftsveränderungen wie die elektrifizierten Flugzeuge für die ausgewählten Parameter in den Jahren 2025 und 2050 erfährt, sondern sich auch der Entwurf einerseits von einem normalen eingefassten Flügel zu einem Hochdecker-Flugzeug ändert und andererseits aufgrund technologischem Fortschritt weitere Materialeinsparungen und Kraftstoffreduktionen für die beiden Betrachtungshorizonte angenommen wurden. Dies resultiert in dem abschließenden Ergebnis für den **Zukunftszustand 2025** im KMF-Szenario, dass 179,21 g CO₂-eq pro pkm, 0,364 g NO_x-eq pro pkm und 0,062 g Cu-eq pro pkm entstehen. Neben der Gewichtsveränderung für die CONV-2025 in der Herstellungsphase werden ein Fünftel des Kraftstoffs eingespart, woraus sich die reduzierten Werten in der Nutzenphase ergeben. Die Veränderung des deutschen Strommix zeigt keine große Änderung des Gesamtergebnisses, jedoch können durch den größeren Recyclinganteil von 42% in 2025 und 65% bzw. 90% in 2050 höhere Gutschriften in der letzten Lebensphase eingeholt werden, woraus insbesondere in der Wirkungskategorie mineralischer Ressourcenverbrauch Verbesserungen erreicht werden. Für den **Zukunftszustand 2050** zeigt sich, dass im WOC-Szenario 151,77 g CO₂-eq pro pkm, 0,308 g NO_x-eq pro pkm und 0,049 g Cu-eq pro pkm und im FP-Szenario 151,76 g CO₂-eq pro pkm, 0,308 g NO_x-eq pro pkm und 0,048 g Cu-eq pro pkm entstehen. Die Verbesserungen sind ebenfalls auf ein geringeres Flugzeuggewicht insgesamt sowie einen geringeren Kraftstoffbedarf zurückzuführen. Das reduzierte Flugzeuggewicht resultiert hauptsächlich aus dem Wechsel von der Tragstruktur in Metallbauweise hin zu Verbundbauweise, wodurch der Mehreinsatz des Verbundwerkstoffs CFK zu Veränderungen an den Umweltwirkungen in der ersten Lebensphase führt. Der geringe Unterschied in den zwei Szenarien, die unter anderem auf Parametern zum verschiedenen Strommix sowie einer Dekarbonisierung und Verbesserung des Herstellungspfades von CFK resultieren, zeigt die fehlende Signifikanz der Parameter auf das Gesamtergebnis, da Kerosin weiterhin der relevanteste Parameter für das konventionelle Flugzeug ist. Jedoch kann festgehalten werden, dass für die Beechcraft 1900D aus dem Baujahr 2002 größere Verbesserungen in allen drei Wirkungskategorien erzeugt werden können, wenn sie unter veränderten Bedingungen von technologischem und zeitlichem Fortschritt bis 2025 bzw. bis 2050 gebaut werden würde. Weiterhin würde der Kerosineinsatz in allen drei Kategorien zwar reduziert werden, jedoch weiterhin den größten Treiber der Umweltwirkungen darstellen. In 2025 können aufgrund 20% weniger Kerosineinsatz etwa ein Fünftel Umweltwirkungsreduktionen erzeugt werden und in 2050 aufgrund 33% weniger Kerosineinsatz knapp ein Drittel Umweltwirkungsreduktionen in allen Kategorien gegenüber der CONV-2002.

Umweltwirkungsergebnisse für den Personentransportvergleich in einem 19-Sitzer Kleinflugzeug

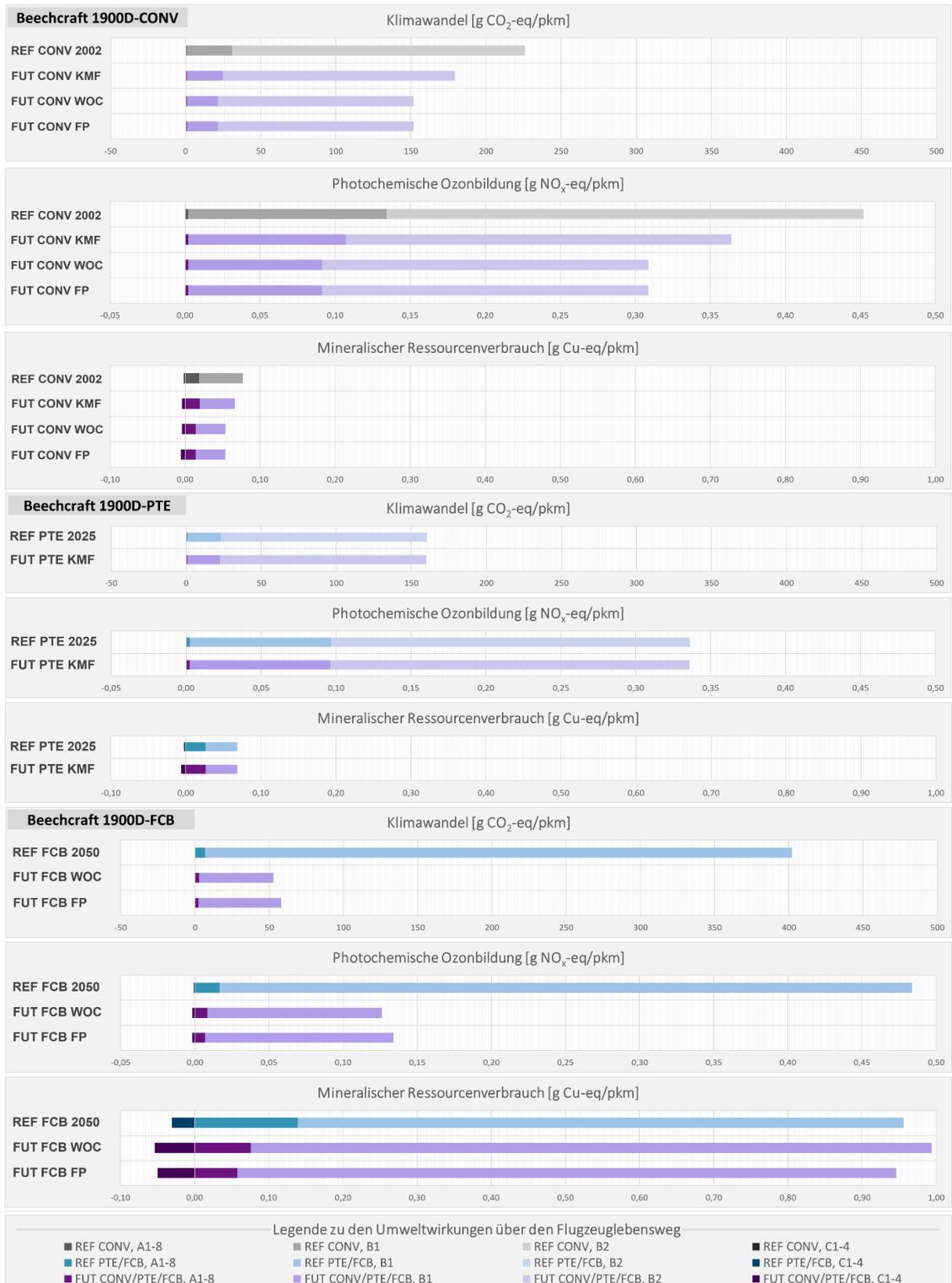


Abbildung 11 Vergleich der Umweltwirkungen aller drei Flugzeuge im Referenzzustand und im Zukunftszustand.

Für die hybridelektrische **PTE** ergibt sich, dass die Reduktion der Umweltwirkungen in den drei Kategorien für den **Zukunftszustand 2025** im KMF-Szenario gering ausfällt. Es werden nur Änderungen zu Strommix und Recyclinganteil berücksichtigt sowie eine höhere technologische Reife durch Verbesserungen des Ressourceneinsatzes zur Herstellung des Energiespeichers Lithium-Ionen-Batterie für das elektrische Rollen. Eine geringe Reduktion der Klimawirkung von weniger als 1% zwischen Referenzzustand und Zukunftszustand resultiert aus der Verbesserung der Bereitstellung des Energieträgers Strom. Aufgrund des geringen Zeithorizontes fällt die Änderung jedoch marginal aus, die als Ursache auch auf den geringen Stromeinsatz in der Nutzenphase zurückzuführen ist. Die leichte Reduktion der Ressourcenwirkung ergibt sich wiederum hauptsächlich aus der höheren Menge an bereitgestellten Sekundärrohstoffen. Als abschließendes Resultat entstehen für die prospektive LCA des KMF-Szenarios 159,99 g CO₂-eq pro pkm, 0,336 g NO_x-eq pro pkm und 0,066 g Cu-eq pro pkm für die PTE im Zukunftszustand. Dies führt zu Einsparungen von -29% CO₂-eq, -26% NO_x-eq sowie -12% Cu-eq gegenüber der CONV-2002. Im Szenario-basierten Vergleich zur CONV-2025A entstehen geringere Umweltwirkungen in den Kategorien Klimawandel von -11% und photochemische Ozonbildung von -8% und höhere Umweltwirkungen in der Kategorie mineralischer Ressourcenverbrauch von +7%.

Für die flüssigwasserstoffelektrische **FCB** zeigt sich unter Berücksichtigung der beiden Szenarien WOC und FP für den **Zukunftszustand 2050** ein grundsätzlich anderes Resultat im internen Vergleich. Die Szenarien basieren auf durchgeführten Veränderungen zu Strommix, Recyclingmix, Herstellungspfaden von CFK und Wasserstoff sowie auf technologischem Fortschritt von den im Flugzeug eingesetzten elektrischen Komponenten. Aus der jeweiligen Kombination der Szenario-Parameter von Anhang 34 und 35 entstehen für den Zukunftszustand 2050 im WOC-Szenario 52,70 g CO₂-eq pro pkm, 0,125 g NO_x-eq pro pkm und 0,940 g Cu-eq pro pkm und im FP-Szenario 57,92 g CO₂-eq pro pkm, 0,132 g NO_x-eq pro pkm und 0,897 g Cu-eq pro pkm. Die größte Änderung zwischen dem Referenzzustand und den beiden Zukunftszuständen basiert auf der Veränderung der Wasserstoffherstellung, welche in Prozess B1 zu den höchsten Umweltwirkungen in allen drei Kategorien führt. Unter dem Strommix für WOC werden zur Bereitstellung des flüssigen Wasserstoffs THG-Emissionen von nur noch einem Sechstel und für FP von einem Fünftel gegenüber der Ausgangslage erzeugt. Dagegen führt die Veränderung des Strommix für die direkte Stromnutzung im Betrieb nur zu jeweils 4% THG-Emissionsreduktionen gegenüber der Bewertung im Status Quo. Für die Klimawirkung entsteht mit 87% bzw. 86% weniger THG-Emissionen insgesamt ein hohes Modifikationspotential am Flugzeug selber. Jedoch resultiert aus dem großen Anteil an regenerativen Energieerzeugungstechnologien als unbeabsichtigte Nebenwirkung eine Erhöhung in der Kategorie mineralischer Ressourcenverbrauch. Die signifikante Verschlechterung der Rohstoffwirkung in der Nutzenphase von beiden Szenarien gegenüber dem Status Quo kann teilweise durch den hohen Recyclinganteil und die höheren Lebensdauern von Elektromotor, Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank kompensiert werden. Insgesamt entstehen für das WOC-Szenario mit mehr Windkraft 2% höheren Auswirkungen und für das FP-Szenario mit mehr PV und Gasnutzung 3% geringere Auswirkungen. Die Lebensdauererlängerungen, die einen geringeren Materialbedarf für die Flugzeugherstellung zur Folge haben, können in der ersten Lebensphase in allen drei Kategorien relevante Reduktionen der Umweltwirkungen erreichen. Für die LCA im Zukunftszustand entstehen als finales Ergebnis für die FCB Einsparungen von -77% CO₂-eq und -72% NO_x-eq, jedoch eine Erhöhung von +1149% Cu-eq im WOC-Szenario sowie -74% CO₂-eq und -71% NO_x-eq, jedoch +1092% Cu-eq im FP-Szenario gegenüber der CONV-2002. Im Szenario-basierten Vergleich zur CONV-2050B resultieren geringere Umweltwirkungen in den

Kategorien Klimawandel von -65% und photochemische Ozonbildung von -60% sowie eine höhere Umweltwirkung in der Kategorie mineralischer Ressourcenverbrauch von +1804% sowie im Vergleich zur CONV-2050C -62% CO₂-eq und -57% NO_x-eq, jedoch +1763% Cu-eq.

Nachdem die Forschungsfrage, welche Umweltwirkungen bei verschiedenen Flugtransportalternativen gegenüber einem konventionellen Kleinflugzeug entstehen, in Kapitel 4.1 und 4.2 beantwortet werden konnte, ist in diesem Kapitel nun die zweite Frage untersucht worden, welche Veränderungen bis zur Markttablierung nach erfolgter Marktreife der neuartigen Technologien eintreten können. Dieser Ökobilanz-Bericht zeigt auf, dass die ökologische Vorteilhaftigkeit für die elektrifizierten Flugzeuge PTE und FCB bestätigt werden kann, wenn Zukunftsveränderungen bis zum Erreichen der Marktreife berücksichtigt werden, jedoch nicht in allen untersuchten Wirkungskategorien.

Zusammenfassend kann als abschließendes Resultat dieser vergleichenden LCA-Studie festgehalten werden, dass für einen Personentransport in einem Kleinflugzeug, über eine Flugdistanz von 476 km und einem Transport von 19 Personen bei 75% Maschinenauslastung, das partiell-turboelektrische Flugzeug in 2025 gegenüber einem Austausch mit der aktuellen Maschine eine geringere Klimawirkung von 29% pro Personenkilometer, eine geringere Gesundheitswirkung von 26% pro Personenkilometer und eine geringere Ressourcenwirkung von 12% pro Personenkilometer erreichen kann. Für das brennstoffzellenbetriebene Flugzeug in 2050, bei welchem die Zukunftsentwicklung aufgrund des unsicherheitsbehafteten fernen Zeithorizonts in einer Spannweite angegeben wird, könnte ein Austausch mit der aktuellen Maschine zu einer geringeren Klimawirkung von 74-77% pro Personenkilometer, einer geringeren Gesundheitswirkung von 71-72% pro Personenkilometer und einer höheren Ressourcenwirkung von 1092-1149% pro Personenkilometer führen. Dieses Resultat der mindestens in zwei von drei Wirkungskategorien erreichten ökologischen Vorteilhaftigkeit der beiden Flugzeugvarianten stellt die abschließende Bewertung zur ökologischen Nachhaltigkeit im elektrischen Fliegen dar. Für die beiden elektrifizierten Flugzeuge PTE und FCB kann daher in naher und in ferner Zukunft bis zur Markttablierung ein großes Potenzial von fast 30% in 2025 und von über 70% in 2050 für die Reduktion von Klimagasen und Luftschadstoffen gegenüber dem aktuellen Zustand festgestellt werden. Dies ist aufgrund des Transformationstyps auf die technologischen Veränderungen an den zwei Flugzeugen selber, aber auch auf den relevantesten modifizierten Parameter, der Regenerativen Energien Anteilserhöhung im Strommix, zurückzuführen. Daher sollten diese Flugzeugtypen im Markthochlauf weiter erforscht werden, um die Ergebnisse dieser Ökobilanz-Studie mit Erkenntnissen aus der praktischen Umsetzung der Flugzeugentwürfe im Pilotbetrieb zu erweitern. Die erzeugten Umweltwirkungsergebnisse aus der Wirkungsabschätzung werden in der letzten Methodenphase der Auswertung genauer analysiert und umfassend betrachtet.

5. Auswertung

Für die letzte Phase der Ökobilanzierung werden die erzeugten Ergebnisse aus der Sachbilanzphase und Wirkungsabschätzungsphase ausgewertet. Es wird das ermittelte Potenzial für den Personentransport in einem elektrischen Kleinflugzeug zunächst tabellarisch im Rahmen einer Beitragsanalyse aufgearbeitet und mittels detaillierter Zuordnung der Umweltwirkungen zu den einzelnen Prozessen und Lebensphasen die signifikanten Parameter der LCA-Ergebnisse herausgearbeitet und der konventionellen Variante im Betrachtungsjahr gegenübergestellt. Daraufhin werden die Resultate dieser Ökobilanz-Studie beurteilt hinsichtlich Vollständigkeit, Sensitivitäten, Konsistenz und mit anderen Studien validiert, Zielsetzungen überprüft sowie Einschränkungen aufgezeigt und Empfehlungen ausgesprochen.

5.1. Beitragsanalyse und signifikante Parameter

Im direkten Vergleich der Umweltwirkung von den zwei Personentransportalternativen mit der Beechcraft 1900D im Marktetablierungsjahr 2025 bzw. 2050 zeigt sich für die untersuchten Wirkungskategorien „Klimawandel“, „Photochemische Ozonbildung“ und „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ das Resultat, dass für elektrische Flugzeuge Verbesserungen in mindestens zwei der drei Kategorien erreicht werden können. In der Beitragsanalyse sollen die wichtigsten, umweltrelevanten Faktoren, die zur FU von 1 pkm beitragen, kenntlich gemacht werden. Diese Beitragsanalyse inklusive der signifikanten Prozesse mit jeweils farblicher Markierung für mehr als 1% bzw. 10% Beitrag am Gesamtergebnis kann nachfolgend Tabelle 5 für die PTE und Tabelle 6 für die FCB entnommen werden. Im Vergleich dazu befindet sich die Beitragsanalyse der CONV in den Varianten 2002, 2025A, 2050B und 2050C in Anhang 39.

Die signifikanten Parameter als größte Treiber der Umweltwirkungen können für die **2025 Flugzeuge** in den zwei Stoffemissions-Kategorien Klimawandel und photochemische Ozonbildung identifiziert werden als die Kerosinverbrennung mit über 70% Anteil an den Gesamtergebnissen der Umweltwirkungen und dem Energieträgereinsatz, der bei der CONV-2025A zu 100% aus der Kerosinherstellung resultiert und bei der PTE-2025A zu 98,4% aus der Kerosinherstellung und zu 1,6% aus der Stromherstellung. Für die Nutzenphase ergibt sich daraus ein Anteil von über 99% an den Gesamtemissionen für Treibhausgase und Luftschadstoffe. Neben dem ausschließlich signifikanten Parameter Kerosin in den beiden Prozessen der Lebensphase B zeigt die Materialnutzungs-Kategorie mineralischer Ressourcenverbrauch ein diversifizierteres Resultat auf. Mehr als 60% Beitrag können dem Prozess B1 zugeordnet werden, wobei dieser bei der CONV-2025A zu 100% aus der Kerosinherstellung resultiert und bei der PTE-2025A zu 98,3% aus der Kerosinherstellung und zu 1,7% aus der Stromherstellung. Über 10% Beitrag am Gesamtergebnis zeigen für beide Flugzeuge die Prozesse A1 und A5 auf. Die hohen Umweltwirkungen des mineralischen Ressourcenverbrauchs können auf den Einsatz von Titan, Kobalt und Nickel in der Gasturbinenherstellung sowie Titan in Tragstrukturherstellung als Auswirkungen kritischer Rohstoffe zurückgeführt werden. Die Reduktion der Umweltwirkungen um 5% bzw. über 10% im KMF-Szenario für den Prozess C4 der Sekundärrohstoffbereitstellung wird durch die Wiedergewinnung von Aluminium, Stahl und Edelmetallen erzeugt. Demnach stellen die signifikanten Parameter für die Ressourcenwirkung die Kerosinbereitstellung sowie die Herstellung des Rohstoffs Nickel sowie weiteren kritischen Rohstoffen dar.

Tabelle 5 Signifikante Parameter der Beechcraft 1900D-PTE bezüglich des prozessbezogenen Beitrags an den Umweltwirkungen.

Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft 1900D-PTE-2025	CO ₂ -eq	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,25%	0,02%	0,09%	0,09%
	NO _x -eq	0,06%	0,04%	0,01%	0,03%	0,32%	0,02%	0,12%	0,09%
	Cu-eq	11,90%	4,85%	0,20%	0,01%	12,32%	0,22%	9,25%	0,91%
	Gesamt [g/pkm]	B1	B2	C1	C2	C3	C4		
	160,35	13,71%	85,79%	0,01%	0,00%	0,03%	-0,07%		
	0,336	28,04%	71,33%	0,00%	0,00%	0,05%	-0,10%		
	0,070	64,45%	0,00%	0,03%	0,00%	0,80%	-4,95%		
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft 1900D-PTE-2025A (KMF)	CO ₂ -eq	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,25%	0,01%	0,09%	0,09%
	NO _x -eq	0,06%	0,04%	0,01%	0,03%	0,32%	0,02%	0,12%	0,09%
	Cu-eq	12,51%	5,10%	0,22%	0,01%	12,95%	0,22%	9,72%	0,95%
	Gesamt [g/pkm]	B1	B2	C1	C2	C3	C4		
	159,99	13,55%	85,98%	0,01%	0,00%	0,07%	-0,14%		
	0,336	27,99%	71,43%	0,01%	0,00%	0,10%	-0,21%		
	0,066	67,56%	0,00%	0,05%	0,00%	1,76%	-11,07%		

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Für die **2050 Flugzeuge** ergibt sich die Beitragsanalyse in den drei Wirkungskategorien in einer ähnlichen Zusammensetzung, dass die Nutzenphase die größten Umweltwirkungen erzeugt. Während dies bei der konventionellen Maschine auf den Kerosinverbrauch zurückzuführen ist, resultiert für die FCB über 95% des Beitrags in jeder Kategorie auf die Herstellung von Wasserstoff und Strom. Dadurch, dass, wie in Abbildung 10 der Sensitivitätsanalyse ersichtlich ist, sich das Umweltwirkungsergebnis von Wasserstoff als direkte Ursache auf den Strommix zurückführen lässt, welcher zusätzlich als direkte Nutzung zu 4% der Betriebsemissionen beiträgt, kann der Strommix insgesamt als signifikanter Parameter von allen drei Kategorien identifiziert werden. Während sich die Beiträge der Stoffemission für die CONV auf die Nutzenphase beschränken, werden für die beiden Varianten der FCB in 2050 in den Herstellungsprozessen von elektrischem Antrieb (A2) und Tragstruktur (A5) sowie in den EOL-Prozessen von Recycling (C3) und Sekundärrohstoffwiedergewinnung (C4) nennenswerte Auswirkungen von über einem Prozent erzeugt. Als signifikant mit 10% Beitrag am Gesamtergebnis kann nur in der Ressourcenkategorie die Herstellung des elektrischen Antriebs für die FCB im Referenzzustand identifiziert werden. Der hohe Beitrag resultiert aus den geringen Lebensdauern und dem häufigen Austausch der Komponenten. Dagegen kann der hohe Materialverbrauch im Status Quo anhand Lebensdauererhöhungen und Recyclinginputrateerhöhungen für den zukünftigen Zustand sukzessive reduziert werden. Hieraus lässt sich Primärmaterial einsparen, woraus positive Effekte und Beitragsreduktionen in allen drei Kategorien erreicht werden. Die prozentuale Erhöhung der Stoffemission u.a. in A2 kann auf die Reduktion der Emissionen insgesamt aufgrund des niedrigen Gesamtergebnisses für die FCB-2050B bzw. FCB-2050C zurückgeführt werden, absolut sinkt die Menge an Emissionen aus allen Prozessen in den beiden Szenarien für 2050. Für den Ressourceneinsatz ergibt sich eine Verlagerung der Umweltwirkungen aus der ersten und dritten Lebensphase in die zweite.

Die Ursache der Beitragserhöhung in der Nutzenphase basiert auf dem Strommix mit einem höheren Anteil an regenerativen Energien wie PV und Windkraftanlagen, die einen größeren Materialbedarf aufweisen. Hieraus resultieren für die FCB-2050B in der Ressourcenkategorie insgesamt höhere Beiträge im Vergleich zur FCB im Referenzzustand. Für die CONV-2050B und CONV-2050C entstehen für den mineralischen Ressourcenverbrauch neben der Nutzenphase in den Prozessen A1 und C4 signifikante Beiträge. Diese sind auf den Gewichtsanstieg des konventionellen Antriebs gegenüber der Ausgangslage sowie einen Anstieg des Recyclinganteils auf 65% in 2050B bzw. 90% in 2050C zurückzuführen. Aufgrund 33% Kerosinreduktion gegenüber der CONV-2002 sind die Prozessbeiträge prozentual anders verteilt, absolut sinken in allen drei Kategorien die Umweltwirkungen. Insgesamt werden für die FCB und die CONV in 2050 mehr als 95% der Beiträge zur Klimawirkung und Gesundheitswirkung in der Nutzenphase erzeugt, zur Ressourcenwirkung steigen sie für die FCB auf mehr als 98% Beitrag gegenüber dem Beitrag der CONV von mehr als 80% an.

Tabelle 6 Signifikante Parameter der Beechcraft 1900D-FCB bezüglich des prozessbezogenen Beitrags an den Umweltwirkungen.

Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft 1900D-FCB-2050	CO ₂ -eq	-	1,22%	0,00%	0,00%	0,38%	0,01%	0,05%	0,03%
	NO _x -eq	-	2,59%	0,01%	0,00%	0,67%	0,01%	0,11%	0,06%
	Cu-eq	-	13,47%	0,01%	0,00%	0,50%	0,01%	0,97%	0,06%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	402,06	98,32%		-		0,02%	0,01%	0,11%	-0,14%
	0,483	96,72%		-		0,02%	0,00%	0,29%	-0,48%
	0,926	88,28%		-		0,01%	0,00%	0,52%	-3,83%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft 1900D-FCB-2050B (WOC)	CO ₂ -eq	-	3,27%	0,03%	0,00%	1,60%	0,03%	0,30%	0,15%
	NO _x -eq	-	4,67%	0,03%	0,00%	1,45%	0,03%	0,34%	0,15%
	Cu-eq	-	6,85%	0,01%	0,00%	0,50%	0,01%	0,64%	0,06%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	52,70	94,97%		-		0,04%	0,09%	1,46%	-1,94%
	0,125	94,64%		-		0,04%	0,01%	1,96%	-3,32%
	0,940	97,63%		-		0,03%	0,00%	0,90%	-6,64%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft 1900D-FCB-2050C (FP)	CO ₂ -eq	-	2,19%	0,03%	0,00%	1,49%	0,03%	0,26%	0,14%
	NO _x -eq	-	3,29%	0,02%	0,00%	1,39%	0,03%	0,30%	0,14%
	Cu-eq	-	5,27%	0,01%	0,00%	0,54%	0,01%	0,58%	0,06%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	57,92	96,38%		-		0,06%	0,09%	1,32%	-1,99%
	0,132	96,18%		-		0,05%	0,01%	1,83%	-3,25%
	0,897	99,09%		-		0,04%	0,00%	0,92%	-6,53%

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Die Beitragsanalyse verdeutlicht, welche Bestandteile der LCA einen großen Anteil an dem erzeugten Gesamtergebnis haben. Abschließend wird in Abbildung 12 für die beiden signifikanten Parameter, den Kerosineinsatz und den Strommix, der drei Flugzeuge in allen drei Wirkungskategorien eine finale Prüfung auf Sensitivitäten bezüglich des Gesamtergebnisses durchgeführt.

Für die beiden **Flugzeugvarianten in 2025** ist der Energieträger Kerosin der größte Verursacher der Umweltwirkungen und muss als signifikanter Parameter weiter reduziert werden. Würde konventionelles Kerosin in beiden Varianten mit Bio-Kerosin aus Gülle- und Gärrestnutzung ersetzt werden, würden im KMF-Szenario 69% geringere THG-Emissionen für die CONV-2025A und die PTE-2025A entstehen, bei einem Anstieg der Luftschadstoffe um 10% für die CONV-2025A und 6% für die PTE-2025A. Jedoch würde für die Substitution von synthetischem Kraftstoff aus Power-to-Liquid mit dem Strommix des KMF-Szenarios 119% höhere THG-Emissionen für die CONV-2025A und die PTE-2025A entstehen, die Luftschadstoffe würden ebenfalls um 122% für die CONV-2025A und um 136% für die PTE-2025A steigen. Demnach sollte neben der Entwicklung von elektrifizierten Flugzeugen, wenn sie hybrid mit Kerosin betrieben werden, ein Fokus auf die Erforschung und Dekarbonisierung alternativer Kraftstoffe als Kerosinsubstitute gelegt werden. Für die Luftschadstoffe könnte bereits eine Veränderung der Bewertung bezüglich der Nicht-Berücksichtigung von $\text{NO}_x\text{-eq}$ während dem Reiseflug aufgrund der zu großen Höhendifferenz für die menschliche Aufnahme zu 66% weniger NO_x -Emissionen der PTE-2025A und 57% weniger NO_x -Emissionen der CONV-2025A führen.

Für die beiden **Flugzeugvarianten in 2050** sind die Energieträger Kerosin für die CONV und Wasserstoff basierend auf dem Strommix für die FCB die signifikanten Parameter. Im Falle der Sensitivität von Strom bzw. Wasserstoff zeigt sich in einer Variation des Strommix für den Betrieb auf den schlechtmöglichsten Fall mit dem aktuellen deutschen Strommix und dem bestmöglichsten Fall mit dem 100% regenerativen Strom aus landbasierten Windkraftanlagen, wie die Performance der FCB im ungünstigsten und günstigsten Fall aussehen könnte. Unter dem aktuellen deutschen Strommix im Jahr 2022 lohnt sich der Personentransport gegenüber der CONV-2002 nicht, selbst mit allen weiteren Zukunftsverbesserungen in beiden Szenarien, da weiterhin knapp 400 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ pro pkm über den Flugzeuglebensweg emittiert werden. Unter den angenommenen Zukunftsverbesserungen sowie einer Erhöhung auf 100% Windstrom würden im Szenario „Wind of change“ ca. 28 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ pro pkm und im Szenario „Fast progress“ ca. 27 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ pro pkm erreicht werden. Selbst ohne Berücksichtigung aller weiteren Szenario-Parameter würde die FCB mit Wasserstoff aus ausschließlich Windstromherstellung ca. 31 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ pro pkm emittieren. Dies würde eine Verbesserung von 92% gegenüber der Ausgangslage bedeuten. Für die CONV würden sich in beiden Szenarien von 2050 lebenswegbezogene Verbesserungen von ca. 39 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ pro pkm unter Einsatz von Bio-Kerosin und ca. 86 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ pro pkm unter Einsatz von synthetischem Kerosin ergeben, jeweils mit einem leichten Anstieg der Luftschadstoffe. Hieraus kann geschlossen werden, dass die aus regenerativen Energien erzeugte Wasserstoffherstellung einen Kerosineinsatz auf Basis der untersuchten alternativen Kraftstoffe in einer konventionellen Maschine übertreffen kann. Jedoch zeigt bei fehlendem Einsatz von grünem Wasserstoff die Nutzung von Bio-Kerosin großes Potenzial, sodass auch dieses Kerosinsubstitut vorangebracht werden sollte für den hybriden Übergang zu rein elektrischen Flugzeugen.

Aus der Sensitivitätsprüfung ergibt sich das abschließende Resultat über die Signifikanz der Energieträger Wasserstoff auf Basis des Strommix bzw. Kerosin für die zwei elektrischen Flugzeuge in der Nutzenphase, sodass der Energieträgereinsatz auch in neuartigen Elektroflugzeugen weiter reduziert werden sollte.



Abbildung 12 Sensitivitätsprüfung ausgewählter Parameter für die Umweltbewertung von CONV, PTE und FCB.

5.2. Beurteilung der Ergebnisse

Um die Bedeutung und Aussagekraft dieser Ergebnisse final beurteilen zu können, müssen Einschätzungen zunächst zu Vollständigkeit, Robustheit und Konsistenz, daraufhin zur Übereinstimmung mit anderen Studien und den vorgegebenen Sektorenzielsetzungen sowie nachfolgend zu den Einschränkungen der LCA gegeben werden.

5.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Aufgrund der Inklusion eines hohen Anteils an realen Daten für die Beechcraft 1900D sowie einigen Schätzungen zu fehlenden Daten kann für das konventionelle Produktsystem von einer hohen Validität der Ergebnisse für die drei Lebensphasen des Flugzeugs ausgegangen werden. Weiterhin sind in die LCA eine Vielzahl von projektspezifischen Daten eingeflossen (aus Simulationen von Modellierungs-Software, Expertenschätzungen, etc.), sodass auch für die beiden elektrifizierten Flugzeuge im Referenzzustand von einer hohen Vollständigkeit und Gültigkeit der gesammelten Daten ausgegangen werden kann. Die fehlenden Daten für den Referenzzustand bzw. alle prospektiven Daten für den Zukunftszustand konnten u.a. durch Expertengespräche, Literatur und Datenbanken ermittelt werden. Der Dateninput, bezogen auf die eingesetzten Materialien, weist in allen Prozessen der LCA eine hohe Vollständigkeit auf. Zudem wurden die Daten zu den Energieverbräuchen der Nutzenphase aus validen Simulationen von Experten übernommen und für die Herstellungs- bzw. Entsorgungsphase mittels hochskalierter Teilberechnungen, Literatur oder eigenen Schätzungen ergänzt, um jeden Prozess abzubilden. Die Datenqualität ist ebenfalls für alle drei Flugzeugtypen ausreichend hoch und wurde, sofern Unsicherheiten bezüglich Dateninputs oder der künftigen Entwicklung bestanden, in einer Sensitivitätsanalyse überprüft und gegebenenfalls für den Zukunftszustand abgewandelt. Die Vollständigkeitsprüfung wird demnach als hinreichend befunden.

5.2.2. Sensitivitätsprüfung

Die Ergebnisse weisen eine hohe Robustheit auf. In einem ersten Schritt wurden die Zwischenergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Referenzzustand in Bezug auf identifizierte Unsicherheiten in einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Das Resultat der Untersuchung ist wiederum in die Wirkungsabschätzung für den Zukunftszustand eingeflossen, sodass erkannte problematische Dateninputs verbessert werden konnten. Für diese wurden innerhalb der Zukunftsbetrachtung mehrere Veränderungen herbeigeführt, um deren Beeinflussungsgrad auf das Gesamtergebnis in ein oder zwei Varianten mittels Szenarien zu überprüfen. Als Resultat konnten deutliche Veränderungen des Endergebnisses der LCA aufgrund dieser Parameter identifiziert werden. Weiterhin erfolgte die Identifizierung von signifikanten Parametern in allen Prozessen und Lebensphasen der LCA in einer Beitragsanalyse für alle zeitlichen Zustände. In einem abschließenden Schritt wurden die ermittelten Ergebnisse einer weiteren Prüfung unterzogen, indem die jeweils signifikantesten Parameter mit der größten Relevanz auf das Endresultat innerhalb einer finalen Sensitivitätsprüfung variiert wurden und die Ökobilanz-Ergebnisse diesen Änderungen über den gesamten Lebensweg gegenübergestellt wurden.

5.2.3. Konsistenzprüfung

Die Ökobilanz wurde auf Basis von einheitlichen Excel-Berechnungstabellen zur Modellierung aller Produktsysteme durchgeführt, die in die Schritte Datenerfassung, Modellgenerierung im Referenzzustand, Modellmodifikation im Zukunftszustand und Umweltbewertung unterteilt werden können. Die finale Umweltbewertung wurde anhand der Ökobilanzsoftware openLCA mit einheitlichen Prozessausbildungen und Flusszuordnungen durchgeführt, diese sind in Anhang 36 – 38 gelistet. In diese Ökobilanzmodelle aller Flugzeuge und Zeithorizonte sind konsistente Annahmen sowie eine übereinstimmende Verrechnung aller Zwischenergebnisse eingeflossen. Über den Lebensweg der Produktsysteme variierte die Datenqualität teilweise zwischen den Prozessen, jedoch sind regionale bzw. zeitliche Unterschiede einheitlich angewendet sowie Unterschiede in den Datentechniken kenntlich gemacht worden. Auch auf den verschiedenen Entwicklungsstand einer etablierten Technologie von industrieller Reife sowie den beiden neuartigen Technologien auf TRL 3 und deren berücksichtigtem Markthochlauf wurde in der Modellierung hinreichend eingegangen und alle Anpassungen sind als Fortschritt innerhalb der Ergebnisdarstellung für den Zukunftszustand der Ökobilanz miteinbezogen worden. Die Genauigkeit der Modelle für den Technologievergleich konnte hieraus sowohl technologisch als auch zeitlich erhöht werden. Die LCA wurde demnach unter robusten Annahmen und einheitlichen Methoden durchgeführt, sodass die Präzision der erzeugten Ergebnisse als hoch erachtet werden kann.

5.2.4. Validierung durch andere Studien

Die Ergebnisse dieser Studie stehen in Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer Veröffentlichungen, die nachfolgend vorgestellt werden für die drei Forschungsbereiche kerosinbasierte Flugzeuge, strombasierte Flugzeuge und wasserstoffbasierte Flugzeuge.

Chester und Horvath zeigten bereits vor knapp 15 Jahren, dass ein konventionelles Kleinflugzeug ca. 180 g CO₂-eq pro pkm und knapp 0,5 g NO_x-eq pro pkm erzeugt (2009). Eine aktuelle Studie des UBA ermittelt für den nationalen Flugverkehr 210 g CO₂-eq pro pkm, 1 g NO_x-eq pro pkm und einen kumulierten Rohstoffaufwand von 0,5 g KRA-metallisch pro pkm (Allekotte et al., 2020). Die Autoren Cox et al. finden dagegen für ein Kleinflugzeug heraus, dass die Klimawirkung ohne zusätzliche Emissionen aus der Wolkenbildung für den Referenzzustand im Jahr 2015 ca. 280 g CO₂-eq pro pkm beträgt, während für ein BAU-Szenario in 2050 200 g CO₂-eq pro pkm und für ein optimistisches Szenario in 2050 etwa 140 g CO₂-eq pro pkm mit den signifikanten Parametern Energieträgerherstellung und direkte Emissionen während der Nutzung entstehen; für die NO_x-Bildung ermitteln sie zwischen 0,6 g – 0,3 g NMVOC-eq pro pkm zwischen diesen drei Zuständen (2018). Die erzeugten Ergebnisse dieser LCA-Studie für die CONV zwischen 225,88 g CO₂-eq pro pkm, 0,452 g NO_x-eq pro pkm und 0,075 g Cu-eq pro pkm bis zu 151,76 g CO₂-eq pro pkm, 0,308 g NO_x-eq pro pkm und 0,048 g Cu-eq pro pkm in den Zeitzuständen 2023 bis 2050 korrelieren mit diesen Ergebnissen und können als stark übereinstimmend eingestuft werden.

Zur Bewertung elektrischer Flugzeuge nehmen Gnadt et al. für Batterie und Kraftstoff im Flugzeugentwurf fast die Hälfte des Flugzeuggewichts an, wobei Lithium-Ionen-Batterien mit 1500-2400 Zyklen und Lithium-Schwefel-Batterien mit 625 Zyklen Lebensdauer eingesetzt werden; vom aktuellen Strommix mit 500 g CO₂-eq werden bis zu 80% regenerative Energien in 2050 betrachtet, woraus ca. 25% weniger THG-

Emissionen im BAU-Szenario und ca. 70% weniger THG-Emissionen im 80% RE-Szenario zur Energieträger Bereitstellung des Flugzeugs erzeugt werden (2019). Scholz et al. haben im Vergleich hybrid-elektrischer und konventioneller Flugzeuge des Referenzzustands auf Schadensendpunkt Wirkungsebene höhere Umweltwirkungen für das Elektroflugzeug erhalten mit einer Verschiebung hin zu einer Erhöhung des Ressourceneinsatzes, welchen sie auf den Mehrbedarf an Strom und Batteriekomponenten zurückführen; die Nutzenphase hat in beiden Flugzeugvarianten einen Anteil von etwa 97% am Gesamtergebnis und sie merken an, dass auch die Batterie-Zyklusanzahl Auswirkungen auf das Ergebnis hat und erhöhen in einem 100% RE-Zukunftsszenario u.a. die Zyklusanzahl von 1500 auf 2000, woraus in allen drei Wirkungsendpunkten Verbesserungen von unter 10% für das hybridelektrische Flugzeug erzielt werden können (2022). Ribeiro et al. haben ebenfalls zwei Zukunftszustände in naher Zukunft 2030 und in langfristiger Zukunft 2050 jedoch ohne Referenzzustand anhand verschiedener Batterieeinsätze untersucht und zeigen auf, dass für 2030 nur der aktuelle Strommix aus Schweden bessere Ergebnisse als der aktuelle Kraftstoffverbrauch im Flugzeug erzeugt, im Szenario 2050 können je nach Batterieart Lithium-Schwefel oder Lithium-Luft Verbesserungen von 53% bzw. 85% für elektrische Flugzeuge erreicht werden, die jedoch nicht vergleichend einem konventionellen Flugzeug gegenübergestellt werden (2020). Ploetner et al. ermitteln im prospektiven Vergleich für das Jahr 2035 von einem konventionellen Flugzeug mit einem hybridelektrischen Flugzeug im BAU-Szenario 9% THG-Reduktionen und in der Gegenüberstellung der Ausgangslage des konventionellen Flugzeugs mit dem hybridelektrischen Flugzeug im BAU-Szenario 41% THG-Reduktionen, im BETTER-Szenario 60% THG-Reduktionen und im BEST-Szenario 89% THG-Reduktionen (2016). Die THG-Reduktionen von 9%, 41%, 60% und 89% gegenüber 11%, 29%, 74-77% und 88% dieser LCA-Studie geben eine ähnliche Größenordnung wieder. Die Erkenntnisse aus den vier Veröffentlichungen zeigen jedoch auf, dass aufgrund unterschiedlicher Annahmen und nur teilweiser Betrachtung von Prozessen des elektrifizierten Produktsystems über den Lebensweg sich ein Vergleich mit den Ergebnissen dieser LCA-Studie als schwierig gestaltet. Dennoch bildet sich heraus, dass Szenarien mit den in dieser Studie getätigten Annahmen zu Strommix und Komponenten-Lebensdauern in Einklang mit anderen Forschungstätigkeiten stehen und wie in der zweiten Studie dargelegt im Referenzzustand schlechtere Ergebnisse für das elektrische Flugzeug erreicht werden können. Die internen 86-87% THG-Verbesserungen der FCB zwischen dem Referenzzustand und dem WOC- bzw. FP-Szenario übersteigen zwar die Ergebnisse der Literatur knapp, jedoch sind sie abhängig von langfristigen und ungewissen Zukunftsentwicklungen für die Technologieentwicklung. Die geringe Zukunftsänderung von unter 1% der PTE im internen Vergleich ist auf den kurzen Zeithorizont von drei Jahren sowie den geringen Anteil von Stromeinsatz im Betrieb für elektrische Rollvorgänge zurückzuführen, da die drei Zukunftsszenarien dieser Studie in ihrer Modifikationsintensität hauptsächlich von der Veränderung des Strommix beeinflusst sind.

Wenige Studien setzen sich zudem mit Wasserstoffflugzeugen auseinander. Nicolay et al. legen dar, dass ein wasserstoffbetriebenes Kleinflugzeug während dem Flug keine THG und NO_x-Emissionen erzeugt und die Lebenswegemissionen sehr stark von der Wasserstoffproduktion abhängen, ohne auf die Emissionen aus der vorgelagerten Energieträgerbereitstellung näher einzugehen bzw. sie zu quantifizieren (2021). Strathoff et al. ermitteln als erste Vorstudie basierend auf noch nicht finalisierten GNOSIS Entwurfsdaten zur FCB auf TRL 2, dass in 2050 bis zu 80% THG-Emissionen gegenüber dem konventionellen Flugzeug in der Nutzenphase eingespart werden können, wenn ein verbesserter Strommix in 2050 berücksichtigt wird, wobei ebenfalls der Strommix der Studie von Jöhrens et al. verwendet wird (2022). Barke et al. zeigen dagegen wiederum auf, dass die Nutzung von Wasserstoff auf Basis von nicht rein regenerativem Strom

zu schlechteren Ergebnissen in Höhe von etwa den dreieinhalbfachen THG-Emissionen in der Nutzenphase gegenüber der konventionellen Kerosinnutzung führt (2022). Die Ergebnisse dieser vorliegenden LCA-Studie haben ermittelt, dass zwischen dem Wasserstoffflugzeug FCB auf TRL 3 und dem konventionellen Flugzeug CONV im Referenzzustand 78% mehr THG-Emissionen entstehen. Dagegen werden im Vergleich auf Basis des besseren Zukunftsszenarios „Wind of change“ unter dem Strommix von Jöhrens et al. 65% weniger THG-Emissionen für das Wasserstoffflugzeug erreicht. Demnach lässt sich zumindest für die Wirkungskategorie Klimawandel eine gute Übereinstimmung zu den anderen Studien feststellen. Die anderen zwei Kategorien photochemische Ozonbildung und mineralischer Ressourcenverbrauch wurden für neuartige elektrifizierte Flugzeuge noch in keiner der vorliegenden Studien untersucht.

5.2.5. Einordnung übergeordnete Zielsetzungen

Die Umweltwirkungsergebnisse der zwei elektrifizierten Flugzeuge zeigen sich in zwei von drei Kategorien als vorteilhafter gegenüber dem konventionellen 19-Sitzer Flugzeug. Abschließend sind Zielvorgaben des Flugsektors für den künftigen Personentransport heranzuziehen, um eine Einordnung des technologischen Konzepts der beiden Flugzeuge im jeweiligen Zukunftsszenario bezüglich der Zielerreichung zu tätigen.

Das Benchmarking der Sektorenzielsetzung folgt für den europäischen Luftfahrtsektor mit dem Flightpath 2050 anhand spezifischer Zielsetzungen im Bereich „Schutz der Umwelt und der Energieversorgung“ (EU COM, 2011). *Das erste Teilziel ist die Verringerung der CO₂-Emissionen pro Personenkilometer um 75% gegenüber typischer neuer Flugzeuge im Jahr 2000.* Mit 29% weniger CO₂-eq der PTE-2025A können für das Technologiekonzept von hauptsächlich Kerosineinsatz über 20 Jahre Betriebszeit die Zielvorgaben nicht erfüllt werden. Dagegen ist mit 74-77% weniger CO₂-eq der FCB-2050B/C eine Zielerreichung der Klimaziele im Flugsektor möglich. *Das zweite Teilziel ist die Verringerung der NO_x-Emissionen um 90% gegenüber typischer neuer Flugzeuge im Jahr 2000.* Mit 26% weniger NO_x-eq der PTE-2025A kann die Zielsetzung für die menschliche Gesundheit nicht erreicht werden. Mit 71-72% weniger NO_x-eq der FCB-2050B/C sind die Zielvorgaben über den Lebensweg zwar nicht vollständig erfüllt, eine Berücksichtigung nur direkter Emissionen während einer Flugmission führt jedoch zu 100% weniger NO_x-eq und somit zu einer Zielerreichung. *Das dritte Teilziel ist die Reduktion der wahrgenommenen Lärmemission fliegender Flugzeuge um 65% gegenüber typischer neuer Flugzeuge im Jahr 2000.* Dieses Teilziel ist für die gewählten drei Wirkungskategorien der LCA nicht überprüfbar. *Das vierte Teilziel ist, dass die Bewegungen der Flugzeuge beim Rollen emissionsfrei sind.* Für den elektrischen Rollvorgang der PTE-2025A wird kein Kerosin verbrannt und folglich das Ziel erreicht. Für die FCB-2050B/C treten keine direkten Emissionen im Betrieb auf, sodass die Zielvorgabe ebenfalls erfüllt ist. *Das fünfte Teilziel ist, dass die Luftfahrzeuge so konstruiert und hergestellt werden, dass sie recycelbar sind.* Die PTE-2025A wird im Technologiekonzept hauptsächlich aus Metall konstruiert und wäre bei der Steigerung auf die Recyclinginputrateerhöhung des FP-Szenarios fast vollständig wiederverwendbar, sodass die Zielvorgaben erfüllt werden. Die FCB-2050B/C ist aufgrund des hohen Anteils an Verbundwerkstoffen in der Tragstruktur nicht vollständig recycelbar, sodass die entwickelte Konstruktion dem Ziel der Kreislauffähigkeit entgegensteht. *Das sechste Teilziel ist, dass Europa sich mittels starker europäischer Energiepolitik als Kompetenzzentrum für nachhaltige alternative Kraftstoffe etabliert, einschließlich solcher für die Luftfahrt.* Die PTE berücksichtigt im KMF-Szenario bis 2025 eine mittlere Verbesserung der Klimapolitik des Strommix, da das Technologiekonzept

den Einsatz vorteilhafterer Kerosinsubstitute ermöglicht, wäre das Ziel langfristig dennoch erreichbar. Für die FCB basiert der Energieträgereinsatz zu einem großen Anteil auf Wasserstoff, zudem berücksichtigen die Szenarien WOC und FP bis 2050 eine sehr große Verbesserung der Klimapolitik, sodass die Zielerreichung für den Einsatz nachhaltiger alternativer Kraftstoffe in der Luftfahrt ebenfalls möglich ist. *Das siebte Teilziel ist, dass Europa an der Spitze der Atmosphärenforschung steht und die Führung zur Formulierung eines Umweltaktionsplans und Festlegung globaler Umweltstandards übernimmt.* Das letzte Teilziel ist mit den Umweltwirkungsergebnissen der Ökobilanz nicht überprüfbar.

Von sieben formulierten Zielvorgaben des Flightpath können fünf Teilziele mit dieser LCA-Studie adressiert werden. Für die PTE sind drei von fünf Zielvorgaben erfüllbar, für die FCB ist das Erreichen von vier der fünf Teilziele bis 2050 möglich. Daher ist das Technologiekonzept der FCB für die europäischen Ziele des Flugsektors die vielversprechendere Variante, besonders für die Klimawirkung und Gesundheitswirkung. Lediglich die Ressourcenwirkung mit der Zielsetzung der Rezyklierbarkeit zeigt sich für die Zukunft des luftbasierten Personentransports als problematisch. Demnach können Herausforderungen für den Bereich „Schutz der Umwelt und der Energieversorgung“ der europäischen Sektorenzielsetzung ermittelt werden.

5.2.6. Einschränkungen

Die Einschränkungen der LCA-Studie betreffen die Datengenerierung der konventionellen und neuartigen Flugzeuge sowie die Datenmodifikation der Zukunftsbetrachtung aller Flugzeuge.

Das nachgebildete Produktsystem Beechcraft 1900D stellt eine vollständige Lebenswegbetrachtung nach ISO Norm von der Rohstoffgewinnung bis zur Beseitigung dar, jedoch haben nicht alle nachgebildeten Prozesse aufgrund fehlender Primärdaten die höchste Datenqualität. Insbesondere beinhalten die Flugzeugmontage (A6) und die Flugzeugdemontage bzw. Beseitigung (C1) vielfältige Schätzungen hinsichtlich des Energieeinsatzes. Für die Flugzeugkomponenten sind häufig Prozentverteilungen der verwendeten wichtigsten Materialien genutzt anstatt eine detaillierte Datenaufnahme anhand von Stücklisten der Flugzeugfertigung durchzuführen. Ebenfalls fehlen die spezifischen Energieeinsätze für die Herstellung der verbauten Komponenten. Das Lebensende basiert auf Schätzungen zur Verwertung sowie literaturbasierten Recyclingverteilungen, für den Energieverbrauch der Komponententrennung wird nur auf generische Werte einer Studie am Standort der ehemaligen Flugzeugfertigung zurückgegriffen.

Viele Prozesse der elektrifizierten Flugzeuge sind direkt von der Beechcraft 1900D in Parametern und Proxydaten übernommen worden, wie beispielsweise Daten zu Transportprozessen des konventionellen Antriebssystems und müssen im Markthochlauf der Produktsysteme mit realen Daten ersetzt werden. Daten zu den Energieverbräuchen der Prozesse sollten über Primärdaten und direkte Messungen anstatt über Simulationen bzw. Literatur und Hochrechnungen ermittelt werden, wenn die elektrischen Flugzeuge in der Realität gefertigt und erprobt werden. Im Bestfall sollten ab dem Pilotbetrieb von PTE und FCB sämtliche Daten, die zur Herstellung des Flugzeugs ermittelbar sind wie Transportwege von Zulieferern, vollständige Stücklisten und Energieverbräuche der Komponentenhersteller sowie Informationen zur Materialzusammensetzung der verbauten Komponenten auf Prozessmodulebene bereitgestellt werden. Ebenfalls gilt es, ab der Marktreife der Flugzeuge die Lebensdauern der Komponenten zu überprüfen und

Anpassungen bei der Zyklendauerhaftigkeit und der Austauschhäufigkeit im LCA-Modell der Sachbilanz umzusetzen.

Weiterhin sind die Szenario-Parameter zwar durch Experten validiert, diese können jedoch Abweichungen zur Zukunftsentwicklung beinhalten, da nahe und entfernte Zukunftszustände unsicherheitsbehaftet sind. Die Wasserstoffherstellung im Referenzzustand basiert auf Datenwerten von öffentlich zugänglichen Informationen und konnte in die LCA-Modellierung integriert und zukunftsgerichtet modifiziert werden. Dagegen konnten die Kerosinsubstitute Bio-Kerosin und synthetisches Kerosin nur in ihren finalen THG und NO_x-Emissionswerten beschafft werden, da die Inputdaten der Kraftstoff-LCA nicht verfügbar waren. Eine konsistente Nachbildung aller Prozesse wie der Energieträgerherstellung anhand eines einzigen LCA-Modells ist notwendig, um die identische Herangehensweise mit denselben Parametern zu gewährleisten. Die alternativen Kraftstoffe wurden aufgrund fehlender Datenüberprüfungsmöglichkeit und Transparenz ausschließlich in der Sensitivitätsprüfung berücksichtigt. Der Strommix hat eine hohe Bedeutung in dieser Studie einerseits als direkte Nutzung und andererseits als Input für die Wasserstoffherstellung, daher wurden zwei verschiedene Forschungsstudien integriert, um die Fehleranfälligkeit der LCA aufgrund nur einem Energieerzeugungsszenario in 2050 zu minimieren. Dennoch kann die Entwicklung abweichen und es wird mit diesen Szenarien nur die Gültigkeit der Studie auf den Raum Deutschland festgelegt. Der Strommix aus anderen Ländern sollte berücksichtigt werden, wenn der Lufttransport in einem anderen Land bzw. zwischen zwei Ländern durchgeführt wird.

5.3. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zum Abschluss der Ökobilanz-Studie sollen die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus der Durchführung der LCA für den Untersuchungsgegenstand der Kleinflugzeuge abschließend prägnant herausgearbeitet werden, um daraufhin Empfehlungen für die angesprochene Zielgruppe zu geben.

5.3.1. Erkenntnisse und Fazit dieser Studie

In diesem LCA-Bericht wurden für die Kleinflugzeuge Beechcraft 1900D, partiell-turboelektrische Variante und brennstoffzellenbetriebene Variante der Einfluss der drei Lebensphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung, mögliche gegenläufige Effekte unterschiedlicher Wirkungskategorien und der Vergleich zwischen Referenzzustand und Zukunftszustand untersucht. Abschließend wurden die verschiedenen Technologieoptionen gegeneinander und in einem Benchmarking zu Zielsetzungen verglichen. Einerseits konnten schon bekannte bzw. erwartete Erkenntnisse bestätigt werden, besonders die überragende Rolle der Dekarbonisierung der jeweiligen Energieträger, aber auch gegenläufige Effekte zwischen den mit fossilen Energieträgern verknüpften Wirkungskategorien und dem Rohstoffbedarf. Denn je ehrgeiziger das Szenario und je größer die Einsparungen in den emissionsbasierten Kategorien sind, desto höher ist die Auswirkung in der materialbasierten Wirkungskategorie aufgrund eines höheren Rohstoffbedarfs. Andererseits wurden so eine Fülle von Einzelergebnissen generiert, die für die weitere Entwicklung bzw. Optimierung der Flugzeugtechnologien genutzt werden können und Handlungsmöglichkeiten aufzeigen.

Die LCA-Studie ermittelt, unter welchen Bedingungen elektrische Flugzeuge nach erfolgtem Markteintritt über den gesamten Lebensweg vorteilhaft sein können. Die Ergebnisse demonstrieren, dass für alle Flugzeuge die höchsten Umweltwirkungen der drei Wirkungskategorien „Klimawandel“, „Photochemische Ozonbildung“ und „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ in der Nutzenphase aufgrund der Energieträger entstehen. Bereits bekannt ist, dass die Nutzenphase von Flugzeugen durch den hohen Energieeinsatz über eine Mission und insbesondere im Reiseflug die größten Umweltwirkungen besitzt und daher größtes Verbesserungspotenzial bereithält. Die Umweltwirkungen der ersten und letzten Lebensphase sind für die Klimawirkung und Gesundheitswirkung gering und es entsteht nur für die Ressourcenwirkung ein signifikanter Beitrag von bis zu 25%. Daher konnte diese Ökobilanz bestätigen, dass Herstellung und Lebensende mit hoher Flugzeublebensdauer weitestgehend vernachlässigbar sind. Die Gegenüberstellung der Technologieentwicklung des Status Quo mit dem Zukunftszustand zeigt eine Szenario-basierte THG-Emissionsreduktion für die CONV-KMF mit 20% und die CONV-WOC/FP mit 33% gegenüber der CONV, für die PTE-KMF weniger als 1% gegenüber der PTE sowie für die FCB-WOC mit 87% und die FCB-FP mit 86% gegenüber der FCB. Dies verdeutlicht das teilweise sehr hohe Modifikationspotential am Flugzeug selber.

Für das partiell-turboelektrische Flugzeug PTE zeigt sich, dass von den 99% Auswirkungen der Nutzenphase die Kerosinverbrennung mehr als 70% Anteil am Gesamtergebnis von CO₂-eq und NO_x-eq hat und die Umweltwirkungen der Energieträgerherstellung zu 98% aus der Kerosinherstellung und zu 2% aus der Stromherstellung resultieren. Es ergibt sich für den Entwurf mit Marktreife im Jahr 2025 weiterhin Kerosin als größter Verursacher der stoffemissionsbasierten Umweltwirkungen. Für die Ressourcenwirkung sind signifikante Parameter neben der Kerosinherstellung die Herstellung von Nickel und kritischen Rohstoffen. Hieraus kann das finale Resultat gezogen werden, dass für die PTE im Zukunftszustand des „Keep moving forward“ Szenarios -29% CO₂-eq, -26% NO_x-eq sowie -12% Cu-eq gegenüber der Beechcraft 1900D-2002 und -11% CO₂-eq, -8% NO_x-eq sowie +7% Cu-eq gegenüber der Beechcraft 1900D-2025A entstehen. Ein technologischer Wechsel zu einem teilelektrifizierten Flugzeug kann dem Flugsektor in naher Zukunft Einsparungen in mindestens zwei der drei Wirkungskategorien ermöglichen und die Klimawirkung um knapp 30% gegenüber dem aktuellen Personentransport in einem Kleinflugzeug reduzieren.

Für das brennstoffzellenbetriebene Flugzeug FCB im Jahr 2050 ergibt sich, dass über 95% Auswirkungen der Nutzenphase in jeder Kategorie aus der Herstellung von Wasserstoff mit 96% THG-Emissionen und Strom mit 4% THG-Emissionen entstehen. Da das Umweltwirkungsergebnis von Wasserstoff als indirekte Ursache aus dem Strommix resultiert, kann als signifikanter Parameter aller drei Kategorien der Strommix identifiziert werden. Für Stoffemissionen treten größere Auswirkungen in den Herstellungsprozessen von elektrischem Antrieb und Tragstruktur sowie beim Recycling und der Sekundärrohstoffwiedergewinnung auf. In der Ressourcenkategorie entsteht mehr als 5% Beitrag durch die Herstellung des elektrischen Antriebs, der auf geringen Lebensdauern elektrischer Komponenten insbesondere der Batterie basiert, jedoch durch mehr Recyclinganstrengungen kompensiert werden kann. Unter dem aktuellen deutschen Strommix im Jahr 2022 lohnt sich der Personentransport gegenüber der Beechcraft 1900D nicht, dagegen führen Zukunftsverbesserungen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit der FCB gegenüber der CONV im Jahr 2050. Der zugrundeliegende Strommix wurde in den beiden Zukunftsszenarien „Wind of change“ und „Fast progress“ auf Basis von 96% bzw. 94% regenerativen Energien angenommen, woraus sich der mineralische Ressourcenverbrauch gegenüber der CONV um etwa den Faktor 10 erhöht. Es zeigt sich daher, dass für das Erreichen klimapolitischer Ziele ein deutlich erhöhter Rohstoffbedarf in Kauf genommen werden muss.

Als Endergebnis entstehen für die FCB im Zukunftszustand -62% bis -77% CO₂-eq, -57% bis -72% NO_x-eq sowie +1092% bis +1804% Cu-eq gegenüber der CONV mit und ohne Zukunftsszenarien. Dies zeigt als unbeabsichtigte Nebenwirkung des elektrischen Fliegens eine Verlagerung der stoffemissionsbasierten Umweltwirkungen zu einer Erhöhung der Umweltwirkungen in der Materialnutzungskategorie auf. Dennoch können über 75% der THG-Emissionen durch den Einsatz des Wasserstoffflugzeugs eingespart werden. Darüber hinaus würde eine bestmögliche Veränderung auf 100% Windstrom im Strommix ohne weitere Verbesserungen bereits zu 86% THG-Reduktionen gegenüber der CONV-2002 führen. Würden zusätzlich zum Grünstrom alle anderen Szenario-Parameter berücksichtigt werden, könnten jeweils insgesamt 88% THG-Reduktionen gegenüber der CONV-2002 erreicht werden. Als Resultat ergibt sich für elektrisches Fliegen mit der Dekarbonisierung von Strom und Wasserstoff ein hohes Einsparpotenzial an Emissionen. Der Einsatz von biobasiertem Kraftstoff auf Basis von Gülle könnte eine THG-Reduktion in 2025 von 69% und 2050 von bis zu 83% erzeugen und von synthetischem Kraftstoff aus Power-to-Liquid in 2025 zwar mit 119% mehr THG-Emissionen keine Verbesserung gegenüber Kerosin erreichen, jedoch sind in 2050 62% THG-Reduktionen möglich. Obwohl die vielversprechendste Alternative die FCB auf Basis von grünem Wasserstoff ist, kann biobasierter Kraftstoff in einem konventionellen Antriebssystem für den hybriden Übergang von kerosinnutzenden zu rein elektrischen Flugzeugen dienlich sein.

Als Kernergebnis der LCA dieser Studie ist die Bedeutung von den Energieträgern für das Ergebnis aller drei Produktsysteme hervorzuheben. Aus der dargelegten Untersuchung kann geschlussfolgert werden, um den Personentransport in einem Kleinflugzeug zu verbessern, sollte der Kraftstoffverbrauch des Flugzeugs, der hauptsächlich während des Reisefluges benötigt wird, größtmöglich minimiert werden. Zusätzlich zu den Kraftstoffen Wasserstoff bzw. Kerosin spielt der direkte Stromeinsatz eine untergeordnete Rolle, mit dem die Batterie für den elektrischen Rollvorgang bzw. für den Flug geladen wird, da dieser zu unter 5% der Gesamtemissionen beiträgt. Die Nutzenphase als hauptsächliche Ursache für alle Umweltwirkungen der untersuchten Flugzeuge verdeutlicht, dass elektrisches Fliegen erst dann zu einer großen Verbesserung der Umweltwirkungen führen kann, wenn bis zum jeweiligen Marktetablierungsjahr die Herstellungspfade der Energieträger dekarbonisiert werden. Der hohe Einfluss der Nutzenphase auch mit dekarbonisierten Energieträgern ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Hintergrundsystem der Materialien für regenerative Energieerzeugungstechnologien wie Windkraft bis 2050 weiterhin ein Einsatz fossiler Energieträger zur Materialbereitstellung, Transportprozesse im Hintergrund, etc. angenommen wird. Als Konsequenz muss zukünftig neben der Dekarbonisierung des Energieträgers selbst auch auf die Dekarbonisierung der Materialproduktion für diesen Energieträger geachtet werden.

Die emissionsbasierten Umweltwirkungsergebnisse der LCA zeigen über den Flugzeuglebensweg für die CONV und PTE als Hauptverursacher Kerosin bzw. als zusätzlicher Nebenverursacher der PTE Strom sowie für die FCB als Hauptverursacher Wasserstoff und als Nebenverursacher Strom auf. Jedoch ergibt sich für den Nutzenphasen-Beitrag von über 99% der CONV und PTE gegenüber 95% der FCB eine größer werdende Relevanz von Flugzeugherstellung und Lebensende als Nebenverursacher emissionsbasierter Wirkungen. Größte Sensitivität zeigt als relevantester Szenario-Parameter die Regenerative Energien Anteilserhöhung im Strommix. Die Lebensdauererhöhung und Recyclinginputrateerhöhung tragen zu einer merklichen Verbesserung in der ersten und letzten Flugzeuglebensphase bei, sodass diese drei Parameter die größte Stellschraube für Verbesserungspotenzial am Flugzeug darstellen. Sie gelten als Grundvoraussetzung für das elektrische Fliegen, um künftig eine bessere Performance aller betrachteten Kategorien anzustreben.

Diese LCA-Studie kann demnach die zu anfangs gestellte Frage hinreichend beantworten, dass für den Referenzzustand des Status Quo nur die PTE zu einer Verbesserung der Umweltwirkungen führt und eine ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber der Beechcraft 1900D erreicht wird. Jedoch zeigt sich unter Berücksichtigung von Zukunftsveränderungen bis zum jeweiligen Marktetablierungsjahr die FCB als das vielversprechendere Flugzeug, da die Treibhausgase und Luftschadstoffe signifikant reduziert werden können. Nur mit der FCB lassen sich fast alle Zielvorgaben des Flightpath 2050 erreichen, in welchem die Reduktion von 75% CO₂-Emissionen pro Personenkilometer und 90% NO_x-Emissionen gegenüber typischer neuer Flugzeuge im Jahr 2000 vorgegeben ist (EU COM, 2011). Ein nicht intendierter Nebeneffekt ergibt sich für alle elektrischen Flugzeuge durch die zusätzliche Ressourceninanspruchnahme, die insbesondere durch kritische Rohstoffe wie Titan, Kobalt, Neodym und Lithium gesteigert wird. Ohne Berücksichtigung des Konzepts der Kreislaufwirtschaft mit hohen Recyclinganteilen und hochwertiger Wiedergewinnung von Rohstoffen stellt der Mehrbedarf an Zukunftstechnologien wie Elektromotoren, Batterien und Brennstoffzellen das elektrische Fliegen in Zukunft vor gravierende Herausforderungen. Diese müssen bereits jetzt berücksichtigt und angegangen werden, um auf die zukünftige Rohstoffknappheit und induzierten Preissteigerungen reagieren zu können bzw. diese zu vermeiden und den Wettbewerb mit anderen diese Komponenten und Rohstoffe nutzenden Sektoren zu verringern.

5.3.2. Handlungsempfehlungen und Ausblick für die angesprochene Zielgruppe

Die Untersuchung dieses Ökobilanz-Berichts zeigt auf, dass sich ein Personentransport für die FCB im aktuellen Status Quo unter Umweltgesichtspunkten nicht lohnen würde, ohne weitere Veränderungen durchzuführen. Dagegen ist der Personentransport für die PTE sowohl im Referenzzustand als auch im Zukunftszustand ökologisch vorteilhaft. Somit kann die PTE innerhalb der nächsten Jahre für den Ersatz konventioneller Kleinflugzeugen dienlich sein und sollte in höheren TRL-Stufen weiter erforscht werden, um einen schnellen Markthochlauf zu erreichen. Unter Berücksichtigung eines langfristigen Zeithorizonts sind weitaus größere Einsparungen mit alternativen Kraftstoffen wie Wasserstoff möglich. Im Rahmen von Zukunftsszenarien kann die FCB durch den weitestgehend dekarbonisierten Wasserstoffherstellungspfad mehr als 75% THG-Emissionsreduktionen gegenüber dem aktuellen Personentransport im Status Quo erreichen, jedoch zu Lasten von vielfach höheren materialbedingten Umweltwirkungen.

Für die untersuchten Wirkungskategorien können drei relevante Szenario-Parameter als Stellschrauben identifiziert werden, Regenerative Energien Anteilserhöhung im Strommix, Lebensdauererhöhung von Komponenten und Recyclinginputrateerhöhung zum Lebensende. Wie auch frühere Untersuchungen schon gezeigt haben, liegt der Einfluss des Parameters Regenerative Energien Anteilserhöhung vor allem in der Nutzenphase, während die Parameter Lebensdauererhöhung und Recyclinginputrateerhöhung sich auf die erste und letzte Flugzeuglebensphase, d.h. die Herstellung und das Lebensende, auswirken. Unter einer maximalen Strommix-Änderung von 100% Windstrom ließen sich ohne weitere Verbesserungen mehr als 80% THG-Emissionsreduktionen als die CONV-2050 und mehr als 86% THG-Emissionsreduktionen als die CONV-2002, mit allen weiteren Zukunftsverbesserungen sogar 88% THG-Emissionsreduktionen realisieren. Hieraus folgt als Konsequenz, dass neben Flugzeugentwicklung und Markthochlauf zeitgleich die Wasserstoffherstellung mit dem starken Ausbau von regenerativen Energien zur Dekarbonisierung des eingesetzten Stroms in die Praxis umgesetzt werden muss. Denn erst, wenn von grauem Wasserstoff auf

Basis von fossilen Energieträgern hin zu gelbem Wasserstoff mit einem sukzessive dekarbonisierten Netzstrom gelangt wird und darüber hinaus in Zukunft im besten Fall grüner Wasserstoff aus ausschließlich regenerativen Quellen genutzt wird, ist das Fliegen in einem Wasserstoffflugzeug zielführend. Hieraus schließt sich, dass die ökologische Vorteilhaftigkeit der FCB erst mit einem Wasserstoffherstellungspfad erreicht werden kann, der einen sehr hohen Anteil an regenerativen Energien enthält. Demnach gilt es, die Wasserstoffversorgung von Flughäfen sowohl am Startflughafen als auch am Zielflughafen zu etablieren und bestenfalls die Wasserstoffherstellung direkt in unmittelbarer Nähe der wichtigsten Flughäfen mittels Strom aus ausschließlich regenerativen Energien zu implementieren. Weiterführend muss das Potenzial von Wasserstoff gegenüber anderen alternativen Kraftstoffen wie biobasierten oder synthetischen Kerosinsubstituten weiter erforscht werden, um den optimalen Entwicklungspfad weg von dem aktuell stark klimaschädlichen Personentransport in einem Flugzeug voranzutreiben.

Gegenüber Energieträgern und deren herausragendem Beitrag auf die Umweltwirkungsergebnisse in der Nutzenphase haben Änderungen des Rohstoffbedarfs im Flugzeug nur einen untergeordneten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Dennoch muss mit voranschreitender Entwicklung der elektrifizierten Flugzeuge der hohe Bedarf reduziert werden, um die negative Ressourcenwirkung u.a. durch höhere Lebensdauern von eingesetzten Komponenten zu verbessern. Um die Sicherheit während einer durchgehenden Flugmission zu gewährleisten, sind elektrische Flugzeuge durch geringe Komponentenlebensdauern im elektrischen Antrieb gekennzeichnet; dies betrifft besonders Elektromotoren für den partiell-turboelektrischen Betrieb sowie Brennstoffzellen, Batterie und Wasserstofftank für das Wasserstoffflugzeug. Die über 2,6 Tonnen Materialeinsatz des elektrischen Antriebs in der FCB werden durch Lebensdauern z.B. von unter einem Jahr der Lithium-Schwefel-Batterie für den Referenzzustand auf einen vielfachen Materialbedarf über die Flugzeuglebensdauer gesteigert. Mit der Lebensdauererhöhung im FP-Szenario können z.B. durch eine geringere Austauschhäufigkeit der Lithium-Schwefel-Batterie 67% deren benötigter Rohstoffe eingespart werden. Die 90% Recyclinginputrateerhöhung kann zusätzlich zu Einsparungen von Primärmaterial mit berücksichtigtem Korrekturfaktor von 94% Aluminium, 84% Stahl, 63% Edelmetalle und 70% Polymere führen. Aus dieser Maßnahme in der letzten Lebensphase reduzieren sich THG-Emissionen und Rohstoffe der FCB, sodass sich aus dem großen Materialeinsatz im Status Quo für die Prozesse C1-C4 Einsparungen von 1621% CO₂-eq und 320% Cu-eq erreichen lassen, welche zu einem nicht unerheblichen Beitrag die Umweltwirkungsergebnisse insgesamt reduzieren. Für die Ressourcenwirkung tragen die umgesetzte Lebensdauererhöhung und Recyclinginputrateerhöhung zusammen mit weiteren Szenario-Parametern zu einer Cu-eq Verbesserung von 45% und 74% im WOC-Szenario sowie 58% und 61% im FP-Szenario jeweils für die erste und letzte Flugzeuglebensphase bei. Die Verbesserungen der materialbasierten Parameter sind für elektrisches Fliegen mit hohem Rohstoffbedarf dringend anzugehen. Für das künftige Recycling ist zu beachten, dass rezyklierbare Materialien mit Möglichkeit zur einfachen, kostengünstigen Trennbarkeit bereits jetzt in den Flugzeugentwurf zu integrieren sind. Für Schlüsseltechnologien sind Alternativen zu finden, wie Batterien mit höherer Energiedichte, Ladezyklen-Stabilität und weniger Rohstoffbedarf, um sie geringer zu dimensionieren, seltener auszutauschen und kritische Rohstoffe mit ökologisch vorteilhafteren Materialien zu substituieren. Hieraus kann der große Bedarf besonders von Batterien für das elektrische Fliegen in Zukunft sichergestellt werden. Dennoch sind durch die größte Relevanz der Energieträger alle materialbasierten Maßnahmen zweitrangig, da sie nur untergeordnet zum Ziel der Treibhausgasneutralität beitragen. Im Entwicklungsprozess der Flugzeuge ressourcensparsame und kreislauffähige Komponenten anzuvisieren kann jedoch zusätzlich das Risiko von zukünftigen Versorgungsempässen verringern.

Es wird daher empfohlen, die in Entwicklung befindlichen Flugzeuge PTE und FCB im Markthochlauf von höheren TRL im Pilotbetrieb weiter zu erforschen und praktisch zu erproben. Hieraus kann diese durchgeführte LCA mit vielfältigen Informationen auf Basis einer noch höheren Datenqualität aufgrund von Realdaten erweitert werden. Das große Gebiet dekarbonisierter Kraftstoffe konnte mit dieser Studie noch nicht umfassend untersucht werden. Weiterhin können neue Entwicklungen berücksichtigt werden bzw. weitere Möglichkeiten von Power-to-X, deren Nutzen zur Reduzierung von Treibhausgasen komplexe vorgelagerte ökobilanzielle Modelle erfordert, um sie in die im Rahmen dieser Forschung aufgesetzten, modellierten und bewerteten vielfältigen Flugzeugmodelle zu integrieren. Eine anschließende Umweltbewertung könnte sich daher damit beschäftigen, in diese LCA zusätzliche Kraftstoffpfade von Kerosin-Substituten und weitere Wasserstoffherstellungsprozesse zu integrieren, die mit den Ergebnissen dieser Ökobilanz-Studie verglichen werden können. Hieraus kann ein noch größeres Spektrum an Potenzialen und Hemmnissen für elektrische Flugzeuge aufgezeigt werden, um die geeignetste Alternative für den Personentransport in einem Kleinflugzeug zur Erfüllung aller Zielsetzungen festzulegen.

Neben der vertieften Erforschung und Umsetzung alternativer Kraftstoffe mit Fokus auf Wasserstoff sollte in der weiteren Forschung zu elektrischem Fliegen stets eine lebenswegbezogene Umweltbewertung in Form einer Ökobilanz Anwendung finden. Die ganzheitliche Lebenswegbetrachtung kann mögliche weitere nicht-intendierte Nebeneffekte wie die Rohstoffnutzung in der Flugzeugherstellung oder in vorgelagerten Prozessketten der Energieträgerbereitstellung aufdecken. Es ergibt sich die Dringlichkeit von weiteren grundsätzlichen konstruktiven und materialwissenschaftlichen Innovationen, z.B. in den Bereichen Leichtbau oder Substitution kritischer Rohstoffe. Auch für die Entwicklungsvorhaben ist eine ökobilanzielle Begleitung sinnvoll bezüglich gegenläufiger Effekte wie z.B. Leichtbau mit einem größeren Einsatz von CFK, welches eine schwere Rezyklierbarkeit aufgrund einer möglichen Krebserregung der Fasern aufzeigt. Aus der vorgestellten Forschung ergibt sich, dass zur Erreichung der ehrgeizigen Ziele des Verkehrssektors für das elektrische Fliegen noch einige Herausforderungen zu bewältigen sind, die jedoch schon jetzt ein konsequentes Handeln auf diesen aufgezeigten vielfältigen Ebenen benötigen.

Allem voran müssen Realdaten für den Energieträgereinsatz während einer Flugmission beschafft werden, die erst generiert werden können, wenn die elektrifizierten Flugzeuge aus dem Flugzeugvorentwurf im Pilotmaßstab höher TRL 3 konstruiert und im Testbetrieb erprobt werden. Aufgrund des unterschiedlichen Zeithorizonts ist sowohl die partiell-turboelektrische Flugzeugalternative zur kurzfristigen Reduktion der Umweltwirkungen mit moderatem Verbesserungspotenzial als auch die brennstoffzellenbetriebene Flugzeugalternative zur langfristigen Reduktion der Umweltwirkungen mit hohem Verbesserungspotenzial ausdrücklich weiter zu erforschen. Elektrische Rollvorgänge der PTE sind eine erste Möglichkeit, um Umweltwirkungen gegenüber konventionellen Kleinflugzeugen zu reduzieren, im langen Zeithorizont zeigt jedoch das Wasserstoffflugzeug größere Vorteilhaftigkeit. Für die FCB sollte prioritär der Markthochlauf umgesetzt werden, jedoch unter Voraussetzung eines dekarbonisierten Wasserstoffpfades, da ansonsten signifikant höhere Umweltwirkungen auftreten und erst dann das Fliegen in einem Wasserstoffflugzeug unter Umweltsichtspunkten nachdrücklich empfohlen werden kann. Es konnten daher mit dieser LCA-Studie für den Flugsektor Alternativen zum aktuell stark klimaschädlichen Personentransport identifiziert werden, die zeitnah zur Marktreife gebracht werden müssen. Dies ist notwendig, um die ungenügende Performance des Flugsektors hinsichtlich Umweltsichtspunkten sukzessiv zu verbessern und luftbasierte Personentransporte auch in Zukunft zu ermöglichen.

Anhang

Beechcraft 1900D: Konventioneller Antrieb Herstellung				
Gesamtgewicht: 448,66 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Getriebe	145,37	Getriebe	Stahl	1
Gasturbine Verdichter	83,00	1. Stufe Rotor Blisk	Titan	0,128
		2.-4. Stufe Rotor Blisk	Chrom-Stahl	0,4
		1.-4. Stufe Schaufeln	Chrom-Stahl	0,079
		Zentrifugalkompressor	Titan	0,252
		Gehäuse	Chrom-Stahl	0,141
Gasturbine Brennkammer	85,69	Einspritzdüsen	Kobalt	0,079
		Dome	Nickel	0,013
		Flammrohr	Nickel-Legierung	0,26
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,648
Gasturbine Hochdruckturbine	17,05	Scheibe	Nickel-Legierung	0,632
		Rotor Schaufeln	Nickel-Legierung	0,135
		Stator Schaufeln	Nickel-Legierung	0,042
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,191
Gasturbine Freie Nutzturbine	43,97	Scheibe	Nickel-Legierung	0,284
		Rotor Schaufeln	Nickel-Legierung	0,413
		Stator Schaufeln	Nickel-Legierung	0,196
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,107
Auspuff, Welle, Struktur	73,58	Auspuff	Nickel-Legierung	0,13
		Welle	Stahl	0,291
		Struktur 1	Aluminium	0,289
		Struktur 2	Stahl	0,145
		Struktur 3	Nickel-Legierung	0,145

Anhang 1 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Konventioneller Antrieb Herstellung.

Beechcraft 1900D: Propeller Herstellung				
Gesamtgewicht: 59,90 kg				
Anzahl: 2 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Propeller Komponenten	59,90	Nabe	Aluminium	0,38
		Nabenabdeckung	Aluminium	0,04
		Metallschaft (4 Stück)	Aluminium	0,04
		Blätter (4 Stück)	GFK	0,54

Anhang 2 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Propeller Herstellung.

Beechcraft 1900D: Tragstruktur Herstellung				
Gesamtgewicht: 2465,00 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Flügel	823,31	Struktur 1	Aluminium	0,9
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,05
		Struktur 3	Titan	0,05
Rumpf	963,82	Struktur 1	Aluminium	0,94
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
Höhenleitwerk	110,93	Struktur 1	Aluminium	0,94
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
Seitenleitwerk	88,74	Struktur 1	Aluminium	0,94
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
Fahrwerk	350,02	Struktur 1	Aluminium	0,11
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,73
		Struktur 3	Titan	0,1
		Struktur 4	Gummi	0,06
Triebwerkseinbau, Gondel	128,18	Struktur 1	Aluminium	0,5
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,3
		Struktur 3	Titan	0,2

Anhang 3 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Tragstruktur Herstellung.

Beechcraft 1900D: Flugzeugsysteme Herstellung				
Gesamtgewicht: 750,00 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Steuerungsanlage	109,50	Systeme 1	Aluminium	0,667
Instrumentenanlage	126,00	Systeme 2	CFK	0,045
Hydraulische und pneumatische Anlagen	58,50	Systeme 3	Stahl	0,167
Elektrische Anlage	184,50	Systeme 4	Titan	0,028
Klimaanlage	101,25	Systeme 5	Chrom-Stahl	0,005
Enteisungsanlage	50,25	Systeme 6	Kupfer	0,015
		Systeme 7	Nickel	0,013
		Systeme 8	PET	0,02
		Systeme 9	PP	0,02
		Systeme 10	PVC	0,02
Brandschutz	23,25	Brandschutz 1	PET	0,1
		Brandschutz 2	PP	0,1
		Brandschutz 3	PVC	0,1
		Brandschutz 4	Chrom-Stahl	0,5
		Brandschutz 5	GFK	0,2
Treibstoffsystem	72,00	Treibstoffsystem 1	Chrom-Stahl	0,8
		Treibstoffsystem 2	Aluminium	0,2
Zapfluftanlage	24,75	Zapfluftanlage 1	Chrom-Stahl	0,8
		Zapfluftanlage 2	Aluminium	0,2

Anhang 4 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Flugzeugsysteme Herstellung.

Beechcraft 1900D: Kabinenausrüstung Herstellung				
Gesamtgewicht: 500,00 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Kabinenausrüstung	500,00	Sitze	Stahl	0,3
		Polsterung	PUR	0,05
		Kabinenisolierung	GFK	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 1	PET	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 2	PP	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 3	PVC	0,05
		Trennwände, Rest	Aluminium	0,45

Anhang 5 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Kabinenausrüstung Herstellung.

Beechcraft 1900D: Transportprozesse				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Transportdistanz (in km)	Datensatz Zuordnung	Transport (in tkm)
Antriebssystem	448,66	2.365	Transport Straße	1.061,08
Transport	119,80	1.265	Transport Straße	151,55
Flugzeug Beseitigung	3426,77	1	Transport Straße	3,43

Anhang 6 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Transportprozesse.

Beechcraft 1900D: Energieprozesse			
Anzahl: 1 Stück			
Prozess Name	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Gesamtenergie (in MJ, kWh, kg)
Flugzeug Montage	Thermische Energie	Wärme	18.100,44
	Elektrische Energie	Strom	1.871,49
	Flugzeuglackierung	Lackierung	43,54
Energieträger Bereitstellung	Bereitstellung pro Mission (WtT)	Kerosin	412,50
Energieträger Nutzung	Kerosin Verbrennung pro Mission (TtW)	Kerosin Verbrennung LTO	131,80
		Kerosin Verbrennung Reiseflug	280,70
Flugzeug Beseitigung	Elektrische Energie	Strom	1.638,37

Anhang 7 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: Energieprozesse.

Beechcraft 1900D: End-of-Life-Prozesse				
Gesamtgewicht: 3426,77 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Behandlungs-anteil (in %)	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Komponenten Verbrennung	57,69	0,2	Verbundwerkstoffe Verbrennung	0,425
		0,2	PET Verbrennung	0,138
		0,2	PP Verbrennung	0,138
		0,2	PVC Verbrennung	0,138
		0,2	PUR Verbrennung	0,087
		0,2	Gummi Verbrennung	0,073
Komponenten Recycling	799,00	0,2	Aluminium Recycling	0,67
		0,2	Stahl Recycling	0,237
		0,2	Edelmetalle Recycling	0,093
Sekundärrohstoffe Bereitstellung	754,86	0,2	Aluminium Sekundärrohstoffe	0,703
		0,2	Stahl Sekundärrohstoffe	0,222
		0,2	Edelmetalle Sekundärrohstoffe	0,075

Anhang 8 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-CONV: End-of-Life-Prozesse.

Beechcraft 1900D: Komponentenherstellungsprozesse			
Prozess Name	Prozesswerte Bauteilgewicht, Materialverteilung	Technik zur Datengenerierung	Referenzen
Konventioneller Antrieb Herstellung	Getriebe, Gasturbine (Verdichter, Brennkammer, Hochdruckturbine, Freie Nutzturbine), Auspuff, Welle, Struktur	Simulation (Modellierungs-Software GasTurb), Expertenschätzung	(Pratt & Whitney Canada, 2007), (Ngoret & Kommula, 2019)
Propeller Herstellung	Propeller	Geometrische Berechnung	(Hartzell Propeller Inc., 2010), (Harlamert & Edinger, 1979)
Tragstruktur Herstellung	Flügel, Rumpf, Höhenleitwerk, Seitenleitwerk, Fahrwerk, Triebwerkseinbau, Gondel	Interne auswertbare Information, Expertenschätzung	(Textron Aviation, 2019), (Schäfer, 2017)
Flugzeugsysteme Herstellung	Steuerungsanlage, Instrumentenanlage, Hydraulische und pneumatische Anlagen, Elektrische Anlage, Klimaanlage, Enteisungsanlage	Literaturwert	(Arzdorf, 2014), (Niedzinski, o.D.)
	Brandschutz, Treibstoffsystem, Zapfluftanlage	Eigene Schätzung	-
Kabinenausrüstung Herstellung	Kabinenausrüstung	Interne auswertbare Information, Expertenschätzung	(Aviation Fabricators, o.D.), (Clarke et al., 1988)

Anhang 9 Datengenerierungsliste der Beechcraft 1900D-CONV: Komponentenherstellungsprozesse.

Beechcraft 1900D: Transportprozesse, Energieprozesse, End-of-Life-Prozesse			
Prozess Name	Prozesswerte Transportdistanz, Gesamtenergie, Behandlungsanteil	Technik zur Datengenerierung	Referenzen
Antriebssystem Transport	Transport Konventioneller Antrieb	Interne auswertbare Information	(Hawker Beechcraft, 2008a), (Google Maps, 2022a)
	Transport Propeller	Interne auswertbare Information	(Hawker Beechcraft, 2008b), (Google Maps, 2022b)
Flugzeug Beseitigung	Transport Beseitigungsmasse	Interne auswertbare Information	(Google Maps, 2022c)
Flugzeug Montage	Thermische Energie	Hochskalierte Teilberechnung, Formeln und Naturgesetze	(Mouritz, 2012), (Koehler et al., 2001), (European Aluminium, 2018), (Kuchling, 2011)
	Elektrische Energie		
	Flugzeuglackierung	Eigene Schätzung	-
Energieträger Bereitstellung	Energieträger WtT	Veröffentlichte Messung	(EMEP/EEA, 2019)
Energieträger Nutzung	Kerosin TtW		
Flugzeug Beseitigung	Elektrische Energie	Literaturwert	(Asmatulu et al., 2013a)
Komponenten Verbrennung	Verbrennung	Literaturwert	(EU COM, 2020), (Asmatulu et al., 2013a)
Komponenten Recycling	Recycling		
Sekundärrohstoffe Bereitstellung	Bereitstellung		

Anhang 10 Datengenerierungsliste der Beechcraft 1900D-CONV: Transportprozesse, Energieprozesse, End-of-Life-Prozesse.

PTE: Konventioneller Antrieb Herstellung				
Gesamtgewicht: 596 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Getriebe	193,10	Getriebe	Stahl	1
Gasturbine Verdichter	110,26	1. Stufe Rotor Blisk	Titan	0,128
		2.-4. Stufe Rotor Blisk	Chrom-Stahl	0,4
		1.-4. Stufe Schaufeln	Chrom-Stahl	0,079
		Zentrifugalkompressor	Titan	0,252
		Gehäuse	Chrom-Stahl	0,141
Gasturbine Brennkammer	113,84	Einspritzdüsen	Kobalt	0,079
		Dome	Nickel	0,013
		Flammrohr	Nickel-Legierung	0,26
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,648
Gasturbine Hochdruckturbine	22,64	Scheibe	Nickel-Legierung	0,632
		Rotor Schaufeln	Nickel-Legierung	0,135
		Stator Schaufeln	Nickel-Legierung	0,042
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,191
Gasturbine Freie Nutzturbine	58,40	Scheibe	Nickel-Legierung	0,284
		Rotor Schaufeln	Nickel-Legierung	0,413
		Stator Schaufeln	Nickel-Legierung	0,196
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,107
Auspuff, Welle, Struktur	97,74	Auspuff	Nickel-Legierung	0,13
		Welle	Stahl	0,291
		Struktur 1	Aluminium	0,289
		Struktur 2	Stahl	0,145
		Struktur 3	Nickel-Legierung	0,145

Anhang 11 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Konventioneller Antrieb Herstellung.

PTE: Elektrischer Antrieb Herstellung				
Gesamtgewicht: 252,24 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Elektromotor	107,45	Motor 1	Aluminium	0,19
		Motor 2	Stahl	0,63
		Motor 3	Chrom-Stahl	0,08
		Motor 4	Kupfer	0,09
		Motor 5	Neodym	0,01
Generator	26,99	Generator 1	Aluminium	0,16
		Generator 2	Kupfer	0,09
		Generator 3	Stahl	0,75
Gleichrichter	26,99	Converter 1	Aluminium	0,6
		Converter 2	Kupfer	0,12
		Converter 3	Chrom-Stahl	0,08
		Converter 4	Stahl	0,11
		Converter 5	PET	0,03
		Converter 6	PP	0,03
		Converter 7	PVC	0,03
Wechselrichter	11,86	Inverter 1	Aluminium	0,66
		Inverter 2	Kupfer	0,15
		Inverter 3	Stahl	0,07
		Inverter 4	PET	0,04
		Inverter 5	PP	0,04
		Inverter 6	PVC	0,04
Kupferkabel	54,99	Kabel 1	Kupfer	0,66
		Kabel 2	PET	0,34
Schutzschalter	7,06	Switch 1	Kupfer	0,27
		Switch 2	Stahl	0,25
		Switch 3	PET	0,16
		Switch 4	PP	0,16
		Switch 5	PVC	0,16
Getriebe	16,90	Getriebe	Stahl	1

Anhang 12 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Elektrischer Antrieb Herstellung.

PTE: Propeller Herstellung				
Gesamtgewicht: 32,79 kg				
Anzahl: 4 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Propeller Komponenten	32,79	Nabe	Aluminium	0,38
		Nabenabdeckung	Aluminium	0,04
		Metallschaft (4 Stück)	Aluminium	0,04
		Blätter (4 Stück)	GFK	0,54

Anhang 13 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Propeller Herstellung.

PTE: Tragstruktur Herstellung				
Gesamtgewicht: 2351,31 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Flügel	623,10	Struktur 1	Aluminium	0,9
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,05
		Struktur 3	Titan	0,05
Rumpf	1018,12	Struktur 1	Aluminium	0,94
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
Höhenleitwerk	178,70	Struktur 1	Aluminium	0,94
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
Seitenleitwerk	122,27	Struktur 1	Aluminium	0,94
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
Fahrwerk	348,00	Struktur 1	Aluminium	0,11
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,73
		Struktur 3	Titan	0,1
		Struktur 4	Gummi	0,06
Triebwerkseinbau, Gondel	61,13	Struktur 1	Aluminium	0,5
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,3
		Struktur 3	Titan	0,2

Anhang 14 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Tragstruktur Herstellung.

PTE: Flugzeugsysteme Herstellung				
Gesamtgewicht: 820,01 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Steuerungsanlage	145,14	Systeme 1	Aluminium	0,667
Instrumentenanlage	100,86	Systeme 2	CFK	0,045
Hydraulische und pneumatische Anlagen	79,54	Systeme 3	Stahl	0,167
Elektrische Anlage	122,18	Systeme 4	Titan	0,028
Klimaanlage	170,56	Systeme 5	Chrom-Stahl	0,005
Enteisungsanlage	4,92	Systeme 6	Kupfer	0,015
		Systeme 7	Nickel	0,013
		Systeme 8	PET	0,02
		Systeme 9	PP	0,02
		Systeme 10	PVC	0,02
Li-Ion NMC811 Batterie	38,54	Batterie 1	Aluminium	0,33
		Batterie 2	Stahl	0,06
		Batterie 3	Kupfer	0,18
		Batterie 4	Nickel	0,12
		Batterie 5	Kobalt	0,02
		Batterie 6	Lithium	0,07
		Batterie 7	Graphit	0,15
		Batterie 8	PET	0,03
		Batterie 9	PP	0,02
		Batterie 10	PVC	0,02
Brandschutz	22,96	Brandschutz 1	PET	0,1
		Brandschutz 2	PP	0,1
		Brandschutz 3	PVC	0,1
		Brandschutz 4	Chrom-Stahl	0,5
		Brandschutz 5	GFK	0,2
Treibstoffsystem	68,88	Treibstoffsystem 1	Chrom-Stahl	0,8
		Treibstoffsystem 2	Aluminium	0,2
Zapfluftanlage	66,42	Zapfluftanlage 1	Chrom-Stahl	0,8
		Zapfluftanlage 2	Aluminium	0,2

Anhang 15 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Flugzeugsysteme Herstellung.

PTE: Kabinenausrüstung Herstellung				
Gesamtgewicht: 472,38 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Kabinenausrüstung	472,38	Sitze	Stahl	0,1
		Polsterung	PUR	0,05
		Sitze	CFK	0,2
		Kabinenisolierung	GFK	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 1	PET	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 2	PP	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 3	PVC	0,05
		Trennwände, Rest	Aluminium	0,45

Anhang 16 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Kabinenausrüstung Herstellung.

PTE: Transportprozesse				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Transportdistanz (in km)	Datensatz Zuordnung	Transport (in tkm)
Antriebssystem Transport	596,00	2.365	Transport Straße	1.409,54
	131,16	1.265	Transport Straße	165,92
	252,24	7.538	Transport Luft	1.901,39
Flugzeug Beseitigung	3.894,10	1	Transport Straße	3,89

Anhang 17 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Transportprozesse.

PTE: Energieprozesse			
Anzahl: 1 Stück			
Prozess Name	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Gesamtenergie (in MJ, kWh, kg)
Flugzeug Montage	Thermische Energie	Wärme	17.265,62
	Elektrische Energie	Strom	1.785,18
	Flugzeuglackierung	Lackierung	40,83
Energieträger Bereitstellung	Bereitstellung pro Mission (WtT)	Kerosin	290,89
		Strom	7,59
Energieträger Nutzung	Kerosin Verbrennung pro Mission (TtW)	Kerosin Verbrennung LTO	31,42
		Kerosin Verbrennung Reiseflug	259,47
Flugzeug Beseitigung	Elektrische Energie	Strom	1.985,18

Anhang 18 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: Energieprozesse.

PTE: End-of-Life-Prozesse				
Gesamtgewicht: 3894,10 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Behandlungs-anteil (in %)	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Komponenten Verbrennung	85,20	0,2	Verbundwerkstoffe Verbrennung	0,520
		0,2	PET Verbrennung	0,159
		0,2	PP Verbrennung	0,108
		0,2	PVC Verbrennung	0,108
		0,2	PUR Verbrennung	0,055
		0,2	Gummi Verbrennung	0,049
Komponenten Recycling	888,32	0,2	Aluminium Recycling	0,628
		0,2	Stahl Recycling	0,228
		0,2	Edelmetalle Recycling	0,144
Sekundärrohstoffe Bereitstellung	829,76	0,2	Aluminium Sekundärrohstoffe	0,667
		0,2	Stahl Sekundärrohstoffe	0,216
		0,2	Edelmetalle Sekundärrohstoffe	0,118

Anhang 19 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-PTE: End-of-Life-Prozesse.

FCB: Elektrischer Antrieb Herstellung				
Gesamtgewicht: 2615,04 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Elektromotor	151,67	Motor 1	Aluminium	0,19
		Motor 2	Stahl	0,63
		Motor 3	Chrom-Stahl	0,08
		Motor 4	Kupfer	0,09
		Motor 5	Neodym	0,01
Wechselrichter	15,69	Inverter 1	Aluminium	0,66
		Inverter 2	Kupfer	0,15
		Inverter 3	Stahl	0,07
		Inverter 4	PET	0,04
		Inverter 5	PP	0,04
		Inverter 6	PVC	0,04
Kupferkabel	104,60	Kabel 1	Kupfer	0,66
		Kabel 2	PET	0,34
Schutzschalter	23,54	Switch 1	Kupfer	0,27
		Switch 2	Stahl	0,25
		Switch 3	PET	0,16
		Switch 4	PP	0,16
		Switch 5	PVC	0,16
Getriebe	14,38	Getriebe	Stahl	1
Li-Sulfur-Batterie	855,12	Batterie 1	Aluminium	0,45
		Batterie 2	Stahl	0,02
		Batterie 3	Kupfer	0,3
		Batterie 4	Lithium	0,13
		Batterie 5	PET	0,04
		Batterie 6	PP	0,03
		Batterie 7	PVC	0,03
PEM Brennstoffzelle	211,82	PEM 1	Aluminium	0,05
		PEM 2	Stahl	0,02
		PEM 3	GFK	0,02
		PEM 4	Graphit	0,73
		PEM 5	PET	0,06
		PEM 6	PP	0,06
		PEM 7	PVC	0,06
PEM Verdichter	83,68	Zentrifugalkompressor	Titan	0,834
		Gehäuse	Chrom-Stahl	0,166
PEM Wärmetauscher	713,91	Wärmetauscher 1	Aluminium	0,34
		Wärmetauscher 2	Stahl	0,66
Flüssigwasserstofftank	397,49	Tankwand	Aluminium	0,765
		Isolationsmaterial	PUR	0,235

Anhang 20 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Elektrischer Antrieb Herstellung.

FCB: Propeller Herstellung				
Gesamtgewicht: 26,74 kg				
Anzahl: 4 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Propeller Komponenten	26,74	Nabe	Aluminium	0,38
		Nabenabdeckung	Aluminium	0,04
		Metallschaft (4 Stück)	Aluminium	0,04
		Blätter (4 Stück)	GFK	0,54

Anhang 21 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Propeller Herstellung.

FCB: Tragstruktur Herstellung				
Gesamtgewicht: 2089,72 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Flügel	756,48	Struktur 1	Aluminium	0,09
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,03
		Struktur 3	Titan	0,03
		Struktur 4	CFK	0,85
Rumpf	837,98	Struktur 1	Aluminium	0,26
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,02
		Struktur 3	Titan	0,02
		Struktur 4	CFK	0,7
Höhenleitwerk	75,23	Struktur 1	Aluminium	0,01
		Struktur 2	CFK	0,99
Seitenleitwerk	79,41	Struktur 1	Aluminium	0,01
		Struktur 2	CFK	0,99
Fahrwerk	282,11	Struktur 1	Aluminium	0,11
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,73
		Struktur 3	Titan	0,1
		Struktur 4	Gummi	0,06
Triebwerkseinbau, Gondel	58,51	Struktur 1	Aluminium	0,5
		Struktur 2	Chrom-Stahl	0,3
		Struktur 3	Titan	0,2

Anhang 22 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Tragstruktur Herstellung.

FCB: Flugzeugsysteme Herstellung				
Gesamtgewicht: 833,29 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Steuerungsanlage	183,32	Systeme 1	Aluminium	0,667
Instrumentenanlage	109,16	Systeme 2	CFK	0,045
Hydraulische und pneumatische Anlagen	77,50	Systeme 3	Stahl	0,167
Elektrische Anlage	249,15	Systeme 4	Titan	0,028
Klimaanlage	124,99	Systeme 5	Chrom-Stahl	0,005
Enteisungsanlage	25,00	Systeme 6	Kupfer	0,015
		Systeme 7	Nickel	0,013
		Systeme 8	PET	0,02
		Systeme 9	PP	0,02
		Systeme 10	PVC	0,02
Li-Ion NMC811 Batterie	39,16	Batterie 1	Aluminium	0,33
		Batterie 2	Stahl	0,06
		Batterie 3	Kupfer	0,18
		Batterie 4	Nickel	0,12
		Batterie 5	Kobalt	0,02
		Batterie 6	Lithium	0,07
		Batterie 7	Graphit	0,15
		Batterie 8	PET	0,03
		Batterie 9	PP	0,02
		Batterie 10	PVC	0,02
Brandschutz	25,00	Brandschutz 1	PET	0,1
		Brandschutz 2	PP	0,1
		Brandschutz 3	PVC	0,1
		Brandschutz 4	Chrom-Stahl	0,5
		Brandschutz 5	GFK	0,2

Anhang 23 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Flugzeugsysteme Herstellung.

FCB: Kabinenausrüstung Herstellung				
Gesamtgewicht: 408,99 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Kabinenausrüstung	408,99	Sitze	Stahl	0,1
		Polsterung	PUR	0,05
		Sitze	CFK	0,2
		Kabinenisolierung	GFK	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 1	PET	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 2	PP	0,05
		Wandverkleidung, Boden, Notsystem 3	PVC	0,05
		Trennwände, Rest	Aluminium	0,45

Anhang 24 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Kabinenausrüstung Herstellung.

FCB: Transportprozesse				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Transportdistanz (in km)	Datensatz Zuordnung	Transport (in tkm)
Antriebssystem Transport	106,96	1.265	Transport Straße	135,30
	2.615,04	350	Transport Straße	915,26
Flugzeug Beseitigung	22.849,29	1	Transport Straße	22,85

Anhang 25 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Transportprozesse.

FCB: Energieprozesse			
Anzahl: 1 Stück			
Prozess Name	Teilkomponente Name	Datensatz Zuordnung	Gesamtenergie (in MJ, kWh, kg)
Flugzeug Montage	Thermische Energie	Wärme	15.344,77
	Elektrische Energie	Strom	1.586,57
	Flugzeuglackierung	Lackierung	29,00
Energieträger Bereitstellung	Bereitstellung pro Mission (WtT)	Flüssiger Wasserstoff	80,93
		Strom	197,06
Flugzeug Beseitigung	Elektrische Energie	Strom	13.818,23

Anhang 26 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Energieprozesse.

FCB: End-of-Life-Prozesse				
Gesamtgewicht: 28561,61 kg				
Anzahl: 1 Stück				
Prozess Name	Prozess-Gewicht (in kg)	Behandlungs-anteil (in %)	Datensatz Zuordnung	Prozent-Verteilung (in %)
Komponenten Verbrennung	874,16	0,2	Verbundwerkstoffe Verbrennung	0,366
		0,2	PET Verbrennung	0,229
		0,2	PP Verbrennung	0,171
		0,2	PVC Verbrennung	0,171
		0,2	PUR Verbrennung	0,059
		0,2	Gummi Verbrennung	0,004
Komponenten Recycling	4838,16	0,2	Aluminium Recycling	0,497
		0,2	Stahl Recycling	0,074
		0,2	Edelmetalle Recycling	0,429
Sekundärrohstoffe Bereitstellung	4284,27	0,2	Aluminium Sekundärrohstoffe	0,557
		0,2	Stahl Sekundärrohstoffe	0,074
		0,2	Edelmetalle Sekundärrohstoffe	0,370

Anhang 27 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: End-of-Life-Prozesse.

PTE/FCB: Komponentenherstellungsprozesse			
Prozess Name	Prozesswerte Bauteilgewicht, Materialverteilung	Technik zur Datengenerierung	Referenzen
Konventioneller Antrieb Herstellung	Komponentengewicht Komponentenanzahl	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO)	-
Elektrischer Antrieb Herstellung	Komponentengewicht Komponentenanzahl	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO)	(ecoinvent v3.8)
Propeller Herstellung	Komponentengewicht Komponentenanzahl	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO)	-
Tragstruktur Herstellung	Flügel, Rumpf, Höhenleitwerk, Seitenleitwerk, Fahrwerk, Triebwerkseinbau, Gondel	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO), Expertenschätzung	(Howe, 2011), (Liu, 2013)
Flugzeugsysteme Herstellung	Steuerungsanlage, Instrumentenanlage, Hydraulische und pneumatische Anlagen, Elektrische Anlage, Klimaanlage, Enteisungsanlage	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO)	(ecoinvent v3.8)
	Batterie		
	Brandschutz, Treibstoffsystem, Zapfluftanlage		
Kabinenausrüstung Herstellung	Komponentengewicht Komponentenanzahl	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO)	-

Anhang 28 Datengenerierungsliste der Beechcraft 1900D-PTE und FCB: Komponentenherstellungsprozesse.

PTE/FCB: Transportprozesse, Energieprozesse, End-of-Life-Prozesse			
Prozess Name	Prozesswerte Transportdistanz, Gesamtenergie, Behandlungsanteil	Technik zur Datengenerierung	Referenzen
Antriebssystem Transport	Transport Konventioneller Antrieb	Interne auswertbare Information	(Hawker Beechcraft, 2008a), (Google Maps, 2022a)
	Transport Propeller	Interne auswertbare Information	(Hawker Beechcraft, 2008b), (Google Maps, 2022b)
	Transport Elektrischer Antrieb	Eigene Schätzung	-
Flugzeug Beseitigung	Transport Beseitigungsmasse	Interne auswertbare Information	(Google Maps, 2022c)
Flugzeug Montage	Thermische Energie	Hochskalierte Teilberechnung, Formeln und Naturgesetze	(Mouritz, 2012), (Koehler et al., 2001), (European Aluminium, 2018), (Kuchling, 2011)
	Elektrische Energie		
	Flugzeuglackierung	Eigene Schätzung	-
Energieträger Bereitstellung	Energieträger WtT	Simulation (Modellierungs-Software MICADO/UNICADO)	(ecoinvent v3.8), (FfE, 2020), (Strathoff et al., 2022)
Energieträger Nutzung	Kerosin TtW	Veröffentlichte Messung	(EMEP/EEA, 2019)
Flugzeug Beseitigung	Elektrische Energie	Literaturwert	(Asmatulu et al., 2013a)
Komponenten Verbrennung	Verbrennung	Literaturwert	(EU COM, 2020), (Asmatulu et al., 2013a)
Komponenten Recycling	Recycling		
Sekundärrohstoffe Bereitstellung	Bereitstellung		

Anhang 29 Datengenerierungsliste der Beechcraft 1900D-PTE und FCB: Transportprozesse, Energieprozesse, End-of-Life-Prozesse.

Stakeholder Umfrage 12/2022		GNOSIS LCA-Szenario-Parameter
Persönliche Daten		<i>Auswahl: Flugzeug, LCA, Energie, Fahrzeug, Kraftstoff, Praxis</i>
Name:	Einrichtung:	Fachexpertise:
<p>A: Ist der Szenario-Parameter in der Ausprägung im Einklang mit dem Flugzeug-Vorentwurf? B: Können Einschränkungen gegen diese zukünftige Parameterausprägung gefunden werden? <i>(Benennung der Einschränkung oder Vorschlag anderer Wert)</i> C: Erscheinen die Veränderungen realistisch und wenn ja, in welcher Höhe? <i>(von 1 gar nicht bis 5 sehr glaubhaft und keinerlei Einschränkungen identifiziert)</i> D: Aufgrund der Expertise ist keine Einschätzung möglich.</p>		
Entwurfsangenommene Transport-Inputparameter (a-TIP)		Bewertungsjahr 2025
a-TIP 1.1 (BAU) Kraftstoffeinsparung	-20% Gesamtreduktion 0,8%/a [ATAG 2010]	A 8 B 4 <u>geringer (5-10%)</u> C 3,4 D 2
a-TIP 2.1 (BAU) Materialreduktion	-3,75% Gesamtreduktion Sitze: CFK-Substitution	A 3 B 1 _____ C 4,7 D 9
Hochskalierte/Upscaling Transport-Inputparameter (u-TIP)		Bewertungsjahr 2025
u-TIP 1.1 (BAU) Transport Elektro-Bauteil	7.538 km Werksproduktion China	A 3 B 1 _____ C 3,7 D 8
u-TIP 2.1 (BAU) Energie E-Motor/BAT	-17,5% Gesamtreduktion Degression [Wright 1936]	A 4 B 2 <u>E-Motor nicht viel besser</u> C 2,5 D 7
u-TIP 3.1 (BAU) Material E-Motor/BAT	-10% Gesamtreduktion Degression [Wright 1936]	A 2 B 2 <u>E-Motor nicht viel besser</u> C 3 D 10
u-TIP 4.1 (BAU) Output Leistungselektronik	+ 14% Gesamterhöhung Mittelwert [Wright 1936]	A 2 B 3 <u>nur Masse verändern</u> C 2,3 D 8
u-TIP 5.1 (BAU) Zyklusanzahl E-Motor	6.000 Flugstunden (6,8 a) [Pipistrell Alpha Elektro]	A 3 B 2 _____ C 3,8 D 6
u-TIP 6.1 (BAU) Zyklusanzahl Li-Ion BAT	1.800 Ladezyklen (2,8 a) [Schneider et al. 2020]	A 4 B 1 _____ C 3 D 6
Szenarioausbildende Transport-Inputparameter (o-TIP)		Bewertungsjahr 2025
o-TIP 1.1 (IST) Strommix	ca. 500 g CO ₂ /kWh [ecoinvent Version 3.8]	
o-TIP 1.2 (BAU) Strommix	ca. 300 g CO ₂ /kWh [Jöhrens et al. 2020]	A 3 B 2 _____ C 4 D 9
o-TIP 2.1 (IST) Recyclinginputrate	20% Recyclinganteil [Asmatulu et al. 2013]	
o-TIP 2.2 (BAU) Recyclinginputrate	42% Mittelwert [UNEP 2011], [EU COM 2020]	A 2 B 0 _____ C 2,5 D 11
Entwurfsangenommene Transport-Inputparameter (a-TIP)		Bewertungsjahr 2050
a-TIP 1.2 (BAU) Kraftstoffeinsparung	-12,5% Gesamtreduktion 0,5%/a [ATAG 2010]	A 7 B 2 <u>geringer (5-10%)</u> C 3,6 D 4
a-TIP 2.2 (BAU) Materialreduktion	-17,5% Gesamtreduktion Tragstruktur: 2/3 CFK	A 4 B 3 <u>ggf. zu hoch</u> C 3,3 D 6
Hochskalierte/Upscaling Transport-Inputparameter (u-TIP)		Bewertungsjahr 2050
u-TIP 1.2 (BAU) Transport Elektro-Bauteil	1 km neues Werk neben Flugzeugproduktion	A 1 B 3 <u>Distanz größer</u> C - D 10
u-TIP 2.2 (BAU) Energie Li-Sulfur BAT	-17,5% Gesamtreduktion Degression [Wright 1936]	A 2 B 0 _____ C 4 D 11
u-TIP 3.2 (BAU) Material Li-Sulfur BAT	-10% Gesamtreduktion Degression [Wright 1936]	A 2 B 0 _____ C 3 D 11

Anhang 30 Expertenfrage zu Szenario-Parametern für den Zukunftszustand von Beechcraft 1900D-CONV, PTE und FCB (Teil 1).

<p>A: Ist der Szenario-Parameter in der Ausprägung im Einklang mit dem Flugzeug-Vorentwurf? B: Können Einschränkungen gegen diese zukünftige Parameterausprägung gefunden werden? <i>(Benennung der Einschränkung oder Vorschlag anderer Wert)</i> C: Erscheinen die Veränderungen realistisch und wenn ja, in welcher Höhe? <i>(von 1 gar nicht bis 5 sehr glaubhaft und keinerlei Einschränkungen identifiziert)</i> D: Aufgrund der Expertise ist keine Einschätzung möglich.</p>		
u-TIP 7.1 (BAU) Energie CFK	-25% 1,5fache Produktion [Nunna et al. 2019]	A 0 B 1 <u>Masse ja, Energie ist max.</u> C - D 12
u-TIP 8.1 (BAU) Material CFK	-25% 1,5fache Produktion [Nunna et al. 2019]	A 1 B 1 <u>Masse ja, Energie ist max.</u> C 3 D 11
Szenarioausbildende Transport-Inputparameter (o-TIP)		Bewertungsjahr 2050
o-TIP 1.3 (BAU) Strommix	ca. 60 g CO2/kWh [Jöhrens et al. 2020]	A 2 B 2 <u>kein BAU Szenario</u> C 3,7 D 9
o-TIP 1.4 (worst) Strommix	ca. 120 g CO2/kWh [Repenning et al. 2021]	A 3 B 0 _____ C 3,7 D 9
o-TIP 1.5 (best) Strommix	ca. 80 g CO2/kWh [Agora 2021]	A 2 B 1 <u>eher niedriger</u> C 3,3 D 9
o-TIP 2.2 (BAU) Recyclinginputrate	65% Recyclinganteil [UNEP 2011]	A 3 B 1 <u>kein CFK Recycling</u> C 2,5 D 9
o-TIP 2.3 (worst) Recyclinginputrate	42% Mittelwert [UNEP 2011], [EU COM 2020]	A 3 B 1 <u>kein CFK Recycling</u> C 3,5 D 9
o-TIP 2.4 (best) Recyclinginputrate	90% Recyclinganteil [Fishman et al. 2021]	A 3 B 1 <u>viel zu hoch</u> C 3 D 9
o-TIP 3.1 (BAU) Zyklusanzahl E-Motor	+ 30% Erhöhung (8,8 a) Mitte [Pipistrel] [Experte]	A 2 B 2 _____ C 4,3 D 8
o-TIP 3.2 (worst) Zyklusanzahl E-Motor	6.000 Flugstunden (6,8 a) [Pipistrell Alpha Elektro]	A 1 B 2 <u>hätte mehr gedacht</u> C 4,7 D 8
o-TIP 3.2 (best) Zyklusanzahl E-Motor	+ 60% Erhöhung (10,8 a) [Experte Industrie]	A 1 B 2 <u>scheint zu hoch</u> C 3 D 8
o-TIP 4.1 (BAU) Zyklusanzahl Li-Sulfur BAT	+ 100% Erhöhung (1,6 a) Mitte [Hersteller] [Experte]	A 2 B 1 <u>bis 2050 in Einklang</u> C 2,3 D 9
o-TIP 4.2 (worst) Zyklusanzahl Li-Sulfur BAT	500 Ladezyklen (0,8 a) [Datenblatt Hersteller]	A 1 B 2 <u>bis 2050 in Einklang</u> C 2,8 D 9
o-TIP 4.3 (best) Zyklusanzahl Li-Sulfur BAT	+ 200% Erhöhung (2,4 a) [Experte Forschung]	A 1 B 2 <u>bis 2050 in Einklang</u> C 2,8 D 9
o-TIP 5.1 (BAU) Zyklusanzahl PEM-FC	+ 10% Erhöhung (5,5 a) [Annahme]	A 2 B 1 <u>zu gering (+20%)</u> C 4 D 8
o-TIP 5.2 (worst) Zyklusanzahl PEM-FC	6.000 Zyklen (5 a) [Experte Forschung]	A 2 B 1 <u>zu gering (+20%)</u> C 4,7 D 8
o-TIP 5.3 (best) Zyklusanzahl PEM-FC	+ 40% Erhöhung (7 a) [Annahme]	A 2 B 1 <u>zu hoch</u> C 3,3 D 8
o-TIP 6.1 (BAU) Zyklusanzahl LH2 Tank	+ 10% Erhöhung (8,8 a) [Annahme]	A 3 B 0 _____ C 4,7 D 8
o-TIP 6.2 (worst) Zyklusanzahl LH2 Tank	10.000 Zyklen (8 a) [Verstraete 2009]	A 3 B 0 _____ C 5 D 8
o-TIP 6.3 (best) Zyklusanzahl LH2 Tank	+ 40% Erhöhung (11,2 a) [Annahme]	A 1 B 2 <u>erscheint viel (+20%)</u> C 3,5 D 8
Anmerkungen		GNOSIS LCA-Szenario-Parameter
<p>-kein Bauchgefühl zu den Werten, keine Erfahrungswerte bisher gesammelt -Entwicklung von Li-S Batterien schwierig einzuschätzen, insbesondere die Zyklusfestigkeit muss erhöht werden. Zeithorizont 2050 ist aber mit den Angaben in Einklang zu bringen!</p>		

Anhang 31 Expertenfrage zu Szenario-Parametern für den Zukunftszustand von Beechcraft 1900D-CONV, PTE und FCB (Teil 2).

Parametermodifikationsregister für Ökobilanzierung Zur Modellierung zukunftsgerichteter Produktsysteme mit Parametermodifikation *Konventionelle Technologie: Incumbent Parameter [IP] / Advance Parameter [AP] / Overall Parameter [OP] **Neuartige Technologie: Ex-ante Parameter [EP] / Upscaling Parameter [UP] / Overall Parameter [OP]						
Beechcraft 1900D-PTE - REF 2023			Referenzzustand			
Kategorie Code*/**	Zeit Code	Interne Parameter	Datengenerierungstechnik	Input-/Outputfluss Umsetzung	Referenzwert	Umsetzungsmaßnahme
EP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	Simulation	Effizienz: Reduktion Energie Flugzeug	0,61 kg/km Kerosin, 0,02 kWh/km Strom	-20%
EP 2.1	REF	Materialartveränderung	Geometrische Berechnung	Substitution: Austausch CFK	94,5 kg (2/3) Stahl zu CFK (1/5 Kabine)	-2% insg.
EP 3.1	REF	Produktartwechsel	Datenbank	Marktanteil: zusätzl. Bereitsteller Li-Ion NMC 811	38,5 kg Li-Ion NMC 811	-
EP 4.1	REF	Herstellungsortveränderung	Eigene Schätzung	Distanz: Antrieb Produktionsortveränderung	7538 km Flugtransport	-
UP 1.1	REF	Herstellungsinputreduktion	-	-	100% Energiebedarf Li-Ion Batterie	-
UP 2.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	-	-	100% Materialbedarf Li-Ion Batterie	-
OP 1.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	-	-	45% RE Strommix in Fahrzeug und Li-Ion Batterie Produktion	-
OP 2.1	REF	Recyclinginputrate-erhöhung	-	-	20% Recyclingquote	-
Beechcraft 1900D-PTE - FUT 2025A			Zukunftszustand - Szenariovariante A			
Kategorie Code*/**	Zeit Code	Interne Parameter	Datenmodifikationstechnik	Input-/Outputfluss Modifizierung	Referenzwert	Modifikationsmaßnahme
UP 1.2	FUT-PRE-BAU	Herstellungsinputreduktion	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie Batterie	100% Energiebedarf Li-Ion Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-PRE-BAU	Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material Batterie	100% Materialbedarf Li-Ion Batterie	-10%
OP 1.2	FUT-PRE-BAU	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil: reduz. Bereitsteller fossile Energieträger	45% RE Strommix in Fahrzeug und Li-Ion Batterie Produktion	+25%
OP 2.2	FUT-PRE-BAU	Recyclinginputrate-erhöhung	Historischer Trend, Expertenumfrage	Marktanteil: zusätzl. Bereitsteller Sekundärrohstoffe	20% Recyclingquote	+22%
Konsistenzcheck			Völlig konsistent	Teilweise konsistent	Nicht konsistent	Keine Antwort möglich
Beechcraft 1900D-PTE - FUT 2025A			14 x (+)	0 x (O)	0 x (-)	2 x (-na-)
Szenariokombination			Szenarioname			
Beechcraft 1900D-PTE - FUT 2025A			Keep moving forward (KMF)			

Anhang 32 Parametermodifikationsregister zur Szenario-Entwicklungsprozess Dokumentation der Beechcraft 1900D-PTE.

Parametermodifikationsregister für Ökobilanzierung

Zur Modellierung zukunftsgerichteter Produktsysteme mit Parametermodifikation

*Konventionelle Technologie: Incumbent Parameter [IP] / Advance Parameter [AP] / Overall Parameter [OP]

**Neuartige Technologie: Ex-ante Parameter [EP] / Upscaling Parameter [UP] / Overall Parameter [OP]

Beechcraft 1900D-FCB - REF 2023			Referenzzustand			
Kategorie Code*/**	Zeit Code	Interne Parameter	Datengenerierungstechnik	Input-/Outputfluss Umsetzung	Referenzwert	Umsetzungsmaßnahme
EP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	Simulation	Effizienz: Reduktion Energie Flugzeug	0,17 kg/km LH2, 0,41 kWh/km Strom	-33%
EP 2.1	REF	Materialartveränderung	Geometrische Berechnung	Substitution: Austausch CFK	94,5 kg (2/3) Stahl zu CFK (1/5 Kabine)	-2% insg.
EP 3.1	REF	Materialartveränderung	Expertenschätzung	Substitution: Austausch CFK	1383,4 kg (4/5) Alu zu CFK (2/5 Struktur)	-23% insg.
EP 4.1	REF	Produktartwechsel	Datenbank	Marktanteil: zusätzl. Bereitsteller Li-Ion NMC 811	38,5 kg Li-Ion NMC 811	-
EP 5.1	REF	Produktartwechsel	Literaturwert	Marktanteil: zusätzl. Bereitsteller Li-S	855 kg Li-Schwefel	-
EP 6.1	REF	Herstellungsortveränderung	Eigene Schätzung	Distanz: Antrieb Produktionsortveränderung	350 km Straßentransport	-
UP 1.1	REF	Herstellungsinpuderuktion	-	-	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-
UP 2.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	-	-	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-
UP 3.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	-	-	100% Materialbedarf E-Motor	-
UP 4.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer E-Motor	-
UP 5.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	-
UP 6.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer Li-S Batterie	-
UP 7.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	-
UP 8.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer LH2 Tank	-
OP 1.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	-	-	100% Materialbedarf CFK Bereitstellung, 45% RE Strommix	-
OP 2.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	-	-	100% Energiebedarf LH2 Bereitstellung, 45% RE Strommix	-
OP 3.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	-	-	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Zukunftstechnologien	-
OP 4.1	REF	Recyclinginputrate-erhöhung	-	-	20% Recyclingquote	-

Anhang 33 Parametermodifikationsregister zur Szenario-Entwicklungsprozess Dokumentation der Beechcraft 1900D-FCB (Teil 1).

Beechcraft 1900D-FCB - FUT 2050B			Zukunftszustand - Szenariovariante B			
Kategorie Code*/**	Zeit Code	Interne Parameter	Datenmodifikations-technik	Input-/Outputfluss Modifizierung	Referenzwert	Modifikationsmaßnahme
UP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungsinp- reduktion	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie alle Batterien	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-BETTER	Materialeffizienz- erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material alle Batterien	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-10%
UP 3.2	FUT-EXP-BETTER	Materialeffizienz- erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material E-Motor	100% Materialbedarf E-Motor	-10%
UP 4.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer E-Motor	100% Lebensdauer E-Motor	+30%
UP 5.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Literaturannahme, Expertenannahme	Bedarf: Nutzungs- dauer Li-Ion Batterie	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	+70%
UP 6.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer Li-S Batterie	100% Lebensdauer Li-S Batterie	+100%
UP 7.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer Brennstoffzelle	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	+25%
UP 8.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer LH2 Tank	100% Lebensdauer LH2 Tank	+10%
OP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadver- besserung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material CFK Bereitstellung	100% Materialbedarf CFK Bereitstellung, 45% RE Strommix	-12,5%, +51%
OP 2.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadver- besserung	Literaturannahme, Expertenannahme	Effizienz: Reduktion Energie LH2 Bereitstellung	100% Energiebedarf LH2 Bereitstellung, 45% RE Strommix	-5%, +51%
OP 3.2	FUT-EXP-BETTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil: reduz. Bereitsteller fossile Energieträger	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	+51%
OP 4.2	FUT-EXP-BETTER	Recyclinginputrate- erhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil: zusätzl. Bereitsteller Sekundärrohstoffe	20% Recyclingquote	+45%
Konsistenzcheck			Völlig konsistent	Teilweise konsistent	Nicht konsistent	Keine Antwort möglich
Beechcraft 1900D-FCB - FUT 2050B			30 x (+)	15 x (O)	0 x (-)	3 x (-na-)
Szenariokombination			Szenarioname			
Beechcraft 1900D-FCB - FUT 2050B			Wind of change (WOC)			

Anhang 34 Parametermodifikationsregister zur Szenario-Entwicklungsprozess Dokumentation der Beechcraft 1900D-FCB (Teil 2).

Beechcraft 1900D-FCB - FUT 2050C			Zukunftszustand - Szenariovariante C			
Kategorie Code*/**	Zeit Code	Interne Parameter	Datenmodifikations-technik	Input-/Outputfluss Modifizierung	Referenzwert	Modifikationsmaßnahme
UP 1.2	FUT-EXP-FASTER	Herstellungsinp- reduktion	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie alle Batterien	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-FASTER	Materialeffizienz- erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material alle Batterien	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-10%
UP 3.2	FUT-EXP-FASTER	Materialeffizienz- erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material E-Motor	100% Materialbedarf E-Motor	-10%
UP 4.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer E-Motor	100% Lebensdauer E-Motor	+65%
UP 5.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenannahme	Bedarf: Nutzungs- dauer Li-Ion Batterie	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	+130%
UP 6.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer Li-S Batterie	100% Lebensdauer Li-S Batterie	+200%
UP 7.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer Brennstoffzelle	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	+40%
UP 8.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Bedarf: Nutzungs- dauer LH2 Tank	100% Lebensdauer LH2 Tank	+20%
OP 1.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadver- besserung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material CFK Bereitstellung	100% Materialbedarf CFK Bereitstellung, 45% RE Strommix	-12,5%, +49%
OP 2.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadver- besserung	Literaturannahme, Expertenannahme	Effizienz: Reduktion Energie LH2 Bereitstellung	100% Energiebedarf LH2 Bereitstellung, 45% RE Strommix	-20%, +49%
OP 3.3	FUT-EXP-FASTER	Regenerative Energien Anteilerhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil: reduz. Bereitsteller fossile Energieträger, zusätzl. Bereitsteller Wasserstoff	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	+49%
OP 4.3	FUT-EXP-FASTER	Recyclinginputrate- erhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil: zusätzl. Bereitsteller Sekundärrohstoffe	20% Recyclingquote	+70%
Konsistenzcheck			Völlig konsistent	Teilweise konsistent	Nicht konsistent	Keine Antwort möglich
Beechcraft 1900D-FCB - FUT 2050C			32 x (+)	13 x (O)	0 x (-)	3 x (-na-)
Szenariokombination			Szenarioname			
Beechcraft 1900D-FCB - FUT 2050C			Fast progress (FP)			

Anhang 35 Parametermodifikationsregister zur Szenario-Entwicklungsprozess Dokumentation der Beechcraft 1900D-FCB (Teil 3).

Bezeichnung der Input- bzw. Outputflüsse	Zuordnung der Datensätze aus ecoinvent v3.8
Aluminium Bereitstellung	market for aluminium, wrought alloy aluminium, wrought alloy APOS, U - GLO
Stahl Bereitstellung	market for steel, low-alloyed steel, low alloyed APOS, U - GLO
Chrom-Stahl Bereitstellung	market for steel, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 APOS, U - GLO
Kupfer Bereitstellung	market for copper, cathode copper, cathode APOS, U
Nickel Bereitstellung	market for nickel, class 1 nickel, class 1 APOS, U - GLO
Nickel-Legierung Bereitstellung	market for iron-nickel-chromium alloy ironnickel-chromium alloy APOS, U - GLO
Titan Bereitstellung	market for titanium titanium APOS, U - GLO
Kobalt Bereitstellung	market for cobalt cobalt APOS, U
Neodym Bereitstellung	market for neodymium oxide neodymium oxide APOS, U
Lithium Bereitstellung	market for lithium lithium APOS, U
Graphit Bereitstellung	market for graphite graphite APOS, U
CFK Bereitstellung	market for carbon fibre reinforced plastic, injection moulded carbon fibre reinforced plastic, injection moulded APOS, U - GLO
GFK Bereitstellung	market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded APOS, U - GLO
PET Bereitstellung	market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade APOS, U
PP Bereitstellung	market for polypropylene, granulate polypropylene, granulate APOS, U
PVC Bereitstellung	market for polyvinylchloride, bulk polymerised polyvinylchloride, bulk polymerised APOS, U
PUR Bereitstellung	market for polyurethane, rigid foam polyurethane, rigid foam APOS, U
Gummi Bereitstellung	market for synthetic rubber synthetic rubber APOS, U - GLO
Transport Straße	market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 APOS, U
Transport Luft	market for transport, freight, aircraft, unspecified transport, freight, aircraft, unspecified APOS, U
Wärme Bereitstellung	market for heat, district or industrial, other than natural gas heat, district or industrial, other than natural gas APOS, U
Lackierung Bereitstellung	market for electrostatic paint electrostatic paint APOS, U
Kerosin Bereitstellung	market for kerosene kerosene APOS, U
Strom Bereitstellung	market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage APOS, U

Anhang 36 Liste der ecoinvent Datensätze für die Input- bzw. Outputflüsse von Prozessen der Herstellungs- und Nutzenphase.

Bezeichnung der Input- bzw. Outputflüsse	Zuordnung der Datensätze aus ecoinvent v3.8
Verbundwerkstoffe Verbrennung	treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration waste plastic, mixture APOS, U
PET Verbrennung	treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration waste polyethylene terephthalate APOS, U
PP Verbrennung	treatment of waste polypropylene, municipal incineration waste polypropylene APOS, U
PVC Verbrennung	treatment of waste polyvinylchloride, municipal incineration waste polyvinylchloride APOS, U
PUR Verbrennung	treatment of waste polyurethane, municipal incineration waste polyurethane APOS, U
Gummi Verbrennung	treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration waste rubber, unspecified APOS, U
Aluminium Recycling	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter aluminium, wrought alloy APOS, U
Stahl Recycling	steel production, electric, low-alloyed steel, low-alloyed APOS, U
Edelmetalle Recycling	treatment of copper scrap by electrolytic refining copper, cathode APOS, U
Polymere Recycling	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade, recycled to generic market for bottle grade PET granulate polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade APOS, U
Aluminium Sekundärrohstoffe	market for aluminium, wrought alloy aluminium, wrought alloy APOS, U - GLO
Stahl Sekundärrohstoffe	market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed APOS, U - GLO
Edelmetalle Sekundärrohstoffe	market for copper, cathode copper, cathode APOS, U - GLO
Polymere Sekundärrohstoffe	market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade APOS, U - GLO

Anhang 37 Liste der ecoinvent Datensätze für die Input- bzw. Outputflüsse von Prozessen der Entsorgungsphase.

Bezeichnung der Input- bzw. Outputflüsse	Zuordnung der Datensätze aus ecoinvent v3.8 bzw. der verwendeten Referenz
Elektromotor Produktion	market for electric motor, electric passenger car electric motor, electric passenger car APOS, U
Generator Produktion	market for electric motor, vehicle electric motor, vehicle APOS, U
Gleichrichter Produktion	market for converter, for electric passenger car converter, for electric passenger car APOS, U
Wechselrichter Produktion	market for inverter, for electric passenger car inverter, for electric passenger car APOS, U
Kupferkabel Produktion	market for cable, unspecified cable, unspecified APOS, U
Schutzschalter Produktion	market for switch, toggle type switch, toggle type APOS, U
Batterie, Li-Ion, NMC811, Produktion	market for battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic APOS, U
Brennstoffzelle, PEM Stack, Produktion	market for fuel cell, stack polymer electrolyte membrane, 2kW electrical, future fuel cell, stack polymer electrolyte membrane, 2kW electrical, future APOS, U
Wärmetauscher Produktion	market for blower and heat exchange unit, KWLC 1200 blower and heat exchange unit, KWLC 1200 APOS, U
Batterie, Li-Sulfur, Produktion	(Deng et al., 2017)
Kerosin Verbrennung LTO	(EMEP/EEA, 2019)
Kerosin Verbrennung Reiseflug	(EMEP/EEA, 2019)
Bio-Kerosin Bereitstellung	(Strathoff et al., 2022)
Synthetisches Kerosin Bereitstellung	(Strathoff et al., 2022)
Wasserstoff Bereitstellung, flüssig, 2022	(FfE, 2020; Fraunhofer ISE, 2022; Strathoff et al., 2022)
Wasserstoff Bereitstellung, flüssig, 2045	(Agora/Stiftung Klimaneutralität, 2021; FfE, 2020; Strathoff et al., 2022)
Wasserstoff Bereitstellung, flüssig, 2050	(FfE, 2020; Jöhrens et al., 2020; Strathoff et al., 2022)
Strom Bereitstellung, 2022	(Fraunhofer ISE, 2022)
Strom Bereitstellung, 2030/2040-R	(Repenning et al., 2021)
Strom Bereitstellung, 2030/2045-A	(Agora/Stiftung Klimaneutralität, 2021)
Strom Bereitstellung, 2030/2050-J	(Jöhrens et al., 2020)
Recyclinganteil 42%	(Asmatulu et al., 2013b)
Recyclinganteil 65%	(Oliveira Fernandes Lopes, 2010; UNEP, 2011b)
Recyclinganteil 90%	(Fishman et al., 2021)

Anhang 38 Liste der ecoinvent Datensätze für die Input- bzw. Outputflüsse von Produkt-Prozessen und eigenen Datensätzen.

Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	0,02%	-	0,01%	0,00%	0,19%	0,01%	0,06%	0,02%
1900D-	NO _x -eq	0,03%	-	0,01%	0,00%	0,25%	0,01%	0,07%	0,03%
CONV-2002	Cu-eq	7,84%	-	0,16%	0,00%	11,63%	0,20%	3,52%	0,90%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	225,88	13,39%		86,32%		0,00%	0,00%	0,02%	-0,04%
	0,452	29,32%		70,31%		0,00%	0,00%	0,03%	-0,06%
	0,075	78,37%		0,00%		0,02%	0,00%	0,56%	-3,21%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	0,03%	-	0,01%	0,00%	0,24%	0,01%	0,07%	0,08%
1900D-	NO _x -eq	0,05%	-	0,01%	0,00%	0,30%	0,01%	0,08%	0,08%
CONV-2025A (KMF)	Cu-eq	12,43%	-	0,27%	0,00%	13,69%	0,10%	4,12%	0,96%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	179,21	13,37%		86,24%		0,01%	0,00%	0,05%	-0,11%
	0,364	28,90%		70,63%		0,00%	0,00%	0,08%	-0,17%
	0,062	75,62%		0,00%		0,05%	0,00%	1,46%	-8,72%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	0,04%	-	0,01%	0,00%	0,43%	0,01%	0,07%	0,06%
1900D-	NO _x -eq	0,05%	-	0,01%	0,00%	0,46%	0,01%	0,09%	0,07%
CONV-2050B (WOC)	Cu-eq	13,65%	-	0,28%	0,00%	8,34%	0,21%	5,10%	1,18%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	151,77	13,34%		86,06%		0,00%	0,01%	0,05%	-0,09%
	0,308	28,80%		70,57%		0,00%	0,00%	0,07%	-0,14%
	0,049	79,99%		0,00%		0,17%	0,00%	1,52%	-10,45%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Beechcraft	CO ₂ -eq	0,04%	0,00%	0,01%	0,00%	0,44%	0,01%	0,07%	0,06%
1900D-	NO _x -eq	0,05%	0,00%	0,01%	0,00%	0,47%	0,01%	0,09%	0,07%
CONV-2050C (FP)	Cu-eq	14,01%	0,00%	0,29%	0,00%	8,72%	0,22%	5,23%	1,23%
	Gesamt [g/pkm]	B1		B2		C1	C2	C3	C4
	151,76	13,35%		86,06%		0,01%	0,02%	0,07%	-0,14%
	0,308	28,80%		70,58%		0,01%	0,00%	0,10%	-0,21%
	0,048	82,07%		0,00%		0,30%	0,01%	2,18%	-14,26%

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Anhang 39 Signifikante Parameter der Beechcraft 1900D-CONV bezüglich des prozessbezogenen Beitrags an den Umweltwirkungen.

6. Literaturverzeichnis

- Agora/Stiftung Klimaneutralität. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann: Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*. www.agora-energiewende.de
- Allekotte, M., Bergk, F., Biemann, K., Deręgowski, C., Knörr, W., Althaus, H.-J., Sutter, D. & Bergmann, T. (2020). *Ökologische Bewertung von Verkehrsarten: Abschlussbericht (156/2020)*.
- Arzdorf, A. (2014). *Entwicklung einer Methode zur ökologischen Lebenszyklusbewertung von Flugzeugen und Technologien im Vorentwurf* [Masterarbeit]. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Asmatulu, E., Overcash, M. & Twomey, J. (2013b). Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011. *Journal of Industrial Engineering*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/960581>
- Asmatulu, E., Twomey, J. & Overcash, M. (2013a). Evaluation of recycling efforts of aircraft companies in Wichita. *Resources, Conservation and Recycling*, 80, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.002>
- ATAG. (2010). *Beginner's Guide to Aviation Efficiency*. https://www.etw.de/uploads/pdfs/ATAG_Beginners_Guide_to_Aviation_Efficiency_web.pdf
- Aviation Fabricators. (o.D.). *Beechcraft 1900 Seating & Table Options*. <https://avfab.com/products/view/beechnraft-1900-beechnraft-1900-airline-style-high-density-commuter-seat-lh/>
- Barke, A., Thies, C., Melo, S. P., Cerdas, F., Herrmann, C. & Spengler, T. S. (2022). Comparison of conventional and electric passenger aircraft for short-haul flights – A life cycle sustainability assessment. *Procedia CIRP*, 105, 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.077>
- Bauer, C., Desai, H., Heck, T., Sacchi, R., Schneider, S., Terlouw, T., Treyer, K. & Zhang, X. (2022). *Stromspeicherung und Wasserstoff – Technologien, Kosten und Auswirkungen auf das Klima: Einschliesslich Aufdatierung der Kosten und Potenziale von Photovoltaik und Windenergie; Bericht auf Englisch mit Zusammenfassung auf Deutsch und Französisch*. Bundesamt für Energie BFE.
- BMU. (2020). *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. Ausgabe 2020. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). www.bmu.de/publikationen
- Cerdas, F., Egede, P. & Herrmann, C. (2017). LCA of Electromobility. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen (Hrsg.), *Life cycle assessment: Theory and practice* (S. 669–693). SPRINGER. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_27
- Chester, M. V. & Horvath, A. (2009). Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2), 24008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>
- Ciroth, A., Muller, S., Weidema, B. & Lesage, P. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1338–1348. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5>
- Clarke, R., Kane, D. & Stewart, C. (1988). *Current Fire Safety Design Aspects of Commuter Aircraft*. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA194554>

- Cox, B., Jemiolo, W. & Mutel, C. (2018). Life cycle assessment of air transportation and the Swiss commercial air transport fleet. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.017>
- Deng, Y., Li, J., Li, T., Gao, X. & Yuan, C. (2017). Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 343, 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.036>
- DIN 9020-1 (1983). *DIN 9020-1:1983: Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft*. Berlin. Beuth Verlag. <https://www.beuth.de/de/norm/din-9020-1/1063112>
- DIN 9020-5. *DIN 9020-5:1992-02: Luft- und Raumfahrt; Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft; Maß- und Bauangaben*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 16603. *Space engineering – Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment: German version EN 16603-11:2019 (DIN EN 16603)*. Berlin. Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14040 (11.2009). *DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006*. Berlin. Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14044 (10.2006). *DIN EN ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006*. Berlin. Beuth Verlag.
- EMEP/EEA. (2019). *Aviation emissions calculator* [Excel]. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- EU COM. (2011). *Flightpath 2050. Europe's vision for aviation; maintaining global leadership and serving society's needs ; report of the High-Level Group on Aviation Research*.
- EU COM. (2020). *Study on the EU's list of critical raw materials (2020): Final report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2873/11619>
- European Aluminium. (2018). *Environmental Profile Report: Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe*. <https://european-aluminium.eu/blog/environmental-profile-reports/>
- FfE. (2020). *LCIA Environmental Indicators for the Construction and End-of-Life of Electrolysers: (Germany)* [Project BEniVer]. <https://opendata.ffe.de/dataset/lcia-environmental-indicators-for-the-construction-and-end-of-life-of-electrolysers-germany/>
- Fishman, T., Heeren, N., Pauliuk, S., Berrill, P., Tu, Q., Wolfram, P. & Hertwich, E. G. (2021). A comprehensive set of global scenarios of housing, mobility, and material efficiency for material cycles and energy systems modeling. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 305–320. <https://doi.org/10.1111/jiec.13122>
- Flight Safety International Inc. (2000). *BEECH 1900 Airliner Pilot Training Manual Volume 2*.
- Fraunhofer ISE. (2022). *Energy-Charts: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2022*. https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2022&interval=year
- Gnadt, A. R., Speth, R. L., Sabnis, J. S. & Barrett, S. R. (2019). Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 105, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.002>

- Google Maps. (2022c). *Harry S Truman Regional Arprt-2M1*.
<https://www.google.de/maps/place/Harry+S+Truman+Regional+Arprt-2M1/@39.5369242,-97.8243879,673452m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x87c1134096d8eecb:0x9233ed8c11ca8b1!8m2!3d39.0180435!4d-94.0911712>
- Google Maps. (2022a). *Route Lethbridge, Alberta, Kanada to Wichita, Kansas, USA*.
<https://www.google.de/maps/dir/Lethbridge,+Alberta,+Kanada/Wichita,+Kansas,+USA/@43.6114948,-109.5688126,6z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x536e864af15acd23:0x1c5c78e36295beae!2m2!1d-112.8451067!2d49.6956181!1m5!1m1!1s0x87badb6ad27f182d:0x9396d5bf74d33d3e!2m2!1d-97.330053!2d37.6871761>
- Google Maps. (2022b). *Route Piqua, Ohio 45356, USA to Wichita, Kansas, USA*.
<https://www.google.de/maps/dir/Piqua,+Ohio+45356,+USA/Wichita,+Kansas,+USA/@38.8962938,-93.0027057,7z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x883f753db3be074f:0xca6dbd6e1b26dcc4!2m2!1d-84.2424449!2d40.1447732!1m5!1m1!1s0x87badb6ad27f182d:0x9396d5bf74d33d3e!2m2!1d-97.330053!2d37.6871761>
- Harlamert, W. B. & Edinger, R. (1979). Development of an Aircraft Composite Propeller. *SAE Transactions, Vol. 88, Section 3, 2028–2033*. <https://www.jstor.org/stable/44699038>
- Hartzell Propeller Inc. (2010). *Propeller Owner's Manual and Logbook: Lightweight Turbine Propellers with Composite Blades*. <https://hartzellprop.com/services/product-support-library/manuals/hartzell-owners-manuals/>
- Hawker Beechcraft. (2008b). *Domestic Inbound within North America – Routing Guide*.
- Hawker Beechcraft. (2008a). *Other International Inbound Shipping to U.S. – Routing Guide*.
- Helms, Hinrich, Jöhrens, Julius, Hanusch, J., Höpfner, U., Lambrecht, U. & Pehnt, M. (2011). *UMBRéLA - Umweltbilanzen Elektromobilität: Wissenschaftlicher Grundlagenbericht*.
- Howe, S. (2011). *Environmental Impact Assessment and Optimisation of Commercial Aviation* [Master's thesis]. Cranfield University, Cranfield, UK.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 22*(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis : Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Jöhrens, J., Rücker, J., Kräck, J., Allekotte, M., Helms, H., Biemann, K., Schillinger, M., Waßmuth, V., Paufler-Mann, D., Frischmuth, F. & Gerhard, N. (2020). *Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030*.

- Koehler, W., Plege, B., Sahm, K. F. & Padmapriya, N. (2001). Metal Forming: Specialized Procedures for the Aircraft Industry. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 5427–5433. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526009463>
- Kuchling, H. (2011). *Taschenbuch der Physik: Mit Tabellen* (20., aktualisierte Aufl.). Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl.
- Liu, Z. (2013). *Life cycle assessment of composites and aluminium use in aircraft systems* [Master's thesis]. Cranfield University, Cranfield, UK.
- Mouritz, A. P. (2012). 7 - Processing and machining of aerospace metals. In A. P. Mouritz (Hrsg.), *Introduction to Aerospace Materials* (S. 154–172). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095152.154>
- NASA. (2012). *Technology Readiness Level*.
- Naumann, K., Schröder J., Oehmichen, K., Etzold H-, Müller-Langer, F., Remmele E., Thuneke, K., Raksha, T. & Schmidt, P. (2019). *Monitoring Biokraftstoffsektor* (4. überarbeitete und erweiterte Auflage). *DBFZ-Report*. <https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-11>
- Ngoret, J. & Kommula, V. (2019). Microstructural Investigation into Premature Failure of Compressor Turbine (CT) Blade Material of High Pressure (HP) PT6A-114A Engine. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 16(1). <https://doi.org/10.22068/ijmse.16.1.49>
- Nicolay, S., Karpuk, S., Liu, Y. & Elham, A. (2021). Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32676–32694. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.127>
- Niedzinski, M. (o.D.). *Airbus and Current Aircrafts Metal Technologies*. Airbus Germany. <https://docplayer.org/36412496-Airbus-and-current-aircrafts-metal-technologies.html>
- Nunna, S., Blanchard, P., Buckmaster, D., Davis, S. & Naebe, M. (2019). Development of a cost model for the production of carbon fibres. *Heliyon*, 5(10), e02698. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02698>
- Oliveira Fernandes Lopes, J. V. de. (2010). *Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft* [Master thesis]. Universidade Técnica de Lisboa, Lisbon, Portugal.
- Oxis Energy. (2017). *Ultra light lithium sulfur pouch cell: Ultra light cell specification*.
- Pipistrel. (2017). *Pipistrel ALPHA ELECTRO Information Pack: Aircraft information*.
- Ploetner, K. O., Miltner, L., Jochem, P., Kuhn, H. & Hornung, M [M.]. (2016). *Environmental Life Cycle Assessment of Universally-Electric Powered Transport Aircraft*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016.
- Pratt & Whitney Canada. (2007). *PT6A-60 Series Training Manual*.
- Ratheon Aircraft. (2000). *Section III Systems Description Beech 1900D Airliner*. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSyKrL6_z8AhWY87sIHRwtDiEQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.smartcockpit.com%2Fdocs%2FRaytheon_Beechcraft_1_00D-SYSTEMS_DESCRIPTION.pdf&usg=AOvVaw1WwaG-aypqITagU57FKD2T
- Repenning, J., Harthan, R., Blanck, R., Böttcher, H., Braungardt, S., Bürger, V., Emele, L., Görz, W., Hennenberg, K., Jörß, W., Ludig, S., Matthes, F., Mendelewitsch, R., Moosmann, L., Nissen, C.,

- Rausch, L., Scheffler, M., Schumacher, K., Wiegmann, K., . . . Adam, S. (2021). *Projektionsbericht 2021 für Deutschland*.
- Ribeiro, J., Afonso, F., Ribeiro, I., Ferreira, B., Policarpo, H., Peças, P. & Lau, F. (2020). Environmental assessment of hybrid-electric propulsion in conceptual aircraft design. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119477. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119477>
- Samaniego, B., Carla, E., O'Neill, L. & Nestoridi, M. (2017). High specific energy Lithium Sulfur cell for space application. *E3S Web of Conferences*, 16, 8006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171608006>
- Schäfer, K. (2017). *Conceptual aircraft design for sustainability* [Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Shaker Verlag]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Schneider, M., Dickhoff, J., Kusterer, K. & Visser, W. (2020). Life Cycle Analysis for a Powertrain in a Concept for Electric Power Generation in a Hybrid Electric Aircraft. In *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition - 2020: Presented at the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, September 21-25, 2020, online*. the American Society of Mechanical Engineers; Curran Associates Inc. <https://doi.org/10.1115/GT2020-15518>
- Scholz, A. E., Trifonov, D. & Hornung, M [Mirko] (2022). Environmental life cycle assessment and operating cost analysis of a conceptual battery hybrid-electric transport aircraft. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(1), 215–235. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00556-0>
- Schrijvers, D. L., Loubet, P. & Sonnemann, G. (2016). Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 976–993. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1063-3>
- Strathoff, P., Zumegen, C., Stumpf, E., Klumpp, C., Jeschke, P., Warner, K. L., Gelleschus, R., Bocklisch, T., Portner, B., Moser, L. & Hornung, M [Mirko] (2022). On the Design and Sustainability of Commuter Aircraft with Electrified Propulsion Systems. In *AIAA AVIATION 2022 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3738>
- Textron Aviation. (2019). *Illustrated Parts Catalog: Model 1900D Airliner* [Technical Publications]. <https://ww2.txtav.com/TechnicalPublications/Downloads/Book?PN=129-590000-11>
- UNEP. (2011a). *Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: A Basis for Greener Processes and Products*. United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2011b). *Recycling Rates of Metals – A Status Report: A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel*. <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals>
- United Nations (2015). Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Verstraete. (2009). *The Potential of Liquid Hydrogen for Long range aircraft propulsion* [Dissertation]. Cranfield University.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. (2016). Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wright, T. P. (1936). Factors Affecting the Cost of Airplanes. *Journal of the aeronautical sciences*(Volume 3).