

Schlussbericht

Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen und ressourcenschonenden Leichtbaustruktur für die Luftfahrt (InteReSt-II)

Teilvorhaben:

**Materialauswahl, Untersuchung relevanter Luftfahrt-Umwelt-
Einflüsse und projektbegleitende Ökobilanzierung**

Kurztitel:	InteReSt-II
Förderkennzeichen:	20E1908C
Zuwendungsempfänger:	Hochschule Hannover (HsH) Technische Universität München (TUM) Technische Universität Chemnitz (TUC)
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2020 bis 31.01.2024
Berichtszeitraum:	01.10.2020 bis 31.01.2024
Berichterstatter:	Christoph Vogel, Vineet Shah, Hannes Schäfer, Sarina Schulte Hochschule Hannover IfBB - Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe Heisterbergallee 10A 30453 Hannover E-Mail: vineet-shailesh.shah@hs-hannover.de Tel.: +49 511 9296-7612

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	5
2	Voraussetzungen.....	10
3	Planung und Ablauf	10
4	Wissenschaftlicher und Technischer Stand.....	14
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	18
6	Ziele und erreichte Ergebnisse	18
6.1	HAP 1: Anforderungen, Materialauswahl und Prüfplanung.....	18
6.1.1	AP 1.1: Prüfplanung und Materialauswahl Gewebe-Prepreg	18
6.1.2	AP 1.3: Materialauswahl biobasierter Beschichtungen	19
6.2	HAP 2: Versuchsdurchführung zu Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen.....	26
6.2.1	AP 2.4: Untersuchung von Witterungseinflüssen	27
6.2.2	AP 2.5: Analyse der mikrobiellen Beständigkeit.....	38
6.2.3	AP 2.6: Einflüsse durch verschiedene Flüssigkeiten	48
6.3	HAP 5: Bewertung der Ergebnisse.....	69
6.3.1	AP 5.2: Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts.....	69
6.3.2	AP 5.2: Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts.....	69
6.3.3	Bio-Anteil.....	70
6.3.4	Ziel und Untersuchungsrahmen	71
6.3.5	Sachbilanz	72
6.3.6	Wirkungsabschätzung: LCIA-Ergebnisse.....	89
6.3.7	Lifecycle Interpretation	91
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	101
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	102
9	Nutzen und Verwertbarkeit.....	103
10	Fortschritt bei anderen Stellen.....	103
11	Veröffentlichungen der Ergebnisse	103
12	Kurzfassung (Berichtsblatt)	105
13	Kurzfassung (Document Control Sheet)	106
14	Abbildungen	107
15	Tabellen.....	110
16	Literatur.....	111
17	Anhang	117
17.1	Hintergrund-Datensätze.....	117
17.2	Prepregdatensammlung.....	120

17.3	Biobasiertes Epoxidharz	123
17.4	Parameterkonfiguration für die Szenarios	125

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
ATCC	American Type Culture Collection
DSM	Deutsche Sammlung für Mikroorganismen
GT	Gitterschnittkennwert
GU	Glanzeinheit
HAP	Hauptarbeitspaket
HsH	Hochschule Hannover
L	Lack/ Beschichtungssystem
LF KL	Luftfahrt-Klarlack
Min.	Minuten
MS	Meilenstein
NFK	Naturfaserverbundkunststoff
PFA	Polyfurfurylalkohol
Prepreg	Vorimprägnierte Faserhalbzeuge
TSD	Trockenschichtdicke
TUC	Technische Universität Chemnitz
TUM	Technische Universität München
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
VARI	Vakuuminfusion (vacuum assisted resin infusion)
W	Woche

Der vorliegende Schlussbericht entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts „Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen ressourcenschonenden Leichtbaustuktur für die Luftfahrt“ (Akronym: InteReSt-II). In Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Hubschraubertechnologie der TU München (HT, TUM; Verbundführer), des Instituts für Strukturleichtbau der TU Chemnitz (IST, TUC) sowie des Instituts für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe der Hochschule Hannover (IfBB, HsH) wurde im Zeitraum vom 01.10.2020 bis 31.01.2024 das Forschungsvorhaben durchgeführt.

Der Schlussbericht beschreibt ausschließlich die von der HsH durchgeführten Arbeiten und wurde entsprechend der Vorgaben für Schlussberichte gemäß Nr. 3.2 BNBest-B MBF 98 des BMWK erstellt.

1 Aufgabenstellung

Gesamtziel des Verbundvorhabens „Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen und ressourcenschonenden Leichtbaustuktur für die Luftfahrt“ (InteReSt-II) ist es, aufbauend auf dem Vorgängerprojekt InteReSt, eine hybride Leichtbaustuktur aus biobasierten sowie konventionellen Werkstoffen für die Luftfahrt weiterzuentwickeln und den Anteil an biobasierten Materialien auf über 50 % zu steigern. Die Verbundmaterialien sollen mit neu entwickelten, soweit möglich biobasierten bzw. umweltfreundlicheren Beschichtungen ausgerüstet werden. Mit diesem Vorhaben soll erstmalig gezeigt werden, dass auf Basis der biobasierten (Hybrid)Materialien Beschichtungsstrategien angewendet werden, die sich der Herausforderung stellen, unter Luftfahrt-relevanten Umwelteinflüssen zu bestehen und eine ökologisch nachhaltigerer Variante im Vergleich zu bisher eingesetzten Prozessen und Produkten darstellen. Dadurch sollen Möglichkeiten für die Verwendung von hybriden Leichtbaustrukturen in der Luftfahrt-Umwelt weiter ausgebaut werden. Im Rahmen des Verbundvorhabens dient repräsentativ eine Hubschrauber-Kabinentür zur Demonstration und zur Evaluierung des Technologiekonzepts.

Das Gesamtziel des Vorhabens gliedert sich chronologisch in die folgenden Hauptpunkte:

- (1) Auswahl geeigneter Materialien und Analyse kritischer Umwelteinflüsse
- (2) Anwendung und Bewertung der Tauglichkeit einer Beschichtung für Naturfaserverbundwerkstoffe zum Schutz vor Umwelteinflüssen
- (3) Optimierung der Auslegung einer Kabinentürstruktur auf Basis von Hybriden mit variabel-axialem Faserdesign
- (4) Fertigung einer beschichteten Kabinentür und Bewertung der Luftfahrttauglichkeit
- (5) Ökologische Bewertung des Konzepts einer strukturmechanisch optimierten, umwelttauglichen Kabinentür aus Naturfaserverbundwerkstoffen

Dieses Technologiekonzept beruht auf einem interaktiven Lösungsansatz, den die HsH mit ihrer Expertise zur Materialauswahl (1) und Durchführung von für die Luftfahrt kritischer

Prüfungen zur Charakterisierung der Material- und Beschichtungstauglichkeit unter relevanten Umwelteinflüssen (2) vorantreibt und der schließlich in einer optimierten Verbundstruktur mündet (3). Der Lösungsansatz wird über die komplette Erarbeitung des Technologiekonzepts von der HsH unter ökobilanziellen Gesichtspunkten begleitet (5), um richtungsweisend ressourcenschonendere Optionen im Entwicklungsprozess zu favorisieren.

Damit soll ein Beitrag geleistet werden, um biobasierten (Hybrid-)Materialien ein Einsatzfeld in der heutigen Luftfahrt zu ermöglichen und somit zum Erreichen globaler Klimaziele beizutragen. Im Folgenden werden die Aufgabenstellungen der Arbeitspakete bei denen die HsH die Hauptbearbeitung übernahm beschrieben. Dabei handelt es sich um:

- Materialauswahl biobasierter Beschichtungen (AP 1.3),
- Untersuchung von Witterungseinflüssen (AP 2.4),
- Analyse der mikrobiellen Beständigkeit (AP 2.5),
- Einflüsse durch verschiedene Flüssigkeiten (AP 2.6) und
- Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts (AP 5.2).

HAP 1: Anforderungen, Materialauswahl und Prüfplanung

Unter der Leitung der TUM erfolgt die Auswahl des Flachsfaser-Grundmaterials für den „Versuchsträger“ unter Verwendung der im Vorgängerprojekt InteReSt erprobten Materialien. Weiterhin sollen Modifizierungen zum Schutz vor Witterung identifiziert und analysiert werden. Dabei soll, in enger Zusammenarbeit zwischen der HsH und der TUM, neben der Luftfahrttauglichkeit auch auf den ökologischen Fußabdruck des Beschichtungsmaterials geachtet werden. Die Luftfahrtnormen AECTP 300 – Climatic Environmental Conditions und RTCA-DO 160 dienen maßgeblich zur Anforderungsidentifikation.

Basierend auf den von der TUM erarbeiteten Anforderungen an die Beschichtung für Luftfahrtanwendungen wird die HsH eine Auswahl geeigneter biobasierter Beschichtungen erarbeiten, die in den letzten Jahren verstärkt auf den Markt gekommen sind und auf Luftfahrttauglichkeit untersucht werden sollen.

Nach Abschluss des HAP 1 sind ein geeignetes Gewebe und passende Beschichtungen identifiziert.

AP 1.3: Materialauswahl biobasierter Beschichtungen

In AP 1.3 wird erarbeitet, welche biobasierten Beschichtungen am Markt sind und für NFK-Luftfahrtstrukturen zum Schutz vor Umwelteinflüssen eingesetzt werden können. Hierfür wird in einschlägigen Datenbanken, sowie der Fachliteratur recherchiert, als auch fachkundige Industriepartner befragt. Die betrachteten Umwelteinflüsse sind u.a. Temperatur,

Feuchtigkeit und Witterung sowie Kontakt mit Wasser, Luftfahrt-Flüssigkeiten (Hydraulikflüssigkeit, Schmieröle, Enteisungsflüssigkeit, etc.) und Mikroorganismen.

Am Ende sind geeignete biobasierte Beschichtungen ausgewählt.

HAP 2: Versuchsdurchführung zu Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen

In HAP 2 werden unter der Leitung der TUM in Zusammenarbeit mit der HsH Versuche an Verbundprobekörpern auf Coupon- und Subkomponentenebene durchgeführt. Hierfür werden Proben unterschiedlicher Gewebe-Materialien mit unterschiedlicher Beschichtung verwendet. Untersucht wird das strukturelle Verhalten unter Einfluss von Temperatur, Feuchte, Witterung, Mikroorganismen und verschiedenen Flüssigkeiten. Außerdem werden Wärme- und elektrische Leitfähigkeit analysiert. Zur Untersuchung der Materialschädigung durch Blitzüberschlag werden Versuche im Rahmen eines F&E-Unterauftrags durchgeführt, da entsprechende Versuchsaufbauten bei keinem der Verbundpartner zur Verfügung stehen. Es sollen Wirksamkeit des gewählten Beschichtungsmaterials sowie Materialverhalten untersucht und bewertet werden. Dies betrifft Aspekte, wie z.B. Lackhaftung, Materialsteifigkeit und Massezunahme unter Wasser.

Die Einhaltung von Luftfahrtzertifizierungsnormen für Faserverbundwerkstoffe wird analysiert und dokumentiert und die TUC wird strukturelle Parameter unter Einfluss der Umweltbedingungen für die Auslegung und Simulation der Kabinentür in HAP 3 verwenden.

Bei Abschluss des AP 2 sind kritische Einflüsse aus luftfahrtspezifischen Umgebungsbedingungen analysiert und ein Konzept zum Schutz vor Luftfahrt-Umwelt unter Einhaltung der Zertifizierungsnormen besteht.

AP 2.4: Untersuchung von Witterungseinflüssen

Zur Untersuchung der Einflüsse von UV-Strahlung auf mechanische Eigenschaften des Materials (Normative Empfehlung: Biegeeigenschaften) als auch der Beständigkeit der unter AP 1.3 ausgewählten Beschichtungen werden Untersuchungen nach AECTP 300 (305) durchgeführt.

Für die Versuche wird das UV-Bewitterungsgerät QUV/spray genutzt, welches UV-Bestrahlung mit Wasserbesprühung kombinieren kann. Somit lassen sich neben der Beeinflussung durch UV-Strahlung auch kombinierte Effekte untersuchen. Das Gerät erfüllt diverse Normen allgemeiner Natur sowie speziell für Lackierungen und Kunststoffe. Je nach Fragestellung sind u.U. verschiedene Normen und eine geeignete Kombination dieser zu berücksichtigen, so dass zur Untersuchung der Beschichtungen neben AECTP 300 (305) ggf. weitere lackierungsspezifische Normen berücksichtigt werden. Die Beschichtungen werden dahingehend untersucht, ob sie trotz UV-Strahlung intakt bleiben. Das Material, mit und ohne Beschichtung, wird mechanisch charakterisiert, da UV-Strahlung zum Erweichen des Materials führen kann und Festigkeit und Elastizität beeinflusst werden.

Je nach Vorschrift sind Testzyklen von durchschnittlich 30-56 Tagen durchzuführen.

Am Ende von AP 2.4 sind die Einflüsse von UV-Strahlung auf das strukturelle Verhalten analysiert, die Unterschiede zwischen den in AP 1.3 ausgewählten Beschichtungen untersucht und dokumentiert und Maßnahmen zur Einhaltung der Normen hinsichtlich UV-Strahlung identifiziert.

AP2.5: Analyse der mikrobiellen Beständigkeit

Da insbesondere Cellulose-basierte Fasern eine Nahrungsquelle für Mikroorganismen darstellen, wird das Pilzwachstum auf beschichteten und unbeschichteten Proben nach AECTP 300 (308) und RTCA-DO 160 (13.0) untersucht. Weitere Normen werden zur Identifizierung relevanter Pilzstämme herangezogen, u.a. MIL-STD-810H (508.8) und DIN EN ISO 846, die zur Herstellung der Sporensuspension für die Beimpfung der Prüfkörper benötigt wird. Dabei wird insbesondere Wert auf die Einbeziehung von Pilzarten gelegt, die speziell mit Naturfasern assoziiert sind.

Es sollen Wachstumstests und Tests zur Prüfung der fungistatischen Wirksamkeit durchgeführt werden. Tests mit einer Laufzeit von 4 Wochen werden bei 30 °C und über 90 % rel. Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Zur Validierung des Versuchs werden Kontrollproben betrachtet. Anschließend werden die Proben entsprechend RTCA-DO 160 (13.0) ausgewertet und interpretiert.

Hierzu wird in mikrobiellen Laboren mit fachkundigem Personal eines weiteren HsH-Lehrstuhls zusammengearbeitet.

Nach Abschluss von AP 2.5 sind Einflüsse diverser Pilzkulturen auf die in AP 1.3 ausgewählten Beschichtungen analysiert und protokolliert, die Wirksamkeit der Beschichtungen zum Schutz vor Pilzwachstum untersucht und Maßnahmen zur Einhaltung der Normen hinsichtlich Pilzwachstum identifiziert.

AP 2.6: Einflüsse durch verschiedene Flüssigkeiten

Da es über die Lebenszeit eines Flugobjekts neben Wasser, in Form von Niederschlägen, Kondenswasser, o.ä. auch zu Kontakt mit weiteren Flüssigkeiten, wie Reinigungsflüssigkeiten, Hydraulikflüssigkeit, Schmieröle usw. kommen kann, muss die Flüssigkeitsresistenz entsprechend untersucht und nachgewiesen werden. Dazu wird neben den Vorgaben aus AECTP 300 (314) sowie RTCA-DO 160 (11.0) die spezifisch für faserverstärkte Kunststoffe ausgelegte Norm DIN EN 2489 angewandt.

Es werden Prüfzeiten zwischen 24 Stunden und 4 Wochen untersucht (DIN EN 2489).

Nach Empfehlung der technischen Bewertung aus dem Vorgängerprojekt InteReSt sollen mindestens folgende Flüssigkeiten untersucht werden: destilliertes Wasser, Fluggasturbinenkraftstoff und Hydrauliköl.

Masse-, Volumenänderung, Rissbildung und Biegefestigkeit werden bestimmt (n = 5).

Bei Abschluss von AP 2.6 wurden die Einflüsse diverser luftfahrtspezifischer Flüssigkeiten und die Unterschiede auf ausgewählte Beschichtungen untersucht und dokumentiert sowie Maßnahmen zur Einhaltung der Normen bzgl. dieser identifiziert.

HAP 5: Bewertung der Ergebnisse

In HAP 5 erfolgt die Bewertung des erarbeiteten Technologiekonzepts zur Realisierung von Luftfahrtbauteilen mit hohen Anteilen an biobasierten und somit nachwachsenden Rohstoffen. Das HAP gliedert sich in eine technische und eine ökologische Validierung. Durch die TUM erfolgt in AP 5.1 eine technische Bewertung der Umwelttauglichkeit der gefertigten Bauteile. Durch die HsH erfolgt eine projektbegleitende ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts.

Abschließend stehen eine Zusammenfassung und ein Ausblick hinsichtlich des Einsatzes von biobasierten Werkstoffen in der Luftfahrt zur Verfügung.

AP 5.2: Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts

Ziel des APs ist es, auf Basis wissenschaftlicher Methoden eine Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit des entwickelten Technologiekonzepts vorzunehmen. Dies soll im Einklang mit den Anforderungen der Förderprogrammlinie LuFo VI-1 und dem aktuellen Stand der Technik in der Anwendung von Ökobilanzen für biobasierte Produkte erfolgen.

Für das Technologiekonzept wird eine Ökobilanzstudie nach ISO 14040/44 durchgeführt, mit dem Fokus auf die Materialauswahl und Fertigungsweise von Musterbauteil und Beschichtung. Ebenfalls soll eine Abschätzung zur Nutzungsphase und Entsorgung vorgenommen werden, in die mechanische Kennwerte und Erkenntnisse zur Umwelttauglichkeit einfließen. Die Instrumente der Ökobilanzierung sollen hierbei nicht nur als Analyse- sondern auch als Planungsinstrumente dienen, sodass sie projektbegleitend und iterativ angewendet werden, um Erkenntnisse frühzeitig in die jeweiligen APs rückfließen lassen zu können.

Begleitend zu HAP 1 werden erstmals Ziel und der Untersuchungsrahmen der Studie definiert. Dem iterativen Charakter folgend, werden während des Projektverlaufs notwendige Anpassungen vorgenommen. Die in HAP 4 gewonnen Daten zur Fertigung von Rahmenstruktur und Beschichtung der Kabinentür werden in eine Sachbilanz überführt. Anschließend erfolgt eine Wirkungsabschätzung der potenziellen Umweltwirkungen des Produktsystems sowie eine Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die Ziele der Studie. Mit den resultierenden Ergebnissen sollen abschließend mögliche Rückschlüsse gezogen und Handlungsempfehlungen bzgl. des Einsatzes von NFK in der Luftfahrt abgeleitet werden.

2 Voraussetzungen

Das IfBB an der Hochschule Hannover kann auf eine langjährige Erfahrung bei der Entwicklung von biobasierten Werkstoffen, insbesondere Bioverbundwerkstoffen, zurückgreifen. Im Bereich der Materialentwicklung für den Mobilitätssektor ist das IfBB bereits aktiv gewesen, u.a. bei Bauteilkomponenten aus dem Interieur- und Karosseriebereich für Sportrennwagen (Projekt Bioconcept-Car, <https://www.ifbb-hannover.de/de/forschungsprojekt/bioconcept-car.html>) und dem Vorgängerprojekt InteReSt 1. Das IfBB kann auf ein sehr gut ausgestattetes Technikum zur Erforschung neuer Biowerkstoffe zurückgreifen (<https://www.ifbb-hannover.de/de/kunststofftechnikum.html>). Neben der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur nutzt das IfBB ebenso Software zur Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten mit Hauptfokus auf die Ökobilanzierung (Ganzheitliche Bilanzierung, GaBi), um Umweltwirkungen von Produkten und Verfahren entlang der Wertschöpfungskette systematisch zu analysieren.

Die generell hohen Anforderungen im Luftfahrtbereich an die zu entwickelnden Materialien erfordern eine breite Expertise und wissenschaftliches Knowhow für die Bereiche Leichtbau und Luftfahrt, welches durch die beiden Projektpartner sehr gut abgebildet werden konnte. Mit den beiden Projektpartnern Institut für Strukturleichtbau der TU Chemnitz und dem Lehrstuhl für Hubschraubertechnologie der TU München ist es in Kooperation mit dem IfBB gelungen, die für das Projekt nötige Synergie zu ermöglichen und erfolgreich zu nutzen.

3 Planung und Ablauf

In Abbildung 1 bis

Abbildung 3 sind der Strukturplan, der Netzplan und der Balkenplan (Zeitplan) des Projekts dargestellt. Darin sind die Arbeitspakete, die vom IfBB bearbeitet wurden, gekennzeichnet und die Arbeitspakete, in denen das IfBB die Leitung übernahm, zusätzlich fett markiert. Der Arbeitsplan wurde weitgehend eingehalten. Jedoch standen Ende 2022 noch letzte Versuche und Analysen aus, die in 2023 erfolgreich abgeschlossen wurden. Zu dieser Verschiebung kam es, da sich die Lieferung von lackierten Platten von externen Partnern verzögerte, die hochaktuelle teilbiobasierte Lacke herstellen. Diese boten einen hohen Erkenntnisgewinn zum Stand von teilbiosbasierten Hochleistungslacken im Luftfahrtbereich und wurden daher trotzdem in den Probenumfang aufgenommen.

Die Untersuchungen der mikrobiellen Beständigkeit (Arbeitspaket 2.5.) konnten aufgrund eines kurzfristigen Ausfalls einer Fachkraft nicht wie geplant in den mikrobiellen Laboratorien an der Hochschule Hannover (HsH) in der Abteilung Bioverfahrenstechnik stattfinden. Um dem Zeitplan gerecht zu werden, wurde zu Voruntersuchungen mit einem externen Dienstleister (Ostthüringische Materialprüfgesellschaft für Textil und Kunststoffe mbH (OMPG) und Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung (TITK)) mit hoher Kompetenz bei der Bestimmung der Einwirkung von Pilzen auf Kunststoffen, Textilien und Verbundmaterialien zusammengearbeitet. Da zeitlich nicht absehbar war, wann der HsH-Arbeitsgruppe (Abteilung Bioverfahrenstechnik) wieder Fachpersonal zur Verfügung stehen würde und sich die Expertise des Dienstleisters dem Projekt als zuträglich erwiesen hatte, wurde ein Antrag auf Umwidmung der Gelder zur Erfüllung dieses Arbeitspakets gestellt, um

weiterhin mit dem bewährten Dienstleister zusammenarbeiten zu können. Dieser wurde vom Projektträger bewilligt. Daher konnten die Untersuchungen zu AP 2.5 im Zeitplan abgeschlossen werden.

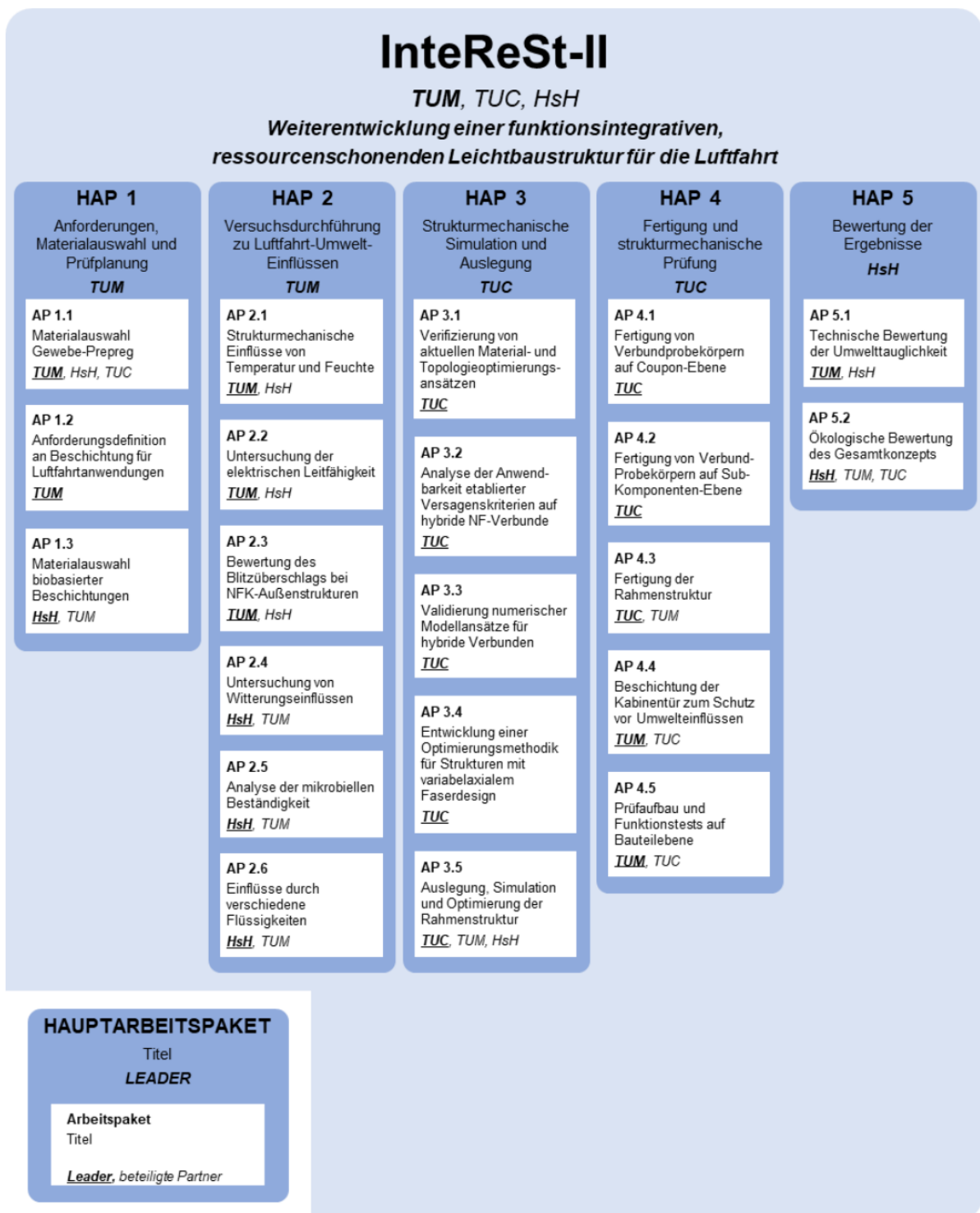


Abbildung 1: Strukturplan des Projekts InteReSt-II

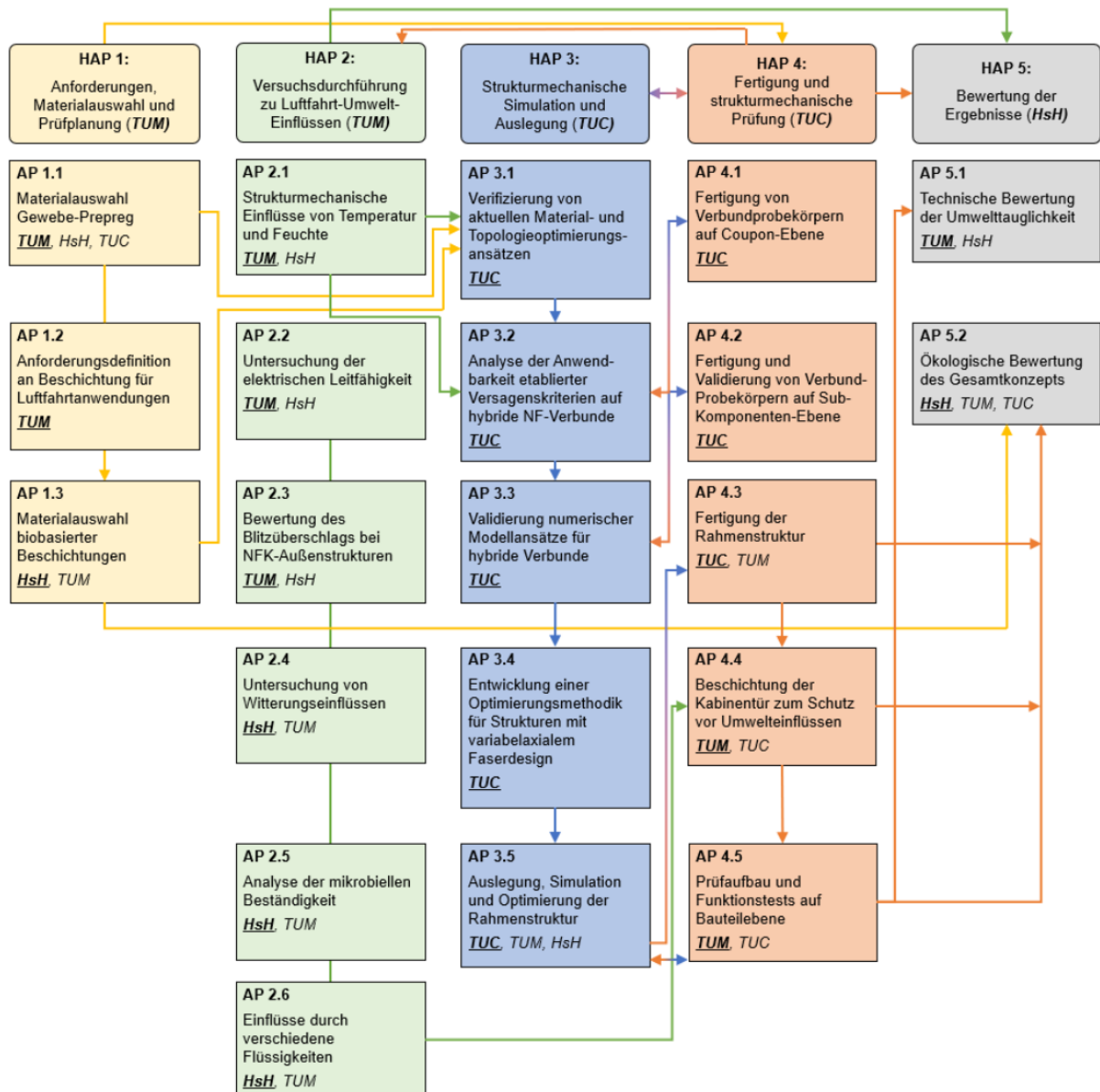


Abbildung 2: Netzplan des Projekts InteReSt-II

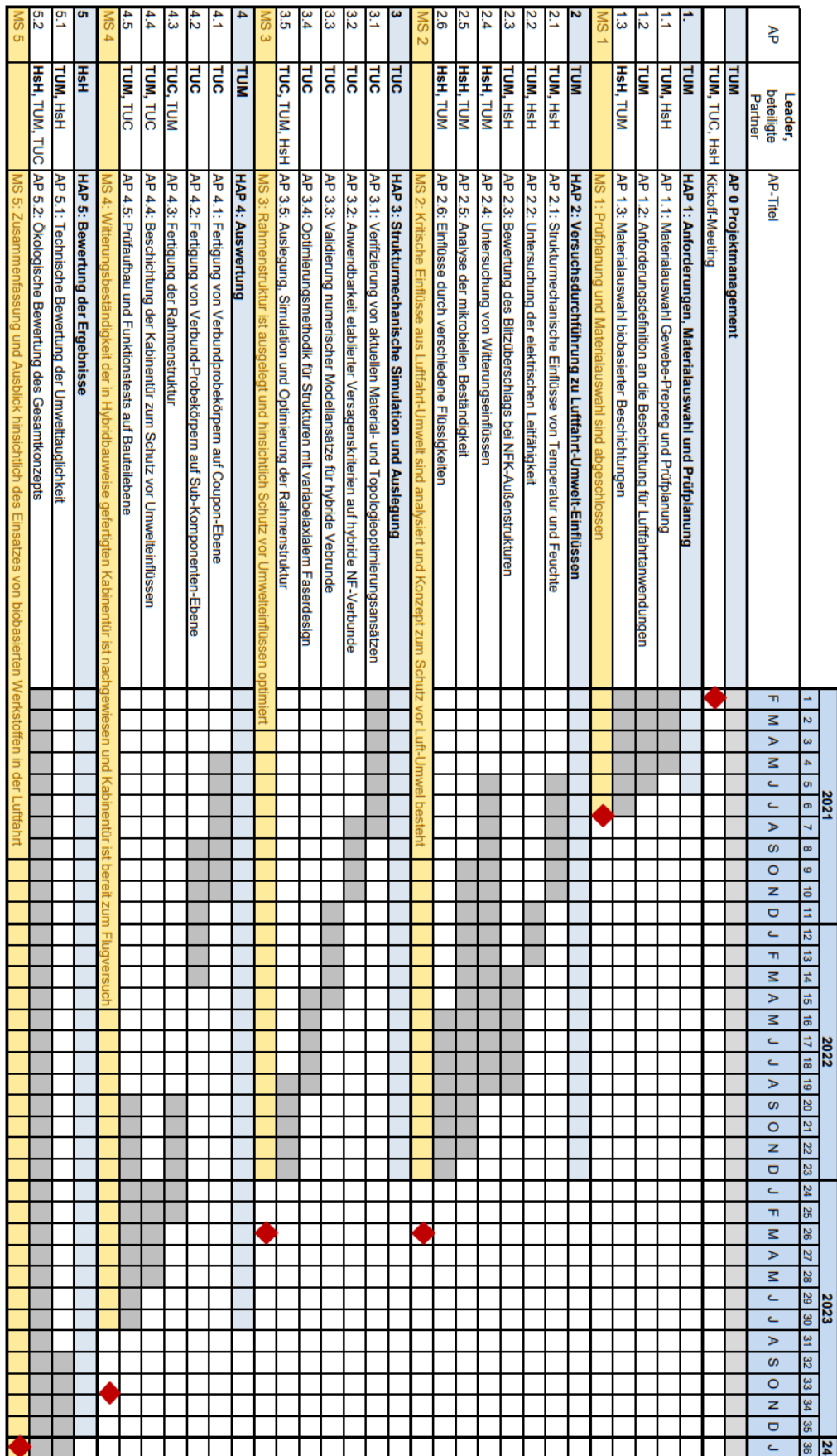


Abbildung 3: Balken/Zeitplan des Projekts InteReSt-II nach kostenneutraler Verlängerung

4 Wissenschaftlicher und Technischer Stand

Für den allgemeinen Stand der Technik in puncto Luftfahrt und die Anknüpfung an das Vorgängerprojekt InteReSt sei auf die Ausführung der TUM verwiesen:

„Zu Beginn der Luftfahrtgeschichte bestanden Flugzeugstrukturen fast vollständig aus Holz. Aus offensichtlichen Gründen kamen statt dem Naturstoff aber schnell andere Materialien wie Stahl, Titan und vor allem Aluminium zum Einsatz. Seit den 1970er Jahren begannen die großen Flugzeughersteller Airbus und Boeing mit der Erprobung und dem Verbau erster Komponenten aus Kohlenstofffaser-verstärktem Kunststoff (CFK). Der steigende Anteil von CFK in fliegendem Gerät fand seinen vorläufigen Höhepunkt in den Entwicklungen von Dreamliner und A350, die jeweils einen CFK-Anteil von über 50 % vorweisen (Carbon Composites e.V., 2019)“.

Der Automobilbau hat Naturfaser-verstärkte Kunststoffe (NFK) längst als ökoeffiziente Konstruktionswerkstoffe für semistrukturale Bauteile, z.B. in komplexen und hochwertigen Türkonstruktionen in der Mittel- und Oberklasse, entdeckt (Karus, et al., 2014). Dort wird der Werkstoff unter anderem für seine geringe Dichte, gute mechanische und akustische Eigenschaften, werkzeugschonende Verarbeitbarkeit, und splitter- und bruchfreie Schadensausprägung geschätzt (Karus & Kaup, Naturfasern für die europäische Automobilindustrie, 2002). Aufgrund der hohen Anforderungen hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und operationeller Langlebigkeit sind NFK-Materialien für die Luftfahrt allerdings noch im Forschungsstadium. Im Vorgängerprojekt InteReSt wurde die mögliche Luftfahrteignung für die Anwendung von NFK-Materialien erstmals untersucht. Mit der Umsetzung von InteReSt konnte gezeigt werden, dass eine Anwendung geeigneter Hybridverbunde aus NFK-Materialien im Luftfahrtbereich möglich erscheint und sich ökologische und ökonomische Vorteile abzeichnen. Allerdings resultiert eine Reihe von Unsicherheiten und Fragestellungen mit der Verwendung von NFK in der Luftfahrt, die auch im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs Widerhall finden (Rinberg, et al., 2016).“

Im praktischen Einsatz werden Kompositmaterialien mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Lastfällen beansprucht. Die nach Shetty et al. (Shetty, Srihari, & Manjunatha, 2016) wichtigsten dieser Konditionen sind mechanische Belastung und die von den Umweltbedingungen ausgehenden Faktoren. Um diese Materialien zu evaluieren, ist es wichtig, ihre mechanischen Eigenschaften zu kennen und wie sie von verschiedenen Umweltfaktoren beeinflusst werden. Zu den Umweltfaktoren zählen hygrothermale Einflüsse, (UV-)Strahlung, chemische und biologische Gegebenheiten, was i.d.R. zu einem Verlust/Abbau an mechanischen Eigenschaften führt (Broughton, 2012) (Dungani, et al., 2019) (Shetty, Srihari, & Manjunatha, 2016). Heiß-warme Umgebungen sind die kritischsten Aspekte in der Berücksichtigung der klimatischen Belastung von klassischen Verbundwerkstoffen (Shetty, Srihari, & Manjunatha, 2016) (Broughton, 2012). Außerdem zählt auch noch Sonnenstrahlung hinzu. Dringt Feuchtigkeit in die Materialmatrix und den Interfacebereich ein, wirkt sie wie ein Weichmacher und führt zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften und zur Erniedrigung der Glasübergangstemperatur (T_g) (Shetty, Srihari, & Manjunatha, 2016) (Broughton, 2012). Wasser dringt in eine Verbundstruktur hauptsächlich per Diffusion ein,

kann jedoch auch per Kapillarwirkung entlang der Faseroberfläche oder durch Mikrorisse eindringen (Mahale, et al., 2004).

Der Materialabbau in CFK wird hauptsächlich durch chemische Veränderungen in der Matrix und sog. de-bonding am Faser-/Matrix-Interface bestimmt (Shetty, Srihari, & Manjunatha, 2016), wohingegen für NFK der Befall mit Pilzen als kritischster performance-bestimmender Punkt bewertet wird (Dungani, et al., 2019). Diese Organismen sind extrem vielseitig und anpassungsfähig; sie produzieren eine enorme Vielfalt an spezifischen, abbaufördernden Enzymen und können signifikante Schädigungen des Materials verursachen. Die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus hängt von den Umgebungsbedingungen ab (Ehrenstein & Pongratz, 2007). Lopez et al. (Lopez, Cooper, & Sain, 2005) zeigten einen relativen Gewichtsverlust von bis zu 11 % durch pilzverursachten Faserabbau auf.

Nicht nur Wasser, auch Luftfahrtflüssigkeiten können mit Luftfahrtstrukturen in Berührung kommen und deren Eigenschaften beeinflussen. Jüngste Untersuchungen nehmen sich dem Thema der naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe an und so konnte für ein mit Jutefaser verstärktes Epoxid-Komposit eine Steigerung der Biegeeigenschaften durch Lagerung in Kraftstoff und Speiseöl nachgewiesen werden (Lila, Singh, Pabla, & Singh, 2017). Broughton fand heraus, dass die Kombination aus JP- 4-Kraftstoff und Wasser aggressiver wirkte als die beiden allein wirkenden Medien. Geeignete Kombinationen an Testszenarien bzw. realistische Fallabschätzungen sind somit in Betracht zu ziehen (Broughton, 2012).

Neben den feuchtebezogenen Umwelteinwirkungen ist auch der Einfluss der Sonnenstrahlung zu untersuchen, da potentielle Auswirkungen von Sonnenstrahlung auf das Material photochemischen und thermischen Ursprungs sind. Mögliche Einflüsse sind: Verschlechterung von natürlichen und synthetischen Elastomeren und Polymeren durch photochemische Reaktionen, die durch kurzwellige Strahlung ausgelöst werden (AECTP-300, 2006) (Ehrenstein & Pongratz, 2007) ($\lambda < 400$ nm). Erwärmungseffekte können u.a. zu Veränderung der Festigkeit und Elastizität, Veränderung der Eigenschaften von Elastomeren und Polymeren, Blasenbildung von Farben und anderen Oberflächen, Erweichung von Kunststoffen und Schwitzen von Verbundwerkstoffen führen (AECTP-300, 2006). Zur Untersuchung von Strahlung durch künstliche Bestrahlung eignen sich insbesondere UVA-340 Lampen, welche eine gute Simulation der Sonnenstrahlung im Spektralbereich zwischen 300 und 350 nm darstellen (Ehrenstein & Pongratz, 2007) und im an der HsH-vorhandenen Testgerät (QUV-spray) eingesetzt werden können. Im Zusammenhang mit der Beurteilung von Eigenschaften von Flugzeugbeschichtungen werden die mit dem QUV realisierbaren Testprotokolle als eines der am häufigsten verwendeten Expositionsprotokolle zur Untersuchung der Auswirkungen von UV-Strahlung und Feuchtigkeit angegeben (Bierwagen & Tallman, 2001).

Da (teil)naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe noch nicht den Stand der Technik in der Luftfahrt darstellen, sind auch die normativen Vorgaben noch nicht in diese Richtung spezifiziert worden. Cellulose-haltige Naturfasern werden nicht explizit erwähnt und somit wird nicht auf Besonderheiten in ihrer Untersuchung eingegangen. Daher wird in diesem Vorhaben neben den technischen Fragestellungen auch ein Beitrag in puncto normgerechter Prüfung von Biohybridverbundwerkstoffen geleistet.

Die maßgeblich durch Feuchtigkeit induzierten Eigenschaftseinbußen sind durch Hemmung der Feuchtigkeitsaufnahme mittels geeigneter Gegenmaßnahmen zu verhindern. Bereits 1974 konnte gezeigt werden, dass Proben, die beschichtet waren, die Feuchtigkeitsresistenz von Kompositen verbesserten (Scott & Paul, 1974). Diese Beschichtungen werden laufend weiterentwickelt und Meldungen über neue Entwicklungen versprechen Beschichtungen die frei von Isocyanaten sind, da sie durch Polysiloxane ersetzt werden, auf Wasserbasis bestehen und mit Schlagworten wie „environmentally friendly“ und „eco-friendly“ beworben werden (AkzoNobel: Helping to develop the next generation of eco-friendly aviation technologies. , kein Datum) (MachineDesign: Navy Develops Environmentally Friendly Topcoat for Aircraft, 2019) (MRO-network: Aircraft Coatings: Not Just A Pretty Color, 2018). Aktuell verwendete Beschichtungen für Außenflächen basieren in der Regel auf Polyurethan oder Epoxidharz und beinhalten meist drei Stufen: Primer zum Korrosionsschutz, Basecoat als Zwischenlack und Topcoat als Decklack. Namhafte Vertreiber für OEM-Lacke sind u.a.: Mankiewicz, AkzoNobel, BASF, Sherwin Williams¹. Zur Identifizierung relevanter und untersuchungswürdiger Beschichtungen wird daher in AP 1.3 einerseits der Stand der Technik erhoben und andererseits der Stand der Wissenschaft herausgearbeitet, um eine diverse Auswahl an Beschichtungen testen zu können.

Eine systematische und quantifizierbare Analyse der Umweltwirkungen von Prozessen und Produkten kann mittels der international standardisierten und in Forschung und Industrie etablierten Methodik der Ökobilanzierung (engl. life cycle assessment, LCA) nach den Normen ISO 14040 (ISO 14040:2006: International Organization for Standardization, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework (ISO 14040:2006), 2006) und 14044 (ISO 14044:2006: International Organization for Standardization, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines (ISO 14044:2006), 2006) durchgeführt werden. LCA ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Beurteilung der potenziellen Umweltauswirkungen von Prozessen und Produkten, wobei alle Lebenszyklusphasen von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung berücksichtigt werden, inklusive aller hierin anfallenden Stoffströme (Rohstoffeinsätze und Emissionen), die mit dem betrachteten Produktsystem verbunden sind. Die Ergebnisse von Ökobilanzen können eine Basis für die Integration umweltrelevanter Aspekte in den Design-, Entwicklungs- und Produktionsprozess von Produkten bilden (Venkatachalam, Spierling, Endres, & Siebert-Raths, 2018).

Die Bilanzierung von biomassebasierten Systemen hat im Rahmen der LCA in den letzten Jahren eine besondere Aufmerksamkeit erhalten, weil gerade in Bezug auf diese Thematik noch einige methodische Unklarheiten und Fehlstellen vorhanden waren (Cherubini & Strømman, 2011) (Garcia, Matos, Aurambout, & Manfredi, 2016) (Milà i Canals, Azapagic, Doka, & Jefferies, 2011) (Pawelzik, et al., 2013). Hierbei haben sich durch methodische Grundlagenarbeit, z.B. zur Betrachtung von biogenem Kohlenstoff oder Landnutzungswirkungen, Fortschritte gezeigt. Weitergehend zur grundlegenden Norm ISO 14040/44 wurden in den Bewertungsmethoden ILCD (International Reference Life Cycle Data System) und dem PEF (product environmental footprint) weiterführende und konsistentere Vorgaben gemacht, die die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen verbessern soll,

¹ Persönliche Kommunikation Mitarbeitende der TUM, Lehrstuhl für Hubschraubertechnologie

sodass die Methodik weiter konsolidiert worden ist in Bezug auf biomassebasierte Systeme. Zum Umgang mit kritischen Aspekten in Ökobilanzen biobasierter Produkte wurden im Rahmen eigener Vorarbeiten (Becker, et al., 2018) sowie durch weitere Arbeiten Dritter (Beck, Albrecht, Lindner, Bos, & Knüpffer, 2017) (Liptow, et al., 2017) Handlungsempfehlungen für die praktische Anwendung entwickelt.

Für NFK-Materialien gibt es eine Reihe von Ökobilanzen, deren Ergebnisse auch im Rahmen von Metaanalysen gegenübergestellt wurden (Y., 2014) (AECTP-300, 2006) (Mansor, Mastura, Sapuan, & Zainudin, 2019) (Campilho, 2015). Der Großteil davon vergleicht NFK mit konventionellen Faserverbundwerkstoffen (z.B. Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)) für die gleichen Anwendungen, um das Potential der biobasierten Alternativen zu demonstrieren. Es wurde keine öffentlich zugängliche LCA über Naturfasern in Luftfahrtanwendungen identifiziert (AECTP-300, 2006), was den Forschungsbedarf unterstreicht, die Lücke mit diesem zu beantragendem Forschungsvorhaben zu schließen. Die meisten LCAs bestätigten, dass der Ersatz von synthetischen Materialien durch Naturfasern die Umweltbelastung eines Verbundwerkstoffes reduzieren kann (Duflou & Deng, 2014) (Barth & Carus, 2015) (Miller, Billington, & Lepech, 2016) (Ribeiro, Ferreira, & Partidário, 2017). Allerdings liegen auch Ergebnisse vor, die darauf hindeuten, dass beispielsweise Flachsfasern aufgrund der intensiven Verwendung von Agrochemikalien (Dünger und Pestizide) eine ähnliche oder höhere Energie benötigen können (Dissanayake, 2011). Anhand der bisher veröffentlichten Ergebnisse lässt sich der Trend erkennen, dass NFKs in einigen Wirkungskategorien, wie z.B. dem Treibhauspotential oder dem abiotischen Ressourcenverbrauch, oftmals besser abschneiden, hingegen in anderen Kategorien wie dem Eutrophierungs- oder Versauerungspotential schlechter abschneiden. Die meisten verfügbaren Studien identifizieren mehrere Datenlücken bei der Bewertung der biobasierten Materialien, wie z.B. die Daten der Landwirtschafts- und Verarbeitungsprozesse in den Vorketten, die Auswirkungen der mechanischen und funktionellen Produkteigenschaften sowie die Haltbarkeit und die erwartete Lebensdauer der Bauteile. Alle diese Parameter können die Umweltprofile der untersuchten Materialien und die vergleichende Bewertung mit den konventionellen Verbundstoffen beeinflussen. Grundsätzlich bedarf es hier weiterer sorgfältiger Untersuchungen der Umweltaspekte von NFKs, um eine verlässlichere Datenlage zu generieren.

Für Luftfahrtanwendungen ist insbesondere die Nutzungsphase ausschlaggebend, da diese den Großteil der Umweltauswirkungen ausmacht (teilweise 95-99 % (Lewis, 2013) (Lopes, 2010)). Im Vorgängerprojekt InteReSt konnte dies bestätigt werden. Es hat sich gezeigt, dass es auf Grund der dominanten Nutzungsphase aus ökologischer Sicht eine Grundvoraussetzung ist, mit NFK mindestens das gleiche Bauteilgewicht wie mit CFK zu erzielen. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass sich für NFK in den Lebenszyklusphasen der Materialbereitstellung und der Bauteilfertigung ökologische Vorteile erzielen lassen. Darüberhinausgehend müssen weitere Aspekte, wie die weiterzuführende Optimierung der mechanischen Eigenschaften sowie die Maßnahmen zur Steigerung der Umwelttauglichkeit und der Langlebigkeit, z. B. durch eine Beschichtung, in die LCA-Bewertung einfließen. Die Beschichtung soll einen positiven Effekt in Bezug auf die Verlängerung der Lebensdauer zeigen und ggf. eine Verbesserung der Eigenschaften bewirken. Die benötigte Beschichtungsmenge (z.B. ausgewählte Lacke) führt

auch zu einer Gewichtszunahme, die im Vergleich zu Gewichtseinsparungen und den ökologischen Vorteilen in der Herstellung des NFKs gegenübergestellt werden muss. Die weitere Erforschung zum nachhaltigen Einsatz von NFK in der Luftfahrt erfordert auch weiterhin die Berücksichtigung der ökologischen Bewertung, unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Verbundpartner TU München, TU Chemnitz und Hochschule Hannover/IfBB haben im Projekt InteReSt-II eng zusammengearbeitet. Die Struktur der Zusammenarbeit der Projektpartner untereinander ist im Netzplan (Kap. 3) dargestellt. Ein kontinuierlicher Austausch hat durch einen Regeltermin alle vier Wochen per Videokonferenz stattgefunden. Bilaterale Absprachen erfolgten bedarfsorientiert je nach anstehendem Arbeitspaket.

Eine Zusammenarbeit hat mit der Fa. INVENT Innovative Verbundwerkstoffe Realisation und Vermarktung neuer Technologien GmbH (kurz Fa. INVENT) stattgefunden. Der Hauptfokus lag hierbei auf der Herstellung der Helikoptertür im Technikum der Fa. INVENT mit den entwickelten Vorproben der Projektpartner. Die durchgeführten Arbeiten sind mit der Fa. edm aerotec GmbH abgestimmt worden, dem Produzenten von ultraleichten Hubschraubern mit einem coaxialen Rotorsystem.

Eine weitere Zusammenarbeit hat mit der Ostthüringischen Materialprüfgesellschaft für Textil und Kunststoffe mbH (OMPG) bzw. den angegliederten Laboren des TITK stattgefunden, da sie Experten bei der Bestimmung der Einwirkung von Pilzen auf Kunststoffen, Textilien und Verbundmaterialien sind und sich daher besonders für die Durchführung der Untersuchungen mit den im InteReSt-II-Projekt hergestellten Proben im AP 2.5/Analyse der mikrobiellen Beständigkeit geeignet haben.

6 Ziele und erreichte Ergebnisse

Nachfolgend sind die Forschungstätigkeiten und die daraus resultierenden wissenschaftlichen Ergebnisse der Hauptarbeitspakete und Arbeitspakete unter Leitung der HsH detailliert dargestellt. Bei den Arbeitspaketen, bei denen die HsH nicht die leitende Funktion eingenommen hat, sind entsprechend nur die Arbeitsanteile der HsH aufgeführt.

6.1 HAP 1: Anforderungen, Materialauswahl und Prüfplanung

6.1.1 AP 1.1: Prüfplanung und Materialauswahl Gewebe-Prepreg

In Arbeitspaket 1.1 sollen unter Leitung der TU München (TUM) Materialien und Fertigungsparameter identifiziert werden, welche sich potentiell für die Herstellung von naturfaserverstärkten Kunststoffen als Luftfahrtstrukturen eignen. Die HsH stand bezüglich der Materialauswahl zur Herstellung der NFK für Luftfahrtanwendungen in engem Austausch mit den Projektpartner der TUM. Neue Materialien und die fortlaufend generierten Erkenntnisse der TUM zu den entsprechenden Materialkombinationen wurden sowohl bilateral als auch in den monatlichen Projektbesprechungen der drei Projektpartner TUM, TUC

und HsH erörtert. Diese konstante Kommunikation war auch aus Sicht der Beschichtungsthematik im Projekt äußerst wichtig, da die Lackierbarkeit der zu untersuchenden Materialien gewährleistet sein muss und diese Eigenschaft daher unbedingt in den Auswahlprozess mit einbezogen werden muss. Ein weiterer wichtiger Aspekt bezüglich der Material- und Prozessauswahl ist die ökobilanzielle Bewertung der Prozesse und Produkte, wozu sich die Projektpartner im Projektverlauf ebenfalls konstant ausgetauscht und beraten haben.

6.1.2 AP 1.3: Materialauswahl biobasierter Beschichtungen

In Arbeitspaket 1.3 soll erarbeitet werden, welche biobasierten Beschichtungssysteme für den Einsatz auf NFK-Materialien am Markt verfügbar sind und das Bauteil potentiell vor luftfahrtspezifischen Umwelteinflüssen schützt. Es wurde eine intensive Recherche zu biobasierten Lacksystemen durchgeführt sowie eine Vielzahl an Gesprächen mit Industrievertretern geführt. Bis dato konnte noch kein Luftfahrtlacksystem identifiziert werden, dass aus 100 % nachwachsenden Rohstoffen besteht und für Luftfahrtanwendungen entwickelt worden ist. Die Recherche hat aber gezeigt, dass es teil-biobasierte Lacke am Markt gibt, diese jedoch generell in nur sehr begrenztem Rahmen verfügbar sind - davon zu meist in Bereichen mit einem niedrigeren Anforderungsprofil als in der Luftfahrt vorgegeben, beziehungsweise Systeme, die nicht für den Einsatz auf Verbundkunststoffen vorgesehen sind. Als Beispiel können hier Beschichtungen zum Holzschutz für Terrassenbretter genannt werden. Daneben haben Gespräche mit produzierenden Unternehmen ergeben, dass bereits weitere Lackrezepturen auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen entwickelt, die Produkte aufgrund der geringen Nachfrage aber derzeit nicht für den Markt produziert werden. Dies zeugt davon, dass es durchaus möglich zu sein scheint, Beschichtungssysteme basierend auf nachwachsenden Rohstoffen auch für anspruchsvolle Einsatzbereiche herzustellen. Es macht aber auch das Defizit in der Nachfrage der Industrie und der Anwender deutlich. Die Entwicklungsbemühungen sollten daher in zwei Richtungen weisen: Zum einen sollte die Forschung und Entwicklung im Bereich voll-biobasierter Lacksysteme verstärkt werden. Zum anderen sollte ebenso die Steigerung der Nachfrage und Akzeptanz der produzierenden Unternehmen sowie der Anwender durch verbesserte Kommunikation und zielgerichtete Aufklärung in den Vordergrund gerückt werden.

Trotz der schwierigen Umstände am Markt, konnten erfolgreich mehrere teil-biobasierte Beschichtungssysteme sowie konventionelle Luftfahrtlacke bezogen werden, um die Forschungsfragestellungen im Projekt InteReSt-II zu beantworten. Da die Lacke auf Basis nachwachsender Rohstoffe für andere Einsatzbereiche und Materialoberflächen entwickelt wurden, wird die Luftfahrttauglichkeit der in **Tabelle 1** genannten Lacksysteme im folgenden Hauptarbeitspaket 2 untersucht und mit fossil-basierten Luftfahrt-spezifischen Beschichtungen (L11-L13) verglichen. Die **Tabelle 1** fasst die bezogenen Systeme (ein Gelcoat sowie 13 Lacksysteme) zusammen und gibt Informationen zu der Materialbasis, dem Anwendungsgebiet und der Rohstoffquelle.

Tabelle 1: Materialauswahl bio- sowie fossil-basierter Beschichtungssysteme.

Lfd. Nr.	Materialbasis	Anwendungsgebiet	Rohstoffquelle
Gelcoat G1	Epoxid	Gelcoat für Epoxidlamine	Teilbiobasiert
L1	Oxidativ Trocknend	Holz(-werkstoffe) und Metall, Innen- & Außenbereich	Teilbiobasiert
L2	Oxidativ Trocknend	Bodenöl, Holz- und Parkettböden	Teilbiobasiert
L3	Oxidativ Trocknend	Holzschutz-Bootslack	Teilbiobasiert
L4	Oxidativ Trocknend	Wetterschutzöl, Hölzer im Außenbereich	Teilbiobasiert
L5	Oxidativ Trocknend	Parkett-Lackvorformulierung	Teilbiobasiert
L6	Polyurethan	Formmassengrundstoff	Teilbiobasiert
L7	UV-Härtend	UV-härtender Lackrohstoff für diverse Untergründe	Teilbiobasiert
L8	Polyester, Polyurethan	Automobilsystem	Fossil-basiert
L9	Polyurethan	Autointerieurlack	Teilbiobasiert
L10	Polyurethan	Autointerieurlack	Teilbiobasiert
L11	Epoxid, Polyurethan	Flugzeuglack	Fossil-basiert
L12	Epoxid, Polyurethan	Flugzeuglack	Fossil-basiert
L13	Polyurethan	Leitfähiger Lack	Fossil-basiert
L14	Polyurethan	Autointerieurlack, Luftfahrt-Klarlack	Teilbiobasiert, fossil-basiert

Die Zusammensetzungen der Lacksysteme sowie die genauen Anteile an nachwachsenden Rohstoffen unterliegen zumeist der Verschwiegenheit der Unternehmen. Falls doch konkrete Werte genannt werden, beruhen diese Angaben auf unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen. Eine direkte Vergleichbarkeit ist somit nicht gegeben und auf eine Nennung genauer Mengenangaben biobasierter Rohstoffe wird daher verzichtet. Die Namen der Hersteller werden aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen nicht genannt. Teilweise sind mehrere Materialbasis-Systeme pro Beschichtung angegeben. Dies ist darauf zurück zu führen, dass es sich bei Lacksystemen um komplexe Mehrschichtaufbauten handeln kann, was in **Abbildung 4** graphisch veranschaulicht ist.



Abbildung 4: Beispielhafter Lackaufbau.

Die unterste Schicht des Lackaufbaus ist eine Grundierungsschicht, welche die Haftung des Lacksystems auf dem Untergrund sicherstellt. Der folgende Füller gleicht mögliche Fehlstellen im Bauteil aus. Der Basislack enthält die Pigmente und sorgt somit für die Farbigkeit. Final wird mit einem Klarlack abgeschlossen. Diese hochglänzende und transparente Schicht schützt vor Umwelteinflüssen und ist leicht zu reinigen. Bei metallischen Substraten wird der Aufbau noch um eine weitere Schicht ergänzt, welche vor Korrosion schützt. Da im InteReSt-II Projekt an nicht korrosiven NFK-Strukturen geforscht wird, kann auf diese Schicht verzichtet werden. Jede einzelne Schicht hat eine spezielle Funktion und das Ineinandergreifen der einzelnen Schichten ist unerlässlich, damit alle entsprechenden Funktionen bestmöglich zum Tragen kommen. Dies ist vor allem in Bereichen mit hoher Bauteilbelastung wie in der Luftfahrtbranche von großer Bedeutung und verdeutlicht die Herausforderung einer erfolgreichen Lackierung von NFK-Oberflächen für Luftfahrtanwendungen.

Neben den beschriebenen Lacksystemen, welche in einem weiteren Bearbeitungsschritt nach Aushärtung des Bauteils appliziert werden, wurde ein teilweise bio-basierter Gelcoat in die Untersuchung aufgenommen. Ein solches System wird bereits im Herstellungsprozess des NFK-Bauteils auf das Werkzeug aufgetragen und bildet so im fertigen Bauteil eine widerstandsfähige Deckschicht, sodass ein weiterer Beschichtungsschritt im Anschluss an die Fertigung eingespart werden kann.

Der Gelcoat wurde im Rahmen des 1. Meilensteintreffens an der TU München (20.07.-22.07.2021) getestet. Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine gleichmäßige Applikation nur sehr schwierig umsetzbar war und auch keine dünnen Schichten erzeugt werden konnten. Dies resultiert in einem höheren Bauteilgewicht, was im Anwendungsfeld der Luftfahrt vermieden werden muss.

Im ersten Schritt wurden daher Voruntersuchungen zur Applizierbarkeit, Haftung, Oberflächenbeschaffenheit und optischem Erscheinungsbild der Lacke durchgeführt. Genauer betrachtet wurden hier speziell die Beschichtungssysteme L1-L7 (**Tabelle 1**), da diese zwar teil-biobasiert sind, aber für andere Anwendungsgebiete konzipiert wurden und daher nicht grundsätzlich von einer guten Kompatibilität der NFK-Oberflächen und den Beschichtungen ausgegangen werden konnte.

Bei den Lacksystemen L8-L12 handelt es sich um spezialisierte Beschichtungssysteme, welche ohne weitere Vortests in die Untersuchung einbezogen werden. Lack L13 ist ein leitfähiger Lack. Dieser kann als weitere Schicht im Lackaufbau von L12 eingebracht werden und ist vor allem für Arbeitspaket 2.3 (TUM) von Interesse.

Um einen Eindruck über die Haftung eines Beschichtungssystems auf einem Untergrund zu erhalten, wird häufig eine Gitterschnittprüfung nach DIN EN ISO 2409 durchgeführt. Dabei wird die Beschichtung kreuzweise eingeritzt, sodass ein Gitter entsteht. Dieses wird optisch begutachtet, ob bzw. zu welchem Grad der Lack an den Schnittpunkten oder entlang der Gitterlinien abgeplatzt ist und entsprechend einem Kennwert von 0-5 zugeordnet. Dabei entspricht ein Kennwert von 0 einem perfekten sauberen Schnittmuster, was ein Hinweis auf eine sehr gute Haftung von Lack und Untergrund ist. Ein Kennwert von 5 entspricht einer nahezu vollständig abgeplatzten Gitterschnittfläche (**Abbildung 5**).

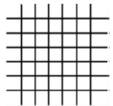
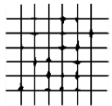
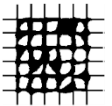
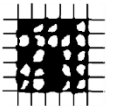
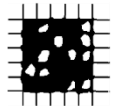
Gitterschnitt-Kennwert GT	0	1	2	3	4	5
Aussehen Gitterschnitt						

Abbildung 5: Gitterschnitt Bewertungssystem, Quelle: DIN EN ISO 2409, modifiziert HsH.

Im Rahmen des Projektes wurde nach ausführlicher Testung ein sog. byko-cut universal Messgerät der Fa. BYK-Gardner GmbH erstanden (**Abbildung 6**). Dieses besitzt neben den Klingen zur Ausführung des genannten Gitterschnitt auch noch Schneiden zur Bestimmung der Schichtdicke sowie der Buchholzhärte. Diese drei zerstörenden Messmethoden werden alle im Projekt zur Analyse der Beschichtungssysteme eingesetzt. Da die Ermittlung der Schichtdicke per byko-cut universal Messgerät auf den im Projekt verwendeten Substrat-Lack-Kombinationen nur sehr schwer durchführbar war, insbesondere die Auswertung, wurde zur Ermittlung der Schichtdicke auf ein alternatives Verfahren zurückgegriffen. Dazu wurden die Schnittkanten der Probenplatten per Mikroskop untersucht, um so auf die Schichtdicke zu schließen.



Abbildung 6: byko-cut universal Messgerät (Fa. BYK-Gardner) zur Beschichtungsanalyse, Quelle: HsH.

Für erste Versuche wurde das bereits erprobte NFK-System als Untergrund eingesetzt, welches im Vorgängerprojekt InteReSt Projekt gute Ergebnisse erzielt hat. Dabei handelt es sich um das Epoxidharz SuperSap INR/INS mit der Flachs-Verstärkungsfasern Lineo FlaxPly BL 200 (3 Lagen), welches mittels Vakuuminfusion (VARI) und einem Ofenaushärtezyklus verarbeitet wird (**Abbildung 7**).

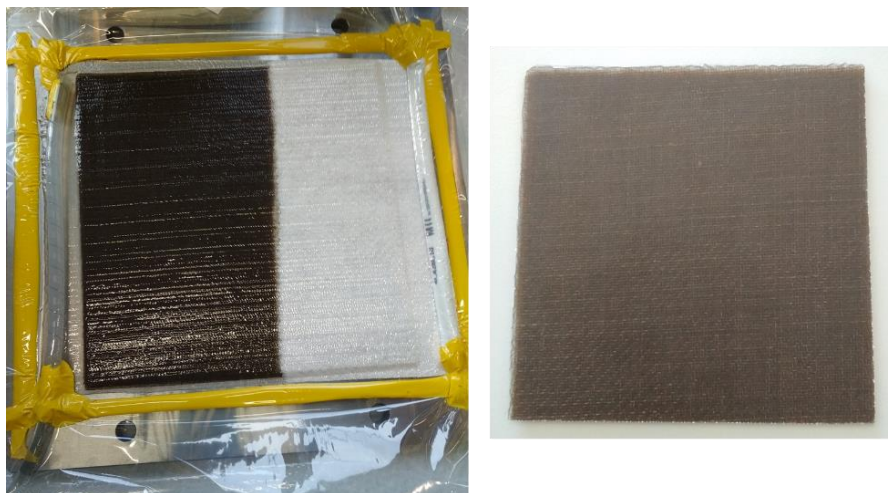


Abbildung 7: Vakuuminfusionsprozess (links) und ausgehärtete NFK-Platte bestehend aus SuperSap INR/INS und Lineo FlaxPly BL 200, 25 cm x 30 cm (rechts).

Die Lacksysteme L1-L6 wurden nach Anschleifen des NFK-Substrats laut Datenblatt zweifach mittels Pinsel händisch auf den NFK appliziert und nach den vorgegebenen Bedingungen ausgehärtet. Die Beschichtungen wurden stets aufgrund der höheren Oberflächengüte auf die

A-Seite des Bauteils, also die Seite, die im Aushärteprozess in Kontakt zum Werkzeug stand, aufgetragen. In der folgenden Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Testlackierungen dargestellt. Eine Probe mit dem UV-härtenden Lack (L7) ist nicht abgebildet, da mit der vorhandenen Ausstattung am Standort eine Applikation nicht zufriedenstellend umzusetzen war. Entsprechend wird das Lacksystem nicht für weitere Untersuchungen berücksichtigt.

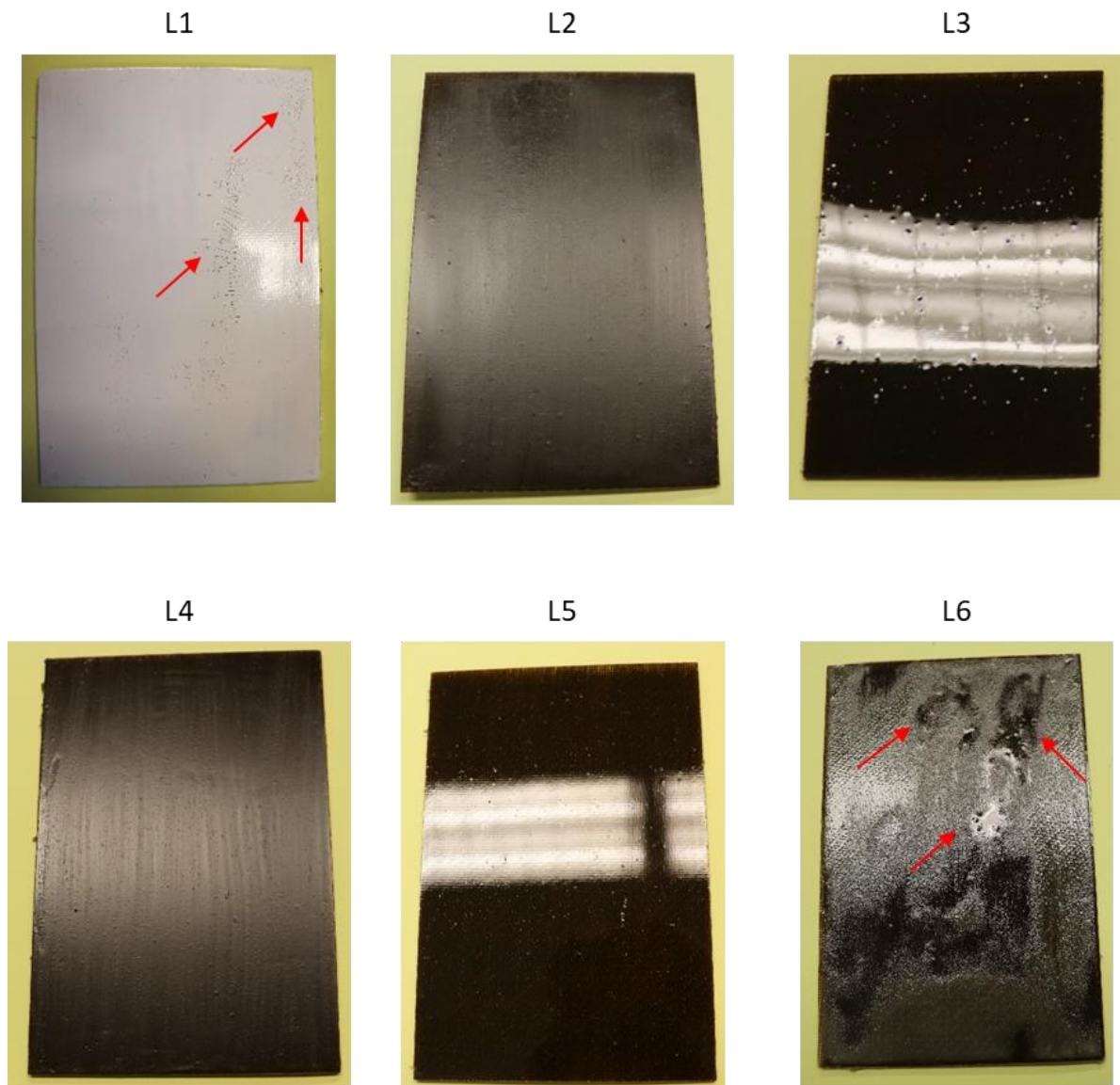


Abbildung 8: Mit Lacken L1-L6 beschichteter NFK-Werkstoff (SuperSap+Lineo FlaxPly BL 200, 10 cm x 15 cm); bei L3 und L5 spiegelt sich die Deckenlampe und bei L1 und L6 sind die Oberflächendefekte mit roten Pfeilen markiert.

Das Lacksystem L1 ist weiß und intransparent. Bei den Beschichtungen L2-L6 handelt es sich um Klarlacksysteme, welche den Untergrund durchscheinen lassen. Die Bauteile erscheinen aufgrund der Farbe des NFK-Werkstoffs daher bräunlich. Bei L1 zeigen sich nach Aushärtung starke Risse und Abplatzungen. Starke Oberflächendefekte sind ebenfalls bei Beschichtung L6

auszumachen. In diesen Fällen scheinen die Lacke mit dem NFK-Untergrund nicht kompatibel zu sein. Um die Untersuchungs-Kapazitäten auf Beschichtungssysteme mit höherem Anwendungspotential zu richten, werden die Systeme L1, L2 und L6 nicht für weitere Untersuchungen herangezogen.

Es wurden Testlackierungen auf einer Auswahl von NFK-Materialien durchgeführt, welche potentielle Kandidaten für den Einsatz im InteReSt-II Projekt als Luftfahrtstrukturen sind. Um einen Eindruck über die Haftung der Lacke auf den unterschiedlichen Untergründen zu erhalten, wurden im Anschluss Gitterschnittprüfungen durchgeführt und so die Lackierfähigkeit der Untergründe bestimmt.

Der Projektpartner aus München hat eine Vielzahl an potentiellen Materialkombinationen zur Verfügung gestellt. Da die Zeit beim Lackhersteller begrenzt war, konnte nur eine Auswahl der zur Verfügung stehenden Materialien getestet werden. Um eine generelle Übersicht der Lackierbarkeiten zu erhalten, wurden Materialien mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen (VARI, Prepreg) und Materialklassen (Epoxid/Polyfurfurylalkohol) sowie mit und ohne Gelcoat ausgewählt: Das im InteReSt-I erfolgreich getestete SuperSap INR/INS System mit dem Lineo FlaxPly BL 200 Flachsfasergewebe, ein NFK basierend auf Lineo FlaxDry 150 Flachsgewebe und dem teil-biobasierten Greenpoxy 56 (Härter SD4771) Harzsystem sowie eine weitere Platte, bei der teilbiobasierte Gelcoat 1 eingesetzt wurde. Die genannten NFK-Systeme sind alle epoxidbasiert und wurden über Vakuuminfusion mit anschließender Ofenhärtung hergestellt. Ergänzend wird noch das CE Flax twill 200 gsm PFC502 - K Prepregsystem von Fa. Composite Evolution begutachtet, welches über einen Autoklavprozess ausgehärtet wird und auf einem Polyfurfurylalkohol-Polymersystem (PFA) beruht.

Bei diesen Testlackierungen wurden die teils biobasierten Beschichtungssysteme L9 und L10 eingesetzt (vgl. **Tabelle 1**). Da es sich hierbei um Autointerieurlacke handelt, sind diese primär nicht für die extremen Beanspruchungen im Luftfahrtbereich entwickelt worden. Um die Beständigkeit gegen luftfahrtspezifische Umwelteinflüsse zu gewährleisten, soll daher im Rahmen des Projekts untersucht werden, ob ein Luftfahrtklarlack als weitere Schicht diesen Schutz bieten kann. Dafür muss die grundlegende Kompatibilität des Luftfahrtklarlacks mit den Beschichtungssystemen L9 und L10 gewährleistet sein, welche über eine Gitterschnittprüfung nachgewiesen werden soll.

Tabelle 2: Gitterschnittkennwerte (GT) ausgewählter NFK-Materialien mit verschiedenen Lacksystemen, visuelle Bewertung.

	SuperSap INR/INS + Lineo FlaxPly BL 200	Greenpoxy 56 (Härter SD4771) + Lineo FlaxDry 150	Greenpoxy 56 (Härter SD4771) + Lineo FlaxDry 150 + Gelcoat1	CE Flax twill 200 gsm PFC502 - K
L9	0	0	0	3
L10	0	0	0	2
L9 + LF KL	0	0	0	3
L10 + LF KL	0	0	0	3

Bei den Prüfungen haben sich Gitterschnitt Kennwerte von $GT = 0$ für alle untersuchten Proben ergeben, was zeigt, dass die Lacksysteme L9 und L10 auf allen Untergründen eine gute Haftung aufweisen (**Tabelle 2**). Einzig bei dem PFA Prepreg System zeigen sich nach Gitterschnittprüfung bei allen Tests deutliche Abplatzungen der Lacke (**Abbildung 9**). Es werden bei allen Tests daher nur Kennwerte von $GT \geq 2$ erreicht, was von einer mangelnden Haftung der Beschichtungen auf diesem Substrat zeugt. Das Harzsystem auf Basis von Polyfurfurylalkohol ist damit nicht für die getesteten Lacksysteme geeignet.



Abbildung 9: Das PFA NFK-System (CE Flax twill 200 gsm PFC502 - K) zeigt nach Gitterschnittprüfung deutliche Abplatzungen bei allen getesteten Lacken.

Bei den Kompatibilitätstest der Beschichtungssysteme L9 und L10 mit einem Luftfahrt-Klarlack haben alle Proben (bis auf den PFA NFK) nach Gitterschnitt einen Kennwert von $GT = 0$ erreicht. Dies zeugt von einer guten Haftung und es kann somit von einer allgemein sehr guten Kompatibilität der Lacksysteme ausgegangen werden.

Zusammenfassend konnten in AP 1.3 erfolgreich Beschichtungssysteme identifiziert werden, die NFK-Luftfahrtstrukturen vor den spezifischen Umwelteinflüssen schützen könnten. Nach den im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführten Vorversuche, werden die Lacksysteme L2, L3, L5 sowie L8-L13 (vgl. **Tabelle 1**) in Hauptarbeitspaket 2 tiefergehend untersucht. Aufgrund der aktuellen Marktsituation sind davon aber nur fünf teilweise biobasierte Lacksysteme (L2, L3, L5, L9, L10). Bei den Systemen L11-L13 handelt es sich um fossilbasierte Luftfahrtlacke, wobei L13 ein leitfähiger Lack ist. Dieser wurde aufgrund der geplanten Untersuchung zur elektrischen Leitfähigkeit sowie dem Verhalten bei Blitzüberschlag in die Untersuchung mit aufgenommen (vgl. AP 2.2 und 2.3, TUM). Bei L8 handelt es sich um ein System, was aktuell im Ultraleichtschrauberbau eingesetzt wird und als Vergleich untersucht werden soll. Der Gelcoat 1 wurde aufgrund der angesprochenen problematischen Applikation und des dadurch gesteigerten Bauteilgewichts im weiteren Projektverlauf nicht weiter betrachtet. Dafür wurde das Zweischichtsystem L14, bei dem ein teilbiobasierter Lack durch einen fossilen Klarlack ergänzt wurde, in den Probenumfang mit aufgenommen.

6.2 HAP 2: Versuchsdurchführung zu Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen

In Hauptarbeitspaket HAP 2 sollen in Zusammenarbeit von TUM und HsH die in HAP 1 erarbeiteten Materialien mit den ausgewählten Lacksystemen beschichtet werden und das

strukturmechanische Verhalten unter Einwirkung von Witterungseinflüssen wie UV-Strahlung (HsH), Temperatur und Feuchte (TUM) sowie die Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen (HsH) und luftfahrtspezifischen Flüssigkeiten (HsH) untersucht werden. Weiterer Teil der Tests ist die elektrische Leitfähigkeit und die Bewertung von Blitzüberschlägen (TUM).

Es wurden verschiedene Untergründe zur Untersuchung der Luftfahrt-Umwelt-Einflüsse eingesetzt, die in **Tabelle 3** aufgeführt sind. Als erstes das an der HsH mittels VARI-Verfahren hergestellte SuperSap+Lineo FlaxPly BL 200 System (NFK1), welches erfolgreich in InteReSt-I Anwendung gefunden hatte. Weiterhin wurden die Prepreg-Systeme CE Flax twill 200 gsm PFC502 (NFK2), Fiberpreg NAT 200 T EP1.5-65//44 (NFK3) sowie das vom Hersteller Fiberpreg im Jahr 2022 neu eingeführte NFK Prepreg-System Fiberpreg NAT 200 T EP4.5S bio-55 (NFK4), welches ein teilweise bio-basierten Harzsystem besitzt, untersucht. Für NFK3 werden eine Schicht mit 65% Harzanteil und drei Schichten mit 44% kombiniert.

Tabelle 3: Ausgewählte NFK-Untergründe für die Untersuchung der Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen.

Lfd. Nr.	Zusammensetzung Naturfaserverbundkunststoff (NFK)	Faser-Bindung	Herstellungsmethode
NFK1	SuperSap+Lineo FlaxPly BL 200	Köper-Gewebe	VARI
NFK2	CE Flax twill 200 gsm PFC502	Köper-Gewebe	Prepreg
NFK3	Fiberpreg NAT 200 T EP1.5-65//44	Köper-Gewebe	Prepreg
NFK4	Fiberpreg NAT 200 T EP4.5S bio-55	Köper-Gewebe	Prepreg

Arbeitspakete 2.1 (Strukturmechanische Einflüsse von Temperatur und Feuchte) und 2.2 (Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit) stehen unter der Leitung der TU München und werden hauptsächlich vom Projektpartner bearbeitet. Die HsH steht vor allem im Hinblick auf Beschichtungsspezifische Fragestellungen wie der Oberflächenanalytik und spezieller Prüfverfahren beratend zur Seite. Weiterhin stellt die HsH der TU München die zu testenden Lacksysteme zur Verfügung und organisiert teils die Applikation der zu untersuchenden Beschichtungen. Dafür stehen TUM und HsH in häufigem bilateralem Austausch.

6.2.1 AP 2.4: Untersuchung von Witterungseinflüssen

In diesem Arbeitspaket soll speziell auf die schädigende Wirkung von UV-Strahlung auf die gefertigten Bauteile eingegangen werden. Dazu werden sowohl unbeschichtete als auch beschichtete Probekörper in einem UV-Bewitterungsgerät (QUV/spray der Firma Q-Lab) ausgelagert. In Anlehnung an die beschichtungsspezifische Bewitterungsnorm DIN EN ISO 16474-3 werden UVA-340 Lampen verwendet, da diese die höchste Korrelation zur natürlichen Sonnenstrahlung aufweisen. Die Proben werden nach dem in **Tabelle 4** gezeigten Zyklus (DIN EN ISO 16474-3, Zyklus 1) bewittert, der in eine vierstündige trockene Periode mit UV-Strahlung und eine vierstündige Kondensationsperiode ohne Bestrahlung aufgeteilt ist. Jeweils fünf Replikate werden pro untersuchten Material nach 14 Tagen (42 Zyklen) sowie nach 28 Tagen (84 Zyklen) entnommen und analysiert.

Tabelle 4: Bewitterungszyklus nach DIN EN ISO 16474-3 (Zyklus 1).

Beanspruchungsperiode	Lampentyp	Bestrahlungsstärke	Schwarztafel-Temperatur
4 h trocken	UVA-340	0,83 W/(m ² ·nm) (bei 340 nm)	(60 ± 3) °C
4 h Kondensation	-	UV-Lampen aus	(50 ± 3) °C

Außerdem wurden weitere Untersuchungen an den verschiedenen Lacksystemen mit höherer energetischer UV-B Strahlung nach DIN EN ISO 16474-3 (Zyklus 4, siehe **Tabelle 5**), analog zu der vorherigen Bewitterung durchgeführt, um die Lacke einem Härtetest auszusetzen und mögliche Differenzen stärker zu Tage treten zu lassen.

Tabelle 5: Bewitterungszyklus nach DIN EN ISO 16474-3 (Zyklus 4).

Beanspruchungsperiode	Lampentyp	Bestrahlungsstärke	Schwarztafel-Temperatur
4 h trocken	UVB-313	0,71 W/(m ² ·nm) (bei 310 nm)	(60 ± 3) °C
4 h Kondensation	-	UV-Lampen aus	(50 ± 3) °C

In **Abbildung 10** bis **Abbildung 12** sind Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung sowohl vor (a) als auch nach zwei- (b) beziehungsweise vierwöchiger (c) Auslagerung dargestellt. Betrachtet man die unbeschichteten Proben, werden die Unterschiede der eingesetzten Lacksysteme deutlich. Die NFK ohne Beschichtung (NFK 1, NFK2, NFK3 und NFK4) weisen eine eher bräunliche dunkle Farbe auf. L2, L3 und L5 sind transparente Lacksysteme, bei denen der Naturfaseruntergrund durchscheint. Bei L8, L9, L10, L11, L12 und L14 sind die Lackschichten pigmentiert und weisen eine entsprechende Farbigkeit auf. Bei diesen Systemen könnte die Farbe durch einen Wechsel der Pigmente verändert werden und so auf mögliche Hersteller- oder Kundenwünsche angepasst werden.

Bei den unbeschichteten Proben NFK1 bis NFK3 (**Abbildung 10**, oberste Reihe) ist deutlich zu erkennen, wie die Proben durch die Bewitterung fortschreitend verblassen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer Beschichtung für Leichtbaustrukturen auf Basis von Naturfaserverbunden, um die Oberfläche vor der energiereichen UV-Strahlung zu schützen. Bei den Klarlacksystemen in der mittleren Reihe (NFK1_L2, NFK1_L3, NFK1_L5) sind optisch nur sehr geringe und in der unteren Reihe (NFK1_L8, NFK1_L9, NFK1_L12) keine Farbänderungen ersichtlich.

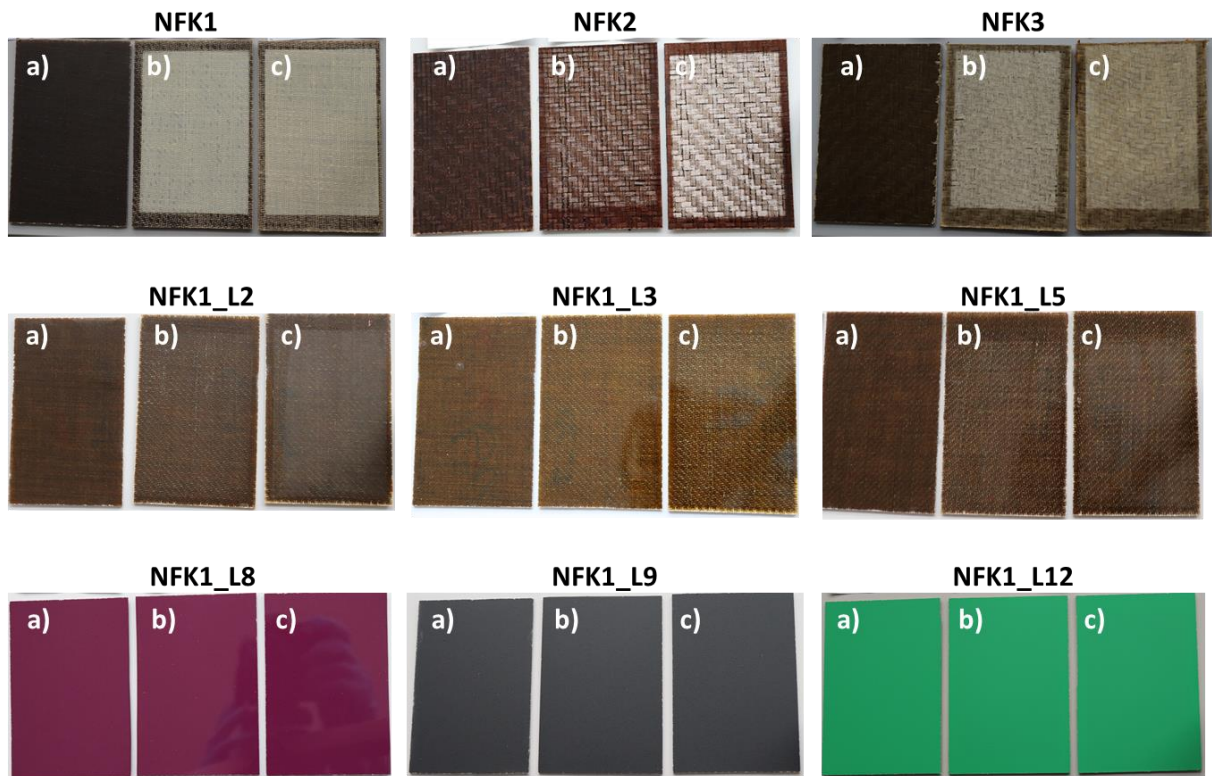


Abbildung 10: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht bewittert (0 Wochen), b) nach zwei Wochen und c) nach vier Wochen Bewitterung (DIN EN ISO 16474-3 Zyklus 1), 7,5 cm x 11 cm, UVA Charge 1.

In **Abbildung 11** sind fotografische Aufnahmen von Charge 2 der Bewitterungen mit UVA-Strahlung (siehe **Tabelle 4**) an den unbeschichteten Proben NFK3 und NFK4 sowie an den lackierten Systemen NFK3_L10, NFK3_L11 und NFK3_L14 dargestellt. Dabei zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der ersten Untersuchung (vgl. **Abbildung 10**). Die unlackierten Proben NFK3 und NFK4 sind bereits nach 2 Wochen Bewitterung stark ausgebleicht, während bei den lackierten Proben auf den ersten Blick keine Farbunterschiede identifiziert werden können. Bei genaueren Betrachtungen zeigen sich jedoch leichte Farbveränderungen nach einer Bewitterung von 4 Wochen bei den Proben mit den Lacken L10 und L14.

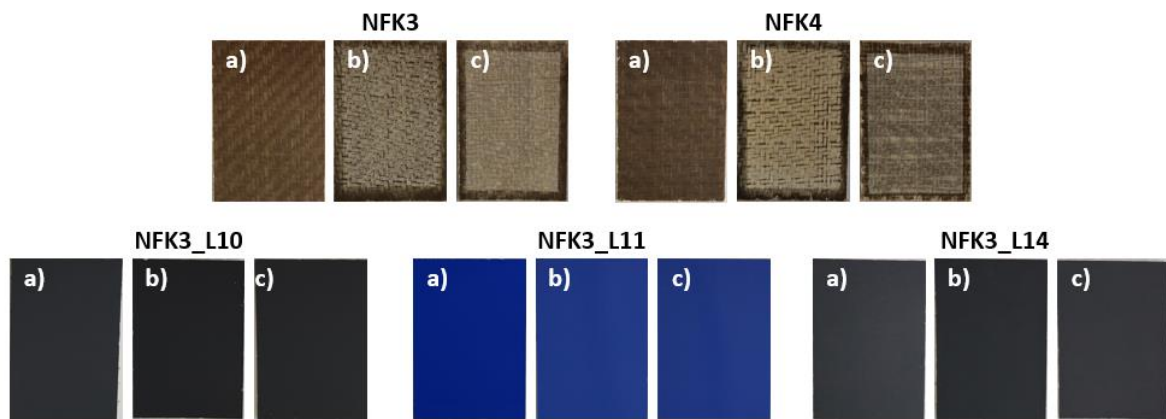


Abbildung 11: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht bewittert (0 Wochen), b) nach zwei Wochen und c) nach vier Wochen Bewitterung (DIN EN ISO 16474-3 Zyklus 1), 7,5 cm x 11 cm, UVA Charge 2.

Abschließend zeigt **Abbildung 12** die mit UVB-Strahlung bewitterten Proben der Charge 3. Dabei zeigt das unbeschichtete NFK3 das gleiche Bild wie bei UVA-Strahlung. Nach 2 Wochen sind die Platten stark ausgebleicht. Die Proben, mit den Lacken L9, L11 und L12 zeigen hingegen keine optischen Veränderungen, was den Ergebnissen der UVA-Bestrahlung entspricht. Bei dem System NFK3_L10 treten leichte Farbunterschied ab 2 Wochen Bestrahlung auf und bei NFK4_L14 ab 2 Wochen leichte und ab 4 Wochen klar wahrnehmbare Farbveränderungen. Somit wurden diese beiden letzten Lacke stärker von der UVB-Strahlung beansprucht, bezogen auf eine rein optische Bewertung (mit dem bloßen Auge) der Auswirkungen der Bewitterung.

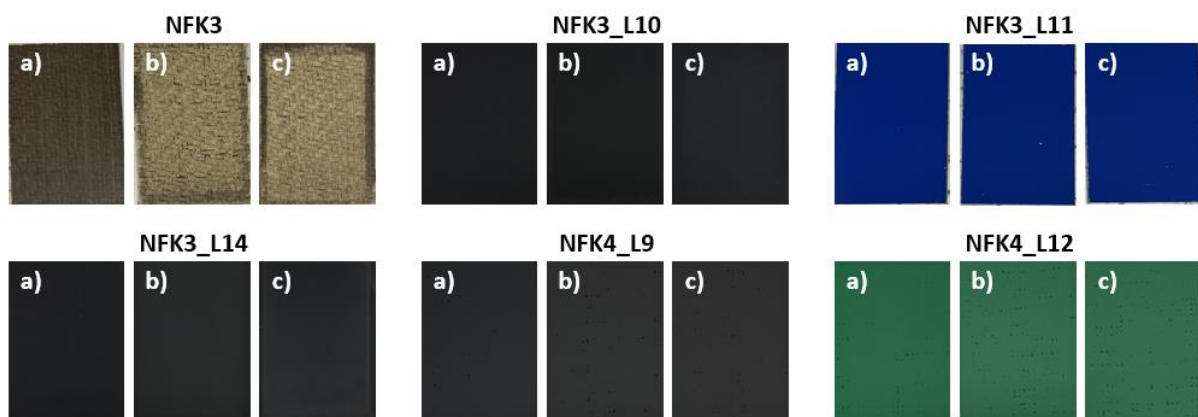


Abbildung 12: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht bewittert (0 Wochen), b) nach zwei Wochen und c) nach vier Wochen Bewitterung (DIN EN ISO 16474-3 Zyklus 4), 7,5 cm x 11 cm, UVB Charge 3.

Um diese Beobachtungen genauer aufzuschlüsseln und den visuellen Eindruck mit Daten zu belegen, werden Glanz- und Farbmessungen mit dem Spectro-guide 45/0 gloss der Fa. BYK-Gardner GmbH an allen Proben durchgeführt. Die Ergebnisse der Glanzmessungen (**Abbildung**

13) zeigen bei den unbeschichteten Proben zum einen die stark unterschiedlichen Glanzwerte (GU) der Naturfaserverbunde unter sich und zum anderen den deutlichen Verlust an Glanz durch die Bewitterung und bestätigen so den optischen Eindruck. Die kurzwellige und energiereiche UV-Strahlung greift die Oberflächen an und schädigt in Kombination mit der feuchten Kondensation die Naturfaserverbunde. Typische zersetzende Effekte, die durch die Strahlung hervorgerufen werden können, sind zum Beispiel Kettenspaltungen, Oxidation und Hydrolyse der Makromoleküle und Pigmente. Ob nur die Oberfläche in Mitleidenschaft gezogen wurde oder sich durch die Bewitterung auch die mechanischen Kennwerte verändert haben, zeigt die 4-Punkt-Biegeprüfungen, dessen Ergebnisse am Ende dieses Kapitels dargestellt sind.

Für UVB Charge 1 zeigt NFK1 beschichtet mit L2 vergleichsweise geringe Glanzwerte von 20 GU, welche sich durch die Bewitterung auf ca. 12 GU verringern. Auch hier kann von einer Degradation der Oberfläche ausgegangen werden. L3, L5 und L8 (Untergrund NFK1, UVB Charge 1) zeigen die höchsten Glanzwerte um 90 GU in der Untersuchung. Bei dem Bootslack L3 sowie bei dem Automobilsystem L8 ändern sich die Glanzwerte durch Bewitterung nicht signifikant. Dies zeugt von einer guten UV-Stabilität dieser Systeme, was bei den Einsatzgebieten der Lacke zu erwarten gewesen ist. Das Lacksystem L5 kann das Bauteil nicht vollumfänglich schützen und eine leichte Verringerung der Glanzwerte auf von 87 auf 78 GU ist detektiert worden. Bei den Beschichtungen L9 und L12 handelt es sich um matte Lacksysteme. Dies wird mit den sehr geringen Glanzwerten von 1-2 GU verdeutlicht. Aufgrund der geringen Werte kann bei diesen Proben über Glanzwertermittlung nur schwer auf mögliche Auswirkung von UV-Strahlung und Kondensation auf das Bauteil geschlossen werden.

Bei Charge 2 der Bewitterung mit UVA-Strahlung hat NFK3 im Vergleich zu NFK3 der ersten Charge wesentlich geringere Werte bei der Referenzprobe (0 Wochen). Dies könnte entweder an einem Mess- bzw. Verfahrensfehler bei Charge 1 liegen oder an einem leicht veränderten Vorgehen der Plattenherstellung. NFK3 Charge 1 wurde in München an der TUM gefertigt und NFK3 Charge 2 an der HsH. Die 2- und 4-Wochen-Proben zeigen hingegen vergleichbare Werte im Bereich 4,5 bis 2 GU. NFK4 hat ähnliche Werte wie NFK3. Die Werte bei den beschichteten Proben NFK3_L10 und NFK3_L14 sind sehr gering, da es sich um matte Lacksysteme handelt. Auch hier kann daher auf Grund der sehr niedrigen GU-Werte keine Aussage über mögliche Auswirkungen von UV-Strahlung und Kondensation auf das Bauteil getroffen werden. NFK3_L11 zeigt hingegen durchgängig hohe Glanzwerte, was darauf hindeutet, dass die L11-Oberfläche widerstandsfähiger gegenüber UVA-Strahlung ist als das angewendete Epoxidharz.

Die Ergebnisse der Proben NFK3, NFK3_L10, NFK3_L11 und NFK3_L14 der Bewitterung mit UVB-Strahlung (Charge 3) zeigen das gleiche Bild wie bei Charge 2 (UVB), was darauf schließen lässt, dass die energiereichere UVB-Strahlung keine größeren Auswirkungen auf die Glanzwerte im Vergleich zur UVA-Strahlung hat. Auch die beiden Lacke L9 und L12, auf dem teilbiobasierten Untergrund NFK4, haben einen vergleichbaren Verlauf wie auf NFK1 (UVB Charge 1). Zwar zeigt, mit etwa 3,5 GU, die Probe NFK4_L12 leicht höhere Werte wie NFK1_L12 (1,5 GU), jedoch befindet sich die Glanzänderung im Verlauf der 4 Wochen auf einem ähnlich niedrigen Niveau, was auch daran liegt, dass es sich um matte Systeme handelt und bei diesen eine Einordnung über den Glanzwert nur schwer möglich ist. Aus diesem Grund

wird die Untersuchung um eine Farbanalyse ergänzt. Aus den dafür vor und nach der Bewitterung gemessenen Werten der Helligkeit L^* sowie aus den Farbwerten a^* und b^* des CIELAB-Farbraums wird der CIELAB-Farbabstand ΔE^*_{ab} nach Norm DIN EN ISO/CIE 11664-4 als Maß für Farbunterschiede bestimmt.

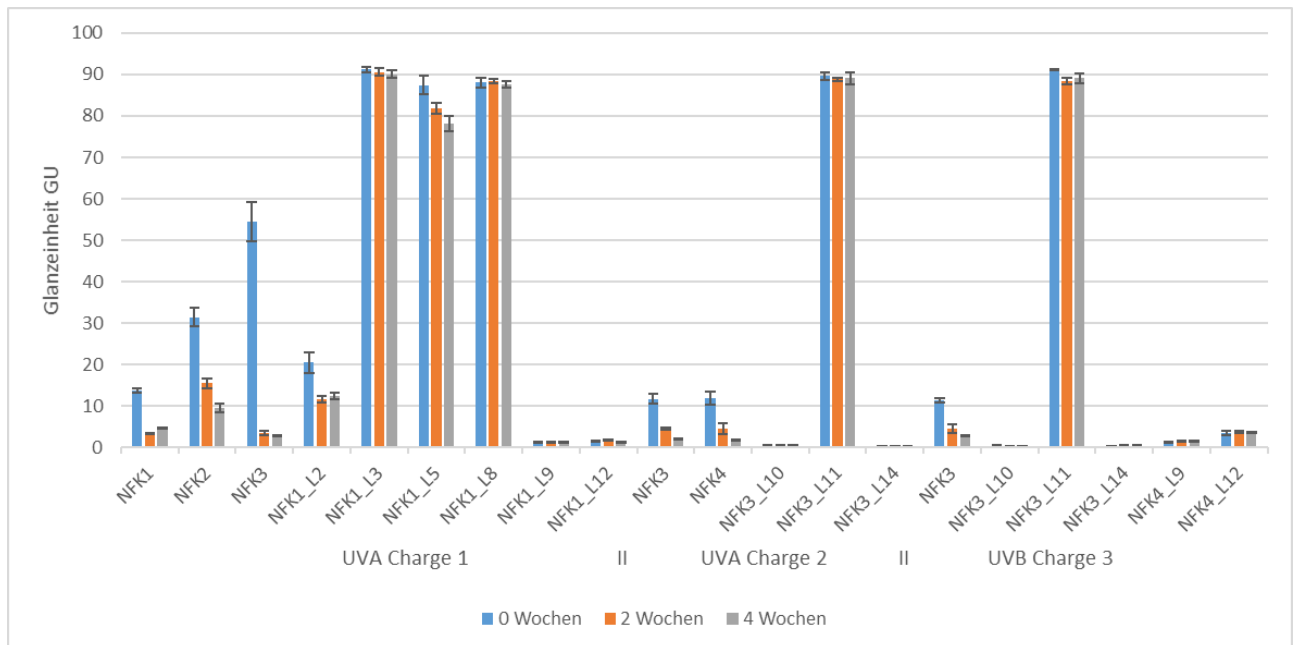


Abbildung 13: Glanzmessung der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung unbewittert (0 Wochen) sowie nach 2- und 4-wöchiger UV-Bewitterung.

In **Abbildung 14** ist der Farbabstand ΔE^*_{ab} der zwei und vier Wochen bewitterten Naturfaserverbundproben jeweils mit der nicht ausgelagerten Probe als Bezugspunkt dargestellt. Auch hier zeigen die unbeschichteten Proben NFK1 bis NFK4 wie erwartet sehr große Farbabstände und verdeutlichen den starken Angriff der Oberfläche. Zwischen NFK3 UVA Charge 2 und UVB Charge 3 können trotz energiereicherer Strahlung hingegen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden und NFK3 UVA Charge 1 weicht wieder von der Vergleichsmessung der zweiten Charge ab, was, wie schon bei der Glanzmessung erwähnt, entweder an einem Mess- bzw. Verfahrensfehler oder an einem leicht veränderten Vorgehen der Plattenherstellung liegen kann, da die Glanz- als auch Farbmessung simultan bei einer Messung erfolgt. Geringe Farbunterschiede mit ΔE^*_{ab} -Werten zwischen 2 und 5 lassen sich für die Beschichtungen L2, L3 und L5 feststellen. Unerwartet für ein luftfahrtspezifisches Lacksystem zeigen sich auch bei dem NFK1_L12 zwar geringe aber dennoch messbare Farbveränderungen, was bei NFK4_L12 mit leicht erhöhten Werten (+ 0,7 bis 1,0) bei UVB-Strahlung nochmal bestätigt wird. Die Lacksysteme L8 und L9 stechen bei dieser Untersuchung hervor, da nahezu keine Farbveränderung festzustellen ist. Diese Lacke sind für die Automobilindustrie entwickelt worden, wo entsprechend großer Wert auf Farbechtheit gelegt wird. Auch hier wird das positive Ergebnisse bei der UVB-Bestrahlung (NFK4_L9) bestätigt. Die Lacke L10, L11 und L14 zeigen mit einem Farbabstand ΔE^*_{ab} kleiner gleich 1 bei Charge 2 der UVA-Bestrahlung und kleiner gleich 2 bei Charge 3 der UVB-Bestrahlung sehr gute Werte.

Dabei ist hervorzuheben, dass NFK3_L10 die mit dem teilbiobasierten Autointerieurlack beschichtete Probe ist und bezüglich der Farbänderung mit dem fossilen Flugzeuglack (L11) und dem 2-Schichtsystem aus teilbiobasierten Autointerieurlack mit fossilem Klarlack (L14) mithalten kann. Somit konnten mit Hilfe der Glanz- und Farbmessung zwei teilbiobasierte Lacke (L9 und L10) mit einer Widerstandsfähigkeit gegen UV-Strahlung identifiziert werden.

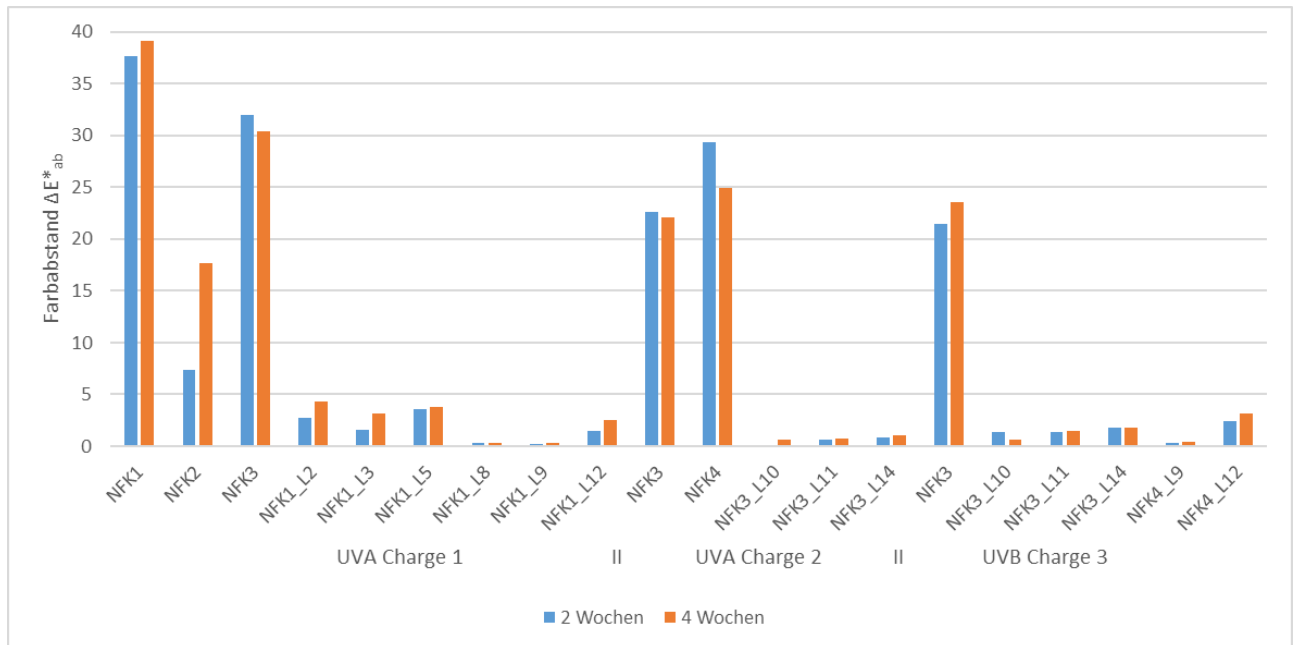


Abbildung 14: Farbabweichung ΔE^*_{ab} der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung nach zwei und vier Wochen in Bezug zur nicht ausgelagerten Probe, nach DIN EN ISO/CIE 11664-4.

Um weitere Informationen über die Veränderungen der Lackoberfläche zu gewinnen wurde der Eindruckversuch nach Buchholz vor und nach Bewitterung der beschichteten NFK durchgeführt. Dafür wurde das byko-cut universal Messgerät der BYK-Gardner GmbH (**Abbildung 6**) mit der entsprechenden Buchholzhärte-Klinge 30 Sekunden auf den Probekörper abgelegt und im Anschluss die Buchholzhärte über die Länge der entstandenen Kerbe auf 0,1 mm genau ermittelt (Anlehnung an DIN EN ISO 2815, **Abbildung 15**).

Die Eindrucklänge verhält sich reziprok proportional zum Eindruckwiderstand. Das bedeutet, je größer die Eindrucklänge desto geringer ist der Widerstand der Oberfläche gegenüber dem Eindringen der Messklinge. Bei den Proben der Charge 1, NFK1_L2, NFK1_L3, NFK1_L5 und NFK1_L8 sind signifikante Veränderungen erkennbar, nach Auslagerung verringert sich die Eindrucklänge deutlich. Somit steigt bei diesen Proben durch die Bewitterung der Eindruckwiderstand der entsprechenden Beschichtungen. Dies könnte mit einer Versprödung des Materials erklärt werden, hervorgerufen durch Degradationsprozesse bedingt durch die energiereiche UV-Strahlung. Hervorzuheben ist, dass diese Proben vor Auslagerung Eindrucklängen im Bereich von ca. 1,6-1,9 mm zeigen und damit höhere Werte erzielen als die Proben NFK1_L9 und NFK1_L12 mit Eindrucklängen von ca. 1,2-1,3 mm. Dafür sind hier nur geringe Abweichungen im Verlauf der Bewitterung festzustellen, die weiterhin im

Fehlerbereich der Messungen liegen und daher nur bedingt aussagekräftig sind. Nach vierwöchiger Bewitterung erreichen alle untersuchten Beschichtungssysteme der Charge 1 relativ ähnliche Eindruckslängen im Bereich von etwa 1,1-1,3 mm.

Bei UVA Charge 2 ist im Vergleich zu Charge 1 keine eindeutige Änderung der Eindruckslängen innerhalb der 4 Wochen Bewitterung feststellbar. Wird der mögliche Fehler mitbetrachtet kann davon ausgegangen werden, dass die Härte der Lacke L10, L11 und L14 nicht durch die energiereiche UVA-Strahlung entscheidend verändert wird.

Für die Beschichtungen L10, L11 und L14 der UVB-Bestrahlung Charge 3 zeigen die Werte ein ähnliches Niveau wie bei UVA Charge 2. Bei NFK4_L9 und NFK4_L12 kann, wie schon bei UVA Charge 1, eine leichte Abnahme der Eindruckslänge und damit eine Erhöhung des Widerstandes gegen das Eindringen der Klinge festgestellt werden. Jedoch liegen alle Werte unterhalb der bei Charge 1 gemessenen in einem Bereich von 0,8-1,2 mm.

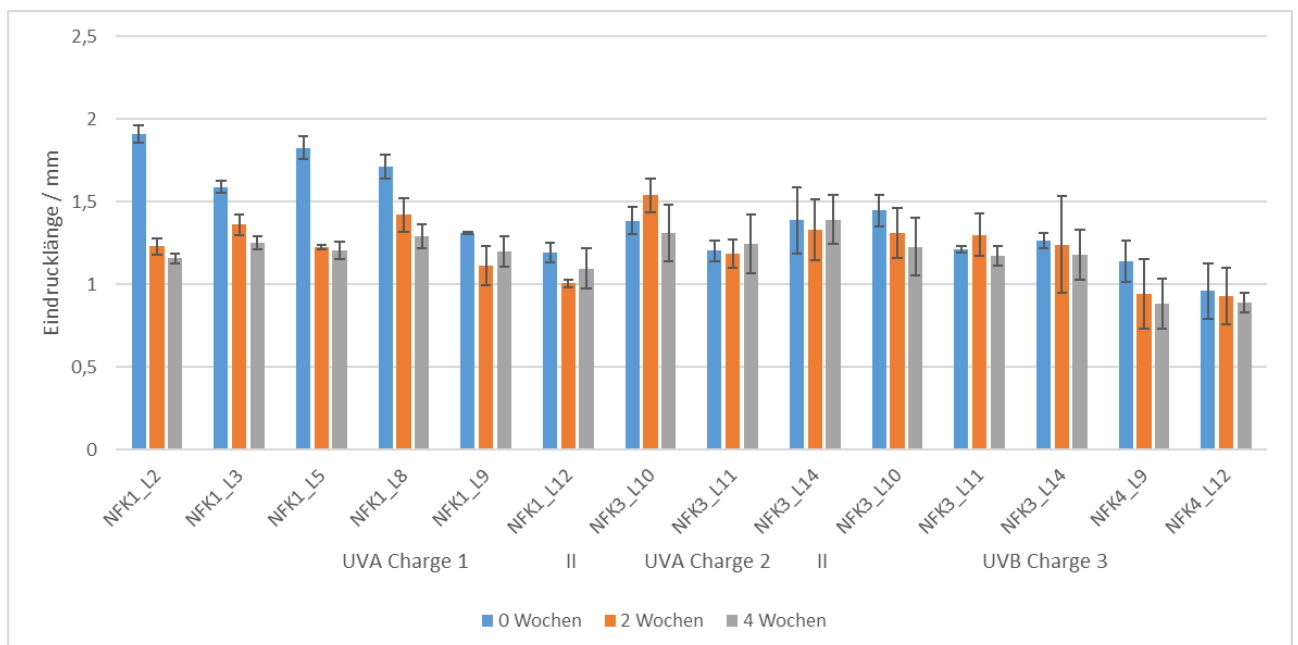


Abbildung 15: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindruckslänge in mm der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung unbewittert (0 Wochen) sowie nach zwei- und vierwöchiger UV-Bewitterung. (DIN EN ISO 2815).

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei Beschichtungssystemen ist die Haftung auf dem Untergrund. Nur gut haftende Schichten können auch einen ausreichenden Schutz des Bauteils gewährleisten. Aus diesem Grund wird die im AP 1.1 schon genannte Gitterschnittprüfung nach DIN EN ISO 2409 mit dem byko-cut universal Messgerät (Schneidenabstand 2 mm, Entfernung loser Partikel mittels Klebeband) auch bei den bewitterten Proben durchgeführt. Die Prüfung kann als bestanden angenommen werden, wenn Werte von $GT \leq 1$ erreicht werden.

Hier zeigen sich für NFK1_L8, NFK1_L9 und NFK1_L12 konstante Werte von GT = 0-1, die gute Haftung dieser Beschichtungen wird demnach nicht durch die Bewitterung verschlechtert. NFK1_L2 und NFK1_L3 zeigen leicht schlechtere Werte von GT = 1 nach 4-wöchiger Bewitterung, was immer noch ein akzeptables Ergebnis darstellt. Nur NFK1_L5 zeigt steigende GT-Werte im Verlauf der Auslagerung. Nach 2 Wochen (GT = 1-2) kann die Vorgabe $GT \leq 1$ nicht mehr eingehalten werden und nach 4 Wochen steigt der Wert nochmals auf GT = 2-3. Hier wird das Beschichtungssystem durch die UV-Bewitterung in dem Maße angegriffen, dass eine ausreichende Haftung des Lacks auf dem NFK-Untergrund nicht gegeben ist. Somit kann nicht mehr sichergestellt werden, dass die Beschichtung den Naturfaserverbund zuverlässig vor Umwelteinflüssen schützen kann.

Die beiden Beschichtungen L10 und L11 zeigen sowohl bei UVA Charge 2 als auch UVB Charge 3 mit Gitterkennwerten von 0 eine sehr gute Haftung. Dagegen hat das Lacksystem L14 mit Werten von 1-2 keine ausreichende Haftung und kann die Vorgabe $GT \leq 1$ nicht erfüllen. Bei Charge 3 der UVB-Bestrahlung kann L9 mit GT = 0 weiterhin eine sehr gute Haftung über die komplette vierwöchige Bewitterung vorweisen und die Probe NFK_L12 scheidet mit Werten von 0 bzw. 1 nach vier Wochen ebenfalls positiv ab.

Tabelle 6: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Wochen) sowie nach zwei- und vierwöchiger Bewitterung.

	0 Wochen	2 Wochen	4 Wochen
UVA Charge 1			
NFK1_L2	0	1	1
NFK1_L3	1	1	1
NFK1_L5	1	1-2	2-3
NFK1_L8	0-1	0-1	0-1
NFK1_L9	0-1	0-1	0-1
NFK1_L12	0-1	0-1	0-1
UVA Charge 2			
NFK3_L10	0	0	0
NFK3_L11	0	0	0
NFK3_L14	1-2	1-2	1-2
UVB Charge 3			
NFK3_L10	0	0	0
NFK3_L11	0	0	0
NFK3_L14	1-2	1-2	1-2
NFK4_L9	0	0	0
NFK4_L12	0	0	1

Um zu überprüfen, ob die Bewitterung auch tiefergehende Schädigungen im Material verursacht und die mechanischen Kennwerte negativ beeinflusst hat, wurden 4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125 durchgeführt. Im Folgenden ist der Biegemodul der Naturfaserverbundkunststoffe vor (0 Wochen) sowie nach zwei- und vier-wöchiger Bewitterung dargestellt (**Abbildung 16**).

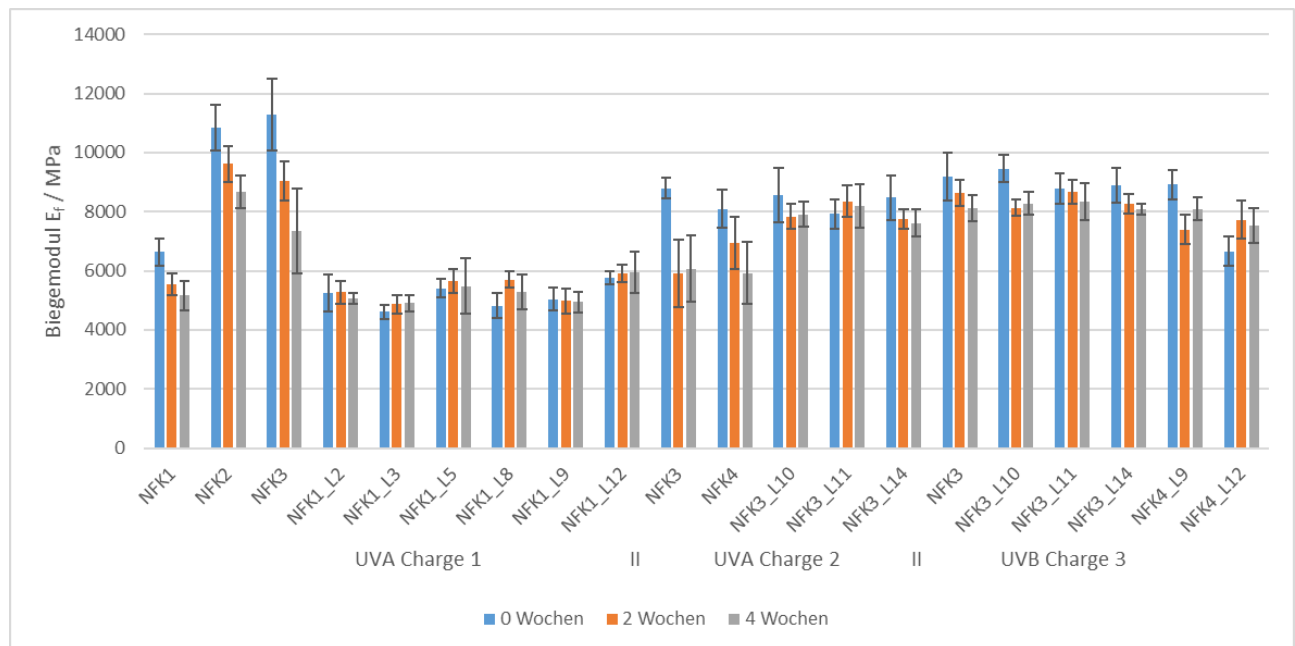


Abbildung 16: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Wochen) sowie nach zwei- und vier-wöchiger Bewitterung (4 Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Bei den Biegemoduln der unbeschichteten NFK muss angemerkt werden, dass es sich bei den unbeschichteten NFK2 und NFK3 der Charge 1 um sechslagige Aufbauten handelt. Bei allen anderen Proben kommen vierlagige Aufbauten zum Einsatz, da sich diese im Laufe des Projektverlaufs aus ökonomischen Gründen bewährt haben. Die Biegemoduln der Materialien sind daher nicht untereinander vergleichbar, Rückschlüsse über die Auswirkung der Bewitterung auf die einzelnen Materialsysteme sind aber möglich und Ziel dieser Untersuchung.

Unabhängig vom Anfangswert zeigt sich ähnliches Verhalten bei Bewitterung der Verbundsysteme von Charge 1: Mit steigender Auslagerungsdauer verringert sich der Biegemodul von NFK1, NFK2 und NFK3, die Steifigkeit der Materialien nimmt demnach ab. Der höchste Rückgang von 34,8 % von 11280 MPa (0 W) auf 7353 MPa nach vierwöchiger Bewitterung ist bei NFK3 festzustellen, welches damit am stärksten von der UV-Strahlung angegriffen zu werden scheint. Im Vergleich dazu verringert sich der Biegemodul von NFK1 um 22,2 % von 6631 MPa auf 5157 MPa und bei NFK2 um 20,0 % von 10851 MPa auf 8684 MPa nach vier Wochen Auslagerung. Es zeigt sich somit, dass die mechanischen Eigenschaften der Verbundsysteme ohne eine schützende Beschichtung durch die Bewitterung negativ beeinflusst werden. Daher wurde NFK1 mit den Lacksystemen L2, L3, L5, L8, L9 und L12 beschichtet und die Biegemoduln nach UV-Bewitterung bestimmt. Die ermittelten Werte der lackierten Proben schwanken zwischen 4605 MPa für NFK1_L3 vor und 5935 MPa für NFK1_L12 nach 4 Wochen Bestrahlung. Dabei ist anzumerken, dass das beschichtete NFK1 aus nur 3 Lagen Gewebe aufgebaut wurde, was die leicht geringeren Moduln im Vergleich zum unbeschichteten NFK1 (vier-lagiger Aufbau) erklärt. Es zeigen sich je Beschichtungssystem vor sowie nach zwei- beziehungsweise vierwöchiger Bewitterung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Proben. Dieses lässt schlussfolgern, dass die

untersuchten Lacksysteme das NFK1-Material vor der energiereichen UV-Strahlung und einer damit verbundenen Materialschädigungen schützen können.

Für Charge 2 der UVB-Bewitterung sieht das Bild ähnlich wie bei Charge 1 aus. Die unbeschichteten NFK3 und NFK4 verringern ihre Werte nach der Bestrahlung stark. NFK3 fällt von 8794 MPa auf 5907 MPa (Rückgang von 32,8 %; vergleiche auch NFK3 Charge 1: Rückgang 34,8 %) und NFK4 von 8088 MPa auf 5911 MPa (Rückgang von 26,9 %). Hier zeigt der NFK4-Verbund einen besseren Wert als der NFK3-Verbund. Die Biegemoduln der lackierten Proben, vor sowie nach zwei- beziehungsweise vierwöchiger Bewitterung, mit den Lacken L10, L11 und L14, sind, wie schon bei Charge 1, relativ konstant und es treten keine signifikanten Unterschiede auf. Dies führt zu dem Schluss, dass diese drei eingesetzten Lacksysteme das Verbundmaterial ebenfalls vor Schädigung durch UVA-Strahlung schützen können.

Bei der Bewitterung mit der kurzwelligeren UVB-Strahlung zeigt sich bei Charge 3 eine veränderte Lage zur UVA-Bestrahlung. Anscheinend hat die UVB-Strahlung einen wesentlich geringeren Tiefeneffekt, wodurch es zu geringeren Materialschädigungen kommt. Dabei fällt das Biegemodul von NFK3 von 9195 MPa auf 8123 MPa (Rückgang von 11,7 %; vergleiche auch NFK3 UVA Charge 1: Rückgang 34,8 % und NFK 3 UVA Charge 2: Rückgang 32,8 %). Die lackierten NFK3 Proben mit den Lacksysteme L10, L11 und L14 zeigen ähnliche Schwankungen wie die unlackierte NFK3 Probe, wodurch hier keine Aussage zur Schutzwirkung gegen UVB-Strahlung getroffen werden kann, da die Werte innerhalb der Messtoleranz (siehe Fehlerbalken) liegen. Auch die Ergebnisse der beiden Lacke L9 und L12 auf dem Untergrund NFK4 zeigen kein eindeutiges Ergebnis. Durch die dort auftretenden Schwankungen lässt sich ebenfalls keine Aussage über eine mögliche Schutzwirkung gegen UVB-Bestrahlung durch die hier verwendeten Lacke treffen.

Abschließend lässt sich sagen, dass es bei den unbeschichteten NFK-Proben durch die UVA-Strahlung eindeutig zu Materialschädigungen kommt, die den Biegemodul herabsetzen. Diesem Effekt kann durch eine geeignete Beschichtung entgegengewirkt werden. Alle getesteten Lacksystem kommen dafür in Frage. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Schädigung durch UVB-Strahlung wesentlich geringer ausfällt, so gering, dass zwischen unlackierten und lackierten Proben keine signifikanten Unterschiede ausgemacht werden können und somit auch keine Aussage über eine mögliche Schutzwirkung der Lacke (gegen UVB-Strahlung) getroffen werden kann, bezogen auf den Biegemodul.

Fazit AP 2.4

Ziel des AP 2.4 war es die Einflüsse von UV-Strahlung auf das strukturelle Verhalten zu analysieren, die Unterschiede zwischen den in AP 1.3 ausgewählten Beschichtungen zu untersuchen und zu dokumentieren sowie Maßnahmen zur Einhaltung der Normen hinsichtlich UV-Strahlung zu identifizieren. Dazu wurden unbeschichtete und beschichtete NFK-Platten für bis zu vier Wochen UV-Strahlung ausgesetzt und anschließend verschiedenen Prüfungen unterzogen. Die Proben wurden optisch begutachtet, Glanz- und Farbmessungen wurden durchgeführt, die Eindrucklänge nach Buchholz und damit die Härte der lackierten Oberflächen ermittelt, die Güte der Haftung bestimmt sowie die mechanischen Kennwerte,

insbesondere der Biegemodul, untersucht. Bei der Begutachtung der unlackierten NFKs zeigte sich hierbei ein starkes Ausbleichen der Proben. Dieser Veränderung induziert durch die UV-Bestrahlung konnte mit Hilfe der verschiedenen Beschichtungen unterschiedlich erfolgreich entgegengewirkt werden. Das Ergebnis konnte über Farb- und Glanzmessungen bestätigt werden. Dabei hat sich der teilbiobasierte Lack L9 als sehr vielversprechend herausgestellt. Zusätzlich hat die Eindrucklänge nach Buchholz der beschichteten Proben gezeigt, dass durch die energiereiche UV-Strahlung grundsätzlich die Härte der Oberflächen zunimmt. Bei der Analyse der Haftungseigenschaften der unterschiedlichen Beschichtungen konnten hingegen allen Lacksystemen, bis auf L5 und L14, eine sehr gute bis gute Haftung attestiert werden. Abschließend zeigte sich außerdem das bei der Untersuchung des Biegemoduls, dass, durch die UV-Bewitterung, das Biegemodul der unlackierten Naturfaserverbundkunststoffe um bis zu 34,8 % abnimmt. Dabei schneidet NKF4 besser ab als NFK3. Dies liegt sehr wahrscheinlich an dem höheren Flachsfaseranteil von NFK3. Grundsätzlich kann dieser Degeneration jedoch mit einer geeigneten Beschichtung mit ausreichender UV-Stabilität entgegengewirkt werden und zusätzlich würde mit dem Lacksystem L9 eine teilbiobasierte Alternative zu den konventionellen Lacken zur Verfügung stehen, sodass einer Substitution möglich wäre um die Bauteile ausreichend vor UV-Strahlung und deren negativen Effekte zu schützen.

6.2.2 AP 2.5: Analyse der mikrobiellen Beständigkeit

In Arbeitspaket 2.5 soll die mikrobielle Beständigkeit, genauer die Beständigkeit gegenüber Pilzwachstum, unbeschichteter und beschichteter Proben, untersucht werden, da vor allem die Cellulose-basierten Naturfasern als Nahrungsquelle diverser Pilzkulturen dienen können.

Dieses Arbeitspaket sollte laut Projektantrag von fachkundigem Personal (technischer Mitarbeiter), in den mikrobiellen Laboratorien der Hochschule Hannover (HsH), Abteilung Bioverfahrenstechnik, bearbeitet werden. Aufgrund von personellen Engpässen durch eine kurzfristige Kündigung einer Mitarbeiterin, konnten die Untersuchungen nicht wie geplant von dieser Arbeitsgruppe ausgeführt werden. Da zeitlich nicht absehbar war, wann dieser Personalmangel behoben werden kann, wurde mit einem externen Dienstleister zusammengearbeitet, um die Projektziele in diesem Arbeitspaket zu erreichen. Dem Antrag zur Umwidmung der Gelder wurde vom Projektträger entsprechend stattgegeben. Die Ostthüringische Materialprüfgesellschaft für Textil und Kunststoffe mbH (OMPG) bzw. die angeschlossenen Laboren des TITKs sind Experten bei der Bestimmung der Einwirkung von Pilzen auf Kunststoffen, Textilien und Verbundmaterialien und eignen sich daher besonders für die Durchführung der Untersuchungen mit den im InteReSt-II-Projekt hergestellten Proben. Die Untersuchungen wurden in Anlehnung an die DIN EN ISO 846:2019 durchgeführt. Dafür wurden die Probekörper mit den Testorganismen in Kontakt gebracht und für 28 Tage unter optimalen Wachstumsbedingungen (29 ± 1 °C, 90 ± 5 % relativ Luftfeuchtigkeit) inkubiert. Dabei wird der Sporensuspension keine zusätzliche Kohlenstoffquelle zugefügt, um in der anschließenden optischen Begutachtung festzustellen, ob die Proben gegenüber den untersuchten Pilzen widerstandsfähig sind oder diesen als Nährstoffquelle dienen können. Eine Petrischale und ein mit Nährlösung getränkter Cellulose-Filter dienen hier als negativ beziehungsweise positiv Kontrolle. Um das Wachstum von Fremdorganismen zu vermeiden werden die Proben vor Auslagerung mit Ethanol desinfiziert.

Zur Identifizierung möglicher Pilzstämme wurden die DIN EN ISO 846, die AECTP 300, die RCTA-DO 160 sowie die MIL-STD-810H zurate gezogen. Dabei wurden speziell die Stämme ausgewählt, bei denen eine Schadwirkung auf Naturfasern sowie Kunststoffe bekannt ist (**Tabelle 7**).

Tabelle 7: Eingesetzte Prüfpilze und die von ihnen unter anderem angegriffenen Materialien.

Name	Angegriffene Materialien	DSM	ATCC
<i>Aspergillus niger</i>	Textilien, Lacke	1957	9642
<i>Paecilomyces variotii</i>	Kunststoffe	1961	10121/18502
<i>Penicillium pinophilum</i>	Kunststoffe	1944	36839
<i>Trichoderma virens</i>	Kunststoffe	1963	9645
<i>Chaetomium globosum</i>	Cellulose, Kunststoffe	1962	6205

Die visuelle Bewertung der Wachstumsintensität der Mikroorganismen auf den Proben findet nach 4 Wochen Inkubationszeit nach den in **Tabelle 8** genannten Kriterien statt.

Tabelle 8: Beurteilungskriterien zur Wachstumsintensität der Prüfpilze.

Wachstumsintensität	Beurteilung des Pilzwachstums auf der Probenoberfläche	Beurteilung des Prüfmateri als
0	kein Wachstum bei mikroskopischer Betrachtung	Material dient nicht als Nährstoffquelle, es ist inert oder fungistatisch
1	kein Wachstum mit bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar	Material dient nicht als Nährstoffquelle
2	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 25 % der Probenoberfläche bewachsen, jedoch kein erhöhtes Wachstum im Vergleich zur Negativkontrolle	Restnährstoffe des Kulturmediums sind ausreichend um Pilzwachstum anzuregen, Material dient nicht als Nährstoffquelle
3	mäßiges Wachstum, bis zu 50 % erhöhtes Wachstum im Vergleich zur Negativkontrolle	keine Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Pilzbefall, Material dient als Nährstoffquelle
4	beträchtliches Wachstum, über 50 % erhöhtes Wachstum im Vergleich zur Negativkontrolle	keine Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Pilzbefall, Material dient als Nährstoffquelle
5	starkes Wachstum, Oberfläche vollständig bewachsen	keine Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Pilzbefall, Material dient als Nährstoffquelle

In **Abbildung 17** ist beispielhaft eine Flachsfasergewebeprobe mit mikrobiellem Bewuchs dargestellt. Dieses entspricht einer Wachstumsintensität von 3 und verdeutlicht die Anfälligkeit dieses Materials gegenüber Pilzbefall.



Abbildung 17: Beispielhafter mikrobieller Bewuchs auf einem Flachsfaser-Gewebe, 20fach vergrößert.

Um einen umfassenden Eindruck der Widerstandsfähigkeit der verschiedenen eingesetzten Materialien zu erhalten, wurden neben den unbeschichteten Naturfaserverbunden NFK1-3 auch die Flachs-Fasern ohne Harz zweier im Projekt eingesetzter Fasergewebe (Faser1, Faser2) sowie ein ebenfalls verwendetes Epoxid-Harz (Harz1) in Reinform in eine erste Untersuchung mit aufgenommen. Weiterhin wurde für Charge 1 die Schutzwirkung der Lacke L2, L3, L5 und L8 auf dem NFK1-Untergrund analysiert. Die Versuche wurden an jeweils 5 Replikaten durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist aber nur jeweils eine repräsentative Probe der Charge 1 in **Abbildung 18** dargestellt.

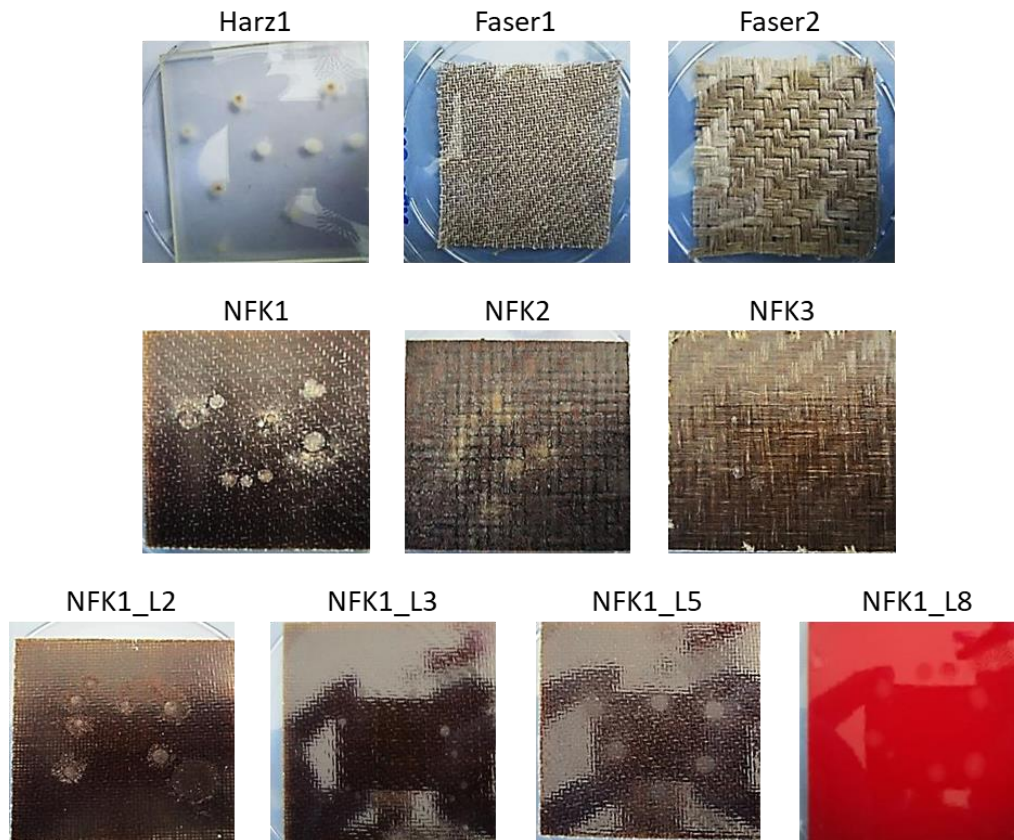


Abbildung 18: Fotos repräsentativer Proben nach vier wöchiger Inkubation mit Pilzsporen, Charge 1, 6 cm x 6 cm.

Nach einer Analyse der Daten aus Charge 1 wurde eine zweite Untersuchung vorgenommen. Dabei wurden erneut Faser2 und NFK2 getestet sowie ein weiterer Naturfaserverbund NFK4. Außerdem wurden fünf weitere Lacke geprüft. L9, L10, L11, L12 und L14, jeweils auf dem Substrat NFK1. Zuletzt wurde nochmalig der Lack L8 untersucht, jedoch diesmal auf dem anderen Untergrund NFK3 (statt NFK1, wie bei Charge 1). In **Abbildung 19** ist der Pilzbewuchs nach 4-wöchiger Inkubation durch fotografische Aufnahmen dargestellt.

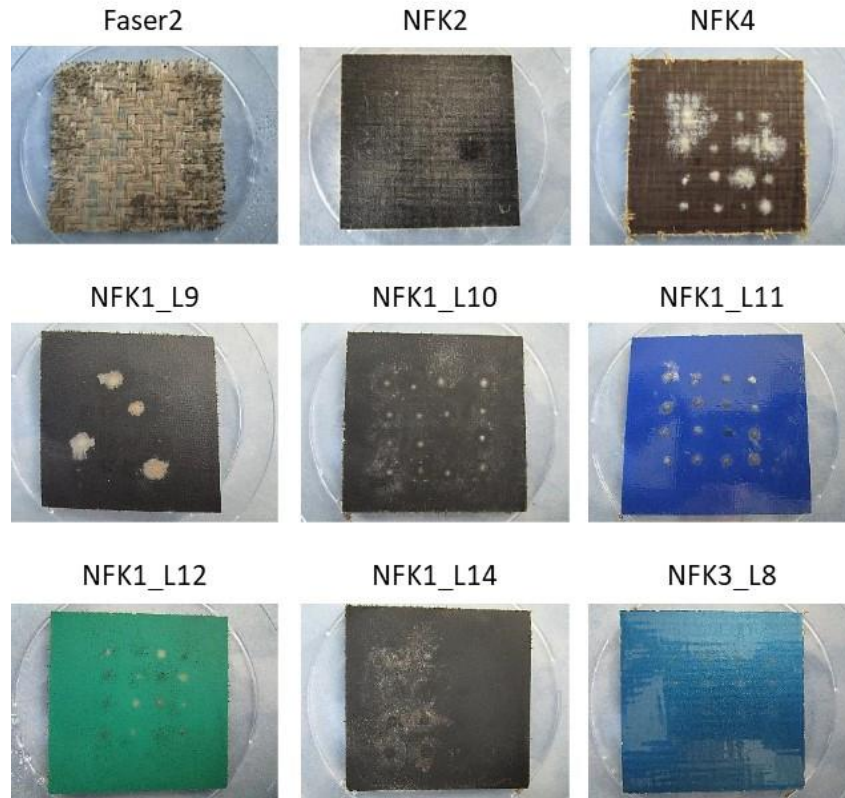


Abbildung 19: Fotos repräsentativer Proben nach vier wöchiger Inkubation mit Pilzsporen, Charge 2, 6 cm x 6 cm

Da einige Proben hohe Glanzgrade aufweisen, ist teilweise die fotografierende Person als Spiegelung zu erkennen. Weiterhin ist zu bemerken, dass die Probe NFK1_L8 aus Charge 1 und die Probe NFK3_L8 der Charge 2 in den Untersuchungen eine rote (Charge 1) bzw. blaue (Charge 2) Farbe aufweisen, im Gegensatz zu dem lila Probensatz, welcher in AP 2.4 verwendet wurde. Dabei handelt es sich weiterhin um das gleiche Lacksystem. Hier wurde jeweils lediglich die Pigmentierung des Basislackes gewechselt. Die grundsätzliche Rezeptur sowie der Lackaufbau haben sich nicht verändert. Die Proben sind somit weiterhin vergleichbar. Außerdem wurde, um das positive Ergebnis, nach 4 Wochen Inkubation, der wiederholten Untersuchung von Lack L8 (NFK3_L8 Charge 2) zu bestätigen, die Proben für weitere 2 Wochen inkubiert. Dabei wurde keine Veränderung festgestellt.

Gut zu erkennen sind die Bereiche, wo die Sporensuspension auf die Proben aufgebracht wurden, welche als solche aber noch keine Hinweise auf gesteigertes Pilzwachstum darstellen. Die Wachstumsintensität wurde nach genauer visueller Betrachtung bestimmt. Der daraus ermittelte Durchschnitt der fünf Replikate je Material sowie die entsprechende Bewertung sind in **Tabelle 9** aufgelistet.

Tabelle 9: Durchschnittliche Wachstumsintensität und Widerstandbestwertung geprüfter Materialien.

Charge	Material	Wachstumsintensität Ø	Bewertung
1	Faser1	1,5	widerstandsfähig
1	Faser2	1,5	widerstandsfähig
2		5,0	nicht widerstandsfähig
1	Harz1	2,5	nicht widerstandsfähig
1	NFK1	2,5	nicht widerstandsfähig
1	NFK2	4,0	nicht widerstandsfähig
2		4,8	nicht widerstandsfähig
1	NFK3	1,5	widerstandsfähig
2	NFK4	3,4	nicht widerstandsfähig
1	NFK1_L2	3,0	nicht widerstandsfähig
1	NFK1_L3	1,0	widerstandsfähig
1	NFK1_L5	2,0	widerstandsfähig
1	NFK1_L8	3,0	nicht widerstandsfähig
2	NFK3_L8	2,0	widerstandsfähig
2 (6 Wochen)		2,0	
2	NFK1_L9	2,8	nicht widerstandsfähig
2	NFK1_L10	4,8	nicht widerstandsfähig
2	NFK1_L11	2,6	nicht widerstandsfähig
2	NFK1_L12	4,2	nicht widerstandsfähig
2	NFK1_L14	3,2	nicht widerstandsfähig

Die getesteten Flachs-Fasermaterialien der Charge 1 (Faser1 und Faser2) zeigen trotz hohem Cellulose-Anteil keinen im Vergleich zur Negativ-Probe erhöhten mikrobiellen Bewuchs. Dies war nicht zu erwarten, da die eingesetzte Sporensuspension den Stamm *Chaetomium globosum* enthält, welcher speziell Cellulose angreifen und verstoffwechseln kann. Dieses Ergebnis konnte jedoch bei der Vergleichsmessung der Charge 2 für die Faser2 nicht bestätigt werden. Dort zeigt sich bei erneuter Testung ein starker Bewuchs, wodurch Faser2 abschließend als nicht widerstandsfähig bewertet werden muss. Bei dem reinen Harz ohne Verstärkungsfaser (Harz1) konnte hingegen ein leicht erhöhter Pilzbewuchs festgestellt werden, weshalb dieses als nicht widerstandsfähig gegen die untersuchten Pilzstämmen eingestuft wird. Auch bei den untersuchten NFK-Materialien konnten Unterschiede ausgemacht werden. Die Epoxid-basierten Naturfaserverbünde NFK1 und NFK4 sowie das PFA-basierte NFK2 zeigen im Gegensatz zu dem ebenfalls Epoxid-basierten NFK3 eine gesteigerte Wachstumsintensität, wodurch bei den untersuchten unbeschichteten Proben ausschließlich NFK3 als widerstandsfähig klassifiziert werden kann. Bei den untersuchten Lacksystemen haben sich ebenfalls unterschiedliche Widerstandsfähigkeiten ergeben. Die Lacke L2, L9, L10, L11, L12 und L14, welche alle auf NFK1 gemessen wurden, zeigen Bewuchs, welcher durch mangelnden Schutz des Substrats oder Angriff des Lacks selbst zustanden kommen kann. Somit müssen diese als nicht widerstandsfähig bewertet werden. Hingegen können die Lacke L3 und L5, beide ebenfalls auf NFK1 aufgebracht, als widerstandsfähig und den Naturfaserverbund schützend klassifiziert werden. Unerwartet ist das Ergebnis der Charge 1 des Automobilsystem L8, was mit einer durchschnittlichen Bewertung von 3,0 erhöhte Werte zeigt, da bei zugelassenen Automobilbeschichtungen von einer hohen Widerstandsfähigkeit gegen mikrobiellen Bewuchs ausgegangen wurde. Dieses Resultat konnte bei Charge 2 jedoch nicht reproduziert werden und zeichnet mit einem Wert von 2,0

L8 als widerstandsfähig aus. Dabei muss bedacht werden, dass bei Charge 1 NFK1 (alleine nicht widerstandsfähig, 2,5) und bei Charge 2 NFK3 (alleine widerstandsfähig, 1,5) zum Einsatz kam. Somit ergibt sich, dass der Lack L8 sehr wahrscheinlich selbst nicht als Nährstoffquelle für die eingesetzten Mikroorganismen dient und widerstandsfähig ist, er jedoch in der aufgetragenen Form NFK1 nicht ausreichend schützen kann um den Verbund aus NFK und Beschichtung als widerstandsfähig zu bezeichnen zu können.

In **Abbildung 20** sind rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen der vielversprechenden teilbiobasierten Lacke L9 und L10 (siehe Abschnitte 6.2.1 und 6.2.3) sowie der fossil-basierten Flugzeuglacke L11 und L12 gezeigt. Außerdem ist die Oberfläche des unlackierten NFK4 sowie von Faser2 dargestellt. Es zeigt sich, dass L9 eine unebene, großporige Oberfläche hat **Abbildung 20 a** und L10 eine feinporige Oberfläche (**Abbildung 20 e**). Die fossil-basierten Luftfahrtlacke entwickeln eine geschlossene Lackschicht, wobei L12 eine unebene Topografie aufweist **Abbildung 20 c**, wohingegen L11 eine sehr glatte Oberfläche hat **Abbildung 20 g**. Auf den vergrößerten REM-Bildern (**Abbildung 20 b, d, f, h und j**) sind unabhängig von der Lacksorte feine Risse in der Lackoberfläche zu sehen. Die Oberfläche der unlackierten Probe weist feine Furchen auf **Abbildung 20 i**. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauheit, die durch die REM-Bilder festgestellt wurde, und des in **Tabelle 9** bewerteten Pilzwachstumsgrad ist nicht festzustellen. Zwar erreicht der glatte Lack L11 einen vergleichsweise guten Wert von 2,6, allerdings ist der großporige Lack L9 nur wenig schlechter mit einem Wert von 2,8. L12 hat trotz der geschlossenen Lackschicht dagegen einen wesentlich schlechteren Wert von 4,2. Somit kann festgehalten werden, dass nicht alleinig die Oberflächenstruktur, sondern auch die (chemische) Zusammensetzung der Lacksysteme an sich einen Einfluss auf die mikrobielle Beständigkeit hat.

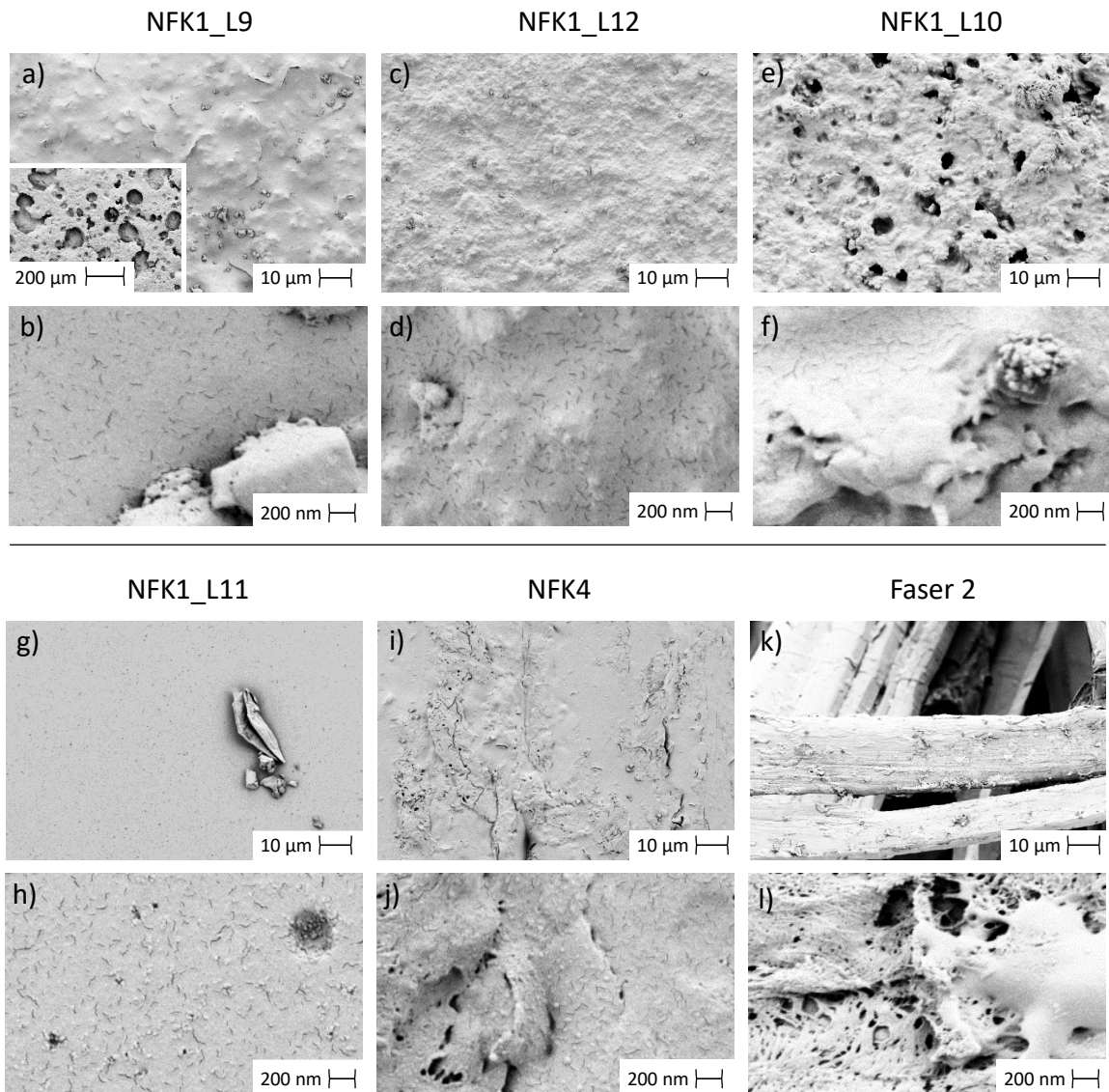


Abbildung 20: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter unbehandelter Probenoberflächen aus Charge 2.

In **Abbildung 21** sind im Vergleich die mit Pilzen bewachsenen Proben gezeigt. Die Wachstumsstruktur der Pilze ist sichtbar, sowie die Morphologie der einzelnen Sporen. Die Wachstumsstrukturen der auf L9 und L12 wachsenden Pilze sowie der Sporen ähneln sich stark. Auch die anderen beiden Lacke L10 und L11 zeigen ähnliche Sporen, jedoch wirkt das Pilzwachstum flächiger. Die Sporen des auf NFK4 wachsenden Pilzes unterschieden sich dagegen stark, sodass davon ausgegangen werden kann, dass es sich um eine andere Art handelt. Auch der auf Faser2 wachsende Pilz unterscheidet sich stark von den anderen. Es überrascht nicht, dass unterschiedliche Pilze jeweils auf Fasern, Lack und Kunststoff zu finden sind, da sie bevorzugt jeweils unterschiedliche Materialien angreifen (siehe **Tabelle 7**).

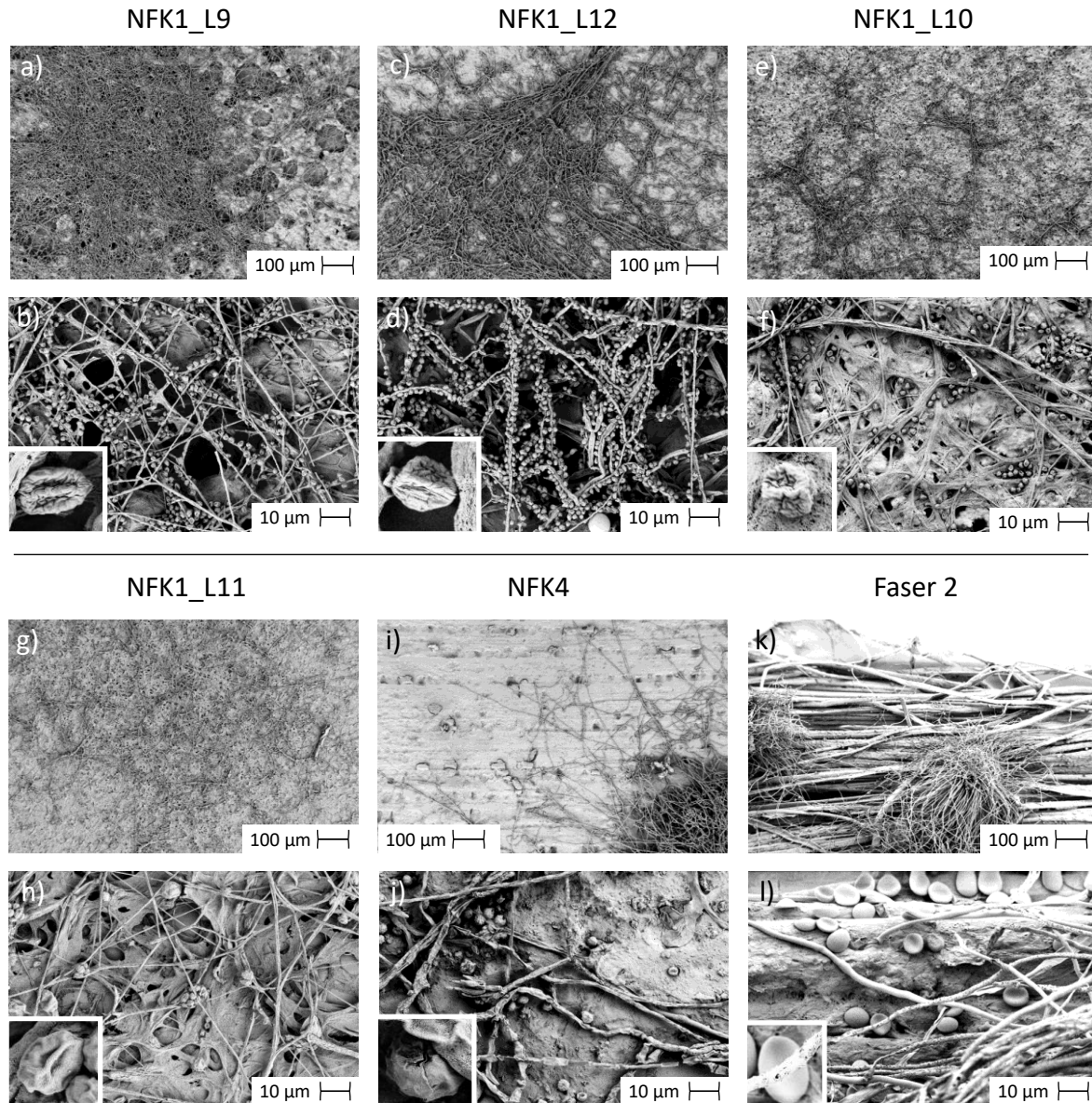


Abbildung 21: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter mit Pilzen bewachsenen Probenoberflächen aus Charge 2 (4 Wochen Inkubation).

Zusätzlich zu dem oben getätigten Vergleich von Wachstumsintensität und Oberflächenrauheit, kann auch aus den REM-Bildern der mit Pilzen bewachsenen Proben in **Abbildung 21** nicht zuverlässig abgeleitet werden, dass Unebenheiten und Poren das Pilzwachstum begünstigen, da auch abseits der Poren und über Poren hinweg starkes Pilzwachstum stattfindet. Die chemische Zusammensetzung der Lacke und des Substrats sind wichtige Faktoren, die in ihrer Wirkung nicht von der Oberflächenrauheit getrennt betrachtet werden können.

Neben der visuellen Bewertung der Wachstumsintensität sollten die Proben weiteren sowohl mechanischen als auch oberflächenspezifischen Untersuchungen unterzogen werden, um zusätzliche Informationen des Einflusses des mikrobiellen Bewuchses auf die Proben zu erhalten. Da die eingesetzten Pilzstämme aber möglicherweise toxische Substanzen

produziert haben könnten, durften die ausgelagerten Proben das speziell dafür ausgestattete Sicherheitslabor nicht ohne vorherige Desinfektion verlassen. Um alle Mikroorganismen abzutöten und jegliche Gefährdung bei der weiteren Handhabung zu gewährleisten, wurden die Proben bei 121 °C für 20 Minuten in einem Autoklav feucht sterilisiert. Nach der Behandlung wurde aber festgestellt, dass eine weitere Analyse dieser Proben wissenschaftlich nicht tragbar ist, da davon auszugehen ist, dass das Verfahren einen stärkeren Einfluss auf die Materialien hatte als der Bewuchs der Mikroorganismen. Dies verdeutlicht als Beispiel die Probe NFK1_L8 vor sowie nach Auslagerung und Sterilisation (**Abbildung 22**). Es konnten im Vergleich zum glatten Lack vor Auslagerung deutliche Blasen und Wellen sowie eine teilweise Ablösung der Beschichtung vom Substrat festgestellt werden. Daher werden keine weiteren Untersuchungen mit den ausgelagerten Proben durchgeführt.

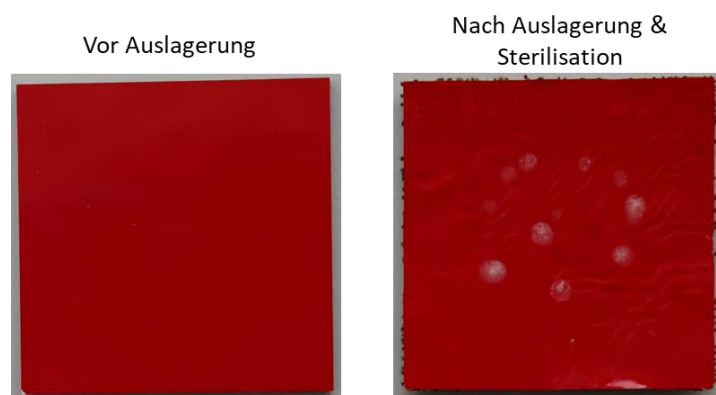


Abbildung 22: Probe NFK1_L8 Charge 1 vor (links) und nach (rechts) Auslagerung mit Pilzsporen sowie anschließender Sterilisation (121 °C, 20 min.), 6 cm x 6 cm.

Fazit AP 2.5

Ziel des AP 2.5 war die Bewertung der fungistatischen Wirksamkeit der untersuchten Beschichtungen. Dazu wurden Wachstumstests an unbeschichteten und beschichteten NFK-Proben sowie den Ausgangsmaterialien (Harz und Faser) durchgeführt. Die relevanten Pilzstämme wurden dazu mit Hilfe von DIN EN ISO 846, AECTP 300, RCTA-DO 160 und MIL-STD-810H identifiziert. Hierbei wurden speziell die Stämme ausgewählt, bei denen eine Schadwirkung auf Naturfasern sowie Kunststoffen bekannt ist (**Tabelle 7**). Bei den anschließenden Untersuchungen, unter Anlehnung an DIN EN ISO 846:2019, zeigten ausschließlich die Lacke L3, L5 und L8 (L8 jedoch nur mit NFK3 als Untergrund, welches auch ohne Beschichtung widerstandsfähig ist) ein positives Resultat. Alle anderen Lacke mussten mit nicht widerstandsfähig bewertet werden. Außerdem wurden rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen der vielversprechenden teilbiobasierten Lacke L9 und L10 (siehe Abschnitte 6.2.1 und 6.2.3) sowie der fossil-basierten Flugzeuglacke L11 und L12 gemacht um die Ergebnisse besser werten zu können. Abschließend kann aus all diesen Daten geschlossen werden, dass fossile Flugzeuglacke keinen generellen Vorteil gegenüber biobasierten Lacksystemen zum Schutz vor mikrobiellem Oberflächenwachstum bieten und mit L9 ein teilbiobasiertes System zur Substitution zur Verfügung stehen würde.

6.2.3 AP 2.6: Einflüsse durch verschiedene Flüssigkeiten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auslagerung von unlackierten und lackierten NFK-Proben in den für die Luftfahrt relevanten Flüssigkeiten Wasser, Kerosin und Hydrauliköl beschrieben und diskutiert.

Auslagerung in Wasser

In **Abbildung 23** sind zur Übersicht die lackierten NFK-Proben im Vergleich zu den unbehandelten Referenzen (NFK3, NFK4) gezeigt. Bei den Lacken L8 bis L14 ist auf den ersten Blick kein signifikanter Unterschied der Lackoberfläche durch die Auslagerung in Wasser zu beobachten. Dagegen zeigt sich bei den unlackierten Proben NFK3 und NFK4 eine zunehmende Entfärbung der Flachsfasern. Das Wasser dringt ein und bewirkt sichtbare Veränderungen der Fasern. Der transparente Bootslack L3 zeigt ein besonders interessantes Verhalten. Nach vier Wochen kommt es zu einer Aufhellung der Fasern und zu einer stärkeren Entfärbung an den Rändern, da durch die unlackierten Seiten vermehrt Wasser eindringt als durch die schützende Lackschicht. In Vorversuchen konnte jedoch gezeigt werden, dass das Wasser, das durch die Seiten in die Probe eindringt, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat, daher wurden die Seiten der ausgelagerten Proben nicht versiegelt.

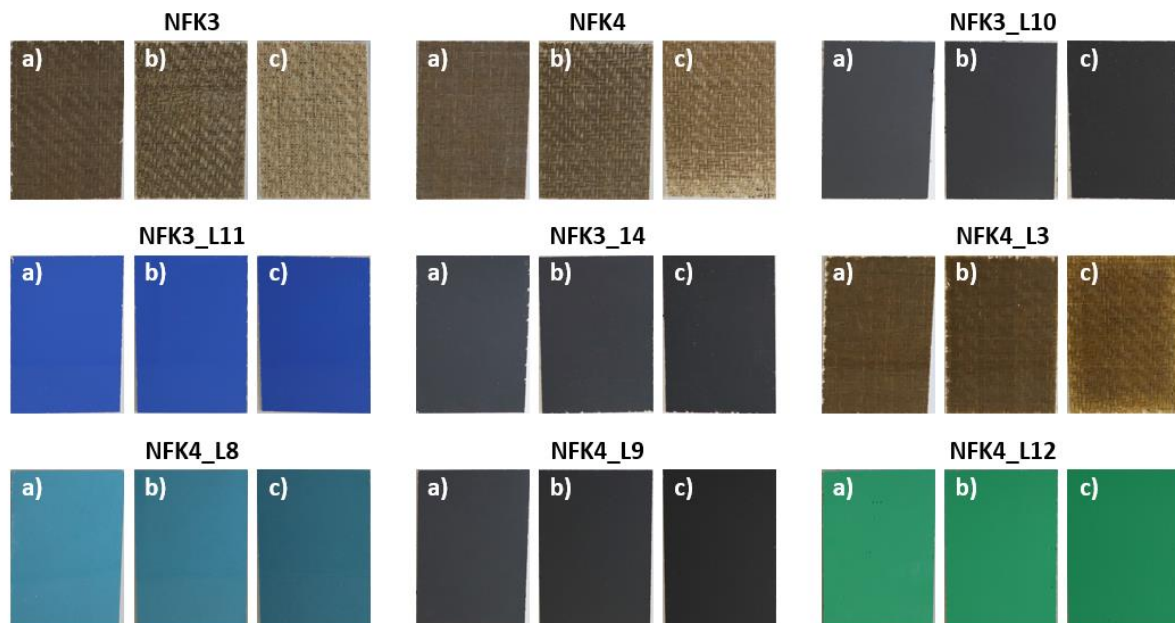


Abbildung 23: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht ausgelagert (0 Tage), b) nach einem Tag und c) nach 28 Tagen Auslagerung in Wasser (nach anschließender Trocknung).

Auch bei der Auslagerung mit Wasser wurden Glanz- und Farbmessungen durchgeführt. **Abbildung 24** zeigt die Ergebnisse nach null, einem und 28 Tagen Auslagerung. Für die unlackierten Naturfaserverbunde NFK3 und NFK4 ergeben sich kaum Änderungen für den Glanz. Mit ungefähr 10 GU haben die Proben von null bis 28 Tagen einen geringen bis mittleren Glanz, der durch die Wasserauslagerung nicht entscheidend beeinflusst wird. Betrachtet man die matten Lacksysteme L9, L10, L12 und L14, welche alle Werte unter 3 GU aufweisen, ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch hier keine signifikanten Änderungen des Glanzes. Die beiden stark glänzenden Lacke L11 und L8 zeigen geringe Veränderungen beim Glanz. L11 verliert über die Dauer von 28 Tagen etwas 7,6 % an Glanz und L8 gewinnt 4,8 %. Den stärksten Einfluss auf den Glanz hat Wasser überraschenderweise bei L3, einem Bootslack. Dabei geht der Glanz von anfänglichen 90 GU (Hochglanz) auf 64 GU (mittlerer Glanz) nach 28 Tagen zurück, was einer Abnahme von 28,9 % entspricht.

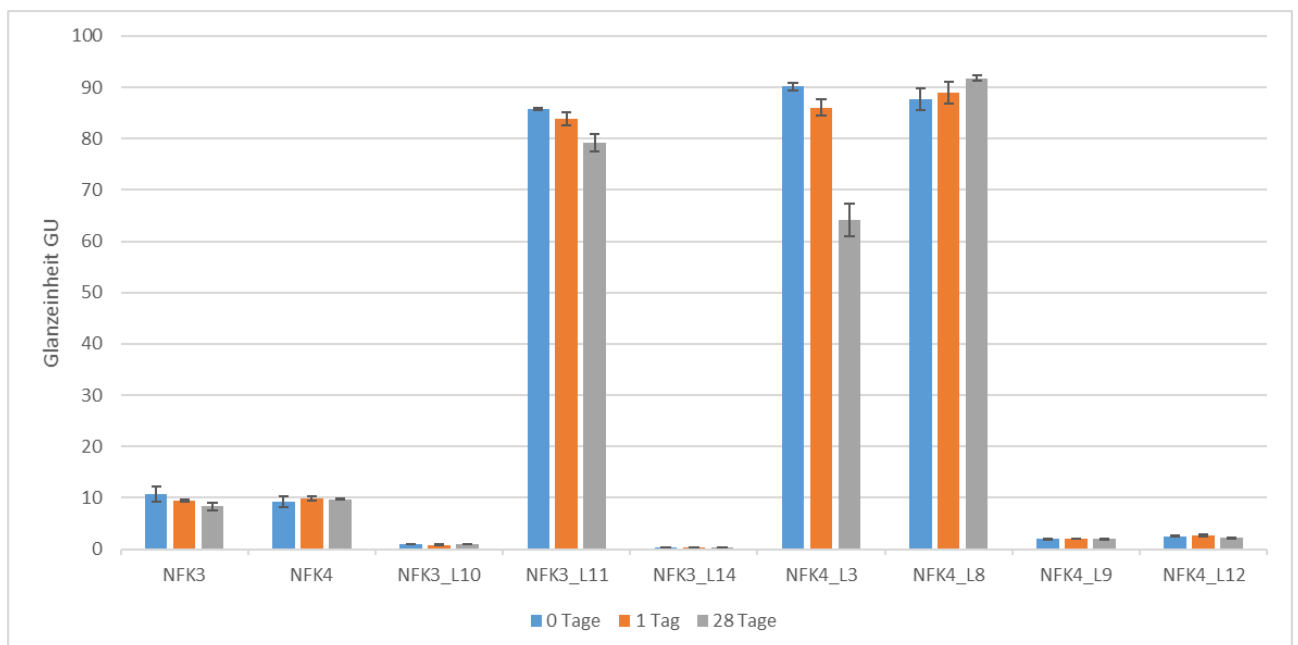


Abbildung 24: Glanzmessungen der in Wasser ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.

Bei den Farbmessungen, welche in **Abbildung 25** dargestellt sind, können zwei Gruppen unterschieden werden. Bei der ersten, welche NFK3, NFK4 sowie das Lacksystem L3 umfasst zeigen sich starke Farbänderungen. NFK3 erreicht mit einem Farbabstand von 6, nach einem Tag, sowie 16,9 nach 28 Tagen den größten Unterschied, gefolgt von NFK4 mit 3,5 nach einem Tag, und 12,3 nach 28 Tagen. Bei beiden unlackierten Verbundmaterialien konnte dieser Einfluss des Wassers auch schon bei der optischen Betrachtung mit dem bloßen Auge ausgemacht werden (vgl. **Abbildung 23**). Die Proben mit dem Bootslack L3, welcher auch schon bei der Glanzmessung (vgl. **Abbildung 24**) herausgestochen ist und ebenfalls bei der optischen Betrachtung (vgl. **Abbildung 23**), zeigt mit einem Farbabstand von 7,3 nach 28 Tagen auch hier einen deutlichen Unterschied. Bei der zweiten Gruppen, mit allen anderen Proben (L8, L9 L10, L11, L12 und L14) und Farbabständen unter 1, sind die Unterschiede so

gering, dass diese nicht mit dem bloßen Auge erkannt werden können und die Auswirkungen des Wassers auf die Farbeänderungen dieser Lacksysteme als vernachlässigbar angesehen werden können.

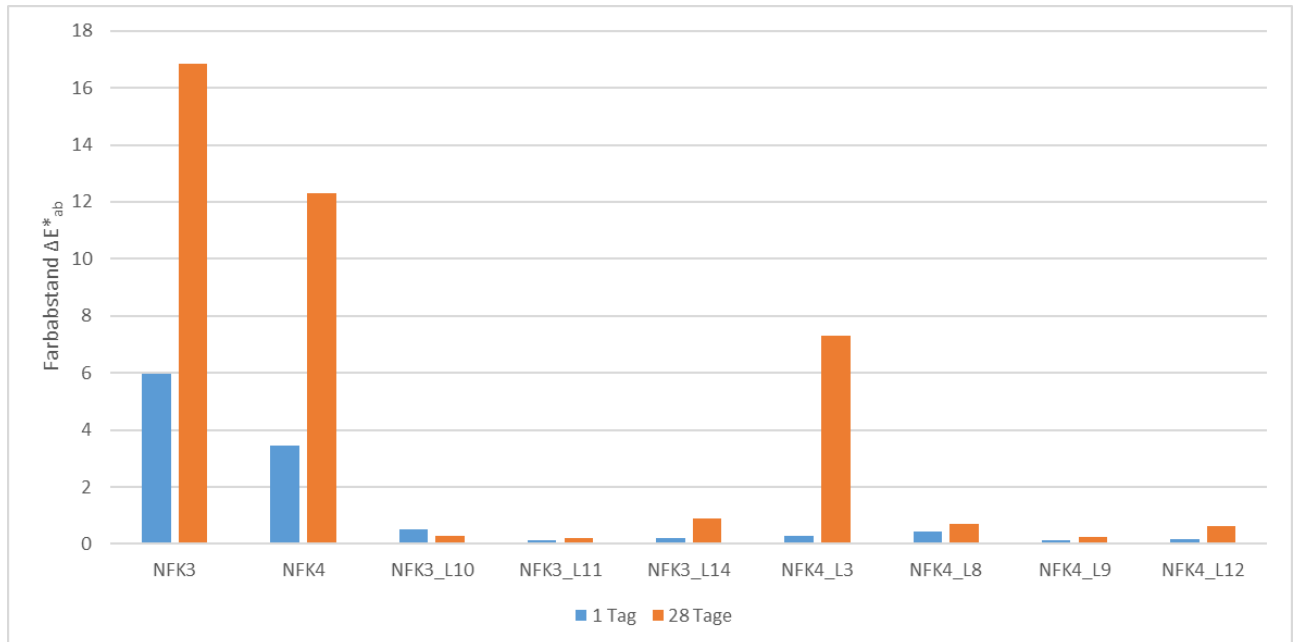


Abbildung 25: Farbmessungen der in Wasser ausgelagerten Proben nach einem und 28 Tagen bezogen auf die 0-Tage-Referenz.

In **Abbildung 26** ist die Eindrucklänge nach Buchholz dargestellt. Dabei verhält sich die Eindrucklänge reziprok proportional zum Eindruckwiderstand. Dies bedeutet je größer die Eindrucklänge desto geringer ist der Widerstand der Oberfläche gegenüber dem Eindringen der Messklinge. Der Lack L10 zeigt hierbei nach 28 Tagen Auslagerung eine Abnahme von 0,96 mm auf 0,81 mm Eindrucklänge, was wiederum bedeutet, dass der Eindruckwiderstand zugenommen hat. Bei den Lacksystemen L8 und L9 hingegen nimmt die Eindrucklänge nach 28 Tagen von 2,09 mm auf 2,38 mm zu bzw. von 0,73 mm auf 0,98 mm und somit der Eindruckwiderstand ab. Hierbei handelt es sich daher um eine Erweichung des Materials. Bei allen anderen Lacken schwanken die Werte leicht, es kommt jedoch nicht zu signifikanten Änderungen.

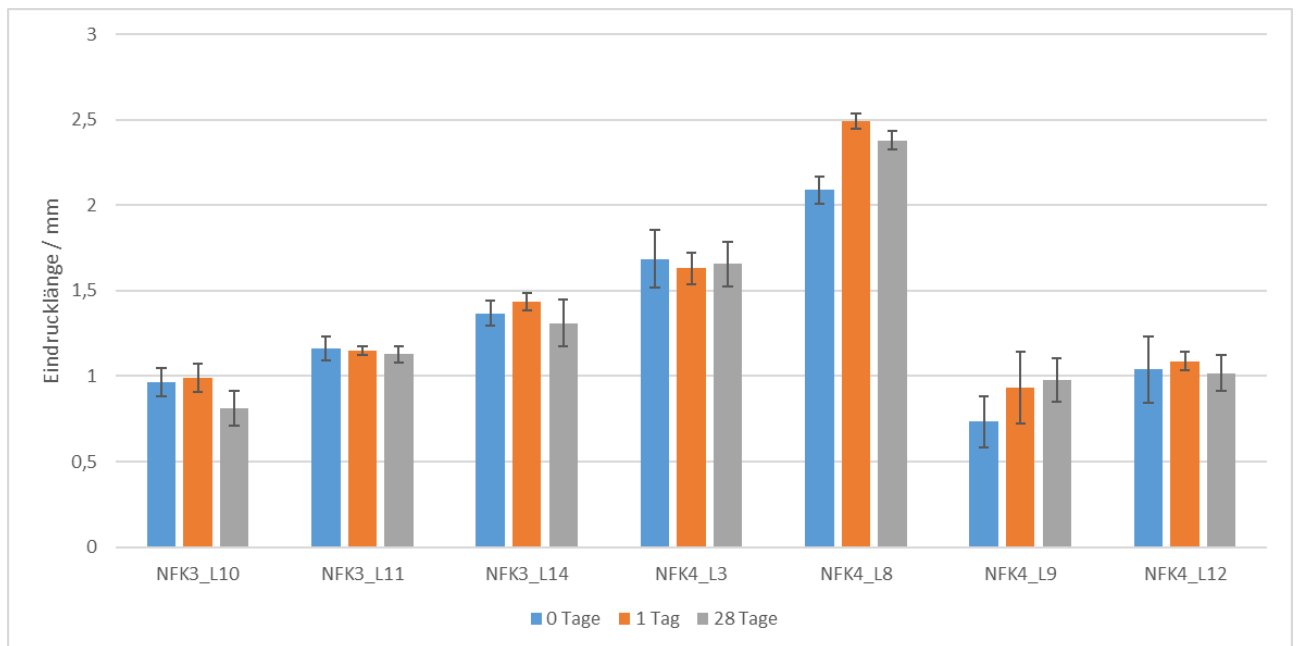


Abbildung 26: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung der in Wasser ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.

Da nur durch eine gute Haftung an das Substrat ein langfristiger Schutz durch die Lacke gewährleistet werden kann, sind in der nachfolgenden **Tabelle 10** die Ergebnisse der Gitterschnittuntersuchung bei der Auslagerung von Wasser dargestellt. Dabei schneiden alle Lacke bis auf L14 sehr gut ab. Sie zeigen Gitterschnittkennwerte (GT) von 0, was mit einer sehr guten Haftung gleichzusetzen ist. L14 liegt mit Werten von 1-2 gerade an der Grenze von bestanden (GT ≤ 1) zu nicht bestanden (GT > 1).

Tabelle 10: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Wasser.

	0 Tage	1 Tag	28 Tage
NFK3_L10	0	0	0
NFK3_L11	0	0	0
NFK3_L14	1-2	1	1-2
NFK4_L3	0	0	0
NFK4_L8	0	0	0
NFK4_L9	0	0	0
NFK4_L12	0	0	0

In **Abbildung 27** und **Abbildung 28** ist die Gewichtszunahme nach bis zu 28 Tagen dargestellt. Dabei zeigt **Abbildung 28** die relative Gewichtszunahme in Prozent bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack). Das Ergebnis unterscheidet sich nur geringfügig von den absoluten Werten (vgl. hierzu NFK3_L11 und NFK4_L8 sowie NFK4_L12 und NFK4_L9, Reihenfolge bzw. Abstand zueinander).

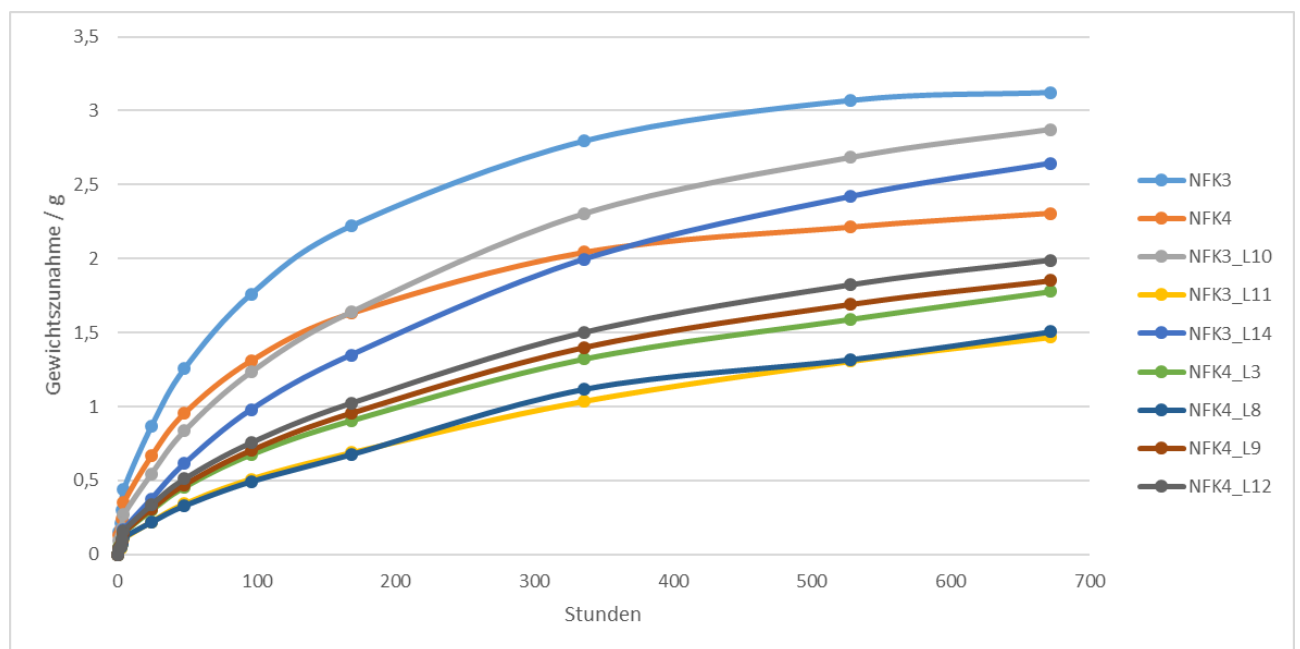


Abbildung 27: Absolute Gewichtszunahme in g der in Wasser ausgelagerten Proben.

Der unlackierte NFK3, mit dem rein fossilbasierten Harz, schneidet bei dieser Untersuchung am schlechtesten ab. Mit knapp 16 % liegt die Gewichtszunahme deutlich über den 12 % des mit einem teilbiobasierten hergestellten NFK4. Dies liegt vermutlich an dem leicht höheren Faseranteil und weniger an der fossilen Matrix, da hauptsächlich die Fasern das Wasser absorbieren und es dadurch zu einer verstärkten Degradation kommt. Auch die Lacke verhindern unterschiedlich erfolgreich die Aufnahme von Wasser. Dabei schützt der Lack L10 am wenigsten, gefolgt von den Lacken L12 und L14 (entspricht L10 plus einer weiteren Schicht Klarlack). Am besten schneiden die Lacksysteme L8 und insbesondere L11 ab. Bei L8 muss jedoch bedacht werden, dass es sich hierbei um eine wesentlich dickere Lackschicht handelt (Faktor 2 bis 3 dicker) als bei den anderen Systemen. Auch ist an der Steigung der einzelnen Linien zu erkennen das nach 28 Tagen noch nicht das Maximum der jeweiligen Wasseraufnahmen erreicht ist und somit die Lacke die Wasseraufnahme, zwar teilweise deutlich, jedoch insgesamt nur verlangsamen können.

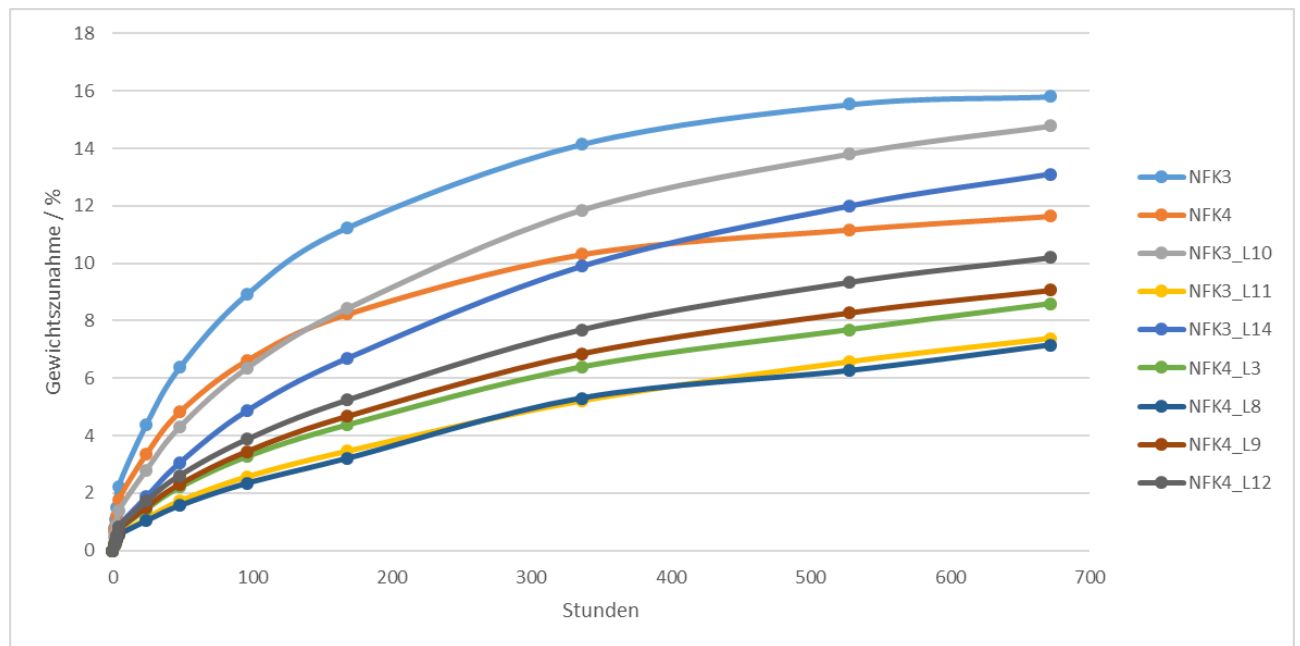


Abbildung 28: Relative Gewichtszunahme in % bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack) der in Wasser ausgelagerten Proben.

Um zu überprüfen, ob die Bewitterung auch tiefergehende Schädigungen im Material verursacht und die mechanischen Kennwerte negativ beeinflusst hat, wurden 4-Punktbiegeprüfungen nach DIN EN ISO 14125 durchgeführt. Im Folgenden ist der Biegemodul der Naturfaserverbundkunststoffe vor (0 Tage) sowie nach einem und 28 Tagen Auslagerung in destilliertem Wasser dargestellt (**Abbildung 29**). Außerdem zeigt **Abbildung 30** den Biegemodul in Prozent, bezogen auf die jeweilige 0-Tage-Referenz, um so die Ergebnisse und Veränderungen der verschiedenen Proben besser miteinander vergleichen zu können.

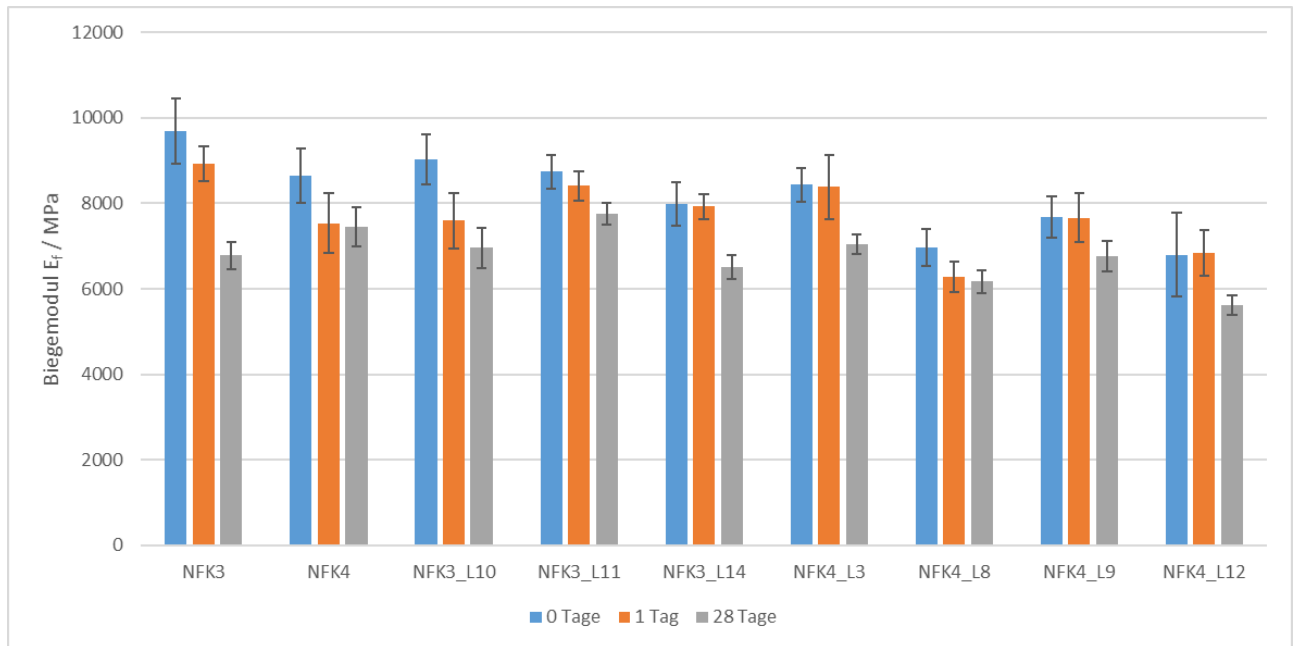


Abbildung 29: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Wasser (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Mit einer Abnahme auf 69,9 % nach 28 Tagen zeigt der unlackierte Naturfaserverbundkunststoff NFK3 (fossilbasiertes Harz) die größten Veränderungen des Biegemoduls. Dieser Abnahme kann mit den Lacken L10, L11 und L14 teilweise bzw. zeitweise entgegengewirkt werden. Insbesondere das Lacksystem L11 verhindert eine Verschlechterung des Biegemoduls (88,8 % nach 28 Tagen) deutlich. Das teilbiobasierte NFK4 scheint weniger anfällig für eine Wasseraufnahme und damit einer Verringerung des Biegemoduls zu sein. Dies kann liegt wahrscheinlich daran, dass das fossilbasierte NFK3 einen leicht erhöhten Faseranteil aufweist und die Fasern für die Wasseraufnahme und die folgende Degradation verantwortlich sind. Mit einem Wert von 86,3 % entspricht dieser fast der durch einen Lack geschützten NFK3_L11-Probe (88,8 %). Jedoch kann durch ein zusätzliches Lacksystem NFK4 auf Dauer zwar nicht höhere Biegemoduln erhalten, jedoch kann die Abnahme durch die Lacke L3, L9 und L12 verlangsamt werden. Insgesamt zeigt sich das die Aufnahme von Wasser zu einer Abnahme der mechanischen Kennwerte führt, diese jedoch durch eine geeignetes, schützendes Lacksystem deutlich verlangsamt werden kann.

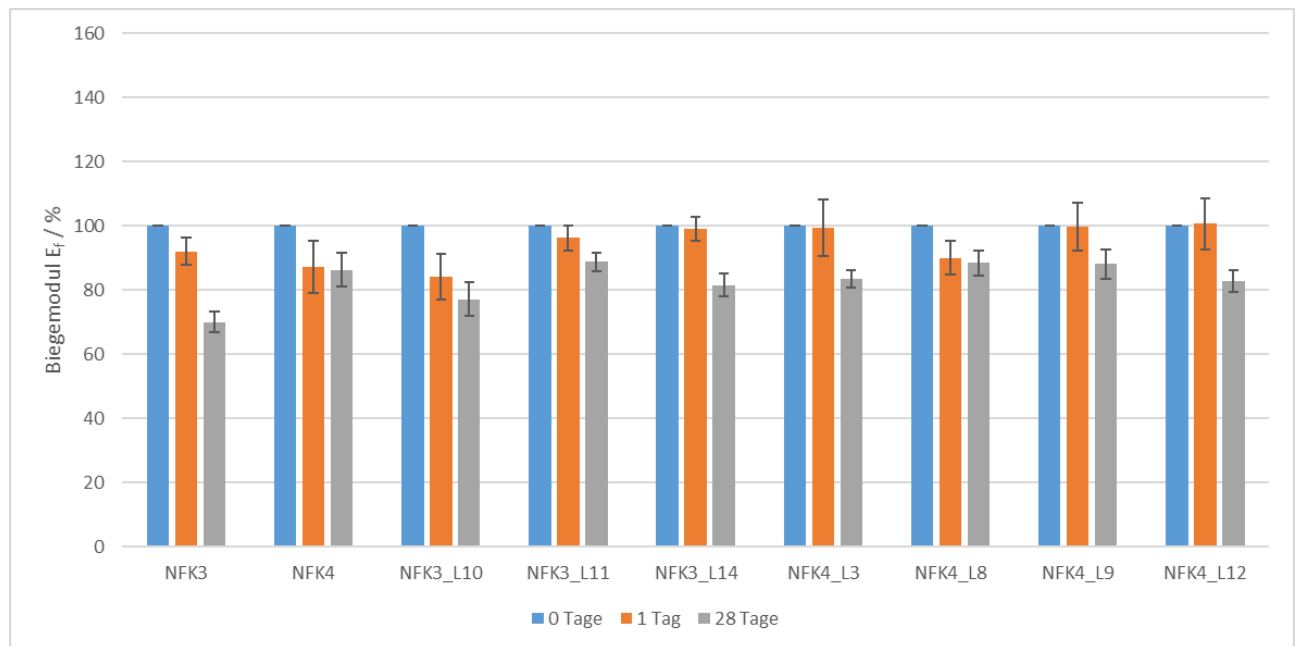


Abbildung 30: Biegemodul in % bezogen auf 0 Tage Referenz, lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Wasser (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Zwischen-Fazit (Wasser)

Bei der optischen Begutachtung der in Wasser ausgelagerten Proben konnte festgestellt werden, dass die beiden unlackierten Naturfaserverbundkunststoffe NFK3 und NFK4 über die Zeit deutlich ausbleichen. Dieser Veränderung konnte jedoch mit allen Lacken (L3 eingeschränkt) entgegengewirkt werden. Außerdem wurde dies auch mit Hilfe der Ergebnisse der Farbabstandsmessung bestätigt. Die Ermittlung des Glanzes und der Buchholzhärte hingegen brachten keine neuen Erkenntnisse. Durch die Gitterschnitt-Untersuchungen zeigte sich, dass alle Beschichtungen, außer L14, keinerlei Haftungsprobleme auf dem Substrat aufweisen und somit ohne Bedenken für Naturfaserverbundkunststoffe verwendet werden können. Zusätzlich stellte sich heraus, dass durch die geringere Wasseraufnahme (12 %) NFK4, besser bei der Biegeprüfung abschneidet als NFK3 (16 % Wasseraufnahme). Dies ist auf den höheren Faseranteil von NFK3 zurückzuführen. Der höhere Faseranteil begünstigt die Degradation, da der Verbund so stärker anschwillt und Faser-Matrix-Verbindungen aufgebrochen werden. Mit einer Abnahme auf 86,3 % des Biegemoduls nach 28 Tagen zeigt NFK4 wesentlich besser Werte als NFK3 mit 69,9 %. Mit einer geeigneten Beschichtung wie z.B. dem Lack L11 kann der Biegemodul von NFK3 jedoch auf ein ähnliches Niveau (88,8 % NFK3 mit L11 beschichtet) wie NFK4 gehoben werden. Schlussendlich kann eine passende Beschichtung dazu führen die Aufnahme von Wasser durch den Naturfaserverbundkunststoff deutlich zu verlangsamen und somit die ursprünglichen und gewollten Eigenschaften des NFKs wesentlich länger zu erhalten. Dabei schneiden die teilbiobasierten Beschichtungen insgesamt nicht schlechter ab als die konventionellen Lacke.

Auslagerung in Kerosin

In **Abbildung 31** sind Fotos der in Kerosin ausgelagerten Proben gezeigt. Dabei werden nicht ausgelagerte Proben (0 Tage) mit einem Tag lang ausgelagerten und 28 Tagen ausgelagerten Proben verglichen. Es zeigen sich keine optischen Veränderungen der Proben durch die Auslagerung. Auch die unbeschichteten Proben zeigen keine Änderung im Gegensatz zur Auslagerung in Wasser.

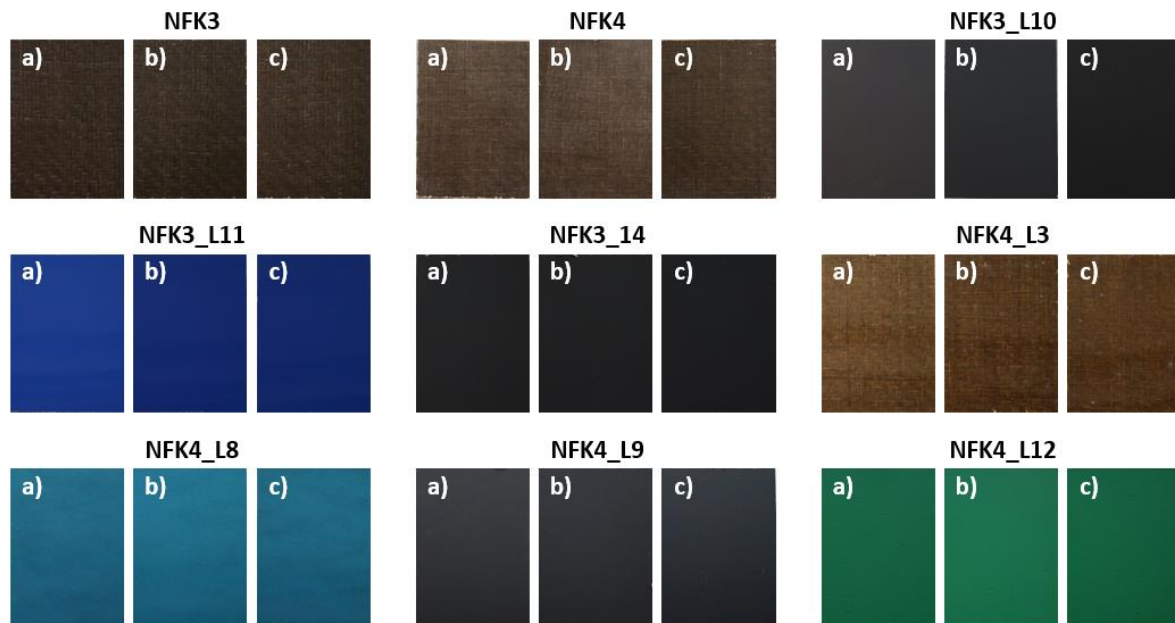


Abbildung 31: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht ausgelagert (0 Tage), b) nach einem Tag und c) nach 28 Tagen Auslagerung in Kerosin (nach anschließender Trocknung).

Die in **Abbildung 32** dargestellten Ergebnisse der Glanzmessung der in Kerosin ausgelagerten Proben zeigen nur sehr geringe Änderungen des Glanzes. Mit einem Anstieg von 7,8 GU (geringer Glanz) auf 12,3 GU (mittlerer Glanz) nach 28 Tagen zeigt der unlackierte Naturfaserverbund NFK4 den größten Unterschied. Bei allen anderen Proben können keine signifikanten Änderungen festgestellt werden, sowohl bei dem ebenfalls unlackierten NFK3, den matten Lacksystemen L9, L10, L12 und L14 als auch bei den Hochglanzlacken L3, L8 und L11.

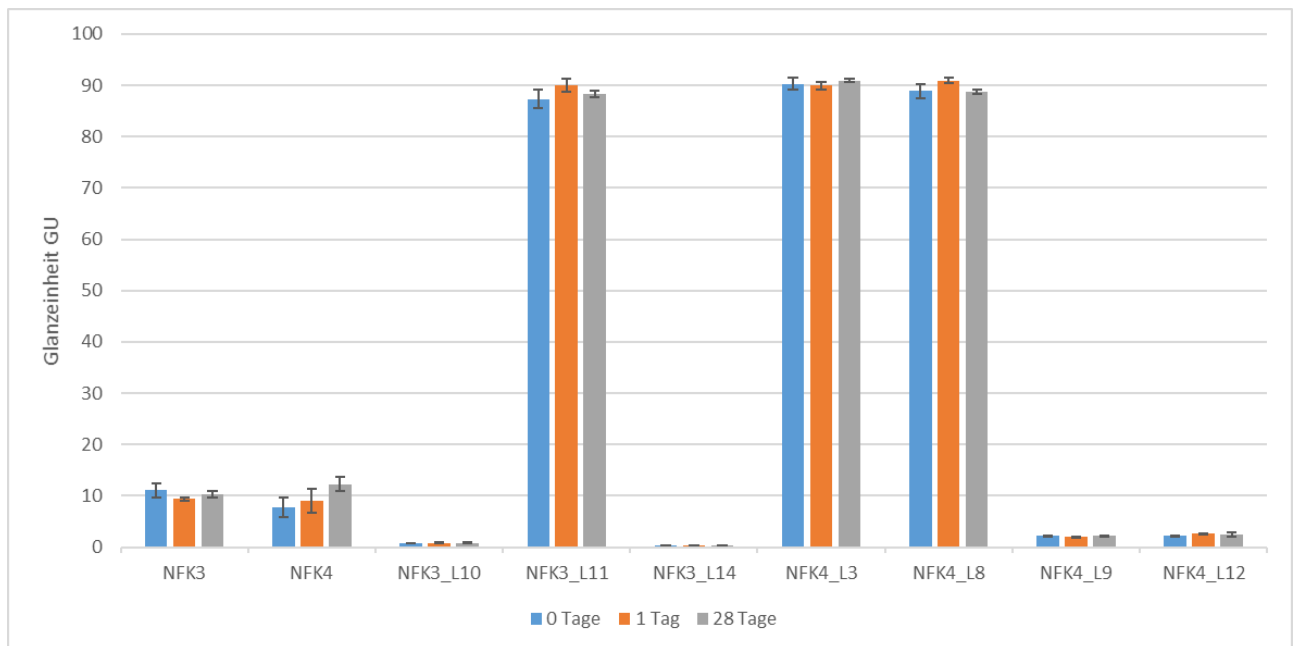


Abbildung 32: Glanzmessungen der in Kerosin ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.

Wie schon für den Glanzmessung, zeigen auch die Farbmessungen in **Abbildung 33** nur sehr geringe Änderungen auf, die die Auslagerung in Kerosin von bis zu 28 Tagen zur Folge hat. Das Lacksystem L8 hat mit einem Wert von 1,2 nach 28 Tagen den höchsten Farbabstand. Alle anderen Proben haben mit Werten unter 1, der kritischen Grenze, ab der mit bloßem Auge kein Unterschied mehr feststellbar ist, so geringe Farbabstände, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Auslagerung in Kerosin keine signifikanten Auswirkungen auf die optische Beschaffenheit der getesteten Oberflächen hat.

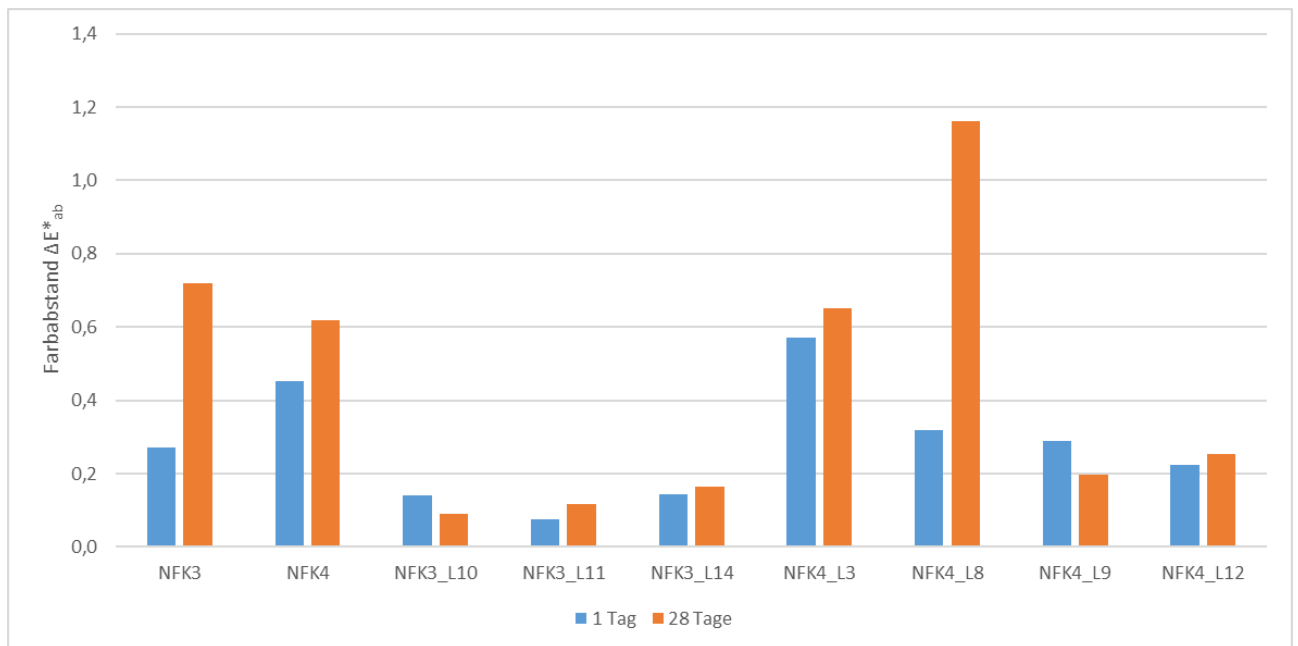


Abbildung 33: Farbmessungen der in Kerosin ausgelagerten Proben nach einem und 28 Tagen bezogen auf die 0-Tage-Referenz.

Die Werte für die Buchholzhärte sind auf einem ähnlichen Niveau wie bei der Auslagerung in Wasser. Dabei ergeben sich nur geringe Veränderungen, der in **Abbildung 34** dargestellten Eindruckslängen. Mit einer Zunahme von 2,25 mm auf 2,51 mm nach 28 Tagen zeigt der Lack L8 die größte konsistente Zunahme bzw. Abweichung und damit einen leichten Rückgang der Buchholzhärte. Die Werte für L3 hingegen schwanken zwar, betrachtet man jedoch den möglichen Fehler (vgl. Fehlerbalken **Abbildung 34**), lässt sich keine eindeutige Aussage über eine Veränderung fällen.

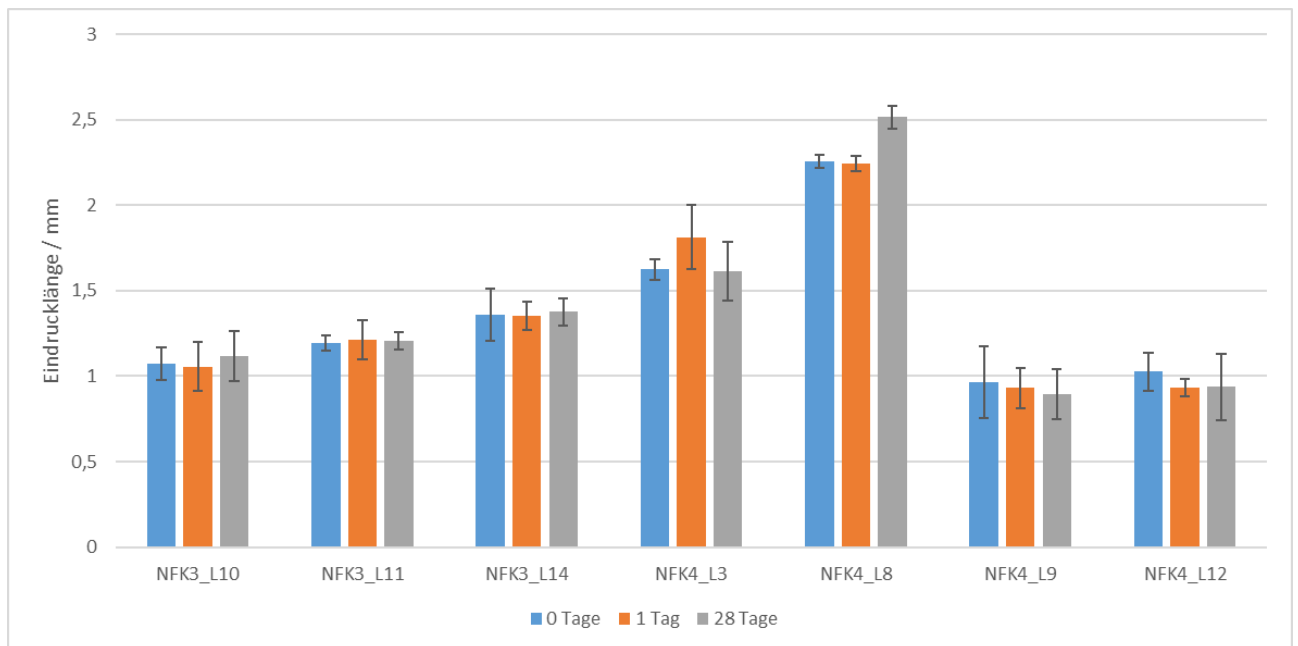


Abbildung 34: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde, mit und ohne Beschichtung, der in Kerosin ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.

Für die in **Tabelle 11** zusammengefassten Ergebnisse der Gitterschnittuntersuchung, also der Güte der Haftung auf dem NFK, ergibt sich ein eindeutiges Bild. Alle Lacke bis auf L14 und L3 (28-Tage-Probe) schneiden sehr gut ab. Sie zeigen Gitterschnittkennwerte (GT) von 0, was mit einer sehr guten Haftung gleichzusetzen ist. L14 und L3 (28-Tage-Probe) liegen mit Werten von 1-2 gerade an der Grenze von bestanden ($GT \leq 1$) zu nicht bestanden ($GT > 1$).

Tabelle 11: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Kerosin.

	0 Tage	1 Tag	28 Tage
NFK3_L10	0	0	0
NFK3_L11	0	0	0
NFK3_L14	1-2	1-2	1-2
NFK4_L3	0	0	1-2
NFK4_L8	0	0	0
NFK4_L9	0	0	0
NFK4_L12	0	0	0

Auf Grund von Sicherheitsbedenken wurde keine Massen und damit auch Gewichtszunahme bei der Auslagerung von Kerosin bestimmt.

Im Folgenden ist das Biegemodul der Naturfaserverbundkunststoffe vor (0 Tage) sowie nach einem und 28 Tagen Auslagerung in Kerosin dargestellt (**Abbildung 35**). Außerdem zeigt

Abbildung 36 das Biegemodul in Prozent, bezogen auf die jeweilige 0-Tage-Referenz, um so die Ergebnisse und Veränderungen der verschiedenen Proben besser miteinander vergleichen zu können.

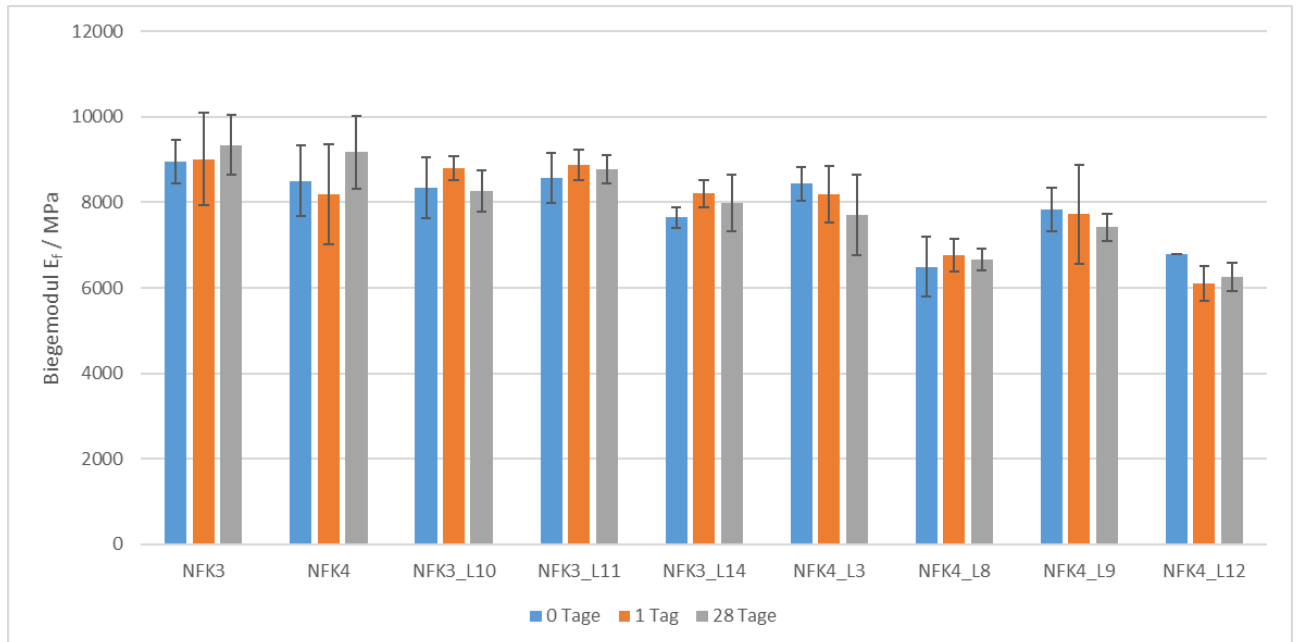


Abbildung 35: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Kerosin (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Wie schon bei der optischen Begutachtung (vgl. **Abbildung 31**) und der Farbmessung (vgl. **Abbildung 33**) der Proben, können auch bei der Biegeprüfung keine signifikanten Veränderungen durch die Auslagerung in Kerosin festgestellt werden. Die in **Abbildung 36** dargestellten Ergebnisse des Biegemoduls in Prozent, bezogen auf die 0-Tage-Referenz, zeigen nur leichte Schwankungen in beide Richtungen der Skala. Dies zusammen mit der Streuung der Einzelwerte und dem damit möglichen Fehler lässt keine eindeutige Tendenz bzgl. einer Zu- oder Abnahme des Biegemoduls zu. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Kerosin keinen negativen Effekt auf die Biegeeigenschaften des Naturfaserverbundkunststoffs hat, unabhängig davon ob beschichtet oder nicht.

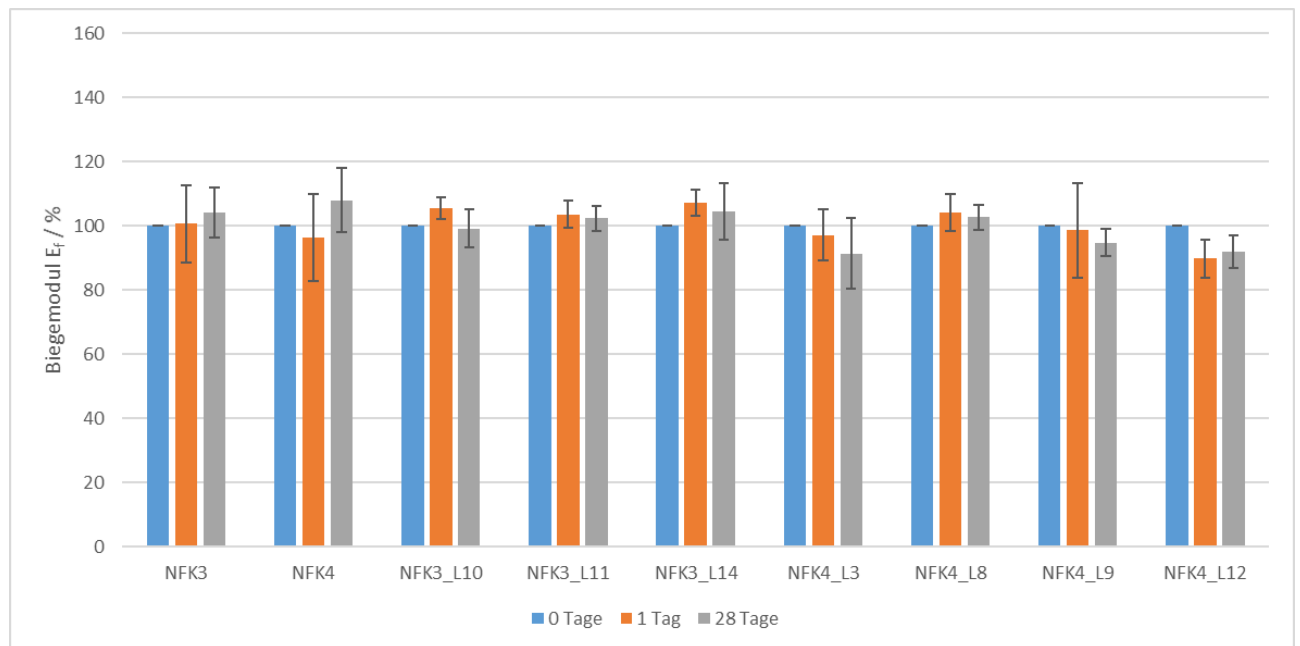


Abbildung 36: Biegemodul in % bezogen auf 0-Tage-Referenz, lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Kerosin (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Zwischen-Fazit (Kerosin)

Bei der optischen Prüfung der in Kerosin ausgelagerten unlackierten und lackierten NFKs ergibt sich ein eindeutiges Bild. Sowohl die visuelle Begutachtung der Proben, die Glanzmessung als auch die Messung des Farbabstands zeigen, dass Kerosin keinen signifikanten Einfluss auf die optischen Eigenschaften der getesteten Naturfaserverbundkunststoffe und deren Beschichtungen hat. Die Untersuchung der Buchholzhärte zeigte keine Veränderung durch die Kerosinauslagerung. Bei den Gitterschnittprüfungen schnitten alle Beschichtungen bis auf L14 und die 28-Tage-Probe von L3 erfolgreich ab. Auf Grund von Sicherheitsbedenken wurden keine Massen ermittelt und damit auch keine Gewichtszunahme untersucht. Zuletzt zeigen auch die Werte für den Biegemodul keine eindeutigen Veränderungen auf, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Auslagerung in Kerosin keine negativen Effekte auf die Biegeeigenschaften zu Folge hat. Damit lässt sich abschließend sagen, dass, unabhängig davon, ob ein fossil- oder teilbiobasiertes Harz eingesetzt wird, und ob es einen höheren oder niedrigeren Faseranteil im Komposit gibt, die getesteten Naturfaserverbundwerkstoffe, sowohl beschichtet als auch unbeschichtet, widerstandsfähig gegen Kerosin sind und somit einer Substitution durch biobasierte Werkstoffe aus technischer Sicht nichts im Wege steht.

Auslagerung in Hydrauliköl

In **Abbildung 37** sind die Proben der Hydraulikölauslagerung zu sehen, bei denen nicht ausgelagerte Proben mit einem Tag lang ausgelagerten und 28 Tagen ausgelagerten Proben verglichen werden. Dabei zeigen sich, so wie schon bei Kerosin, keine optischen Unterschiede.

Die einzige Ausnahme bildet die Probe NFK4_L3 b, welche jedoch schon zu Beginn die erkennbaren Fehlstellen aufgewiesen hat und es sich somit hier nicht um durch das Hydrauliköl verursachte Veränderungen handelt.

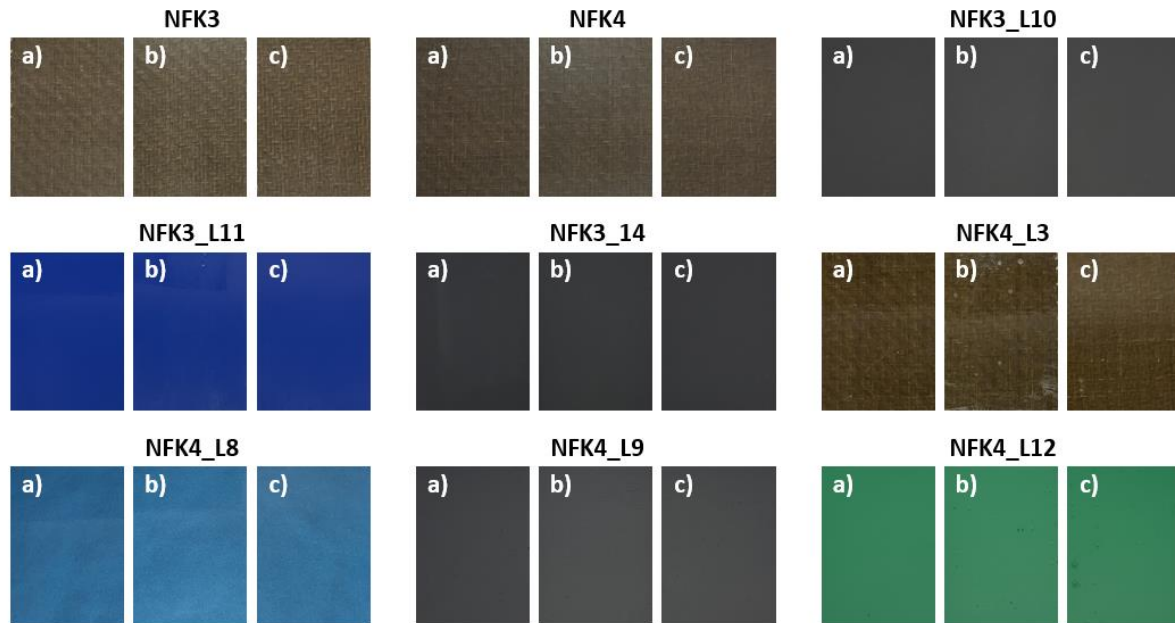


Abbildung 37: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht ausgelagert (0 Tage), b) nach einem Tag und c) nach 28 Tagen Auslagerung in Hydrauliköl (nach anschließender Trocknung).

Die Untersuchung des Glanzes der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben (**Abbildung 38**) zeigt keine signifikanten Änderungen während der 28 Tage dauernden Auslagerung. Alle Proben weisen nur leichte Schwankungen von bis zu maximal 6 Glanzeinheiten (GU) bei NFK3_L11 und NFK4_L3 auf.

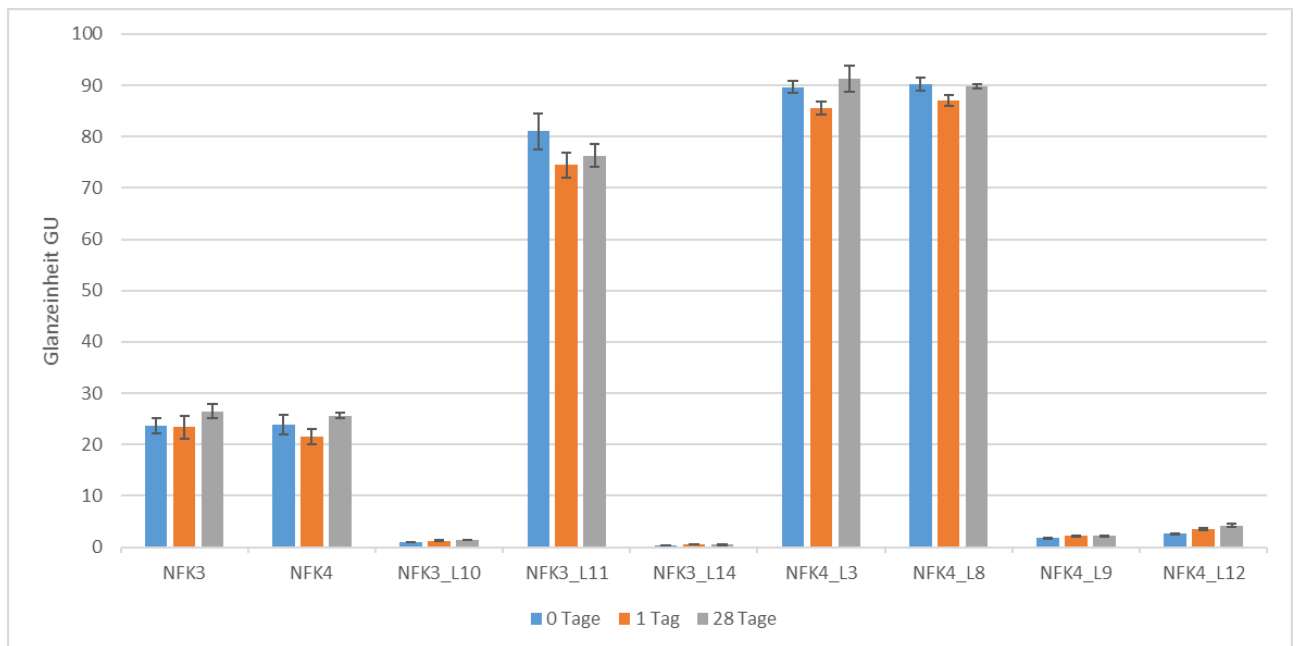


Abbildung 38: Glanzmessungen der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.

Die in **Abbildung 39** dargestellten Ergebnisse der Farbabstandsmessungen der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben, bezogen auf die 0-Tage-Referenz, zeigen, wie schon bei Kerosin, nur sehr geringe Schwankungen. Dabei erreicht der nicht lackierte Naturfaserverbund NFK3 mit einem Wert von 1,3 den höchsten Farbabstand, gefolgt von NFK4_L12 mit 1,2. Alle anderen Proben, sowohl der ebenfalls unlackierte NFK3 als auch die Lacksysteme L3, L8, L9, L10, L11 und L14 zeigen deutliche Werte unter 1. Da bei einem Wert von um die 1 davon ausgegangen wird, dass mit dem menschlichen Auge kein Unterschied feststellbar ist, schneiden alle getesteten Naturfaserverbunde, sowohl lackiert als auch unlackiert, bei diesem Test positiv ab.

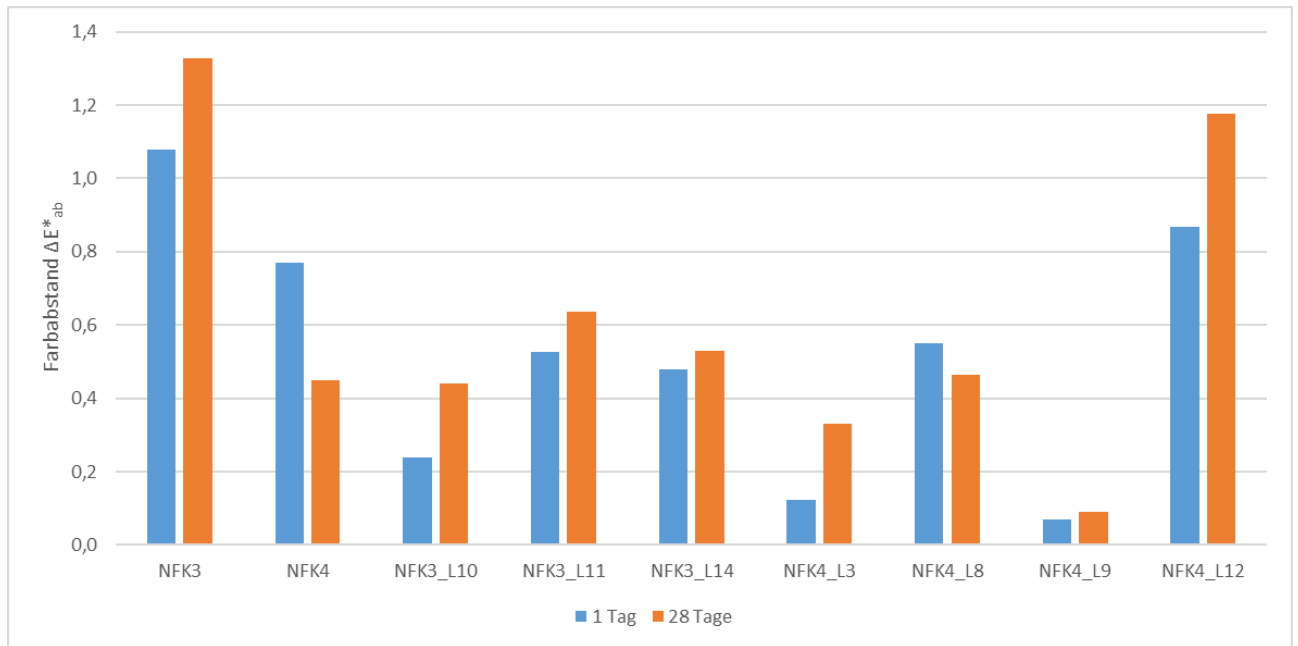


Abbildung 39: Farbmessungen der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach einem und 28 Tagen bezogen auf die 0-Tage-Referenz.

Insgesamt kann die optische Untersuchung (Glanz und Farbabstand) der Oberflächen als unauffällig bewerten werden und das Hydrauliköl hat keine negativen Effekte auf die optischen Eigenschaften der untersuchten Proben.

Die in **Abbildung 40** dargestellte Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm, zeigt nur geringe Schwankungen für die Auslagerung in Hydrauliköl. Mit einer Abnahme von 1,05 mm auf 0,86 mm erhöht sich der Eindruckwiderstand von L10 am stärksten. Alle anderen getesteten Beschichtungen weisen nur unerhebliche Veränderungen in der Eindrucklänge auf.

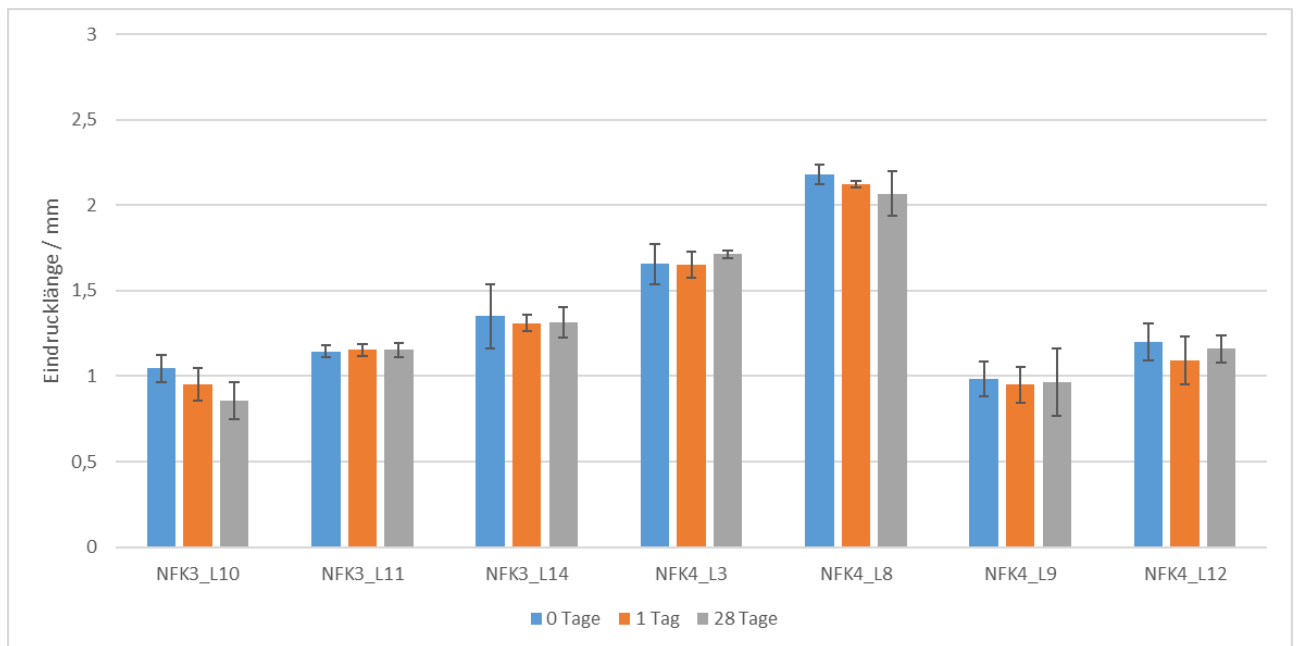


Abbildung 40: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde, mit und ohne Beschichtung, der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.

Wie schon bei der Auslagerung in Wasser und Kerosin zeigen auch bei Hydrauliköl alle Beschichtungen bis auf L14 eine sehr gute Haftung. Die in **Tabelle 12** angegebenen Gitterschnittkennwerte (GT) liegen durchgehend bei 0 (sehr gute Haftung) und ausschließlich bei dem Lacksystem L14 ergibt sich mit Werten von 1-2 für die 0-Tage-Referenz und die 1-Tage-Probe bzw. 2 für die 28-Tage-Probe ein negatives Ergebnis, d.h. eine nicht ausreichende Haftung.

Tabelle 12: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Hydrauliköl.

	0 Tage	1 Tag	28 Tage
NFK3_L10	0	0	0
NFK3_L11	0	0	0
NFK3_L14	1-2	1-2	2
NFK4_L3	0	0	0
NFK4_L8	0	0	0
NFK4_L9	0	0	0
NFK4_L12	0	0	0

In **Abbildung 41** und **Abbildung 42** ist die Gewichtszunahme der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach bis zu 28 Tagen dargestellt. Dabei zeigt **Abbildung 42** die relative Gewichtszunahme in Prozent bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack). Das Ergebnis unterscheidet sich nicht von den absoluten Werten.

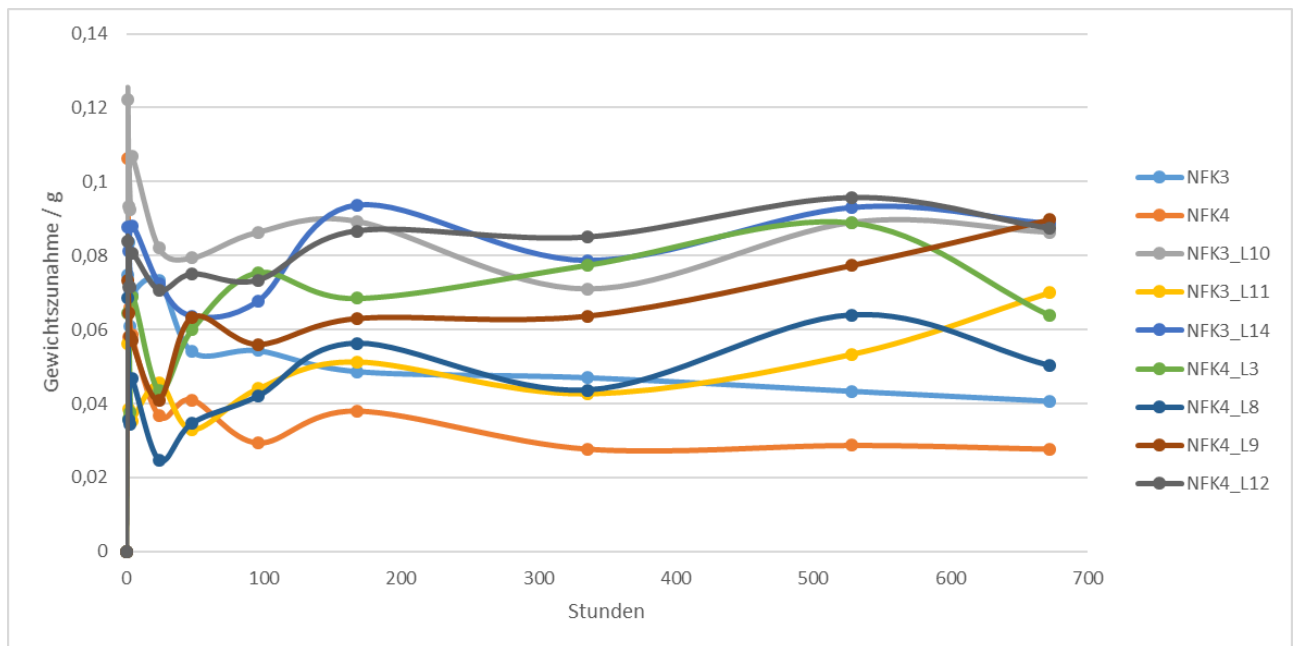


Abbildung 41: Absolute Gewichtszunahme in g der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben.

Mit Werten um bzw. unter 0,6 % relative Gewichtszunahme bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack) zeigen die Naturfaserverbundkunststoffe, sowohl ohne, als auch mit Beschichtung, in **Abbildung 42** keine signifikante Aufnahme von Hydrauliköl.

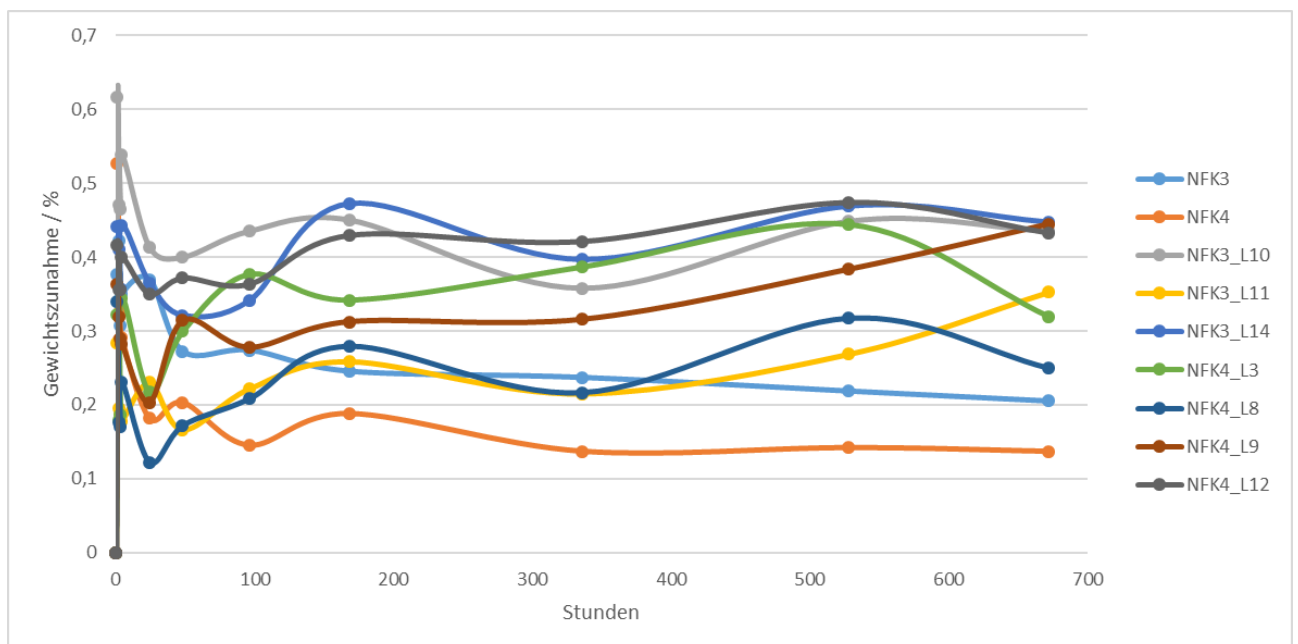


Abbildung 42: Relative Gewichtszunahme in % bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack) der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben.

Nachfolgend ist der Biegemodul der Naturfaserverbundkunststoffe vor (0 Tage) sowie nach einem und 28 Tagen Auslagerung in Hydrauliköl dargestellt (**Abbildung 43**). Außerdem zeigt **Abbildung 44** den Biegemodul in Prozent, bezogen auf die jeweilige 0-Tage-Referenz, um so die Ergebnisse und Veränderungen der verschiedenen Proben besser miteinander vergleichen zu können.

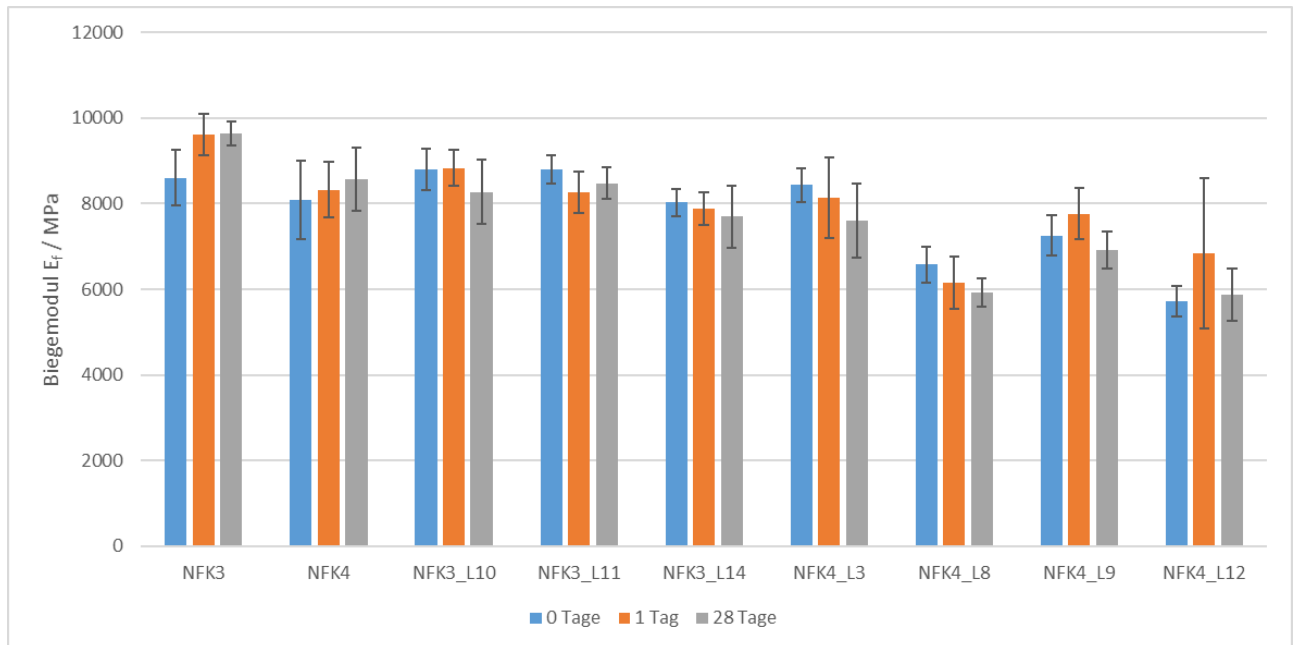


Abbildung 43: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Hydrauliköl (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Insgesamt ergibt sich, so wie auch bei Kerosin, kein eindeutiges Bild bzgl. einer Tendenz für den Biegemodul in **Abbildung 44**. Bei NFK3 steigt er um ca. 12 % nach einem Tag Auslagerung an und bleibt auf diesem Niveau. Für NFK4 ergibt sich eine Zunahme von 6 % nach 28 Tagen. Bei den lackierten NFK-Proben sinkt das Biegemodul hingegen über die Zeit, so z.B. bei L3 und L8 auf ca. jeweils 90 % nach 28 Tagen. Die Werte für L9 und L12 dagegen steigen zunächst fallen dann aber wieder ab. Dabei weisen die Einzelwerte jedoch, insbesondere bei L12, starke Schwankungen auf und damit auch einen großen möglichen Fehler. Insgesamt lassen sich keine negativen Effekte auf den Biegemodul durch die Auslagerung in Hydrauliköl nachweisen.

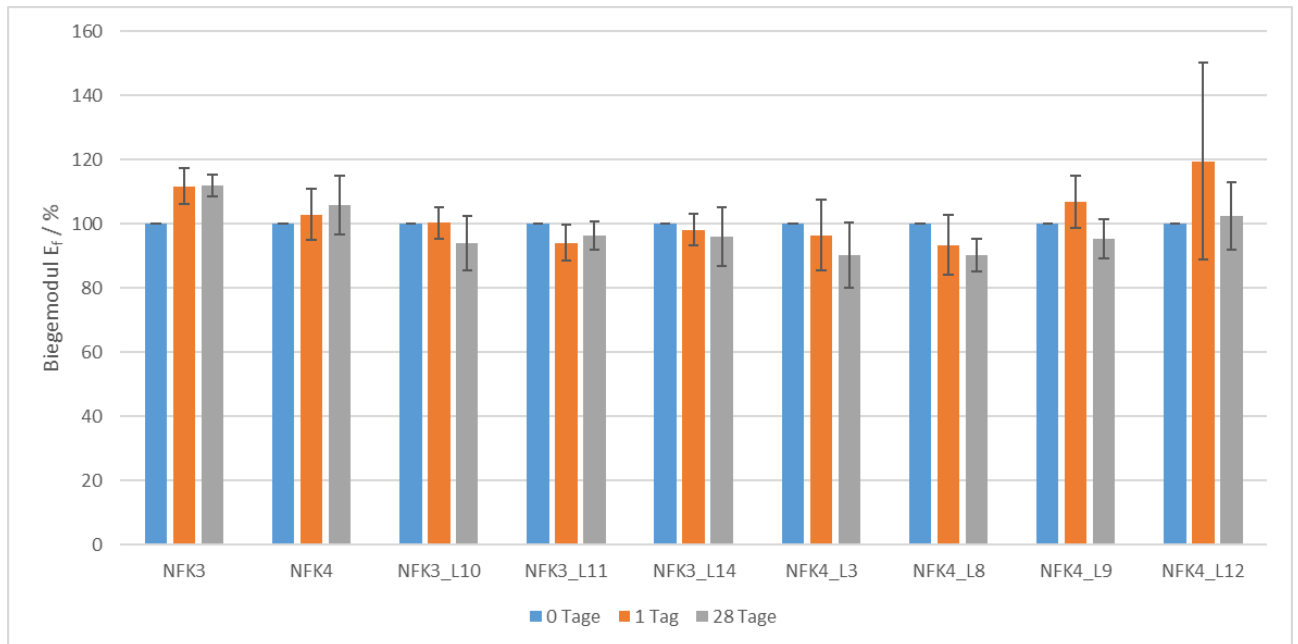


Abbildung 44: Biegemodul, in % bezogen auf 0 Tage Referenz, lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Hydrauliköl (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).

Zwischen-Fazit (Hydrauliköl)

Bei der Auslagerung in Hydrauliköl konnten keine optischen Veränderungen an den unbeschichteten und beschichteten Naturfaserverbundkunststoffen festgestellt werden. Dies wurde auch durch die Glanzuntersuchungen als auch den Messungen des Farbabstandes bestätigt. Die Analyse der Buchholzhärte ergab, wie schon bei Wasser und Kerosin, keine neuen Erkenntnisse. Mit Hilfe der Gitterschnittprüfung wurden außerdem allen Lacken, bis auf L14, eine sehr gute Haftung attestiert. Bei der Untersuchung der Masse bzw. der relativen Gewichtszunahme zeigte sich außerdem, dass mit Werten von maximal 0,6 % keine signifikante Aufnahme von Hydrauliköl in den Werkstoff stattfindet, unabhängig ob die jeweilige Probe durch eine Beschichtung geschützt wird oder nicht. Zuletzt weisen nur leicht erhöhte bzw. verringerte Werte bei der 4-Punktbiegeprüfung auf keine negativen Effekte auf den Biegemodul bei der Auslagerung in Hydrauliköl hin.

Fazit AP 2.6

Ziel des AP 2.6 war die Untersuchung der Flüssigkeitsresistenz von naturfaserverstärkten Kunststoffen sowie des Einflusses der verwendeten Beschichtungen zum Schutz der NFKs vor den ausgewählten luftfahrtspezifischen Flüssigkeiten Wasser, Kerosin und Hydrauliköl. Dazu wurden zwei Naturfaserverbundkunststoffe (NFK3 (fossil-basiertes Harz) und NFK4 (teilbiobasiertes Harz)) mit unterschiedlichem Fasergehalt (55 % bzw. ca. 50 %), sowie sieben Beschichtungen, davon drei fossilbasiert, drei teilbiobasiert und eine Kombination (L14, teilbiobasierter Autointerieurlack plus fossilbasierter Klarlack), für bis zu 28 Tage in den Flüssigkeiten ausgelagert und im Anschluss verschiedenen Prüfungen unterzogen. Die Proben

wurden optisch begutachtet, der Glanz und der Farbabstand ermittelt, die Härte nach Buchholz sowie die Haftung der Beschichtungen geprüft, die Masse bzw. Gewichtszunahme analysiert und per 4-Punktbiegeprüfung die mechanischen Kennwerte untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass Wasser als die kritische Flüssigkeit anzusehen ist. Durch das Eindringen von bis zu 16 % Wasser, bezogen auf den reinen NFK, in den Werkstoffe, kam es zum Ausbleichen der Proben als zur Abnahme mechanischen Kennwerte, genauer gesagt des Biegemoduls, der sich hat nach 28 Tagen auf bis zu 70 % der ursprünglichen Werte reduziert hat. Diesem Effekt konnte jedoch durch die ausgewählten Beschichtungen entgegengewirkt werden. Sowohl Kerosin als auch Hydrauliköl haben sich hingegen als unbedenklich für NFK herausgestellt und das für die unlackierten als auch lackierten Naturfaserverbundkunststoffe. Auch hat sich gezeigt, dass die teilbiobasierten Beschichtungen nicht schlechter abschneiden als die konventionellen. Der NFK mit dem geringeren Faseranteil (NFK4) hat besser abgeschnitten als der NFK mit dem höheren Faseranteil (NFK3). Die teilbiobasierte Matrix von NFK4 zeigte keine negativen Auswirkungen. Damit stellt sich abschließend aus technischer Sicht eine Substitution mit (teil-)biobasierten Materialien als möglich und auch sinnvoll dar.

6.3 HAP 5: Bewertung der Ergebnisse

Ziel des Hauptarbeitspaket 5 ist die Bewertung des erarbeiteten Technologiekonzepts zur Realisierung von Luftfahrtbauteilen mit hohen Anteilen an biobasierten und somit nachwachsenden Rohstoffen. Dabei übernimmt der Projektpartner TUM die technische Bewertung der gefertigten Bauteile und die HsH die projektbegleitende ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts. Abschließend steht eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick hinsichtlich des Einsatzes von biobasierten Werkstoffen in der Luftfahrt am Beispiel einer Hubschrauber-Kabinentür zur Verfügung.

6.3.1 AP 5.2: Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts

6.3.2 AP 5.2: Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts

Das Ziel dieses Arbeitspakets besteht darin, die Umweltauswirkungen des gesamten Konzepts mithilfe der Ökobilanzmethode (LCA) zu quantifizieren. Die Ökobilanz umfasst vier iterative und voneinander abhängige Schritte, die in der DIN ISO 14040; DIN ISO 14044) definiert sind und in Abbildung 45 dargestellt werden.

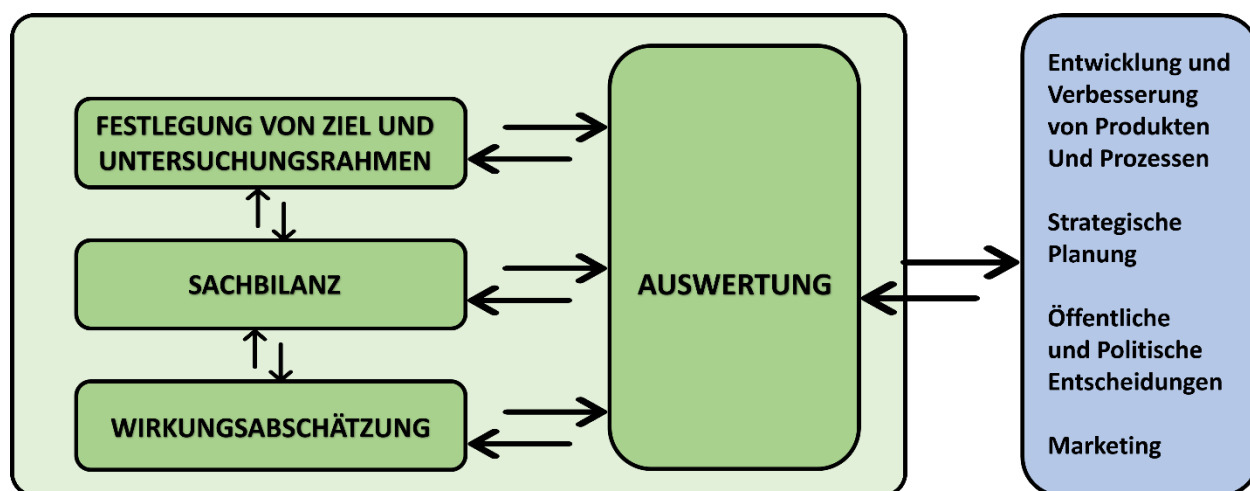


Abbildung 45 Rahmen einer Ökobilanz

6.3.3 Bio-Anteil

Der biobasierte Anteil der Helikoptertür wird anhand empirischer Methoden und Daten berechnet. Dabei werden Naturfasern als 100 % und Kohlenstofffaser als 0 % biobasierter Anteil betrachtet. Der biobasierte Anteil der Epoxidharze und der Beschichtungssysteme wird von den Herstellern nicht offengelegt, da sie ihn als Geschäftsgeheimnis betrachten. Für die hier vorgenommene Schätzung wurde der biobasierte Anteil auf der Grundlage von in der Literatur verfügbaren Daten geschätzt. Der biobasierte Anteil für die im Prepreg verwendeten Epoxide wird auf 46,8 % geschätzt (Terry und Taylor 2021). Das Beschichtungssystem besteht aus zwei Komponenten, einem Basecoat und einem Topcoat, die beide vor dem Auftragen mit einem Härter gemischt werden. Der biobasierte Anteil im Härter beträgt bis zu 70 % (Chemanager 06.03.2024), während der Anteil des für die Anwendung im Automobilbereich geeigneten Polyols bis zu 48 % betragen kann (Cargill 2023). Die Tabelle 13 zeigt die Berechnung zur Schätzung des biobasierten Anteils der im Rahmen des Projekts hergestellten Hubschraubertür.

Tabelle 13 Berechnung des biogenen Gehalts der Hubschraubertür

Material	Gewicht [g]	Prepreg Anteil im gesamt Prepreg	Material Anteil in Lackierte Tür	Harzanteil im prepreg	Bioanteil im Harz	Faseranteil im Prepreg	Bioanteil in Fasern	Bioanteil in Lackierte Tür
CF Prepreg Bidirektional (BD)	105	5,38%	4,13%	55%	22%	45%	0%	0,50%
CF Prepreg Tow	40	2,05%	1,57%	45%	22%	55%	0%	0,16%

CF Prepreg Unidirektional (UD)	45	2,31%	1,77%	36%	22%	64%	0%	0,14%
Flachs Prepreg BD	1010	51,79%	39,68%	55%	22%	45%	100%	22,66%
Flachs UD	750	38,46%	29,47%	55%	22%	45%	100%	16,83%
Prepregs (Ges.)	1950							
Innen+Außen Schalen	950							
Klebstoff	175,4		14,08%	Bioanteil %primer/ topcoat	primer/ topcoat%	Bioanteil %Härter	Härter % Lack System	
Geklebte Tür	1125,4							
Lacksystem	120		9,64%	48%	81,63%	70,00%	18,37%	5,01%
Lackierte Tür	1245,4		100,00%					45,29%

6.3.4 Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel dieser Ökobilanz besteht darin, die potenziellen Umweltauswirkungen des Lebenszyklus einer Hubschraubertür zu quantifizieren, die aus naturbasierten Materialien mit einem hohen biogenen Anteil hergestellt wird. Die Ergebnisse dieser Ökobilanz sind nicht für die Öffentlichkeit bestimmt, sondern dienen als Orientierungshilfe bei der Auswahl von Materialien und Produktionstechnologien mit möglichst geringen Umweltauswirkungen. Die funktionelle Einheit dieser Ökobilanz ist eine Hubschraubertür, die an den coAX 2D-Hubschrauber von EDM Aerotec GmbH montiert werden soll. Nach Rücksprache mit den Projektpartnern von EDM Aerotec, Dr. Alexander Burreh, wurden die Anforderungen an die Funktionseinheit von 10.000 auf 1.000 Flugstunden geändert. Der Status Quo wird mit Kohlefaser-Prepregs hergestellt und dient als Referenz, um die Umweltauswirkungen der neu entwickelten Hubschraubertür zu vergleichen. Zusätzlich fungiert das Produktsystem als Kohlenstoffsенke durch den biogenen Kohlenstoff, der in den natürlichen Materialien enthalten ist, die zur Herstellung der neuen Tür verwendet werden. Diese Ökobilanz folgt dem Ansatz der Attributional-Ökobilanzmodellierung (Ekvall 2020) gemäß den Leitlinien des von der Europäische Commission - Joint Research Centre der (EU-JRC) empfohlenen International Reference Lifecycle Data System (ILCD) Handbuchs (EU-JRC und EPLCA 2011) und erfüllt die Datenqualitätsanforderungen der (DIN ISO 14040; DIN ISO 14044; EU-JRC und EPLCA 2010). Die Allokationshierarchie für multifunktionale Prozesse wird dabei beachtet. Die Wirkungsabschätzung wurden mithilfe der Methode CML 4.8 (Leiden University 2016) berechnet, da sie die Ergebnisse einschließlich des biogenen Kohlenstoffs enthält, der in diesem Projekt von großem Interesse ist. Das gesamte Konzept wurde mit der Ökobilanzsoftware Sphera LCA for Experts (LCA FE, früher GaBi) von Sphera Solutions Inc. modelliert. Als Quelle für Hintergrunddaten wurden der Sphera Managed Life Cycle Content

(Sphera MLC, früher GaBi-Datenbanken) (Sphera Solutions GmbH 2023) und die ecoinvent-Datenbanken verwendet (The ecoinvent Association 2022). Die Cradle-to-Grave Systemgrenzen, die für das aktuelle Produktsystem gewählt wurden, sind in Abbildung 46 dargestellt.

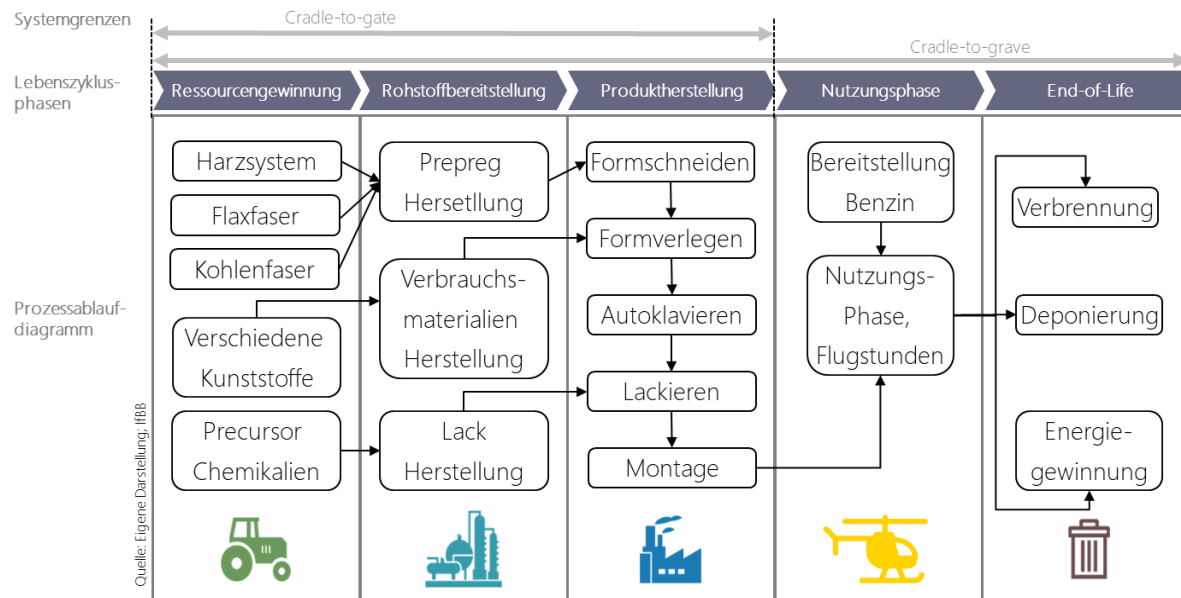


Abbildung 46 Systemgrenzen und das Produktsystem

6.3.5 Sachbilanz

Das Ziel der Sachbilanz (Life Cycle Inventory; LCI) besteht darin, sämtliche Austauschvorgänge zwischen dem Produktsystem und der Umwelt aufzulisten und zu quantifizieren. Hierbei werden alle verbrauchten Ressourcen sowie alle Emissionen erfasst, die bei der Produktion einer Funktionseinheit, in diesem Fall einer Hubschraubertür, entstehen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird zunächst das zu untersuchende Produktsystem abgebildet und in Prozesseinheiten unterteilt. Jeder Teilprozess wird definiert, gefolgt von einer Input-Output-Analyse sowie einer Material- und Energieflussanalyse. Demnächst werden die LCI-Systemdiagramme und der wichtigen Prozesseinheiten beschrieben. Der Autoklavenprozess, wie in Abbildung 47 dargestellt, spiegelt den Produktionsprozess der Hubschraubertür wider. Der Prozess beginnt mit der Anlieferung aller Materialien am Fabrikator und endet mit dem Einbau der Tür in den Hubschrauber. Der Prozess läuft in den folgenden Schritten ab.

Herstellung: Autoklavierung

Verlegen der Prepregs auf der Form

Dieser Prozess beschreibt das Auflegen der in Form geschnittenen Prepregs auf die Türverkleidungsform. Der Materialfluss umfasst UD Flachsfaser Prepreg, BD Flachsfaser Prepreg, UD Kohlefaser Prepreg und BD Kohlefaser Prepreg. Die Mengen dieser Materialien wurden bei der Produktion der Tür im Juli 2023 bei der Fa. Invent GmbH gemessen.

Aushärtung im Autoklaven

Dieser Prozess beschreibt den Prozess der Vorbereitung der Form für den Autoklaven sowie den eigentlichen Autoklavierprozess. Es werden aller Stoffströme (Verbrauchsmaterialien) erläutert, die für die Vakuumversiegelung der Form benötigt werden. Die Mengen aller Stoffströme wurden im Juli 2023 bei der Fa. Invent GmbH während der Produktion der Tür gemessen. Die Energieströme umfassen den Stromverbrauch der Heizelemente des Autoklavs sowie der Vakuumpumpen zur Erzeugung und Aufrechterhaltung des Vakuums an den vakuumversiegelten Türformen. Die elektrische Energie wurde im Juli 2023 während der Produktion der Tür bei der Fa. Invent GmbH gemessen. Der Energieverbrauch der Peripherie, wie zum Beispiel der Energieverbrauch der Vakuumpumpe, konnte aufgrund der Einschränkungen des Messgeräts nicht gemessen werden. Da der periphere Energieverbrauch jedoch relativ gering ist (Hohmann und Isik 2022), wird er in dieser Ökobilanz nicht berücksichtigt und ist vernachlässigbar. Des Weiteren entstehen bei der Aushärtung auch einige NMVOC- und andere Luftemissionen, die jedoch schwer zu messen oder abzuschätzen sind (Hadar et al. 1997) und daher ebenfalls nicht in die Ökobilanz einbezogen werden.

Randbeschneidung

Die Materialflüsse für diesen Prozess wurden anhand der gemessenen Werte für die Masse der Türschalen vor und nach dem Schneidprozess erstellt. Die Messungen wurden im Juli 2023 während der Produktion der Tür bei der Fa. Invent GmbH durchgeführt. Da der Zuschnitt manuell mit Elektrowerkzeugen erfolgt, werden die Energieströme für diesen Prozess derzeit nicht berücksichtigt. Dies geschieht, da sie im Vergleich zum gesamten Energieaufwand für die Produktion der Hubschraubertür als vernachlässigbar eingeschätzt werden.

Verkleben der Türverkleidungen

Dieser Prozess beschreibt das Verkleben der inneren und äußeren Türschalen, aus denen schließlich die Hubschraubertür entsteht. Die Stoffströme dieses Prozesses beinhalten ausschließlich den Klebstoff, der zur Verklebung der Türschalen verwendet wird. Ein 2-Komponenten (2K) Epoxidklebstoff wurde auf Basis der Angaben von Experten der Fa. Invent GmbH ausgewählt und die LCI-Daten wurden aus der Sphera MLC-Datenbank entnommen. Die Menge des verwendeten Klebstoffs wurde ermittelt, indem die Masse der inneren und äußeren Türschalen mit der Masse der fertigen Tür verglichen wurde.

Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH

Process plan reference quantities
The names of the basic processes are shown.

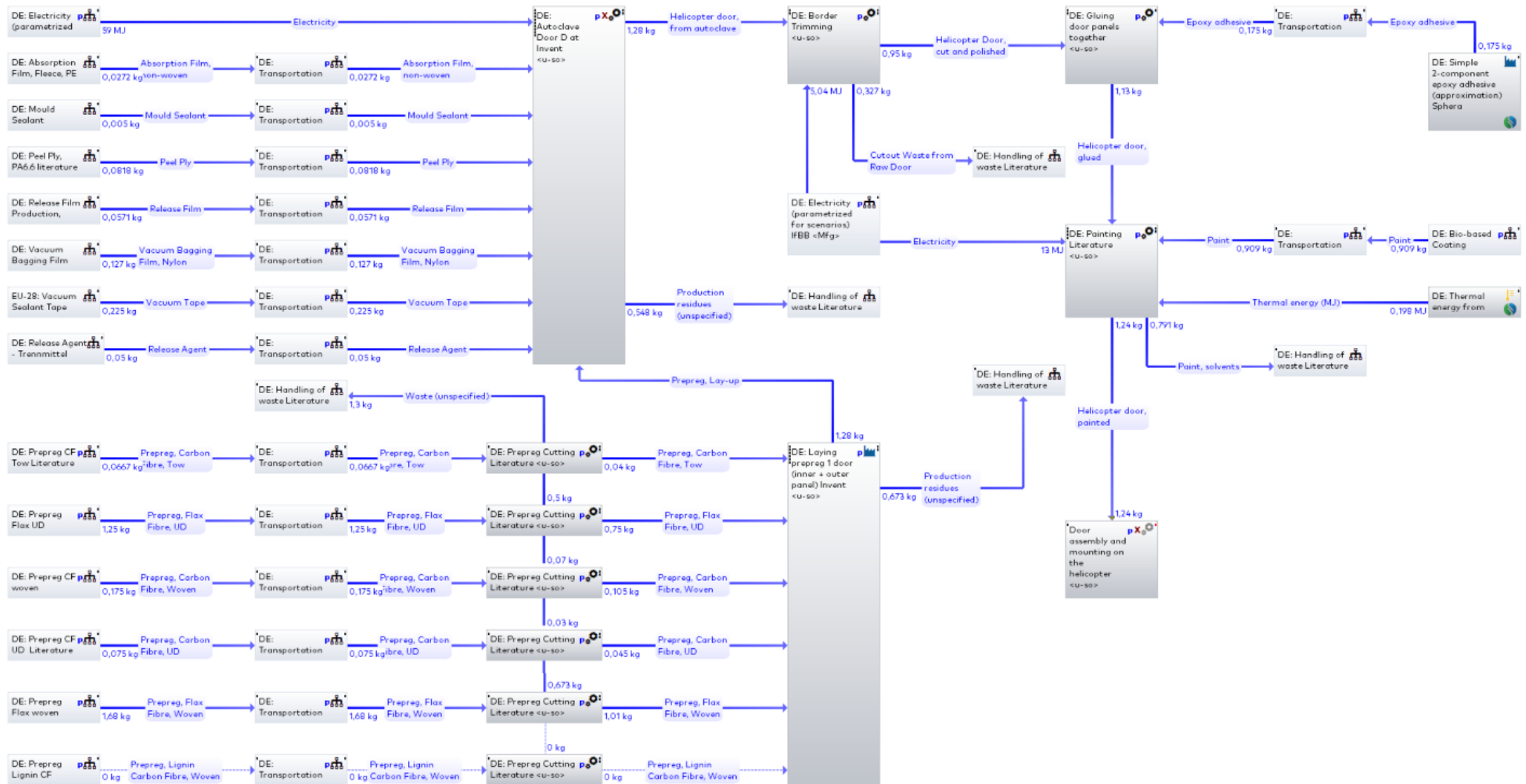


Abbildung 47 LCI-Systemdiagramm: Prepreg im Autoklavenverfahren

Lackierung und Beschichtung

Dieser Prozess beschreibt das Beschichtungsverfahren, bei dem die Tür lackiert und beschichtet wird, um sie für den Einbau in den Hubschrauber vorzubereiten. Es wird der in AP 1.3 ausgewählte, teilweise biobasierte 2K-Lack (Lack L9) auf Polyurethanbasis verwendet. Die Menge der Stoffströme wird anhand der Masse der Lackdosen vor und nach der Beschichtung geschätzt. Da es sich bei der 2K-Beschichtung um ein Beschichtungssystem auf Wasserbasis handelt, werden keine Lösungsmittel verwendet. Das Beschichtungssystem wird mit destilliertem Wasser auf 90-95 Gew.-% verdünnt. Dies ist von der Modellierung ausgenommen. Die während des Prozesses anfallenden Abfälle werden auf Basis der verbrauchten Lackmenge und der Differenz zwischen der Masse der Tür vor und nach der Beschichtung geschätzt. Zur Aushärtung der Beschichtung auf der Tür wird Erdgas für die Heizung verwendet. Die gemessenen Werte für den stündlichen Erdgasverbrauch stammen von der Fa. Lack Plus GmbH, bei der die Beschichtung durchgeführt wurde. Die Aushärtezeit wurde aus dem technischen Datenblatt des Lacks ermittelt, dass vom Hersteller Weilburger Coatings GmbH zur Verfügung gestellt wird. Der Stromverbrauch während des Beschichtungs Vorgangs wurde nicht berücksichtigt, da derzeit keine Daten vorliegen. Der Energieverbrauch bei der Vorbereitung des Lacks und dem Auftragen von Base- und Topcoat ergibt sich aus (Rivera und Reyes-Carrillo 2016a). Die organischen Emissionen in die Luft (NMVOC - non-methane volatile organic compound emissions) während der Lackierprozesse werden auf der Grundlage des vom European Environment Agency veröffentlichten Berichts über Beschichtungen auf 10% der erzeugten Lackabfallmenge geschätzt (Kuenen und Trozzi 2019).

Montage der Tür

Dieser Prozess beschreibt die Montage der Tür am Hubschrauber. Da es sich um eine manuelle Tätigkeit handelt, sind keine Energieflüsse erforderlich. Die Polymethylmethacrylate (PMMA) Folie zur Abdeckung des Fensters und das Befestigungsmaterial zur Montage der Tür am Hubschrauber wurden explizit von dieser Ökobilanz ausgeschlossen, da das Ziel die Quantifizierung der Auswirkungen der Tür aus biobasierten Materialien ist.

Nutzungsphase

Die Nutzungsphase des Helikopters, wie in Abbildung 48 dargestellt, wird auf Basis von Ökobilanzen für den Luftverkehr modelliert, die von namhaften Institutionen wie der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) AG, dem Bundesamt für Energie (BFE), dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), und der Swisscom AG in Auftrag gegeben wurden (Frischnecht und Messmer 2016). Dieses Inventar berücksichtigt den Treibstoffverbrauch und die Emissionen während des Reisefluges sowie der Lande- und Startphase separat. Es entspricht einem einmotorigen Helikopter.

Use Phase - Helicopter p

Process planReference quantities
The names of the basic processes are shown.



Abbildung 48 LCI-Systemdiagramm: Nutzungsphase

Die Treibstoffverbräuche und Emissionen der Hubschraubertür werden mithilfe eines massenbasierten Allokationsansatzes (Ribeiro et al. 2007) zugewiesen, da die Umweltauswirkungen während der Nutzungsphase von erheblichem Interesse sind.

$$C_{\text{door}} = C_{\text{helicopter}} \times (M_{\text{door}} / M_{\text{helicopter}}) \times C \quad (1)$$

C_{door} = Zuteilungsfaktor für Kraftstoffverbrauch und Emissionen für die Tür

$C_{\text{helicopter}}$ = Treibstoffverbrauchs- und Emissionsfaktor für den Helikopter

M_{door} = Masse der Hubschraubertür

$M_{\text{helicopter}}$ = Masse des Hubschraubers (ohne Passagier(e) und/oder Gepäck)

C = dimensionslose Konstante zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs

Der hier verwendete massebasierte Zuteilungsansatz wurde für die Zuteilung des Treibstoffverbrauchs bei Autos veröffentlicht. Der Ansatz ist allgemein anwendbar und wurde hier genutzt, um die Modellierung zu vereinfachen und die Ergebnisse besser vergleichbar zu machen. Ein ähnliches Konzept der massenbasierten Allokation wurde auch für die Integration von Ökobilanzen in die Konzeption des Lufttransports diskutiert (Johanning A und Scholz D. 2013).

Abfall Verwertung: End-of-Life

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur End-of-Life-Behandlung von thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen, einschließlich Recycling und Downcycling (Bledzki et al. 2021). Im Gegensatz dazu sind die Möglichkeiten zur End-of-Life-Behandlung von duroplastischen Faserverbundwerkstoffen begrenzt. Die End-of-Life-Behandlung von duroplastischen Faserverbundwerkstoffen bietet verschiedene Optionen, wie zum Beispiel thermisches Downcycling, chemisches Downcycling und mechanisches Downcycling (Morici und Dintcheva 2022). Allerdings ist die Verbrennung der gängigste Weg (Krauklis et al. 2021). Die wichtigsten End-of-Life-Pfade sind:

1. Kommerzielle Verbrennung ohne Gutschriften für die energetische Verwertung,
2. Gewerbliche Verbrennung mit Gutschriften für die energetische Verwertung
3. Mülldeponie.

Gemäß der Abbildung 27 wurden die drei Möglichkeiten zur End-of-Life-Behandlung der Hubschraubertür modelliert.

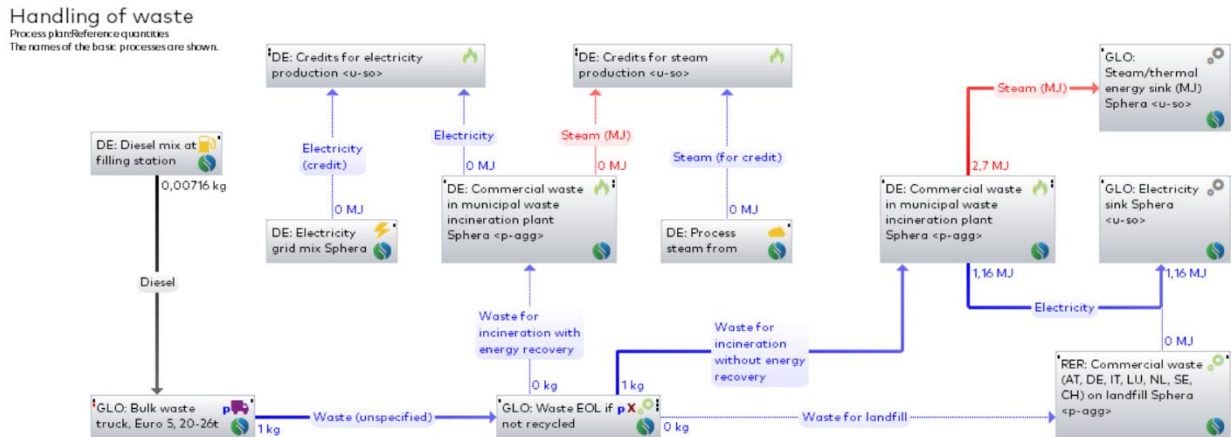


Abbildung 49 LCI-Systemdiagramm: End-of-life und Abfallbehandlung

Stromversorgung: einschließlich für Zukunftsszenarien

In der gesamten Ökobilanz wurde der Strommix, der dem Verbraucher zugrunde liegt, als Stromlieferant in der Produktionsphase verwendet. Da Elektrizität einer der Hauptverursacher von Umweltauswirkungen während der Produktionsphase ist, sind verschiedene Optionen simuliert worden, um zu verstehen, wie sich diese Auswirkungen ändern, wenn während der Produktionsphase verschiedene Strommixe verwendet werden, wie in Abbildung 50 dargestellt.

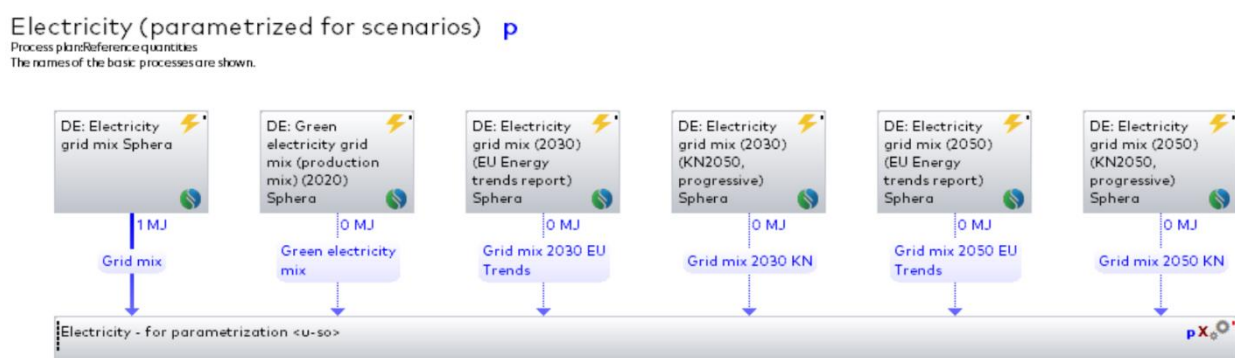


Abbildung 50 LCI-Systemdiagramm: Parametrisierte Strom

Folgende Strommixe werden für die Region Deutschland untersucht:

1. Standardnetzmix und Ökostrommix
2. EU 2030 und 2050 Prognosestrommix (European Commission et al. 2021)

3. Klimaneutrales Deutschland 2030 und 2050 Strommix (Prognos AG et al. 2020)

Transport – einschließlich für Zukunftsszenarien

Die Transportentfernung für jedes Material kann an dieser Stelle nicht genau bestimmt werden. Jedoch wurde in dieser Ökobilanz für jeden Transportschritt eine durchschnittliche Entfernung von 270 km angenommen, basierend auf einem Mix aus Euro 0-6 Dieselfahrzeugen (Statistisches Bundesamt 2022). Um den Beitrag zu den Umweltauswirkungen weiter zu untersuchen, wurden weitere Transportmethoden und -entfernungen modelliert, wie in Abbildung 51 dargestellt:

Transportation (parametrized for scenarios) **P**
Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

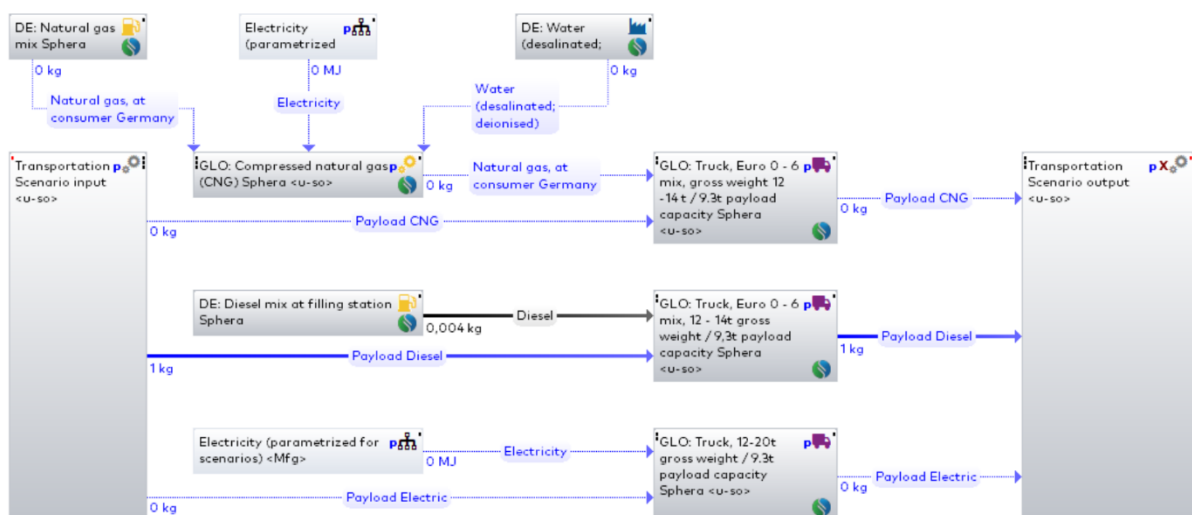


Abbildung 51 LCI-Systemdiagramm: Parametrisierter Transport

Der Transport mit Diesel-, CNG- und Elektro-LKWs für verschiedene Entfernungen, die von durchschnittlichen Transportentfernungen bis zum Worst-Case-Szenario reichen, wird untersucht und die Ergebnisse werden im Interpretationsteil diskutiert.

Materialien

Da die LCI-Daten der meisten Materialien, die im Produktsystem innerhalb des Vordergrundsystems verwendet werden, weder in der Sphera MLC- noch in der ecoinvent v3.8-Datenbank verfügbar sind, wurde die Herstellung jedes Materials ebenfalls als Prozesseinheit modelliert. Die Stoffstromanalysen basieren auf technischen Datenblättern und Expertenrat, soweit verfügbar, und werden bei Bedarf durch Daten aus Hintergrund-LCI-Datenbanken und Literatur ergänzt. Die Energieflussanalyse basiert auf Industriedaten und wird gegebenenfalls durch Daten aus Hintergrund-LCI-Datenbanken und der Literatur ergänzt. Jeder erstellte Einheitsprozess wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Prepreg Materialien

Die Projektpartner der TUC stellen die technischen Datenblätter für die Kohlefaser-Prepregs bereit, während die Projektpartner der TUM und TUC die technischen Datenblätter für die Flachsfasern-Prepregs zur Verfügung stellen. Alle Prepregs verwenden ein teilweise biobasiertes Epoxidharzsystem für die Imprägnierung. Dieses Harzsystem wurde separat als Einheitsprozess modelliert, da es in den Hintergrund-Datenbanken nicht als LCI-Prozess verfügbar ist. Viele Prepreg-Hersteller wurden kontaktiert, um LCA/LCIA-Daten für die Prepreg-Herstellung zu erhalten; die Liste dieser Hersteller ist im Anhang 17.2 zu finden. Es wurden jedoch noch keine Primärdaten zur Verfügung gestellt. Die Energieflussanalysen basieren auf den von (Suzuki und Takahashi 2005) veröffentlichten Werten zur Herstellung von Prepreg-Materialien. Diese Studie ist eine führende Arbeit auf dem Gebiet der Energieflussanalyse von Prepreg-Materialien und wurde bereits über 200 Mal zitiert, unter anderem in den Berichten des United States Department of Energy (US DOE 2017). Die Daten zu den Prozessanforderungen für die Herstellung von Prepregs werden auf der Grundlage dieser Literatur modelliert. Die Prepregs werden anhand ihrer technischen Datenblätter modelliert, welche von den Projektpartnern an der TUM erhalten wurden. Die Fasern in Prepreg werden durch Mikropolyesterfäden zusammengehalten. Die Menge der Mikropolyesterfäden konnte jedoch nicht gemessen werden und wurde daher von der Modellierung ausgeschlossen. Die Mengen an beschichtetem Trägerpapier und Trennfolie für alle Prepregs wurden während der Herstellung der Tür bei der Fa. Invent GmbH gemessen. Im Folgenden wird eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Prepreg-Herstellungsprozesse gegeben.

Flachsfaser unidirektional

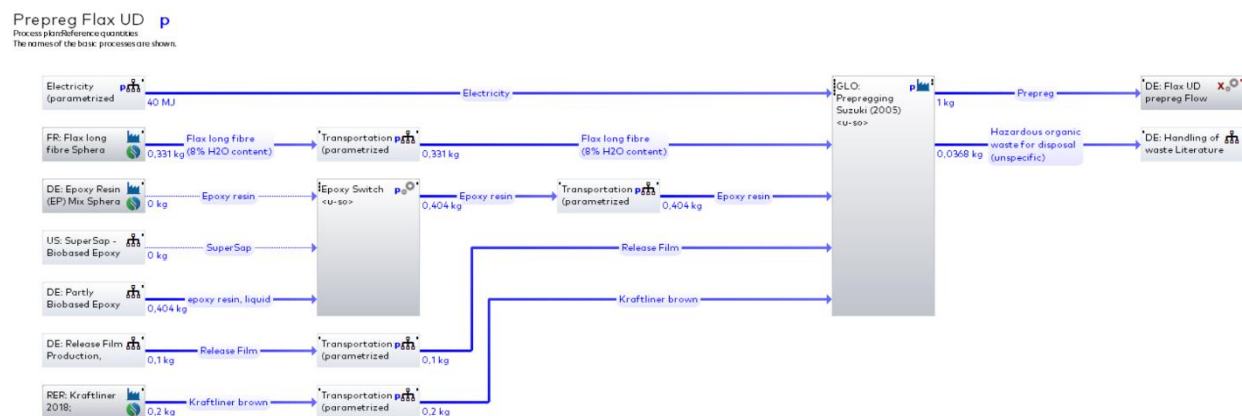


Abbildung 52 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung UD Flachsfaser Prepreg

Die UD Flachsfaser Prepreg, wie in Abbildung 52 dargestellt, bezieht sich auf Fibreg N 120 UD EP4.5S Bio 55 70 (Fibreg 2023). Es handelt sich dabei um ein Prepreg, das aus einem unidirektionalen EU-Flachs-Naturfasergewebe mit einem Flächengewicht von 120 g/m² als Verstärkungsmaterial und einem biobasierten Epoxidharz mit einer Dichte von 1,23 g/cm³ zur

Imprägnierung hergestellt wird. Das Prepregmaterial hat bei einem Harzanteil von 55 % ein rechnerisches Flächengewicht von 300 g/m².

Flachsfaser bidirektional

Prepreg Flax woven p
Process plant reference quantities
The names of the base processes are shown.

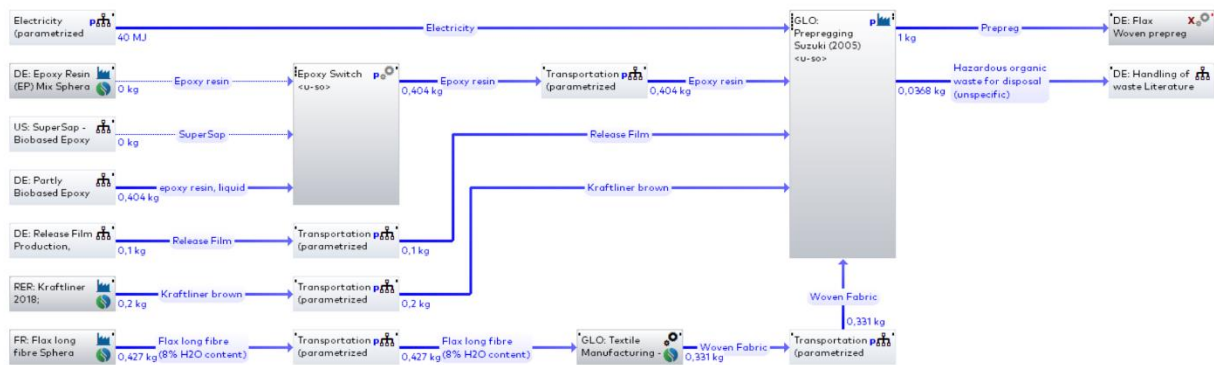


Abbildung 53 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung BD Flachsfaser Prepreg

Die BD bzw. gewebten Flachsfaser-Prepreg, wie in Abbildung 53 dargestellt, bezieht sich auf Fibregreg N 200 T EP4.5S Bio 55 100 (Fibregreg 2022). Es handelt sich dabei um ein Prepreg, das aus einem BD (gewebten) EU-Flachs-Naturfasergewebe mit einem Flächengewicht von 200 g/m² als Verstärkungsmaterial und einem biobasierten Epoxidharz mit einer Dichte von 1,23 g/cm³ zur Imprägnierung hergestellt wird. Das Prepregmaterial hat bei einem Harzanteil von 55% ein rechnerisches Flächengewicht von 383 g/m².

Carbonfaser unidirektional

Prepreg CF UD p
Process plant reference quantities
The names of the base processes are shown.

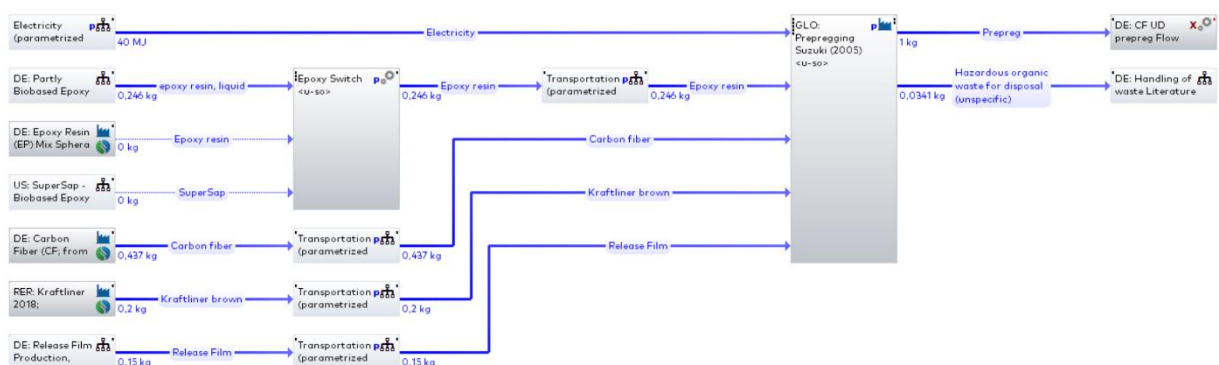


Abbildung 54 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung UD CF Prepreg

Die UD CF Prepreg, wie in Abbildung 54 dargestellt, bezieht sich auf die Kohlenstofffaser Zoltek Panex 35 Tow (50K) mit einem Flächengewicht von 150 g/m² als Verstärkungsmaterial und ein

modifiziertes BX Epoxy (modifiziertes biobasiertes Epoxysystem) mit einer Dichte von $1,81 \text{ g/cm}^3$ als Harz zur Imprägnierung (Unipreg GmbH). Das Prepreg-Material hat bei einem Harzanteil von 36% ein spezifiziertes Flächengewicht von 234 g/m^2 .

Carbonfaser bidirektional

Prepreg CF woven **p**
Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

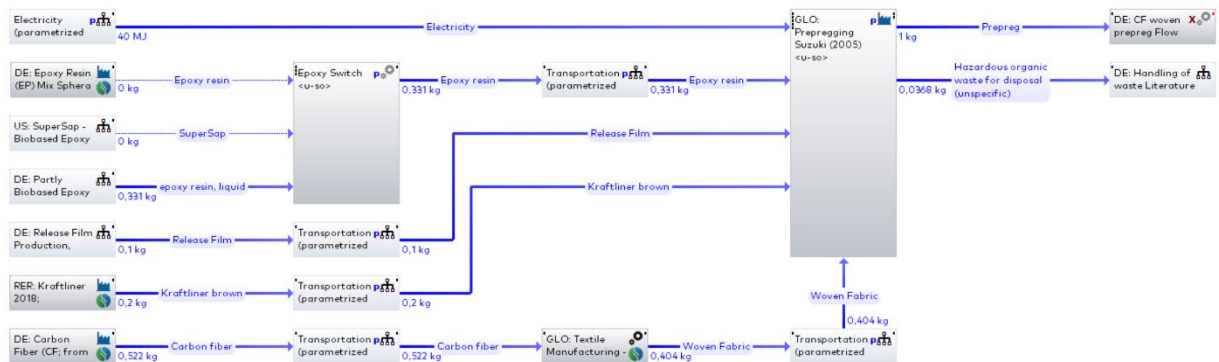


Abbildung 55 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung BD CF Prepreg

Die BD CF Prepreg, wie in Abbildung 55 dargestellt, bezieht sich auf die Kohlefaser Krempel BX45IMP530R45 50K mit einem Flächengewicht von 300 g/m^2 als Verstärkungsmaterial und ein modifiziertes BX Epoxy (biobasiertes Epoxidsystem) mit einer Dichte von $1,81 \text{ g/cm}^3$ zum Einsatz kommt (Krempel 2023). Das Prepregmaterial hat bei einem Harzanteil von 45% ein rechnerisches Flächengewicht von 450 g/m^2 .

Carbonfaser towpreg

Prepreg CF Tow **p**
Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

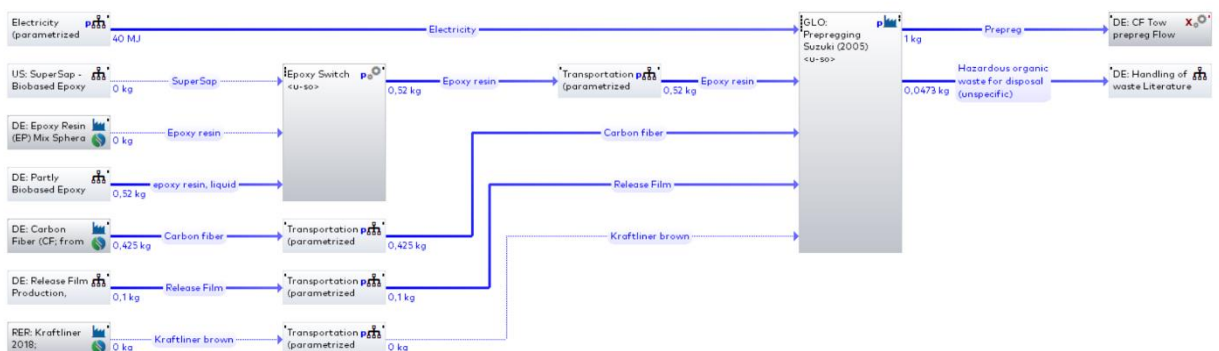


Abbildung 56 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung CF Towpreg Prepreg

Die Carbonfaser Towpreg (Rovings) Prepreg, wie in Abbildung 56 dargestellt, bezieht sich auf Carbonfaser-Tow 24k t700 der Firma Langer & Ritter mit einem spezifizierten Flächengewicht

von 300 g/m² als Verstärkungsmaterial und einem modifizierten BX Epoxy (biobasiertes Epoxidsystem) mit einer Dichte von 1,81 g/cm³ als Harz zur Imprägnierung. Das Prepreg-Material hat ein rechnerisches Flächengewicht von 450 g/m² und einen Harzanteil von 55%.

Lignin-basiertes Carbonfaser Prepreg

Prepreg Lignin CF woven p

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

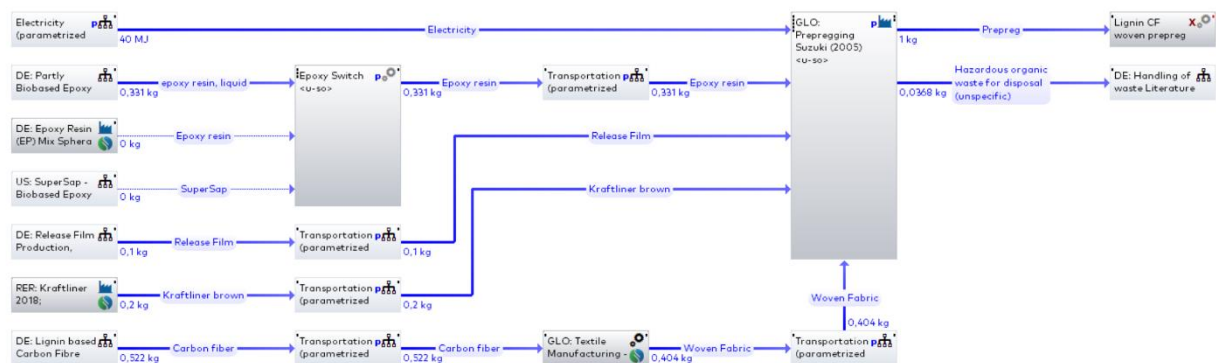


Abbildung 57 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Lignin-basierte CF Prepreg

Als Zukunftsszenario wurden auch ligninbasierte Kohlenstofffaser-Prepregs, wie in Abbildung 57 dargestellt, auf basis BD CF Prepreg modelliert. Die LCI-Daten für Kohlenstofffasern auf Ligninbasis wurden den in (Janssen et al. 2019) veröffentlichten LCIA-Ergebnissen entnommen. Ligninbasierte Kohlenstofffasern haben das Potenzial, herkömmliche Kohlenstofffasern in Zukunft zu ersetzen. Im Vergleich zu diesen weisen sie sehr geringe Umweltauswirkungen auf, insbesondere hinsichtlich des Klimawandels.

Harzsysteme

Die Daten zu den spezifischen Epoxidsystemen, die in den verwendeten Prepregs eingesetzt wurden, sind nicht öffentlich zugänglich. Trotz mehrfacher Versuche, die Hersteller dieser Epoxidsysteme über einen längeren Zeitraum zu kontaktieren, wurde keine Antwort erhalten. Um das Ziel des Projekts zu erreichen, wurde das biobasierte Epoxidsystem mithilfe von Literaturdaten, Daten aus der LCI-Datenbank und Daten von anderen Grundchemikalienherstellern modelliert. Das Modell dient der Quantifizierung der Kohlenstoffspeicherung durch die Verwendung biobasierter Materialien.

Teilbiobasierte Harzsysteme

Der am häufigsten verwendete Herstellungsweg für Epoxidharze besteht darin, Epichlorhydrin und Bisphenol A als Rohstoffe zu verwenden (Pham und Marks 2003). Bei teilweise biobasierten Epoxidsystemen wird der aus fossilen Rohstoffen gewonnene Epichlorhydrin durch ein vollständig oder teilweise biobasiertes Bisphenol A ersetzt. Zur Modellierung der

biobasierten Epoxidsysteme wurden zunächst alle großen Hersteller von biobasierten Epoxidsystemen kontaktiert, um die Verfügbarkeit von LCI-/LCA-/Prozessumwandlungsdaten für die Produktion von biobasierten Epoxidsystemen zu erfragen. Eine Liste der kontaktierten Hersteller befindet sich im Anhang 17.3. Die einzige positive Antwort kam von Epinity Chemicals, ein Tochterunternehmen von AGC Vinythai Public Company Limited in Thailand. Epinity Chemicals ist einer der größten Hersteller von vollständig biobasiertem Epichlorhydrin (AGC Chemicals Europe 2021) und erklärte sich bereit, die LCI-Daten über die Produktion ihres vollständig biobasierten Epichlorhydrins zu teilen, nachdem eine Geheimhaltungsvereinbarung zu Datenschutz Zwecken unterzeichnet worden war. Im nächsten Abschnitt wird die Herstellung von biobasiertem Epichlorhydrin beschrieben.

Partly Biobased Epoxy from 100% bio-based Epichlorohydrin and BPA
Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

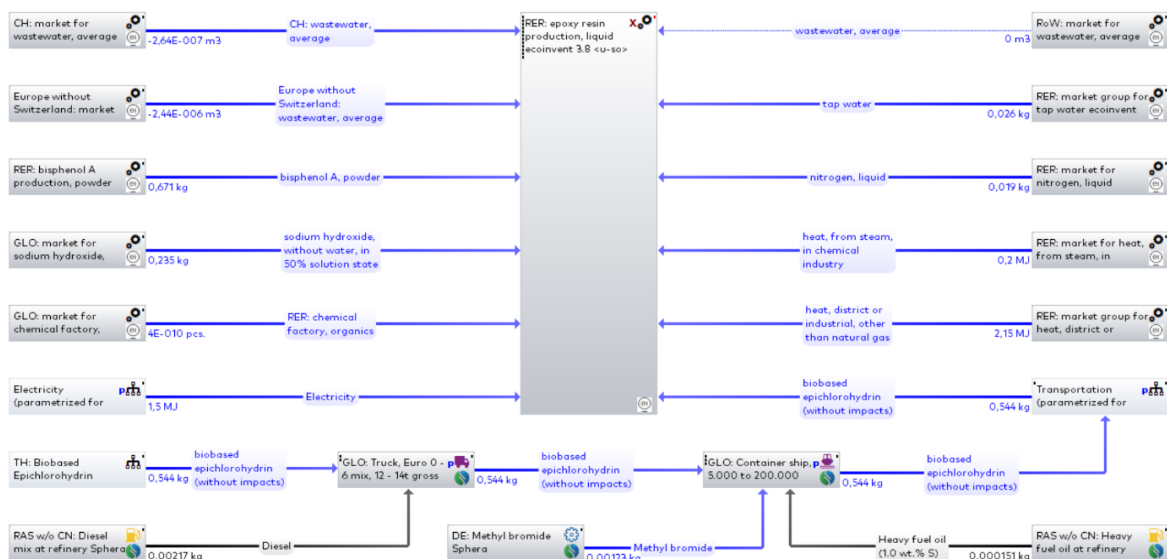


Abbildung 58 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Teil bio-basierte Harzsystem

Das teilweise biobasierte Epoxidharzsystem wurde modelliert, indem der Standardprozess von ecoinvent v3.8 für die Herstellung von Epoxidharzsystemen auf fossiler Basis modifiziert wurde, wie in Abbildung 58 dargestellt. Dabei wurde das Epichlorhydrin auf fossiler Basis, durch die von Fa. Epinity Chemicals bereitgestellten LCI-Daten für vollständig biobasiertes Epichlorhydrin ersetzt. Auch der Transport des biobasierten Epichlorhydrins von Thailand nach Deutschland wurde berücksichtigt. Die Transportmethoden und -entfernungen wurden auf Basis der Angaben von Fa. Epinity Chemicals zu ihren durchschnittlichen Lieferwegen von Thailand nach Europa modelliert.

Biobasiertes Epichlorhydrin

Die Fa. Epinity Chemicals hat die LCI-Daten für die Produktion des zu 100 % biobasierten Drop-in-Epichlorhydrins bereitgestellt. Die LCIA-Ergebnisse können aufgrund des unterzeichneten

Geheimhaltungsvertrags nicht veröffentlicht werden, weshalb sie hier nicht aufgeführt sind. Das Epichlorhydrin wird jedoch aus 100% biobasiertem Glycerin hergestellt, das aus Pflanzenöl gewonnen wird. Die Ökobilanz bezieht sich auf das geografische Gebiet Map Ta Phut in Thailand. Sie wurde von ThinkStep Sustainability Solutions Private Limited Indien (einem Sphera-Unternehmen) durchgeführt. Die Ökobilanz entspricht (DIN ISO 14040; DIN ISO 14044) und wurde von der Dekra Assurance Services GmbH kritisch geprüft.

Handelsübliches Harzsystem (Fossil-basiert)

Die Daten für ein generisches Epoxidharzsystem wurden unverändert aus der Sphera LCA FE-Datenbank übernommen. Die Daten beschreiben den allgemeinen Produktionsmix für in Deutschland hergestellte Epoxidharzsysteme.

Beschichtungssystem

Das Beschichtungssystem ist ein wichtiger Bestandteil der Türherstellung. Der Fokus liegt darauf, ein teilweise biobasiertes Lack- und Beschichtungssystem zu finden, das für Luftfahrtanwendungen geeignet ist. Es gibt jedoch kaum öffentlich zugängliche LCI-/LCA-Daten zur Herstellung von voll- oder teilbiobasierten Lack- und Beschichtungssystemen. Da der Schwerpunkt der Ökobilanz auf der Bewertung der Speicherung von biogenem Kohlenstoff durch die Verwendung von biobasierten Materialien liegt, ist es wichtig, genaue LCI-Daten für biobasierte Materialien zu haben. Aus diesem Grund wurden mehrere Hersteller von biobasierten Beschichtungen und Lacken kontaktiert, jedoch gab es kaum eine Antwort. Der einzige Hersteller, der geantwortet hat, war die Fa. Weilburger Coatings GmbH. Sie sind auch der eigentliche Hersteller des biobasierten Beschichtungssystems (Lack L9), das in AP 1.3 als geeignet für Luftfahrtanwendungen eingestuft wurde. Sie erklärten sich bereit, uns die Stoffstromanalysen nach Unterzeichnung einer Geheimhaltungsvereinbarung zur Verfügung zu stellen. Obwohl sie sich bereit erklärt haben, die Energieflussanalysen mitzuteilen, liegen diese Daten noch nicht vor.

Biobasiertes 2K Lacksystem

2K PU based Paint System

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

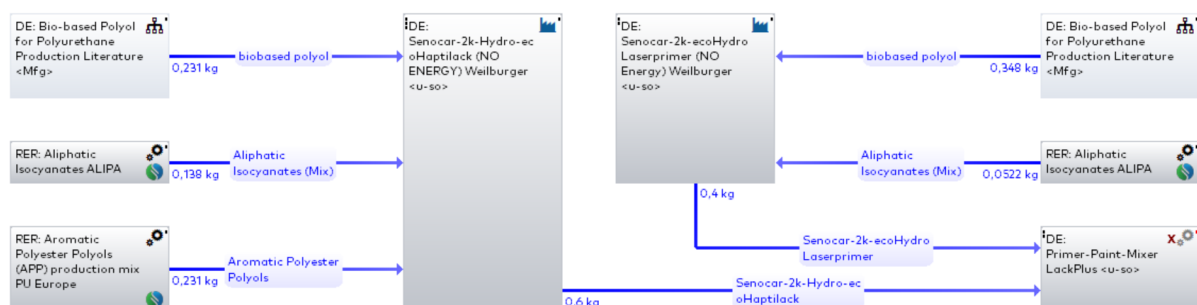


Abbildung 59 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung teil-biobasierte 2K Lacksystem

Das biobasierte Lacksystem, das in AP 1.3 als für die Luftfahrt geeignet eingestuft wird, ist ein 2-Komponenten-Lacksystem auf Polyurethanbasis. Es besteht aus einer Grundierung und einem biobasierten aliphatischen Isocyanat als zweite Komponente (Härter). Die LCI-Daten für ähnliche Materialien wie die in den technischen Datenblättern genannten werden verwendet, wie in Abbildung 59 dargestellt, da die von der Weilburger Coatings GmbH zur Verfügung gestellten Daten unvollständig sind. Nach Absprache mit den Experten von Weilburger Coatings wurde festgestellt, dass die verwendeten Datensätze, die in den biobasierten Beschichtungen enthaltenen Ausgangsstoffe gut repräsentieren.

Handelsübliche biobasierte Lacksysteme

Bio-based Coating

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

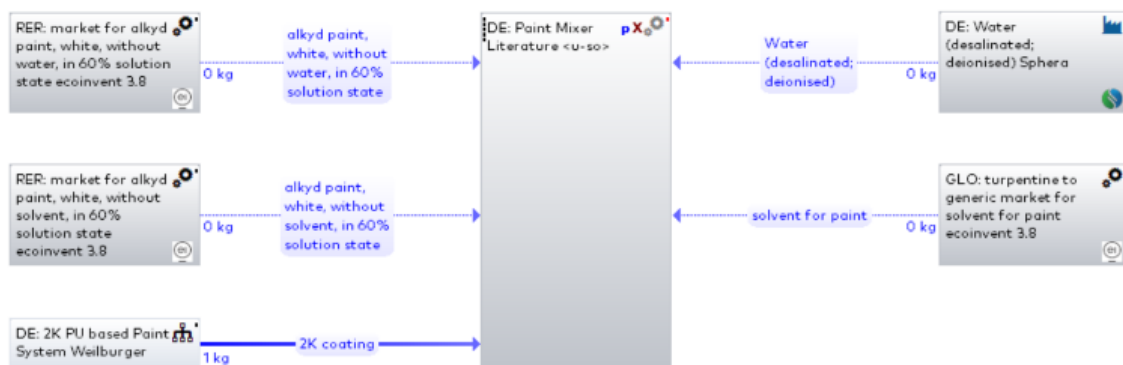


Abbildung 60 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung handelsüblicher Lacksysteme

Die LCI-Daten zur Herstellung von generischen, biobasierten Farben und Beschichtungssystemen stammen aus der ecoinvent-Datenbank v3.8, wie in Abbildung 60 dargestellt. In der Datenbank sind zwei Farbsysteme auf Alkydharzbasis, eines auf Wasserbasis und eines auf Lösungsmittelbasis enthalten. Das Verfahren beschreibt die Gewinnung von Alkydharz unter Verwendung von Sojabohnenöl als Fettsäure, Phthalsäure Anhydrid als Polybasic-Säure und Pentaeritritol als Polyol. Dies ist der am häufigsten verwendeter Weg zur Herstellung von Farben und Beschichtungssystemen auf Alkydbasis.

Handelsübliche Lacksysteme (Fossil-basierte)

Die LCI-Daten für die Herstellung von allgemeinen Farben und Beschichtungssystemen auf Basis fossiler Lösungsmittel stammen aus der Sphera MLC-Datenbank.

Verbrauchsmaterialien

Die Verbrauchsmaterialien wurden auf Basis einer Kombination aus Expertenrat und den verfügbaren technischen Datenblättern modelliert. Die Materialien und technischen Spezifikationen aller Verbrauchsmaterialien sind mit den im Handel erhältlichen Produkten vergleichbar. Im Folgenden werden die Modelle für die Herstellung jedes dieser Prozessverbrauchsstoffe ausführlich beschrieben:

Vakuumfolie

Die Vakuumfolie, wie in Abbildung 61 dargestellt, wurde auf Basis der Material- und Sicherheitsdatenblätter, die von den Projektpartnern der TUM zur Verfügung gestellt wurden, modelliert (Richmond Aircraft Products). Nylon (Polyamid 6) wird bei der Herstellung der Vakuumfolie in Kunststofffolienproduktionsprozessen verwendet (Abdel-Bary 2003). Die LCI-Daten für Polyamid 6 sowie die Prozessdaten für die Kunststofffolienproduktion (Extrusion und Kalandrieren) wurden aus dem Sphera MLC entnommen. Das technische Datenblatt der Vakuumsackfolie gibt eine Ausbeute von 11,6 m²/kg an, was einem Flächengewicht von 86,2 g/m² entspricht.

Vacuum Bagging Film Production, PA6.6

Process placeholder: processes
The names of the basic processes are shown.

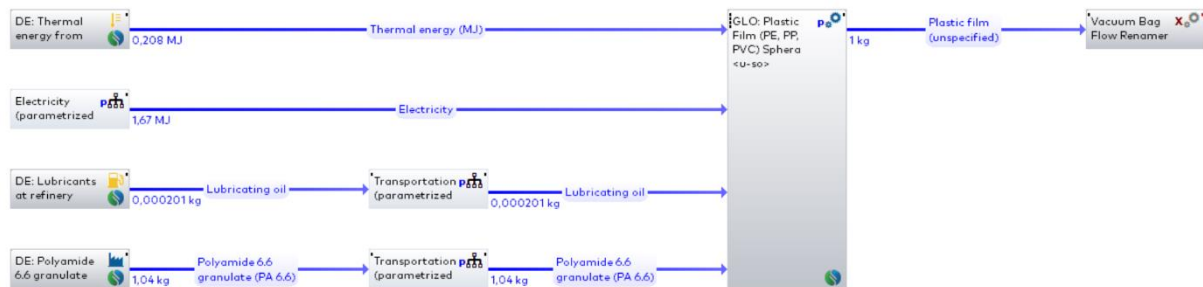


Abbildung 61 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Vakuumfolie

Trennfolie

Die Trennfolie, wie in Abbildung 62 dargestellt, wurde auf Basis der Material- und Sicherheitsdatenblätter, die von den Projektpartnern an der TUM erhalten wurden, modelliert (Richmond Aircraft Products). Sie besteht aus Hoch-Dichte-Polyethylen (HDPE) und wird im Rahmen von Kunststofffolienproduktionsprozessen hergestellt (Abdel-Bary 2003). Die LCI-Daten für HDPE sowie die Prozessdaten für die Kunststofffolienproduktion (Extrusion und Kalandrieren) wurden aus dem Sphera MLC entnommen (Abdel-Bary 2003). Das technische Datenblatt gibt an, dass das Flächengewicht 71,5 g/m² beträgt und der Ertrag 28,38 m²/kg beträgt.

Release Film Production, HDPE

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

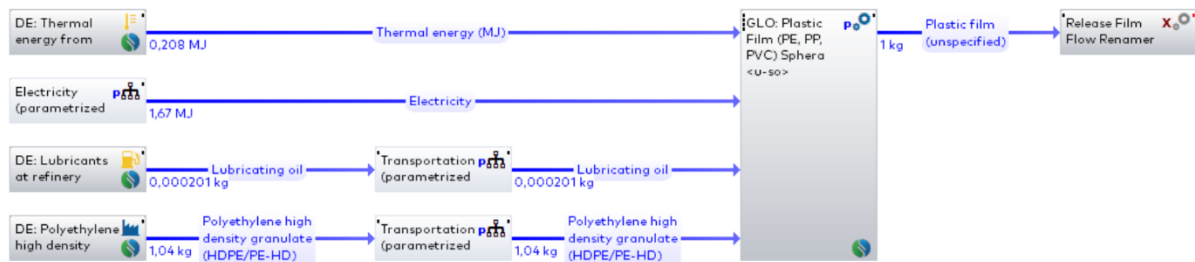


Abbildung 62 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Trennfolie

Saugvlies

Die Modellierung des Absorptionsvlieses, wie in Abbildung 63 dargestellt, basiert auf den Sicherheits- und Materialdatenblättern der Projektpartner an der TUM (Richmond Aircraft Products). Das Vlies wird aus HDPE-Material hergestellt und in einem Vliesherstellungsprozess produziert (Abdel-Bary 2003). Die LCI-Daten für HDPE stammen von Sphera MLC, während die Prozessdaten für den Vliesherstellungsprozess aus der ecoinvent v3.8-Datenbank entnommen wurden. Das technische Datenblatt der Luftpolsterfolie gibt ein Flächengewicht von 240 g/m² an.

Absorption Film, Fleece, PE

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

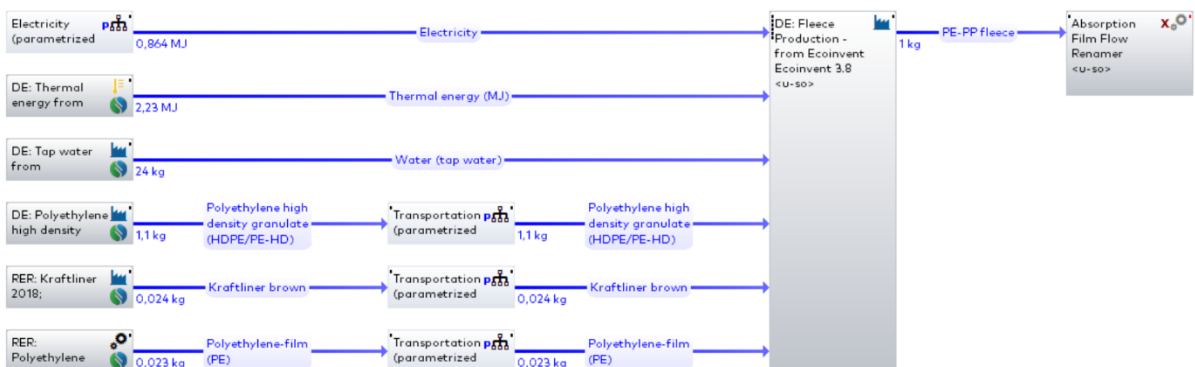


Abbildung 63 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Saugvlies

Vakuumdichtband

Die Modellierung des Vakuumdichtbandes, wie in Abbildung 64 dargestellt, basiert auf den technischen Datenblättern der Projektpartner an der TUM und auf der fachlichen Beratung durch die Fa. Invent GmbH, wo die Türen als Demonstratorbauteil hergestellt wurden (Richmond Aircraft Products). Das Vakuumdichtband wird mit einem druckempfindlichen Klebstoff hergestellt, der auf ein beschichtetes Trägerpapier extrudiert wird. Das Laufgewicht des Bandes und des Trägerpapiers wurde bei der Fa. Invent GmbH mit 50 g/m gemessen und

entsprechend modelliert (Abdel-Bary 2003). Die LCI-Daten für den Haftklebstoff stammen von Sphera MLC, während die Prozessdaten für die Extrusion und die Daten für das Trägerpapier aus der ecoinvent v3.8 Datenbank stammen. Da für das Aufbringen des Trägerpapiers auf den extrudierten Haftklebstoff keine Prozessdaten verfügbar sind, werden hier nur die Stoffströme betrachtet und die Energieeinträge auf Basis der Cut-Off-Methodik explizit ausgeschlossen.

Vacuum Sealant Tape

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.

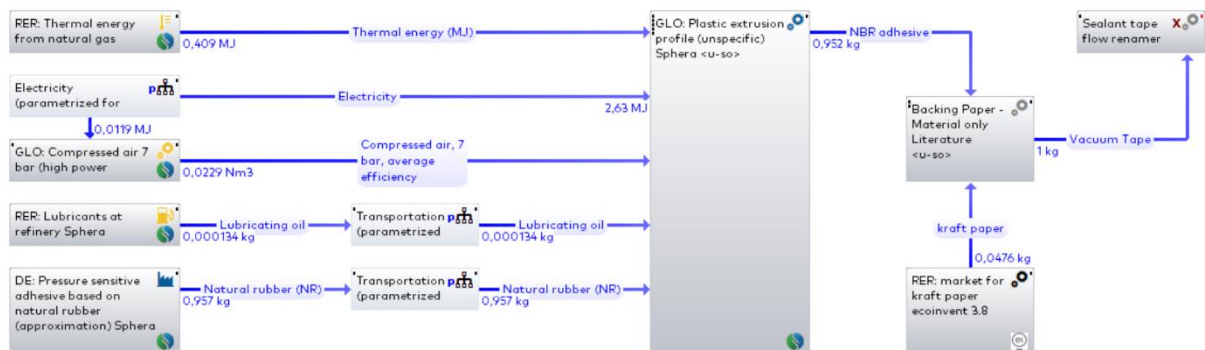


Abbildung 64 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Vakuumdichtband

Trennmittel

Das Trennmittel, wie in Abbildung 65 dargestellt, wurde anhand des Sicherheits- und Materialdatenblatts der Fa. Invent GmbH modelliert, welches Informationen zur Herstellung der Türen vom Juli 2023 enthält. Es wurden ausschließlich Materialinputs berücksichtigt, da keine Informationen zu den Prozessanforderungen für die Herstellung des Trennmittels vorliegen.

Release Agent - Trennmittel

Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.



Abbildung 65 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Trennmittel

Die Hauptbestandteile des Trennmittels sind Ethanol, 1-Propanol und andere nicht spezifizierte organische Chemikalien und Lösungsmittel. Die LCI-Daten stammen aus der

ecoinvent v3.8 Datenbank. Der Ausschluss des Prozesses und des Energiebedarfs bei der Herstellung des Trennmittels wird wie folgt begründet:

1. Die Prozessdaten zur Herstellung bestimmter Chemikalien sind in der Literatur oft nicht verfügbar.
2. Der Hersteller dieser oder ähnlicher Chemikalien hat keine Prozess- und Energiedaten für die Herstellung dieser spezifischen Chemikalie bereitgestellt.
3. Im Vergleich zu anderen Materialien und Prozessverbrauchsmaterialien wird nur eine geringe Menge des Trennmittels verwendet.

Daher wurde es als unangemessener Zeitaufwand angesehen, die Genauigkeit der Modellierung des Trennmittels zu verbessern, da die Auswirkungen auf das Produktsystem nicht eindeutig sind.

Abreißgewebe

Peel Ply, PA6.6
Process plant reference quantities
The names of the basic processes are shown.



Abbildung 66 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Abreißgewebe

Das Abreißgewebe, wie in Abbildung 66 dargestellt, wird auf Basis von Sicherheits- und Materialdatenblättern modelliert, die von den Projektpartnern an der TUM bereitgestellt werden (Precision Fabrics Group). Es handelt sich um ein gewebtes Textil aus Nylon (Polyamid 6). Die LCI-Daten für Polyamid 6 sowie die Prozessdaten für die Textilherstellung wurden von Sphera MLC bezogen. Das technische Datenblatt gibt ein Flächengewicht von 101 g/m² für das Abreißgewebe an.

Hintergrund-Datensätze

Die Hintergrunddatensätze, die für die LCI-Modellierung verwendet wurden, sind im Anhang 17.1 zu finden.

6.3.6 Wirkungsabschätzung: LCIA-Ergebnisse

LCIA-Methode

Eines der Ziele der Ökobilanz ist es, die Auswirkungen der Kohlenstoffspeicherung auf den Klimawandel zu verstehen und den Vorteil der Verwendung biobasierter Materialien im Vergleich zu konventionellen fossilbasierten Materialien zu bewerten. Die neueste Version (v4.8 2016) der Centrum voor Milieukunde (CML) LCIA-Methode wurde als relevant eingestuft, da sie die Kohlenstoffspeicherung berücksichtigt und die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Klimawandel sowohl mit als auch ohne biogenen Kohlenstoff berechnet (Leiden University 2016). Die CML v4.8 LCIA-Methode umfasst alle wichtigen

Wirkungskategorien und für jede Kategorie sind aktualisierte Charakterisierungsmodelle implementiert. Eine Liste der Wirkungskategorien, ihrer jeweiligen Charakterisierungsmodelle und der Einheiten, in denen die berechneten Ergebnisse ausgedrückt werden, ist in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14 Wirkungskategorien, Charakterisierungsmodelle, und Gesamt LCIA-Ergebnisse

Wirkungskategorie	Charakterisierungsmodell	Einheit	Cradle-to-Gate	Cradle-to-Grave
Erschöpfung abiotischer Ressourcen (Elemente)	ADP-Elemente	Kg Antimon eq.	1,00E-04	1,10E-04
Erschöpfung abiotischer Ressourcen (fossil)	ADP-fossil	Megajoule	6,41E+02	1,18E+04
Versauerung	AP	Kg Schwefeldioxid eq.	1,34E-01	1,57E+00
Eutrophierung	EP	Kg Phosphat eq.	5,42E-02	3,24E-01
Süßwasser Ökotoxizität	FAETP	Kg 1,4-Dichlorbenzol eq.	4,13E+00	8,76E+00
Klimawandel	GWP 100	Kg Kohlendioxid eq.	4,75E+01	8,70E+02
Klimawandel (Ohne Biogenen Kohlenstoff)	GWP 100	Kg Kohlendioxid eq.	4,99E+01	8,72E+02
Menschliche Ökotoxizität	HTP	Kg 1,4-Dichlorbenzol eq.	1,42E+01	8,56E+01
Meereswasser Ökotoxizität	MAETP	Kg 1,4-Dichlorbenzol eq.	9,79E+03	2,35E+04
Ozonabbau	ODP	Kg Trichlorfluormethan eq.	6,13E-04	6,13E-04
Bildung von Foto-Oxidantien	POCP	Kg Ethen eq.	5,85E-02	5,08E-01
Terrestrische Ökotoxizität	TETP	Kg 1,4-Dichlorbenzol eq.	3,41E-01	1,20E+00

LCIA-Ergebnisse

Tabelle 14 zeigt die Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse für die Hubschraubertür. Die Ergebnisse werden in Abbildung 67 in einer logarithmischen Skala zur Basis 10 dargestellt, da die absoluten Ergebnisse für verschiedene Wirkungskategorien in Größenordnungen variieren. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Auswirkungen in den meisten Kategorien von Cradle-to-Gate und Cradle-to-Grave erheblich variieren. Dies lässt darauf schließen, dass die Nutzungsphase im Vergleich zur Produktionsphase und den

Rohstoffen insgesamt dominiert. Die absoluten LCIA-Ergebnisse sind jedoch für sich genommen nur bedingt aussagekräftig. Deshalb ist es notwendig, die Phase der Lebenszyklusinterpretation zu nutzen, um die Ergebnisse im Detail zu verstehen.

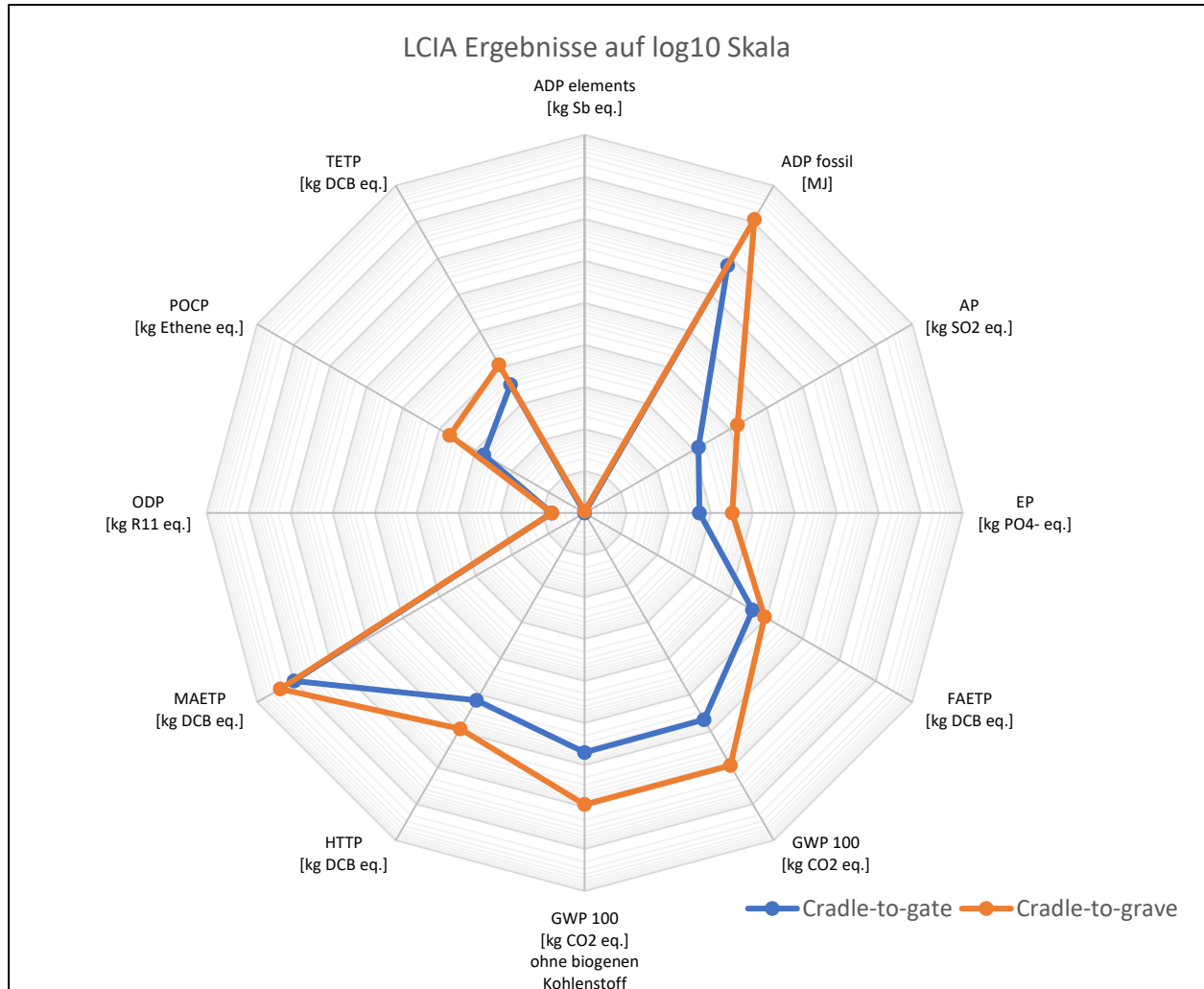


Abbildung 67 Absolute LCIA-Ergebnisse, auf logarithmischer Skala dargestellt

6.3.7 Lifecycle Interpretation

Im Abschnitt Interpretation des Lebenszyklus werden die Ergebnisse der Ökobilanz weiter analysiert, um ein besseres Verständnis der potenziellen Auswirkungen und der Faktoren, die zu diesen Auswirkungen beitragen, zu erhalten.

Beiträge zu den LCIA-Ergebnissen

Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, besteht darin, alle Einzelprozesse anhand verschiedener Parameter zu gruppieren und ihren Beitrag zu den absoluten LCIA-Ergebnissen zu analysieren. Zunächst werden die Cradle-to-Grave-Ergebnisse in die Phasen Produktion, Nutzung und End-of-Life gruppiert, um zu verstehen, welche Phase die Gesamtauswirkungen des Lebenszyklus der Hubschraubertür dominiert. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 68 dargestellt.

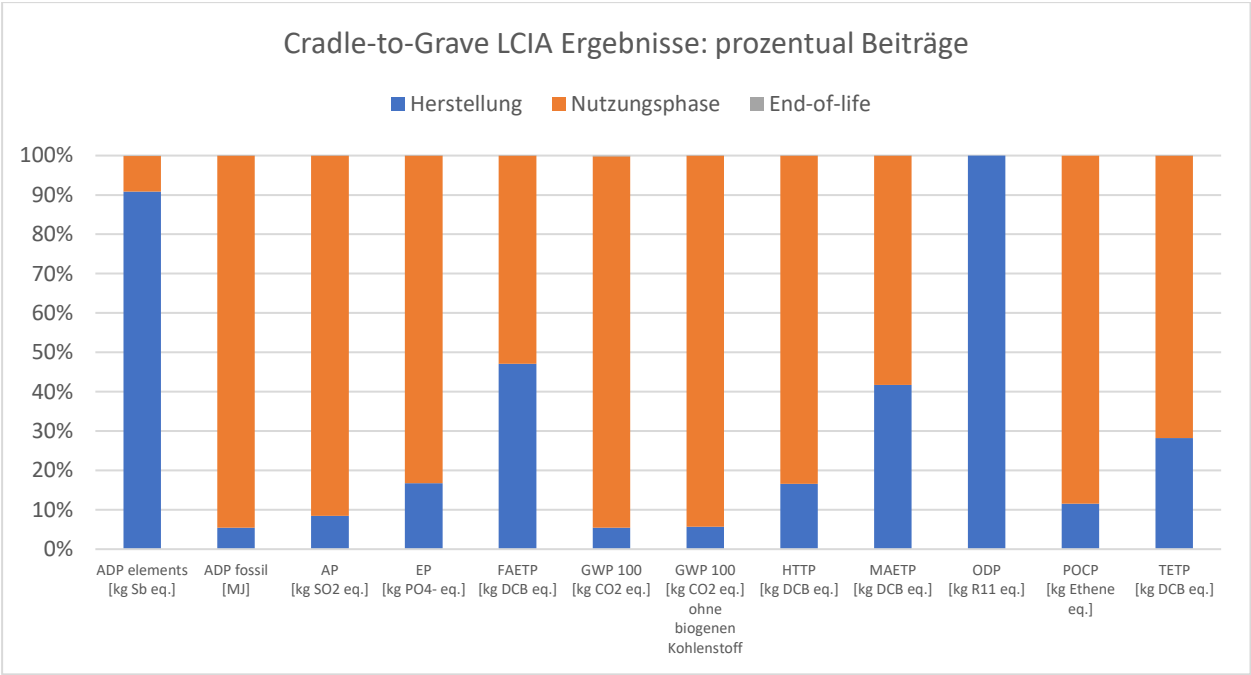


Abbildung 68 Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse: prozentuale Beiträge

Es fällt auf, dass die Nutzungsphase bei fast allen Wirkungskategorien dominiert, mit Ausnahme der Wirkungskategorien abiotischer Ressourcenabbau (Mineralien) und Ozonabbaupotenzial, bei denen die Produktionsphase dominiert. Hier zeigt sich auch, dass die End-of-Life-Phase einen sehr geringen Beitrag zu den gesamten LCIA-Ergebnissen leistet.

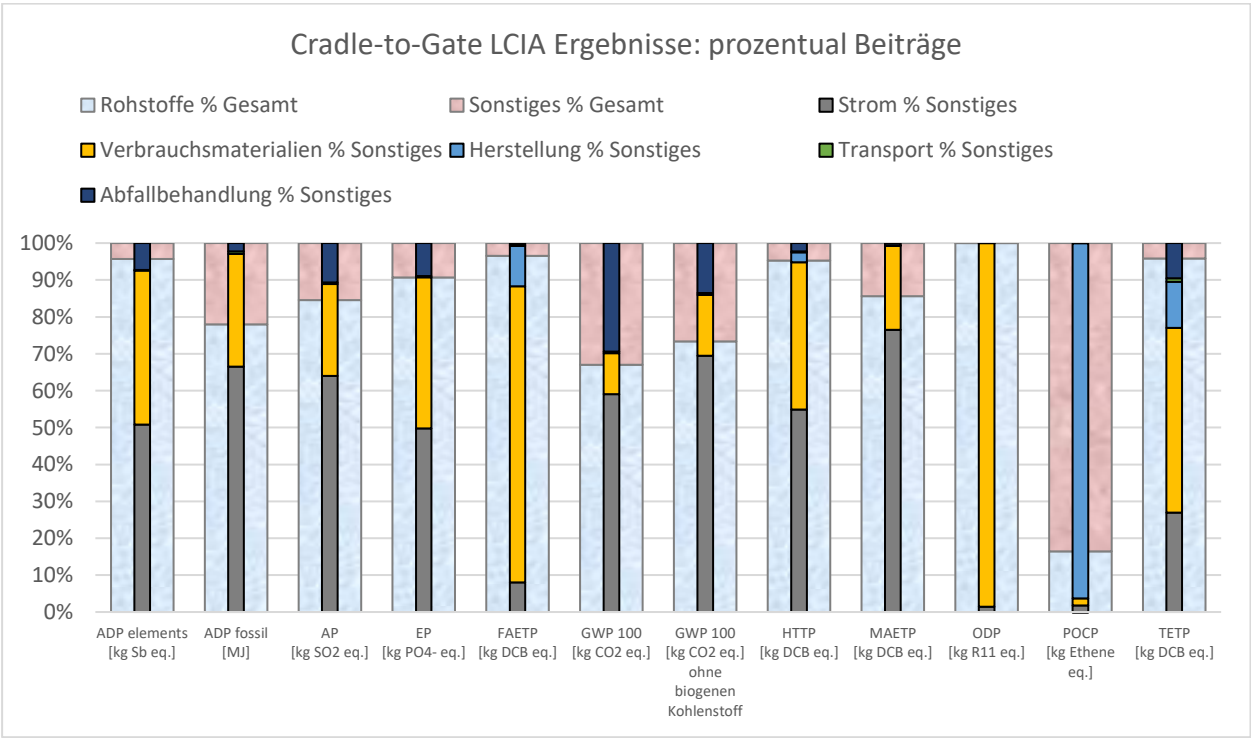


Abbildung 69 Cradle-to-Gate LCIA-Ergebnisse: prozentuale Beiträge

Da die Nutzungsphase die größten Auswirkungen hat, gefolgt von der Produktionsphase, wird die Produktionsphase in Abbildung 69 vertieft analysiert. Die einzelnen Prozesse werden zunächst in folgende Gruppen eingeteilt: Rohstoffe und Sonstige. Ihr Beitrag zu den absoluten Cradle-to-Grave-Ergebnissen wird in breiteren Spalten in hellblauer und hellrosa Farbe dargestellt. Die Ergebnisse für Sonstiges werden auf der sekundären Achse in Hundertstel skaliert und in Verbrauchsmaterialien, Herstellung, Strom, Transport und Abfallbehandlung unterteilt. Diese Beiträge zu Sonstigem sind in schmalen Spalten in Volltonfarben dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Rohstoffe für fast alle Wirkungskategorien den höchsten Beitrag zu den gesamten Cradle-to-Gate-LCIA-Ergebnissen leisten, gefolgt von Strom und Verbrauchsmaterialien. Der Beitrag von Transport und Abfallbehandlung zu den absoluten Cradle-to-Gate-LCIA-Ergebnissen ist für fast alle Wirkungskategorien hingegen relativ gering.

Szenarien Analyse

Ein Produktsystem in der Ökobilanz ist nicht dynamisch und daher auch nicht vollständig repräsentativ für die reale Welt. Szenarien helfen dabei, „Was-wäre-wenn-Fragen“ zum Produktsystem zu analysieren und Vergleiche zwischen verschiedenen Produktsystemen mit einer ähnlichen Funktionseinheit anzustellen. Dies wiederum hilft, die Ergebnisse der Ökobilanz besser zu verstehen. Die im Folgenden beschriebenen Szenarien werden mit dem Parameter-Explorer der Sphera LCA FE-Software erstellt. Für das im Abschnitt LCI beschriebene Produktsystem werden alle Einheitsprozesse mithilfe von Parametern erstellt. Diese Parameter können die Werte der Material- und Energieinputs sowie der Outputs variieren, ohne den Einheitsprozess zu verändern. Die Werte aller erforderlichen Parameter können dann mit dem Parameter-Explorer programmiert werden, um Was-wäre-wenn-Fragen zu beantworten. Die Werte sämtlicher Parameter für alle Szenariogruppen und -szenarien sind im Anhang 17.4 aufgeführt.

Szenariogruppe 1: Cradle-to-Gate: Material + Energie

In der ersten Szenariogruppe werden fünf Szenarien erstellt, um eine Hubschraubertür zu vergleichen, die aus verschiedenen Materialien und in verschiedenen Referenzzeiträumen hergestellt wurde. Jedes Szenario wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Baseline: Tür

Das Basisszenario beschreibt die Produktion der Tür, welche im Juli 2023 von der Fa. Invent GmbH hergestellt wurde, wie in Abschnitt Sachbilanz beschrieben.

Status Quo

Dieses Szenario beschreibt die bestehende Referenz-Hubschraubertür, die vollständig aus Kohlefaser-Prepregs besteht. Diese sind mit Epoxidharz auf fossiler Basis imprägniert und mit einer für Luftfahrtanwendungen geeigneten industriellen Beschichtung auf fossiler Basis

versehen. Das Gewicht der Tür wurde von den Projektpartnern an der TUM gemessen. Alle anderen Gewichte wurden auf der Grundlage der Produktionsparameter für Tür berechnet.

InteReSt-1

Dieses Szenario beschreibt die Hubschraubertür, die im Vorgängerprojekt InteReSt-1 entwickelt wurde. Die Referenztür aus dem Vorgängerprojekt ist aufgrund ihrer Geometrie leichter als die Referenztür im aktuellen Projekt. Daher werden die Materialinputs und -outputs mit den Massenverhältnissen der Referenztüren hochskaliert. Die Ein- und Ausgänge des Energieverbrauchs entsprechen den im Rahmen des InteReSt-1-Projekts gemessenen Werten.

Lignin-basierte Kohlenfaser 2030

Derzeit wird an der Herstellung vollständig biobasierter Kohlenstofffasern aus Lignin geforscht. Obwohl solches Lignin basierten Kohlenstofffasern noch nicht kommerziell verfügbar sind, wird in diesem Szenario die Herstellung der gleichen Hubschraubertür unter Verwendung von Lignin basierten Kohlenstofffaser-Prepregs, die mit biobasierten Harzen imprägniert sind, mit einem Bezugsjahr 2030 analysiert. Die Lignin basierte Kohlenstofffaser wird anhand von Literaturwerten modelliert (Janssen et al. 2019). Der Strom, der in diesem Szenario verwendet wird, entspricht der Prognose der Europäischen Union für den Stromverbrauchsmix im Jahr 2030 (European Commission et al. 2021). Die durchschnittlichen Transportentfernungen und -methoden entsprechen ebenfalls den prognostizierten Werten für das Jahr 2030.

Scenario: Serienfertigung 2050

Das Szenario optimiert alle Parameter auf Basis der Literatur, um den Material- und Energieverbrauch auf die Massenproduktion im Jahr 2050 abzustimmen. Der verwendete Strom entspricht der Prognose der Europäischen Union für den Stromverbrauchsmix im Jahr 2050 (European Commission et al. 2021). Der Prozess des Schneidens der Prepreg-Rollen in die erforderliche Geometrie wurde auf der Grundlage von (A. Chaudhary et al. 2017) optimiert. Der anfallende Abfall wird im Vergleich zu anderen Szenarien um 30% reduziert. Die benötigten Mengen an Prepreg-Materialien basieren auf der bei der Fa. Invent GmbH hergestellten Tür. Der Energieverbrauch für den Autoklaven wurde um 35% reduziert, basierend auf dem Cool-Clave Zyklus, einem optimierten Autoklav-Zyklus für Verbundwerkstoffe (Chowdhury und Summerscales 2023). Der Lackeinsatz wurde gemäß (Rivera und Reyes-Carrillo 2016b) modifiziert. Der gemessene Lackverbrauch beträgt 0,909 kg pro Tür und wurde auf 0,218 kg reduziert. Alle während des Lebenszyklus anfallenden Abfälle werden durch Verbrennung mit Energieerzeugung behandelt.

Cradle-to-Gate LCIA-Ergebnisse für Szenariogruppe 1

Die Ergebnisse der Cradle-to-Gate-LCIA für die Szenariogruppe 1 sind in Abbildung 70 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Ergebnisse auf die Ergebnisse für das Status-Quo-Szenario (Kohlefaser-Prepreg-Tür) normalisiert. Es zeigt sich, dass die im Rahmen

des im InteReSt-II-Projekts hergestellte Basis Tür in fast allen Wirkungskategorien mit Ausnahme des Ozonabbaupotenzials und des Humantoxizitätspotenzials deutlich geringere Auswirkungen hat.

Das Baseline Tür hat im Vergleich zum Status quo einen sehr hohen biobasierten Anteil. Das bedeutet, dass die Basis Tür eine erhebliche Menge an biogenem Kohlendioxid speichert, das in Form von biogenen Materialien gebunden ist. Daraus ergeben sich deutliche Unterschiede in den Kategorien der Klimawirkung, die auf der X-Achse durch das GWP 100 Charakterisierungsmodell dargestellt werden. Darüber hinaus weisen die beiden Zukunftsszenarien in fast allen Wirkungskategorien deutlich geringere Auswirkungen auf, während die Tür aus dem Vorgängerprojekt InteReSt in den meisten Wirkungskategorien höhere Auswirkungen hat.

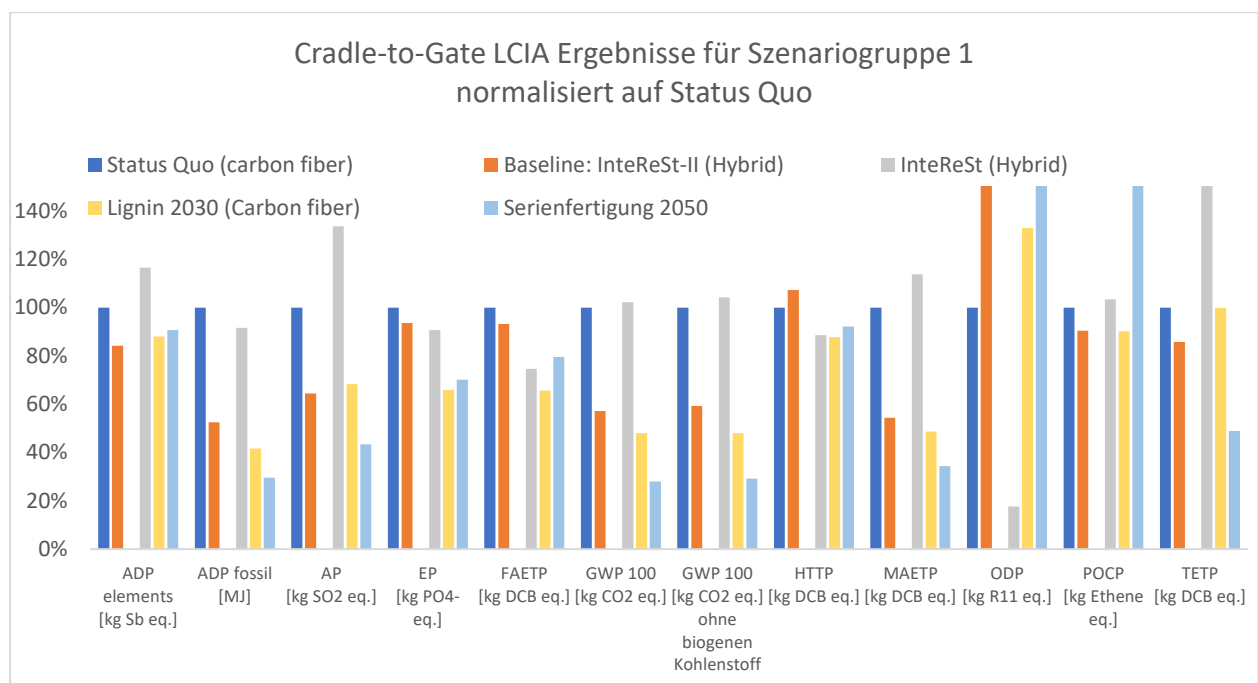


Abbildung 70 Cradle-to-Gate LCIA-Ergebnisse für Szenariogruppe 1

Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse für Szenariogruppe 1

Die Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse für die Szenariogruppe 1 sind in Abbildung 71 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Ergebnisse auf die Status Quo Szenario (Tür aus Kohlefaser-Prepreg) normalisiert. Es ist zu erkennen, dass die im Rahmen des InteReSt II-Projektes hergestellte Hybridtür in fast allen Wirkungskategorien, mit Ausnahme des abiotischen Elementabbaus und des marinen aquatischen Ökotoxizitätspotenzials, etwas höhere Auswirkungen im Vergleich zu den Cradle-to-Gate-Ergebnissen aufweist.

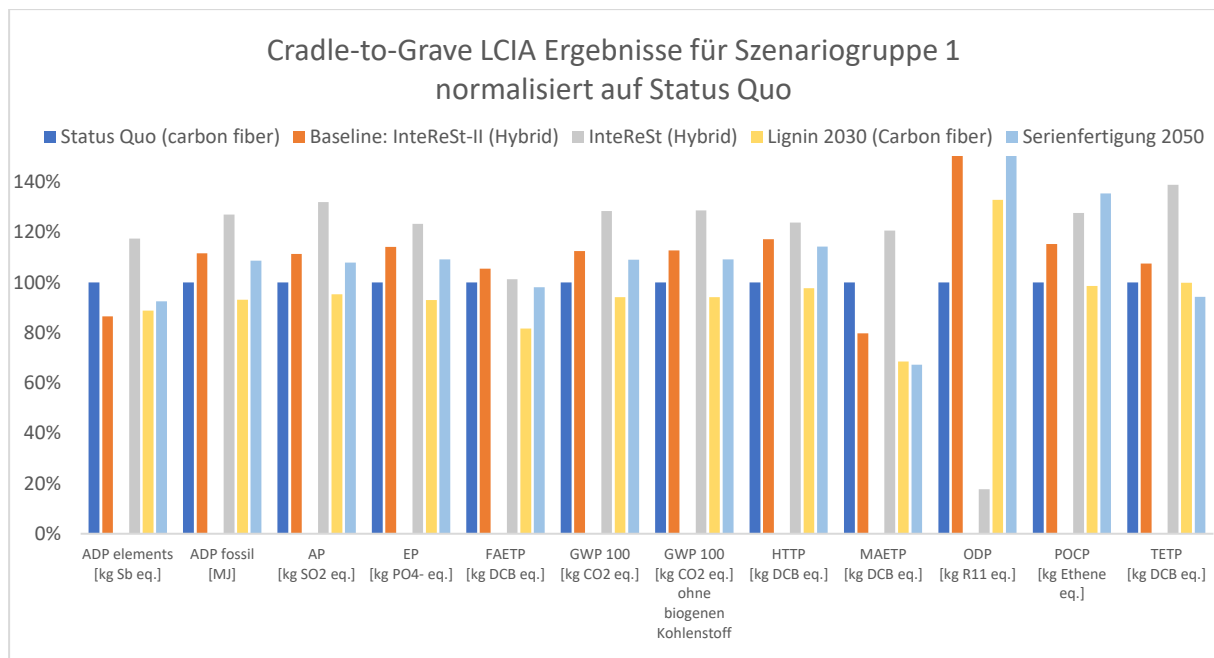


Abbildung 71 Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse für Szenariogruppe 1

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die im Rahmen des InteReSt-II-Projekts entwickelte Hybridtür Faktor 1,2 mehr als die Status-quo-Kohlefasertür wiegt. Das bedeutet, dass die Baseline Tür zwar in der Herstellung geringere Auswirkungen hat, aber durch das höhere Gewicht in der Nutzungsphase mehr Emissionen verursacht und letztendlich etwas schlechter abschneidet als der Status quo. Die Zukunftsszenarien schneiden deutlich besser ab als der Status Quo und die Hybridtür, während die Tür aus dem Vorgängerprojekt InteReSt in den meisten Wirkungskategorien am schlechtesten abschneidet.

Break-even Analyse: GWP 100

Die potenziellen Klimaauswirkungen der im vorliegenden Projekt hergestellten Hybridtür sind geringer als die der Kohlefasertür. Die potenziellen Klimaauswirkungen der Kohlefasertür sind jedoch während der Nutzungsphase etwas geringer als die der Hybridtür, denn der Hybridtür wiegt Faktor 1,2 mehr als der Kohlefasertür. Es wurde analysiert, nach wie vielen Stunden die Kohlefasertür die Rentabilitätsschwelle erreicht. Die Abbildung 72 zeigt die potenziellen Klimaauswirkungen der Tür pro Flugstunde des Hubschraubers. Es ist zu erkennen, dass die Kohlefasertür und die Hybridtür den Breakevenpunkt bei 281 Flugstunden erreichen, während das Szenario 2050 Serienproduktion der Breakevenpunkt mit der Kohlefasertür bei 472 Flugstunden erreicht.

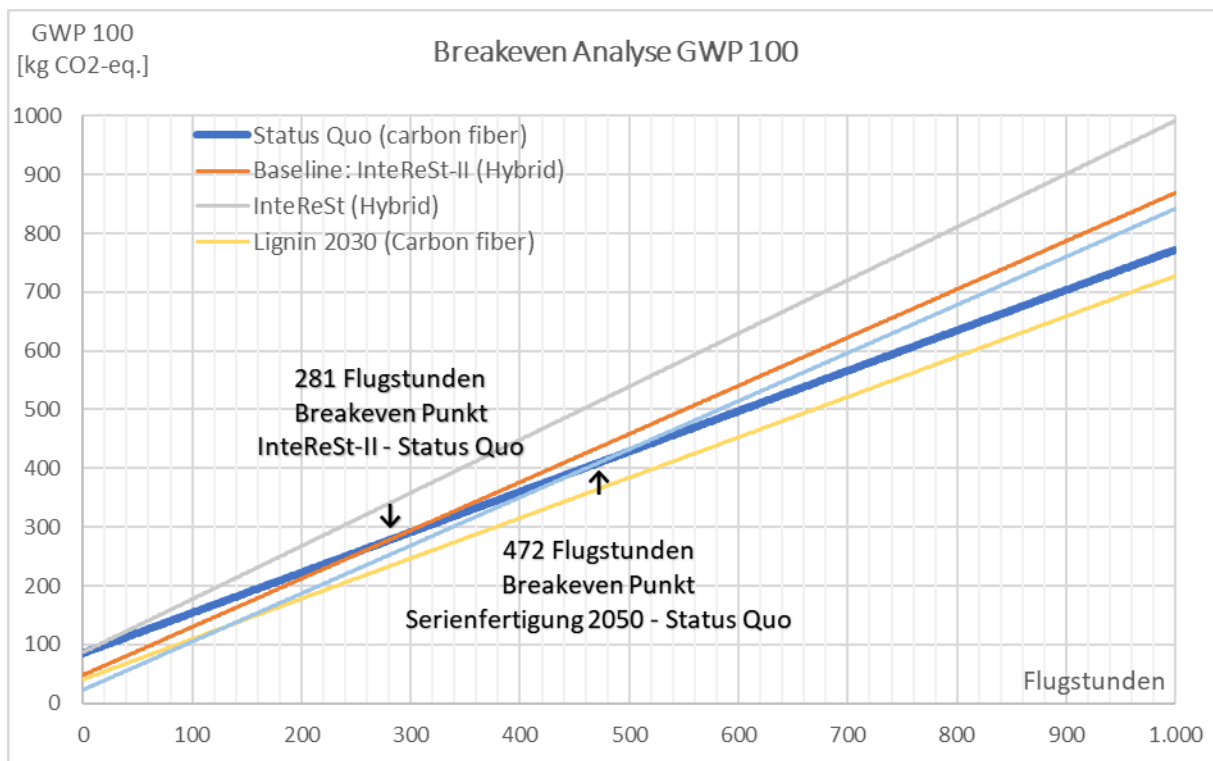


Abbildung 72 Breakeven Analyse für Impact Kategorie Klimawandel

Weitere Szenariogruppen (Cradle-to-Gate + end-of-life)

Es wurden drei weitere Szenariogruppen entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener Aspekte des Lebenszyklus der Hubschraubertür zu verstehen. Diese Szenarien basieren auf dem Basisszenario, welches in Szenariogruppe 1 beschrieben wurde, d.h. der Herstellung der Tür bei Fa. Invent GmbH. Szenariogruppe 2 untersucht die Auswirkungen verschiedener Energiemixe auf die Produktion der Hubschraubertür. Szenariogruppe 3 untersucht die Auswirkungen verschiedener Transportmittel auf den Lebenszyklus der Hubschraubertür. Szenariogruppe 4 untersucht die Auswirkungen verschiedener Abfallbehandlungswege für alle Abfälle, die während des gesamten Lebenszyklus der Hubschraubertür anfallen, einschließlich des End-of-Life der Hubschraubertür. Die spezifischen Szenarien für jede Szenariogruppe sind in der Tabelle 15 beschrieben.

Tabelle 15 Szenariogruppenbeschreibung

Szenariogruppe 2: Energie	Szenariogruppe 3: Transport	Szenariogruppe 4: Abfallbehandlung
Baseline: Konventioneller Strommix (DE)	A-Diesel (Baseline)	Verbrennung (Baseline) Alle Abfälle werden verbrannt

	Transportdistanz 270 km; Durchschnittlicher EU- Flottenmix; Diesel (DE)	
Green Grünströmmix (DE)	W-Diesel Transportdistanz 1000 km; Durchschnittlicher EU- Flottenmix; Diesel (DE)	Deponie Alle Abfälle werden deponiert
EU 2030 EU-Prognose-Energiemix 2030	2050 Forecast Transportdistanz 391 km; Elektro-LKWs; EU-Prognose- Energiemix 2050	Energiegewinnung Alle Abfälle werden verbrannt mit Gutschrift für Dampf und Strom
EU 2050 EU-Prognose-Energiemix 2050		

Szenariengruppe 2: Ergebnisse

Die Szenariengruppe 2 befasst sich mit verschiedenen zukünftigen Energiemixen, da der Anwendungshorizont des Projektes in der Zukunft liegt. Das Basisszenario entspricht dem aktuellen Energieverbrauchsmix in Deutschland, während das grüne Szenario dem aktuellen Ökostrommix entspricht. Die Daten für die prognostizierten Energiemixe EU 2030 und EU 2050 wurden von der Europäischen Kommission veröffentlicht (European Commission et al. 2021).

Die Abbildung 73 zeigt die normalisierten LCIA-Ergebnisse für die Szenariengruppe 2, wie in der Tabelle 15 beschrieben. Es ist zu erkennen, dass die LCIA-Ergebnisse für fast alle Wirkungskategorien nur um ± 20 % voneinander abweichen, mit Ausnahme der Wirkungskategorien abiotische Erschöpfung fossiler Ressourcen und Klimawandel. In diesen beiden Wirkungskategorien sind die potenziellen Auswirkungen für den grünen und zukünftigen Energiemix deutlich geringer.

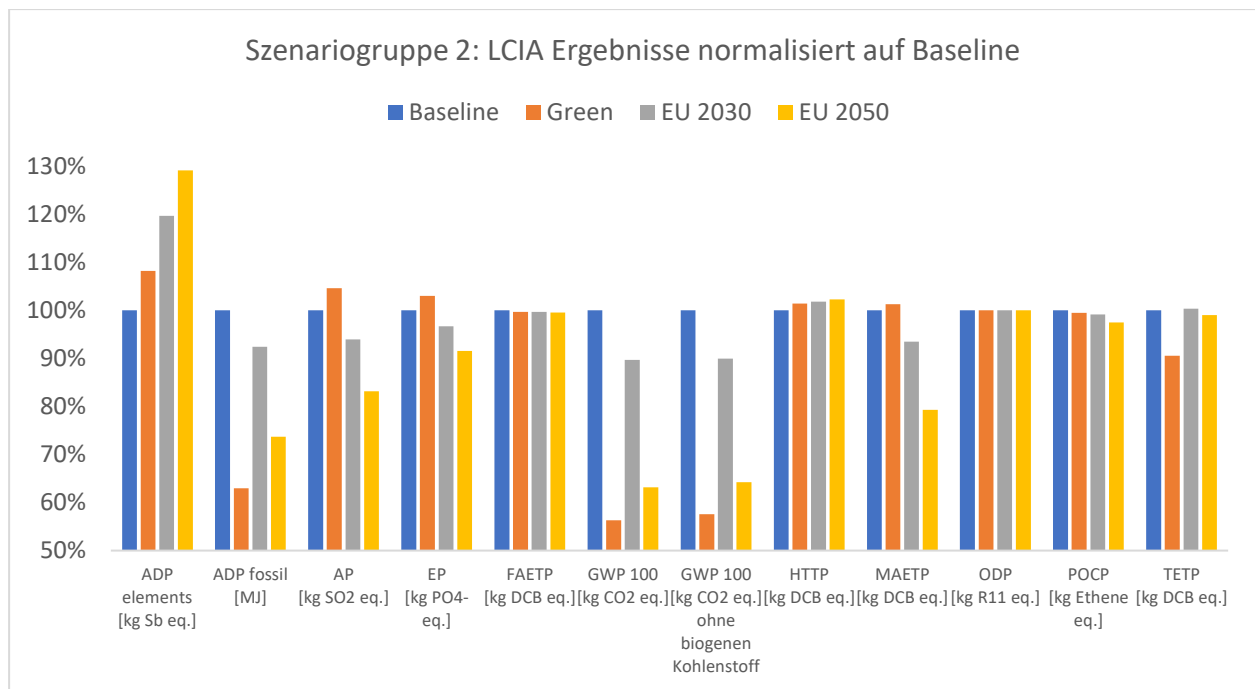


Abbildung 73 Szenariogruppe 2: Energiemix

Szenariogruppe 3: Ergebnisse

Die Szenariogruppe 3 befasst sich mit verschiedenen Flottenmischen. Das Basisszenario entspricht dem aktuellen Dieselflottenmix in Europa, während die Prognose 2050 einem rein elektrischen Flottenmix entspricht (IEA, International Energy Agency 2017). Das durchschnittliche Diesel (A-Diesel) Szenario geht von einer durchschnittlichen Transportentfernung von 291 km (Statistisches Bundesamt 2022) für alle Transportstufen aus, während das Worst-Case (W-Diesel) Szenario von einer durchschnittlichen Transportentfernung von 1.000 km für alle Transportstufen ausgeht.

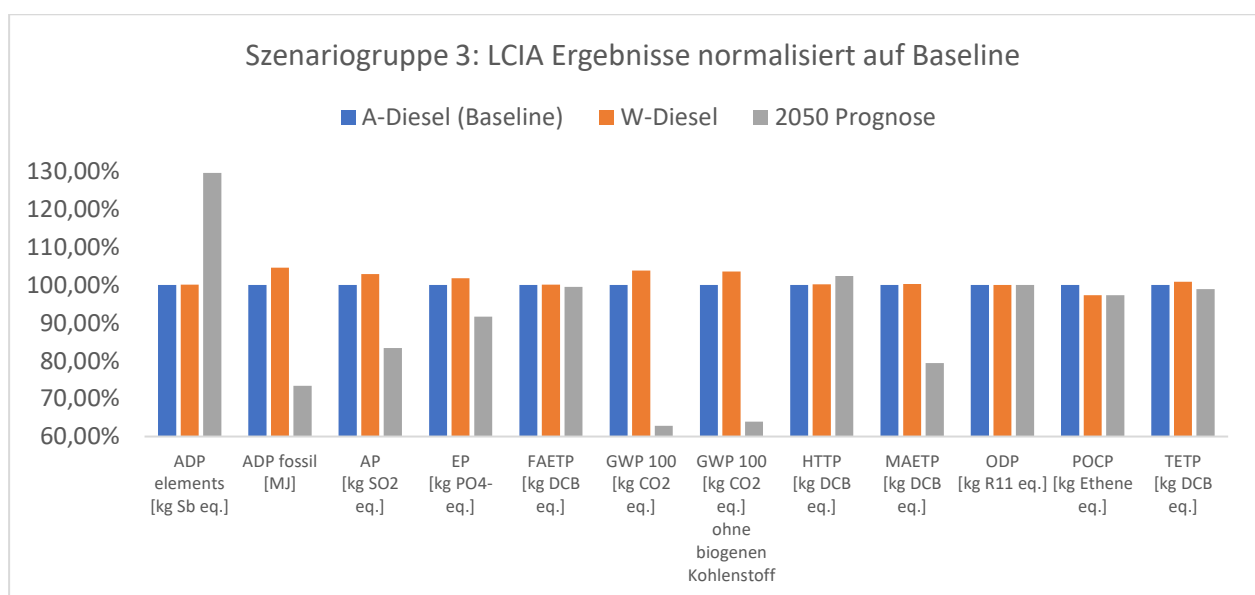


Abbildung 74 Szenariogruppe 3: Transport

Die Abbildung 74 zeigt die normalisierten LCIA-Ergebnisse für die Szenariogruppe 3, wie in der Tabelle 15 beschrieben. Es ist zu erkennen, dass die LCIA-Ergebnisse für fast alle Wirkungskategorien nur um $\pm 20\%$ voneinander abweichen, mit Ausnahme der Wirkungskategorien abiotischer Abbau fossiler Ressourcen und Elemente, Klimawandel und aquatisches Ökotoxizitätspotenzial. Außer bei der abiotischen Erschöpfung von Elementen sind die potenziellen Auswirkungen für die künftige Transportflotte deutlich geringer. Die höheren Auswirkungen in der Wirkungskategorie abiotischer Abbau von Elementen sind auf den Verbrauch von Lithium und Cadmium bei der Herstellung von Batterien für die Elektrofahrzeuge der Flotte zurückzuführen. Darüber hinaus ist über alle Wirkungskategorien hinweg nur ein leichter Anstieg der potenziellen Auswirkungen zwischen dem durchschnittlichen und dem Worst-Case-Diesel-Szenario zu beobachten.

Szenariogruppe 4: Ergebnisse

Die Szenariogruppe 4 befasst sich mit verschiedenen Abfallbehandlungs- und End-of-Life-Pfaden für alle Abfälle, die während des Lebenszyklus der Hubschraubertür anfallen, einschließlich der Entsorgung der Tür selbst.

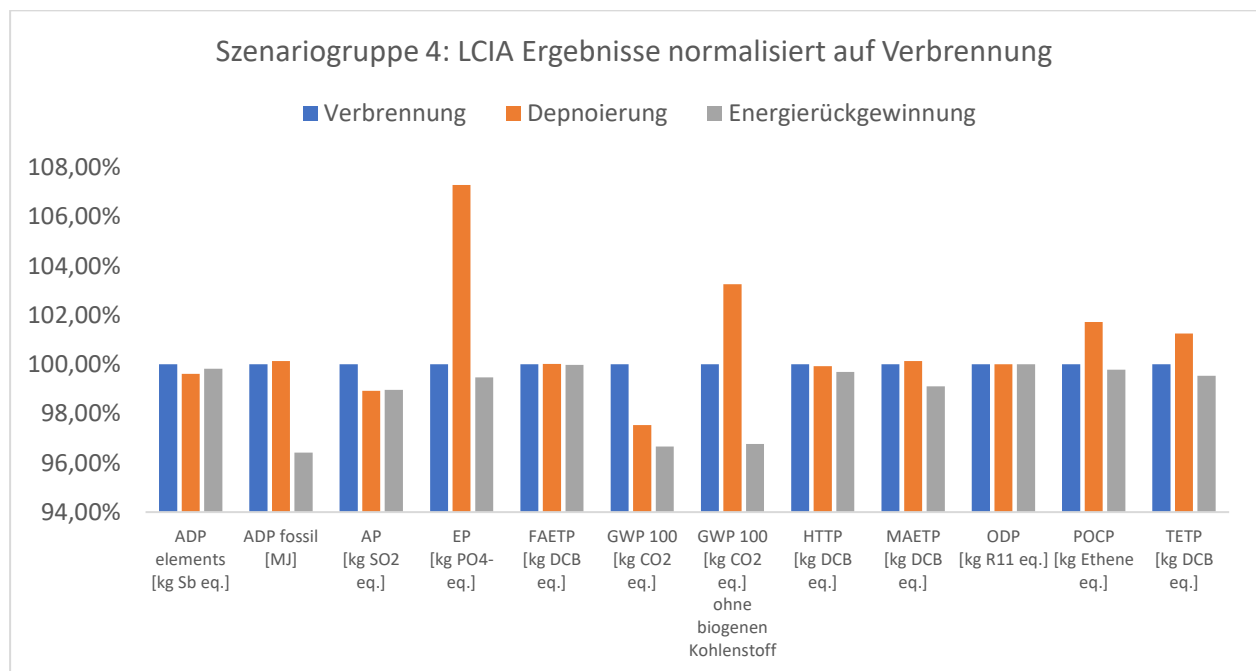


Abbildung 75 Szenariogruppe 4: End-of-life und Abfallbehandlung

Die Abbildung 75 zeigt die normalisierten LCIA-Ergebnisse für die Szenariogruppe 4, wie in der Tabelle 15 beschrieben. Es ist zu erkennen, dass die potenziellen Auswirkungen der verschiedenen Abfallbehandlungspfade um weniger als $\pm 10\%$ voneinander abweichen.

Fazit

Auf der Grundlage aller Diskussionen und Analysen kann der Schluss gezogen werden, dass es viele Möglichkeiten gibt, mit biobasierten Werkstoffen in der Luftfahrtindustrie, insbesondere in der Produktionsphase, eine gleichwertige technische Leistung zu erzielen und gleichzeitig

die Umweltverträglichkeit deutlich zu verbessern. Unter dem Gesichtspunkt der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus ist jedoch noch viel zu tun, um Strukturbauteile aus Kohlefasern in der Luftfahrtindustrie sinnvoll durch Strukturbauteile aus Naturfasern zu ersetzen. Zu berücksichtigen ist aber auch, dass biobasierte Materialien und Technologien noch „in den Kinderschuhen“ stecken, während konventionelle Materialien und Prozesse über viele Jahrzehnte optimiert wurden. Es sollte daher nicht überraschen, wenn in den nächsten Jahren biobasierte Materialien und Verfahren den konventionellen Materialien und Verfahren sowohl in technischer als auch in ökologischer Hinsicht in Bezug auf den Lebenszyklus überlegen sein werden.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 16 zeigt den Gesamtfinanzierungsplan und die nicht verwendeten Mittel. Da das Projekt aufgrund der pandemischen Lage 2020 nicht zum geplanten Zeitpunkt starten konnte, wurde eine kostenneutrale Verlängerung um 4 Monate gewährt. Außerdem wurden Mittel, die für einen technischen Mitarbeiter veranschlagt waren (17164,06 €), in Vergabe von Aufträgen (12000 €) und die Beschäftigung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters (5164,06 €) umgewidmet. Dies wurde nötig, da es in der Forschungsgruppe an der Hochschule Hannover, in der die Untersuchungen zur mikrobiellen Beständigkeit durchgeführt werden sollten, zu einem kurzfristigen Personalausfall kam und nicht die nötigen personellen Kapazitäten zu Bearbeitung dieses Arbeitspakets zur Verfügung gestellt werden konnten. Stattdessen wurde die Durchführung der Versuche fremdvergeben und die Ergebnisse am IfBB von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter ausgewertet.

Tabelle 16: Gesamtfinanzierungsplan nach Umwidmung der Gelder

Position*	Gesamtfinanzierungsplan	Verbleibende Mittel	Verbleibende Mittel (%)
812	203.886,87 €	4.180,66 €	2,05%
817	79.813,13 €	3.354,34 €	4,20%
822	6.200,00 €	-1.807,04 €	-29,15%
835	12.000,00 €	65,33 €	0,54%
843	13.400,00 €	2.268,89 €	16,93%
846	5.400,00 €	1.365,14 €	25,28%
850	4.700,00 €	191,77 €	4,08%
Summe	325.400,00 €	9.619,09 €	2,96%

* 0812 = Beschäftigte E12-E15; 0817 = Beschäftigte E1-E11; 0822 = sonst. Beschäftigte; 0835 = Vergabe von Aufträgen; 0843 = Sonst. Allg. Verwaltungsausgaben; 0846 = Dienstreisen; 0850 = Gegenstände über 410 €.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Leichtbau ist in der Luftfahrt eine wichtige Konstruktionsrahmenbedingung, da Mehrgewicht zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch und somit zu einer verschlechterten CO₂-Bilanz führt. Daher werden im Flugzeugbau Hochperformanzmaterialien verwendet, die eine möglichst leichte Struktur ermöglichen, bei deren Herstellung jedoch endliche Ressourcen verbraucht werden und ein hoher Energiebedarf entsteht. Im Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht sind die etablierten CFK-Materialien überlegen, jedoch gibt es im Bereich der Steifigkeit weitere Materialien, die zusammen mit einem passenden Bauteildesign sehr gute Werte erzielen können. Interessante Kandidaten sind naturfaserverstärkte Verbunde, die in der Herstellung wesentlich ressourcenschonender sind als CFK-Materialien.

Im Projekt InteReSt-II wurde daher untersucht, ob naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe als nachhaltiges, semistrukturelles Leichtbaumaterial für die Luftfahrt eingesetzt werden können.

Dies wurde am Beispiel einer Helikoptertür demonstriert. Das Ziel dabei war, die Helikoptertür in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften und ihr Gewicht durch Materialauswahl und Design zu optimieren. Dabei sollte eine möglichst ressourcenschonende Herstellungsweise (Erhöhung Bioanteil auf über 50 %) und Resilienz gegenüber Witterungseinflüssen (Auswahl (teil)-biobasierter Lack) erreicht werden.

Für den Demonstrator wurde ein Flachsfaserver- Epoxidharz-System ausgewählt. Das ambitionierte Ziel, den Bioanteil auf über 50% zu erhöhen, wurde mit 45,29% knapp nicht erreicht. Es ist jedoch im Vergleich zum Vorgängerprojekt (34%) eine Erhöhung von 11,29% erzielt worden. Optimierungspotential findet sich vor allem im Einsatz von Epoxidharzen mit höherem Bioanteil, was eine verarbeitungstechnische Herausforderung darstellt. Dies sollte in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden sollte, da es hier noch Möglichkeiten zur Verbesserung gibt.

Es wurden mit L9 und L10 erfolgreich geeignete teilbiobasierte Beschichtungen gefunden, die das Material vor Degradation schützen können, was die Ökobilanz des Gesamtsystems bei gleichbleibender Langlebigkeit verbessert.

Des Weiteren zeichnet sich die optimierte Hybrid-Hubschraubertür durch einen stark reduzierten CO₂-Ausstoß während der Herstellung aus. Außerdem wurde sie gegenüber den verschiedensten Belastungsszenarien ausgelegt. Sie ist jedoch 203 g (19,5%) schwerer geworden. Ein direkter Vergleich ist daher schwierig. Insgesamt zeigt dieses Ergebnis das Dilemma des Leichtbaus: Jedes Gramm Sicherheit zeichnet sich in einem höheren Gewicht und einer schlechteren Ökobilanz ab, ist aber womöglich kritisch für die Funktion der Struktur und die Sicherheit der Passagiere. Insgesamt sind die Unterschiede nur gering, sodass gezeigt werden konnte, dass Flachsfaserver-Carbon-Hybridverbunde als attraktive Materialien für den Leichtbau einzuordnen sind.

9 Nutzen und Verwertbarkeit

Über den Projektzeitraum hinaus bieten sich aufgrund der projektbezogenen Kontakte zu diversen Unternehmen wie der edm aerotec GmbH, der INVENT GmbH und führenden Lackherstellern sowie zu Forschungseinrichtungen an der TU Chemnitz und der TU München weitere Zusammenarbeiten im Bereich der Naturfaserverbundkunststoffe sowie zu beschichtungsspezifischen Fragestellungen an, um das Technology Readiness Level (TRL) der bearbeiteten Systeme weiter zu erhöhen. Aktuell besteht zudem ein Kontakt zu der Fa. Airbus Operations GmbH, um die bisher gewonnenen Erkenntnisse auf Basis der Helikoptertür auf neue für Verkehrsflugzeuge relevante Bauteile und Produkte zu transferieren.

10 Fortschritt bei anderen Stellen

Mit dem BMW M4 GT4 kam 2022 ein Serienrennwagen auf den Markt, der auf flachsfaserverstärkte Composite setzt – und das nicht nur im Interieur, sondern auch Außenteile wie Motorhaube, Frontspoiler, Türen, Kofferraum und Heckspoiler. Abgesehen vom Dach gibt es fast keine Bauteile aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK), die nicht durch FFK ersetzt wurden. In Zusammenarbeit mit der Firma Bcomp Ltd. konnte durch intelligente Kombination der Produkte powerRibs und ampliTex Gewicht eingespart und die Vorteile der Flachsfaserkomposite wie die hohe Schlagfestigkeit und das hervorragende Absorptionsverhalten genutzt werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass Leichtbau mit natürlichen Fasern tatsächlich möglich ist und so auch während der Nutzungsphase CO₂ eingespart werden kann.

11 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Veröffentlichung der Ergebnisse und Informationsweitergabe an Forschung und Industrie erfolgte in Form von Veröffentlichungen, Konferenzbeiträgen und Webinaren, die im Folgenden aufgeführt sind.

Veröffentlichungen (wissenschaftliche Artikel in Fachzeitschriften)

S. Schulte, H. Schäfer, C. Vogel, V. Shah, S. Kroll, A. Siebert-Raths: "Influence of aviation environmental stresses using water, jet fuel, hydraulic oil and UV radiation on the optical and mechanical properties of coated and uncoated flax fiber-reinforced composites", Applied Composite Materials, special issue „Environmental durability of composite materials and structures“, submission deadline 31.08.2024 (paper in preparation).

H. Schäfer, B. Lühring, M. Neudecker, S. Kroll, A. Siebert-Raths: „Ready for Take-off: Bio-based paint systems for natural fibre reinforced plastics for aviation applications“, ipw / bio-fibre magazine, 5-6, 2022.

Konferenzbeiträge (Vorträge, Poster)

V. Shah, H. Schäfer, S. Schulte, M. Neudecker, S. Kroll, A. Siebert-Raths: „Leveraging life cycle management to improve eco-design in the aerospace industry, LCM 2023 - The 11th International Conference on Life Cycle Management, Lille/Frankreich, 06.-08. September 2023 (Posterbeitrag).

A. Siebert-Raths, L. Mundzeck: „Biowerkstoffe: Recycling und Einsatzmöglichkeiten in der Luft- und Raumfahrt“, Webinar-Reihe „innovativ jetzt“, Hannover-Impuls, Hannover, 19. Januar 2021 (Vortrag).

Webinare

Webinare der Reihe „Biowerkstoffe im Fokus!“ des IfBB – für die Öffentlichkeit frei zugänglich auf der IfBB-Website

<https://www.ifbb-hannover.de/de/webinare.html>

- Webinar 76: Bio-Leichtbaustrukturen für die Luftfahrt – nachhaltig und auch beständig? (InteReSt-II) am 18.01.2024
- Webinar 65 - Nachhaltige Leichtbaustrukturen für die Luftfahrt und ihr Schutz vor Umwelteinflüssen (InteReSt-II) am 15.12.2022

12 Kurzfassung (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Schlussbericht zum Teilvorhaben „Charakterisierung, Recycling und Ökologie von Materialien für die ressourcenschonenden Leichtbaustrukturen für die Luftfahrt“ innerhalb des Verbundvorhabens „Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen und ressourcenschonenden Leichtbaustruktur für die Luftfahrt“ (InteReSt-II)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Vogel, Christoph; Shah, Vineet; Schulte, Sarina	5. Abschlussdatum des Vorhabens: 31.01.2024	
	6. Veröffentlichungsdatum:	
	7. Form der Publikation: Bericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule Hannover, IfBB - Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe Heisterbergallee 10A 30453 Hannover	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen: 20E1908C	
	11. Seitenzahl: 131	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 11019 Berlin	13. Literaturangaben: 78	
	14. Tabellen: 16	
	15. Abbildungen: 75	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Luftfahrtforschung des DLR, Königswinterer Str. 522-524, 53227 Bonn		
18. Kurzfassung Ziel des Projekts „InteReSt-II“ war die Weiterentwicklung einer hybriden Helikoptertür für einen Ultraleicht-Hubschrauber. Dafür wurden Carbonfasern und Flachsfasern in einer duroplastischen Matrix kombiniert. Um den Bioanteil der lackierten Hubschraubertür zu erhöhen, wurden (teil-)biobasierte Lacke ausgewählt und in Ihren Eigenschaften mit etablierten Flugzeuglacken verglichen. Insgesamt wurden 14 Lacksysteme für die Untersuchungen am IfBB ausgewählt. Ziel war es, den Einfluss luftfahrtspezifischer Umwelteinflüsse auf die optischen und mechanischen Eigenschaften von Flachsfaserkompositen (FFK) und Lacksystemen zu bewerten. Die Proben wurden bis zu 28 Tage den Umweltbedingungen ausgesetzt und wurde festgestellt, dass Wasser und UV-Licht die optischen und mechanischen Eigenschaften von FFK negativ beeinflussen, die Komposite jedoch resistent gegen Auslagerung in Hydrauliköl und Kerosin sind. Es konnten außerdem zwei teilbiobasierte Autointerieurlacke bestimmt werden, die im Vergleich zu den fossilen Flugzeuglacken gleich gut abschnitten. Die biologische Herkunft der Flachsfasern begünstigt außerdem in besonderem Maß die Degradation durch mikrobielles Wachstum. Daher untersuchte das IfBB zusätzlich das Pilzwachstum auf verschiedenen FFK-Substraten und Lacken. Die begleitende Ökobilanzierung zur optimierten Helikoptertür verglich fünf Szenarien, unter anderem wurde die Carbonfaserntür mit der optimierten InteReSt-II Hybridtür verglichen. Für die InteReSt-II-Tür zeigen sich 42,8 % Einsparungen von CO₂-eq während der Herstellung. Jedoch ist diese schwerer als die Carbonfasertür, was sich in der Nutzungsphase negativ auswirkt. Die optimierte Hybridtür ist jedoch auch auf eine Vielzahl von möglichen Lastfällen ausgelegt und daher nicht direkt mit der ursprünglichen, nicht optimierten Carbonfasertür vergleichbar. Es darf weiterer Studien, um das CO₂-Einsparpotential durch den Einsatz von Naturfaser-Hybridwerkstoffen in der Luftfahrt abschließend zu bewerten.		
19. Schlagwörter Biobasierte Materialien, Flachs, Hybridverbundwerkstoffe, Umwelteinflüsse, NFK, LCA, Ökobilanzierung, Luftfahrt		
20. Verlag Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover		21. Preis

13 Kurzfassung (Document Control Sheet)

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report (in German)	
3. title Schlussbericht zum Teilvorhaben „Charakterisierung, Recycling und Ökologie von Materialien für die ressourcenschonenden Leichtbaustrukturen für die Luftfahrt“ innerhalb des Verbundvorhabens „Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen und ressourcenschonenden Leichtbaustruktur für die Luftfahrt“ (InteReSt-II)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Vogel, Christoph; Shah, Vineet; Schulte, Sarina	5. end of project:	31.01.2024
	6. publication date:	
	7. form of publication:	report
8. performing organization(s) (name, address) Hochschule Hannover, IfBB - Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe Heisterbergallee 10A, 30453 Hannover	9. originator's report no.	
	10. reference no.:	20E1908C
	11. no. of pages:	131
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 11019 Berlin	13. no. of references:	37
	14. no. of tables:	16
	15. no. of figures:	75
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date): Projekträger Luftfahrtforschung des DLR, Königswinterer Str. 522-524, 53227 Bonn		
18. abstract The goal of the "InteReSt-II" project was to further develop a hybrid helicopter door for an ultralight helicopter. Carbon fibers and flax fibers were combined in a thermoset matrix. To increase the bio-content of the coated helicopter door, commercial (partially) bio-based coatings were selected, and their properties compared with established aircraft paints. A total of 14 coating systems were selected for the tests at the IfBB. The aim was to evaluate the influence of aviation-specific environmental influences on the optical and mechanical properties of flax fiber composites (FFK) and paint systems. The samples were exposed to environmental conditions typical for helicopters for up to 28 days and it was found that water and UV light have a negative effect on the optical and mechanical properties of FFK, but that the composites are resistant to ageing in hydraulic oil and paraffin. In addition, two partially biobased car interior paints were identified that performed equally as the fossil-based aircraft paints. The biological origin of the flax fibres also particularly favours degradation through microbial growth. For this reason, the IfBB also investigated fungal growth on various FFK substrates and paints. The accompanying life cycle assessment for the optimised helicopter door compared five scenarios, including the carbon fibre door and the optimised InteReSt-II hybrid door. The InteReSt-II door showed a 42.8 % saving in CO₂-eq during manufacture. However, it is heavier than the carbon fibre door, which has a negative impact in the use phase. Since the optimised hybrid door is also designed for a variety of possible load cases, it is therefore not directly comparable with the original, non-optimised carbon fibre door. Further studies are needed to conclusively evaluate the CO₂ savings potential of using natural fibre hybrid materials in aviation.		
19. keywords Bio-based materials, flax, hybrid composites, environmental impact, NFRC, LCA, life cycle assessment, aviation		
20. publisher Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover		21. price

14 Abbildungen

Abbildung 1: Strukturplan des Projekts InteReSt-II.....	11
Abbildung 2: Netzplan des Projekts InteReSt-II	12
Abbildung 3: Balken/Zeitplan des Projekts InteReSt-II nach kostenneutraler Verlängerung	13
Abbildung 4: Beispielhafter Lackaufbau.....	21
Abbildung 5: Gitterschnitt Bewertungssystem, Quelle: DIN EN ISO 2409, modifiziert HsH.	22
Abbildung 6: byko-cut universal Messgerät (Fa. BYK-Gardner) zur Beschichtungsanalyse, Quelle: HsH.	23
Abbildung 7: Vakuuminfusionsprozess (links) und ausgehärtete NFK-Platte bestehend aus SuperSap INR/INS und Lineo FlaxPly BL 200, 25 cm x 30 cm (rechts).	23
Abbildung 8: Mit Lacken L1-L6 beschichteter NFK-Werkstoff (SuperSap+Lineo FlaxPly BL 200, 10 cm x 15 cm); bei L3 und L5 spiegelt sich die Deckenlampe und bei L1 und L6 sind die Oberflächendefekte mit roten Pfeilen markiert.....	24
Abbildung 9: Das PFA NFK-System (CE Flax twill 200 gsm PFC502 - K) zeigt nach Gitterschnittprüfung deutliche Abplatzungen bei allen getesteten Lacken.	26
Abbildung 10: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht bewittert (0 Wochen), b) nach zwei Wochen und c) nach vier Wochen Bewitterung (DIN EN ISO 16474-3 Zyklus 1), 7,5 cm x 11 cm, UVA Charge 1.....	29
Abbildung 11: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht bewittert (0 Wochen), b) nach zwei Wochen und c) nach vier Wochen Bewitterung (DIN EN ISO 16474-3 Zyklus 1), 7,5 cm x 11 cm, UVA Charge 2.....	30
Abbildung 12: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht bewittert (0 Wochen), b) nach zwei Wochen und c) nach vier Wochen Bewitterung (DIN EN ISO 16474-3 Zyklus 4), 7,5 cm x 11 cm, UVB Charge 3.....	30
Abbildung 13: Glanzmessung der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung unbewittert (0 Wochen) sowie nach 2- und 4-wöchiger UV-Bewitterung.....	32
Abbildung 14: Farbabstand ΔE^*_{ab} der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung nach zwei und vier Wochen in Bezug zur nicht ausgelagerten Probe, nach DIN EN ISO/CIE 11664-4.	33
Abbildung 15: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung unbewittert (0 Wochen) sowie nach zwei- und vierwöchiger UV-Bewitterung. (DIN EN ISO 2815).....	34
Abbildung 16: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Wochen) sowie nach zwei- und vier-wöchiger Bewitterung (4 Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).....	36
Abbildung 17: Beispielhafter mikrobieller Bewuchs auf einem Flachsfaser-Gewebe, 20fach vergrößert.....	40
Abbildung 18: Fotos repräsentativer Proben nach vier wöchiger Inkubation mit Pilzsporen, Charge 1, 6 cm x 6 cm.....	41
Abbildung 19: Fotos repräsentativer Proben nach vier wöchiger Inkubation mit Pilzsporen, Charge 2, 6 cm x 6 cm.....	42
Abbildung 20: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter unbehandelter Probenoberflächen aus Charge 2.	45
Abbildung 21: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter mit Pilzen bewachsenen Probenoberflächen aus Charge 2 (4 Wochen Inkubation).....	46
Abbildung 22: Probe NFK1_L8 Charge 1 vor (links) und nach (rechts) Auslagerung mit Pilzsporen sowie anschließender Sterilisation (121 °C, 20 min.), 6 cm x 6 cm.....	47

Abbildung 23: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht ausgelagert (0 Tage), b) nach einem Tag und c) nach 28 Tagen Auslagerung in Wasser (nach anschließender Trocknung).	48
Abbildung 24: Glanzmessungen der in Wasser ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.	49
Abbildung 25: Farbmessungen der in Wasser ausgelagerten Proben nach einem und 28 Tagen bezogen auf die 0-Tage-Referenz.	50
Abbildung 26: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung der in Wasser ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.	51
Abbildung 27: Absolute Gewichtszunahme in g der in Wasser ausgelagerten Proben.	52
Abbildung 28: Relative Gewichtszunahme in % bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack) der in Wasser ausgelagerten Proben.	53
Abbildung 29: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Wasser (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).	54
Abbildung 30: Biegemodul in % bezogen auf 0 Tage Referenz, lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Wasser (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).	55
Abbildung 31: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht ausgelagert (0 Tage), b) nach einem Tag und c) nach 28 Tagen Auslagerung in Kerosin (nach anschließender Trocknung).	56
Abbildung 32: Glanzmessungen der in Kerosin ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.	57
Abbildung 33: Farbmessungen der in Kerosin ausgelagerten Proben nach einem und 28 Tagen bezogen auf die 0-Tage-Referenz.	58
Abbildung 34: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde, mit und ohne Beschichtung, der in Kerosin ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen. ..	59
Abbildung 35: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Kerosin (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).	60
Abbildung 36: Biegemodul in % bezogen auf 0-Tage-Referenz, lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Kerosin (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).	61
Abbildung 37: Naturfaserverbunde mit und ohne Beschichtung, a) nicht ausgelagert (0 Tage), b) nach einem Tag und c) nach 28 Tagen Auslagerung in Hydrauliköl (nach anschließender Trocknung).	62
Abbildung 38: Glanzmessungen der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.	63
Abbildung 39: Farbmessungen der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach einem und 28 Tagen bezogen auf die 0-Tage-Referenz.	64
Abbildung 40: Darstellung der Buchholzhärte über die Eindrucklänge in mm der Naturfaserverbunde, mit und ohne Beschichtung, der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben nach null, einem und 28 Tagen.	65
Abbildung 41: Absolute Gewichtszunahme in g der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben.	66
Abbildung 42: Relative Gewichtszunahme in % bezogen auf den reinen NFK (ohne Lack) der in Hydrauliköl ausgelagerten Proben.	66
Abbildung 43: Biegemodul lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Hydrauliköl (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).	67
Abbildung 44: Biegemodul, in % bezogen auf 0 Tage Referenz, lackierter und unbeschichteter Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Hydrauliköl (4-Punktbiegeprüfung nach DIN EN ISO 14125).	68

Abbildung 45 Rahmen einer Ökobilanz	70
Abbildung 46 Systemgrenzen und das Produktsystem	72
Abbildung 47 LCI-Systemdiagramm: Prepreg im Autoklavenverfahren	74
Abbildung 48 LCI-Systemdiagramm: Nutzungsphase.....	76
Abbildung 49 LCI-Systemdiagramm: End-of-life und Abfallbehandlung.....	77
Abbildung 50 LCI-Systemdiagramm: Parametrisierte Strom	77
Abbildung 51 LCI-Systemdiagramm: Parametrisierter Transport	78
Abbildung 52 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung UD Flachsfaser Prepreg	79
Abbildung 53 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung BD Flachsfaser Prepreg.....	80
Abbildung 54 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung UD CF Prepreg	80
Abbildung 55 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung BD CF Prepreg.....	81
Abbildung 56 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung CF Towpreg Prepreg	81
Abbildung 57 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Lignin-basierte CF Prepreg	82
Abbildung 58 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Teil bio-basierte Harzsystem	83
Abbildung 59 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung teil-biobasierte 2K Lacksystem	84
Abbildung 60 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung handelsüblicher Lacksysteme.....	85
Abbildung 61 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Vakuumfolie	86
Abbildung 62 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Trennfolie	87
Abbildung 63 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Saugvlies	87
Abbildung 64 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Vakuumdichtband	88
Abbildung 65 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Trennmittel.....	88
Abbildung 66 LCI-Systemdiagramm: Bereitstellung Abreißgewebe	89
Abbildung 67 Absolute LCIA-Ergebnisse, auf logarithmischer Skala dargestellt.....	91
Abbildung 68 Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse: prozentuale Beiträge	92
Abbildung 69 Cradle-to-Gate LCIA-Ergebnisse: prozentuale Beiträge	92
Abbildung 70 Cradle-to-Gate LCIA-Ergebnisse für Szenariogruppe 1	95
Abbildung 71 Cradle-to-Grave LCIA-Ergebnisse für Szenariogruppe 1	96
Abbildung 72 Breakeven Analyse für Impact Kategorie Klimawandel.....	97
Abbildung 73 Szenariogruppe 2: Energiemix	99
Abbildung 74 Szenariogruppe 3: Transport	99
Abbildung 75 Szenariogruppe 4: End-of-life und Abfallbehandlung.....	100

15 Tabellen

Tabelle 1: Materialauswahl bio- sowie fossil-basierter Beschichtungssysteme.	20
Tabelle 2: Gitterschnittkennwerte (GT) ausgewählter NFK-Materialien mit verschiedenen Lacksystemen, visuelle Bewertung.....	25
Tabelle 3: Ausgewählte NFK-Untergründe für die Untersuchung der Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen. ..	27
Tabelle 4: Bewitterungszyklus nach DIN EN ISO 16474-3 (Zyklus 1).....	28
Tabelle 5: Bewitterungszyklus nach DIN EN ISO 16474-3 (Zyklus 4).....	28
Tabelle 6: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Wochen) sowie nach zwei- und vierwöchiger Bewitterung.....	35
Tabelle 7: Eingesetzte Prüfpilze und die von ihnen unter anderem angegriffenen Materialien.	39
Tabelle 8: Beurteilungskriterien zur Wachstumsintensität der Prüfpilze.	39
Tabelle 9: Durchschnittliche Wachstumsintensität und Widerstandbestwertung geprüfter Materialien.	43
Tabelle 10: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Wasser.....	51
Tabelle 11: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Kerosin.	59
Tabelle 12: Gitterschnittkennwerte (GT) der beschichteten Naturfaserverbunde vor (0 Tage) sowie nach ein- und 28-tägiger Auslagerung in Hydrauliköl.	65
Tabelle 13 Berechnung des biogenen Gehalts der Hubschraubertür	70
Tabelle 14 Wirkungskategorien, Charakterisierungsmodelle, und Gesamt LCIA-Ergebnisse	90
Tabelle 15 Szenariogruppenbeschreibung	97
Tabelle 16: Gesamtfinanzierungsplan nach Umwidmung der Gelder	101

16 Literatur

AECTP-300. (2006). Climatic Environmental Tests.

AkzoNobel: Helping to develop the next generation of eco-friendly aviation technologies. . (kein Datum). Abgerufen am 5. 4 2019 von <https://aerospace.akzonobel.com/news-and-stories/helping-develop-next-generation-eco-friendly-aviation-technologies>

Barth, M., & Carus, M. (2015). Carbon Footprint and Sustainability of Different Natural Fibres for Biocomposites and Insulation Material. Study Providing Data for the Automotive and Insulation Industry. Hürth: Nova-Institut GmbH.

Beck, T., Albrecht, S., Lindner, P., Bos, U., & Knüpfner, E. (2017). Handlungsempfehlungen für Ökobilanzen biobasierter Produkte. Universität Stuttgart.

Becker, N., Mundersbach, M., Spierling, S., Krieg, H., Albrecht, S., & Endres, H.-J. (2018). Handlungsempfehlungen zur Ökobilanzierung von biobasierten Kunststoffen. BiNa, Förderkennzeichen FKZ 01UT1430A .

Bierwagen, G., & Tallman, D. (2001). Choice and measurement of crucial aircraft coatings system properties. *Progress in Organic Coatings*, 41(4), S. 201-216.

Broughton, W. R. (2012). Environmental Induced Failure in Fibre-Reinforced Plastics. In *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites: Criteria, Testing and Industrial Applications*. Woodhead Publishing Limited. doi:DOI:10.1016/B978-1-84569-750-1.50013-6

Campilho, R. (2015). *Natural Fiber Composites*. CRC Press.

Carbon Composites e.V. (2019). Faserverbundwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrt. Abgerufen am 08 2019 von <https://www.carbon-composites.eu/de/branchen/carbon-in-den-industrie-branchen>

Cherubini, F., & Strømman, A. (2011). Life Cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102, S. 437–451.

Dissanayake, N. P. (2011). Life Cycle Assessment of Flax Fibres for the Reinforcement of Polymer Matrix Composites. Dissertation of Doctoral Degree. . Plymouth: University of Plymouth.

Duflou, J., & Deng, Y. D. (2014). Comparative impact assessment for flax fibre versus conventional glass fibre reinforced composites: Are biobased reinforcement materials the way to go? *CIRP Annals—Manuf Technol*, 63, S. 45–48.

Dungani, R., Aditiawati, P., Islam, M. N., Aprilia, N. A., Hartati, S., Sulaeman, A., . . . Sutrisno. (2019). Evaluation of the effects of decay and weathering in cellulose-reinforced fiber composites. In *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (S. 173-210). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.

Ehrenstein, G., & Pongratz, S. (2007). *Beständigkeit von Kunststoffen*. Hanser Verlag.

Garcia, J. C., Matos, C., Aurambout, J.-P., & Manfredi, S. (2016). Environmental sustainability assessment of bioeconomy value chains. *Biomass and Bioenergy*, 89(4).

ISO 14040:2006: International Organization for Standardization, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework (ISO 14040:2006). (2006). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

ISO 14044:2006: International Organization for Standardization, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines (ISO 14044:2006). (2006). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

Karus, M., & Kaup, M. (2002). Naturfasern für die europäische Automobilindustrie. Abgerufen am 08 2019 von <http://nova-institut.de/pdf/studie-naturf-auto.pdf>

Karus, M., Eder, A., Dammer, L., Korte, H., Scholz, L., Essel, R., & Breitmayer, E. (Oktober 2014). Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC) – European and Global Markets 2012 and Future Trends. Von <http://www.bio-based.eu/markets> abgerufen

Lewis, T. (2013). A life cycle assessment of the passenger air transport system using three flight scenarios. Dissertation of Masteral Degree. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

Lila, M. K., Singh, B., Pabla, B., & Singh, I. (2017). Effect of environmental conditioning on natural fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today Proceedings*, 5(9), S. 17006- 17011.

Liptow, C., Carus, M., Lozanovski, A., Lindner, J.-P., Essel, R., Albrecht, S., & Held, M. (2017). Handlungsempfehlungen für die Durchführung und Umsetzung von Ökobilanzen für die stoffliche Nutzung von Biomasse im Spannungsfeld der Politik. *ÖkoStoff*.

Lopes, J. (2010). Life-cycle assessment of the airbus A330-200 aircraft. Universidade Técnica de Lisboa.

Lopez, J., Cooper, P. A., & Sain, M. (2005). Evaluation of Proposed Standard Test Method to Determine Decay Resistance of Natural Fiber Plastic Composites. *Forrest Products Journal*, 55(12).

MachineDesign: Navy Develops Environmentally Friendly Topcoat for Aircraft. (10. 6 2019). Von <https://www.machinedesign.com/materials/navy-develops-environmentally-friendly-topcoat-aircraft> abgerufen

Mahale, S., Rajamani, D., Revathi, A., Prakash, M., Srihari, S., & Rao, R. (2004). Hot-Wet Property Characterisation of a High-Temperature Cured Glass–Epoxy Composite in Immersion Environment. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*.

Mansor, M., Mastura, M., Sapuan, S., & Zainudin, A. (2019). The environmental impact of natural fiber composites through life cycle assessment analysis. In M. T. Mohammad Jawaaid (Hrsg.), *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.

Milà i Canals, L., Azapagic, A., Doka, G., & Jefferies, D. (2011). Approaches for Addressing Life Cycle Assessment Data Gaps for Bio-Based Products. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5).

Miller, S. A., Billington, S. L., & Lepech, M. D. (2016). Influence of carbon feedstock on potentially net beneficial environmental impacts of bio-based composites. *J Clean Prod*, 132, S. 266–278.

MRO-network: Aircraft Coatings: Not Just A Pretty Color. (16. 8 2018). Von <https://www.mro-network.com/painting-coatings/aircraft-coatings-not-just-pretty-color> abgerufen

Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., . . . Patel, M. (2013). Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Resources conversation and recycling*, 73, S. 211-228.

- Ribeiro, C., Ferreira, J. V., & Partidário, P. (2017). Life cycle assessment of a multi-material car component. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), S. 336-345.
- Rinberg, R., Svidler, R., Kroll, L., Nendel, W., Strohrmann, K., Hajek, M., & Endres, H.-J. (2016). Anwendungspotenzial von naturbasierten hybriden Leichtbaustrukturen in der Luftfahrt. *Deutscher Luft und Raumfahrtkongress 2016*, Braunschweig. Von urn:nbn:de:101:1-201610283534 abgerufen
- Scott, K., & Paul, K. (1974). Weathering Resistance of Plastics Composites. *J. Composites*, S. 201-208.
- Shetty, K., Srihari, S., & Manjunatha, C. M. (2016). A survey on the environmental effects on Aerospace Fibre Reinforced Plastic Composites. *Proceedings of 14th ISAMPE National Conference on Composites (INCCOM-14)*.
- Venkatachalam, V., Spierling, S., Endres, H.-J., & Siebert-Raths, A. (2018). Integrating Life Cycle Assessment and Eco-design Strategies for a Sustainable Production of Bio-based Plastics. In *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies* (S. 487-497).
- Y., D. (2014). Life cycle assessment of biobased fibre-reinforced polymer composites. Dissertation of Doctoral Degree. Katholieke Universiteit Leuven.
- A. Chaudhary; Xiaofei Sun; Jason Reese; J. Dahl (Hg.) (2017): Method to utilize aligned carbon fiber prepreg trim scrap for structural applications. *Automotive composites conference and exhibition*, 06-08.09.2017. SPE Automotive. Michigan, USA: Society of plastic engineers. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/METHOD-TO-UTILIZE-ALIGNED-CARBON-FIBER-PREPREG-TRIM-Chaudhary-Sun/0caebc535ec49501102fa470ff2e3ec7b9d1a7e3>.
- Abdel-Bary, Elsayed M. (2003): *Handbook of plastic films*. First Edition. 1 Band. hawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK: Rapra Technology Limited. Online verfügbar unter <https://www.scribd.com/doc/105233247/Handbook-of-Plastic-Films#>.
- AGC Chemicals Europe (2021): Bio-based Epichlorohydrin - AGC Chemicals Europe. Online verfügbar unter <https://www.agcce.com/bio-based-epichlorohydrin/>, zuletzt aktualisiert am 24.08.2021, zuletzt geprüft am 11.03.2024.
- Bledzki, Andrzej K.; Seidlitz, Holger; Goracy, Krzysztof; Urbaniak, Magdalena; Rösch, Janina J. (2021): Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composite Polymers-Review-Part 1: Volume of Production, Recycling Technologies, Legislative Aspects. In: *Polymers* 13 (2). DOI: 10.3390/polym13020300.
- Cargill (2023): coatings-brochure. Cargill Brochure_Guide for Coatings. Cargill Bioindustrial. Wayzata, MN 55391. Online verfügbar unter <https://www.cargill.com/bioindustrial/doc/1432234423382/coatings-brochure.pdf>, zuletzt geprüft am 03.06.2024.
- Chemanager (06.03.2024): Covestro-Materialien beim Solarrennen im australischen Outback | CHEManager. Online verfügbar unter <https://www.chemanager-online.com/news/covestro-materialien-beim-solarrennen-im-australischen-outback>, zuletzt geprüft am 06.03.2024.
- Chowdhury, Indraneel R.; Summerscales, John (2023): Cool-Clave—An Energy Efficient Autoclave. In: *Journal of Composites Science* 7 (2), S. 82. DOI: 10.3390/jcs7020082.
- DIN ISO 14040, 02.2021: DIN EN ISO 14040. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/37456.html>, zuletzt geprüft am 20.11.2022.

DIN ISO 14044, 02.2021: DIN EN ISO 14044. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/76122.html>, zuletzt geprüft am 20.11.2022.

Ekvall, Tomas (2020): Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. In: María José Bastante-Ceca (Hg.): Sustainability Assessment at the 21st century. [S.l.]: IntechOpen.

EU-JRC; EPLCA (2010): ILCD Handbook. General guide for Life Cycle Assessment. Detailed Guidance. Unter Mitarbeit von Joint Research Centre und Institute for Environment and Sustainability. Italy: Publication Office of the European Union, Luxemburg.

EU-JRC; EPLCA (2011): ILCD Handbook. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. based on existing environmental impact assessment models and factors. Unter Mitarbeit von Joint Research Centre und Institute for Environment and Sustainability. Italy: Publication Office of the European Union, Luxemburg.

European Commission; Directorate-General for Climate Action; Directorate-General for Energy; Directorate-General for Mobility and Transport; Vita, A. de; Capros, P. et al. (2021): EU reference scenario 2020 : energy, transport and GHG emissions : trends to 2050: Publications Office.

Fibrepreg (2022): Fibrepreg N 200 T EP 4.5S Bio 55 100. Product Data Sheet. Fibrepreg GmbH. Neu-Ulm, Germany.

Fibrepreg (2023): Fibrepreg N 120 UD EP 4.5S Bio 55 70. Product Data Sheet. Fibrepreg GmbH. Neu-Ulm, Germany.

Frischnecht, Rolf; Messmer, Annika (2016): Life Cycle Inventories of Air Transport Services. Unter Mitarbeit von SBB AG, BFE, BAFU, Swisscom AG und Öbu. Treeze. Uster. Online verfügbar unter https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Mobility/544-LCI-Air-Transport-Services-v2.0.pdf.

Hadar, Julia; Tirosh, Tsvi; Grafstein, Ora; Korabelnikov, Evgeny (1997): Autoclave Emissions—Hazardous or Not. In: Journal of the American Biological Safety Association 2 (3), S. 44–51. DOI: 10.1177/109135059700200309.

Hohmann, Andrea; Isik, Rahime (2022): Energetische Vermessung des Autoklavs am LLB. Projektgruppe "Funktionsintegrierter Leichtbau" FIL des ICT. Vermessung und Ergebnisse Einzelverbraucher. Fraunhofer ICT. Fraunhofer ICT, 2022, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

IEA, International Energy Agency (2017): The Future of Trucks. Implications for Energy and the Environment. Second. Unter Mitarbeit von Rebecca Gaghen, Kamel Ben Naceur und Jean-Francois Gagne. Hg. v. Adam Majoe. IEA, International Energy Agency.

Janssen, Matty; Gustafsson, Eva; Echardt, Linda; Wallinder, Johan; Wolf, Jens (2019): Life cycle assessment of lignin-based carbon fibres.

Johanning A; Scholz D. (Hg.) (2013): A First Step Towards the Integration of Life Cycle Assessment into Conceptual Aircraft Design. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart, 10.09.2013 - 12.09.2013. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. Online verfügbar unter https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_DLRK_13-09-10.pdf, zuletzt geprüft am 16.02.2024.

Krauklis, Andrey E.; Karl, Christian W.; Gagani, Abedin I.; Jørgensen, Jens K. (2021): Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. In: J. Compos. Sci. 5 (1), S. 28. DOI: 10.3390/jcs5010028.

Kuenen, Jeroen; Trozzi, Carlo (2019): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Unter Mitarbeit von Domenico Gaudioso, Silvia Brini, Neil Passant und Mike Woodfield. European Environment Agency. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/2-industrial-processes/2-d-l-other-solvent/2-d-3-d-coating>, zuletzt geprüft am 2023.

Leiden University (2016): CML-IA Characterisation Factors. CML-IA is a database that contains characterisation factors for life cycle impact assessment (LCIA) and is easily read by the CMLCA software program. Hg. v. Laurant van Oers. Institute of Environmental Sciences (CML). Leiden. Online verfügbar unter <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2024, zuletzt geprüft am 08.03.2024.

Morici, Elisabetta; Dintcheva, Nadka Tz (2022): Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites: Challenge and Opportunity. In: Polymers 14 (19). DOI: 10.3390/polym14194153.

Pham, Ha Q.; Marks, Maurice J. (2003): Epoxy Resins. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 6., completely rev. ed. Weinheim: Wiley-VCH.

Precision Fabrics Group: Nylon Release Peel Ply Fabric. Style 56137; Code 41661. Product Data Sheet. Richmond Aircraft Products. NC, USA, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora. Unter Mitarbeit von Öko-Institut e.V., Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität, Prognis AG und Wuppertal Institut. Hg. v. Alexandra Langenheld und Matthias Deutsch. Agora Energiewende (195/03-S-2020/DE | 48-2020-DE). Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland/>, zuletzt geprüft am 30.03.2023.

Ribeiro, Catarina; Ferreira, José V.; Partidário, Paulo (2007): Life cycle assessment of a multi-material car component. In: Int J Life Cycle Assess 12 (5), S. 336–345. DOI: 10.1065/lca2006.12.304.

Richmond Aircraft Products: E3760 Release Film. Clear, Translucent, and White Modified Halocarbon Polymer Release Films, Plain and Perforated. Product Data Sheet. Richmond Aircraft Products. California, USA, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Richmond Aircraft Products: RC-3000-10A and RC-3000-10A-FR. Polyester Felt Breather. Product Data Sheet. Richmond Aircraft Products. California, USA, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Richmond Aircraft Products: Vac-PAK Flashtape 5. High-Temperature Pressure-Sensitive Silicone Adhesive Polyester Tape. Product Data Sheet. Richmond Aircraft Products. California, USA, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Richmond Aircraft Products: Vac-PAK HS8171 Bagging Film. Co-Extruded High Temperature Nylon 6 Film. Product Data Sheet. Richmond Aircraft Products. California, USA, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Rivera, J. L.; Reyes-Carrillo, T. (2016a): A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops. In: Journal of Cleaner Production 115, S. 75–87. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.027.

Rivera, J. L.; Reyes-Carrillo, T. (2016b): A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops. In: Journal of Cleaner Production 115, S. 75–87. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.027.

Sphera Solutions GmbH (2023): LCA for Experts. LCA for Experts Software System and Database for Life Cycle Engineering. Windows Feature Experience Pack 120.2212.4190.0. Version 10.7.0.183. Online: Sphera Solutions GmbH. Online verfügbar unter <https://sphaera.com/life-cycle-assessment-lca-software/>, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Statistisches Bundesamt (2022): Beförderte Gütermenge und Beförderungsleistung (Straßengüterverkehr): Deutschland, Jahre, Verkehrsart, Verkehrswege. Statistisches Bundesamt Deutschland - GENESIS-Online: Ergebnis 46231-0003. Straßenverkehrstatistik, Deutschland. Unter Mitarbeit von Flensburg Kraftfahrt-Bundesamt. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis>, zuletzt aktualisiert am 30.03.2023, zuletzt geprüft am 30.03.2023.

Suzuki, Tetsuya; Takahashi, Jun (Hg.) (2005): Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars. The Ninth Japan International SAMPE Symposium. 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan, 29.11 - 02.12. The University of Tokyo. Tokyo: SAMPE.

Terry, Joseph S.; Taylor, Ambrose C. (2021): The properties and suitability of commercial bio-based epoxies for use in fiber-reinforced composites. In: J of Applied Polymer Sci 138 (20), Artikel 50417. DOI: 10.1002/app.50417.

The ecoinvent Association (2022): ecoinvent Databases. The ecoinvent Database is a Life Cycle Inventory (LCI) database that supports various types of sustainability assessments. Windows Feature Experience Pack 120.2212.4190.0. Version 3.8. Online: The ecoinvent Association. Online verfügbar unter <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Unipreg GmbH: CFK - Unidirektional Unipreg 150g/m² mit Panex 35 50k C-Fasern Harzgehalt: 36% Prepreggewicht: 234 g/m². Product Data. Product Data Sheet. Unipreg GmbH.

US DOE (2017): Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in U.S. Carbon Fiber Reinforced Polymer Manufacturing (Advanced Manufacturing Office, DOE/EE-1662). Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/1513860>.

17 Anhang

17.1 Hintergrund-Datensätze

Name of the Dataset	Geography	Reference Year	Temporal Validity	Source	GUID
bisphenol A production, powder	RER	2021		ecoinvent 3,8	{83922C6B-C640-4C60-B092-ED4C7D526F46}
Bulk waste truck, Euro 5, 20-26t gross weight / 10t payload capacity (urban area)	GLO	2022	2025	Sphera/ TH Bingen	{2EA14515-3BD4-47F1-9F02-A760C2DFFC4E}
Carbon Fiber (CF; from PAN; standard strength)	DE	2022	2025	Sphera MLC	{D2E4CB14-C5FA-49A3-B6C2-840A2B860D63}
Commercial waste (AT, DE, IT, LU, NL, SE, CH) on landfill	RER	2022	2025	Sphera MLC	{E378D67C-A042-413C-A151-6D39F0FA280D}
Commercial waste in municipal waste incineration plant	DE	2022	2025	Sphera MLC	{3459B855-8EB8-4288-BF7C-17B6AFA2B753}
Compressed natural gas (CNG)	GLO	2018	2024	Sphera MLC	{47E1AD7A-26D8-49A8-9912-FB514C063FB3}
Container ship, 5.000 to 200.000 dwt payload capacity, deep sea (Methyl bromide fumigation)	GLO	2022	2025	Sphera MLC	{0C89DC83-412A-46C3-B01D-63D0E1437D92}
Diesel mix at filling station	DE	2019	2025	Sphera MLC	{F63987F3-9C75-49B5-9B94-99203725D66A}
Diesel mix at refinery	RAS w/o CN	2019	2025	Sphera MLC	{F25EF8BE-D580-40E0-9633-07CEC5030DDC}
Electricity grid mix	DE	2019	2025	Sphera MLC	{48AB6F40-203B-4895-8742-9BDBEF55E494}
Electricity grid mix (2030) (EU Energy trends report)	DE	2020	2025	Sphera MLC	{CB02F27B-7589-401D-BFA3-9DE27DD1D080}
Electricity grid mix (2030) (KN2050, progressive)	DE	2020	2025	Sphera MLC	{99A7ECCF-BFE1-4C5E-8ADF-48FF3957AFCF}
Electricity grid mix (2050) (EU Energy trends report)	DE	2020	2025	Sphera MLC	{5578AB3E-1413-44AC-95D1-8A90E58B1988}
Electricity grid mix (2050) (KN2050, progressive)	DE	2020	2025	Sphera MLC	{1F3202A5-3C12-4783-A133-B22081102DCC}
Electricity sink	GLO	2022	2024	Sphera MLC	{B3AE9EFB-9ABD-44A4-9F07-071338A4AF9E}

Epoxy Resin (EP) Mix	DE	2022	2025	Sphera MLC	{50125A08-978E-4156-BCC0-2D13EC3B49C7}
epoxy resin production, liquid	RER	2021		ecoinvent 3,8	{75D1F283-B81A-43EB-9DF3-AAB3D8DA1D75}
Flax long fibre	FR	2022	2025	Sphera MLC	{F0E27392-C4A2-4593-8603-C9F2A5274F9E}
Green electricity grid mix (production mix) (2020)	DE	2019	2025	Sphera MLC	{67903784-DCAC-441F-9DB7-3CF6820D7698}
Heavy fuel oil at refinery	RAS w/o CN	2019	2025	Sphera MLC	{B5A8F50B-3EF3-43E1-AA88-35BBF3014402}
Kraftliner 2018; by-products: tall oil, turpentine; cut-off EoL; [mass allocation]	RER	2022	2025	Sphera/FEFCO	{DB37FA90-370B-4B0A-A49A-5D0D0F0382F7}
Kraftliner 2018; by-products: tall oil, turpentine; substitution EoL; [mass allocation]	RER	2022	2025	Sphera/FEFCO	{6AC37D3C-CAEB-4216-9F1D-C78C1B8C772B}
Lubricants at refinery	DE	2019	2025	Sphera MLC	{5CB700AC-6476-4CE3-A0CE-8486AAEC945B}
Lubricants at refinery	RER	2019	2025	Sphera MLC	{BDFAC21C-7415-46AF-ACBC-8916CB95B9B8}
market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state	RER	2021		ecoinvent 3,8	{7C6AB71D-AAAE-46E1-9E81-8CECB046425D}
market for alkyd paint, white, without water, in 60% solution state	RER	2021		ecoinvent 3,8	{04F383E0-7130-4D01-BE34-065373CB609A}
market for chemical factory, organics	GLO	2021		ecoinvent 3,8	{98590248-C0A7-45D6-92F0-A8FE4935BC2F}
market for heat, from steam, in chemical industry	RER	2021		ecoinvent 3,8	{0E80A34F-8EBC-452B-A524-5A240080B763}
market for nitrogen, liquid	RER	2021		ecoinvent 3,8	{842AA756-53B5-40DA-9B9D-1A51ED467CB4}
market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	GLO	2021		ecoinvent 3,8	{58A9DBB7-224A-425F-960B-E5DF009DC704}
market for wastewater, average	RoW	2021		ecoinvent 3,8	{52CF1212-92F4-4153-968A-E18874D64871}
market for wastewater, average	CH	2021		ecoinvent 3,8	{E9444F90-D06F-416F-8C03-4AE0B8DF716D}
market for wastewater, average	Europe without witzerland	2021		ecoinvent 3,8	{F31D648C-843C-4EE1-8FE0-5D891220E1C9}
market group for heat, district or industrial, other than natural gas	RER	2021		ecoinvent 3,8	{B67A61DE-294C-4182-80FA-8F846FCC7EBB}

market group for tap water	RER	2021		ecoinvent 3,8	{8435CF4E-C423-4A06-9E44-E65030745268}
Methyl bromide	DE	2022	2025	Sphera MLC	{4584335A-E81A-4244-A6A9-97E0FC267683}
Natural gas mix	DE	2019	2025	Sphera MLC	{297D0F72-A589-4624-A088-B33E12ECCA15}
Plastic Film (PE, PP, PVC)	GLO	2022	2025	Sphera MLC	{7094F46A-2202-44E5-A1CC-8E939BE9FF6B}
Polyamide 6.6 fibres (PA 6.6)	RER	2022	2025	Sphera MLC	{DB009019-338F-11DD-BD11-0800200C9A66}
Polyamide 6.6 granulate (PA 6.6) (HMDA from acrylonitrile)	DE	2022	2025	Sphera MLC	{5927ADEA-71FF-442C-9468-9CBC05748253}
Polyester Resin (unsaturated) (UP)	DE	2022	2025	Sphera MLC	{B6801F51-3D8E-47D1-96BB-DBBEA7B14E16}
Polyethylene film (PE-LD)	RER	2005	2012	Plastics Europe	{FB2AA755-D7C6-44A8-9133-B9944FA58C2D}
Polyethylene high density granulate (HDPE/PE-HD) mix	DE	2022	2025	Sphera MLC	{7367ACAB-4CE1-4ECB-AEBF-29A2EA20BD1D}
Pressure sensitive adhesive based on natural rubber (approximation)	RER	2022	2025	Sphera MLC	{5CF83482-A16F-4CB3-9C52-ECE69DAAC4CB}
Process steam from natural gas 90%	DE	2019	2025	Sphera MLC	{929464EA-4536-4462-8964-B1C5B71F38FE}
Simple 2-component epoxy adhesive (approximation)	DE	2022	2025	Sphera MLC	{326D32E2-3478-41A7-984E-39236C0FE8EC}
Steam/thermal energy sink (MJ)	GLO	2022	2025	Sphera MLC	{DE170D70-3609-4398-90D5-50B51FA63F7B}
Tap water from groundwater	DE	2022	2025	Sphera MLC	{A659D96B-23C8-4ABF-8424-3E0C650E0DC3}
Textile Manufacturing - Woven Fabric	GLO	2014	2020	Cotton Inc	{33FC2CA1-F73E-4B8D-B48A-8B0847BB06A3}
Thermal energy from natural gas	DE	2019	2025	Sphera MLC	{009F27A6-F336-4200-81C0-28E4FA5638A4}
Thermal energy from natural gas	RER	2019	2025	Sphera MLC	{CFE8972E-6B51-4A17-B499-D78477FA4294}
Truck, 12-20t gross weight / 9.3t payload capacity	GLO	2022	2025	Sphera MLC	{21F3293D-B1A5-45C6-B97A-53198413BD5D}
Truck, Euro 0 - 6 mix, 12 - 14t gross weight / 9,3t payload capacity	GLO	2022	2025	Sphera MLC	{62991AAC-20BB-4711-B6B2-DBED8DB05414}

Truck, Euro 0 - 6 mix, gross weight 12 -14 t / 9.3t payload capacity	GLO	2022	2025	Sphera MLC	{72272033-95AA-4420-9004-C0AB1CDCD27E}
turpentine to generic market for solvent for paint	GLO	2021		ecoinvent 3,8	{E4DA0E70-59E6-49C4-BBF8-AA452572E927}
Waste EOL if not recycled distribution	GLO	2022	2024	Sphera MLC	{7994E3D8-1E09-47FA-A8CF-5ABA5AE991CF}
Water (desalinated; deionised)	DE	2022	2025	Sphera MLC	{300E0734-6B74-4225-A078-D64108783DA3}
Wax / Paraffins at refinery	DE	2019	2025	Sphera MLC	{8C3C78AD-5370-43B5-9EC6-F699502B51FD}

17.2 Prepregdatensammlung

Sr. No.	Company name	Contact name / Link	Contact location	Contact (email / phone)	Contacted date	Reply from	Note
1	Albany, US	https://www.albint.com/en-us/company/Pages/Contact.aspx		Contact form	01.02.2023		
2	Albarrie	https://albarrie.com/contact/	Ontario, Canada	7.057.370.551	01.02.2023		
3	APCM	David Young	Plainfield, Connecticut, USA	dyoung@prepregs.com	21.11.2022	David Young	Technical properties available. No environmental data available
4	Arisawa	https://www.arisawa.co.jp/en/inquiry/index.html	Japan	denzetsu@arisawa.co.jp fukugouzai@arisawa.co.jp	01.02.2023		
5	Axiom	https://axiommaterials.com/contact/	Santa Anna, California, USA	info@axiommaterials.com	01.02.2023		
6	BASF	https://aerospace.basf.com/contact-form.html	USA, Germany	contact form	01.02.2023		
7	Celanese	https://www.celanese.com/	USA	contact form	01.02.2023		

8	Composites One	https://www.compositesone.com/	USA	Contact form	01.02.2023		
9	Cytec Solvay Group	https://www.solvay.com/en/form/sustainability	Gloabl	Contact form	01.02.2023		
10	Delta-Tech	https://www.delta-tech.it/contacts/	Italy	info.delta.mb@delta.toray	03.02.2023		
11	DuPont	https://www.dupont.com/	US, Global	contact form	03.02.2023		
12	Georgia Pacific Chemicals / Bakelite	https://bakelite.com/contact	US, Global	Contact form	03.02.2023		
13	Gurit Holding	https://www.gurit.com/	Global, Switzerland	regulatory@gurit.com	03.02.2023		
14	Hexcel	https://www.hexcel.com/Contact/	Global, Germany		07.02.2023	Awaiting another call	
15	INEOS	https://www.ineos.com/	Global	emeacustomer.composites@ineos.com	07.02.2023		
16	Lanxess	https://lanxess.com/en/Products-and-Solutions/Brands/TepeX	Germany	sebastian.roehrig@lanxess.com TepeX contact form	07.02.2023		
17	Lincoln Composite Materials	https://www.lcmaterials.com/contacts.html	California, US	sales@lcmaterials.com Contact Form	07.02.2023		
18	Maverick	https://maverickmolding.com/contact/	Ohio, US	info@maverickmolding.com	07.02.2023		
19	Mitsubishi	https://mccfc.com/contact/	California, US	contact form	07.02.2023		
20	Park Electrochemical	https://parkaerospace.com/locations/	Kansas, US	pac_cs@parkaerospace.com pkny@parkaerospace.com	07.02.2023		
21	Quadrant / now MCAM	https://www.mcam.com/en/contact	Global	Contact form	08.02.2023		

22	Renegade	http://www.renegadematerials.com/	Ohio, US	JLewis@renegadematerials.com Contact Form	08.02.2023	Jill Lewis	No data available.
23	Revchem Composites	https://revchem.com/contact-us/	California, US	Contact form	08.02.2023		
24	SGL Group	https://www.sglcarbon.com/en/	US, DE	info@sglcarbon.com contact form	08.02.2023	Dr. Thomas Meinhardt	Can't share data
25	Solvay	https://www.solvay.com/en/form/product-inquiry?market_application=COMAR00041	Global	Contact form	08.02.2023		
26	Strata	https://www.strata.ae/	UAE	info@strata.ae			
27	SBHPP / Sumitomo Bakelite	https://www.sbhpp.com/	Global	Contact form	08.02.2023		
28	Teijin	https://www.teijin.com/form/	Global	Contact form	08.02.2023	Same as Renegade, until further update	
29	Tencate / now Toray	https://www.toraycma.com/contact-us/	USA	Contact form	08.02.2023		
30	Victrex	https://www.victrex.com/	EU, UK	info@victrex.com Contact form	08.02.2023	Frank Schemm	Data not available
31	Voith	https://voith.com/corp-en/index.html	DE, Global	Contact form	08.02.2023		
32	Zoltek / Toray	https://zoltek.com/	US, Global	Contact form	08.02.2023		

17.3 Biobasiertes Epoxidharz

Sr. No.	Company name	Product Name	Link	Contact name	Contact location	Contact (email / phone)	Contacted date	Reply
1	Epinity Chemicals, Advanced Biochemicals Thailand	Epinity	https://epinitychem.com/	Teerawat Inpota Prakit Sangthonganoi	Thailand	teerawat.inpo@agc.com prakit.sang@agc.com	16.11.2022	NDA signed, Data delivered.
2	Long Train Sustainability (Entropy Resins LCA report)	Entropy	https://longtrailsustainability.com/	Melissa Hamilton Shelly Severinghaus	Huntington, Vermont, USA	Melissa@ltsexperts.com Shelly@ltsexperts.com	13.02.2023	
3	Entropy Resins	Entropy One	https://entropyresins.com/	contact form	USA		13.02.2023	
4	Helios Resins	?	https://www.resinshelios.com/	contact form	Slovenia	info@resinshelios.com	13.02.2023	
5	Sicomin Resins	Green Poxy	http://sicomin.com/en	contact form	France	info@sicomin.com	13.02.2023	
6	Wessex Resins	Pro Set?	https://wessexresins.co.uk/	contact form	UK	techinfo@wessex-resins.com	13.02.2023	Reply from Colin. Awaiting another reply.
7	Chang Chun Group	?	https://www.ccp.com.tw/ccpweb.nsf/HomepageEN?OpenAgent	contact form	Teipei, Taiwan		13.02.2023	
8	Resin Research	Bio science epoxy systems	https://resinresearch.net/	contact form	USA, UK	joe@resinresearch.net	13.02.2023	
9	Ecoxy	?	https://ecoxy.eu/	contact form	France		13.02.2023	
10	Epoxy 2.0	NaturePoxy/OceanPoxy	https://epoxy2.com/	contact form	?	info@epoxy2.com	13.02.2023	
11	Pond Global	?	https://pond.global/	contact form	Denmark	hello@pond.global	13.02.2023	No related products
12	Kukdo Chemicals	?	https://www.kukdo.com/en/index.do	contact form	Korea, India	kdc@kukdo.com	13.02.2023	

13	Bitrez	?	https://www.bitrez.com/contact/	contact form	UK		13.02.2023	Paul: No LCA data available
14	Change Climate		https://www.changeclimate.com.au/	Sean Steed, CEO	Australia	jeff@changeclimate.com.au	13.02.2023	Sean Steed: Interested in partnership
				Jeff Dower		sean@changeclimate.com.au		
15	Huntsmann Inc	?	https://www.huntsman.com/	contact form	Global	Info@bm-chemie.de	13.02.2023	Online Meeting on 16.03
						Contact_India@huntsman.com		Only bio-attributed resins offered
16	Alpas	?	http://alpas.eu/	contact form	Italy	info@alpas.eu	13.02.2023	
17	Nagase Chemtex	?	https://www.nagasechemtex.co.jp/en/index.html	contact form	Japan		13.02.2023	
18	Leuna Harze	?	https://www.leuna-harze.de/en/	contact form	Germany		13.02.2023	
19	Spolchemie	?	https://www.spolchemie.cz/en/	contact form	Czech Republic		13.02.2023	
20	Specific Polymers	?	https://specificpolymers.com/	contact form	France		13.02.2023	
21	Stahl	?	https://www.stahl.com/	contact form	Netherlands	Ms./Mrs. Mi Yan	13.02.2023	
22	ATL Composites	?		contact form	Australia		13.02.2023	

17.4 Parameterkonfiguration für die Szenarios

Gruppe 1: Material + Energie							
Cradle-to-Gate + End-of-life							
Alias	Object	Parameter	Baseline: Tür D	Status Quo	InteReSt	Lignin 2030	Serienfertigung 2050
Autoclave_el ec	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Autoclave_el ec	16,4	21	39,6	21	10,66 [kwh] Amount of electricity required to cure 1 door (inner+outer trim)
bio_epoxy	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	bio_epoxy	1	0	0	1	1 [0,1] binary switch; 0=no; 1=yes ! only one of the three parameters should be set to 1.
fossil_epoxy	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	fossil_epoxy	0	1	1	0	0 [0,1] binary switch; 0=no; 1=yes ! only one of the three parameters should be set to 1.
supersap_epoxy	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	supersap_epoxy	0	0	0	0	0 [0,1] binary switch; 0=no; 1=yes ! only one of the three parameters should be set to 1.
prepreg_precut	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	prepreg_precut	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3 [Decimal %] waste generated when cutting the prepreg from the prepreg rolls. Default 0,4
CF_BD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	CF_BD	0,105	0,874	0,15425	0	0,105 [kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
CF_tow	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	CF_tow	0,04	0,04	0	0	0,04 [kg] amount of CF tow required for 1 door (inner + outer panels)
CF_UD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	CF_UD	0,045	0,623	0	0	0,045 [kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
Flax_BD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Flax_BD	1,01	0	2,4112	0	1,01 [kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
Flax_UD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Flax_UD	0,75	0	0	0	0,75 [kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)

Lignin	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Lignin	0	0	0	1,55	0	[kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
door_p anels	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	door_p anels	0,95	0,744	1,074	0,744	0,95	[kg] weight of the inner + outer door panels - measured - Jana Diekmann Invent
glued_ door	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	glued_ door	1,125	0,92	1,25	0,92	1,125	[kg] Final weight of the glued door - uncoated - measured - Lukas TUM
paint_ 2K_wei lbu	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_ 2K_wei lbu	1	0	0	1	1	[0, 1, binary] Paint decision switch. Only one of the three paints can be one.
paint_ alkyd_ H2O	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_ alkyd_ H2O	0	0	0	0	0	[0, 1, binary] Paint decision switch. Only one of the three paints can be one.
paint_ alkyd_ sol	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_ alkyd_ sol	0	1	1	0	0	[0, 1, binary] Paint decision switch. Only one of the three paints can be one.
paint_ input	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_ input	0,909	0,909	0,909	0,909	0,218	[kg] amount of paint input needed during the painting process - measured by Christoph Vögel - IfBB
painte d_door	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	painte d_door	1,243	1,04	1,37	1,04	1,24	[kg] weight of final painted door
elec_2 030_e u	Electricity Scenarios	elec_2 030_e u	0	0	0	1	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_2 030_kn	Electricity Scenarios	elec_2 030_kn	0	0	0	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_2 050_e u	Electricity Scenarios	elec_2 050_e u	0	0	0	0	1	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_2 050_kn	Electricity Scenarios	elec_2 050_kn	0	0	0	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_gr een	Electricity Scenarios	elec_gr een	0	0	0	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_gr id	Electricity Scenarios	elec_gr id	1	1	1	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios

CNG	Transportation Scenarios	CNG	0	0	0	1	0	Binary switch for Transportation scenarios
Diesel	Transportation Scenarios	Diesel	1	1	1	0	0	Binary switch for Transportation scenarios
Distance	Transportation Scenarios	Distance	270	270	270	310	391	[km] Parameter to pass value to Transport plans for scenarios
Electric	Transportation Scenarios	Electric	0	0	0	0	1	Binary switch for Transportation scenarios
incin_w_cred it	Waste Scenarios	incin_w_cred it	0	0	0	1	1	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery
incin_wo_cre dit	Waste Scenarios	incin_wo_cre dit	1	1	1	0	0	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery
landfill	Waste Scenarios	landfill	0	0	0	0	0	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery
Use Hours	Subset	Use Hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours	
Cradle-to-Grave								
Alias	Object	Parameter	Baseline: Tür D	Status Quo	InteReSt	Lignin 2030	Serienfertigung 2050	
Autoclave_el ec	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Autoclave_el ec	16,4	21	39,6	21	10,66	[kwh] Amount of electricity required to cure 1 door (inner+outer trim)
bio_epoxy	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	bio_epoxy	1	0	0	1	1	[0,1] binary switch; 0=no; 1=yes ! only one of the three parameters should be set to 1.
fossil_epoxy	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	fossil_epoxy	0	1	1	0	0	[0,1] binary switch; 0=no; 1=yes ! only one of the three parameters should be set to 1.
supersap_epoxy	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	supersap_epoxy	0	0	0	0	0	[0,1] binary switch; 0=no; 1=yes ! only one of the three parameters should be set to 1.
prepreg_precut	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	prepreg_precut	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	[Decimal %] waste generated when cutting the prepreg from the prepreg rolls. Default 0,4

CF_BD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	CF_BD	0,105	0,874	0,15425	0	0,105	[kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
CF_to_w	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	CF_to_w	0,04	0,04	0	0	0,04	[kg] amount of CF tow required for 1 door (inner + outer panels)
CF_UD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	CF_UD	0,045	0,623	0	0	0,045	[kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
Flax_BD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Flax_BD	1,01	0	2,4112	0	1,01	[kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
Flax_UD	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Flax_UD	0,75	0	0	0	0,75	[kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
Lignin	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	Lignin	0	0	0	1,55	0	[kg] amount of prepreg needed in layup for one door (inner + outer panels)
door_panels	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	door_panels	0,95	0,744	1,074	0,744	0,95	[kg] weight of the inner + outer door panels - measured - Jana Diekmann Invent
glued_door	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	glued_door	1,125	0,92	1,25	0,92	1,125	[kg] Final weight of the glued door - uncoated - measured - Lukas TUM
paint_2K_weilbu	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_2K_weilbu	1	0	0	1	1	[0, 1, binary] Paint decision switch. Only one of the three paints can be one.
paint_alkyd_H2O	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_alkyd_H2O	0	0	0	0	0	[0, 1, binary] Paint decision switch. Only one of the three paints can be one.
paint_alkyd_sol	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_alkyd_sol	0	1	1	0	0	[0, 1, binary] Paint decision switch. Only one of the three paints can be one.
paint_input	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	paint_input	0,909	0,909	0,909	0,909	0,218	[kg] amount of paint input needed during the painting process - measured by Christoph Vögel - IfBB

painte d_door	DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg> - 'DE: Helicopter Door - Cradle to Grave + Scenarios IfBB <LC>'. 'DE: Prepreg in Autoclave - Tür D - Invent GmbH IfBB <Mfg>'	painte d_door	1,243	1,04	1,37	1,04	1,24	[kg] weight of final painted door
elec_2 030_e u	Electricity Scenarios	elec_2 030_e u	0	0	0	1	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_2 030_kn	Electricity Scenarios	elec_2 030_kn	0	0	0	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_2 050_e u	Electricity Scenarios	elec_2 050_e u	0	0	0	0	1	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_2 050_kn	Electricity Scenarios	elec_2 050_kn	0	0	0	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_gr een	Electricity Scenarios	elec_gr een	0	0	0	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
elec_gr id	Electricity Scenarios	elec_gr id	1	1	1	0	0	[0=no,1=yes] Value passing to Binary switch for electricity switch scenarios
CNG	Transportation Scenarios	CNG	0	0	0	1	0	Binary switch for Transportation scenarios
Diesel	Transportation Scenarios	Diesel	1	1	1	0	0	Binary switch for Transportation scenarios
Distanc e	Transportation Scenarios	Distanc e	270	270	270	310	391	[km] Parameter to pass value to Transport plans for scenarios
Electric	Transportation Scenarios	Electric	0	0	0	0	1	Binary switch for Transportation scenarios
incin_ w_cred it	Waste Scenarios	incin_ w_cred it	0	0	0	1	1	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery
incin_ wo_cre dit	Waste Scenarios	incin_ wo_cre dit	1	1	1	0	0	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery
landfill	Waste Scenarios	landfill	0	0	0	0	0	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery
Use Hours	Subset	Use Hours	1000 hours	1000 hours	1000 hours	1000 hours	1000 hours	
Gruppe 2: Energie im Fordergrundsystem								
Cradle-to-Gate + End-of-life								

Alias	Object	Parameter	Baseline	Grünstrom	EU 2030	KN 2030	EU 2050	KN 2050
elec_2030_eu	Electricity Scenarios	elec_2030_eu	0	0	1	0	0	0
elec_2030_kn	Electricity Scenarios	elec_2030_kn	0	0	0	1	0	0
elec_2050_eu	Electricity Scenarios	elec_2050_eu	0	0	0	0	1	0
elec_2050_kn	Electricity Scenarios	elec_2050_kn	0	0	0	0	0	1
elec_green	Electricity Scenarios	elec_green	0	1	0	0	0	0
elec_grid	Electricity Scenarios	elec_grid	1	0	0	0	0	0
Use Hours	Subset	Use Hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours
Gruppe 3: Transport im Fördergrundsystem								
Cradle-to-Gate + End-of-life								
Alias	Object	Parameter	Baseline	Average, CNG	Worst case, Diesel	Worst case, CNG	2050 Forecast, Average, Electric	2050 Forecast, Worst case, Electric
CNG	Transportation Scenarios	CNG	0	1	1	1	0	0
Diesel	Transportation Scenarios	Diesel	1	0	0	0	0	0
Distance	Transportation Scenarios	Distance	270	270	1000	1000	391	1000
Electric	Transportation Scenarios	Electric	0	0	0	0	1	1
elec_2030_eu	Electricity Scenarios	elec_2030_eu	0	0	0	0	0	0
elec_2030_kn	Electricity Scenarios	elec_2030_kn	0	0	0	0	0	0

elec_2050_eu	Electricity Scenarios	elec_2050_eu	0	0	0	0	1	1
elec_2050_kn	Electricity Scenarios	elec_2050_kn	0	0	0	0	0	0
elec_green	Electricity Scenarios	elec_green	0	0	0	0	0	0
elec_grid	Electricity Scenarios	elec_grid	1	1	1	1	0	0
Use Hours	Subset	Use Hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours	0 hours
Gruppe 4: Abfallverwertung im Fordergrundsystem								
Cradle-to-Gate + End-of-life								
Alias	Object	Parameter	Depo nie	Verbr ennu ng	Energiegewinnu ng			
incin_w_cred it	Waste Scenarios	incin_w_cred it	0	0	1	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery		
incin_wo_cred it	Waste Scenarios	incin_wo_cred it	0	1	0	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery		
landfill	Waste Scenarios	landfill	1	0	0	[0...1] share of waste going to incineration with energy recovery		
Use Hours	Subset	Use Hours	0 hours	0 hours	0 hours			