

HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ÖKOBILANZIERUNG VON LEICHTBAUSTRUKTUREN

Jens Bachmann, DLR SY-ECO

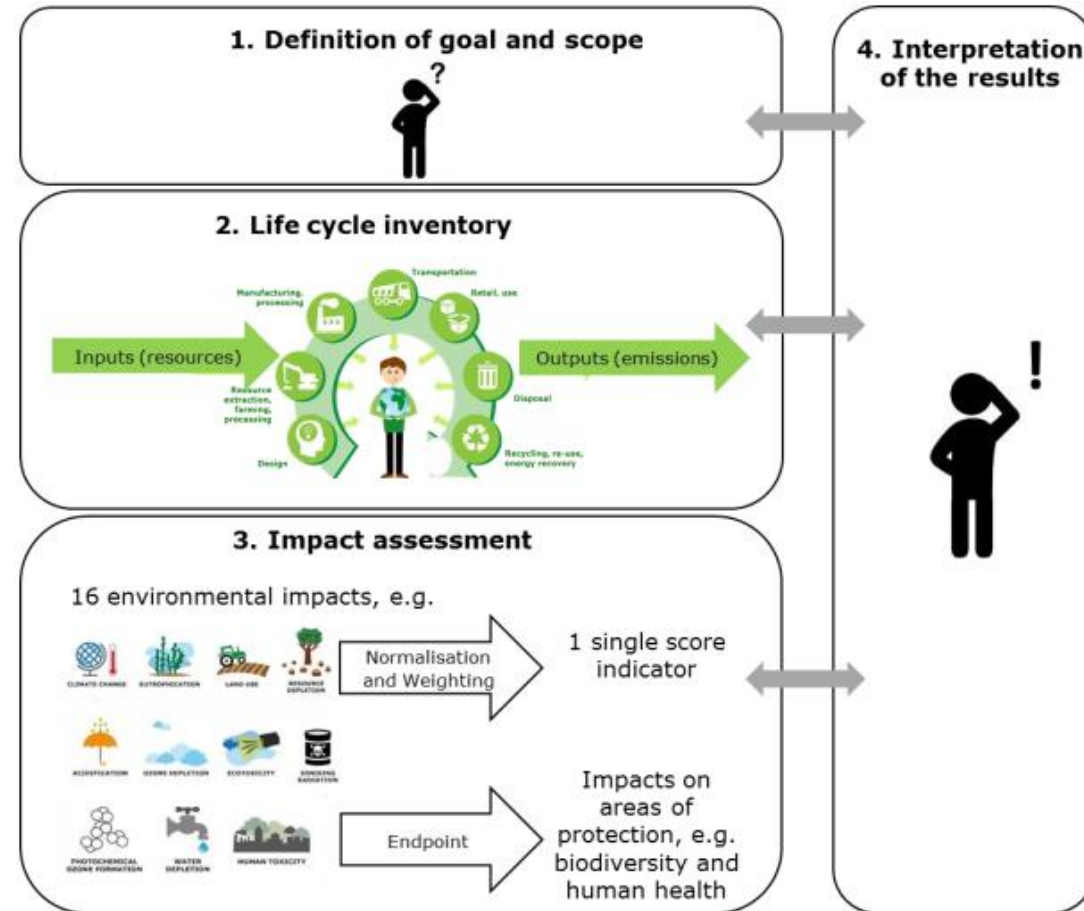
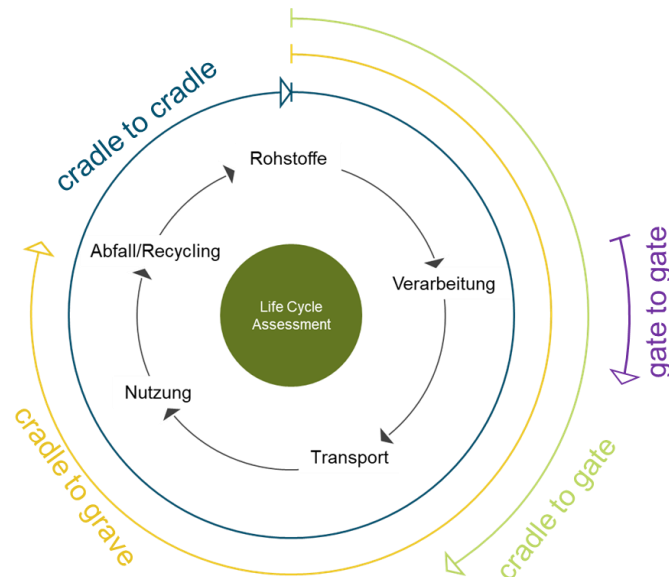
26. September 2024

Wissenschaftstag – Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz durch Systemleichtbau



Life Cycle Assessment, LCA Ökobilanz

- ISO 14040/44
- ILCD, PEF, OEF, ...
- PCR, EPD, CSR, ...
- ...

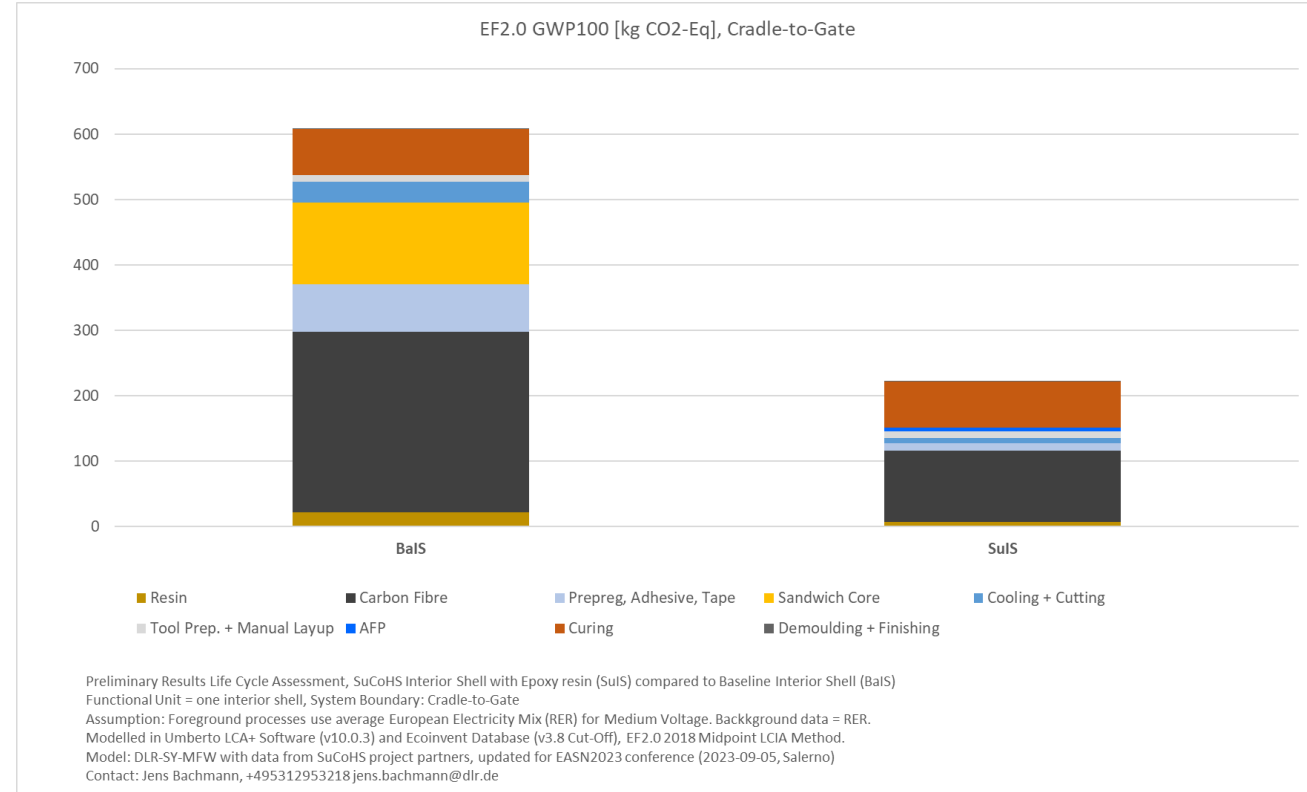
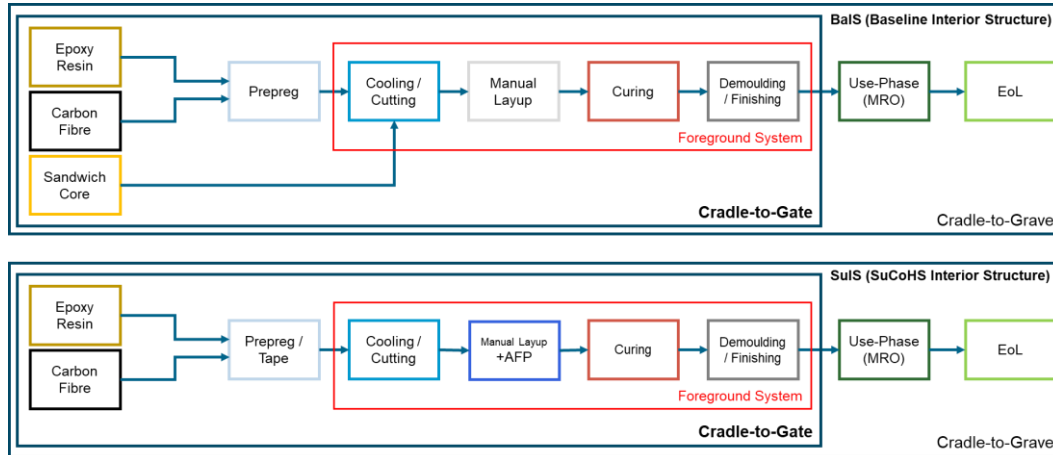


Sala S., Beylot A., Corrado S., Crenna E., Sanyé-Mengual E, Secchi M. (2019) Indicators and Assessment of the environmental impact of EU consumption. Consumption and Consumer Footprint for assessing and monitoring EU policies with Life Cycle Assessment, Luxembourg: Publications Office of the European Union, ISBN 978-92-79-99672-6, doi:10.2760/403263, JRC114814

SuCoHS Sustainable and cost efficient high-performance composite structures demanding temperature and fire resistance

Industrial Demonstration and Use-Cases

(Preliminary) LCIA Interior Shell, Cradle-to-Gate



- Functional Unit: Finished Interior Shell
- Foreground data: Different TRL level, partly laboratory data
- Background data: Ecoinvent v3.8 cut-off (RER), Literature
- Software: Umberto LCA+ Version 10.0 (build 10.0.3.200)
- LCIA Method: EF2.0, all categories



LCI

Example 1: Carbon Fibres

- Today: PAN based Carbon Fibres
 - Different grades of CF, e.g. HT, HM
- No primary data available
- No vCF data in Ecoinvent
 - Other databases only aggregated, if any...

- Published LCIA results?
 - e.g. „Carbon-Footprint“ in EPD

- Literature?
 - Wide range of energy consumption reported
 - Specifications often unclear
- Cradle-to-Gate or Gate-to-Gate LCI?
 - Precursor Line included?
 - What form of energy?
 - Equipment / Periphery included?
 - ...

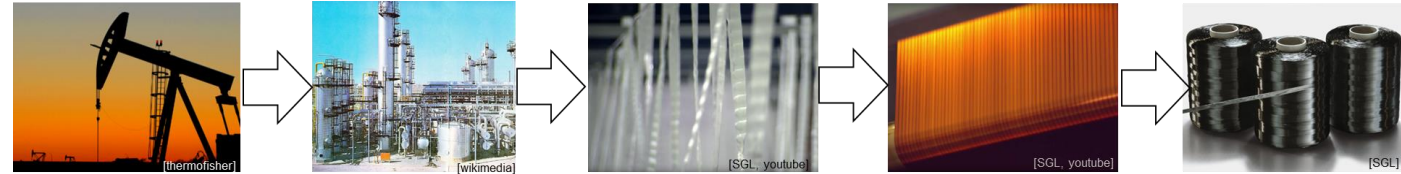


Table 1: Reported energy intensities for PAN-based precursor manufacturing

	Das, 2011	Liddell et al., 2016	Liddell et al., 2017
Polymerisation [MJ/ kg PAN]		N/A	199
Spinning [MJ/ kg PAN]		N/A	195
Total [MJ/ kg PAN]	245	394	312
System boundary	cradle-to-gate, primary energy	gate-to-gate	gate-to-gate

Table 2: Reported energy intensities for carbon fibre manufacturing

	De Veigt and Haije, 1997	Suzuki and Takahashi, 2005b	Griffing and Overcash, 2009	Das, 2011	Liddell et al., 2016	Liddell et al., 2017	Arnold et al., 2018
Stabilization [MJ/ kg CF]	N/A	N/A	N/A	N/A	316	195	N/A
Carbonization [MJ/ kg CF]	N/A	N/A	4.47	N/A			N/A
Surface Treatment [MJ/ kg CF]	N/A	N/A	0.05	N/A	25	24	N/A
Total [MJ/ kg CF]	7.56	286-478	4.52	704	341	219	255.02
Fibre properties	N/A	N/A	high strength	N/A	N/A	N/A	N/A
System boundary	gate-to-gate	N/A	gate-to-gate	primary energy	gate-to-gate	gate-to-gate	gate-to-gate

Table 1 Total energy consumption per kg carbon fibre

Source	Total Energy [MJ/kg]	Data origin	Comment
<i>Arnold et al. [16]</i>	255	Experimental data, simulation	Heat and electricity
<i>Das [3]</i>	459	Experimental data, databases	Little details about system
<i>Suzuki et al. [17]</i>	286	unclear	No details about system
<i>Liddell et al. [18]</i>	219	Experimental data, databases, estimations	US industry average
<i>Liddell et al. [19]</i>	195	Experimental data, databases, estimations	“State of the art” average
<i>Dér et al. [15]</i>	1150	Experimental data	Incl. peripheral processes

[Groetsch et al. 2021] <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.146>

VCF

- Material conversion yield of PAN precursor to VCF is 58%. Electricity, natural gas, and steam consumption include 150 MJ, 178 MJ and 31.4 kg per kg VCF produced.⁵ Emission data for CF production obtained from literature.⁶

[Meng et al. 2021] <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05462>

[Dér et al. 2021] <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127105>

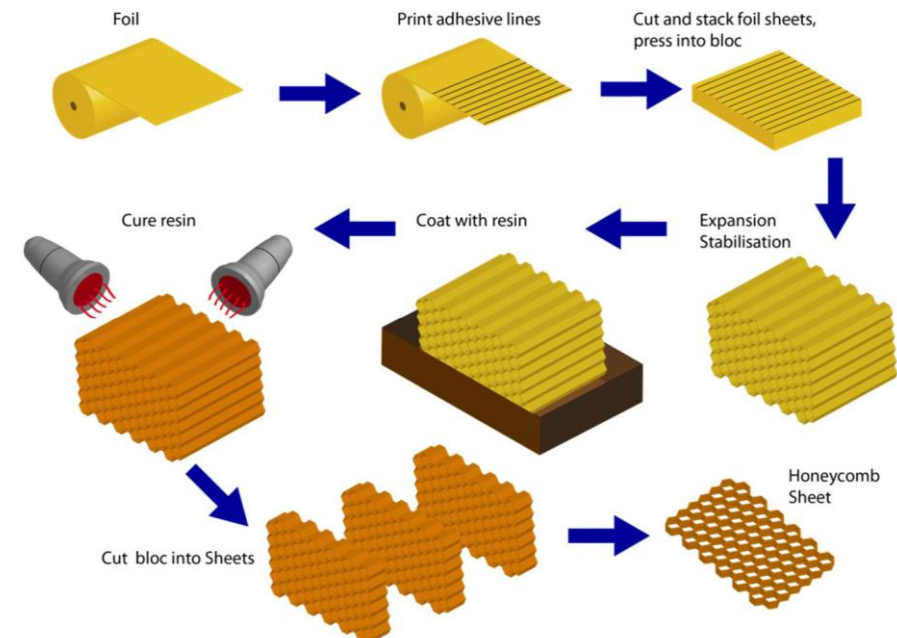
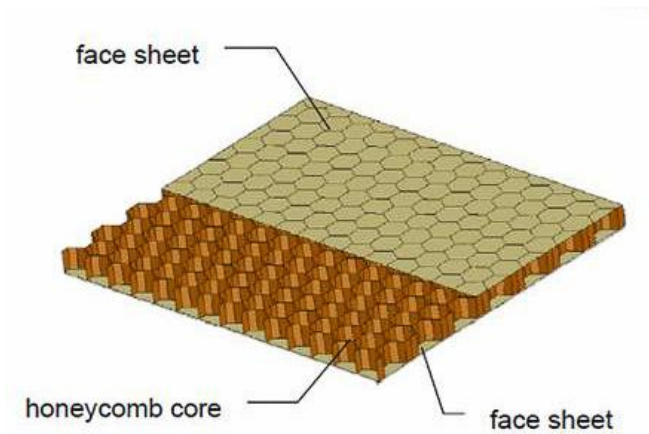
LCI

Example 2: Sandwich Core

- Aramid fibre and phenolic resin
- Energy intensive production process

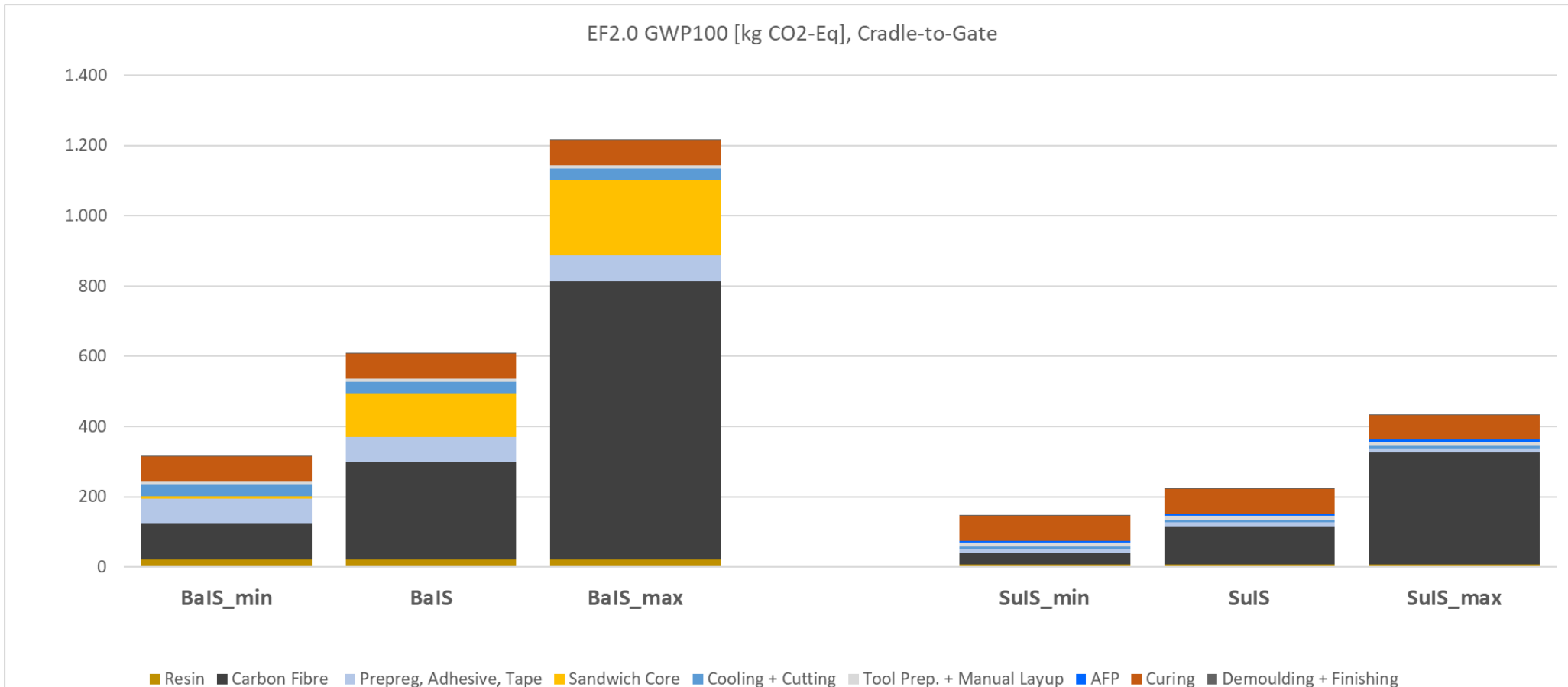
- No data in any LCA database

- Literature survey
 - Example
 - Proxy fibre: Nylon 6-6
 - Other processes neglected!



SuCoHS

Sensitivity Analysis for Carbon Fibre and Sandwich Core



Preliminary Results Life Cycle Assessment, SuCoHS Interior Shell with Epoxy resin (SuIS) compared to Baseline Interior Shell (BaIS)

Functional Unit = one interior shell, System Boundary: Cradle-to-Gate

Assumption: Foreground processes use average European Electricity Mix (RER) for Medium Voltage. Background data = RER.

Modelled in Umberto LCA+ Software (v10.0.3) and Ecoinvent Database (v3.8 Cut-Off), EF2.0 2018 Midpoint LCIA Method.

Model: DLR-SY-MFW/ECO with data from SuCoHS project partners, modified CF and Sandwich Core data for EASN2023 conference (2023-09-05, Salerno)

Contact: Jens Bachmann, +495312953218 jens.bachmann@dlr.de

Repräsentative Daten für komplexe Materialien und Halbzeuge LCI Polymere



Heute

- Nur vereinzelte Datensätze für Kunststoffe verfügbar
 - Epoxy: 1-/2-K-Systeme, Reaktivverdünner und Additive häufig nicht genau betrachtet
- Verwendung von Proxydatensätzen für seltene Polymere (bspw. PEKK)

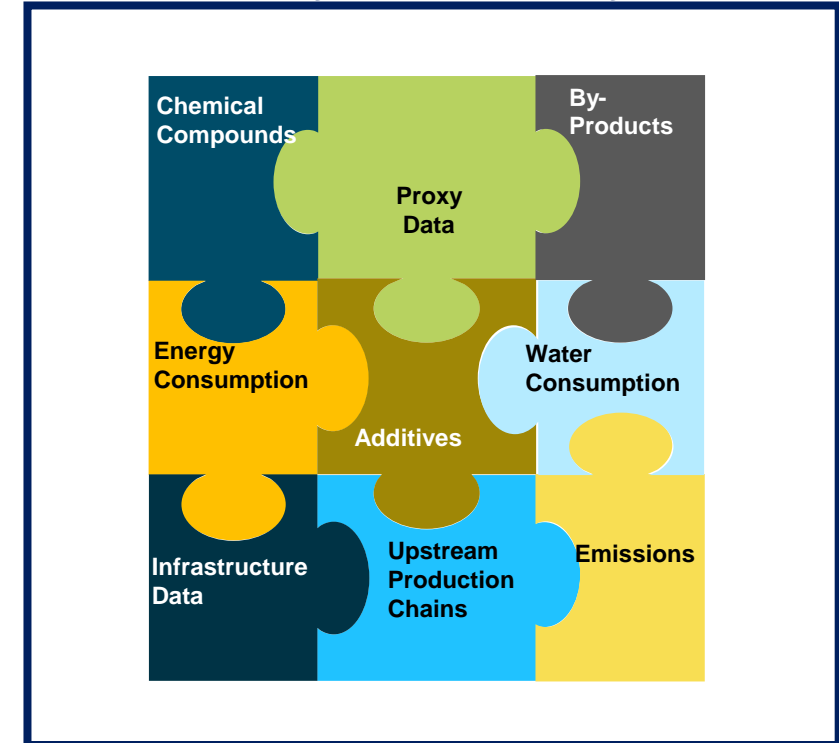
Zentrale Frage

- Wie wirkt sich ganzheitlichen Betrachtung des Systems auf bestimmte Kategorien im LCIA aus?

Lösungsansatz

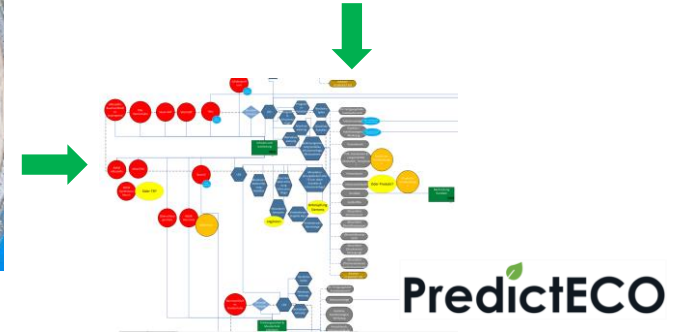
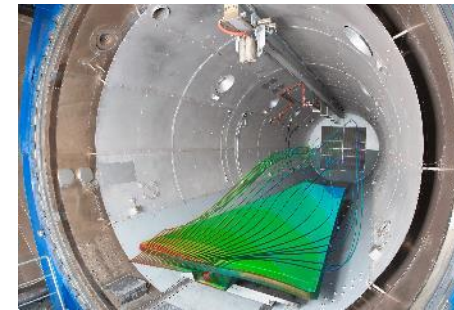
- Erarbeitung eines Rahmenwerks zur Erstellung einer ganzheitlichen LCA von Harzsystemen
 - Vorkettenmodellierung
 - Datenextraktion aus Sicherheitsdatenblättern
 - **DLR Projekt ODIX**
 - Primärdaten aus der Industrie
 - **DLR Projekt RoSto**
 - Thermoanalyse und instrumentelle Analytik

Life Cycle Inventory



Repräsentative Daten für komplexe Prozesse Autoklav LCI

- Heute werden die Herstellungsprozesse von Leichtbaustrukturen stark vereinfacht bzw. aggregiert in Datenbanken bereitgestellt
- Laboranlagen und Industriekontakte des Instituts decken einen weiten Bereich ab
- Nutzung der Institutskompetenzen für eine verbesserte, datenbasierte Nachhaltigkeitsbewertung
→ **PredictECO**
- Ableitung repräsentativer LCI für verschiedene Autoklavprozesse
 - Infusion / Prepreg / Thermoplast
 - Füllgrad
 - Parameter für typische Aushärtezyklen
 - Hilfsstoffe und Abfall
 - Emissionen
 - Equipment und Infrastruktur
 - ...



Repräsentative
LCI

sphera

Brightway

openLca

umberto®
know the flow.

ALICIA

ei ecoinvent

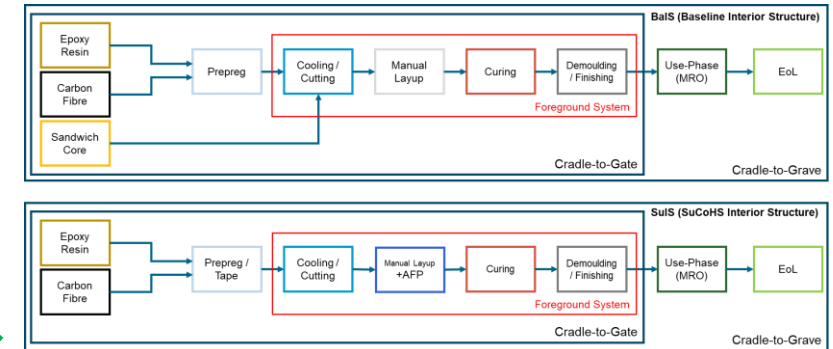
cpacs
A Common Language
for Aircraft Design

Standardisierte LCA in der Luftfahrt

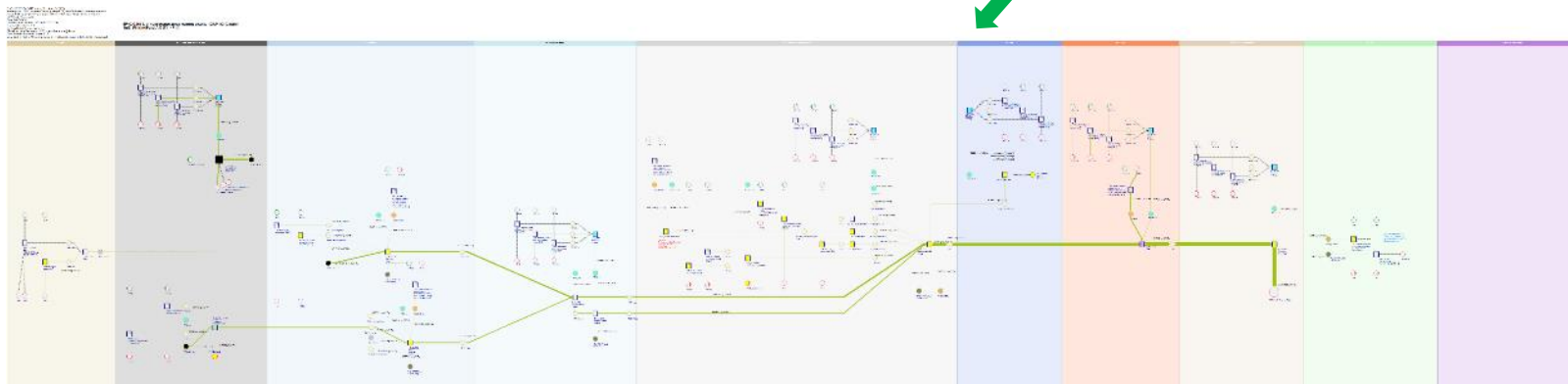
Beispiel: Datensammlung



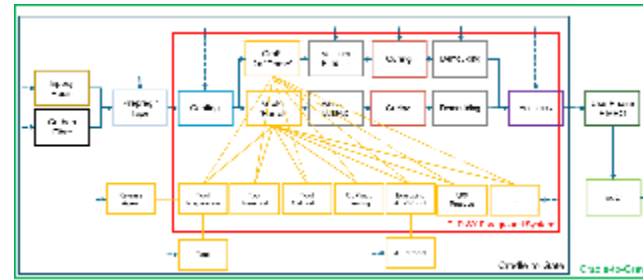
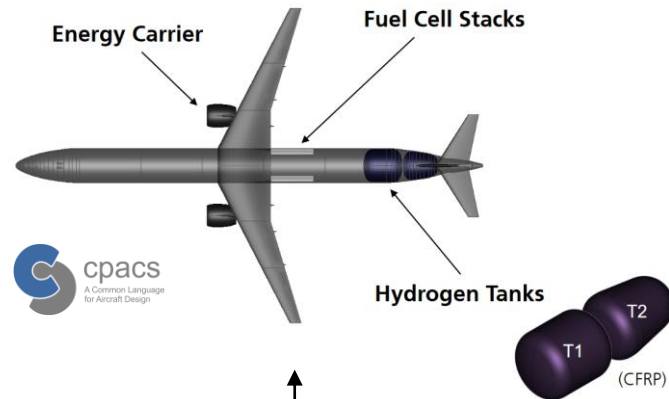
1. Prozessbeschreibung / Funktionale Einheit / Überblick mit Flussdiagramm
2. Datensammlung mit TIRIKA Vorlage
3. Verbindung der gesammelten Daten mit verfügbaren LCA Daten mit Hilfe spezieller Software/Datenbanken



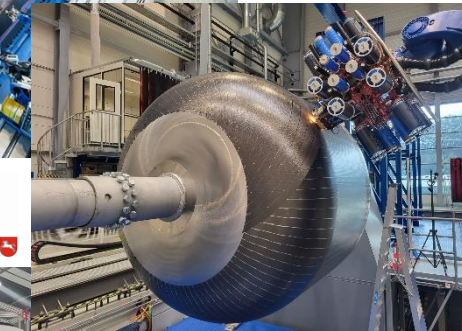
LCA_TIRIKA_v01									
Unit Specifications (Units to be filled by the data provider)									
Process Name	Process Abbrev.	Reference ID	Process Description	Quantity	Unit	Type of MBST	Type of MBST/ST	Reference Product	Material
CF prepreg production (Basis)	CF_PP	1	High-strength epoxy resin	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Basis)	CF_PP
CF prepreg production (Carbon)	CF_PP	2	Carbon fibre	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Carbon)	CF_PP
CF prepreg production (Sandwich)	CF_PP	3	Sandwich core	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Sandwich)	CF_PP
CF prepreg production (MRO)	CF_PP	4	CF prepreg production (MRO)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (MRO)	CF_PP
CF prepreg production (EoL)	CF_PP	5	CF prepreg production (EoL)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (EoL)	CF_PP
CF prepreg production (Secondary)	CF_PP	6	CF prepreg production (Secondary)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Secondary)	CF_PP
CF prepreg production (Tape)	CF_PP	7	CF prepreg production (Tape)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Tape)	CF_PP
CF prepreg production (AFP)	CF_PP	8	CF prepreg production (AFP)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (AFP)	CF_PP
CF prepreg production (MRO)	CF_PP	9	CF prepreg production (MRO)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (MRO)	CF_PP
CF prepreg production (EoL)	CF_PP	10	CF prepreg production (EoL)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (EoL)	CF_PP
CF prepreg production (Secondary)	CF_PP	11	CF prepreg production (Secondary)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Secondary)	CF_PP
CF prepreg production (Tape)	CF_PP	12	CF prepreg production (Tape)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Tape)	CF_PP
CF prepreg production (AFP)	CF_PP	13	CF prepreg production (AFP)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (AFP)	CF_PP
CF prepreg production (MRO)	CF_PP	14	CF prepreg production (MRO)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (MRO)	CF_PP
CF prepreg production (EoL)	CF_PP	15	CF prepreg production (EoL)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (EoL)	CF_PP
CF prepreg production (Secondary)	CF_PP	16	CF prepreg production (Secondary)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Secondary)	CF_PP
CF prepreg production (Tape)	CF_PP	17	CF prepreg production (Tape)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Tape)	CF_PP
CF prepreg production (AFP)	CF_PP	18	CF prepreg production (AFP)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (AFP)	CF_PP
CF prepreg production (MRO)	CF_PP	19	CF prepreg production (MRO)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (MRO)	CF_PP
CF prepreg production (EoL)	CF_PP	20	CF prepreg production (EoL)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (EoL)	CF_PP
CF prepreg production (Secondary)	CF_PP	21	CF prepreg production (Secondary)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Secondary)	CF_PP
CF prepreg production (Tape)	CF_PP	22	CF prepreg production (Tape)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Tape)	CF_PP
CF prepreg production (AFP)	CF_PP	23	CF prepreg production (AFP)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (AFP)	CF_PP
CF prepreg production (MRO)	CF_PP	24	CF prepreg production (MRO)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (MRO)	CF_PP
CF prepreg production (EoL)	CF_PP	25	CF prepreg production (EoL)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (EoL)	CF_PP
CF prepreg production (Secondary)	CF_PP	26	CF prepreg production (Secondary)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Secondary)	CF_PP
CF prepreg production (Tape)	CF_PP	27	CF prepreg production (Tape)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (Tape)	CF_PP
CF prepreg production (AFP)	CF_PP	28	CF prepreg production (AFP)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (AFP)	CF_PP
CF prepreg production (MRO)	CF_PP	29	CF prepreg production (MRO)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (MRO)	CF_PP
CF prepreg production (EoL)	CF_PP	30	CF prepreg production (EoL)	1.000	kg	Prepreg	Prepreg	CF prepreg production (EoL)	CF_PP



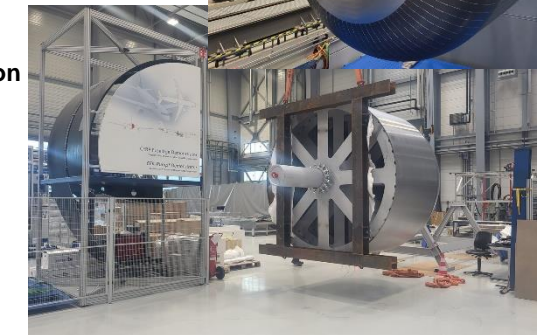
Bewertung der Luftfahrt über alle Lebensphasen ALICIA: Aviation Life Cycle and Impact Assessment



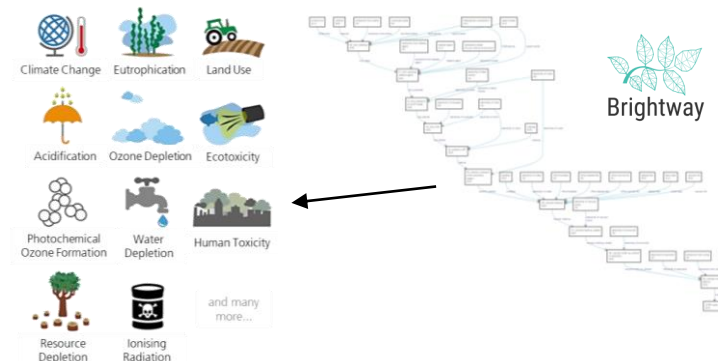
Flowchart / System Boundaries



Data Collection

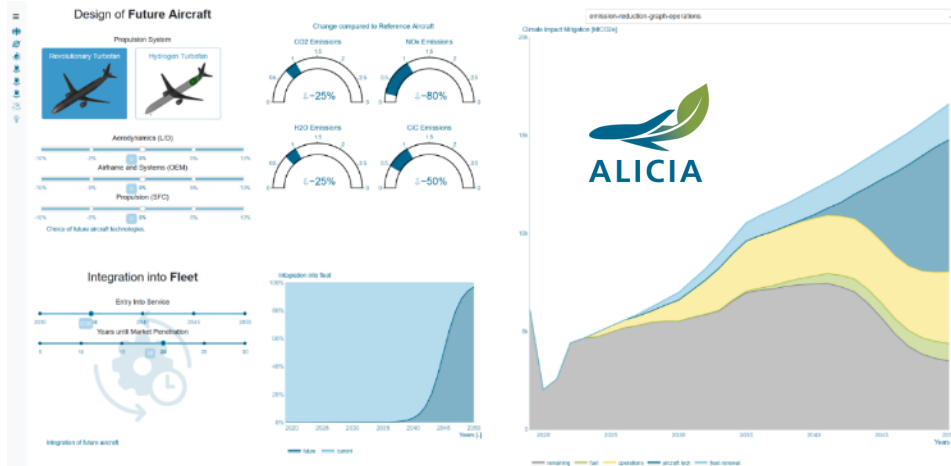


LCA Model in Brightway2
OpenSource Software



Category	Value	Unit	Impact
Climate Change	1.2	kg CO2e	1.2
Eutrophication	0.5	kg N	0.5
Land Use	0.1	kg N	0.1
Acidification	0.3	kg SO2e	0.3
Ozone Depletion	0.05	kg CFC-11e	0.05
Ecotoxicity	0.2	kg 1,4-DCB	0.2
Photochemical Ozone Formation	0.1	kg NMVOC	0.1
Water Depletion	0.05	kg H2O	0.05
Human Toxicity	0.1	kg 1,4-DCB	0.1
Resource Depletion	0.05	kg H2O	0.05
Ionising Radiation	0.001	kg U-235	0.001

Life Cycle Inventory (LCI)



Integration of composite production data into ALICIA Dashboard

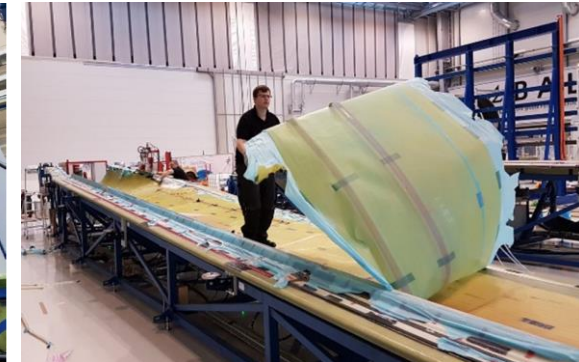
Umweltauswirkungen aller Produktlebensphasen

Beispiel Windenergie

- Produktionsphase überwiegt für viele Kategorien bei WEA
- Vollständige LCI Daten als Vergleichsbasis nicht verfügbar

Aktuelle Fragestellungen im Institut:

- Vollständige Modellierung der Herstellung von Rotorblättern inklusive Aushärtung, Abfälle und Hilfsstoffe
- Alternative Materialien und Produktionsmethoden und deren Einfluss auf die potentiellen Umweltauswirkungen
- Masterarbeit: Untersuchung des Ausmaßes von Vorderkantenerosion an Rotorblättern von Windkraftanlagen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen
 - Literaturdaten für On- und Offshore WEA ausgewertet
 - Auswertung von realen Felddaten ausstehend
 - Erweiterung auf Staubentstehung bei Reparatur (Schleifen) und EoL (Kreissäge)
- Charakterisierungsfaktoren für die Berechnung von Umweltauswirkungen durch Kunststoffeintrag in die Umwelt aktuell nicht verfügbar.




88% Rotorradius



98% Rotorradius



Wissenschaftliche Dienste  Deutscher Bundestag

Kurzinformation
Zu einem Einzelaspekt der Erosion von Rotorblättern von Windrädern

Aufgrund der Umweltaufwände wie UV-Strahlung, Wind und Temperaturwechsel sind Rotorblätter von Windkraftanlagen anfällig für Erosion. Infolge dessen kann es zu Abnutzungen und Risikobildung kommen. Hierdurch verschlechtern sich die aerodynamischen Eigenschaften der Flügel. Aus diesem Grund müssen die Rotoren regelmäßig gewartet werden. Das Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) entwickelt dabei ein Testverfahren, mittels dessen die Beständigkeit verschiedener Beschichtungsmethoden evaluiert werden kann. Das Institut betreibt einen Prüfstand zur Lebensdauerprüfung von Beschichtungssystemen für Rotorblätter.

Eine bislang offene Frage ist, welcher Mechanismus im Detail zur Schädigung und zum Materialabtrag an Rotorblättern führt. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie befindet sich derzeit zu dieser Fragestellung ein Forschungsprojekt verschiedener Projektpartner¹ in seiner Endphase.² Die Rotorblätter von Windkraftanlagen selbst bestehen aus einem Verbund aus kunstharzen (Epoxyd oder Polyesterharz) und Fasern (Glas- oder Carbonfasern).³ Beschichtungsmaterialien aus Folien und Lacken werden in verschiedenen Forschungsprojekten optimiert, um auf der einen Seite witterungsbedingte Erosionen zu minimieren, und auf der anderen gleichzeitig die aerodynamischen Eigenschaften zu optimieren.³

Ein spezifischer Aspekt der Erosion ist das Freisetzen von Mikroplastik an den Rotorblättern. Laut Auskunft des IWES sind ihnen bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu der

1 Siehe hierzu: <https://www.windbranche.de/news/achrichten/artikel-25242-fraunhofer-iwes-segt-erosion-von-windkraftanlagen-dies-konzepten> und http://www.iwes.fraunhofer.de/de/presse_medien/achse-2017/ingeborg-lies-windenergie-efektiv-vorwegen.html.

2 Blade Care, DWT, Fraunhofer IWES (Koordinator) Fraunhofer EFP, Freilacke, Jedewind, Norden, Ocean Breese, Seawison.

3 <https://www.iwes.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/belsh.html>.



Vorläufiges Ergebnis:
Eintrag in Deutschland pro Jahr (31.000 Anlagen)

Optimistisch [t]	Pessimistisch [t]
120	304

Würde man nach vier Jahren die komplette Beschichtung im betroffenen Bereich erodiert vorfinden, ergebe sich ein maximaler Materialabtrag von **1.395 t/a für alle rund 31.000 Windkraftanlagen in Deutschland**.⁶ Das sei als sehr grobe obere Abschätzung anzusehen,⁷ das heißt durch die vereinfachten Annahmen liegt der tatsächliche Wert mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich darunter.

Kreislaufwirtschaft: EDISON-rCF

Rezyklierte Kohlenstofffasern für Carbon Beton



EDISON-rCF = Energieeffizienter und werkstoffgerechter Recyclingprozess von carbonfaserverstärkten Kunststoffen von der Wertstoffaufbereitung bis hin zum neuen Bauteil unter Anwendung eines innovativen Solvolyseprozesses sowie der Entwicklung und Herstellung neuartiger standardisierter quasi-unidirektionaler Halbzeuge im industriellen Maßstab.

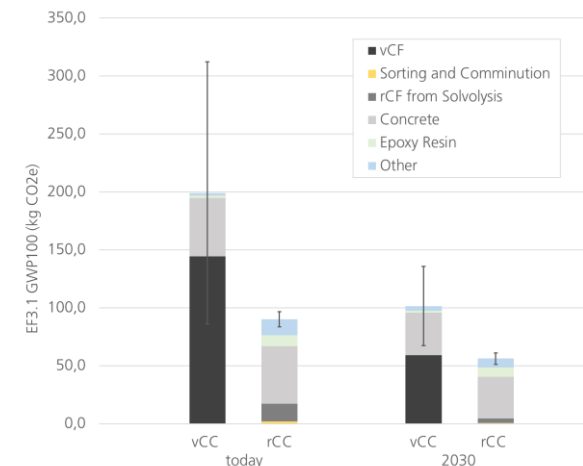
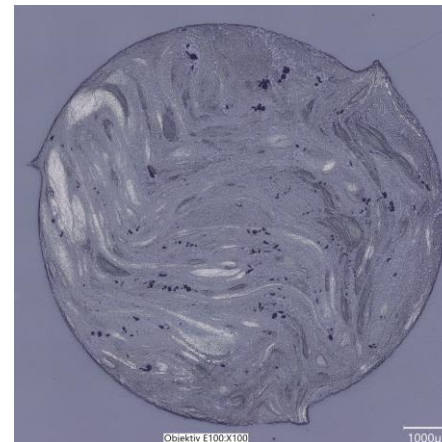
- Einsatz von Rezyklaten in sektorübergreifender Recyclingroute
- Bewertung von CFK-Recyclingverfahren
- Charakterisierung und LCA Modellierung

Ausblick:

- Modellierung von zwei Szenarien für die Anwendung von rCF über den kompletten Lebenszyklus
- Auswirkungen verschiedener „EoL-Formeln“ auf die Ergebnisse



Zaisberg Carbon rCF-Rebar®, der weltweit erste Bewehrungsstab aus rezyklierten Kohlenstofffasern (Foto: Stefan Gröschel, TU Dresden)



SETAC EUROPE 26TH LCA SYMPOSIUM
21-23 OCTOBER 2024 | GOTHENBURG, SWEDEN
MAKING LCA MEANINGFUL: GOOD DATA, BETTER MODELS, SUSTAINABLE DECISIONS

Supported by:



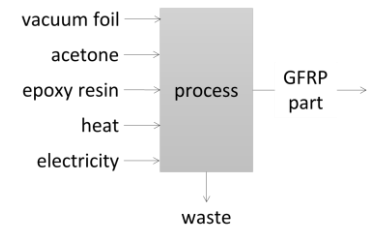
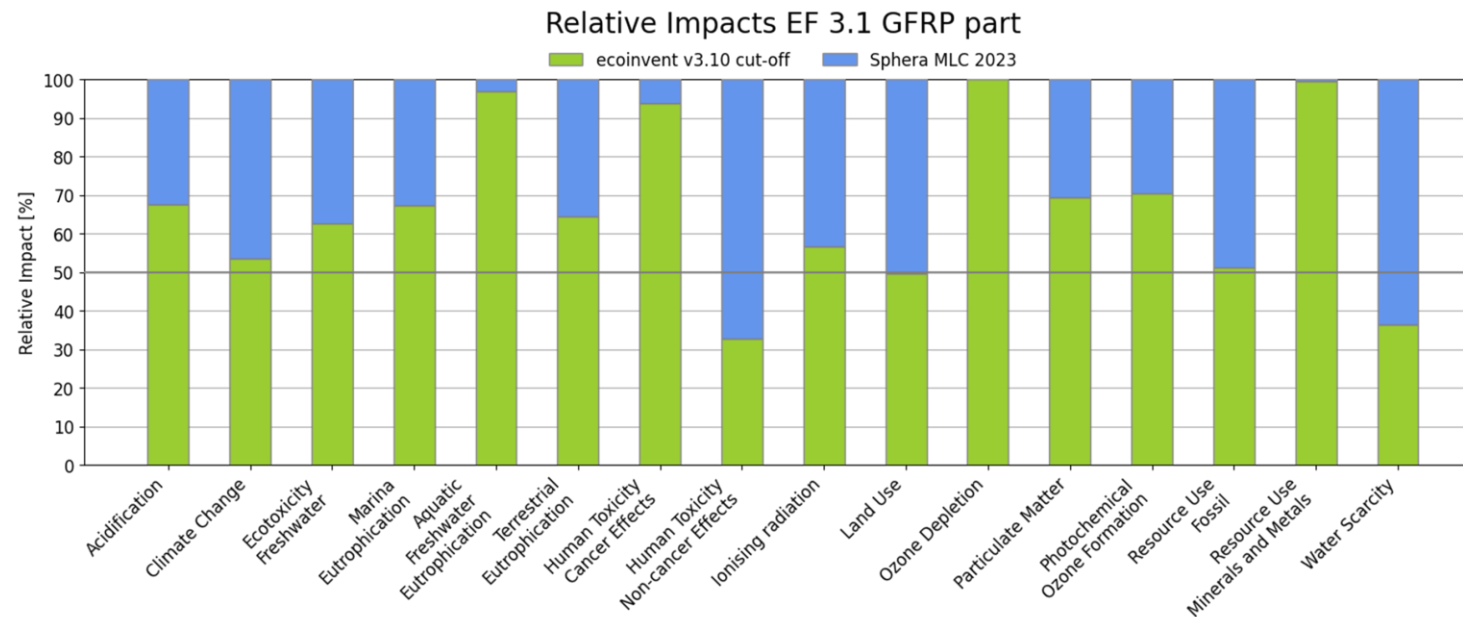
on the basis of a decision
by the German Bundestag

TTP-LB Projekt, Förderkennzeichen 03LB3007

Zaisberg Carbon GmbH
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingssystemtechnik (IART)
Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau

LCA Hintergrunddaten Version und Software

- Ähnliche Modelle basierend auf identischer Systembeschreibung erzeugen potentiell sehr unterschiedliche Ergebnisse
- Fiktives Beispiel: Vereinfachte GFK Herstellung mit typischen



- Unterschiedliche Modellierungsprinzipien, Datenquellen, Zeithorizonte, ...
 - Mischung von Datenbanken weiterhin vermeiden
- Identische LCIA Methoden (z.B. EF3.1) sind unterschiedlich implementiert
- Datenbankversionen und Updates können Ergebnisse erheblich beeinflussen, z.B. Ecoinvent 3.10 durch Einbeziehung der CH₄ Emissionen

LCA Hintergrunddaten Einfluss auf EPD?



- EPD = Environmental Product Declaration
- Üblicherweise werden nur die resultierenden potentiellen Umweltauswirkungen veröffentlicht
- Die Beispiel zeigen die Informationen zur verwendeten Software und Datenbanken, diese Angaben sind nicht einheitlich und teilweise lückenhaft.
- Unterschiede in den Datenbanken lassen einen fairen Vergleich nicht zu (außerhalb der Kategorie GWP)
- **Veröffentlichung (aggregierter) LCI Daten ein notwendiger Schritt zu mehr Transparenz und Vergleichbarkeit**

Ökobilanzierung im Systemleichtbau

Zusammenfassung und Ausblick



- Alle Produktlebensphasen einer Ökobilanzierung haben ihre eigenen Herausforderungen
 - Unvollständige Daten und Charakterisierungsfaktoren über den gesamten Lebenszyklus von Leichtbaustrukturen
 - Verschiedene Datenbanken erzeugen unterschiedliche Ergebnisse
 - Die Vergleichsbasis von heutigen Prozessen ist für zukünftige Entscheidungsfindung am Beispiel „Planetare Grenzen“ unzureichend
- **Veröffentlichung von teilweise aggregierten und parametrisierten LCI Daten mit dem Ziel unabhängig von Software und Datenbanken vergleichbare LCA Modelle erstellen zu können**
- Weitere Punkte und Fragen:
 - Skalierung von Labordaten auf zukünftigen, industriellen Level (Prospective LCA)
 - Umfangreichere Betrachtung der Unsicherheit / Sensitivität
 - Interpretation der potentiellen Umweltauswirkungen und deren Wechselwirkungen
 - Allokation von Kaskadennutzung in einer Kreislaufwirtschaft (Vielzahl EoL Formeln)
 - Kombination von LCA mit Sozialen Aspekten (SLCA) und Kostenbewertung (LCC) zu einer vollständigen Nachhaltigkeitsbewertung (LCSA)
 - Definition von PCR für Luftfahrt und andere Anwendungen von Leichtbaustrukturen?
 - ...

Contact:

Jens Bachmann

jens.Bachmann@dlr.de

+49 531 295 3218

