

GNOSIS

Holistische Bewertung des elektrischen Fliegens - LCA-Bewertung und betriebliche Aspekte des elektrischen Fliegens

Projekt-Schlussbericht der Technischen Universität Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



IWAR



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger	Technische Universität Darmstadt FG Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt	Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt
Förderkennzeichen	20E1916G	
Vorhaben	LCA-Bewertung und betriebliche Aspekte des elektrischen Fliegens	
Projektlaufzeit	01.05.2020 bis 31.07.2023	
Berichtszeitraum	01.05.2020 bis 31.07.2023	
Verfasser/Projektleiter	Susanne Hanesch, M.Sc. Tel.: +49 6151 16-25743 E-Mail: s.hanesch@iwar.tu-darmstadt.de Sven Heuner, M.Sc. Tel.: +49 6151 16-21065 E-Mail: heuner@fsr.tu-darmstadt.de	Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek Tel.: +49 6151 16-20720 E-Mail: l.schebek@iwar.tu-darmstadt.de Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf Tel.: +49 6151 16-21042 E-Mail: klingauf@fsr.tu-darmstadt.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abkürzungen.....	III
Abbildungen.....	IV
Tabellen	VI
I. Kurzdarstellung der Aufgabenstellung	1
I.1. Aufgabenstellung	1
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
II. Eingehende Darstellung des Vorhabens.....	9
II.1. Detaillierte Darstellung der Ergebnisse	9
II.1.1. Ergebnisse FG SuR.....	9
II.1.2. Ergebnisse FSR	33
II.1.3. Soll-Ist-Vergleich der gesetzten Ziele	45
II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	46
II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	46
II.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	47
II.4.1. Wissenschaftliche Verwertung	47
II.4.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	47
II.4.3. Anschlussfähigkeit	48
II.5. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt Dritter	48
II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	48
Anhänge.....	VII
Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur.....	VIII

Abkürzungen

FG SuR	Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft
FSR	Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik
TUDa	Technische Universität Darmstadt
LuFo VI-1	1. Aufrufs des sechsten Luftfahrtforschungsprogramms
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
AP	Arbeitspaket
BHL	Bauhaus Luftfahrt
ILR	Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme
LCA	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)
CONV	Konventionelles Flugzeug
PTE	Neuartiges Flugzeug der Variante „Partiell-Turboelektrisch“
FCB	Neuartiges Flugzeug der Variante „Brennstoffzellenbetrieben“
TRL	Technologiereifegrad (Technology Readiness Level)
REF	Referenzzustand
FUT	Zukunftszustand
KMF	2025 Szenario “Keep moving forward”
WOC	2050 Szenario “Wind of change”
FP	2050 Szenario “Fast progress”
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
THG	Treibhausgas
CO ₂ -eq	Kohlendioxid-Äquivalent
NO _x -eq	Stickoxide-Äquivalent
Cu-eq	Kupfer-Äquivalent
BOM	Materialbilanz (Bill-of-Material)
WtT/TtW	Well-to-Tank/Tank-to-Wake
NADP	Noise Abatement Departure Procedure
ETS	Electric-taxiing System
APM	Flugleistungsmodell (Aircraft Performance Model)
SHE	Seriell-hybridelektrisch

Abbildungen

Abbildung 1 Projektstrukturplan des Verbundprojektes GNOSIS.....	3
Abbildung 2 Abschlussbericht zur Ökobilanz eines regionalen Kleinflugzeugs und deren elektrifizierten Varianten.	9
Abbildung 3 Emissionen der Treibhausgase und Luftschadstoffe sowie Kosten zur Bereitstellung und Verwendung von den Energieträgern Strom, Kerosin und Wasserstoff für das Bezugsjahr 2020 sowie die Marktetablierungsjahre 2025 und 2050.	10
Abbildung 4 Energieerzeugungstechnologieverteilung im Status Quo 2023 (Fraunhofer ISE 2022), im Szenario 2025A (Jöhrens et al. 2020) und in den Szenarien 2050B (Jöhrens et al. 2020) und 2050C (Agora/Stiftung Klimaneutralität 2021).	12
Abbildung 5 Verwertungsverteilung im Status Quo 2023 (Asmatulu et al. 2013a; EU COM 2020), im Szenario 2025A (Asmatulu et al. 2013b) und in den Szenarien 2050B (UNEP 2011; Oliveira Fernandes Lopes 2010) und 2050C (Fishman et al. 2021).	12
Abbildung 6 Komponentenaustauschhäufigkeit im Status Quo 2023, im Szenario 2025A und in den Szenarien 2050B und 2050C; generiert auf Basis diverser Literatur, Experteneinschätzungen und einer abschließenden Expertenumfrage.	12
Abbildung 7 Grafische Darstellung des Produktsystems eines Kleinflugzeugs und der Funktion des Personentransports.....	14
Abbildung 8 Analyse der Rohstoffkritikalität im Flugvehikel mittels Kriterien des Versorgungsrisikos und Identifikation von kritischen Rohstoffen im konventionellen (mittig) und elektrifizierten (unten) Antriebsstrang (VDI Richtlinie 4800 Blatt 2).....	15
Abbildung 9 Materialbilanz und Umweltwirkungen für die 9-/19-/50-Sitzer Flugzeuge und deren Varianten im Status Quo.	20
Abbildung 10 Umweltwirkungen für die 19-Sitzer Flugzeuge im Status Quo und im Marktetablierungsjahr-Szenario.....	22
Abbildung 11 Umweltwirkungen für die 9-Sitzer Flugzeuge im Status Quo und im Marktetablierungsjahr-Szenario.....	23
Abbildung 12 Umweltwirkungen für die 50-Sitzer Flugzeuge im Status Quo und im Marktetablierungsjahr-Szenario.....	24
Abbildung 13 ICAO Noise Abatement Departure Procedure (NADP) 1.	33
Abbildung 14 Standard Anflug mit 3° im Vergleich zum Steilanflug mit Windmilling (Thomas und Hansman 2020).	35
Abbildung 15 Ausgewählte Systemarchitektur für das ETS.	37
Abbildung 16 Änderung des Treibstoffverbrauchs einer Beechcraft 1900D mit ETS in Abhängigkeit der Rollzeit und der Flugstrecke.	38

Abbildung 17 Ablaufdiagramm des APMs.	39
Abbildung 18 Antriebsarchitektur eines konventionellen Turbopropflugzeugs.	40
Abbildung 19 Partiell-turboelektrische Antriebsarchitektur.	40
Abbildung 20 Seriell hybride Antriebsarchitektur.	40
Abbildung 21 Modellstruktur zur Untersuchung der Lärmemissionen.	41
Abbildung 22 Einfluss verschiedener Fluggeschwindigkeiten und Höhen auf den Treibstoffverbrauch und die Flugzeit.	42
Abbildung 23 Vergleich der Lärmbelastung (SEL) im Referenzanflug (A-0.1) mit dem Steilanflug mit Windmilling (A-3.5).	44

Tabellen

Tabelle 1 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Elektrischer Antrieb Herstellung.....	17
Tabelle 2 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Propeller Herstellung.....	17
Tabelle 3 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Tragstruktur Herstellung.....	18
Tabelle 4 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Flugzeugsysteme Herstellung.....	18
Tabelle 5 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Kabinenausrüstung Herstellung.....	19
Tabelle 6 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Transportprozesse.	19
Tabelle 7 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Energieprozesse.	19
Tabelle 8 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: End-of-Life-Prozesse.	19
Tabelle 9 Vergleich zu Umweltwirkungen der 19-Sitzer PTE und FCB gegenüber der CONV im gleichen Marktetablierungsjahr und Gegenüberstellung der im Markt befindlichen realen Beechcraft 1900D.	25
Tabelle 10 Vergleich zu Umweltwirkungen der 9-Sitzer PTE und FCB gegenüber der CONV im gleichen Marktetablierungsjahr.	26
Tabelle 11 Vergleich zu Umweltwirkungen der 50-Sitzer PTE und FCB gegenüber der CONV im gleichen Marktetablierungsjahr.	26
Tabelle 12 Parameter des Referenzflugzeugs Beechcraft 1900D für das NADP.....	34
Tabelle 13 Zu erwartende Rollzeiten an deutschen Flughäfen für ein Regionalflugzeug.....	37
Tabelle 14 Optimierte Trajektorien der verschiedenen Flugzeugkonfigurationen.	42
Tabelle 15 Optimierte Flugverfahren der seriell-hybriden Konfiguration für eine 257 NM Mission.....	45
Tabelle 16 Optimierte Flugverfahren der seriell-hybriden Konfiguration für eine 511 NM Mission.....	45

I. Kurzdarstellung der Aufgabenstellung

Im Folgenden wird ein Überblick zur Aufgabenstellung und Zielsetzung des Vorhabens gegeben. Weiterhin werden die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, beschrieben sowie ein Überblick zum wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde, gegeben. Ergänzend zu Planung und Ablauf des Vorhabens wird die Zusammenarbeit im Projekt thematisiert.

I.1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens GNOSIS ist es, elektrobasierte Antriebskonfigurationen für ein Passagierflugzeug zu entwickeln und diese im Hinblick auf technische, ökonomische, ökologische und rechtliche Aspekte zu untersuchen. Der Aufgabenbereich des Verbundpartners TU Darmstadt beinhaltet die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen der innovativen Flugkonzepte sowie die Betrachtung der flugbetrieblichen Aspekte. Dabei sollen die getroffenen Maßnahmen im Hinblick auf die Zielerfüllung des Flightpath 2050 (EU COM 2011) und dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung (BMU 2016) bezüglich deren Emissionen und dem Rohstoffeinsatz überprüft und bewertet werden.

Zur Erfüllung der übergeordneten Zielstellung stehen für das Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft (FG SuR) die folgenden Ziele im Vordergrund:

- Die Verknüpfung der im Vorhaben entwickelten Simulationsmodelle mit einer sequenziellen ökobilanziellen Bewertungsmethodik
- Begleitend zur technologischen Variantenentwicklung erfolgt die Umsetzung einer Bewertung von Umweltwirkungen der entwickelten Technologien
- Die Untersuchung des Bedarfs von Rohstoffen, insbesondere strategisch relevanter, sogenannter kritischer Rohstoffe, in den im Vorhaben entwickelten Technologien sowie deren Komponenten
- Die Evaluation des Rohstoffverbrauchs durch Implementierung der entwickelten Technologien und deren elektrobasierter Antriebskonfigurationen nach erfolgtem Markthochlauf

Das Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik (FSR) strebt die folgenden Ziele an:

- Die Analyse der Flugleistungen und operationeller Aspekte aufgrund des elektrischen Antriebs
- Die Generierung optimierter Flugtrajektorien anhand Leistungsindikatoren wie Energieeffizienz und Fluglärm
- Die Untersuchung (luftseitiger) Bodenoperationen, primär die Rollphasen (Taxi-out, Taxi-in)
- Die Betrachtung relevanten Subsysteme des Flugzeugs und Trade-off Analysen hinsichtlich Gewicht, Energiebedarf, Lärm etc. (beispielsweise Rollen mit elektrisch angetriebenem Fahrwerk versus Rollen mit den Flugantrieben)

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit sowie operationeller Aspekte des elektrischen Fliegens ist bislang für den Flugverkehr kaum erschlossen. Wie bereits in der Bekanntmachung des sechsten nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms beschrieben, hängt die Zukunftsfähigkeit der Luftfahrt

maßgeblich von ihrer Umweltverträglichkeit und Ressourcenschonung ab und stellt damit einen wichtigen Eckpfeiler in der Bearbeitung des Projektes GNOSIS dar. Das erste förderpolitische Ziel „Umweltfreundliche Luftfahrt“ soll in diesem Kontext betrachtet und bearbeitet werden.

Vom FG SuR wird auf die Methodik des Life Cycle Assessments zurückgegriffen, um die im Verbundprojekt entstehenden Modelle nicht nur hinsichtlich des Flugbetriebs sondern auch in Bezug auf Umweltwirkungen in der Produktionsphase zu betrachten. Somit findet das erste förderpolitische Ziel zu jedem Zeitpunkt im Projekt Beachtung und ebenfalls werden die Umweltschutzziele des „Flightpath 2050“ in einer lebenszyklusorientierten Optimierung der Systeme ganzheitlich mit einbezogen. Im Zuge der Gesamtsystemfähigkeit ist es weiterhin unerlässlich, sich mit der Kritikalität wichtiger Materialien für die (teil-)elektrifizierte Luftfahrt auseinanderzusetzen. Die durch das Vorhaben ermittelte zukünftige Knappheit und Einschätzungen über Versorgungsrisiken relevanter Rohstoffe fließen in die Modelle mit ein und machen sie robuster gegenüber zukünftigen Entwicklungen. Aktuell liegt der Verkehrssektor im Bereich des Luftverkehrs sehr weit von der Zielsetzung der Bundesregierung und der EU Kommission entfernt, daher ist eine künftige Forschung an neuen Antrieben sowie ihrer ökologischen Bewertung und dem benötigten Ressourceneinsatz unabdingbar.

Die vom FSR entwickelten Methoden machen die Bewertung der operationellen Verfahren und der eingesetzten Technologien hinsichtlich Ihrer Einflüsse auf die Ökoeffizienz möglich. Durch die Analyse der operationellen Rahmenbedingungen werden die Potentiale für angepasste und optimierte Flugverfahren ausgelotet. Mit Hilfe einer ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Flugtrajektorie unter Einbeziehung von luftseitigen Bodenprozessen können die Einsparpotentiale beim Treibstoffverbrauch und bei den Lärmemissionen quantifiziert werden. Dadurch kann in Zukunft eine Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks des Gesamtsystems Luftverkehr, sowohl in Bezug auf eine optimierte Auslegung und Konstruktion als auch auf einen optimierten Betrieb des Fluggeräts, erreicht werden. Das FSR leistet somit einen direkten Beitrag zur Erreichung des ersten förderpolitischen Ziels.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben **GNOSIS - Holistische Bewertung des elektrischen Fliegens** ist ein Verbundprojekt des Fachgebiets Stoffstrom und Ressourcenwirtschaft und des Instituts für Flugsysteme und Regelungstechnik der Technischen Universität Darmstadt (TUDa) im Verbund mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, dem Bauhaus Luftfahrt e.V., der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig, der Technischen Universität Hamburg, der Universität Stuttgart und der Technischen Universität Dresden. Das Vorhaben der TUDa wurde zu 100% vom DLR Projektträger Luftfahrttechnik im Rahmen des 1. Aufrufs des sechsten Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1) gefördert. Die Mittel entstammen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Das Vorhaben wurde für den Zeitraum vom 01.05.2020 bis 30.04.2023 beantragt und genehmigt. Eine kostenneutrale Verlängerung wurde im Zeitraum 01.05.2023 bis 31.07.2023 umgesetzt.

In Abbildung 1 ist die Projektstruktur des Verbundvorhabens dargestellt, die sich in eine lange Projektphase A und eine kurze Projektphase B unterteilt. In Phase A lag der Fokus auf der detaillierten Ausarbeitung von Konzeption und Entwurf elektrifizierter Varianten eines 19-Sitzer-Flugzeugs. Phase B

beschäftigt sich zusätzlich mit der vereinfachten konzeptionellen Betrachtung elektrifizierter Varianten von zwei weiteren Flugzeugen. Die Arbeitspakete (AP) mit Beteiligung der TUDa sind rötlich markiert.

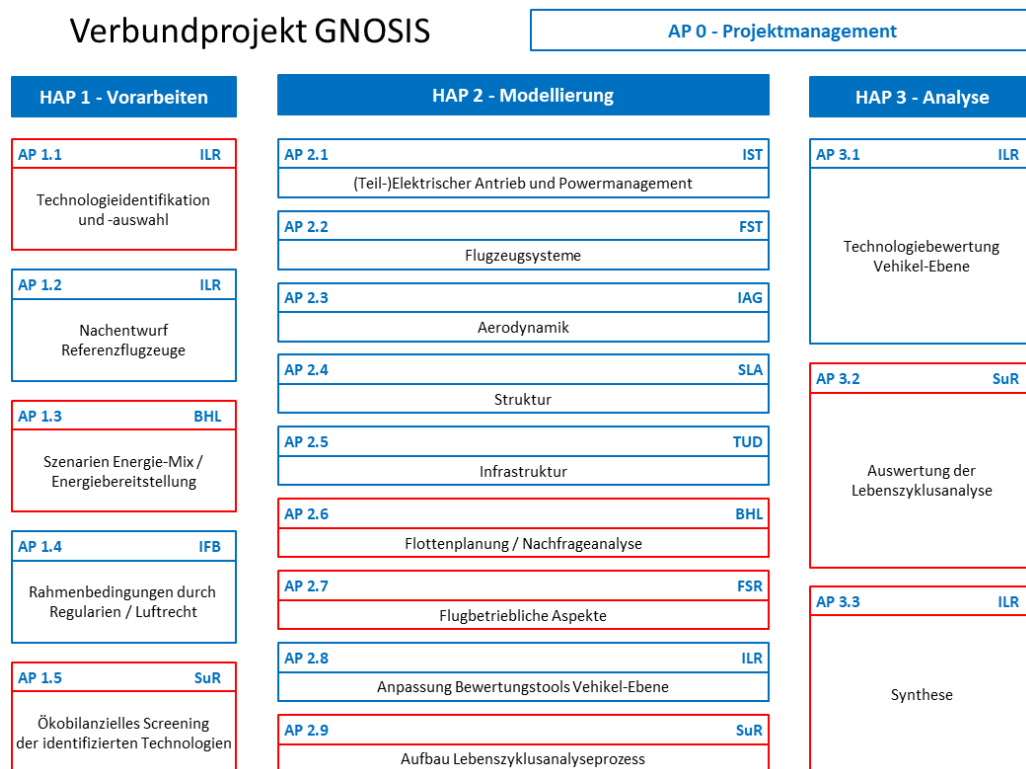


Abbildung 1 Projektstrukturplan des Verbundprojektes GNOSIS.

Die Arbeiten des FG SuR finden in sechs Arbeitspaketen statt; für drei dieser APs übernimmt das FG SuR selbst die Koordination. Das FSR ist in drei Arbeitspaketen vertreten und Hauptverantwortlicher für das AP 2.7. AP 1.1 beinhaltet Rechercharbeiten auf Technologie-, Rohstoff- und Umweltwirkungsebene. In AP 1.3 werden Szenarien für die künftige Energiebereitstellung entwickelt. In AP 1.5 werden die Randparameter der LCA gesteckt und ein parametrisiertes Modell mit ersten Daten gebildet. In AP 2.9 liegt der Fokus auf der Datenerhebung für das LCA-Modell. In AP 3.2 wird die LCA anhand der jeweiligen Technologieauswahl ausgewertet. Es werden Sensitivitätsuntersuchungen der Teilbereiche Energieeffizienz, globale und lokale Emissionen erstellt und zukünftige Verfügbarkeitsrisiken aus dem Materialeinsatz der drei Optionen abgeleitet. Abschließend findet in AP 3.3 die Auswertung der Gesamtergebnisse zu Ökologie und Rohstoffen der Projekt-Phasen A und B statt.

Das FSR unterstützt bei den Rechercharbeiten in AP 1.1 und legt den Fokus auf die Technologieebene. Dabei werden Technologien für mögliche voll-elektrische Flugzeugkonfigurationen vorgeschlagen, die eine positive Einflussnahme auf die Energieeffizienz im Flugbetrieb, eine optimale Flugtrajektorie und eine potentielle Reduktion von Lärmemissionen ermöglichen. Die Expertise des FSR wird in AP 2.7 gebündelt und die Forschungsfragen untersucht. Darunter fallen die Leistungsbewertung, die Analyse von Lärmemissionen, die Optimierung von Flugtrajektorien und die Untersuchung der technologischen und operationellen Einflüsse auf den Flugbetrieb und die sich daraus ergebenden Potentiale zur Ökoeffizienzsteigerung.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ökologische Betrachtung des Flugsektors

Mobilitätskonzepte im Hinblick auf ihre ökologischen Auswirkungen zu bewerten ist ein neuartiges Vorgehen, das seinen Ursprung in der Umweltbewertung für den Sektor Energie hat. Herkömmliche Technologien der Energieerzeugung wurden dabei mit regenerativen Technologien wie Wind- oder PV-Anlagen verglichen in Bezug auf ihre Treibhausgas-Emissionen (Agora 2017). Die Vorgehensweise der ökologischen Betrachtung von herkömmlichem und neuartigem System ist im vergangenen Jahrzehnt auf den Sektor Verkehr angewendet worden. Zunächst lag der Fokus auf dem personenbezogenen Individualverkehr (Umweltbundesamt 2012), für den herkömmliche Antriebstechnologien (verbrennungsmotorbasiert), elektrische Antriebstechnologien (batterieelektrisch und brennstoffzellenbasiert) sowie hybride Antriebsmischformen untersucht und verglichen wurden (Pötscher 2014). Der Flugsektor steht am Anfang der ökologischen Bewertung, da aktuell nur Emissionsberechnungen für herkömmliche Technologien existieren (Umweltbundesamt 2019). Für die Nutzenphase – der Zeitraum, zu dem das Flugzeug in Betrieb genommen wird bis zum Zeitpunkt, zu dem es die Funktion des Fahrgasttransports nicht mehr erfüllen kann und aus dem Betrieb genommen wird – existieren erste Forschungsergebnisse zur Umweltwirkung eines Flugzeugs. Diese basiert auf der eingesetzten Kerosinmenge pro Fahrzyklus und den daraus emittierten THG (Klimaschutzportal 2019). Den hohen THG-Emissionen während der Nutzenphase müssen neuartige Flugkonzepte entgegengestellt werden, die geringere Umweltauswirkungen aufweisen. Diese Flugkonzepte müssen erforscht und entwickelt werden, um sie ökologisch bewerten zu können, wie es in dem Vorhaben GNOSIS vorgesehen ist. Im Pilotbetrieb befindliche neuartige Flugkonzepte wie der E-Fan X (hybrid, batterieelektrisch) (Airbus 2019; Rolls Royce 2019b) oder der Piper M (hybrid-wasserstoffbasiert) des kalifornischen StartUp-Unternehmens ZeroAvia (Electric Flight 2019) sowie in Forschung befindliche Flugkonzepte wie die britischen Projekte „Fresson“ (Aerosociety 2019) und „ACCEL“ (Rolls Royce 2019a) zeigen, dass ein dringlicher Forschungsbedarf global erkannt wurde und erste Lösungsansätze in Bezug auf die Problematik des herkömmlichen Fliegens in der Entwicklung sind. Trotz laufender Forschungsaktivitäten verschiedener Unternehmen und Forschungseinrichtungen existieren aktuell keine Informationen zur ökologischen Auswirkung der betrachteten Technologien. Auch mit dem künftigen Erscheinen deren publizierter Forschungsergebnisse sinkt die Dringlichkeit des Forschungsbestrebens von GNOSIS nicht, da nur in der Vielfältigkeit der entwickelten Konzepte am Ende die beste Alternative hinsichtlich Kosten, Ökologie und Sicherheit für den künftigen Flugverkehr gewählt werden kann.

Ökobilanzen elektrischer Flugkonzepte

In der Vergangenheit hat sich die Debatte um die ökologischen Auswirkungen von herkömmlichen und neuartigen Technologien häufig nur auf die THG-Emissionen während der Nutzenphase konzentriert, seit dem vergangenen Jahrzehnt finden im Verkehrssektor vermehrt Methoden Beachtung, die sich mit der Umweltwirkung über den gesamten Lebensweg der Technologien beschäftigen. Eine Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse (LCA) genannt, betrachtet ein System, das einen bestimmten Nutzen erfüllt, sowie alle relevanten Vorketten aus der Herstellung des Systems. Im Verkehrssektor wird üblicherweise der Nutzen in dem Transport von Gütern oder Personen pro Kilometer angegeben (Zukunft Mobilität 2011).

Dafür wird einerseits eine Transporttechnologie benötigt, andererseits die notwendige Infrastruktur, damit die Güter oder Personen zu Luft, Wasser oder am Boden transportiert werden können. Im Gegensatz zum Schienen- und Straßenverkehr benötigt der Flugverkehr weniger Infrastruktur, da lediglich an den Anfangs- und Endpunkten des Transports eine Versorgungsinfrastruktur errichtet wird. Der Gesamtanteil an den THG-Emissionen aus Bau und Betrieb der Infrastruktur liegt laut Studien aktuell bei etwa 3,2%. Für den Fahrzeugbau werden ca. 5-11% benötigt, der Hauptanteil von mehr als 75% der THG-Emissionen entfällt auf den Kerosinverbrauch während der Nutzung (Hill et al. 2012). In der Anwendung der Methodik der Ökobilanzierung auf den Flugverkehr existieren lediglich Veröffentlichungen, welche die Lebenszyklusanalyse von herkömmlichen Flugzeugen und ihren Technologiekomponenten durchführen (Verstraete 2012; Vinodh et al. 2017). Eine erste Annäherung an die Umweltwirkung künftiger Flugkonzepte zeigt Johanning anhand je eines Beispiels für brennstoffzellenbasiertes und batteriebasiertes Fliegen sowie alternativen Antriebstechnologien (Johanning 2015). Allerdings entspricht hierbei der Detailgrad der abgebildeten Ökobilanz nicht der tiefergehenden Untersuchung des FG SuR im Rahmen des GNOSIS Vorhabens. Ebenfalls sollen im Forschungsprojekt GNOSIS verschiedene Flugkonzepte anhand des aktuellen Wissenstandes entwickelt werden, sodass sich die Technologieoptionen, die ökobilanziell untersucht werden sollen, auf dem neuesten Stand der Technik befinden. Des Weiteren existiert ein Webseitenartikel, der die LCA von elektrischen Flugzeugen behandelt. Dieser ist von einem der Verbundpartner, dem BHL, veröffentlicht worden (Bauhaus Luftfahrt 2019). Von diesem Partner wurde ebenfalls eine erste Studie verfasst mit dem Titel „Environmental life cycle assessment of universally-electric powered transport aircraft“ (Ploetner et al. 2016). Aufgrund der hervorragenden thematischen Überschneidung werden in den Arbeitspaketen 1.3 und 2.9 Kooperationsforschungen mit dem Verbundpartner BHL angestrebt.

Rohstoffuntersuchung der Komponenten des elektrischen Fliegens

Neben der Ermittlung der Umweltwirkung über den gesamten Lebensweg muss sich mit den einzelnen Komponenten befasst werden, die in den neuartigen Technologien eingesetzt werden. Es existieren Studien, die sich mit den Bausteinen eines Flugvehikels auseinandersetzen und mögliche künftige Komponentenveränderungen aufzeigen (Kuhn et al. 2012; Apffelstaedt 2009). Aufgrund des Fehlens von neuartigen Antriebstechnologien für das elektrische Fliegen werden in der Forschung jedoch fast ausschließlich herkömmliche Technologien in ihrer Systemumwelt betrachtet. Aktuell werden für die Herstellung des Flugvehikels hauptsächlich Stahl, Eisen, Blei, Zink, Nickel und der Verbundwerkstoff CFK eingesetzt (Hill et al. 2012). Welche Veränderungen auf Materialebene für das elektrische Fliegen auftreten, muss tiefergehend untersucht werden. Die DERA-Studie befasst sich mit Materialbedarfen für Zukunftstechnologien wie z. B. Elektromotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge, PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge, Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher für PKW, Legierungen für den Airframe-Leichtbau, Synthetische Kraftstoffe, etc. (Angerer et al. 2016). Die Studie gibt einen guten Überblick über aktuell eingesetzte Rohstoffe in neuartigen Technologien des Verkehrssektors und zeigt mögliche Engpässe für künftig häufig benötigte Elemente auf. Die neuen Technologien des Flugsektors benötigen ebenfalls eine Vielzahl an Rohstoffen, welche den zukünftigen Bedarf nach bestimmten kritischen Elementen erhöhen können. Kritikalitätsuntersuchungen existieren bereits für neuartige Technologien des Energiesektors (Viebahn et al. 2014), es müssen jedoch auch die im

Forschungsprojekt GNOSIS erarbeiteten Technologiekonzepte hinsichtlich ihres Rohstoffeinsatzes in den entwickelten Komponenten tiefergehend untersucht werden.

Bewertung der Energieeffizienz und der Lärmemissionen

Bei der Bewertung der Energieeffizienz ganzheitlich elektrischer Flugzeugkonzepte liegt in der Literatur der Fokus auf der Antriebseinheit. Hierbei erfolgt eine technologische Auseinandersetzung mit der Antriebseinheit, anhand der insbesondere die Masse und Schubleistung als Leistungsindikatoren identifiziert werden (Gohardani et al. 2010). Für den Vergleich eines kerosinbetriebenen Luftstrahltriebwerks mit einem elektrischen betriebenen Fan wird von (Seitz et al. 2012) ein schubspezifischer Leistungsverbrauch sowie ein energiespezifischer Reichweitenfaktor eingeführt und genutzt. Auch eine operationelle Betrachtung, bei der Leistungsparameter für die gesamte Flugenvolpe bestimmt wurden, liegt vor. Dabei werden Reiseflugbedingungen technologisch analysiert und optimale Betriebsbedingungen abgeleitet. Leistungsspezifische und energetische Charakteristiken werden von (Bolam et al. 2018) für hybride und vollelektronische Konzepte auch unter Berücksichtigung der Masse, der Flugzeugkonfiguration, der aerodynamischen Effizienz und operationeller infrastruktureller Vorgaben betrachtet. Damit liegen in der Literatur bereits Ansätze und teils Ausführungen eines technologischen Vergleichs von Antriebseinheiten und Flugzeugkonfigurationen mit brauchbaren Leistungsindikatoren vor. Lärmemissionen ganzheitlich elektrischer Flugzeugkonzepte werden in der Literatur kaum betrachtet. Nach dem Fluglärmbericht des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2017) werden Eindämmungen der Fluglärmentwicklung durch Lärmschutzbereiche, Schutzzonengrenzwerte, die Differenzierung der Tag- und Nachtbelastung sowie moderner Fluglärm-Berechnungsverfahren und finanzieller Entschädigungen erreicht. Operationelle Ansätze, die sich durch neue Technologien beim elektrischen Fliegen ergeben können, existieren derzeit nicht.

Flugoperationen und Optimierung der Trajektorie

Wie auch teilweise bei der Bewertung der Energieeffizienz genannt, werden in der Literatur operationelle Rahmenbedingungen für die Flugleistungsbewertung mit einbezogen. Hinsichtlich der Flugoperationen werden Trajektorien analysiert und für vollelektrische Flugzeugkonzepte optimiert (Falck et al. 2017). Die Optimierung erfolgt hinsichtlich einer minimalen Flugzeit und Anpassungen der Trajektorie werden unter Berücksichtigung von Temperaturgrenzwerten der elektrischen Motoren empfohlen. Nach (Hepperle 2012) und (Traub 2011) werden operationelle Einschränkungen insbesondere in der Leistungsfähigkeit der Akkumulatoren gesehen. Nach diesen reichen die Batteriekapazitäten und Leistungsdichten kaum aus, um die Flugmissionen in der kommerziellen Luftfahrt zu bewältigen. Spezifische Auseinandersetzungen mit einzelnen Flugphasen, wie der Landephase, in Kombination mit der elektrischen Antriebseinheit, bestehen nicht. Ansätze zur Energierückgewinnung (Rekuperation) während der Landung, wie sie beim elektrischen Fahrzeug beim Bremsen am Boden zum Einsatz kommen (Varocky 2011), existieren für das elektrische Luftfahrzeug nicht. Grundsätzlich werden allerdings in der Literatur brauchbare Konzepte für hohe Energierückgewinnungen für elektrisch betriebene Fahrzeuge gesehen (Spichartz et al. 2013).

Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Das Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft hat Expertise im Themenfeld Mobilität und es wurden bereits verschiedene Technologien des Verkehrssektors ökologisch bewertet. Im BMWi geförderten Forschungsprojekt FahrKlang (2017/18) wurde sich mit herkömmlichem und (teil-)elektrifiziertem Personen-Individualverkehr auf der Langstrecke befasst und für verschiedene Antriebsstrangkonzeppte die Umweltwirkungen für den gesamten Lebensweg ermittelt. Ebenfalls werden am Fachgebiet aktuell im BMU geförderten Forschungsprojekt ELISA (2019-22) die Umweltwirkungen der neuartige Technologie Oberleitungs-Hybrid Lkw sowie der gebauten Infrastruktur eHighway auf der Bundesautobahn A5 untersucht, um die neue Antriebstechnologie in seiner Systemumwelt ökologisch zu bewerten und mit den THG-Emissionen eines herkömmlichen Lkw zu vergleichen. Die Kernkompetenz des FG SuR liegt dabei in der Methodenanwendung der Ökobilanzierung (LCA). Die Bewertung erfolgt ganzheitlich, sodass für die Technologie und alle notwendigen Infrastrukturkomponenten alle Vorketten aus der Herstellung und der Energiebereitstellung mit einbezogen werden. Ebenfalls wurden zahlreiche weitere Forschungsvorhaben zur Ökobilanzierung im Themenfeld von Energietechnologien bearbeitet, u.a. für Photovoltaik, Energiespeicher und Wasserkraft. Des Weiteren können am FG SuR detaillierte Rohstoffuntersuchungen angestellt werden, die sich mit der Kritikalität der eingesetzten Elemente beispielsweise aufgrund der geologischen oder technischen Rohstoffverfügbarkeit befassen. Die Untersuchung der Zukunftstechnologien Wind- und PV-Anlagen wurde im Kopernikusprojekt ENavi (2016-19) durchgeführt und der Materialbedarf der Technologien sowie der Einsatz kritischer Elemente für die Energiewende analysiert und bewertet. Ebenfalls wurde sich in zwei Dissertationen vertieft mit den Recyclingpotentialen der kritischen Rohstoffe Neodym (Nd) und Lithium (Li) befasst. Die Kompetenzen im Bereich LCA und Kritikalität konnte das FG SuR folglich in zahlreiche Projekte einbringen und die Ergebnisse wurden erfolgreich publiziert (Ziemann et al. 2018, 2013; Schulze et al. 2017b, 2017a; Schmidt et al. 2016).

Ein Forschungsfeld des Instituts für Flugsysteme und Regelungstechnik liegt im Bereich des nachhaltigen und effizienten Flugbetriebs. Dieser Bereich schließt die hier angesprochene Bewertung der Energieeffizienz und der Lärmemissionen sowie die Optimierung von Flugtrajektorien ein. Zur Beantwortung der Forschungsfragen im Projekt GNOSIS kann das FSR auf einer Reihe erfolgreich abgeschlossener Projekte in Kooperation mit Partnern aus Forschung und Industrie sowie auf abgeschlossenen Promotionen im Forschungsfeld der effizienten Flugoperationen aufbauen. Im Forschungsprojekt LuFo-V2 RetroEff (2017-2019) werden aktuell auf Basis von Flugleistungsmodellen und Künstlicher Intelligenz Grundlagen zur Technologiebewertung von Retrofits für leistungsfähige und sparsame Flugzeugflotten erforscht. Operationelle Aspekte beim Rollen wurden in den Projekten BMVI Airport eMove (2013-2016) und LuFo-V1 ZETO (2014-2017) mit dem Ziel der Verringerung von Schadstoff- und Lärmemissionen bzw. des Treibstoffverbrauchs bei Bodenoperationen untersucht. In den beiden Projekten steht die Untersuchung und Bewertung des elektrischen Rollens und Schleppens im Vordergrund. In diesem Kontext ist die kürzlich abgeschlossene Dissertation mit dem Titel „Automation Concept for Cockpit Crew Integration into Trajectory-Based Dispatch Towing“ (Bernatzky 2019) zu nennen. Ein System zur 4D-Flugführung und Trajektorienoptimierung von heterogenem Flugverkehr im Flughafenumfeld wurde im Rahmen des Projektes LuFo-IV HETEREX (2010-2012) entwickelt und ist Forschungsgegenstand mehrerer Dissertationen am Institut. In diesem Kontext ist die Dissertation von

(Schulze 2019) mit dem Titel „Architectural Design of a Future Flight Management System Supporting 4D Trajectories“ zu nennen. Im Rahmen von HETEREX wurde auch ein ECAC-konformes Tool zur Lärmbewertung von Abflugtrajektorien entwickelt. Operationelle Aspekte werden auch für unbemannte Flugsysteme untersucht. Ein aktuelles Projekt ist das im Rahmen des EU Horizon 2020 Programms geförderte Verbundprojekt IMPETUS (2017-2019). Themen am FSR sind in diesem Bereich der U-Space, das Informationsmanagement, das Contingency Management sowie die Risikobewertung von unbemannten Flugmissionen.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die im Projekt beteiligten Partner sind:

- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Luft- und Raumfahrtsysteme, Prof. Stumpf; Strukturmechanik und Leichtbau, Prof. Schröder; Strahlantriebe und Turbomaschinen, Prof. Jeschke; Verbrennungskraftmaschinen, Prof. Pischinger)
- Bauhaus Luftfahrt, Prof. Hornung
- Universität Stuttgart (Aerodynamik, Prof. Krämer; Flugzeugbau, Prof. Strohmayer)
- TU Darmstadt (Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft, Prof. Schebek; Flugsysteme und Regelungstechnik, Prof. Klingauf)
- TU Braunschweig (Flugantriebe und Strömungsmaschinen, Prof. Friedrichs)
- TU Dresden (Energiespeichersysteme, Prof. Bocklisch)
- TU Hamburg (Flugzeugsystemtechnik, Prof. Thielecke)
- Universität Würzburg (Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt, Prof. Montenegro)

Im Folgenden werden, ergänzend zu Kapitel I.3, Details zur Kooperation vorgestellt.

Die AP 1.1 und 3.3 wurden zusammen mit allen Verbundpartnern bearbeitet. Hierzu erfolgte ein intensiver Austausch und es wurde ein Kick-Off Meeting sowie ein Synthese-Workshop zu Beginn und Abschluss des Projektes durchgeführt.

In den AP 1.3, 2.9 und 3.2 sind Kooperationen des FG SuR mit den Verbundpartnern Bauhaus Luftfahrt (BHL) und Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR) erfolgt. Hierzu wurden die Arbeitspakete in die daraus resultierenden Arbeitsschritte auf alle beteiligten Partner aufgeteilt und klar abgegrenzt.

Das AP 2.7 wurde in Eigenverantwortung vom FSR bearbeitet. Während der Erarbeitung der Ergebnisse fand ein enger Austausch mit allen Projektpartnern des HAP 2 Modellierung statt. Insbesondere mit dem ILR wurde ein enger Austausch angestrebt, da die Ergebnisse des Arbeitspaketes hauptsächlich dem vom ILR durchzuführenden AP 2.8 und AP 3.1 zur Verfügung gestellt wurden.

Die AP 1.5, 2.9 und 3.2 bauen auf einer Vielzahl von Teilergebnissen der im Projekt beteiligten Partner auf. Für zielführende Projektergebnisse im Bereich der Ökologie und Rohstoffe wurde neben der aktiven Zusammenarbeit mit den zuarbeitenden Partnern auch eine umfangreiche und kontinuierliche Kommunikation der jeweils erzeugten Ergebnisse während der gesamten Projektlaufzeit durchgeführt.

II. Eingehende Darstellung des Vorhabens

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete beschrieben und ein Soll-Ist-Vergleich der gesetzten Ziele durchgeführt. Daraufhin werden die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aufgelistet. Weiterhin wird die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit dargelegt und die voraussichtliche Verwertbarkeit der Ergebnisse erläutert. Zudem wird der bekannt gewordene Fortschritt Dritter während der Projektlaufzeit aufgezeigt. Abschließend wird auf den voraussichtlichen Nutzen und die Verwertbarkeit der Ergebnisse eingegangen.

II.1. Detaillierte Darstellung der Ergebnisse

II.1.1. Ergebnisse FG SuR

Die Arbeiten des FG SuR umfassen die ökobilanzielle Untersuchung von den im GNOSIS Projekt entwickelten unterschiedlichen Flugzeugtransportalternativen. Die Bewertung erfolgt in Projektphase A für das 19-Sitzer Flugzeug „Beechcraft 1900D“ und in der Skalierung von Projektphase B für das 9-Sitzer Flugzeug „Cessna 208B“ und das 50-Sitzer Flugzeug „ATR 42-500“. Die Aufbereitung und Strukturierung der Teilergebnisse aus den einzelnen AP und die Zusammenführung zu einem Gesamtergebnis wird für das FG SuR in Form eines abschließenden Ökobilanz-Berichts dokumentiert (siehe Abbildung 2). Dieser Bericht behandelt das in Projektphase A detailliert untersuchte 19-Sitzer Kleinflugzeug, welches in den drei Projektjahren primär von allen Partnern bearbeitet wurde. Die Ergebnisse für die Projektphase B sind nur im vorliegenden Schlussbericht des GNOSIS Projekts zu finden.

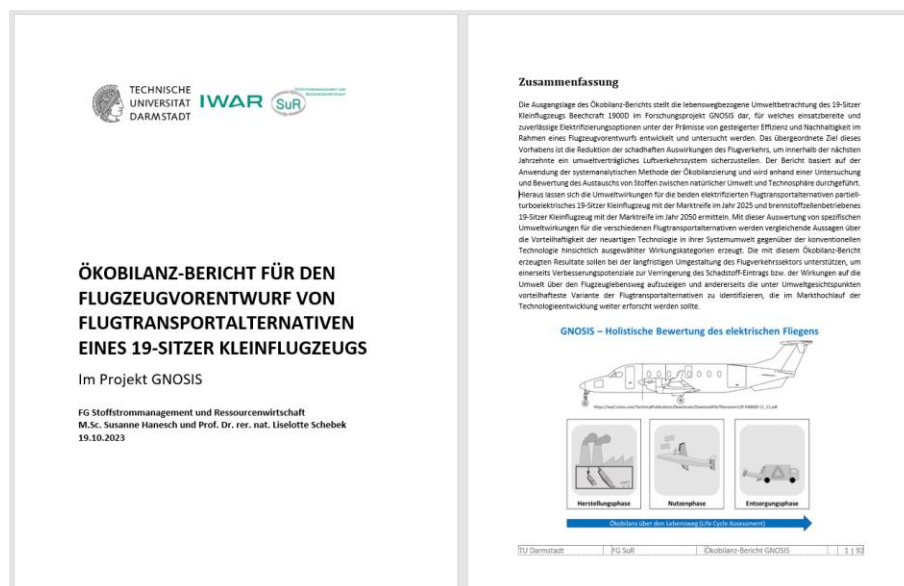


Abbildung 2 Abschlussbericht zur Ökobilanz eines regionalen Kleinflugzeugs und deren elektrifizierten Varianten.

Der Ökobilanz-Bericht kann Anhang 1 entnommen werden und ist öffentlich zugänglich über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1244.2> (Hanesch et al. 2023). In den folgenden Abschnitten sind die wichtigsten Inhalte und Ergebnisse der AP aus der ökobilanziellen Untersuchung zusammengefasst. Für Einzeldarstellungen wird auf die entsprechenden Kapitel des Ökobilanz-Berichts hingewiesen.

AP 1.1 - Technologieidentifikation und –auswahl

Von Seiten des FG SuR wurde eine umfassende Literaturrecherche auf Technologie-, Rohstoff- und Umweltwirkungsebene zum Aufbau fundierter Kenntnisse für das elektrische Fliegen durchgeführt. Die recherchierten Werte zu Umweltwirkungen (Wernet et al. 2016; Bareiß et al. 2019; Blat Belmonte et al. 2020; Jöhrens et al. 2020) und Kosten (Gerbert et al. 2018; IRENA 2018; Leipziger Institut für Energie 2019) von Energieträgern in drei Zeithorizonten (siehe Abbildung 3) unterstützten die Auswahl der zu betrachtenden Technologien der elektrischen Flugzeugkonfigurationen. Die Rechercheergebnisse sind im Projektverlauf durch Literatur ergänzt worden und wurden für die Ökobilanz im Rahmen von eigenen Modellen nachgebildet sowie für die Bewertung der Flugvehikel über den gesamten Lebensweg genutzt.

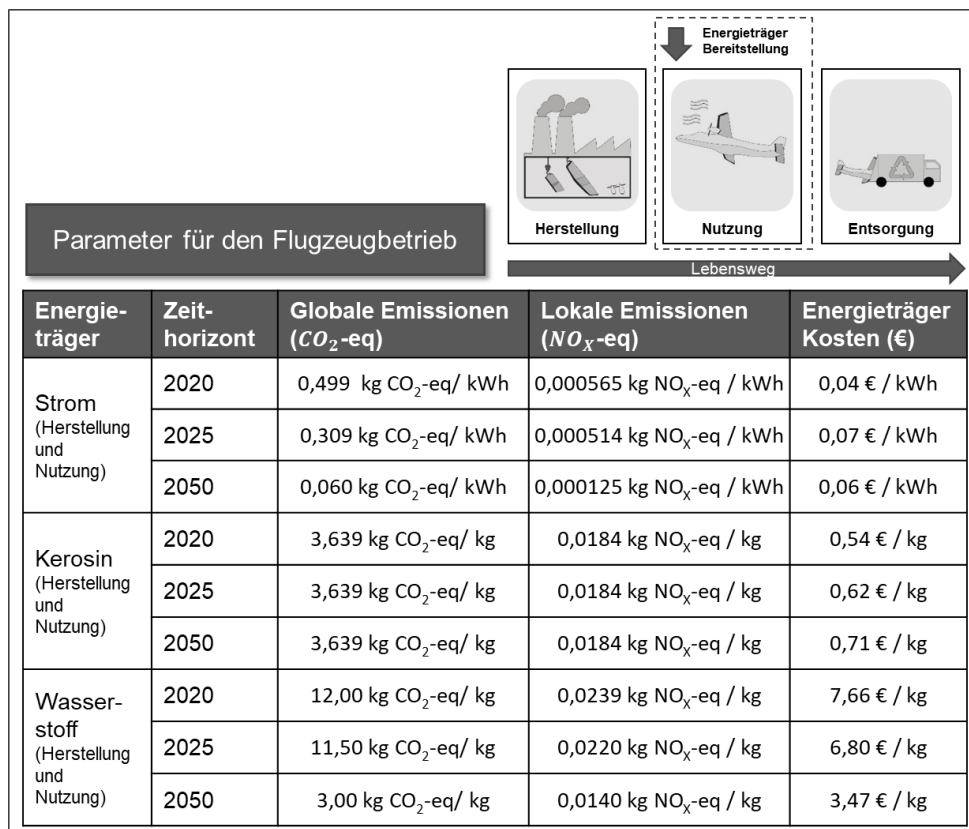


Abbildung 3 Emissionen der Treibhausgase und Luftschadstoffe sowie Kosten zur Bereitstellung und Verwendung von den Energieträgern Strom, Kerosin und Wasserstoff für das Bezugsjahr 2020 sowie die Marktetablierungsjahre 2025 und 2050.

AP 1.3 - Szenarien Energiemix, Energiebereitstellung

Aufgrund der in GNOSIS festgelegten Marktetablierungsjahre 2025 und 2050 müssen Zukunftsszenarien anhand von Annahmen bis zu diesem Zeitpunkt festgelegt werden. Für die ökobilanzielle Bewertung wurde ein Szenariokonzept entwickelt, basierend auf der Unterscheidung von Vordergrundsystem und Hintergrundsystem. Als Vordergrundsystem ist das Produktsystem des spezifischen Flugzeugs zu verstehen, das in GNOSIS entwickelt und untersucht wurde. Als Hintergrundsystem sind die umgebenden vorgelagerten und nachgelagerten Rohstoff-, Energie- und weiteren Märkte definiert, um das Flugzeug über den gesamten Lebensweg abzubilden.

Sowohl für das Vordergrundsystem als auch für das Hintergrundsystem muss eine zeitliche Veränderung betrachtet werden, welche eine evolutionäre Entwicklung bzw. Sprünge zwischen verschiedenen Technologieentwicklungsstufen beinhaltet. Diese Entwicklungen und Sprünge werden in Form von Szenarien definiert. Es werden unterschiedliche Szenario-Parameter einbezogen, die teils Vordergrund- und teils Hintergrundsystem beschreiben. Für den ökobilanziellen Vergleich des vollständigen Produktsystems aus Vordergrund- und Hintergrundsystem werden diese Parameter zur Beschreibung unterschiedlicher Zustände kombiniert. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu ermöglichen, werden für diese Kombination die folgenden Prämissen gesetzt:

- Jeder ökobilanzielle Vergleich erfolgt für einen festgelegten Zeitpunkt. Für diesen Zeitpunkt werden ein Referenzzustand und einer oder mehrere Vergleichszustände in der Zukunft definiert.
- Der Referenzzustand ist dadurch beschrieben, dass dieser die Ausgangslage abbildet, den Status Quo, ohne weitere zeitlichen Veränderungen an den Daten. Die beiden Begriffe Referenzzustand und Status Quo werden im Folgenden synonym benutzt. Bei fehlender Marktreife ist kein bewertender Vergleich zu marktreifen Technologien durchzuführen.
- Die Vergleichszustände beinhalten modifizierte Daten in der Zukunft, die zu einem oder mehreren Zukunftsszenarien kombiniert werden können. Diese Veränderungen beinhalten technologischen und zeitlichen Fortschritt bis zum anvisierten Betrachtungsjahr, mit denen das Produktsystem passgenauer abgebildet werden kann. Ergebnisse im Zukunftszustand sind mit anderen Ergebnissen im gleichen Zukunftszustand zu vergleichen oder mit dem Referenzzustand zur Darstellung von Veränderungen gegenüberzustellen.

Für die Durchführung der lebenswegbezogenen Ökobilanz (LCA, Life Cycle Assessment) wird festgelegt, dass die Umweltbewertung immer in zwei Zeitzuständen umgesetzt werden soll. Zunächst erfolgt die Umsetzung der LCA im aktuellen Referenzzustand als Status Quo, um vollständige Modelle auszubilden, und daraufhin im Zukunftszustand der Marktetablierung nach erfolgter Marktreife der neuartigen Technologie als spezifisches Zukunftsszenario. Zur Bewertung wird jeweils ein konventionelles Flugzeug (CONV) mit einem partiell-turboelektrischen Flugzeug (PTE) im Marktetablierungsjahr 2025 und einem brennstoffzellenbasierten Flugzeug (FCB) im Marktetablierungsjahr 2050 verglichen. Die konkreten Konstruktionsdaten dieser drei Flugzeugvarianten jeweils von der Beechcraft 1900D, Cessna 208B und ATR 42-500 wurden in GNOSIS im HAP Modellierung von den Projektpartnern nachgebildet bzw. neu entwickelt. Abschließend wurden vom Projektkoordinator ILR die finalen Entwürfe der CONV auf Technologiereifegrad (TRL, Technology Readiness Level) 9 sowie der PTE und FCB auf TRL 3 an das FG SuR übermittelt. Da für jeden Zukunftszustand die gleichen Hintergrunddaten für das konventionelle und elektrifizierte Flugzeug modifiziert werden, sind sie jeweils untereinander vergleichbar.

Zur Ökobilanz der GNOSIS Flugzeugvarianten stellt das Hintergrundsystem der Energiebereitstellung für die Zeithorizonte 2025 und 2050 eine herausragende Rolle dar, wie AP 1.1 gezeigt hat. Dazu wurden in AP 1.3 durch das FG SuR entsprechende Szenario-Parameter herausgearbeitet und als Dateninput in die LCA integriert. Die Erarbeitung zukünftiger Strommix Parameter basiert auf der Literaturrecherche zur aktuellen und künftigen Energieerzeugungstechnologieverteilung und resultiert in drei Variationen des deutschen Strommix. Die recherchierten Annahmen zur „Regenerativen Energien Anteilserhöhung“ des Strommix, die zur Erstellung spezifischer Datensätzen dienen, sind in Abbildung 4 gezeigt. Weiterhin wurde zur Nachbildung des Zukunftszustandes im Hintergrundsystem die „Recyclinginputrateerhöhung“

zum Lebensende mittels recherchierter Verwertungsverteilungen für zukünftige Recyclingmix Parameter erstellt, die in Abbildung 5 dargestellt sind. Abbildung 6 demonstriert zur „Lebensdauererhöhung“ von Komponenten die Szenario-Parameter des Vordergrundsystems spezifisch für elektrifizierte Flugzeuge. Mittels Literatur- und Expertenannahmen sowie einer Expertenumfrage wurde die Austauschhäufigkeit des elektrischen Antriebsstrangs nachgebildet wie die diversen Einsatzzeiten einzelner Komponenten im Zukunftszustand zeigen. Die gewählten Szenario-Parameter und weitere Änderungen sind zu Szenarien kombiniert worden, die in Kapitel 3.2.3 und Anhang 32-35 des LCA-Berichts vollständig gezeigt sind.

Strommix Szenario-Parameter für Deutschland

Zeit-horizont	Abfall	Atom-kraft	Bio-masse	Braun-kohle	Gas	Solar	Stein-kohle	Wasser-kraft	Wasser-stoff	Wind (offshore)	Wind (onshore)	Gesamt
2023	1%	6%	8%	20%	16%	11%	12%	3%	-	5%	18%	45%
2025A	-	-	7%	14%	13%	11%	3%	4%	-	14%	34%	70%
2050B	-	-	1%	-	4%	23%	-	3%	-	19%	50%	96%
2050C	-	-	1%	-	-	34%	-	5%	6%	24%	30%	94%

Abbildung 4 Energieerzeugungstechnologieverteilung im Status Quo 2023 (Fraunhofer ISE 2022), im Szenario 2025A (Jöhrens et al. 2020) und in den Szenarien 2050B (Jöhrens et al. 2020) und 2050C (Agora/Stiftung Klimaneutralität 2021).

Recyclingmix Szenario-Parameter für Deutschland

Zeit-horizont	Aluminium Recycling	Stahl Recycling	Edelmetalle Recycling	Polymere Recycling	PET, PP, PVC Verbrennung	Verbundwerkstoffe Verbrennung	Gummi-Weichstoffe Verbrennung	Gesamt
2023	20%	20%	20%	-	20%	20%	20%	20%
2025A	40%	53%	43%	10%	35%	35%	35%	42%
2050B	60%	85%	65%	20%	50%	50%	50%	65%
2050C	95%	95%	82%	70%	20%	90%	90%	90%

Abbildung 5 Verwertungsverteilung im Status Quo 2023 (Asmatulu et al. 2013a; EU COM 2020), im Szenario 2025A (Asmatulu et al. 2013b) und in den Szenarien 2050B (UNEP 2011; Oliveira Fernandes Lopes 2010) und 2050C (Fishman et al. 2021).

Lebensdauer Szenario-Parameter für elektrifizierte Kleinflugzeuge

Zeit-horizont	Elektromotor Flugstunden	Lithium-Ionen Batterie Ladezyklen	Lithium-Schwefel Batterie Ladezyklen	Brennstoffzelle An-/Aus-Zyklen	Wasserstofftank An-/Aus-Zyklen
2023	6.000 h	1.800 Zyklen	500 Zyklen	6.000 Zyklen	10.000 Zyklen
2025A	6.000 h	1.800 Zyklen	-	-	-
2050B	8.000 h	3.000 Zyklen	1.000 Zyklen	7.500 Zyklen	11.000 Zyklen
2050C	10.000 h	4.000 Zyklen	1.500 Zyklen	8.500 Zyklen	12.000 Zyklen

Abbildung 6 Komponentenaustauschhäufigkeit im Status Quo 2023, im Szenario 2025A und in den Szenarien 2050B und 2050C; generiert auf Basis diverser Literatur, Experteneinschätzungen und einer abschließenden Expertenumfrage.

Die Entwicklung von Zukunftszuständen aus dem Referenzzustand erfolgt nach einem systematischen Vorgehen. Aus den in Abbildung 3 – 5 genannten Szenario-Parametern und weiteren signifikanten und unsicherheitsbehafteten Parametern im Referenzzustand (REF) wurden für den Zukunftszustand (FUT) aus drei Parameter-Bündeln drei Zukunftsszenarien zur Bewertung der elektrifizierten Flugzeuge für das Jahr der jeweiligen Marktetablierung entwickelt. Die Zukunftsszenarien werden anhand drei Narrativen in Kapitel 3.3 des Ökobilanz-Berichts beschrieben. Ein Zukunftsszenario ist definiert als ein spezifisches Zukunftsbild von einer möglichen künftigen Situation auf Basis von konsistenten Entwicklungspfaden,

die dorthin führen (Kosow und Gassner 2008). Im nahen Zeithorizont von 2025 wird daher nur eine moderate, prädiktive Entwicklung der Entwicklungspfade als „business-as-usual“ Zustand dargestellt, dieses Szenario trägt den Namen „Keep moving forward (KMF)“. Aufgrund von größerer Unsicherheit durch einen entfernten Zeithorizont werden für 2050 zwei extremere, explorative Entwicklungen ausgehend vom heutigen Zustand ausgebildet. Auch wenn die Entwicklung der prospektiven Parameterannahmen ungewiss ist, können zwei verschiedene Varianten für 2050 ausgearbeitet werden in einer BETTER Variante für das Szenario „Wind of change (WOC)“ und einer FASTER Variante für das Szenario „Fast progress (FP)“. Diese stellen positive Entwicklungen dar, die zwei verschiedene Parameterwerte u.a. für den Strommix im Jahr 2050 integrieren, jedoch noch keine Entwicklung im Bestfall von 100% regenerative Energien darstellen.

Die Parameterentwicklung für die genannten Szenarien wird in Projektphase A für das zu untersuchende 19-Sitzer Flugzeug erarbeitet und in Projektphase B auf die 9-Sitzer und 50-Sitzer übertragen. Die prospektiven Daten sind auch für das konventionelle Flugzeug anzuwenden, wenn der jeweilige Szenario-Parameter enthalten ist. Zudem werden im Markthochlauf Veränderungen der neuartigen Flugzeuge von TRL 3 zu TRL 9 sowie einer industriellen Reife bezüglich Energiebedarf und Materialeinsatz von Zukunftstechnologien am Flugzeug wie den Lebensdauern berücksichtigt, die nur für die neuartigen Flugzeuge umgesetzt werden. Erst mit diesen Anpassungen sind die elektrifizierten Flugzeuge mit den im Markt etablierten Flugzeugen vergleichbar. Die Auflistung und ausführliche Beschreibung aller Szenario-Parameter inklusive deren formulierter Szenario-Narrative, die neben den internen Parametern des Vordergrund- und Hintergrundsystems des Produktsystems zusätzlich externe sozioökonomische Faktoren enthält, kann dem Ökobilanz-Bericht in Anhang 1 entnommen werden.

Methodisch ist in diesem vorgelagerten AP 1.3 der LCA herausgefunden worden, dass neuartige elektrische Flugzeuge erst nach Eintreten in den Markt bewertet und mit konventionellen Flugzeugen verglichen werden sollten. Dies gewährleistet die Berücksichtigung von technologischem Fortschritt am Flugzeug wie Komponentenverbesserungen von z.B. Batterien aufgrund von Material- und Energieeffizienz sowie Lebensdauererhöhungen. Auch wird die Veränderung des umgebenden Systems berücksichtigt, sodass z.B. zeitlicher Fortschritt im Energiesektor mit einem veränderten Strommix bzw. im Entsorgungssektor mit höheren Recyclingraten bis zum jeweiligen Betrachtungsjahr für alle Flugzeugalternativen berücksichtigt werden kann. Somit ist ein jeweiliges passgenaues Zukunftsszenario für das Marktetablierungsjahr der neuartigen Flugzeuge zur Umweltbewertung verwendbar.

AP 1.5 - Ökobilanzielles Screening der identifizierten Technologien

In AP 1.5 soll das Grundgerüst für die spätere Ökobilanzierung erstellt werden. Hierfür müssen laut Ökobilanzstandard das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert werden (DIN EN ISO 14040:2009-11; DIN EN ISO 14044:2006-10). Das Ziel ist eine vergleichende Ökobilanz-Studie von herkömmlichen und neuartigen elektrifizierten Kleinflugzeugen. Die Durchführungsgründe sind die Klima- und Nachhaltigkeitsziele für den Mobilitätssektor, um eine Entscheidungsunterstützung zu Klimagasen, Luftschadstoffen und Materialeinsatz zu geben mit der hauptsächlichen Zielgruppe des BMWK sowie weiteren Forschern und Praktikern der Mobilitätswende. Die funktionelle Einheit, auf welche alle

Umweltwirkungen berechnet werden sollen, ist der Lufttransport von 1 Person über 1 km. Auf diese werden alle Prozesse über den Lebensweg des Produktsystems eines Kleinflugzeugs mit der Funktion „Regionaler Personentransport mit einem Kleinflugzeug“ bezogen, die in Abbildung 7 dargestellt sind.

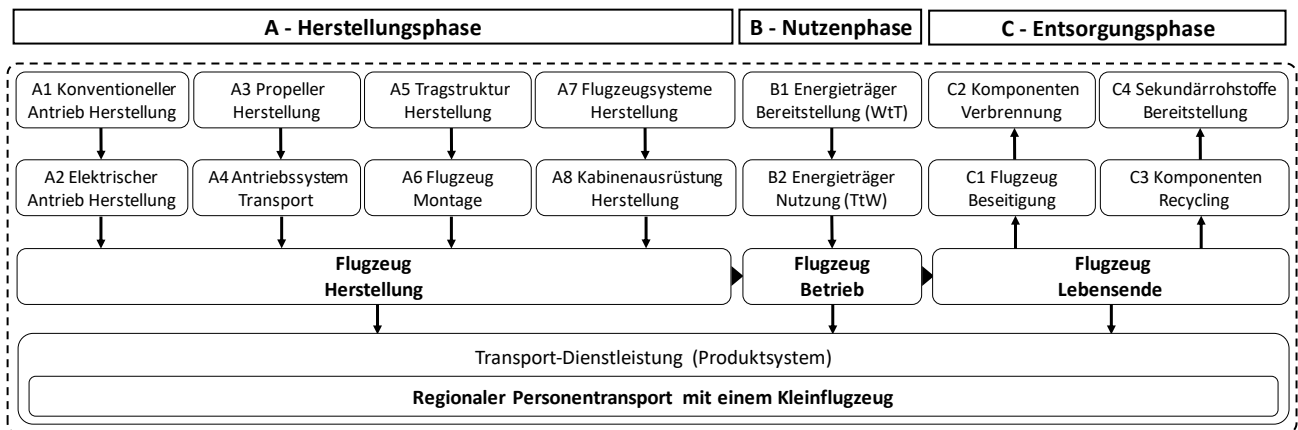


Abbildung 7 Grafische Darstellung des Produktsystems eines Kleinflugzeugs und der Funktion des Personentransports.

Als Systemgrenzen für das Produktsystem wurden die geographischen Grenzen von Deutschland gewählt. Dies ist darin begründet, dass eine Mission des in Projektphase A betrachteten Flugzeugs 476 km darstellt und innerhalb nationaler Grenzen liegt. Zeitlich werden die Horizonte für Datenaufnahme und Modelle von 2020 bis 2050 betrachtet und der Lebenswegansatz ist „Cradle-to-Grave/Cradle“, bei dem die Rohstoffentnahme, Produktion, Nutzung und das Lebensende modelliert werden sollen. Es werden Anforderungen an die Aktualität der Daten sowie deren geografische und technologische Repräsentativität gestellt, jedoch verschiedene Schätzungen bei z.B. Rohstoffeinsatz, Fertigungsenergie und Recycling getroffen, die im Ökobilanz-Bericht von Anhang 1 in Kapitel 3 der Sachbilanz detailliert erläutert werden.

Die definierten Randbedingungen des LCA-Modells helfen bei der Datenaufnahme und der Nachbildung geeigneter Prozesse zur Erstellung des parametrisierten Vordergrundsystems (siehe die dargestellten 14 Prozesse von Abbildung 7) und deren Verknüpfung mit dem Hintergrundsystem (z.B. vorgelagerte Rohstoffmärkte oder nachgelagerte Recyclingmärkte). Laut (DIN 9020-5) stellen die wichtigsten Materialien der Tragstruktur die Rohstoffe Aluminium, Stahl und Titan dar. Zudem werden im Flugzeug verschiedene Polymere sowie Nickel, Kupfer und Kobalt eingesetzt. Die Zuordnung der relevantesten Rohstoffe zu den einzelnen Prozessen ist notwendig, um die Umweltwirkungen u.a. aus der Herstellung der Materialien und den zugeordneten Datensätzen bestimmen zu können. Neben Titan und Kobalt, die laut (EU COM 2020) als kritische Rohstoffe gelten und für die EU zu einem künftigen Versorgungsrisiko führen können, müssen auch die elektrifizierten Flugzeuge hinsichtlich ihres Materialeinsatzes überprüft werden. Abbildung 8 stellt die wichtigsten Metalle der Flugvehikel und ihre bewertete Kritikalität dar.

Das Screening der Konfigurationen der im GNOSIS Projekt entwickelten neuartigen Flugzeuge PTE und FCB zeigt, dass eingesetzte Rohstoffe wie Neodym im Elektromotor, Platin in der Brennstoffzelle und Lithium in der Batterie zu besonderen Auswirkungen bei der Bewertung führen können. Kritische Rohstoffe haben meist einen hohen Marktpreis, der bei Engpässen noch weiter steigen kann. Zudem ist der Rohstoffabbau häufig mit einem größeren Aufwand verbunden, sodass kritische Rohstoffe deutlich

höhere Umweltwirkungen aufweisen. Eine wichtige Erkenntnis in AP 1.5 ist, dass Lithium und kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK), der zur Gewichtsreduktion in elektrifizierten Flugzeugen eingesetzt wird, die höchsten Auswirkungen aller verwendeten Materialien bezüglich emittierter Treibhausgase (THG) und NO_x-basierter Luftschadstoffe in der Herstellung haben. Beispielsweise zeigt die Substitution von 1 kg CFK mit 1,8 kg Aluminium, die für die veränderte Tragstruktur des seriell-hybriden Flugzeugs mit Marktreife in 2050 erfolgt, trotz weniger Materialmenge eine 3-fache THG-Wirkung zur Herstellung. Die Erkenntnisse wurden anhand der Optimierungspotenziale für Ökologie und Rohstoffverbrauch an die Projektpartner rückgekoppelt, um im Entwurf der neuartigen Flugvehikel frühzeitig bei der Auswahl von Materialien, Komponenten und Technologien zu unterstützen.

Bewertung des Versorgungsrisikos der wichtigsten Rohstoffe im herkömmlichen und elektrifizierten Flugzeug	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Grad der Koppelproduktion/Nebenproduktion	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Recyclingtechnologien	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	politisches Länderrisiko	regulatorisches Länderrisiko	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	Grad der Nachfragesteigerung	techn. Machbarkeit + Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	annualisierte Preisvolatilität
Aluminium	0	0	0,3	0,7	1	0,7	0,3	0,3	0	0,7	0,7
Stahl (Eisen)	0,3	0	0,3	0,3	1	0,7	0,3	0,3	0	0,7	0,7
Nickel	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1	1
Kupfer	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	1
Kobalt*	0,3	0,7	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,3	0,3	1	1
Titan*	0	0	0,3	0,7	1	0,7	0,7	0,3	0	0,3	1
Neodym*	0	0,7	0,7	1	1	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,3
Platin*	0	0,7	0,7	1	1	0,7	0,7	0,7	0,3	0,7	1
Lithium*	0	0	1	1	1	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7	0,7

[0 = geringe Kritikalität, 1 = hohe Kritikalität] * kritische Rohstoffe der Liste kritischer Rohstoffe (EU COM 2020)

Abbildung 8 Analyse der Rohstoffkritikalität im Flugvehikel mittels Kriterien des Versorgungsrisikos und Identifikation von kritischen Rohstoffen im konventionellen (mittig) und elektrifizierten (unten) Antriebsstrang (VDI Richtlinie 4800 Blatt 2).

Dieses aufgesetzte Grundgerüst von AP 1.5 bildet zur Ökobilanzierung und Ressourcenbewertung in AP 2.9 und AP 3.2 das Fundament und dient der Bewertung in Projektphase B, bei der die skalierten Flugzeuge auf die entwickelte Bewertungsmethodik angepasst werden. Als Wirkungskategorien werden „Klimawandel“ (Einheit: CO₂-eq), „Photochemische Ozonbildung“ (Einheit: NO_x-eq) und „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ (Einheit: Cu-eq) auf Grundlage der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 ausgewählt (Huijbregts et al. 2017). Diese Wirkungskategorien stehen für unterschiedliche Effekte: Klimawandel für die Veränderung des globalen Klimasystems, Photochemische Ozonbildung für gesundheitliche Wirkungen auf den Menschen und mineralischer Ressourcenverbrauch für den Verbrauch an nicht erneuerbaren Rohstoffen, insbesondere kritischen Rohstoffen.

Für diese Wirkungskategorien müssen im nachfolgenden AP 2.9 alle Informationen und Daten aus dem Vordergrundsystem der einzelnen Flugzeuge beschafft werden und mit Daten zum umgebenden Hintergrundsystem verknüpft werden.

AP 2.9 - Aufbau und Datenerhebung Lebenszyklusanalyseprozess

In AP 2.9 wird die softwaretechnische Umsetzung des parametrisierten Sachbilanzmodells der Ökobilanz durchgeführt. Basierend auf dem ersten Hauptarbeitspaket der Vorarbeiten werden in diesem Schritt alle detaillierten Modellierungen der entsprechenden Technologien CONV, PTE und FCB ausgearbeitet.

In Projektphase A werden die aufgesetzten Prozesse des Produktsystems „Regionaler Personentransport mit einem Kleinflugzeug“ anhand von Datengenerierungstechniken wie die Simulation in der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO, Expertenschätzung, etc. für alle Flugzeugvarianten mit Parametern wie dem Komponentengewicht und der Materialverteilung ausgestattet und über alle Lebensphasen verrechnet. Die Datenaufnahme basiert im Detail auf der bis zum Jahr 2002 real gefertigten Beechcraft 1900D. Die übergeordnete Modellstruktur der Komponenten wird dem Piloten-Trainingshandbuch entnommen (Flight Safety International Inc. 2000) und technische Systeme sind in der Herstellersystembeschreibung aufgeführt (Ratheon Aircraft 2000). Die Zusammensetzung der Tragstruktur z.B. des Flügels werden den Bauteilzeichnungen des illustrierten Teilekatalogs entnommen (Textron Aviation 2019) und Informationen zur Innenausstattung sowie den zugehörigen Materialien sind im technischen Bericht des U.S. Department of Transportation enthalten (Clarke et al. 1988). Die Daten zu den durchschnittlichen Verbrennungsemissionen von THG und Luftschadstoffen wurden mit einem Luftfahrthandbuch anhand des Kraftstoffbedarfs der Durchschnittsmission erzeugt (EMEP/EEA 2019). Detaillierte Informationen zu diesem Datenbeschaffungsprozess befinden sich im dokumentierten Ökobilanz-Bericht von Anhang 1 im Kapitel 3.2 der Datenerhebung.

Das vollständig gebildete Modell des Referenzflugzeugs Beechcraft 1900D ist aus der Datengenerierung mit Primärdaten zusammen mit der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO entstanden und mit der Datenmodifikation auf die Betrachtungsjahre angepasst worden. Des Weiteren hat diese Simulation die Entwürfe der elektrischen Flugzeugmodelle von TRL 3 erzeugt, woraus die Modellstruktur abschließend um verschiedene Flugzeugvarianten, Zeithorizonte und Flugzeugtypen ergänzt werden konnte. Beispielhaft geben die Prozesse der Beechcraft 1900D-FCB, welche in Tabelle 1 – 8 gezeigt sind, das Flugzeug in allen Daten über den kompletten Lebensweg wieder. Diese Datenerhebungsblätter zeigen übergeordnet alle notwendigen Daten für die Umweltbewertung. In der Datenaufnahme wurden weitere Spezifizierungen wie die Betriebsphasen Rollen, Abflug, Anflug und Reiseflug übermittelt, die unterteilen, dass der Energieverbrauch von einem Anteil im Reiseflug für die Varianten der CONV von durchschnittlich 75% bei den elektrischen Varianten auf über 80% ansteigt, sodass sich der Hauptanteil des Energieträgerverbrauchs aller Flugzeuge auf diesen zurückführen lässt.

In Projektphase B wurde die umfangreiche Datenaufnahme des Referenzflugzeugs Beechcraft 1900D unter Berücksichtigung der begrenzten vorhandenen personellen und zeitlichen Ressourcen auf die skalierten Flugzeuge übertragen, sodass die Modelle der Flugzeuge Cessna 208B und ATR 42-500 auf deren Modellstruktur und einigen Daten basieren.

Tabelle 1 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Elektrischer Antrieb Herstellung.

FCB: Elektrischer Antrieb Herstellung (A2)				
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

Tabelle 2 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Propeller Herstellung.

FCB: Propeller Herstellung (A3)				
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

Tabelle 3 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Tragstruktur Herstellung.

FCB: Tragstruktur Herstellung (A5)				
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

Tabelle 4 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Flugzeugsysteme Herstellung.

FCB: Flugzeugsysteme Herstellung (A7)				
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
Hydr. + pneum. 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

Tabelle 5 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Kabinenausrüstung Herstellung.

FCB: Kabinenausrüstung Herstellung (A8)				
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

Tabelle 6 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Transportprozesse.

FCB: Transportprozesse (A4) (C1)				
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

Tabelle 7 Datenerhebungsblatt zu Lebensweg-Prozessen der Beechcraft 1900D-FCB: Energieprozesse.

FCB: Energieprozesse (A6) (B1) (C1)			
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 (WrT)	Flüssiger Wasserstoff	80,93
		Strom	197,06
Flugzeug Beseitigung	Elektrische Energie	Strom	13.818,23

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

FCB: End-of-Life-Prozesse (C2) (C3) (C4)				
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

Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen den beschafften Daten des Vordergrundsystems und des umgebenden Hintergrundsystems mit den Umweltauswirkungen herzustellen, werden zunächst die hergestellten Flugvehikel in ihrer Materialbilanz (BOM, Bill-of-Material) und den daraus resultierenden emissions- und materialbasierten Umweltwirkungen für alle Flugzeugtypen und Varianten abgebildet. Abbildung 9 zeigt den Rohstoffeinsatz aus den Herstellungsprozessen anhand der BOM für das Gesamtflugzeug und stellt die Ergebnisse mittels Ökobilanz-Softwaremodellierung in openLCA bezogen auf die Umweltwirkungseinheiten CO₂-eq für die Kategorie Klimawandel, NO_x-eq für die Kategorie Photochemische Ozonbildung und Cu-eq für die Kategorie Mineralischer Ressourcenverbrauch in der Systemgrenze Cradle-to-Gate dar.

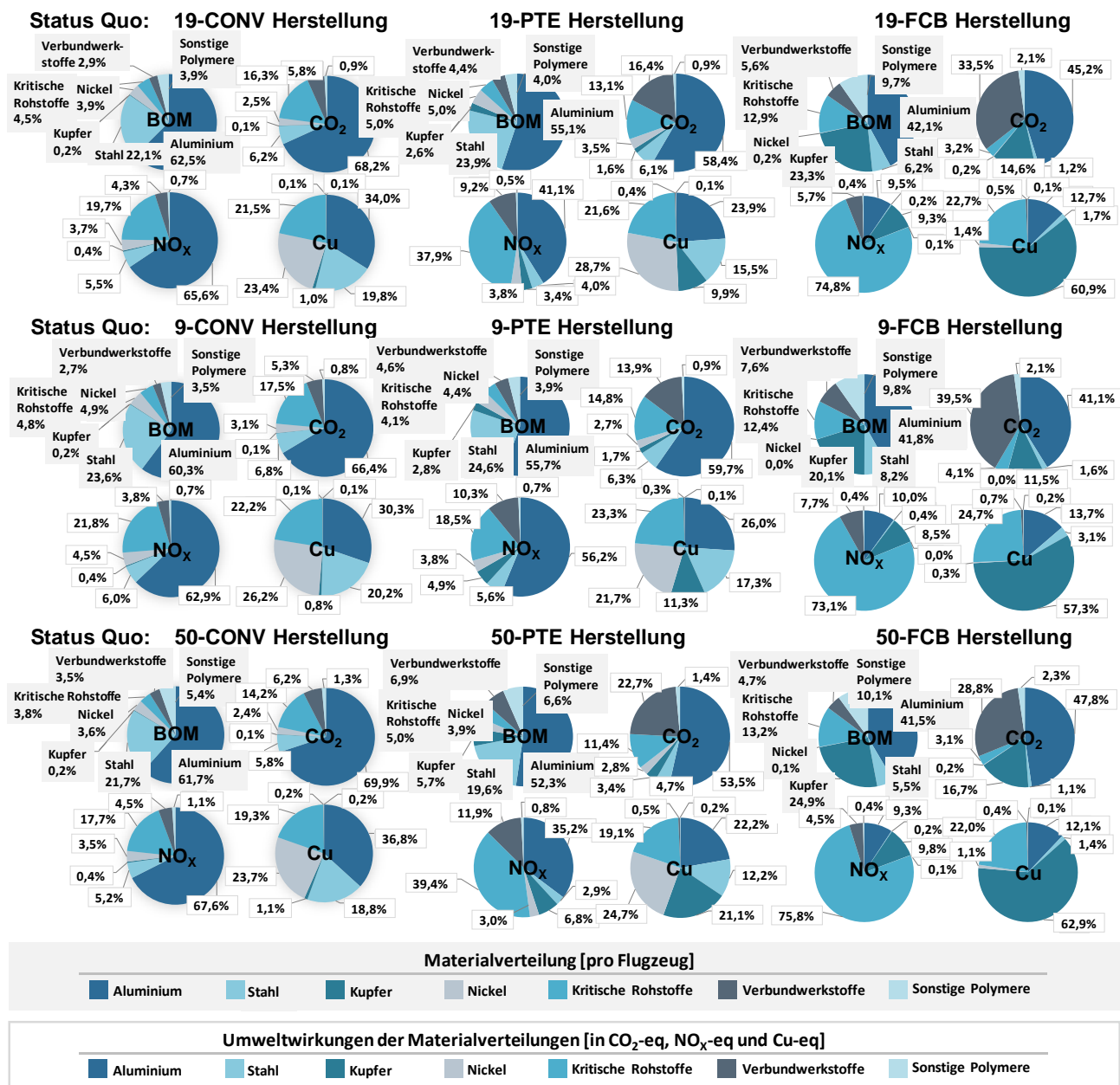


Abbildung 9 Materialbilanz und Umweltwirkungen für die 9-/19-/50-Sitzer Flugzeuge und deren Varianten im Status Quo.

Die abgebildete BOM zeigt die Flugzeuge im Status Quo, d.h. es sind die Lebensdauern der elektrischen Komponenten für den Zeithorizont 2023 berücksichtigt. Dies basiert bei 20 Jahren Flugzeuglebensdauer auf den Schätzungen einer Austauschhäufigkeit für den Elektromotor alle 6,8 Jahre, für die Lithium-Ionen-Batterie alle 2,9 Jahre, für die Lithium-Schwefel-Batterie alle 0,8 Jahre, für die Brennstoffzelle alle 4,8 Jahre und für den Wasserstofftank alle 7,9 Jahre. Dies bewirkt einen sehr hohen Materialeinsatz für die FCB, die alle diese Komponenten enthält. Der große Rohstoffbedarf führt zu einer erhöhten Umweltwirkung von Kupfer und kritischen Rohstoffen, die in der Antriebselektronik zu einem großen Anteil enthalten sind. Die Verlagerung der Materialverteilung zu einem großen Anteil dieser Rohstoffe, wie dies in Abbildung 9 für die FCB gegenüber der CONV und PTE ersichtlich wird, kann zu einer zukünftigen Rohstoffknappheit aufgrund der hohen Rohstoffkritikalität des elektrischen Antriebs (siehe Abbildung 8) für das elektrische Fliegen führen, wenn nicht deutlich höhere Recyclingquoten, wie in Abbildung 5 dargestellt, erreicht werden. Abschließend kann geschlussfolgert werden, dass Verbundwerkstoffe wie CFK und kritische Rohstoffe wie Lithium die Umweltwirkungen erhöhen und daher in künftigen Flugzeugen in einer möglichst geringen Menge eingesetzt werden sollten.

Nachdem alle Arbeitsergebnisse des Projektes zu einem ökobilanziellen Gesamtmodell integriert werden konnten und der Rohstoffeinsatz quantifiziert sowie Verfügbarkeitsengpässe identifiziert wurden, erfolgt im Anschluss die Bewertung der verschiedenen Technologiekonzepte.

AP 3.2 - Auswertung der Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen der LCA-Auswertung von AP 3.2 werden die resultierenden Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg der Flugzeuge ermittelt und in einer abschließenden Bewertung vergleichend gegenübergestellt. Nachdem parametrisierte Sachbilanzmodelle aller Technologieoptionen in der LCA-Software umgesetzt und Datensätze für die Vordergrund- und Hintergrundsysteme erstellt wurden, kann nun auf die Gesamtergebnisse der konventionellen und elektrifizierten Flugzeuge eingegangen werden, die für den Referenzzustand im Status Quo und den Zukunftszustand in den Marktetablierungsjahren 2025 im Szenario KMF für die PTE und 2050 in den Szenarien WOC und FP für die FCB dargestellt sind. Diese basieren auf iterativen Sensitivitätsanalysen und Berechnungen verschiedener Zukunftsszenarien zur Auswertung der Gesamtwerte für Emissionen und Ressourcenverbrauch. Aus den Resultaten wird ersichtlich, ob die elektrischen Flugzeugkonfigurationen im jeweiligen Marktetablierungsjahr über den Flugzeuglebensweg hinweg vorteilhaft sein können. Die Sensitivitäten und die Gesamtergebnisse zu den Umweltwirkungen der 19-Sitzer sind im LCA-Bericht von Kapitel 4 der Wirkungsabschätzung dargestellt.

Aus den im Ökobilanzbericht von Anhang 1 durchgeführten Sensitivitätsanalysen wird ersichtlich, dass u.a. mit einer Parametervariation des künftigen Strommix bzw. des höheren Recyclinganteils geringere Umweltwirkungen in den einzelnen Prozessen erreicht werden können. Die Ergebnisse aus der Umweltbewertung aller Flugzeuge sind in den Abbildungen 10 – 12 dargestellt. Diese sind jeweils in die Herstellungsphase A, die Nutzenphase B mit der Energieträgerbereitstellung, Well-to-Tank (WtT), und der Energieträgernutzung, Tank-to-Wake (TtW), und die Entsorgungsphase C differenziert, die in ihrer Struktur Abbildung 7 entnommen werden können. Zudem werden die Ergebnisse zunächst für den Referenzzustand und daraufhin für den Zukunftszustand in den Szenarien KMF, WOC bzw. FP pro Flugzeug im Rahmen der Technologieentwicklung und Zukunftsentwicklung abgebildet.

Umweltwirkungsergebnisse für den Personentransportvergleich in einem 19-Sitzer Kleinflugzeug

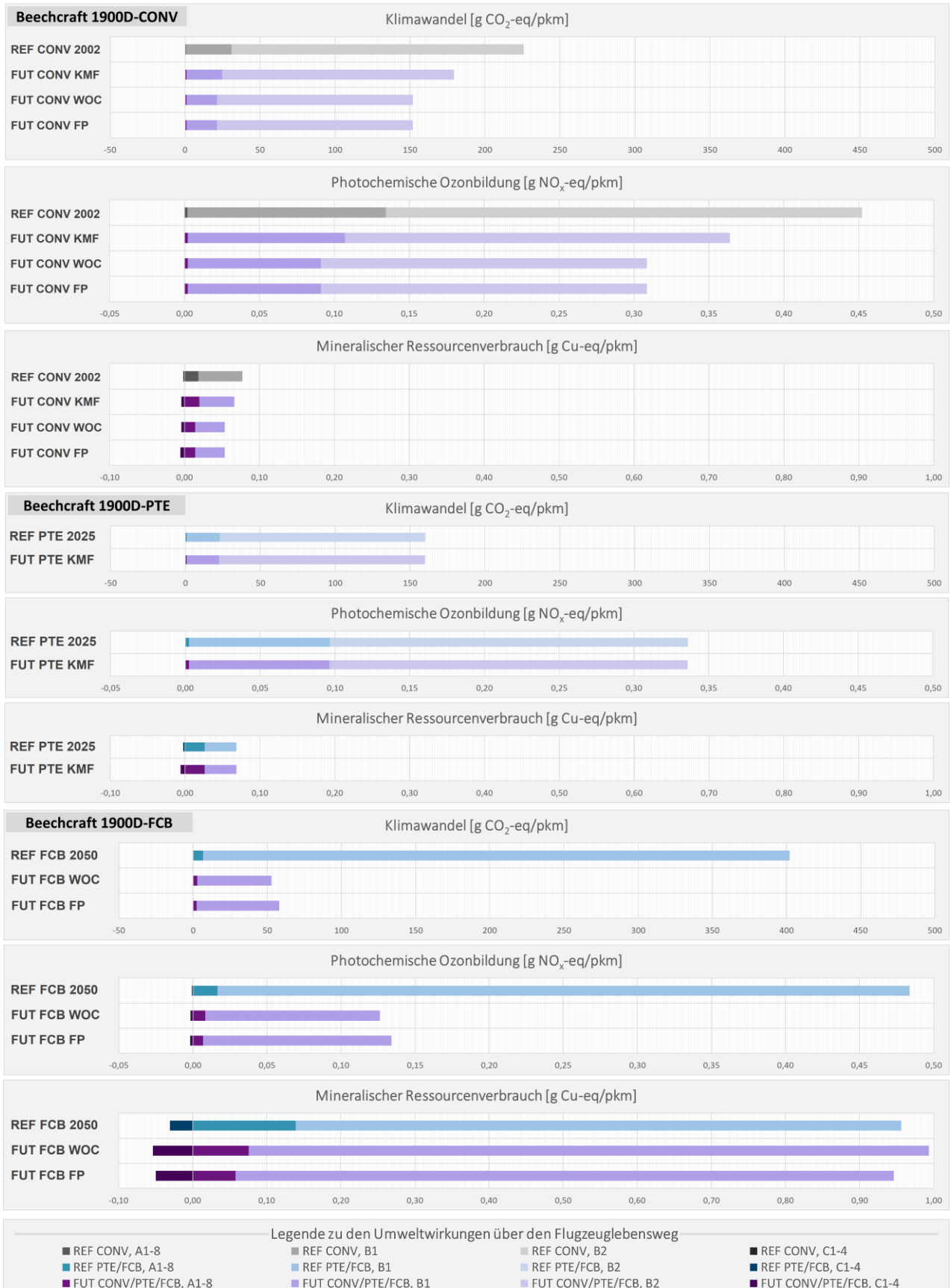


Abbildung 10 Umweltwirkungen für die 19-Sitzer Flugzeuge im Status Quo und im Marktetablierungsjahr-Szenario.

Umweltwirkungsergebnisse für den Personentransportvergleich in einem 9-Sitzer Kleinflugzeug

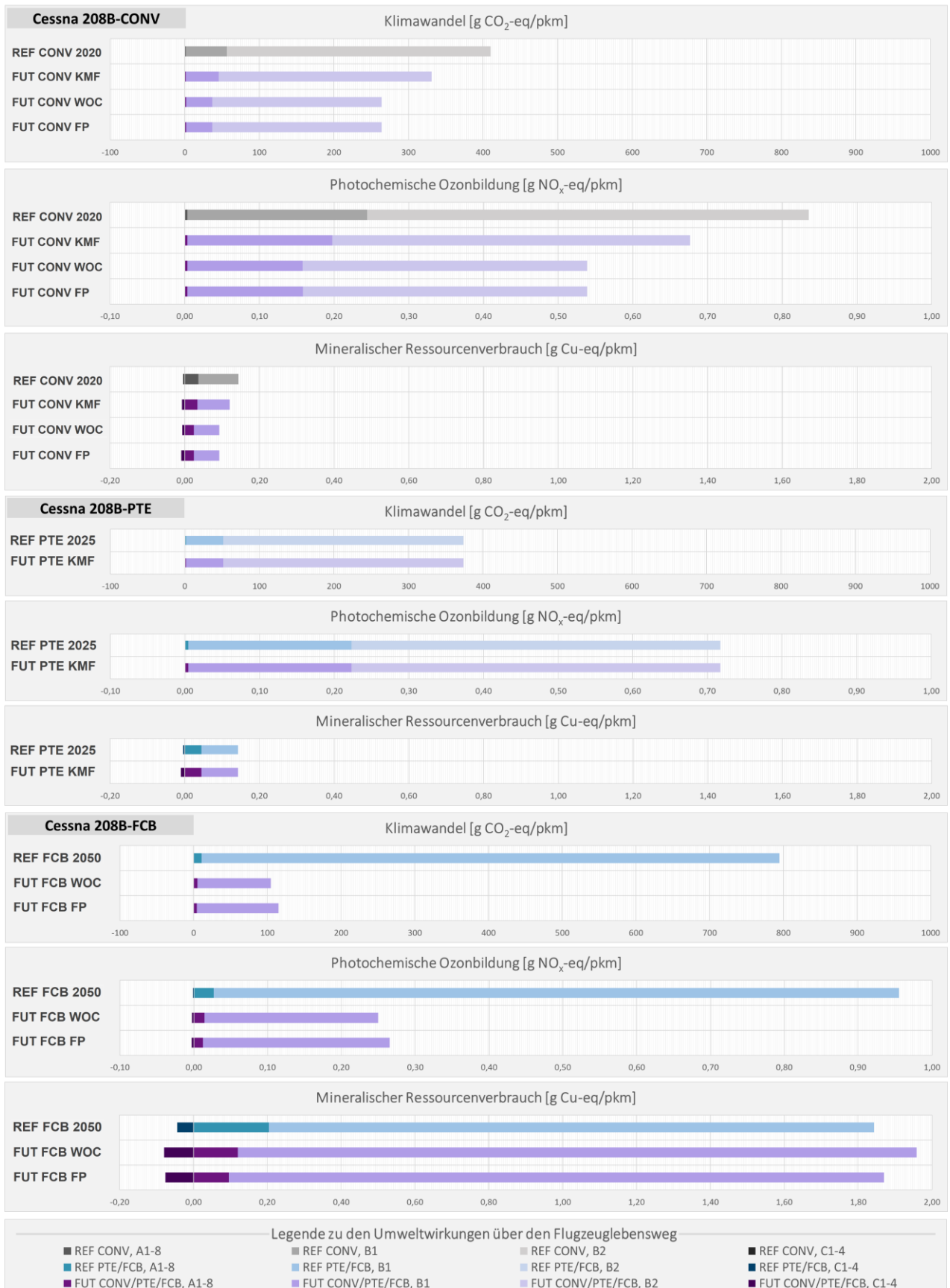


Abbildung 11 Umweltwirkungen für die 9-Sitzer Flugzeuge im Status Quo und im Marktetablierungsjahr-Szenario.

Umweltwirkungsergebnisse für den Personentransportvergleich in einem 50-Sitzer Kleinflugzeug

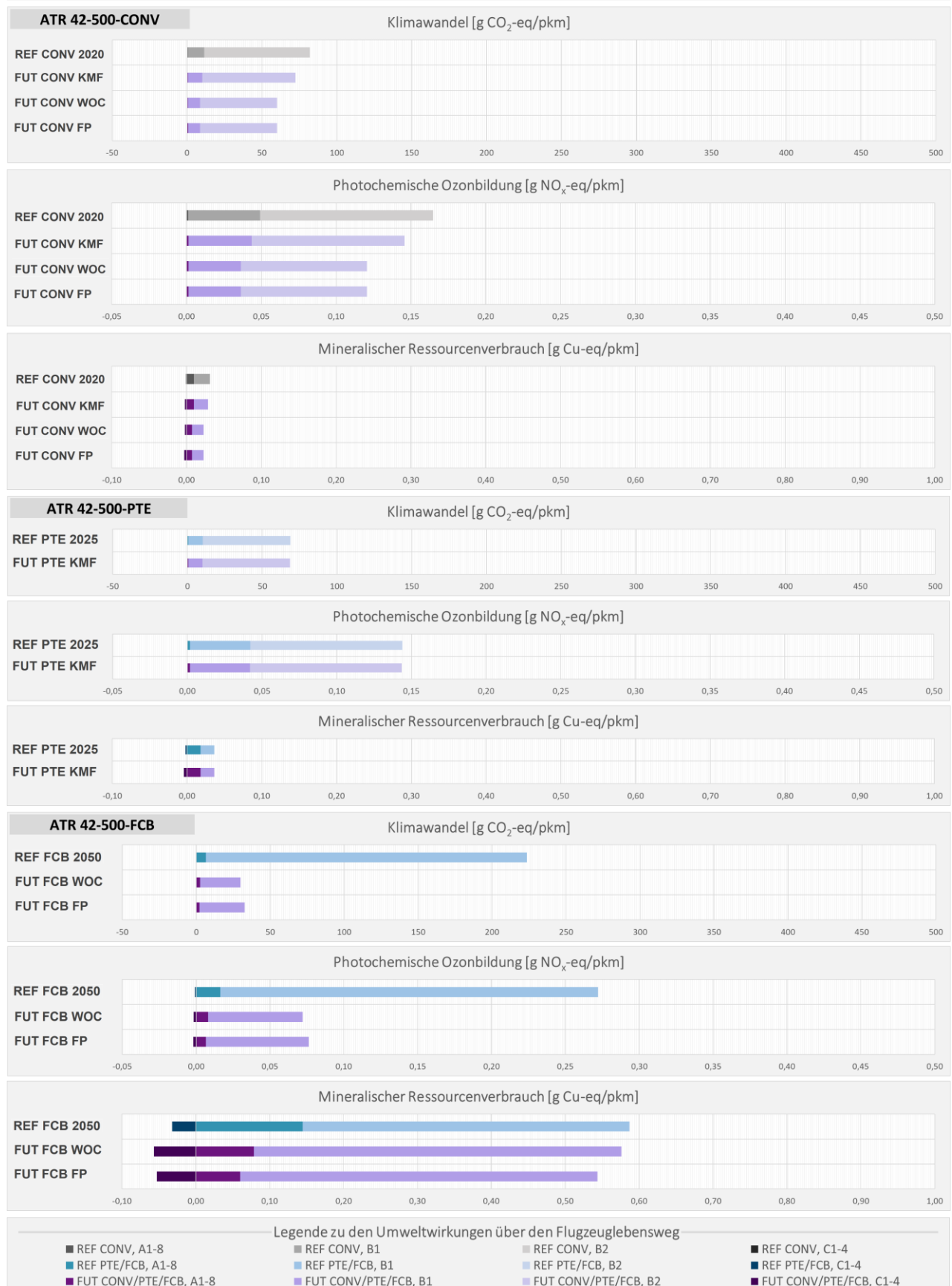


Abbildung 12 Umweltwirkungen für die 50-Sitzer Flugzeuge im Status Quo und im Marktetablierungsjahr-Szenario.

Die Umweltwirkungsergebnisse der LCA zeigen das 19-Sitzer Referenzflugzeug Beechcraft 1900D in Abbildung 10, das 9-Sitzer Flugzeug Cessna 208B in Abbildung 11 und das 50-Sitzer Flugzeug ATR 42-500 in Abbildung 12. Die Darstellungen der drei Umweltwirkungen bildet jeweils pro Flugzeugvariante im obersten Balken den Referenzzustand und in den lila Balken den Szenario-basierten Zukunftszustand ab. Es ergibt sich für die elektrischen Varianten, dass zur Marktreife im Jahr 2025 bzw. 2050 meist deutliche Verbesserungen gegenüber den konventionellen Varianten erzielt werden können. Aufgrund des fast ausschließlichen Kerosineinsatzes resultieren für die PTE, ebenso wie für die CONV, die Emissionen von CO₂-eq und NO_x-eq aus der Kerosinbereitstellung sowie Kerosinverbrennung und werden zu 99% in der Nutzenphase primär aus dem Flugzeugbetrieb (Prozess B2, TtW) und sekundär aus der Energieträgervorkette (Prozess B1, WtT) erzeugt. Ein geringer Stromanteil wird in der Beechcraft 1900D-PTE und der ATR 42-500-PTE für elektrische Rollvorgänge genutzt, die Cessna 208B-PTE verwendet ausschließlich Kerosin. Dagegen werden für die FCB im rein elektrischen Betrieb keine Emissionen aus Verbrennungsprozessen erzeugt. Die THG und Luftschadstoffe werden hauptsächlich zur Bereitstellung des Energieträgers Wasserstoff emittiert, die aus dem verwendeten Strommix resultieren. Nur eine geringe Menge von etwa 5% der Emissionen entfallen auf die Flugzeugherstellung und das Flugzeublebensende. Demnach sind die signifikanten Parameter der zwei Wirkungskategorien die Kerosinverwendung (WtT und TtW) und die Strommixbereitstellung (WtT). Die Umweltwirkungen der mineralischen Ressourcenknappheit entstehen neben Kerosinverwendung und Strommixbereitstellung aus der Rohstoffnutzung, besonders kritischer Rohstoffe, die für die CONV, PTE und FCB zwischen 1% und 40% Anteil am Cu-eq Ergebnis besitzen und die Fördermengenzunahme von Erzen bewirkt, die eine Rohstoffknappheit zur Folge hat.

Die Gegenüberstellung der Flugzeuge in deren Zukunftsentwicklungen lässt erkennen, dass nicht in allen Wirkungskategorien zu jedem Zeitpunkt eine ökologische Vorteilhaftigkeit der elektrischen Flugzeuge existiert. Die Auswertung der LCA zeigt zwar für die Emissionen sukzessive Verbesserungen auf, jedoch erhöht sich der Ressourcenbedarf mit dem elektrischen Antrieb und häufigen Komponentenaustausch, sodass der nicht intendierte Nebeneffekt von höheren Umweltwirkungen gegenüber der CONV auftritt.

Abschließend wird der Vergleich der drei Varianten CONV, PTE und FCB zueinander aufgezeigt. In den nachfolgenden Tabellen 9 – 11 sind die differenzierten Ergebnisse pro Szenario dargestellt.

Tabelle 9 Vergleich zu Umweltwirkungen der 19-Sitzer PTE und FCB gegenüber der CONV im gleichen Marktetablierungsjahr und Gegenüberstellung der im Markt befindlichen realen Beechcraft 1900D.


Beechcraft 1900D  https://leeaerospace.com/aircraft-windows/beechcraft-1900d-replacement-windows/	19-PTE-2025, Keep moving forward		
	CO ₂ -eq	-11% vs. CONV-2025	-29% vs. CONV-2002
	NO _x -eq	-8% vs. CONV-2025	-26% vs. CONV-2002
	Cu-eq	+7% vs. CONV-2025	-12% vs. CONV-2002
	19-FCB-2050, Wind of change		
	CO ₂ -eq	-65% vs. CONV-2050	-77% vs. CONV-2002
	NO _x -eq	-60% vs. CONV-2050	-72% vs. CONV-2002
	Cu-eq	+1804% vs. CONV-2050	+1149% vs. CONV-2002
	19-FCB-2050, Fast progress		
	CO ₂ -eq	-62% vs. CONV-2050	-74% vs. CONV-2002
	NO _x -eq	-57% vs. CONV-2050	-71% vs. CONV-2002
	Cu-eq	+1763% vs. CONV-2050	+1092% vs. CONV-2002

Tabelle 10 Vergleich zu Umweltwirkungen der 9-Sitzer PTE und FCB gegenüber der CONV im gleichen Marktetablierungsjahr.



Cessna 208B  https://cessna.txtav.com/en/turboprop/caravan	9-PTE-2025, Keep moving forward	
	CO ₂ -eq	+13% vs. CONV-2025
	NO _x -eq	+6% vs. CONV-2025
	Cu-eq	+17% vs. CONV-2025
	9-FCB-2050, Wind of change	
	CO ₂ -eq	-60% vs. CONV-2050
	NO _x -eq	-54% vs. CONV-2050
	Cu-eq	+2094% vs. CONV-2050
	9-FCB-2050, Fast progress	
	CO ₂ -eq	-57% vs. CONV-2050
	NO _x -eq	-51% vs. CONV-2050
	Cu-eq	+2042% vs. CONV-2050

Tabelle 11 Vergleich zu Umweltwirkungen der 50-Sitzer PTE und FCB gegenüber der CONV im gleichen Marktetablierungsjahr.

ATR 42-500  https://airline-club.fandom.com/wiki/ATR-Regional	50-PTE-2025, Keep moving forward	
	CO ₂ -eq	-5% vs. CONV-2025
	NO _x -eq	-1% vs. CONV-2025
	Cu-eq	+21% vs. CONV-2025
	50-FCB-2050, Wind of change	
	CO ₂ -eq	-50% vs. CONV-2050
	NO _x -eq	-41% vs. CONV-2050
	Cu-eq	+2424% vs. CONV-2050
	50-FCB-2050, Fast progress	
	CO ₂ -eq	-46% vs. CONV-2050
	NO _x -eq	-38% vs. CONV-2050
	Cu-eq	+2364% vs. CONV-2050

Die Zukunftsszenarien zeigen unter der prädiktiven Entwicklung im kurzen Zeithorizont 2025 und zwei explorativen Entwicklungen im entfernten Zeithorizont 2050 für alle Flugzeuge die emissionsbezogenen und materialbasierten Umweltwirkungen für das jeweilige Marktetablierungsjahr des elektrischen Fliegens auf.

Bei allen drei Flugzeugtypen zeigt sich für das Wasserstoffflugzeug FCB, dass die Umweltwirkungen in den Kategorien Klimawandel und Photochemische Ozonbildung reduziert werden können, wenn ein dekarbonisierter Wasserstoff mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien in der Herstellung verwendet wird. Je nach Flugzeugtyp liegen die Emissionsreduktionen bei etwa 40% bis 60% im gleichen Marktetablierungsjahr. Dagegen treten in der Kategorie Mineralischer Ressourcenverbrauch für die FCB im Vergleich bei allen 9-/19-/50-Sitzer Flugzeugen deutlich höhere Umweltwirkungen auf. Trotz dieser nicht-intendierten Nebenwirkung kann in zwei von drei Wirkungskategorien eine größere ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber der CONV erzeugt werden.

Für die geringfügig elektrifizierte PTE variieren die Ergebnisse stärker. Die Cessna 208B-PTE erreicht aufgrund des fehlenden „electric taxiing“ am Boden und der ausschließlichen Kerosinverwendung keine Vorteilhaftigkeit gegenüber der herkömmlichen Alternative. Auch die ATR 42-500-PTE erzeugt nur

geringe Verbesserungen in den emissionsbasierten Kategorien und eine sichtbare Verschlechterung in der Materialkategorie. Nur für die Beechcraft 1900D-PTE kann die ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber der CONV im selben Marktetablierungsjahr erreicht werden mit Emissionsreduktionen von knapp 10% und unter einer geringen Zunahme der Umweltwirkung aus dem Rohstoffeinsatz.

Zur Einschätzung der abschließenden Resultate sind die dargestellten Einschränkungen für Projektphase B zu berücksichtigen: Modellstruktur und Lebenswegdaten, abgesehen von den Primärdaten aus der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO, basieren auf dem realen Referenzflugzeug Beechcraft 1900D. Die Modelle der 9-Sitzer und 50-Sitzer beruhen zwar auf den individuellen Simulationsdaten der Komponentengewichte und Kraftstoffverbräuche, geben jedoch den spezifischen Lebensweg in einzelnen Parametern wie Materialverteilungen nicht hinreichend wieder. Folglich stellt nur Projektphase A eine belastbare LCA nach dem Standard der ISO Norm 14040/14044 dar (DIN EN ISO 14040:2009-11; DIN EN ISO 14044:2006-10), die in den drei Projektjahren primär von allen Partnern erforscht wurde, sodass nur diese zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden sollte.

Um die Ergebnisse der Projektphase A noch weitergehend für eine Entscheidungsunterstützung aufzubereiten, ist für die 19-Sitzer Flugzeuge zusätzlich ein Benchmarking mit existierenden Zielvorgaben und dem Status Quo sinnvoll, um Veränderungen zu dem real im Markt befindlichen Flugzeug aufzuzeigen. Als Zielvorgaben werden die europäischen Zielsetzungen des Flightpath 2050 von 75% THG-Reduktion und 90% NO_x-Reduktion gegenüber typischer neuer Flugzeuge im Jahr 2000 bis zum Jahr 2050 herangezogen (EU COM 2011). Die PTE erreicht im 2025 Zukunftsszenario „Keep moving forward“ eine Verbesserung von -29% CO₂-eq, -26% NO_x-eq sowie -12% Cu-eq und zeigt eine bessere Performance in allen betrachteten Wirkungskategorien als die aktuell eingesetzte Beechcraft 1900D aus dem Jahr 2002. Für die FCB sind in den 2050 Zukunftsszenarien „Wind of change“ und „Fast progress“ Verbesserungen zwischen -74% bis -77% THG-Reduktionen und -71% bis -72% NO_x-Reduktionen möglich, sodass die anvisierten Emissionsziele aus (EU COM 2011) weitestgehend erreichbar sind. Der mineralische Ressourcenverbrauch erhöht sich dagegen zwischen +1092% bis +1149% stark im Vergleich zur Referenzmaschine. Die Ergebnisse zeigen gegenüber (EU COM 2011) auf, dass das elektrische Fliegen, das im Projekt GNOSIS für die Flugzeugentwürfe PTE und FCB untersucht wurde, zu den gewünschten Emissionsreduktionen führen kann. Jedoch kann elektrisches Fliegen auch zur Verschlechterung der Zielvorgaben führen, besonders, wenn keine Dekarbonisierung der berücksichtigten Energieträger wie Strom und Wasserstoff erfolgt. Die detaillierte Gegenüberstellung zu den Zielsetzungen des Flightpath 2050 kann dem Ökobilanz-Bericht in Kapitel 5.2.5 entnommen werden.

Aus dem Flugzeugvergleich und dem Benchmarking mit den Zielvorgaben des Flightpath 2050 können für die Ökobilanz-Ergebnisse von Projektphase A Empfehlungen formuliert werden. Es kann festgehalten werden, dass elektrisches Fliegen nur dann zu größeren Umweltverbesserungen führt, wenn die Herstellungswege der Energieträger bis zum Jahr der Markteinführung größtenteils dekarbonisiert sind. Außerdem sind längere Lebensdauern der Komponenten und höhere Recyclingraten erforderlich. Die Auswirkungen auf das Klima und die menschliche Gesundheit können durch elektrisches Fliegen verringert werden. Dagegen sind bei den Ressourcen aufgrund des höheren Materialverbrauchs in den Flugzeugen z.B. aufgrund von kritischen Rohstoffen sowie einem zusätzlichen Materialverbrauch in den Vorketten der erneuerbaren Erzeugungstechnologien wie PV und Wind hohe zukünftige Auswirkungen

zu erwarten, unabhängig davon, ob die Ökobilanz-Ergebnisse den Status Quo oder eine mögliche Zukunftsentwicklung abbilden. Erkenntnisse zu den Umweltwirkungen sind, dass durch die unterschiedlichen Zeithorizonte beide Flugzeugalternativen zur Marktreife gebracht werden sollten, da die PTE im kurzen Zeithorizont moderates Verbesserungspotenzial beinhaltet und die FCB im entfernten Zeithorizont hohes Verbesserungspotenzial zur Emissionsreduktion, jedoch zu Lasten eines hohen Materialbedarfs. Im KMF Szenario erreicht die Beechcraft 1900D-PTE knapp 30% THG-Reduktion und die Beechcraft 1900D-FCB in den WOC bzw. FP Szenarien etwa 75% THG-Reduktion gegenüber der CONV-2002. Die Nutzenphase besitzt mindestens 95% Anteil an den emissionsbasierten Umweltwirkungen, sodass bei Flugzeugen weiterhin ein Fokus auf die Energieträger und Energieeffizienz im Betrieb gelegt werden muss. Flugzeugherstellung und Lebensende besitzen zwar einen höheren, aber noch keinen signifikanten Beitrag am Endergebnis. Die materialbasierten Umweltwirkungen zeigen zu mehr als zwei Drittel Auswirkungen in der Nutzenphase durch den hohen Energieträgereinsatz über die lange Lebensdauer der Flugzeuge und deren vorgelagerte Bereitstellung, sodass der Materialbedarf aus der Energieträgervorkette, aber auch der hochspezialisierten Rohstoffe wie kritische Rohstoffe und Nickel u.a. im Antriebsstrang zu reduzieren sind.

Das vergleichende Abschlussresultat ergibt, dass die FCB nur zur Klimawirkung und Gesundheitswirkung Vorteile gegenüber der CONV hat. Die Cessna 208B-PTE zeigt keine Vorteilhaftigkeit, die ATR 42-500-PTE nur geringe Emissionsverbesserungen und die Beechcraft 1900D-PTE höhere Verbesserungen für CO₂-eq und NO_x-eq. Da diese Reduktionspotenziale nicht an die FCB heranreichen, ist das Wasserstoffflugzeug aufgrund fehlendem Kerosineinsatz als Technologieentwurf vielversprechender. Zudem können die Ziele des Flightpath 2050 größtenteils erreicht werden. Da der Energieverbrauch insbesondere im Reiseflug die höchsten Umweltwirkungen insgesamt erzeugt, gilt für konventionelle und elektrifizierte Flugzeuge weiterhin als wichtigste Maßnahme, den Energieeinsatz zu reduzieren. Für diese Maßnahme ist ein größerer Einsatz von CFK, welches eine schwere Rezyklierbarkeit aufgrund einer möglichen Krebserregung der Fasern aufzeigt, sowie mehr kritische Rohstoffe im Flugzeug tolerierbar, um als oberstes Ziel die Klimaziele des Flugsektors zu erreichen und auch in Zukunft einen luftbasierten Personentransport zu ermöglichen.

AP 3.3 - Synthese

In der durchgeführten Ökobilanz wurden zukünftige Technologieoptionen für die im Vorhaben GNOSIS betrachteten drei Referenzflugzeuge untersucht:

- 19-Sitzer Beechcraft 1900D
- 9-Sitzer Cessna 208B
- 50-Sitzer ATR 42-500

Die ökobilanzielle Untersuchung des Referenzflugzeugs 19-Sitzer Beechcraft 1900D war Gegenstand der Projektphase A und konnte daher auf Basis einer umfassenden und validen Datenbasis aus den Arbeiten der Projektpartner untersucht werden. Im Unterschied dazu konnten die beiden anderen Referenzflugzeuge nur anhand eines ersten Entwurfs aus der Projektphase B von GNOSIS und unter Nutzung von Annahmen aus Projektphase A untersucht werden.

Für alle drei Referenzflugzeuge wurden entsprechend der im Vorhaben GNOSIS entwickelten Konzeptionen die folgenden beiden zukünftigen Technologieoptionen betrachtet:

- partiell-turboelektrisches Flugzeug (PTE), bei welchem der Rollvorgang auf dem Boden elektrifiziert abläuft
- brennstoffzellenbetriebenes Flugzeug (FCB), bei welchem eine vollelektrische Mission durchgeführt wird

Als Teil der ökobilanziellen Untersuchungen wurde ein Szenariokonzept entwickelt, durch das ein aussagekräftiger Vergleich zwischen diesen beiden Technologieoptionen und dem Referenzzustand eines konventionellen Betriebs der drei Referenzflugzeuge ermöglicht wird. In diesem Szenariokonzept wird der entsprechende Referenzzustand ebenfalls auf die neuartigen Technologien bezogen und daraufhin Szenarien für das Marktetablierungsjahr einbezogen anhand der Entwicklung von Hintergrundsystemen, v.a. Energiemix und Recyclingraten, sowie einer evolutionären Vordergrundsystem Entwicklung der konventionellen und neuartigen Technologie. Das Szenariokonzept ist eine wesentliche Unterstützung der konkreten Arbeiten für die Analyse der Technologieoptionen in GNOSIS. Gleichzeitig stellt es eine methodische Weiterentwicklung im Bereich der prospektiven Ökobilanz dar, das übergreifend für andere Technologien im Bereich der Mobilität und darüber hinaus eingesetzt werden kann. Insofern ist dieses Szenariokonzept ein wesentliches und innovatives wissenschaftliches Ergebnis der Arbeitspakete des FG SuR.

Die Datenerhebung für die Sachbilanz umfasste die Übernahme der Daten der Projektpartner, die Recherche und Auswertung von Literatur und die Entwicklung von Schätzungen, wo notwendig. Sie berücksichtigte zur Operationalisierung des beschriebenen Szenariokonzepts darüber hinaus verschiedene Datenmodifikationstechniken für die Ableitung von Datensätzen für zukünftige Zustände. Die ökobilanzielle Bewertung erfolgte für die drei Wirkungskategorien „Klimawandel“, „Photochemische Ozonbildung“ und „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ auf Basis der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 (Huijbregts et al. 2017).

Wesentliche Fragestellungen der ökobilanziellen Betrachtung waren innerhalb jedes Referenzflugzeugs der Einfluss unterschiedlicher Lebenszyklusphasen (Herstellung, Nutzung, Entsorgung), mögliche gegenläufige Effekte unterschiedlicher Wirkungskategorien und der Vergleich zwischen Referenzzustand und zukünftigem Zustand. Abschließend wurden die verschiedenen Technologieoptionen gegeneinander und in einem Benchmarking zu Zielsetzungen verglichen. Einerseits konnten insgesamt 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. 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, welche für die weitere Entwicklung bzw. Optimierung der Technologien genutzt werden können und Handlungsmöglichkeiten aufzeigen.

Auf Basis der ausführlichen Untersuchung des 19-Sitzer Kleinflugzeugs werden im Ökobilanz-Bericht in Kapitel 5.3 detaillierte Schlussfolgerungen und Empfehlungen für elektrisches Fliegen formuliert.

In der Synthese des vorliegenden Schlussberichts kann festgestellt werden, dass für die untersuchten Wirkungskategorien als Stellschrauben drei relevante Szenario-Parameter identifiziert wurden, diese sind die „Regenerative Energien Anteilserhöhung“ im Strommix, die „Lebensdauererhöhung“ von Komponenten und die „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.

Die Einflüsse dieser drei relevanten Parameter können wie folgt zusammengefasst werden:

Regenerative Energien Anteilserhöhung im Strommix

- Die wesentliche Rolle der Energieträger für den Personentransport in den Wirkungskategorien „Klimawandel“ und „Photochemische Ozonbildung“ wurde bestätigt. Insbesondere zeigte sich, dass auch bei den zukünftigen Technologieoptionen unter Einsatz dekarbonisierter Energieträger die Nutzenphase mindestens einen Anteil von 95% an den emissionsbasierten Umweltwirkungen besitzt. Der Betrieb resultiert für die PTE hauptsächlich aus Kerosin und nebensächlich aus Strom und für die FCB hauptsächlich aus flüssigem Wasserstoff und nebensächlich aus Strom, wobei die direkte Stromnutzung weitestgehend vernachlässigbar ist, da diese zu unter 5% im gesamten Produktsystem beiträgt. Der hohe Einfluss der Nutzenphase ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Hintergrundsystem der Materialien für regenerative Energieerzeugungstechnologien wie Windkraft im Zieljahr 2050 noch der 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.
- Als bestmöglicher Fall zur Optimierung des Parameters „Regenerative Energien Anteilserhöhung“ wurde für das brennstoffzellenbetriebene Flugzeug 100% Windstrom für die Erzeugung von Wasserstoff aufgezeigt. Hierbei ergeben sich schon ohne alle weiteren Zukunftsverbesserungen der Technologie THG-Reduktionen in der Größenordnung von 80%, mit allen weiteren Zukunftsverbesserungen können bis zu 88% THG-Reduktionen gegenüber dem entsprechenden Referenzzustand erreicht werden.
- Als Einzelaspekt für den Parameter „Regenerative Energien Anteilserhöhung“ zur Herstellung des alternativen Kraftstoffs Wasserstoff wurden zusätzlich alternative Kraftstoffe als Kerosinsubstitut untersucht. Für einen hybriden Übergang von kerosinnutzenden zu rein elektrischen Flugzeugen könnte der Einsatz von biobasiertem Kraftstoff auf Basis von Gülle eine THG-Reduktion in 2025 von 69% und 2050 von bis zu 83% erzeugen. Für synthetischen Kraftstoff aus Power-to-Liquid könnte in 2025 mit 119% mehr THG-Emissionen keine Verbesserung gegenüber Kerosin erzeugt werden, jedoch in 2050 sind 62% THG-Reduktionen möglich. Dies ist auf den jeweils zugrunde gelegten Strommix zurückzuführen. Diese und weitere Analysen der signifikanten Parameter wurden in Kapitel 4.3 und 5.1 des Ökobilanz-Berichts durchgeführt.

Lebensdauererhöhung von Komponenten/Recyclinginputrateerhöhung zum Lebensende

- Der Rohstoffbedarf über den Flugzeuglebensweg äußert sich für das Vordergrundsystem in der Herstellung und zum Lebensende und im Hintergrundsystem in den Vorketten der Energieträger. Grundsätzlich zeigt sich, dass je ehrgeiziger ein Szenario und je größer die Einsparungen in den Wirkungskategorien „Klimawandel“ und „Photochemische Ozonbildung“ sind, desto höher wird der vorgelagerte Rohstoffeinsatz der Kategorie „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ für den Betrieb elektrischer Flugzeuge. Zusätzlich zum herausragenden Beitrag von Energieträgern in der Nutzenphase haben Änderungen des Rohstoffbedarfs im Flugzeug einen größeren Einfluss auf das Gesamtergebnis aller Kategorien, besonders der Einsatz kritischer Rohstoffe. Daher bietet neben Maßnahmen zu Design/Konstruktion und Recycling der ersten und letzten Lebensphase sich eine wesentliche Handlungsmöglichkeit in der „Lebensdauererhöhung“ von Komponenten.
- Die untersuchten elektrifizierten Technologieoptionen sind, um die Sicherheit während einer durchgehenden Flugmission zu gewährleisten, durch geringe Lebensdauern der Komponenten im elektrischen Antrieb gekennzeichnet; dies betrifft insbesondere Elektromotoren im Fall des partiell-turboelektrischen Betriebs sowie Brennstoffzellen, Batterie und Wasserstofftank für das brennstoffzellenbetriebene Wasserstoffflugzeug. Die mehr als 2,6 Tonnen Materialeinsatz des elektrischen Antriebs in der FCB werden zusätzlich durch geringe Lebensdauern von z.B. unter einem Jahr der Lithium-Schwefel-Batterie für den Referenzzustand im Jahr 2023 auf ein Vielfaches des Materialbedarfs über 20 Jahre Flugzeuglebensdauer gesteigert, woraus über den Lebensweg insgesamt der zehnfache Rohstoffbedarf der FCB gegenüber der CONV entsteht. Die Untersuchung des relevanten Parameters „Lebensdauererhöhung“ zeigt auf, dass im FP-Szenario beispielsweise durch eine geringere Austauschhäufigkeit der Lithium-Schwefel-Batterie 67% von deren benötigten Rohstoffen eingespart werden können.
- Die Sensitivitätsanalyse zum Recyclinganteil kann mit 90% „Recyclinginputrateerhöhung“ der FCB zusätzlich Einsparungen von Primärmaterial mit berücksichtigtem Korrekturfaktor von 94% Aluminium, 84% Stahl, 63% Edelmetalle und 70% Polymere erreichen. Aus dieser Maßnahme in der letzten Lebensphase reduzieren sich die THG-Emissionen und Rohstoffe, wie Kapitel 4.3 des Ökobilanz-Berichts aufzeigt. Bezogen auf den großen Materialeinsatz im Status Quo der FCB werden Reduktionen von 1621% CO₂-eq und 320% Cu-eq für die Prozesse C1-C4 erhalten, die zu einem nicht unerheblichen Beitrag die Umweltwirkungsergebnisse insgesamt reduzieren.
- In der materialbasierten Wirkungskategorie haben die Parameter von höheren Nutzungsdauern und Recyclingquoten vor allem einen Einfluss auf die Materialien Nickel und Kupfer sowie bei den kritischen Rohstoffen auf die Elemente Titan, Kobalt, Neodym und Lithium. Die umgesetzte „Lebensdauererhöhung“ und „Recyclinginputrateerhöhung“ trägt zusammen mit allen Szenario-Parametern für alle Materialien insgesamt zu einer Verbesserung der Kategorie „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ im Umfang zwischen 45% und 74% im WOC-Szenario sowie 58% und 61% im FP-Szenario je für die erste und letzte Flugzeuglebensphase bei. Die Zukunftsannahmen von Lebensdauererhöhung bzw. Recyclingmix von Abbildung 6 bzw. 5 berücksichtigen daher primär die wichtigsten Rohstoffgruppen Aluminium, Stahl, Edelmetalle und Polymere, in die alle Materialien des Flugzeugs eingeordnet werden können. Als Konsequenz ist für das zukünftige Recycling zu berücksichtigen, dass rezyklierbare Materialien mit der Möglichkeit einer einfachen, kostengünstigen Trennbarkeit bereits jetzt in den Flugzeugentwurf integriert werden.

Abschließend wurden ein Technologievergleich und ein Benchmarking für die drei entwickelten Zukunftsszenarien durchgeführt. Hieraus ergeben sich die folgenden Aussagen:

- Die brennstoffzellenbetriebene Technologievariante zeigt für alle drei Referenzflugzeuge die größten Vorteile zur Klimawirkung und Gesundheitswirkung. Die partiell-turboelektrische Technologievariante zeigt im Fall der Beechcraft 1900D-PTE ebenfalls Verbesserungen, die aber geringer als für die FCB ausfallen. Für die Cessna 208B-PTE ergibt sich gar keine Vorteilhaftigkeit und für die ATR 42-500-PTE nur geringe Emissionsverbesserungen. Grund für das schlechte Abschneiden des partiell-turboelektrischen Flugzeugs ist der nach wie vor hohe Kerosineinsatz auf Basis fossiler Rohstoffe. Dieser Befund ist besonders ausgeprägt bei der Cessna 208B-PTE aufgrund des hier fehlenden „electric taxiing“ am Boden. Als Konsequenz kommt der teilelektrische Betrieb nur dann infrage, falls zukünftig biobasierte oder synthetische Kraftstoffe mit einer sehr verbesserten THG Bilanz bereitstehen. Dieser Aspekt konnte aber im Rahmen der durchgeführten Arbeiten nicht weiter untersucht werden.
- Europäische Zielsetzungen im Flightpath 2050 zu 75% THG-Reduktion und 90% NO_x-Reduktion können für das brennstoffzellenbetriebene Flugzeug in den zwei entwickelten Zukunftsszenarien von 2050 über den Lebensweg für THG in etwa erreicht werden, für NO_x liegen die erreichbaren Reduktionen nur in der Größenordnung von 70%. Der zugrundeliegende Strommix wurde in den beiden Zukunftsszenarien WOC und FP auf Basis von 96% bzw. 94% regenerativen Energien angenommen, wie Abbildung 4 zeigt. Der mineralische Ressourcenverbrauch erhöht sich hierbei um etwa den Faktor 10 (vgl. Tabelle 9).

Weiterer Forschungsbedarf besteht in Gebieten, die im Rahmen des Verbundprojekts GNOSIS und dieser darauf basierenden Ökobilanz nicht untersucht werden können. So zeigt der Befund, dass für das Erreichen klimapolitischer Ziele ein deutlich erhöhter Rohstoffbedarf in Kauf genommen werden muss. Über die in der vorliegenden Ökobilanz untersuchten Möglichkeiten der Lebensdauerverlängerung und des Recyclings hinaus ergibt sich die Dringlichkeit von weiteren grundsätzlichen konstruktiven und materialwissenschaftlichen Innovationen, z.B. in den Bereichen Leichtbau oder Substitution kritischer Rohstoffe. Auch für solche 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. Zur Weiterentwicklung eines teilelektrifizierten Flugzeugs wurden in der vorliegenden Ökobilanz elektrische Rollvorgänge als eine erste Möglichkeit identifiziert, um Umweltwirkungen zu vermindern. Darüber hinaus zeigt erst eine Vollelektrifizierung gewünschte Verbesserungspotenziale zur Erreichung übergeordneter Zielsetzungen im Flugsektor auf. Das große Gebiet dekarbonisierter Kraftstoffe konnte mit dieser Forschung noch nicht beleuchtet werden. Hierbei sind zukünftig neue Entwicklungen zu berücksichtigen sowie beispielsweise 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. Aus der 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 den aufgezeigten vielfältigen Ebenen benötigen.

II.1.2. Ergebnisse FSR

AP 1.1 - Technologieidentifikation und –auswahl

Im Rahmen des AP 1.1 wurden basierend auf Rechercharbeiten und dem Wissen aus vorherigen Projekten vier operationelle „Technologien“ identifiziert, die für die Technologieauswahl in Frage kommen:

- Steilabflug mit elektrischem Boost
- Steilanflug mit Rekuperation
- Sinkflug mit ausgeschaltetem Motor
- Rollen mit einem elektrischen Antrieb im Fahrwerk (electric taxiing)

Im Folgenden werden die einzelnen Technologien kurz vorgestellt. Als konventionelles Referenzflugzeug wurde im Projektkonsortium die 19-sitzige Beechcraft 1900D ausgewählt. Für die Bewertung der Technologien wurde eine quantitative Abschätzung der Veränderung der quantitativen Abschätzung auf die Veränderung der globalen Emissionen (CO_2), lokalen Emissionen (NO_x), Betriebskosten und des Lärms durchgeführt.

Steilabflug mit elektrischem Boost

Steilabflüge werden mit einem größeren Gradienten als dem Standard-Steiggradienten von 3,3% durchgeführt, der bereits 0,8% Steigung als Sicherheit zu Hindernissen beinhaltet. Für Flüge nach Instrumentenflugregeln (IFR) werden in den Procedures for Air Navigation Services (PANS-OPS) der ICAO Steilabflüge in der Noise Abatement Departure Procedure (NADP) 1 beschrieben (siehe Abbildung 13). Diese kann für eine Lärmreduzierung in unmittelbarer Nähe zur Startbahn angewendet werden. (International Civil Aviation Organization (ICAO))

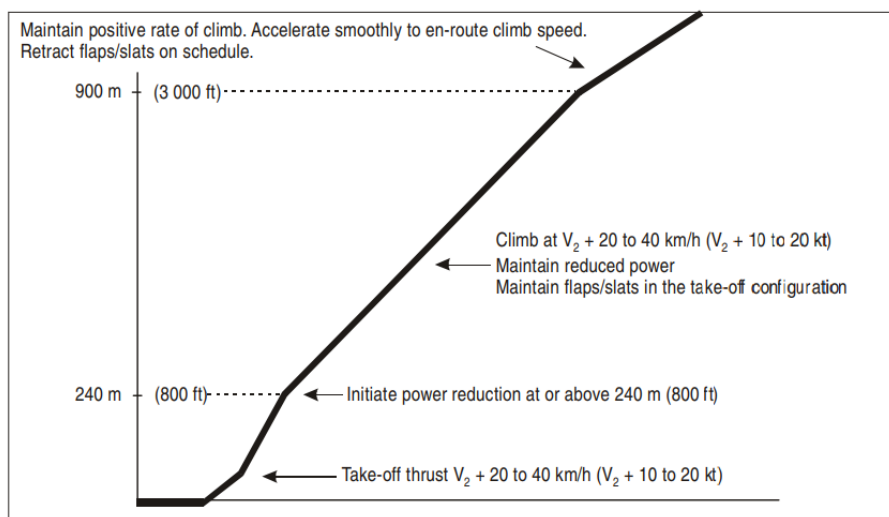


Figure I-7-3-App-1. Noise abatement take-off climb — Example of a procedure alleviating noise close to the aerodrome (NADP 1)

Abbildung 13 ICAO Noise Abatement Departure Procedure (NADP) 1.

Erst ab einer Höhe von 800 ft über der Startbahn darf das NADP 1 Verfahren eingeleitet werden, um bei einem Triebwerksausfall die entsprechenden Notfallverfahren bis zu dieser Höhe einleiten zu können. Ab einer Flughöhe von 800 ft wird die Triebwerksleistung von Maximum Take-off auf Maximum Continuous reduziert, wobei die Geschwindigkeit unverändert oberhalb von $V_2 + 10 \text{ kt}$ liegen soll. Erst in einer Flughöhe von 3000 ft werden die Klappen eingefahren. (International Civil Aviation Organization (ICAO))

Für die Beechcraft 1900D mit einer Masse von 7688 kg und einem Klappenausschlag von 17° beträgt die Stallgeschwindigkeit V_{S1} 90 Knoten Indicated Air Speed (IAS) (Raytheon Aircraft Company 2001). Damit ergibt sich nach (ASTM International 2020) $V_2 = 1,2 \cdot V_{S1}$ zu 108 Knoten. Tabelle 12 zeigt die resultierenden Parameter für das Abflugverfahren NAPD 1.

Tabelle 12 Parameter des Referenzflugzeugs Beechcraft 1900D für das NADP.

	Flughöhe	Geschwindigkeit	Engine Power	Flaps
1. Segment	< 800 ft	$V_2 + 10 \text{ kt}$ (118 kt)	Max. Take-off (954 kW)	Take-off (17°)
2. Segment	800 ft – 3000 ft	$V_2 + 10 \text{ kt}$ (119 kt)	Max. Continuous (906 kW)	Take-off (17°)

Im zweiten Steigsegment muss bei einem konventionellen Antrieb auf Grund der Belastungsgrenze des Triebwerks der Schub von Maximum Take-off auf Maximum Continuous reduziert werden. Durch einen elektrischen Antrieb könnte die resultierende Reduktion des Schubs ausgeglichen und im zweiten Steigsegment konstant mit der Leistung von Maximum Take-off gestiegen werden.

Mit Hilfe der Leistungsdaten der Beechcraft 1900D (Raytheon Aircraft Company 2001) kann der Steigwinkel für ein konventionelles NADP und ein elektrisches NADP, bei dem bis 3000 ft mit maximaler Startleistung geflogen werden könnte, berechnet werden. Aufgrund der geringen zusätzlichen elektrischen Leistung würde der Steigwinkel sich lediglich um $0,4^\circ$ von $12,1^\circ$ auf $12,14^\circ$ vergrößern, wodurch keine Lärm- oder Emissionsreduktionen erreicht werden. Deshalb wurde dieses Verfahren in der Technologieauswahl zunächst verworfen.

Steilanflug mit Rekuperation

Durch den Einsatz elektrisch angetriebener Propeller ergibt sich das Potential in Flugphasen die keinen bzw. nur sehr geringen Schub benötigen ein Teil der Energie über die Anströmgeschwindigkeit der Propeller zu rekuperieren. Die Propeller werden als Windmühlen genutzt und die Motoren im Generatormodus betrieben, weshalb das Verfahren auch als Windmilling bezeichnet wird.

Neben der Möglichkeit der Rekuperation kann durch den Betrieb im Windmilling der Widerstand des Flugzeugs erhöht werden, wodurch steilere Anflüge ermöglicht werden, die den Lärm unter dem Anflugpfad reduzieren können (siehe Abbildung 14). Der Standardanflugwinkel beträgt 3° . Anflüge mit einem Anflugwinkel von $4,5^\circ$ bis $7,5^\circ$ werden als Steilanflüge bezeichnet. (Civil Aviation Authority 2008; European Union Aviation Safety Agency (EASA) 2019)

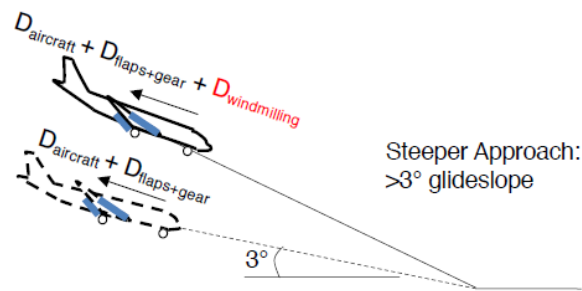


Abbildung 14 Standard Anflug mit 3° im Vergleich zum Steilanflug mit Windmilling (Thomas und Hansman 2020).

In der Literatur wird Rekuperation im Sinkflug in (Erzen et al. 2018) und (Thauvin et al. 2016) untersucht. In (Erzen et al. 2018) wird ein zweisitziges Schulungsflugzeug (Pipistrel Alpha Electro) betrachtet, bei dem Rekuperation bereits in Flugversuchen umgesetzt wurde. Mit einem Standardpropeller konnte 2,88% der potentiellen Energie des Flugzeugs zu Beginn des Sinkflugs zurückgewonnen werden. Durch ein optimiertes Propellerdesign konnte die Energieausbeute auf 33,3% gesteigert werden. (Thauvin et al. 2016) gibt in einer simulativen Studie für ein hybrid-elektrisches Regionalflugzeug eine Energierückgewinnung von 4% an, macht jedoch auch deutlich, dass ein Anflug mit Rekuperation nicht die effizienteste Nutzung der potentiellen Energie des Flugzeugs darstellt, wenn die Sinkflugzeit nicht beschränkt ist. In diesem Fall ist ein Sinkflug mit der Geschwindigkeit der optimalen Gleitzahl energieeffizienter.

Die Reduktion des Fluglärms durch einen steileren Anflugwinkel, durch Windmilling wurde u.a. in (Thomas und Hansman 2020) simulativ untersucht. Durch die Erhöhung des Anflugwinkels von 3° auf 4,6° wurde eine Reduktion des Lärms um 4-6 dB am Boden berechnet. Mit Hilfe einer empirischen Formel für Turbopropflugzeuge nach (Galloway und Wilby 1981) konnte das Lärmreduktionspotential für Steilanflüge ebenfalls zu ca. 5 dB bestimmt werden.

Die Voruntersuchungen in AP 1.1 zeigen ein geringes Energierückgewinnungspotential des Windmillings, aber ein erhebliches Potential in der Reduktion des Fluglärms. Aus diesen Gründen wurde das Verfahren für eine detaillierte Betrachtung in AP 2.7 ausgewählt.

Sinkflug mit ausgeschaltetem Motor

In konventionellen Flugzeugen mit Verbrennungsmotoren bzw. Triebwerken, werden die Motoren im Sinkflug nicht ausgeschaltet. Sie besitzen eine gewisse Warmlaufzeit, wodurch erst mit großer Verzögerung auf notwendige Änderungen der Flugbahn reagiert werden könnte. Diese können z.B. Holdings, Reroutings oder Ausweichmanöver sein (Glasscock et al. 2017). Aufgrund der schlechten Effizienz der Triebwerke im Leerlauf existiert hier ein klares Potential um Treibstoff einzusparen.

Da Elektromotoren keine Warmlaufzeit benötigen, könnten sie in Flugphasen, in denen kein Schub benötigt wird, ausgeschaltet werden und die Propeller in Segelstellung (feathered) gebracht werden. Dadurch wird ein emissionsfreier Segelanflug ermöglicht. Da bei Propellerflugzeugen der Großteil des Lärms durch den Propeller entsteht, kann durch einen Segelanflug mit stillstehendem Propeller außerdem eine große Reduktion des Lärms erreicht werden. Das Verfahren würde die Triebwerkslaufzeit

pro Flug um etwa 15% reduzieren, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass hier zusätzlich Wartungs- und Instandhaltungskosten gesenkt werden können.

Voraussetzung für diese Technologie ist, dass die Motoren jederzeit schnell genug gestartet werden können, um notwendige Änderungen der Trajektorie sicher zu ermöglichen. Der Endanflug und die Landung sollten wieder mit eingeschalteten Triebwerken durchgeführt werden, um bei einem Go-Around die volle Leistung zur Verfügung zu haben. Außerdem müssen in der Zeit, in der das Triebwerk ausgeschaltet ist, alle Systeme an Bord durch einen alternativen Energiespeicher versorgt werden, da sie nicht mehr über den Generator am Triebwerk betrieben werden können.

Für das Referenzflugzeug Beechcraft 1900D wurde ein BADA Flugleistungsmodell implementiert (EUROCONTROL 2009). Damit wurde der Anteil des Treibstoffverbrauchs im Sinkflug der Referenzmission, von Reiseflughöhe bis Beginn des Endanflugs (23000 ft – 2000 ft), zu 9,5% des Gesamtreibstoffverbrauchs bestimmt. Aufgrund des hohen Einsparpotentials und der Tatsache, dass diese Methode in der Literatur bisher wenig untersucht ist, wurde die Technologie für die weitere Betrachtung in AP 2.7 ausgewählt.

Rollen mit einem elektrischen Antrieb im Fahrwerk (electric taxiing)

Durch einen elektrischen Antrieb im Fahrwerk wird, leises, emissionsfreies und eigenständiges Rollen am Boden ermöglicht. Solange die Taxi out und Taxi in Zeiten größer als die minimale Warmlauf- bzw. Cooldownzeit des Triebwerks ist, kann somit der Treibstoffbedarf am Boden gesenkt werden. Es muss ein Radnabenmotor in das Fahrwerk integriert werden und ein elektrischer Speicher zur Versorgung des Antriebs installiert werden.

Mögliche Vorteile sind:

- Weniger Kraftstoffverbrauch am Boden
- Unabhängigkeit von Pushback-Fahrzeugen -> geringere Gebühren, Zeitersparnis
- Geringere Laufzeit der Triebwerke -> gesenkte Wartungskosten
- Weniger Schadstoffemissionen auf dem Flughafengelände -> geringere Gebühren, verbesserte Luftqualität
- Reduzierung des Bodenlärms
- Möglichkeit zur Bremsenergieerückgewinnung

Mögliche Nachteile:

- Durch Elektromotor und Energiespeicher steigt Komplexität und das Leergewicht des Flugzeugs
- Ggf. Payloadreduzierung notwendig
- Auf längeren Strecken mehr Treibstoffbedarf durch zusätzliches Gewicht

Der elektrische Antrieb kann entweder in das Bugrad oder in das Hauptfahrwerk integriert werden. Dabei sind nach (Re 2017) und (Lukic et al. 2018) folgende Vor- und Nachteile zu beachten:

Motor im Bugfahrwerk:

- leichtere Integration, geringere Komplexität (keine Bremsen)
- weniger Traktion durch geringe vertikale Last (ca. 10% Bugrad, 90% Hauptfahrwerk)

- möglicherweise Neudesign der Fahrwerkstruktur notwendig um zusätzliches Gewicht aufnehmen zu können

Motoren im Hauptfahrwerk

- Schwierige Integration, höhere Komplexität (Bremsen)
- gute Traktion durch vertikale Last
- robuste Struktur kann möglicherweise Motorgewicht besser aufnehmen
- Möglichkeit zur Bremsenergierückgewinnung

Im Rahmen des AP 2.2 Systeme wurde eine umfassende Analyse der Betriebsanforderungen für ein electric-taxiing System (ETS) eines Regionalflugzeugs durchgeführt. Für die Ermittlung der Rollzeiten an deutschen Regional- und internationalen Flughäfen wurden statistische Daten von EUROCONTROL (EUROCONTROL 2019) ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13 Zu erwartende Rollzeiten an deutschen Flughäfen für ein Regionalflugzeug.

Phase	min Zeit	Ø Zeit	max. Zeit
Taxi-Out	5,9 min	9,5 min	13,8 min
Taxi-In	2,5 min	4,3 min	6,3 min

Es wurde ein detailliertes Kräftemodell entworfen und implementiert, um die Kraftschlussgrenzen sowie die Traktionskräfte für die gestellten Betriebsanforderungen zu bestimmen. Als Systemarchitektur erwiesen sich zwei direktangetriebene Räder im Hauptfahrwerk am vorteilhaftesten, da bei einem Antrieb im Bugrad, bei schlechten Fahrbahnbedingungen, die notwendige Traktionskraft nicht gewährleistet werden kann. Die ausgewählte Systemarchitektur für das ETS ist in Abbildung 15 dargestellt.

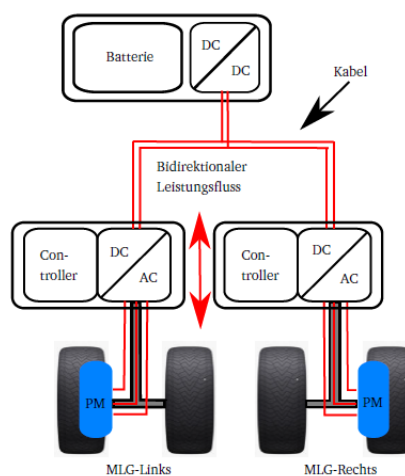


Abbildung 15 Ausgewählte Systemarchitektur für das ETS.

Nach dem Festlegen der Systemarchitektur konnte ein skalierbares Auslegungsmodell für das ETS zur Bestimmung der benötigten elektrischen Leistung, des Drehmoments und der Komponentenmassen entwickelt werden. In Zusammenarbeit mit dem ILR wurde das Modell in die Flugzeugentwicklungsumgebung UNICADO integriert und bereits getestet. Für das Referenzflugzeug wurde der Nennleistungsbedarf der Radnabenmotoren zu $P_M = 2 \times 26.6 \text{ kW}$ bestimmt, wodurch sich ein zusätzliches Gewicht durch das ETS von $m_{ETS} = 80.7 \text{ kg}$ ergibt.

Für die Skalierbarkeit des Modells sind folgende Einschränkungen zu beachten: Bei der Anwendung des Modells auf schwerere Flugzeuge ist zu beachten, dass ab einer gewissen Masse ein Direktantrieb nicht mehr sinnvoll ist, da die Motoren zu groß werden müssten, um das notwendige Drehmoment aufzubringen. Das maximale Drehmoment der ausgewählten ETS-Architektur liegt bei etwa 1000 Nm, welche bei einer Flugzeugmasse von ca. 11000 kg erreicht werden. Darüber hinaus müsste die Massenabschätzung um einen Getriebeanteil erweitert werden. Bei der Skalierung nach unten stellt der verfügbare Bauraum eine limitierende Größe dar. Es ist davon auszugehen, dass es bei Radgrößen unterhalb von 14 Zoll zu Problemen bei der Integration kommen kann.

Um den Einfluss des ETS auf den Treibstoffverbrauch und die Emissionen im Betrieb zu quantifizieren, wurde das in AP 2.7 entwickelte Flugleistungsmodell genutzt. Die tatsächliche Treibstoffreduktion hängt stark von der jeweiligen Mission ab: Je höher der Anteil der gesamten Rollzeit und je geringer die Flugstrecke ist, desto größer ist die Treibstoffreduktion durch electric taxiing. Der Zusammenhang ist in Abbildung 16 dargestellt. Durch das relativ geringe zusätzliche Gewicht beträgt der zusätzliche Treibstoffverbrauch selbst bei Rollzeiten unterhalb der minimalen Warmlauf- und Abkühlzeiten der Triebwerke (d.h. es kann kein elektrisches Rollen genutzt werden) lediglich 0.62%. Es konnte festgestellt werden, dass sich der Kraftstoffvorteil bei einer Gesamtrollzeit unterhalb von 7 Minuten während der Flugphase wieder aufhebt. Für eine durchschnittliche Mission eines 19-Sitzers ist eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs um ca. 4% im Vergleich zur Referenz zu erwarten.

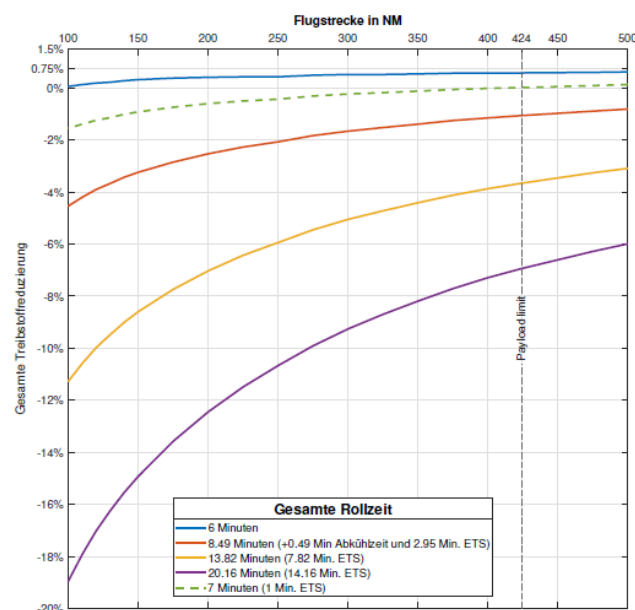


Abbildung 16 Änderung des Treibstoffverbrauchs einer Beechcraft 1900D mit ETS in Abhängigkeit der Rollzeit und der Flugstrecke.

AP 2.7 - Flugbetriebliche Aspekte

Rollen mit einem elektrischen Antrieb im Fahrwerk (electric taxiing)

Trajektoriengenerierung und -Optimierung

Zur Optimierung der Flugtrajektorien wurde in AP 2.7 ein reduziertes Flugleistungsmodell (Aircraft Performance Model APM) entwickelt, in dem sowohl konventionelle, als auch turboelektrische und seriell-hybride Flugzeugkonfigurationen abgebildet werden können.

Es basiert auf der Berechnungsmethodik des BADA-Flugleistungsmodells (EUROCONTROL 2009), welche um hybride Antriebskomponenten und im Detailgrad der Modellierung erweitert wurde. Der Modellaufbau ist in Abbildung 17 dargestellt.

Mit dem Flugleistungsmodell können nicht-konventionelle Flugverfahren, wie Steilanflug mit Windmilling oder Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken untersucht werden.

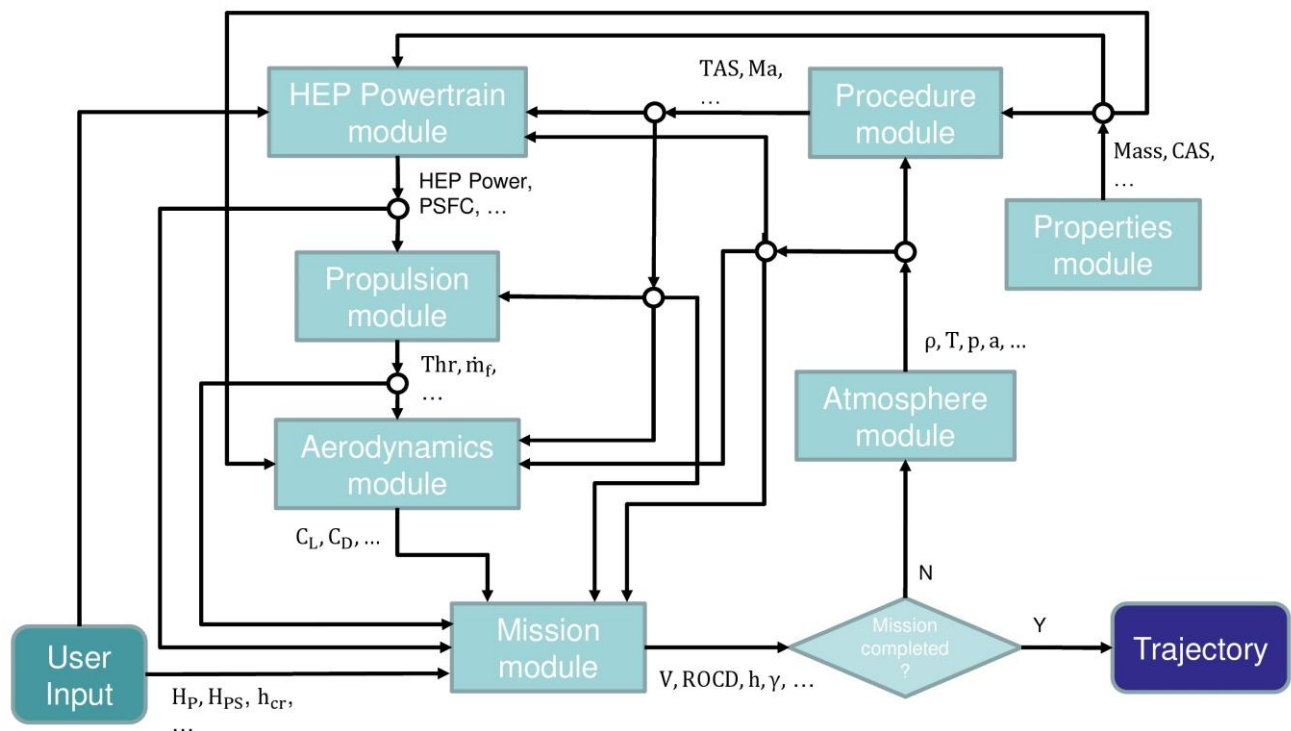


Abbildung 17 Ablaufdiagramm des APMs.

Die verschiedenen Antriebsarchitekturen eines konventionellen, partiell-turboelektrischen und seriell-hybriden Turbopropflugzeugs sind in ihrem Aufbau, den Komponenten und den Wirkbeziehungen in den Abbildungen 18 – 20 dargestellt.

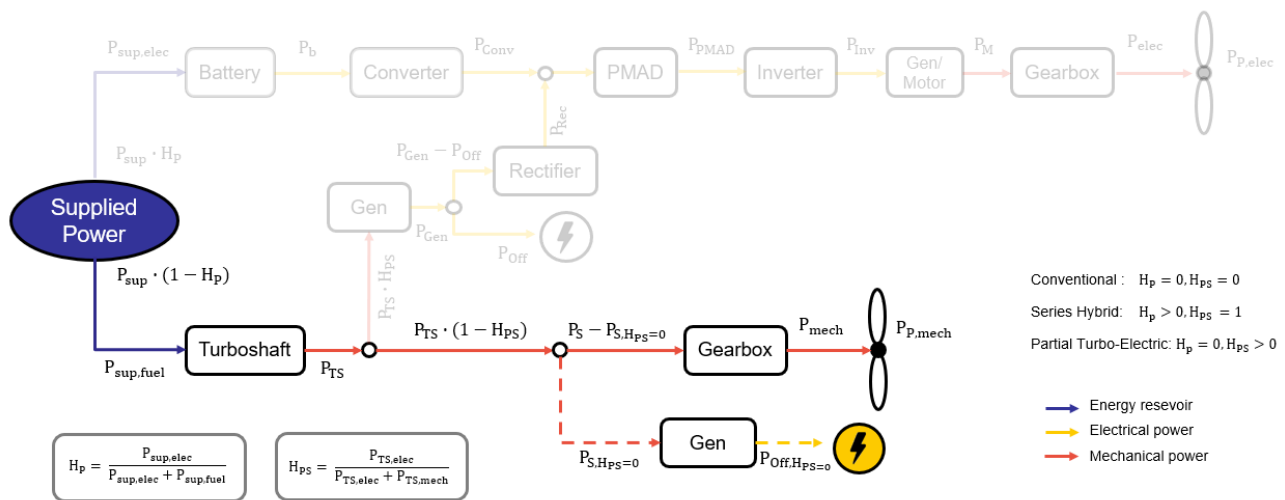


Abbildung 18 Antriebsarchitektur eines konventionellen Turbopropflugzeugs.

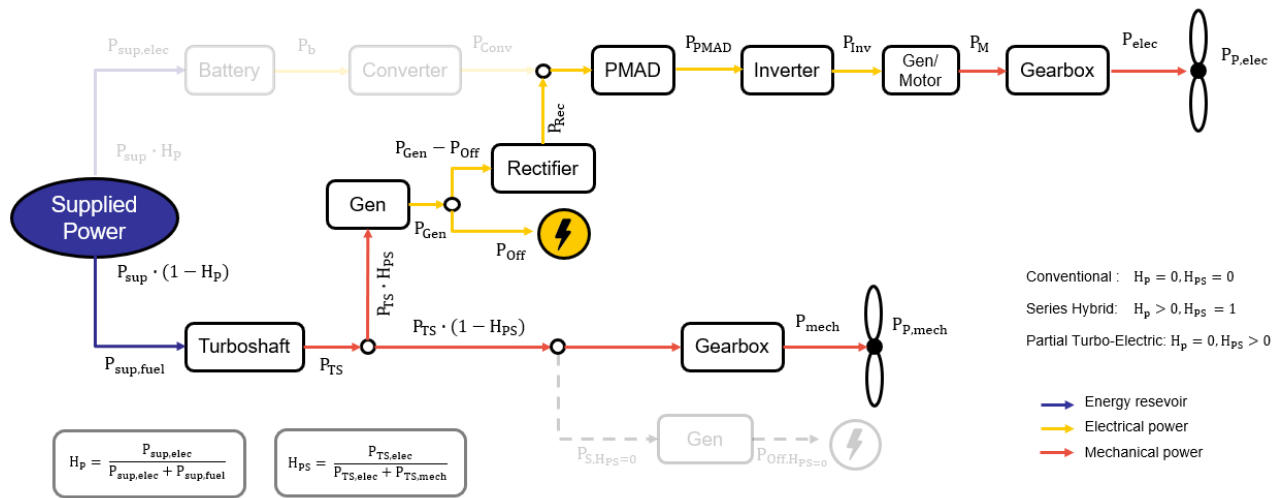


Abbildung 19 Partiell-turboelektrische Antriebsarchitektur.

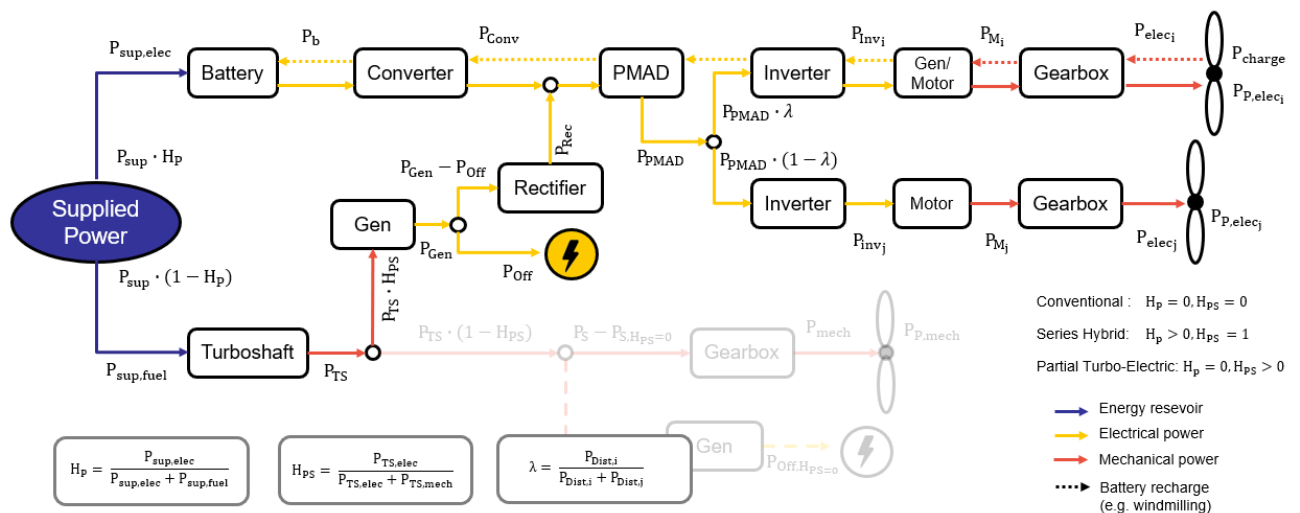


Abbildung 20 Seriell hybride Antriebsarchitektur.

Zur Bewertung der Lärmemissionen unterschiedlicher An- und Abflugtrajektorien wurde ein bestehendes Lärmmodell nach ECAC Doc 29 (European Civil Aviation Conference 2005) implementiert und an die Anforderungen im vorliegendem Projekt angepasst. Durch die Kopplung des APMs mit dem Lärmmodell (siehe Abbildung 21) konnten die Auswirkungen unterschiedlicher An- und Abflugverfahren auf die Lärmemissionen quantifiziert werden.

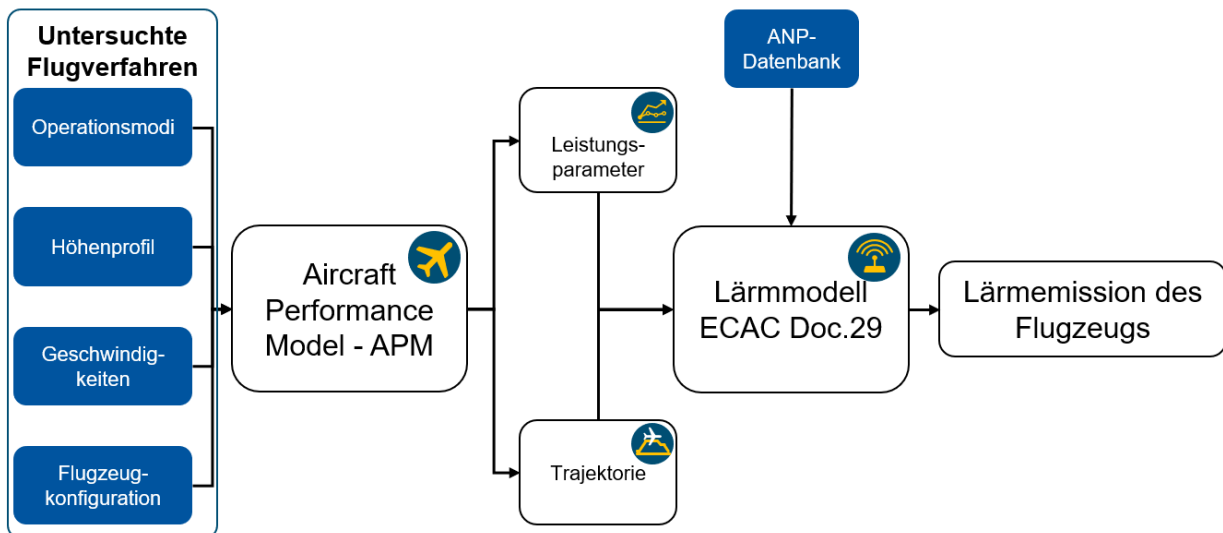


Abbildung 21 Modellstruktur zur Untersuchung der Lärmemissionen.

Das Lärmmodell basiert auf der Aircraft Noise and Performance (ANP) Datenbank, in der empirisch bestimmte Lärmwerte existierender Triebwerkstypen und Flugzeugen hinterlegt sind. Somit können in dem Modell keine konstruktiven Veränderungen am Flugzeug, wie beispielsweise Flächenendpropeller berücksichtigt werden. Alle Aussagen über den Fluglärm innerhalb des AP 2.7 beziehen sich ausschließlich auf den Einfluss der veränderten Trajektorien.

Um die effizienteste Trajektorie für die verschiedenen Flugzeugkonfigurationen zu bestimmen, wurden Simulationen mit Variationen der Fluggeschwindigkeiten in den Flugphasen Initial Climb, Climb, Cruise und Descent sowie Variationen der Reiseflughöhe durchgeführt. In Abbildung 22 ist der Treibstoffverbrauch des Referenzflugzeugs über der Flugzeit, für eine durchschnittliche Mission über 257 Nautische Meilen, aufgetragen. Da sich aufgrund der geringen Flugdistanz die minimale und maximale Missionszeit um lediglich 10 Minuten unterscheiden, können die Zeitkosten vernachlässigt werden und es ist sinnvoll nach dem minimalen Treibstoffverbrauch und damit den minimalen Emissionen zu optimieren.

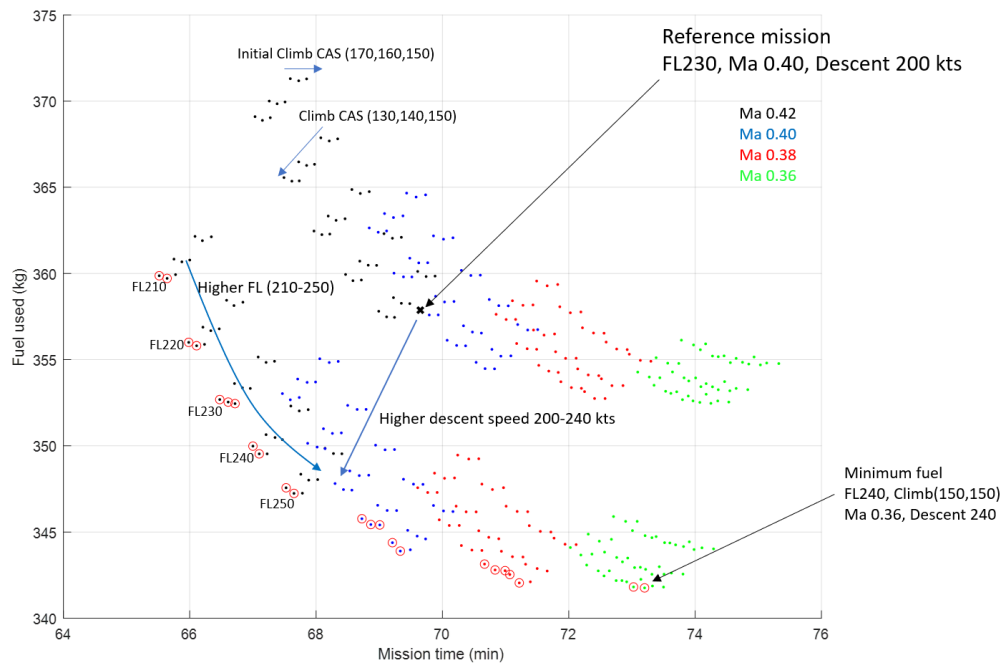


Abbildung 22 Einfluss verschiedener Fluggeschwindigkeiten und Höhen auf den Treibstoffverbrauch und die Flugzeit.

Die Parameterstudien wurden sowohl für das Referenzflugzeug, als auch für die partiell-turboelektrische und die seriell-hybride Flugzeugkonfiguration durchgeführt. Da während des Berichtszeitraums noch nicht die finalen Flugzeugentwürfe für die elektrifizierten Flugzeuge vorlagen, wurden für die hybrid-elektrischen Konfigurationen die Flugzeugparameter aus der Vorauslegung in AP 1.1 verwendet. Die Ergebnisse der treibstoffeffizientesten Trajektorien sind in Tabelle 14 zusammengetragen. Es kann festgehalten werden, dass eine möglichst hohe Flughöhe mit einer geringeren Reisefluggeschwindigkeit angestrebt werden sollte. Der Sinkflug sollte mit möglichst hohen Geschwindigkeiten durchgeführt werden, mit der Einschränkung, dass eine maximale Sinkrate von 2500 ft/min nicht überschritten werden darf. Zwischen den unterschiedlichen Konfigurationen zeigen sich nur sehr geringe Abweichungen, was an den relativ geringen Hybridisierungsgraden der elektrischen Konfigurationen liegt. Im partiell-turboelektrischen Fall (PTE) werden 100% der Energie aus Kerosin bereitgestellt, während im seriell-hybridelektrischen Fall (SHE) die Batterie aufgrund der Gewichtsbeschränkung nur 6% der maximalen Leistung liefert.

Tabelle 14 Optimierte Trajektorien der verschiedenen Flugzeugkonfigurationen.

Konfiguration	Init. climb CAS (kts)	Climb CAS (kts)	Cruise Alt (ft)	Cruise Mach	Descent CAS (kts)
konventionell	150	150	24000	0.36	240
PTE 2025	150	130	25000	0.36	220
SHE 2050	150	150	25000	0.36	240

Untersuchung der Lärmemissionen verschiedener An- und Abflugverfahren

Neue Flugzeugkonfigurationen wie rein elektrisch oder hybrid-elektrisch angetriebene Passagiermaschinen besitzen aufgrund ihrer charakteristischen Flugeigenschaften auch das Potenzial, die Lärmemission insbesondere in der An- und Abflugphase zu reduzieren. Mögliche Verfahren zum lärmreduzierenden Start- und Landevorgängen wurden innerhalb des AP 2.7 hinsichtlich der Lärmeinsparungspotenziale auf Basis der Lärmmodellierung nach ECAC Doc 29 in untersucht.

Hierzu wurden zunächst die allgemeinen Anforderungen an An- und Abflugverfahren nach ICAO PANS OPS untersucht und bereits existierende regulatorische Vorgaben hinsichtlich lärmreduzierender Verfahren herausgearbeitet. Ebenso wurden bereits in der Literatur untersuchte An- und Abflugverfahren konventioneller und auch neuer Flugzeugkonfigurationen diskutiert. Insbesondere Verfahren mit steileren Steigwinkel im Abflug können zur Lärmreduktion, vor allem im Fernbereich, genutzt werden. Die von der ICAO definierten Abflugverfahren NADP 1 und NADP 2 führen hingegen zu keiner signifikanten Verminderung des Lärms, sondern lediglich zu einer Umverteilung. Demgegenüber versprechen bezüglich möglicher Anflugverfahren insbesondere die Vergrößerung des Winkels im Sinkflug und die Veränderung der Anfluggeschwindigkeiten größere Lärmreduktionspotenziale.

Wie bereits aus der Literaturrecherche in AP 1.1 abgeleitet, eignen sich im Abflug vor allem steilere Steigwinkel, um eine Reduktion der Lärmemission zu erreichen. Trotz der leicht größeren Steigwinkel ergaben sich für die partiell-turboelektrische Flugzeugkonfiguration keine direkten Lärmverbesserungen im Vergleich zu Abflugverfahren mit dem Referenzflugzeug. Demgegenüber weist die SHE-Konfiguration im Abflug ein Reduktionspotenzial von ca. 2 dB auf, welches im Wesentlichen aus den verbesserten Auftriebswerten und dem damit verbundenen geringeren Schub resultiert. Die Lärmreduktion im Abflug betrifft insbesondere den Fernbereich.

Analog hierzu zeigte sich auch bei den Anflugverfahren, dass insbesondere mit der SHE-Konfiguration durch das Ausnutzen von Windmillingeffekten steilere Anflugwinkel bis zu $5,3^\circ$ möglich sind, was ebenfalls ein Lärmreduktionspotenzial bietet. Wie auch im Abflug, profitieren hiervon vor allem zum Landepunkt entferntere Bereiche, auch weil der Endanflug unterhalb von 2000 ft aus Sicherheitsgründen nicht verändert wird. Im direkten Vergleich zum Referenzfall können so maximale Lärmpegeldifferenzen von ca. 12 dB erreicht werden.

In Abbildung 23 ist ein Vergleich der Lärmbelastung durch einen Referenzanflug mit einem Gleitwinkel von 3° und einem Steilanflug mit Windmilling (Gleitwinkel $5,3^\circ$) zu sehen. Durch die größere Distanz zum Boden verringert sich die Fläche mit einem sound-exposure-level (SEL) über 70 dB um 25%, während die Fläche mit SEL über 60 dB sogar um 51% reduziert werden kann. Die Ergebnisse verdeutlichen das hohe Potenzial des Windmillings zur Lärminderung, auch wenn die Energierückgewinnung aufgrund des schlechten Propellerwirkungsgrads in diesem Betriebszustand keine weiteren Vorteile bringt.

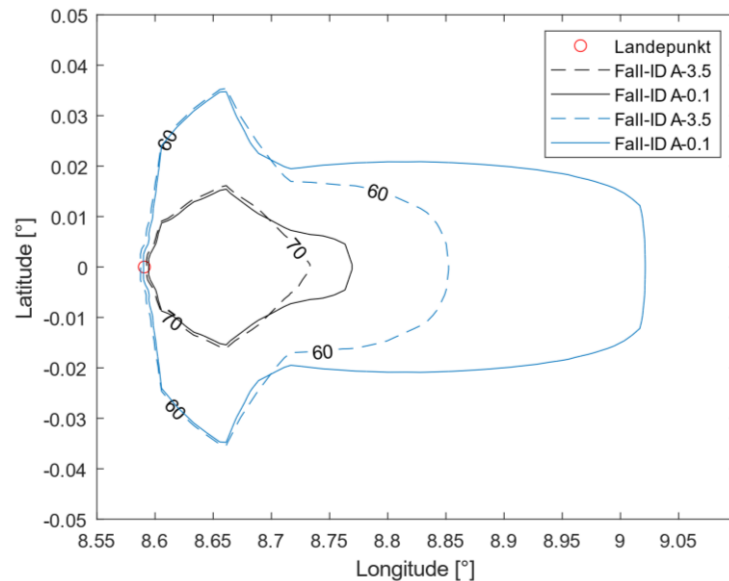


Abbildung 23 Vergleich der Lärmbelastung (SEL) im Referenzanflug (A-0.1) mit dem Steilanflug mit Windmilling (A-3.5).

Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken

Das energieeffizienteste und leiseste Anflugverfahren, welches theoretisch mit der seriell-hybriden Flugzeugkonfiguration möglich ist, stellt der Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken dar.

Da Elektromotoren keine Warmlaufzeit benötigen, könnten sie in Flugphasen, in denen kein Schub benötigt wird, ausgeschaltet werden und die Propeller in Segelstellung (feathered) gebracht werden. Dadurch wird ein emissionsfreier Segelanflug ermöglicht. Der Großteil des Lärms bei Turbopropflugzeugen entsteht durch die Rotation der Propeller, weshalb im Segelanflug mit stillstehendem Propeller eine große Reduktion des Lärms erreicht werden kann. Das Verfahren würde die Triebwerkslaufzeit pro Flug um etwa 15% reduzieren, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass hier zusätzlich Wartungs- und Instandhaltungskosten gesenkt werden können.

Voraussetzung für diese Technologie ist, dass die Motoren jederzeit schnell genug gestartet werden können, um notwendige Änderungen der Trajektorie sicher zu ermöglichen. Der Endanflug und die Landung sollten wieder mit eingeschalteten Triebwerken durchgeführt werden, um bei einem Go-Around die volle Leistung zur Verfügung zu haben. Außerdem müssen in der Zeit, in der das Triebwerk ausgeschaltet ist, alle Systeme an Bord durch die Batterie versorgt werden, da sie nicht mehr über den Generator am Triebwerk betrieben werden können. Für die Systeme der SHE-Konfiguration ist eine Leistung von ca. 42 kW notwendig, die ohne Probleme ausschließlich durch die Batterie bereitgestellt werden kann.

Mit Hilfe des entwickelten Flugleistungsmodells lassen sich die zu erwartende Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch das Flugverfahren für die SHE-Konfiguration bestimmen. In Tabelle 15 und Tabelle 16 sind die Ergebnisse aufgelistet. Für die kürzere Durchschnittsmission können im Vergleich zur optimierten Trajektorie weitere 16% Kraftstoff eingespart werden. Bei der längeren Auslegungsmission sind es 9%. Das besonders hohe Einsparpotenzial in der Durchschnittsmission kann

durch den größeren Anteil der Sinkflugphase am Gesamtflug begründet werden. In beiden Fällen erhöht sich die Flugzeit um jeweils eine Minute.

Tabelle 15 Optimierte Flugverfahren der seriell-hybriden Konfiguration für eine 257 NM Mission.

Durchschnittsmision 257 NM	Cruise Alt (ft)	Cruise Mach	Δfuel (%)	Δt (min)
Referenz	23000	0.40	0	0
Optimierte Trajektorie	25000	0.36	-8.8	+3
Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken	25000	0.36	-16	+1

Tabelle 16 Optimierte Flugverfahren der seriell-hybriden Konfiguration für eine 511 NM Mission.

Auslegungsmission 511 NM	Cruise Alt (ft)	Cruise Mach	Δfuel (%)	Δt (min)
Referenz	23000	0.40	0	0
Optimierte Trajektorie	25000	0.36	-10.4	+11
Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken	25000	0.36	-9	+1

Der Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken ist für die SHE-Konfiguration das energieeffizienteste und leiseste Anflugverfahren. Durch die Notwendigkeit des Wiederauffahrens der Triebwerke während des Sinkflugs, bestehen erhebliche Hürden im Blick auf die Sicherheit und Zertifizierbarkeit des Flugverfahrens. In aktuellen Regularien ist ein absichtliches Abschalten der Triebwerke während des Flugs nicht vorgesehen.

II.1.3. Soll-Ist-Vergleich der gesetzten Ziele

Das übergeordnete Ziel der ganzheitlichen Untersuchung des elektrischen Fliegens in GNOSIS lässt sich für den Verbundpartner TUDa in wissenschaftlich-technische Teilziele unterteilen, mit welchen das Vorhaben umgesetzt werden sollte. Diese Teilziele werden nun mit den vorgestellten Ergebnissen gegenübergestellt, um das Zielerreichen zu bewerten.

Das FG SuR hatte zur Aufgabe, im Projekt eine Abschätzung der Emissionen und des Ressourcenbedarfs vorzunehmen für die im Vorhaben entwickelten elektrischen Konfigurationen von einem Kleinflugzeug. Diese Aspekte des Vorhabens konnten in der Umweltbewertung der Wirkungskategorien „Klimawandel“,

„Photochemische Ozonbildung“ und „Mineralischer Ressourcenverbrauch“ umgesetzt werden. Weiterhin sollten die Beiträge der verschiedenen Projektpartner in neuartige Modelle zu Ressourcen und Ökologie zusammengeführt werden und eine modulare Bewertungsmethodik für die Technologienoptionen auf Umweltwirkungsebene generiert werden. Dieses Ziel wurde in der Entwicklung von jeweils einem parametrisierten Ökobilanzmodell pro betrachtete Technologienoption und einer neuen Methodik für die Bewertung in den zwei Zeitzuständen Status Quo und Zukunftsbetrachtung erreicht. Weiterhin sollten die Ergebnisse der iterativen Durchführung der Ökobilanz für das Konsortium aufbereitet und diskutiert werden, um den Datenübertrag aus den laufenden technologischen Forschungsarbeiten in GNOSIS zu verbessern. Dies wurde in einem kontinuierlichen Austausch während den Regelterminen und der LCA-Vorstellung bei den Halbjahrestreffen erreicht, zudem wurde sich mit vielfältigen Partnern bilateral zu benötigten Daten ausgetauscht und Ergebnisse übermittelt. Als Abschluss der Forschung war eine Gesamtbewertung des entwickelten Lufttransportsystems im Kontext der Umweltverträglichkeit durchzuführen. Dieses Ziel konnte mit den abschließenden Resultaten aus dem Ökobilanzvergleich zwischen herkömmlicher und neuartiger Technologie in verschiedenen Zeithorizonten erreicht werden.

Das FSR hatte zur Aufgabe, eine strukturierte Analyse von relevanten operationellen Aspekten und regulatorischen Rahmenbedingungen für das elektrische Fliegen durchzuführen. Diese konnten mit der Untersuchung von vier operationellen Technologien und einem Fokus auf das „electric taxiing“ umgesetzt werden. Weiterhin sollte eine Methode zur Quantifizierung des Einflusses flugbetrieblicher Aspekte auf die Ökoeffizienz und die Lärmemissionen generiert werden und eine gesamtheitliche Betrachtung der Methode zur Optimierung der Trajektorie von elektrisch betriebenen Flugzeugen unter Berücksichtigung von Bodenprozessen durchgeführt werden. Die Modelle konnten vom FSR entwickelt werden und unter Aufzeigen von Vor- und Nachteilen sowie relativen Verbesserungen von Kraftstoffverbrauch und Lärmentwicklung dem ILR zur Verfügung gestellt werden. Abschließend sollte die Entwicklung eines skalierbaren Flugleistungsmodells zur Abbildung der besonderen Flugmechanik und unter Berücksichtigung relevanter Subsysteme von elektrisch angetriebenen Flugzeugen umgesetzt werden. Dieses Ziel konnte mit der Entwicklung des Flugleistungsmodells APM, das konventionelle, partiell-turboelektrische und seriell-hybride Flugzeugkonfigurationen abgebildet und mit welchem sich nicht-konventionelle Flugverfahren wie Steilanflug mit Windmilling oder Sinkflug mit ausgeschalteten Triebwerken untersuchen lassen, erreicht werden.

II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Durchführung des Projekts GNOSIS mit den in Kapitel II.1 dargestellten Arbeiten und Ergebnissen der TUDa sind hauptsächlich Personalkosten und Reisekosten angefallen. Hierbei machen die Personalkosten den Großteil der Gesamtprojektkosten aus. Der zahlenmäßige Nachweis wird dem Zuwendungsgeber gesondert zugesendet und enthält eine detaillierte Aufstellung aller Projektkosten.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die künftige Mobilität zu Land, zu Wasser und in der Luft muss dringend erforscht, entwickelt, umgesetzt und großflächig angewandt werden, um die Klimaneutralität bis zur zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu erreichen. Das Forschungsprojekt GNOSIS bildet dazu einen entscheidenden Baustein ab, in welchem

die zukünftige Mobilität der Luftfahrt ganzheitlich betrachtet wird. Die Erforschung des Themenfeldes „elektrisches Fliegen“ im Hinblick auf den Rohstoffeinsatz und die Umweltwirkungen ist für die Forschungsgemeinschaft dringend notwendig, da Ergebnisse dieser Art bis jetzt nicht existieren.

Das durchgeführte Vorhaben hätte ohne eine Förderung an der TUDa nicht bearbeitet werden können, da die notwendige Finanzierung nicht über die Grundfinanzierung der Institute erfolgen kann. Durch die Förderung des Vorhabens wurde eine Stärkung der Kompetenzen des FSR im Bereich der nachhaltigen und effizienten Flugverfahren sowie deren Modellierung erzielt. Das FG SuR konnte seine LCA-Kompetenzen erweitern und in den Kontext der Luftfahrt einbringen. Die erfolgreiche Bearbeitung im Verbund mit zahlreichen Partneruniversitäten stärkt die Kooperation der verschiedenen Forschungseinrichtungen und kann die Grundlage für zukünftige Zusammenarbeit bilden.

Der während der Projektbeantragung festgelegte Personal- und Zeitaufwand konnte im Rahmen der Projektlaufzeit und einer anschließenden kostenneutralen Verlängerung eingehalten werden.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

II.4.1. Wissenschaftliche Verwertung

Die wissenschaftlichen Ergebnisse im GNOSIS Projekt wurden in Veröffentlichungen an anerkannten internationalen Konferenzen vorgestellt und dem Fachpublikum zur Diskussion gestellt. Im Anschluss an eine Konferenz wurde zudem ein Netzwerk gegründet, das sich mit zukunftsgerichteten Ökobilanzen (prospektiver LCA) auseinandersetzt. Die Partizipation des FG SuR an diesem Netzwerk mit europäischen Wissenschaftlern, in welchem sich mehrjährig zu Modellierungsfragen und Erkenntnissen zu neuartigen Technologien ausgetauscht wird, konnte durch die Förderung und die Erarbeitung im Projekt GNOSIS erreicht werden.

Des Weiteren schaffte GNOSIS die Möglichkeit zur Einbeziehung Studierender, die in Abschlussarbeiten Teilaspekte des Projekts begleitet haben. Dies ermöglicht den Studierenden eine praxisnahe Anwendung der im Studium erlangten Kompetenzen. Ergänzend können die Ergebnisse unmittelbar in die Lehre einfließen z.B. im Rahmen der Vorlesung „Zukünftige Luftverkehrssysteme“. Bearbeitet wurde das Projekt GNOSIS von einem Doktoranden, der die Erkenntnisse in anschließenden Forschungsarbeiten weitertreibt, welche wiederum in einem Zeitraum von zwei Jahren nach Projektende in Journalartikeln veröffentlicht werden können. Die erreichten Ergebnisse im Projekt dienen als Grundlage für eine Dissertationsschrift.

II.4.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Projektergebnisse aus GNOSIS liefern eine umfassende Bewertung des Potentials hybrid-elektrischer Flugzeugkonfigurationen. Hierbei wurden verschiedene Technologiekombinationen evaluiert und miteinander verglichen. Im Projekt wurde kein Produkt entwickelt, was eine direkte wirtschaftliche Verwertung bietet, jedoch können die entwickelten Methoden und Ergebnisse bei der Bewertung zukünftiger Flugzeugkonzepte von der Luftfahrtindustrie eingesetzt werden und damit zu einer umweltfreundlicheren Luftfahrt beitragen.

II.4.3. Anschlussfähigkeit

Die an der TUDa durchgeführten Arbeiten boten die Möglichkeit, die Kompetenzen der beiden Institute im Bereich der LCA und der Flugbetriebsführung weiter auszubauen. Mit den erworbenen Erfahrungen und Erkenntnissen ist es möglich, an zukünftigen Forschungsvorhaben in diesem Bereich mitzuwirken.

Darüber hinaus wurden die Forschungsergebnisse insgesamt in den Kontext der weiteren am FG SuR laufenden Forschungsarbeiten zu Elektromobilität und erneuerbaren Energien sowie am FSR in die Gebiete der Trajektorienplanung, Flugleistungsberechnung und der Betrachtung operationeller Aspekte eingebracht. Eine unmittelbare Weiternutzung der methodischen Vorgehensweise zur LCA-Bewertung von elektrifizierten Verkehrsmitteln kann z.B. im Projekt von modularen, autonomen Kleinfahrzeugen „Campus Free City“ umgesetzt werden. Die direkte Fortsetzung der aufgebauten Expertise in GNOSIS trägt folglich zu Synergien und einer breiten Betrachtung dieser Themenfelder bei.

II.5. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt Dritter

Während der Projektdurchführung ist in der gesamten Projektlaufzeit kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Konferenzbeiträge

- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) 2021:
Susanne Hanesch & Liselotte Schebek (2021). Transformation of the transport sector for achieving climate targets. A methodological approach to assess the environmental impacts of emerging means of transport change options. Poster. SETAC Europe 31st Annual Meeting.
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) 2022:
Susanne Hanesch & Liselotte Schebek (2022). LCA of Emerging Transportation Systems in Pilot Operation including Scenario Analysis. Präsentation. SETAC Europe 32nd Annual Meeting. Kopenhagen, Dänemark. 19.05.2022.
Einladung zur Neugründung des „Prospective LCA Network“ im Mai 2022 im Rahmen des ersten Meetings „Workshop on prospective LCA: Building a network“ auf der SETAC Konferenz.
- International Society for Industrial Ecology (ISIE) 2023:
Susanne Hanesch & Liselotte Schebek (2023). Prospective LCA of Emerging Transportation Systems as demonstrated by the Electrification of a Regional Aircraft. Präsentation. 11th International Conference on Industrial Ecology (ISIE2023). Leiden, Niederlande. 03.07.2023.

Journal-Publikationen

- Susanne Hanesch, Steffi Weyand, Liselotte Schebek (2023): Stepwise LCA guidance of parameter generation for emerging technologies and parameter modification for future scenarios with the Ex-ante Prospective Life cycle inventory analysis (EPL) framework. In: WILEY Journal of Industrial Ecology. (Submitted)

Universitätsarbeiten

- Susanne Hanesch: „Erweiterung der Ökobilanzierung zur Bewertung zukünftiger Umweltauswirkungen von neuartigen Transporttechnologien“. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft. Darmstadt. (In Bearbeitung)

Den Studierenden der aufgelisteten studentischen Abschlussarbeiten, die im Rahmen von GNOSIS durchgeführt wurden, gilt an dieser Stelle ein besonderer Dank für die kreative Unterstützung des Projekts:

- John Eshagh Saetlou: „Development of a scalable flight-performance-model for hybrid-electric regional aircraft“. 2021. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik. Darmstadt.
- Katharina Heuser: „Chancen und Grenzen des LCA zur Bewertung von Umweltauswirkungen elektrifizierter Kleinflugzeuge“. 2021. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft. Darmstadt.
- Daniel Neumann: „Untersuchung elektrischer Rollverfahren für hybride Regionalflugzeuge“. 2021. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik. Darmstadt.
- Afzal Khan Peerukhan: „Ganzheitliche Lebenszyklusanalyse eines teilelektrifizierten Flugzeugs mit Fokus auf Materialeinsatz und Recyclingpotenzial der Flugzeugkomponenten“. 2021. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft. Darmstadt.
- Johannes Krämer: „Untersuchung von lärmreduzierten An- und Abflugverfahren für zukünftige hybrid-elektrische Regionalflugzeuge“. 2021. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik. Darmstadt.
- Torsten Frank: „Rohstoffuntersuchung des Antriebsstrangs von teil-elektrifizierten Flugzeugen und Kritikalitätsanalyse ausgewählter Elemente“. 2022. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft. Darmstadt.
- Tina Schwatmann: „Analyse der Flugleistungen eines Regionalflugzeugs mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb“. 2022. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik. Darmstadt.
- Yitong Zhou: „Kostenwettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff in China bis 2060“. 2023. Masterthesis. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft. Darmstadt.
- Luis Schell: „Entwicklung einer Ökobilanz aus Reverse Engineering Daten am Beispiel eines Flugzeugsitzes“. 2023. Bachelorthesis. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft. Darmstadt.

Anhänge

Anhang 1: Ökobilanz-Bericht

Anhang 2: Erfolgskontrollbericht

Anhang 3: Berichtsblatt und Controlsheet

Anhang 4: Verwertungsplan

Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

- 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC) (2016). 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Toulouse, France, 02.11.2016: IEEE.
- 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC) (2018). 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Nottingham, 07.11.2018: IEEE.
- Aerosociety (2019): Projekt Fresson. Online verfügbar unter <https://www.aerosociety.com/news/electric-pioneer/>.
- Agora (2017): Erneuerbare vs. fossile Stromsysteme: ein Kostenvergleich. In: *tromwelten 2050 – Analyse von Erneuerbaren, kohle- und gasbasierten Elektrizitätssystemen*.
- 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. Berlin. Online verfügbar unter www.agora-energiewende.de.
- AIAA AVIATION 2020 FORUM (2020). AIAA AVIATION 2020 FORUM. VIRTUAL EVENT. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Airbus (2019): Bringing zero-emission technology to aviation. Online verfügbar unter <https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight.html>.
- Angerer, G.; et al. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien.
- Apffelstaedt, A. (2009): Identifying CO2 Reducing Aircraft Technologies and Estimating their Impact on Global Emissions. Dissertation. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg.
- Asmatulu, Eylem; Overcash, Michael; Twomey, Janet (2013b): Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011. In: *Journal of Industrial Engineering*, S. 1–8. DOI: 10.1155/2013/960581.
- Asmatulu, Eylem; Twomey, Janet; Overcash, Michael (2013a): Evaluation of recycling efforts of aircraft companies in Wichita. In: *Resources, Conservation and Recycling* 80, S. 36–45. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.08.002.
- ASTM International (2020): Standard Specification for Performance of Aircraft. ASTM F3179/F3179M.
- Bareiß, Kay; La Rua, Cristina de; Möckl, Maximilian; Hamacher, Thomas (2019): Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. In: *Applied Energy* 237, S. 862–872. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.001.

-
- Bauhaus Luftfahrt (2019): Environmental life-cycle assessment of universally electric aircraft. Online verfügbar unter <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/en/research/alternative-fuels/environmental-life-cycle-assessment-of-universally-electric-aircraft/>.
- Bernatzky, T. (2019): Automation Concept for Cockpit Crew Integration into Trajectory-Based Dispatch Towing. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Blat Belmonte, Benjamin; Esser, Arved; Weyand, Steffi; Franke, Georg; Schebek, Liselotte; Rinderknecht, Stephan (2020): Identification of the Optimal Passenger Car Vehicle Fleet Transition for Mitigating the Cumulative Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions until 2050. In: *Vehicles* 2 (1), S. 75–99. DOI: 10.3390/vehicles2010005.
- BMU (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.
- Bolam, R. C.; et al. (2018): Review of Electrically Powered Propulsion for Aircraft. In: *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- Civil Aviation Authority (2008): Steep Approach Approval Compliance Statement and Checklist.
- Clarke, Richard; Kane, Deborah; Stewart, Carla (1988): Current Fire Safety Design Aspects of Commuter Aircraft. Atlantic City. Online verfügbar unter <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA194554>, zuletzt geprüft am 04.02.2023.
- DIN 9020-5: DIN 9020-5:1992-02.
- DIN EN ISO 14040:2009-11, 11.2009: DIN EN ISO 14040.
- DIN EN ISO 14044:2006-10, 10.2006: DIN EN ISO 14044.
- Electric Flight (2019): Elektrisches Fliegen - die Zukunftsperspektive. Online verfügbar unter <http://www.electric-flight.eu/>.
- EMEP/EEA (2019): Aviation emissions calculator: European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>, zuletzt geprüft am 04.02.2023.
- Erzen, D.; Andrejasic, M.; Lapuh, R.; Tomazic, J.; Gorup, C. (2018): An Optimal Propeller Design for In-flight Power Recuperation on an Electric Aircraft. In: *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*.
- 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. Final report (2020). Unter Mitarbeit von Gian Andrea Blengini, Cynthia El Latunussa, Umberto Eynard, Cristina Torres de Matos, Wittmer, Dominic Marcus Alexander Günter, Konstantinos Georgitzikis et al. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- EUROCONTROL (2009): Base of Aircraft Data (BADA) Aircraft Performance Modelling Report.

-
- EUROCONTROL (2019): Taxi times. Hg. v. Homepage. Online verfügbar unter https://www.eurocontrol.int/search?keywords=Taxi%20times&sort_by=search_api_relevance, zuletzt geprüft am 10.04.2021.
- Europäische Kommission (2020): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Brüssel.
- European Civil Aviation Conference (2005): ECAC/CEAC Doc 29 Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports.
- European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2019): Easy Access Rules for Air Operations.
- Falck, R. D.; et al. (2017): Trajectory Optimization of Electric Aircraft Subject to Subsystem Thermal Constraints. In: *AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition*.
- Fishman, Tomer; Heeren, Niko; Pauliuk, Stefan; Berrill, Peter; Tu, Qingshi; Wolfram, Paul; Hertwich, Edgar G. (2021): A comprehensive set of global scenarios of housing, mobility, and material efficiency for material cycles and energy systems modeling. In: *Journal of Industrial Ecology* 25 (2), S. 305–320. DOI: 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. Online verfügbar unter https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2022&interval=year, zuletzt aktualisiert am 24.02.2023, zuletzt geprüft am 24.02.2023.
- Galloway, W.; Wilby, J. (1981): Noise Abatement Technology Options for Conventional Turboprop Airplanes. FAA-EE-80-19.
- Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Burchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Kirchner, Almut et al. (2018): Klimapfade für Deutschland.
- Glasscock, Richard; Galea, Michael; Williams, Warren; Glesk, Tibor (2017): Hybrid Electric Aircraft Propulsion Case Study for Skydiving Mission. In: *Aerospace* 4 (3), S. 45. DOI: 10.3390/aerospace4030045.
- Gohardani, A. S.; et al. (2010): Challenges of future aircraft propulsion: A review of distributed propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft. In: *Progress in Aerospace Science*.
- Hanesch, Susanne; Schebek, Liselotte; TU Darmstadt (2023): Ökobilanz-Bericht für den Flugzeugvorentwurf von Flugtransportalternativen eines 19-Sitzer Kleinflugzeugs. Unter Mitarbeit von Technical University of Darmstadt.
- Hepperle, M. (2012): Electric Flight – Potential and Limitations, 2012.
- Hill; et. al. (2012): EU Transport GHG – Routes to 2050 II. The role of GHG emissions from infrastructure construction, vehicle manufacturing, and ELVs in overall transport sector

emissions. Task 2 paper produced as part of a contract between European Commission Directorate-General Climate Action and AEA Technology plc.

- Huijbregts, Mark A. J.; Steinmann, Zoran J. N.; Elshout, Pieter M. F.; Stam, Gea; Veronesi, Francesca; Vieira, Marisa et al. (2017): ReCiPe2016. A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In: *Int J Life Cycle Assess* 22 (2), S. 138–147. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- International Civil Aviation Organization (ICAO): Procedures for Air Navigation Services. Aircraft Operations. Volume I - Flight Procedures.
- IRENA (2018): Hydrogen from renewable power. Technology outlook for the energy transition. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Johanning, A. (2015): Comparison of the potential environmental impact improvements of future aircraft concepts using life cycle assessment.
- Jöhrens, Julius; Rücker, Julius; Kräck, Jan; Allekotte, Michel; Helms, Hinrich; Biemann, Kirsten et al. (2020): Roadmap OH-Lkw. Einführungsszenarien 2020-2030. Heidelberg.
- Klimaschutzportal (2019): Klimawirkung des Luftverkehrs. Online verfügbar unter <https://www.klimaschutz-portal.aero/klimakiller-nr-1/klimawirkung-des-luftverkehrs/>.
- Kosow, Hannah; Gassner, Robert (2008): Methods of future and scenario analysis. Overview, assessment, and selection criteria. Bonn: Dt. Inst. für Entwicklungspolitik.
- Kuhn, H.; et al. (2012): Fundamental Prerequisites for Electric Flying. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. München, 2012.
- Leipziger Institut für Energie (2019): Preisbericht für den Energiemarkt in Baden-Württemberg 2018. Endbericht. Leipzig.
- Lukic, M.; Hebala, A.; Giangrande, P.; Klumpner, C.; Nuzzo, S.; Chen, G. et al. (2018): State of the Art of Electric Taxiing Systems. In: 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Nottingham, 07.11.2018: IEEE, S. 1–6.
- Oliveira Fernandes Lopes, João Vasco de (2010): Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft. Master thesis. Universidade Técnica de Lisboa, Lisbon, Portugal.
- Paul, A.; Grimme, W.; Atanasov, G.; van Wensveen, J.; Peter, F. (2020): Evaluation of the Market Potential and Technical Requirements for Thin-Haul Air Transport.
- Ploetner, K.; et al. (2016): Environmental Life Cycle Assessment of Universally-Electric Powered Transport Aircraft. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Braunschweig, 2016.
- Pötscher, F. (2014): Ökobilanz Alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich. In: *UBA, Wien*.

-
- Ratheon Aircraft (2000): Section III Systems Description Beech 1900D Airliner. Online verfügbar unter 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, zuletzt geprüft am 04.02.2023.
- Raytheon Aircraft Company (2001): Beech 1900D Airliner Performance / Specifications.
- Re, Fabrizio (2017): Model-based Optimization, Control and Assessment of Electric Aircraft Taxi Systems. Dissertation. Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, Darmstadt.
- Rolls Royce (2019a): Electrifying Flight. Online verfügbar unter https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/innovation-advance-and-ultrafan/Rolls_Royce_IG_Final_04_RGB_Sheet.pdf.
- Rolls Royce (2019b): The E-Fan X programme. Online verfügbar unter <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/insights/2018/paul-stein-talks-about-e-fan-x.aspx>.
- Schmidt, T.; et al. (2016): Investigation of the primary production routes of nickel and cobalt products used for Li-ion batteries. In: *Resources, Conservation and Recycling*.
- Schulze, J. (2019): Architectural Design of a Future Flight Management System Supporting 4D Trajectories. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Schulze, R.; et al. (2017a): Developing a Life Cycle Inventory for Rare Earth Oxides from Ion-Adsorption Deposits: Key Impacts and Further Research Needs. In: *Journal of Sustainable Metallurgy*.
- Schulze, R.; et al. (2017b): Recycling and its effects on joint production systems and the environment – the case of rare earth magnet recycling – Part 1 – Production model. In: *Resources, Conservation and Recycling*.
- Seitz, A.; et al. (2012): Electrically Powered Propulsion: Comparison And Contrast To Gas Turbines. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2012.
- Spichartz, P.; et al. (2013): Conception of a Novel Converter Topology for Higher Energy Recuperation in Electric Vehicles. In: *IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- Textron Aviation (2019): Illustrated Parts Catalog. Model 1900D Airliner. Technical Publications. Online. Online verfügbar unter <https://ww2.txtav.com/TechnicalPublications/Downloads/Book?PN=129-590000-11>, zuletzt aktualisiert am 08-2019, zuletzt geprüft am 10.03.2022.
- Thauvin, Jerome; Barraud, Guillaume; Roboam, Xavier; Sareni, Bruno; Budinger, Marc; Leray, Dimitri (2016): Hybrid propulsion for regional aircraft: A comparative analysis based on energy efficiency. In: 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Toulouse, France, 02.11.2016: IEEE, S. 1–6.

-
- Thomas, Jacqueline L.; Hansman, R. John (2020): Community Noise Reduction Assessment of Using Windmilling Drag on Approach by Hybrid Electric Aircraft. In: AIAA AVIATION 2020 FORUM. AIAA AVIATION 2020 FORUM. VIRTUAL EVENT. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Traub, L. W. (2011): Range and Endurance Estimates for Battery-Powered Aircraft. In: *Journal of Aircraft* (Vol. 48, No. 2.).
- Umweltbundesamt (2012): Ratgeber – Daten zum Verkehr, abgerufen von. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#textpart-1>.
- Umweltbundesamt (2017): Fluglärmbericht 2017 des Umweltbundesamtes. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-07-17_texte_56-2017_fluglaermbericht_v2.pdf.
- Umweltbundesamt (2019): Emissionsfaktoren für Verkehrsmittel
(https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/verkehr/1_verkehrsmittel/EKZ_Pkm_Tkm_Verkehrsmittel.pdf).
- UNEP (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel. Unter Mitarbeit von T.E Graedel, J. Allwood, J-P Birat, B.K Reck, S.F Sibley, G. Sonnemann et al. Paris. Online verfügbar unter <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals>.
- Varocky, B. J. (2011): Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car.
- VDI Richtlinie 4800 Blatt 2, 2018.03: VDI Richtlinie 4800 Blatt 2.
- Verstraete, J. (2012): Creating a Life-Cycle Assessment of an Aircraft.
- Viebahn, P.; et al. (2014): Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems (KRESSE).
- Vinodh, S.; et al. (2017): Life cycle assessment of an aircraft component: a case study. In: *Int. J. Industrial and Systems Engineering* (Vol. 27, No. 4), S. 485–499.
- Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- Ziemann, S.; et al. (2013): The future of mobility and its critical raw materials. In: *Revue de Métallurgie*.
- Ziemann, S.; et al. (2018): Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach. In: *Resources, Conservation & Recycling*.
- Zukunft Mobilität (2011): Der große Unterschied zwischen Verkehr und Mobilität. Online verfügbar unter <https://www.zukunft-mobilitaet.net/3892/analyse/unterschied-verkehr-mobilitaet/>.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

IWAR



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

Im Projekt GNOSIS

FG Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft

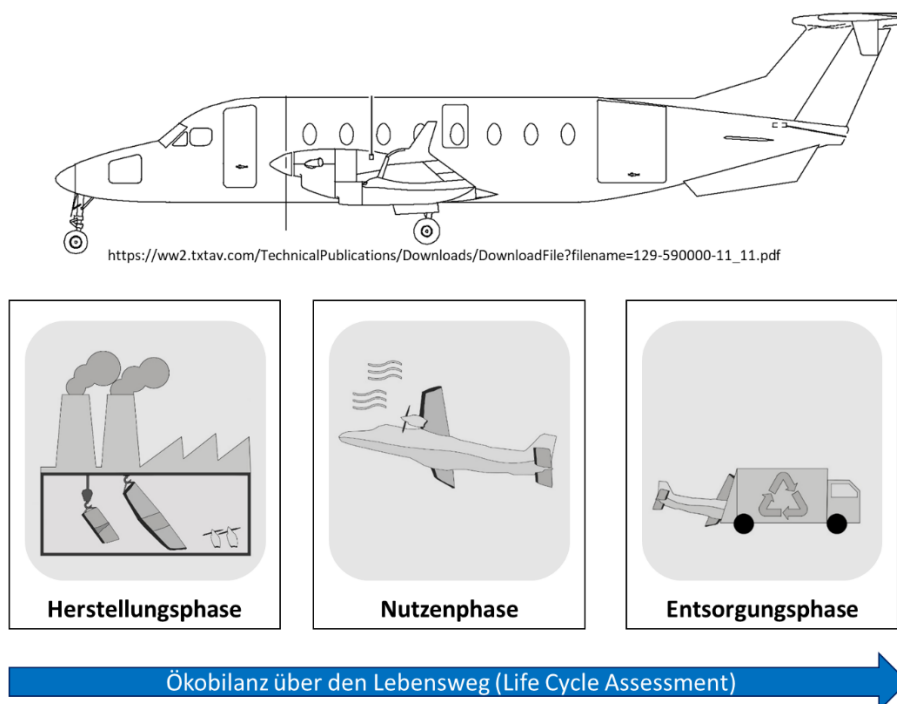
M.Sc. Susanne Hanesch und Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek

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



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	Zukunftszeitpunkt
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 Erzpotezial (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 Marktetablierung 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 Markteinführung (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 einfassen, 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 Expertenumfrage validiert werden. Neben spezifischen Vordergrunddaten für die Produktsysteme werden für das Hintergrundsystem hauptsächlich Datenbanken verwendet, die als qualitätsgesichert 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 Datenbank ecoinvent Version 3.8 verwendet. Zusätzlich werden neue Datensätze erstellt, die mit projektspezifischen Rohdaten oder Literaturdaten gespeist werden. Die erzeugten Datensätze und die Datensätze aus der ecoinvent 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.

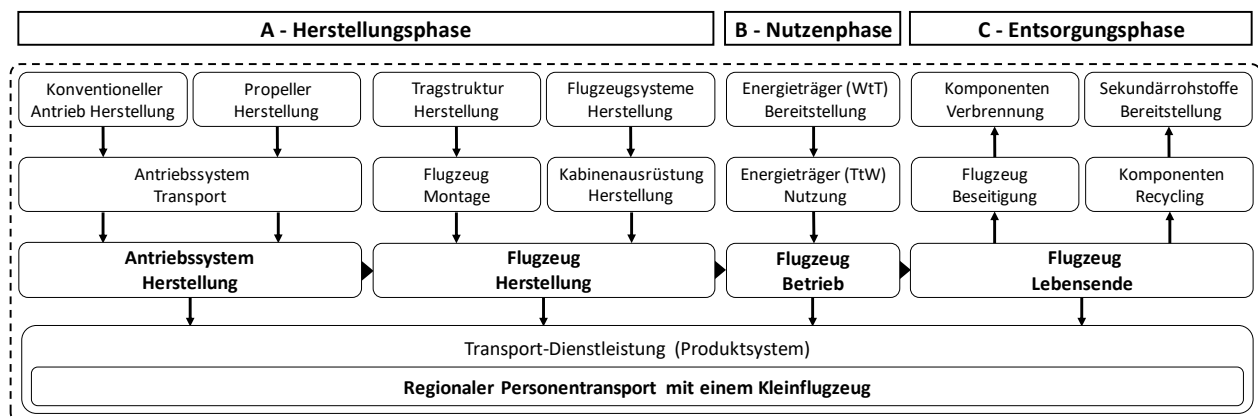


Abbildung 1 Grafische Darstellung des Produktsystems Beechcraft 1900D-CONV und der Systemgrenzen über den Lebensweg.

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 linksschraffiert 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.

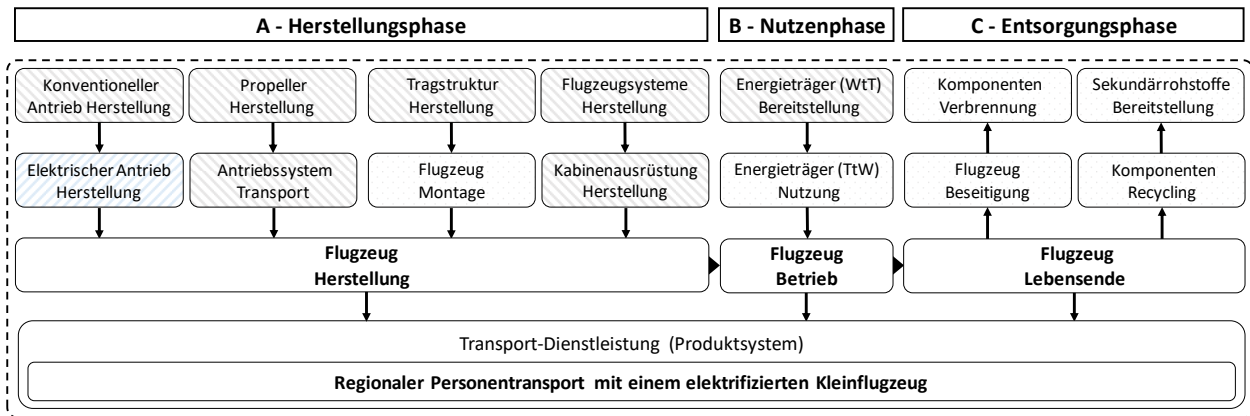


Abbildung 2 Grafische Darstellung des Produktsystems Beechcraft 1900D-PTE und der Systemgrenzen über den Lebensweg.

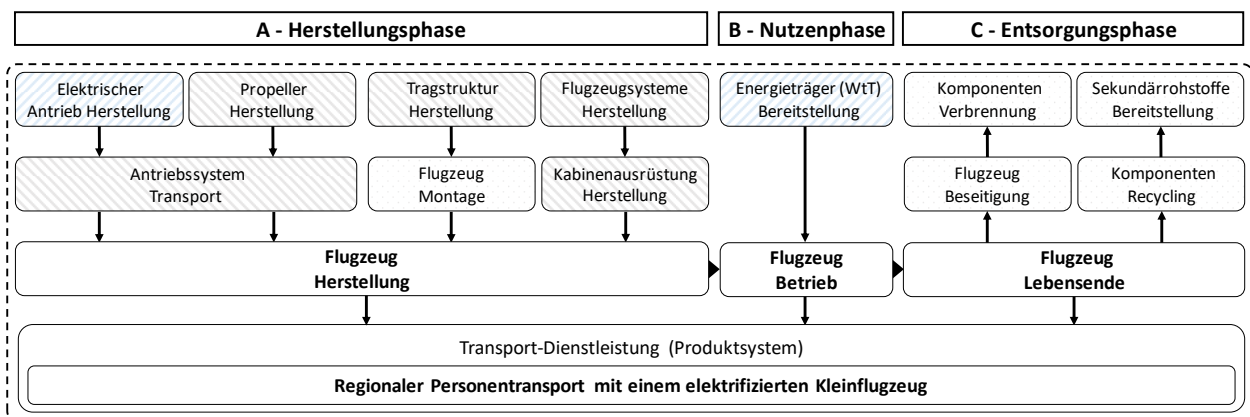


Abbildung 3 Grafische Darstellung des Produktsystems Beechcraft 1900D-FCB und der Systemgrenzen über den Lebensweg.

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 $1,19\text{E-}08$ 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 von ecoinvent 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) PTE-/CONV-2025A	Wind of change (WOC) FCB-/CONV-2050B	Fast progress (FP) 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.

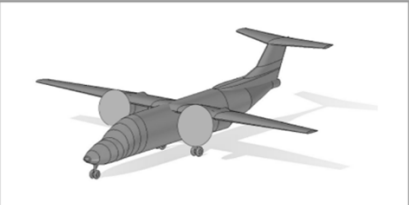


Konventionelles Flugzeug „CONV“	Partiell-Turboelektrisches Flugzeug „PTE“	Brennstoffzellenbetriebenes Flugzeug „FCB“
CONV-2002: Fahrzeugmasse (OEM) = 4919 kg Konventionelle Leistung = 2x954 kW CONV-2025: Fahrzeugmasse (OEM) = 4589 kg Konventionelle Leistung = 2x1196 kW CONV-2050: Fahrzeugmasse (OEM) = 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	
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.

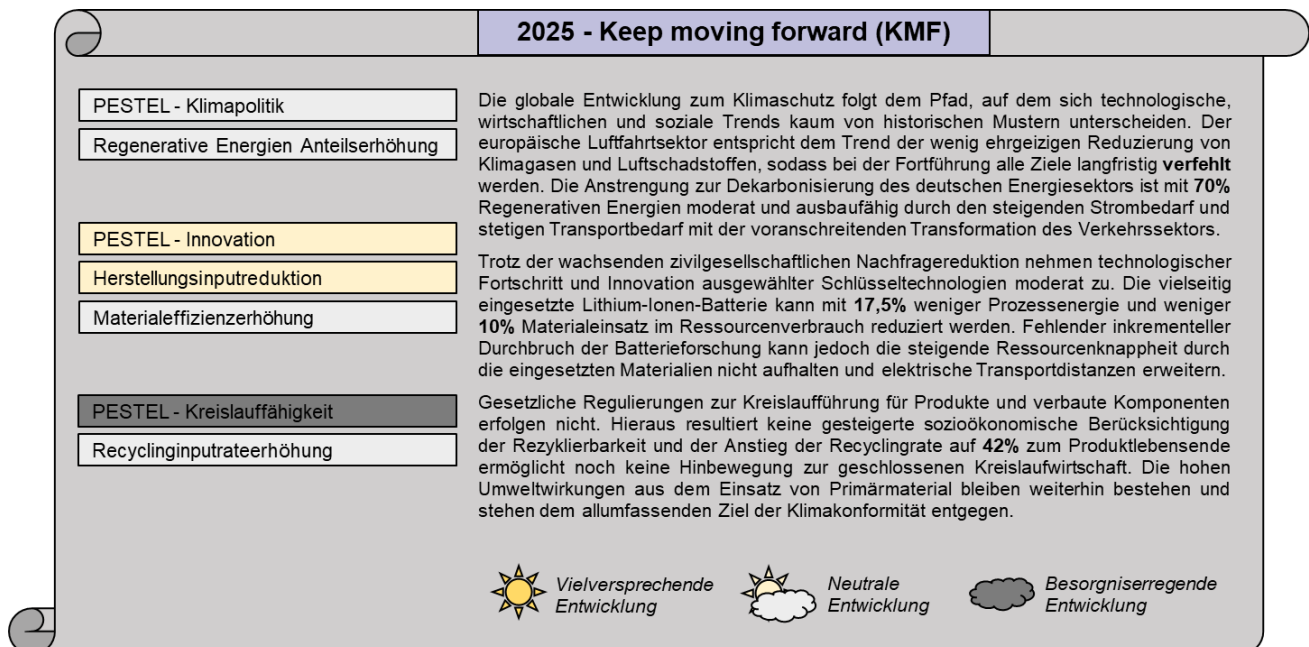


Abbildung 5 Narrative des prädiktiven Szenarios KMF zur Szenario-Ergebnis Dokumentation der Beechcraft 1900D-PTE.

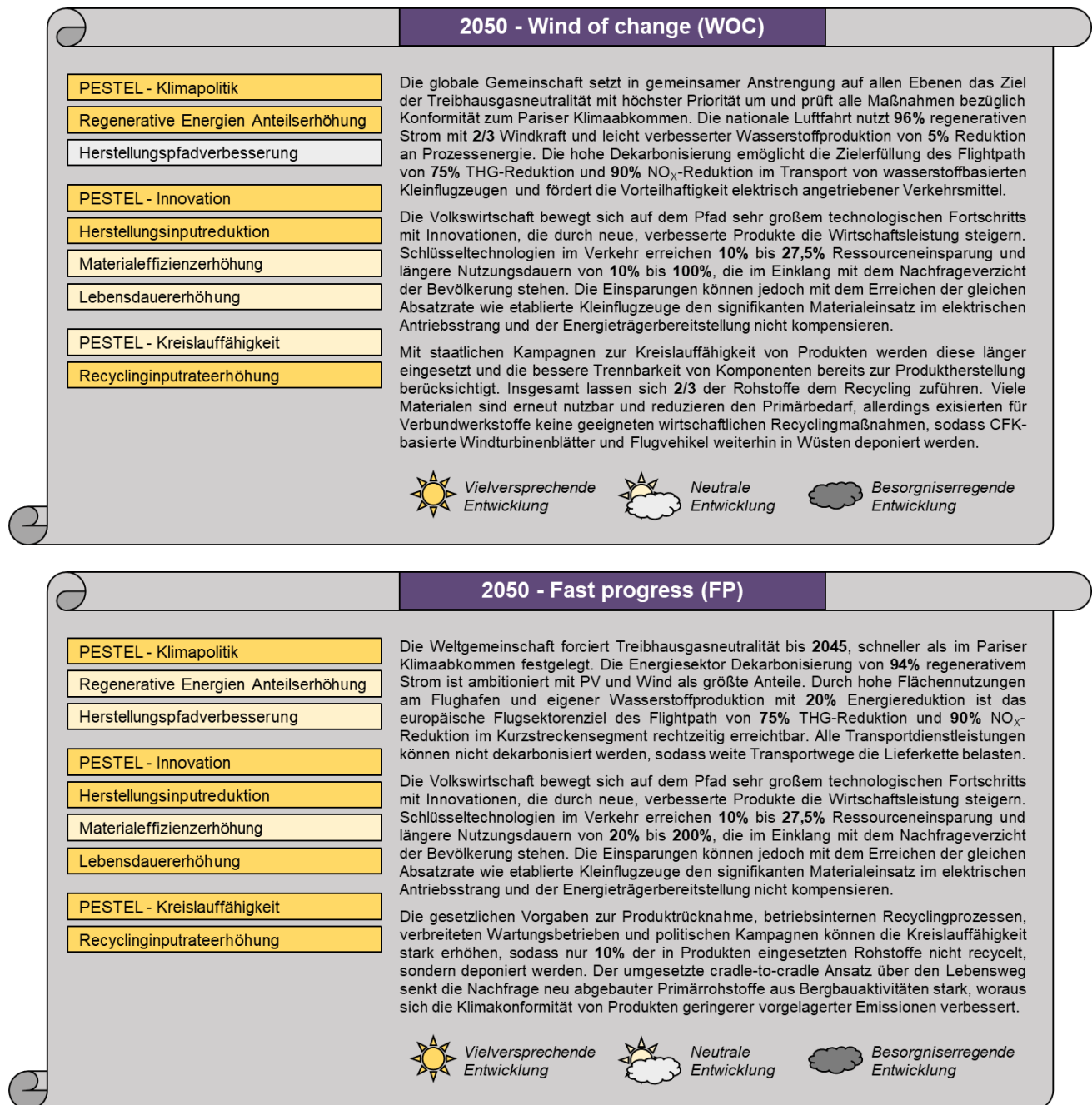


Abbildung 6 Narrative der explorativen Szenarien WOC und FP zur Szenario-Ergebnis Dokumentation der Beechcraft 1900D-FCB.

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 Technologiemic 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 Datenbank ecoinvent 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 reduzierten 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	HOFP (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.

Tabelle 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 1900D- CONV- 2002	CO ₂ -eq	4015,9	-	1378,0	105,4	36259,3	2544,8	10597,9	4079,9
	NO _x -eq	12,2	-	3,1	0,2	94,5	5,2	27,0	10,3
	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 1900D- PTE-2025	CO ₂ -eq	5334,8	2762,5	1508,7	1583,3	34237,4	2424,7	11582,9	11636,8
	NO _x -eq	16,2	10,4	3,4	7,4	89,2	4,9	32,7	26,1
	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 1900D- FCB-2050	CO ₂ -eq	-	410491,0	1230,3	91,3	126901,2	2126,5	16884,5	10075,3
	NO _x -eq	-	1051,5	2,8	0,2	272,8	4,3	44,8	22,6
	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.

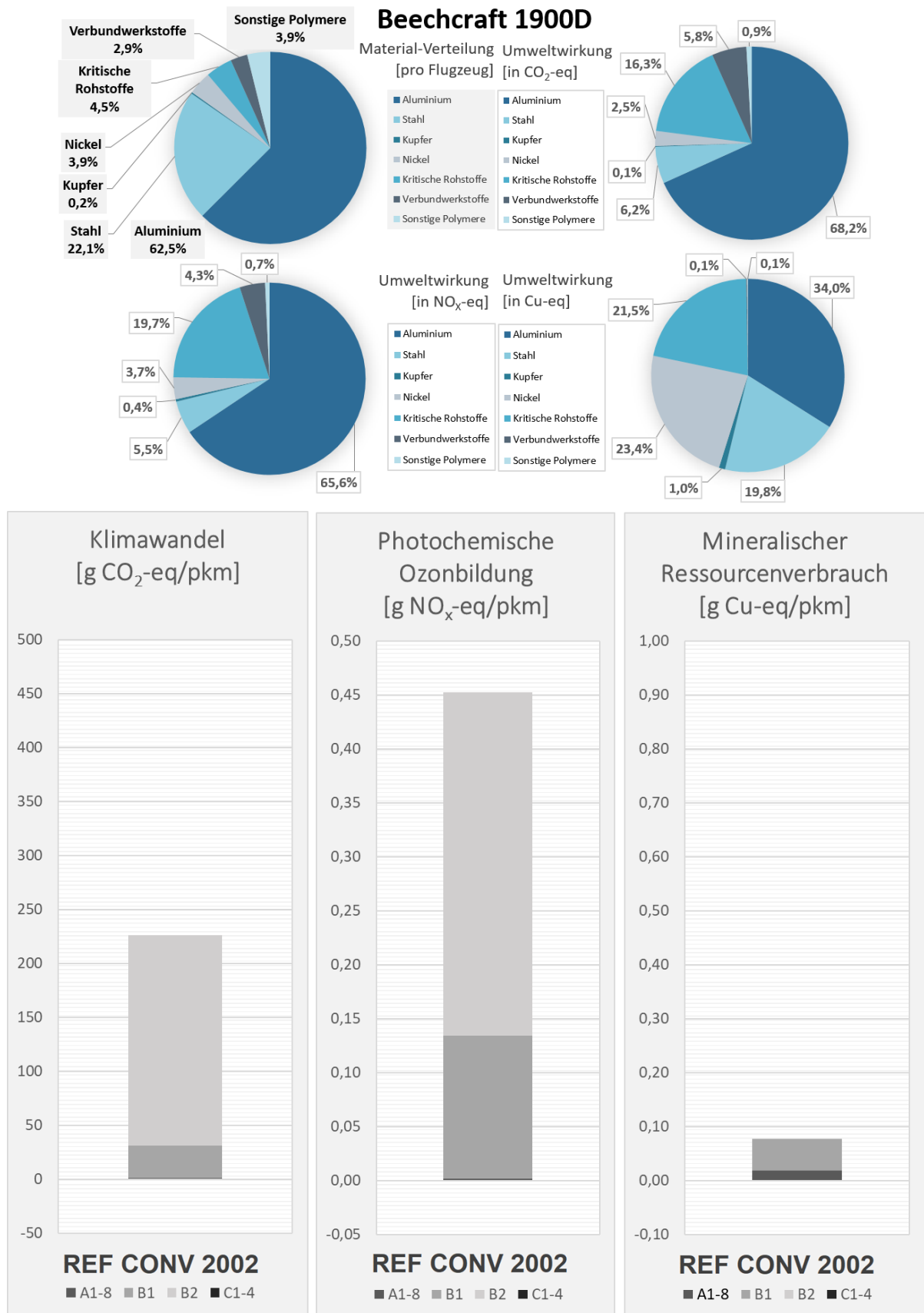


Abbildung 7 Umweltwirkungen der Beechcraft 1900D-CONV pro Lebensphase im Referenzzustand.

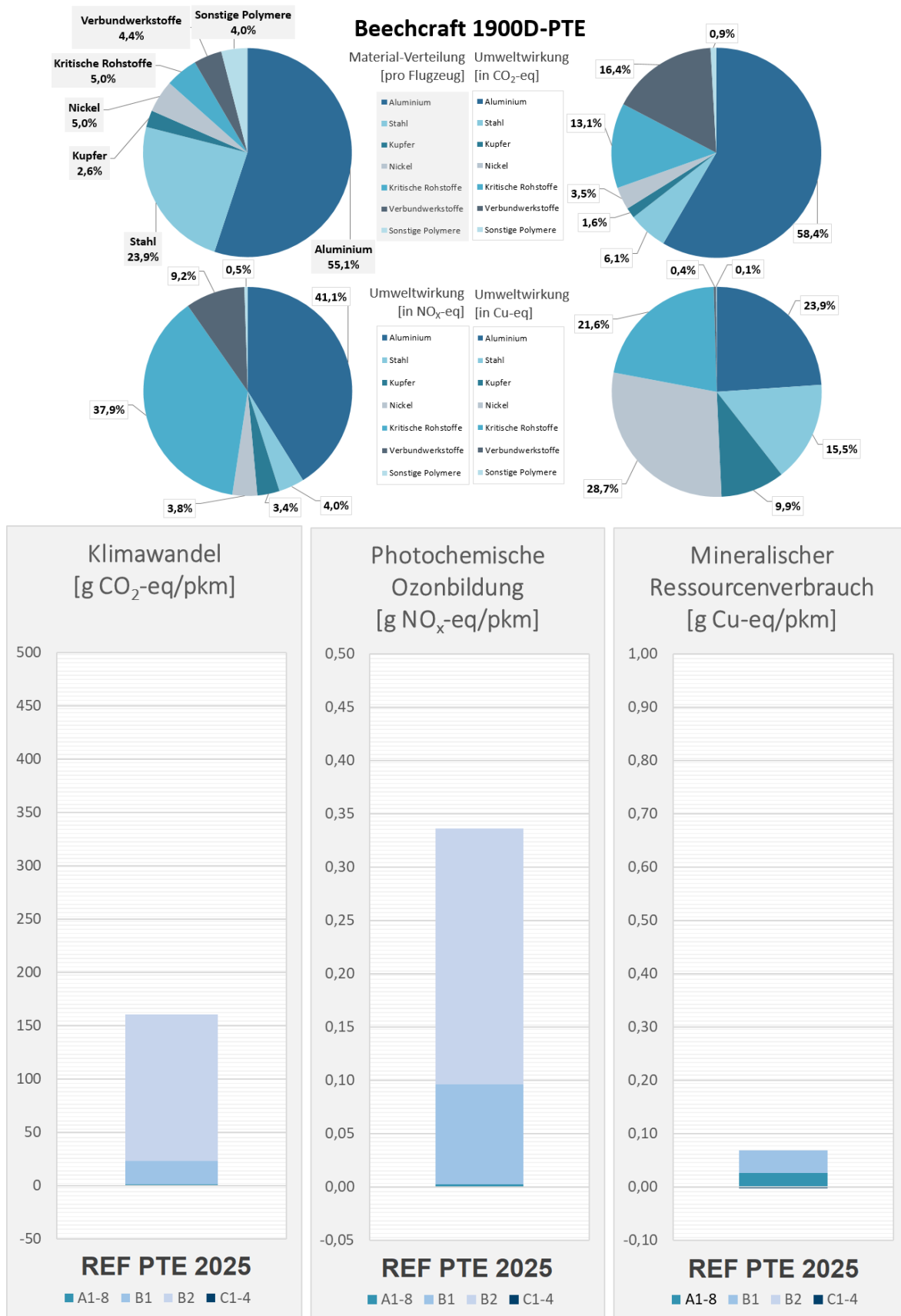


Abbildung 8 Umweltwirkungen der Beechcraft 1900D-PTE pro Lebensphase im Referenzzustand.

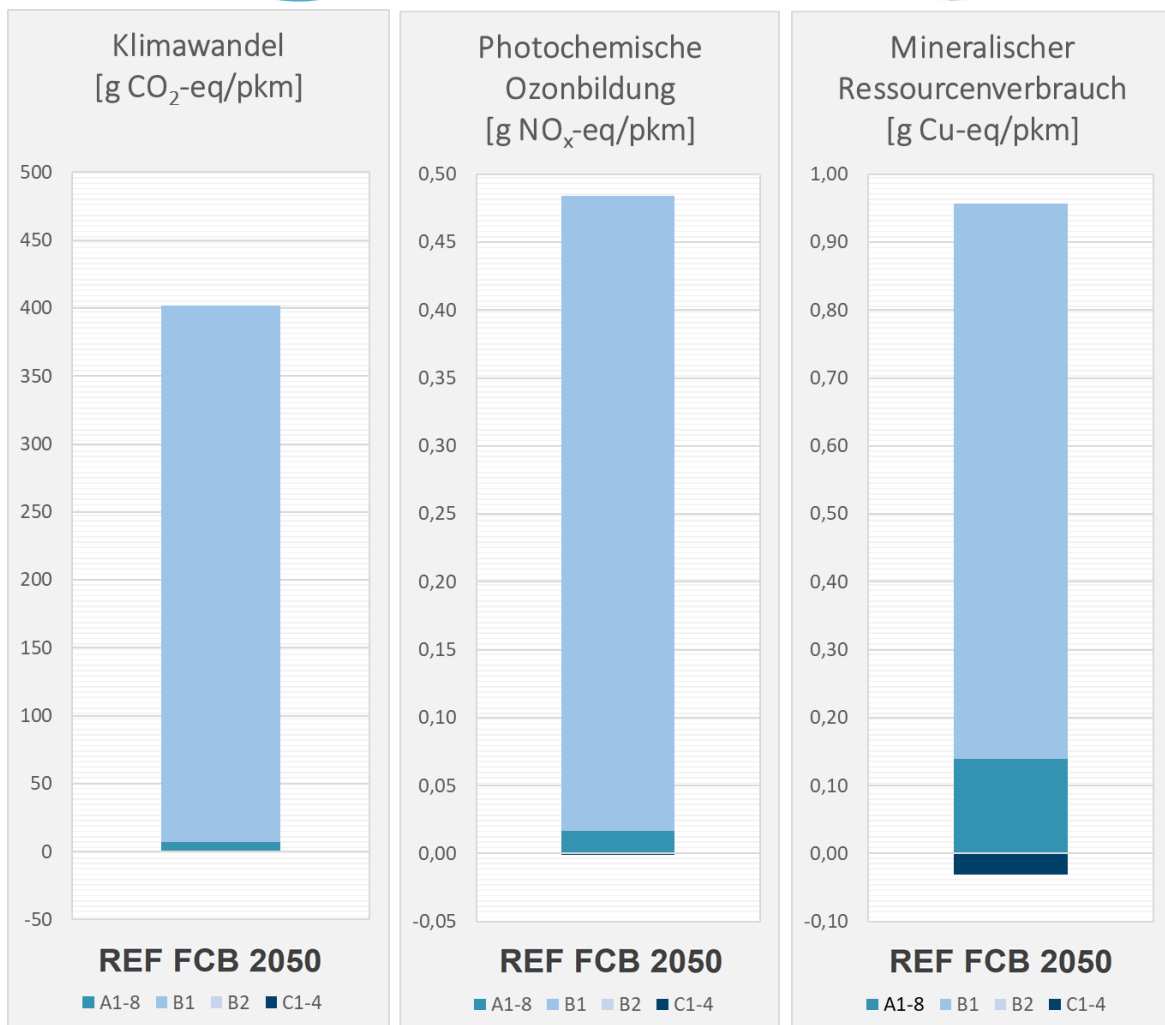
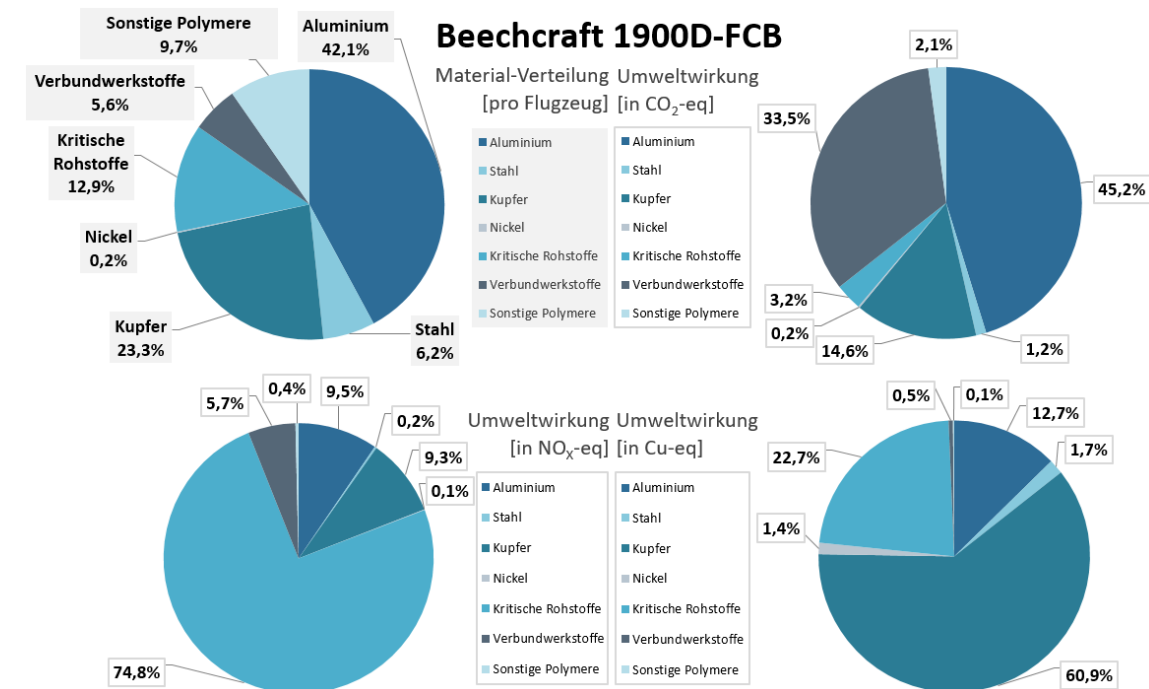


Abbildung 9 Umweltwirkungen der Beechcraft 1900D-FCB pro Lebensphase im Referenzzustand.

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 Zyklenanzahl 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.

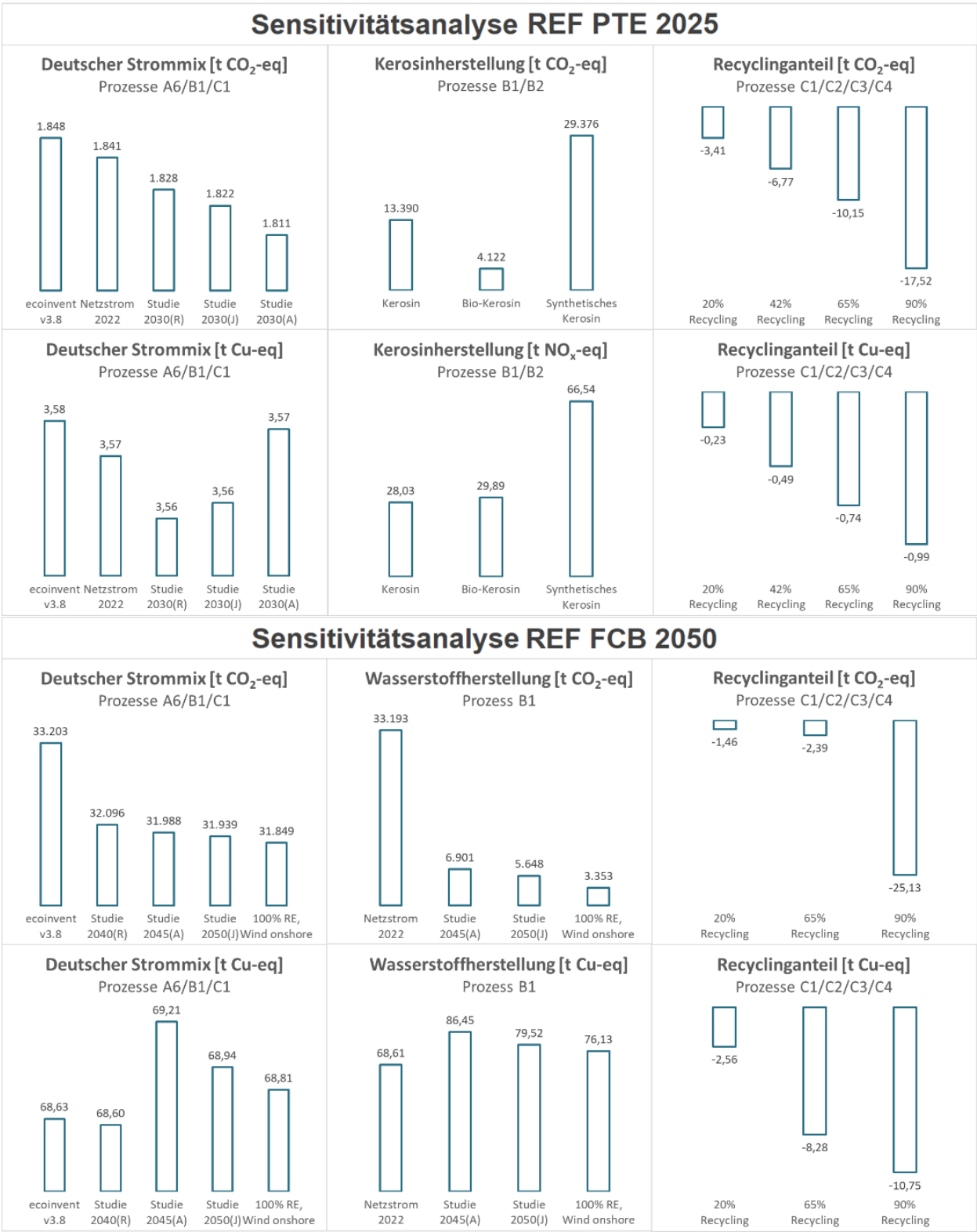


Abbildung 10 Sensitivitäten ausgewählter umweltrelevanter Parameter für die PTE und FCB im Vergleich.

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 Kerosinsubstitute 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

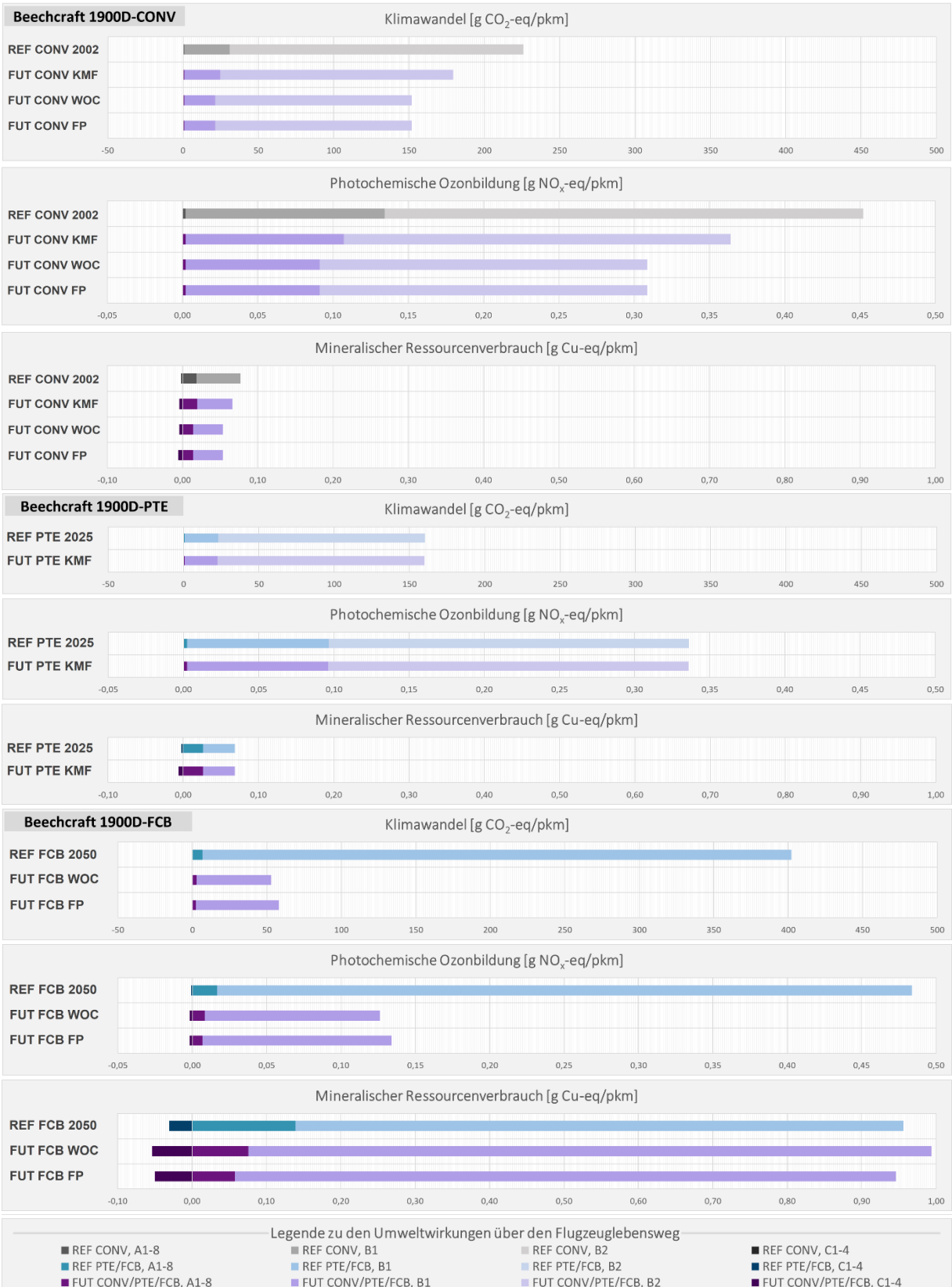


Abbildung 11 Vergleich der Umweltwirkungen aller drei Flugzeuge im Referenzzustand und im Zukunftszustand.

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 Lebensdauererweiterungen, 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 Marktetablierung 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 Marktetablierung 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	CO ₂ -eq	-	1,22%	0,00%	0,00%	0,38%	0,01%	0,05%	0,03%
1900D-	NO _x -eq	-	2,59%	0,01%	0,00%	0,67%	0,01%	0,11%	0,06%
FCB-2050	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	CO ₂ -eq	-	3,27%	0,03%	0,00%	1,60%	0,03%	0,30%	0,15%
1900D-	NO _x -eq	-	4,67%	0,03%	0,00%	1,45%	0,03%	0,34%	0,15%
FCB-	Cu-eq	-	6,85%	0,01%	0,00%	0,50%	0,01%	0,64%	0,06%
2050B (WOC)	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	CO ₂ -eq	-	2,19%	0,03%	0,00%	1,49%	0,03%	0,26%	0,14%
1900D-	NO _x -eq	-	3,29%	0,02%	0,00%	1,39%	0,03%	0,30%	0,14%
FCB-	Cu-eq	-	5,27%	0,01%	0,00%	0,54%	0,01%	0,58%	0,06%
2050C (FP)	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-Zyklenanzahl Auswirkungen auf das Ergebnis hat und erhöhen in einem 100% RE-Zukunftsszenario u.a. die Zyklenanzahl von 1500 auf 2000, woraus in allen drei Wirkungs-Endpunkten 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 erfolgreichem 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 Flugzeuglebensdauer 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 Versorgungsengpässen 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 Umweltgesichtspunkten 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 Umweltgesichtspunkten 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	106,96	1.265	Transport Straße	135,30
Transport	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		Auswahl: Flugzeug, LCA, Energie, Fahrzeug, Kraftstoff, Praxis
Name:	Einrichtung:	Fachexpertise:
<p>A: Ist der Szenario-Parameter in der Ausprägung im Einklang mit dem Flugzeug-Vorentwurf?</p> <p>B: Können Einschränkungen gegen diese zukünftige Parameterausprägung gefunden werden?</p> <p>(Benennung der Einschränkung oder Vorschlag anderer Wert)</p> <p>C: Erscheinen die Veränderungen realistisch und wenn ja, in welcher Höhe?</p> <p>(von 1 gar nicht bis 5 sehr glaubhaft und keinerlei Einschränkungen identifiziert)</p> <p>D: Aufgrund der Expertise ist keine Einschätzung möglich.</p>		
Entwurfsangenommene Transport-Inputparameter (a-TIP)		Bewertungsjahr 2025
a-TIP 1.1 (BAU) Kraftstoffeinsparung	-20% Gesamtreaktion 0,8%/a [ATAG 2010]	A 8 B 4 geringer (5-10%) C 3,4 D 2
a-TIP 2.1 (BAU) Materialreaktion	-3,75% Gesamtreaktion 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% Gesamtreaktion Degression [Wright 1936]	A 4 B 2 E-Motor nicht viel besser C 2,5 D 7
u-TIP 3.1 (BAU) Material E-Motor/BAT	-10% Gesamtreaktion Degression [Wright 1936]	A 2 B 2 E-Motor nicht viel besser C 3 D 10
u-TIP 4.1 (BAU) Output Leistungselektronik	+ 14% Gesamterhöhung Mittelwert [Wright 1936]	A 2 B 3 nur Masse verändern C 2,3 D 8
u-TIP 5.1 (BAU) Zyklenanzahl 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) Zyklenanzahl 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% Gesamtreaktion 0,5%/a [ATAG 2010]	A 7 B 2 geringer (5-10%) C 3,6 D 4
a-TIP 2.2 (BAU) Materialreaktion	-17,5% Gesamtreaktion Tragstruktur: 2/3 CFK	A 4 B 3 ggf. zu hoch 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 Distanz größer C - D 10
u-TIP 2.2 (BAU) Energie Li-Sulfur BAT	-17,5% Gesamtreaktion Degression [Wright 1936]	A 2 B 0 C 4 D 11
u-TIP 3.2 (BAU) Material Li-Sulfur BAT	-10% Gesamtreaktion 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).

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	Herstellungsinputreduktion	-	-	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	Modifikations- maßnahme
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	Modifikations- maßnahme
UP 1.2	FUT-EXP- FASTER	Herstellungsin- put-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 Anteilserhöhung	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-	Cu-eq	7,84%	-	0,16%	0,00%	11,63%	0,20%	3,52%	0,90%
2002	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-	Cu-eq	12,43%	-	0,27%	0,00%	13,69%	0,10%	4,12%	0,96%
2025A (KMF)	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-	Cu-eq	13,65%	-	0,28%	0,00%	8,34%	0,21%	5,10%	1,18%
2050B (WOC)	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-	Cu-eq	14,01%	0,00%	0,29%	0,00%	8,72%	0,22%	5,23%	1,23%
2050C (FP)	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., Deregowski, 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/beechcraft-1900-beechcraft-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). *UMBReLA - 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., Mendelevitch, 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). The ecoinvent 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).