

FORSCHUNGSBERICHT

SuLiCo – Sustainable Lightweight Construction

Optimierung der CO₂-Bilanz, Ressourceneffizienz und
Recyclingfähigkeit von Leichtbauteilen aus Kunststoff durch
Entwicklung und Verbreitung eines datenbankgestützten
Softwaretools

Ort, Julius | Schwaiger, Johannes | Kolb, Christian | Arndt, Carmen | Carstens, Anna |
Brinkmann, Tobias

Abschlussbericht SuLiCo



Optimierung der CO₂-Bilanz, Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit von Leichtbauteilen aus Kunststoff durch Entwicklung und Verbreitung eines datenbankgestützten Softwaretools

Die Autoren:



Julius Ort, SKZ - KFE gGmbH

Johannes Schwaiger, SKZ - KFE gGmbH

Christian Kolb, SKZ - KFE gGmbH

Dr. Carmen Arndt, brands and values GmbH

Anna Carstens, brands and values GmbH

Tobias Brinkmann, brands and values GmbH

Danksagung

Das Vorhaben mit dem Förderkennzeichen 03LB3084 der SKZ - KFE gGmbH und dem Verbundpartner brands and values GmbH wurde im Rahmen des Technologietransfer-Programms Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abstract

The joint research project SuLiCo – Sustainable Lightweight Construction focused on the development of a database-supported for assessing the environmental and resource performance of plastic and lightweight products. The objective was to provide environmental information at early stages of product development and to support material and design decisions before product concepts are fully specified. [1, 2]

User requirements were identified through expert interviews and a survey among associated industrial partners. The results indicated a need for an early, transparent and easy-to-use comparison of material and product alternatives. Particular relevance was assigned to carbon footprint calculations, recyclability and secondary material content. [3]

Based on these requirements, three software modules were defined: a Material Quick-Check for early material screening, a Product LCA module for component-level assessment, and a Benchmark module for comparing two product variants based on a functional unit. The method considers relevant life cycle stages, including raw material supply, manufacturing, use phase, end-of-life and potential benefits from recycling or substitution.

A structured database was developed using material, process, energy, end-of-life and credit datasets. Environmental background data were prepared using ecoinvent version 3.12 and the system model “Allocation, cut-off, EN15804”. The software was implemented as a web-based application with server-side processing and a browser-based frontend.

The method was plausibilised using selected case studies, including wind turbine rotor blades and an automotive component. The results showed that the tool can process the defined input data, system boundaries and functional units consistently.

Overall, SuLiCo provides a basis for integrating environmental aspects into early-stage lightweight product development. Future work should focus on database expansion, validation with real industrial cases and improved communication of assumptions, data quality and uncertainties.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Voraussetzungen zu Beginn des Vorhabens	1
1.2	Aufgabenstellung.....	2
1.3	Zielsetzung	2
2	Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
2.1	Methodischer Stand (Ökobilanz, Recycling, Ökoeffizienz)	4
2.2	Stand der digitalen Lösungen zur Nachhaltigkeitsbewertung.....	6
3	Lösungsweg	7
3.1	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
3.2	Planung und Ablauf des Vorhabens,	7
4	Eingehende Darstellungen	11
4.1	Informationsbedarfe von Kunststoffproduktherstellern	11
4.1.1	Erhebung der Anforderungen durch Experteninterviews	11
4.1.2	Zentrale Ergebnisse der Experteninterviews	12
4.1.3	Validierung der Anforderungen und Erstellung des Lastenhefts	13
4.2	Entwicklung unternehmensspezifischer Anwendungsszenarien	14
4.2.1	Einordnung in Phasen der Produktentwicklung	15
4.2.2	Zusammenhang zwischen Produktkonkretisierung und Umwelteinfluss..	16
4.2.3	Ableitung relevanter Akteursgruppen und Integrationskonzept	17
4.3	Bewertungsmethode und Bewertungsmodelle.....	19
4.3.1	Relevante Lebenswegabschnitte und Prozesse	19
4.3.2	Ermittlung relevanter Kenngrößen	22
4.3.3	Methodische Grundlagen.....	24
4.3.4	Relevante Ein- und Ausgangsgrößen für die Bewertung der Umweltperformance.....	27
4.4	Erstellung einer Datenbank mit relevanten Kennwerten	29
4.4.1	Zielsetzung	29
4.4.2	Struktur der Datenbank und Auswahl der Datensatzkategorien	29
4.4.3	Auswahl der Materialien, Prozesse und End-of-Life-Datensätze	30
4.4.4	Ökobilanzdaten und Wirkungsabschätzung	31
4.4.5	Aufbereitung und Integration der Daten in das Softwaretool	32
4.4.6	Ergebnis der Arbeiten	32
4.5	Digitale Umsetzung der Methode.....	33

4.5.1	Allgemeines	33
4.5.2	Material-Quick-Check	34
4.5.3	Product LCA	36
4.5.4	Benchmark	38
4.5.5	Technische Umsetzung	39
4.5.6	Datenbankanbindung.....	40
4.5.7	Ergebnis der Arbeiten	40
4.6	Validierung der Methode	41
4.7	„Roll-Out“ Programm	43
5	Zusammenfassung und Ausblick	45
6	Literaturverzeichnis	47
I	Abbildungsverzeichnis/ Tabellenverzeichnis	49
II	Abkürzungsverzeichnis	iii

1 Einleitung

Das Verbundvorhaben SuLiCo – Sustainable Lightweight Construction befasste sich mit der Entwicklung eines datenbankgestützten Softwaretools zur Bewertung der Umwelt- und Ressourcenperformance von Kunststoff-Leichtbauprodukten. Das Vorhaben wurde durch die SKZ - KFE gGmbH koordiniert und gemeinsam mit der brands & values GmbH sowie weiteren assoziierten Industriepartnern durchgeführt.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer digitalen Entscheidungsunterstützung, mit der ökologische Kenngrößen bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt werden können. Im Fokus stand dabei eine praxisnahe Anwendung durch Personen aus Konstruktion, Entwicklung und Design, die nicht zwingend über vertiefte Fachkenntnisse in der Ökobilanzierung verfügen.

Die Arbeiten umfassten die methodische Grundlagenentwicklung, den Aufbau einer geeigneten Datenbasis, die Konzeption und Implementierung der Software sowie Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse in industrielle Anwendungskontexte.

1.1 Voraussetzungen zu Beginn des Vorhabens

Die ökologische Bewertung von Produkten gewinnt im industriellen Umfeld zunehmend an Bedeutung. Gründe hierfür sind unter anderem regulatorische Anforderungen, klimapolitische Zielsetzungen sowie steigende Anforderungen von Kunden, Lieferketten und Unternehmen an Transparenz und Nachhaltigkeit.

Für Kunststoff-Leichtbauprodukte ist die Bewertung ökologischer Wirkungen besonders anspruchsvoll. Einerseits können Leichtbaumaßnahmen durch reduzierte Bauteilmasse zu Materialeinsparungen und, abhängig vom Einsatzfall, zu geringeren Umweltwirkungen in der Nutzungsphase beitragen. Andererseits können höhere Herstellungsaufwände, materialbedingte Umweltlasten oder eingeschränkte Recyclingoptionen diese Vorteile teilweise kompensieren oder überlagern.

Daraus ergibt sich ein Bedarf an Bewertungswerkzeugen, die ökologische Auswirkungen nicht erst nach Abschluss der Produktentwicklung, sondern bereits während der Konzept- und Auslegungsphase sichtbar machen. Insbesondere für Anwenderinnen und Anwender in Konstruktion, Entwicklung und Design ist eine Lösung erforderlich, die mit begrenzter Datenverfügbarkeit umgehen kann, Standardwerte bereitstellt und Ergebnisse verständlich aufbereitet.

1.2 Aufgabenstellung

Zum Projektbeginn standen etablierte methodische Grundlagen zur Umweltbewertung zur Verfügung. Die Ökobilanzierung ist in ISO 14040 und ISO 14044 als methodischer Rahmen beschrieben. Die ISO 14040 behandelt Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanzierung. Die ISO 14044 wiederum Anforderungen und Leitlinien zur Durchführung bei Ökobilanzierungen. Für die Bilanzierung des Carbon Footprint von Produkten liegt mit ISO 14067 ein spezifischer Standard zur Quantifizierung und Berichterstattung produktbezogener Treibhausgasemissionen vor. [4–6]

Trotz dieser methodischen Grundlagen besteht in frühen Entwicklungsphasen häufig das Problem, dass produkt- und prozessspezifische Daten nur unvollständig vorliegen. Für eine entwicklungsbegleitende Bewertung sind daher parametrisierte Modelle, geeignete Hintergrunddaten sowie belastbare Standard- bzw. Defaultwerte erforderlich.

Eine spezifisch auf Kunststoff-Leichtbauprodukte ausgerichtete, integrierte Softwarelösung, die mehrere ökologische Bewertungsdimensionen, Variantenvergleiche und eine Anwendung in frühen Entwicklungsphasen kombiniert, wurde im Rahmen der Projektvorbereitung als Forschungslücke identifiziert.

Eine weitere Herausforderung liegt in der adressatengerechten Darstellung der Ergebnisse. Für Anwenderinnen und Anwender in Konstruktion und Design müssen Ergebnisse nachvollziehbar, vergleichbar und entscheidungsrelevant aufbereitet werden. Eine rein expertenorientierte Darstellung von Ökobilanzergebnissen ist für diesen Anwendungskontext nur eingeschränkt geeignet.

1.3 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Softwarelösung zur ganzheitlichen Bewertung und zum Vergleich unterschiedlicher Material- und Produktvarianten im Kunststoffleichtbau. Die Software sollte eine multikriterielle Entscheidungsgrundlage für frühe Entwicklungsphasen bereitstellen und dabei ökologische Kennzahlen mit produkt- und materialspezifischen Parametern verknüpfen. Darüber hinaus verfolgte das Vorhaben das Ziel, das im Projekt erarbeitete methodische und softwaretechnische Wissen in den potenziellen industriellen Anwenderkreis zu transferieren, um eine breite Nutzung der entwickelten Ansätze und Werkzeuge zu ermöglichen. Das im Vorhaben entwickelte Tool sollte den Lebenszyklus von Kunststoff-Leichtbauprodukten ganzheitlich abbilden und dabei insbesondere relevante Bewertungsgrößen berücksichtigen. Hierzu zählten unter anderem ökologische, technische und ökonomische

Kenngößen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, um eine fundierte und transparente Bewertung der betrachteten Material- und Produktvarianten zu ermöglichen::

- Carbon Footprint gemäß DIN EN ISO 14067
- CO₂-Bindung biogener Kohlenstoffe gemäß EN 16485
- Weitere Ökobilanzindikatoren, z. B. Versauerung und Eutrophierung
- Ökoeffizienz gemäß DIN EN ISO 14045
- Recyclingfähigkeit in Anlehnung an VDI 2243
- Ressourceneffizienzindikatoren, z. B. fossile Rohstoffe und Landnutzung
- Energiekennzahlen, z. B. End- und Primärenergiebedarf
- Ökologische Substitutionspotenziale

Für die Ökoeffizienzbewertung kann DIN EN ISO 14045 herangezogen werden, da diese Norm Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien für die Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen beschreibt. Für die recyclingorientierte Produktentwicklung bietet VDI 2243 Informationen und Entscheidungshilfen für Entwickler und Konstrukteure zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit technischer Produkte. Die EN 16485 ist für Umweltproduktdeklarationen von Holz und Holzprodukten im Bauwesen einschlägig und adressiert unter anderem produktkategorienspezifische Regeln für diese Materialien; ihre Übertragbarkeit auf biobasierte Kunststoffe sollte daher genau begründet werden. [6–9]

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Kunststoffe weisen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium in vielen Fällen eine geringere Dichte auf und bieten somit besonders günstige Voraussetzungen für den Einsatz in Leichtbauanwendungen. Besonders faserverstärkte Kunststoffe, beispielsweise glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärkte Systeme, ermöglichen hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten. Die tatsächliche ökologische Vorteilhaftigkeit hängt jedoch vom jeweiligen Anwendungsfall, der Materialauswahl, der Herstellungsrouten, der Nutzungsphase sowie dem End-of-Life-Szenario ab. Zur Nutzung dieser Potenziale ist eine werkstoffgerechte Auslegung erforderlich. Faserverstärkte Kunststoffe unterscheiden sich hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, Versagensverhalten, Anisotropie und Verarbeitungsverhalten deutlich von metallischen Werkstoffen.

Leichtbaumaßnahmen können Materialeinsparungen ermöglichen und in nutzungsintensiven Anwendungen, insbesondere im Mobilitätssektor, zur Reduktion des Energiebedarfs beitragen. Gleichzeitig können material- und prozessbedingte Umweltlasten in der Herstellung oder Einschränkungen bei Reparatur, Wiederverwendung und Recycling die ökologische Gesamtbewertung beeinflussen.

Damit reicht eine isolierte Betrachtung der Bauteilmasse nicht aus. Erforderlich ist vielmehr eine lebenszyklusorientierte Bewertung, die Herstellungs-, Nutzungs- und End-of-Life-Phase berücksichtigt und Zielkonflikte transparent darstellt.

2.1 Methodischer Stand (Ökobilanz, Recycling, Ökoeffizienz)

Im Rahmen der Projektvorbereitung wurde keine Lösung identifiziert, die eine integrierte, entwicklungsbegleitende Anwendung im Kontext der Leichtbauentwicklung, vollständig abdeckte.

In anderen Anwendungsfeldern sind einzelne Ansätze teilweise weiter etabliert; ihre systematische Verknüpfung und frühe Integration in die Produktentwicklung stellt jedoch eine methodische Herausforderung dar.

Ökobilanzierung und Ökoeffizienz

Die Ökobilanzierung nach ISO 14040 und ISO 14044 stellt den etablierten methodischen Rahmen zur Bewertung potenzieller Umweltwirkungen über den Lebenszyklus eines Produkts dar. Sie umfasst Ziel- und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. [4, 5]

Für den Einsatz in frühen Entwicklungsphasen ist die klassische Ökobilanzierung jedoch nur eingeschränkt geeignet, wenn produkt- oder prozessspezifische Daten noch nicht vorliegen. In solchen Fällen sind vereinfachte Modelle, Annahmen und Defaultwerte erforderlich.

Die Ökoeffizienzbewertung verbindet als auf der Ökobilanz aufbauende Methode ökologische und ökonomische Bewertungsgrößen. DIN EN ISO 14045 beschreibt hierzu Anforderungen und Leitlinien für Produktsysteme [8]. Für eine Softwareanwendung im Kunststoffleichtbau bedeutet dies, dass neben Umweltwirkungen auch wert- oder kostenbezogene Größen definiert werden müssen. Die Auswahl und Gewichtung dieser Größen sind methodisch transparent zu dokumentieren.

CO₂-Bilanzierung

Die CO₂-Bilanzierung bzw. der Product Carbon Footprint fokussiert auf die Quantifizierung klimawirksamer Treibhausgasemissionen eines Produkts. ISO 14067 legt hierfür Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien fest und ist konsistent mit ISO 14040 und ISO 14044 aufgebaut.

Für Leichtbauprodukte ist der Carbon Footprint ein zentraler, jedoch nicht allein ausreichender Indikator. Eine alleinige Betrachtung der Treibhausgasemissionen kann andere Umweltwirkungen, Ressourceneffekte oder Recyclingaspekte ausblenden. [4–6]

Recyclingfähigkeit und Design for Recycling

Die Recyclingfähigkeit technischer Produkte wird wesentlich durch Materialkombinationen, Verbindungstechnik, Trennbarkeit, Sortierbarkeit und Qualität potenzieller Sekundärrohstoffe beeinflusst. VDI 2243 bietet hierzu eine Grundlage für recyclingorientierte Produktentwicklung und richtet sich ausdrücklich an Entwickler und Konstrukteure. [9]

Für Kunststoff-Leichtbauprodukte, insbesondere für Multi-Material- oder Faserverbundsysteme, ist die Bewertung der Recyclingfähigkeit besonders relevant, da Materialverbunde, Additive und Faserverstärkungen die werkstoffliche Verwertung erschweren können.

CO₂-Bindung biogener Kohlenstoffe

Die Berücksichtigung biogener Kohlenstoffbindung ist für biobasierte Materialien relevant, muss jedoch methodisch präzise abgegrenzt werden. EN 16485 bezieht sich auf Umweltproduktdeklarationen für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen. Für biobasierte Kunststoffe ist daher zu prüfen, ob EN 16485 unmittelbar anwendbar ist oder lediglich als methodische Orientierung dienen kann. [7]

2.2 Stand der digitalen Lösungen zur Nachhaltigkeitsbewertung

Zum Zeitpunkt der Projektvorbereitung standen verschiedene digitale Werkzeuge zur Bewertung ökologischer Wirkungen von Produkten und Prozessen zur Verfügung. Hierzu zählen insbesondere generische Ökobilanzsoftware mit umfangreichen Hintergrunddatenbanken, vereinfachte branchenspezifische Bewertungstools, CO₂-Rechner, technisch-ökonomische Planungswerkzeuge sowie konstruktions- oder designunterstützende Softwarelösungen mit einzelnen Nachhaltigkeitsfunktionen.

Generische Ökobilanzsoftware ermöglicht eine detaillierte Modellierung von Produktsystemen über den Lebenszyklus. Ihr Einsatz setzt jedoch in der Regel vertiefte methodische Kenntnisse, eine belastbare Datenbasis sowie eine klare Definition von Systemgrenzen, Prozessketten und End-of-Life-Szenarien voraus. In frühen Entwicklungsphasen von Kunststoff-Leichtbauprodukten liegen diese Informationen häufig noch nicht vollständig vor.

Vereinfachte Tools reduzieren den Eingabeaufwand, sind jedoch meist auf bestimmte Branchen, Produktgruppen, Materialien oder Einzelindikatoren beschränkt. Insbesondere CO₂-Rechner liefern häufig eine erste Orientierung, bilden jedoch nicht zwangsläufig weitere Umweltwirkungen, Ressourceneffekte, Energiekennzahlen oder Recyclingaspekte ab. Für eine fundierte Variantenentscheidung im Kunststoffleichtbau ist daher eine breitere, multikriterielle Betrachtung sinnvoll.

Aus der Perspektive der angestrebten Anwendung ergibt sich daraus der Bedarf an einer Softwarelösung, die mit begrenzter Datenverfügbarkeit umgehen kann, Standard- und Defaultwerte bereitstellt, unterschiedliche Material- und Produktvarianten vergleichbar macht und die Ergebnisse für Anwenderinnen und Anwender in Konstruktion, Entwicklung und Design nachvollziehbar darstellt.

Im Rahmen der Projektvorbereitung wurde keine bestehende Lösung identifiziert, die die projektspezifischen Anforderungen an eine entwicklungsbegleitende, multikriterielle und auf Kunststoff-Leichtbauprodukte ausgerichtete Bewertung vollständig abdeckte.

3 Lösungsweg

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung, Validierung und Implementierung eines datenbankgestützten Softwaretools zur entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung von Leichtbauprodukten.

Der zur Erreichung dieses Ziels gewählte Lösungsansatz beruhte auf einem strukturierten und sukzessiven Vorgehen, das in acht aufeinander aufbauende Arbeitspakete (AP 1–AP 8) gegliedert war. Der verfolgte Ansatz verband dabei eine fundierte methodische Basis mit der digitalen Umsetzung, der industriellen Erprobung sowie einem systematischen Transfer der Ergebnisse in die Praxis.

3.1 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die assoziierten Partner, welche eine Zusammensetzung aus Firmen der potenziellen Softwareanwender darstellen, gezielt mit einbezogen, indem sie das Tool kontinuierlich testen und Feedback zum Entwicklungsstand liefern. Ziel dieser Vorgehensweise war die Evaluation der Anforderungen sowie die Implementierung einer Lösung, die eine branchenübergreifende Anwendbarkeit gewährleistet, sicherzustellen.

3.2 Planung und Ablauf des Vorhabens,

AP 1 – Identifikation des Informationsbedarfs

In AP 1 wurde analysiert, an welchen Stellen des Design- und Konstruktionsprozesses Nachhaltigkeitsinformationen den größten Mehrwert bieten. Hierzu erfolgten Vor-Ort-Prozessanalysen bei Verbundpartnern sowie strukturierte Interviews mit den Partnern. Betrachtet werden unter anderem Prozessschritte, IT-Systeme, relevante Kennzahlen sowie typische Nutzungs- und End-of-Life-Szenarien.

Das Resultat dieses Arbeitspakets besteht in einer strukturierten Darstellung repräsentativer Lebenswege von Leichtbauprodukten sowie der Identifikation derjenigen Prozessschritte, an denen nachhaltigkeitsbezogene Informationen für fundierte Entscheidungen von besonderer Relevanz sind.

Des Weiteren wurde eine Anforderungsanalyse bei den potentiellen Nutzern der Software durchgeführt, um deren Bedarfe qualitativ zu erfassen. Auf dieser Grundlage wurden die funktionalen und inhaltlichen Anforderungen an das Softwaretool definiert. Damit wurde die Grundlage für die weitere inhaltliche und funktionale Entwicklung geschaffen.

AP 2 – Entwicklung unternehmensspezifischer Anwendungsszenarien

Aufbauend auf den in AP 1 identifizierten Prozessschritten und Informationsbedarfen wurden in AP 2 konkrete Workflows zur Integration des Softwaretools in bestehende Design- und Entwicklungsprozesse ausgearbeitet. Dies umfasste die Definition geeigneter Schnittstellen und Datenformate. Dazu wurden durch strukturierte Befragungen der assoziierten Industriepartner zusätzliche Anforderungen an Einsatzszenarien, Systemintegration und technische Rahmenbedingungen erhoben.

AP 3 – Bewertungsmethode und Bewertungsmodelle

In AP 3 erfolgte die methodische Konkretisierung der Bewertungslogik. Entlang des gesamten Produktlebenszyklus wurden relevante ökologische, technische und recyclingbezogene Kenngrößen systematisch identifiziert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Systemgrenzen, Prozessdefinitionen sowie die erforderlichen Ein- und Ausgangsparameter präzisiert.

Im weiteren Verlauf wurden geeignete Berechnungsmodelle entwickelt, die die generische Nutzung in einer Vielzahl von Branchen ermöglicht. Diese Modelle bilden die fundierte Grundlage des Softwaretools und legen die Struktur der späteren digitalen Umsetzung fest. Das Arbeitspaket resultierte in einer abgeschlossenen methodischen Basis, einschließlich formulierter Berechnungsmodelle. Letztere ermöglichen eine ökologische Bewertung in Design- und Konstruktionsprozessen.

AP 4 – Erstellung einer Datenbank mit relevanten Kennwerten

Für eine belastbare und automatisierte Bewertung ist eine umfangreiche Datenbasis erforderlich, die durch das Softwaretool bereitgestellt wird. In AP 4 wurde daher eine webbasierte Datenbank aufgebaut, die technische Materialkennwerte, Daten zu Leichtbautechnologien, ökobilanzielle Hintergrunddaten (Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungsdaten) sowie Informationen zur Recyclingfähigkeit integriert.

Die Datensammlung erfolgte aus anerkannten Datenbanken, Literaturquellen und bestehenden Vorarbeiten innerhalb des Projektkonsortiums. Die Informationen wurden in einer strukturierten Form hinterlegt, sodass eine unmittelbare Einbindung in die Berechnungsmodelle möglich ist. Das Ziel bestand in der Schaffung einer integrationsfähigen und erweiterbaren Datenbasis, die sowohl unternehmensspezifische als auch generische Bewertungen unterstützt und eine automatisierte Berechnung im Tool ermöglicht.

AP 5 – Digitale Umsetzung der Methode

In AP 5 erfolgte die Entwicklung und Programmierung des Softwaretools auf Grundlage der in AP 1 bis AP 4 erarbeiteten Konzepte. Neben der Implementierung der Berechnungsmodelle sind die Benutzerfreundlichkeit, eine leicht erlernbare Bedienstruktur sowie die Interoperabilität mit bestehenden IT-Systemen von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus wurden Visualisierungskonzepte entwickelt, die eine transparente Darstellung der Ergebnisse sowie den Vergleich alternativer Produktvarianten ermöglichen. Darüber hinaus findet sich in der vorliegenden Arbeit die Integration eines strukturierten Entscheidungsschemas, dessen Funktion in der Unterstützung der Anwender bei Zielkonflikten besteht.

Parallel zur Toolentwicklung wurden Referenzmodelle in einer etablierten LCA-Software erstellt, um eine spätere Validierung zu gewährleisten. Im Rahmen von Workshops erfolgte die gemeinsame Testung einer Betaversion des Tools mit den Industriepartnern sowie die iterative Weiterentwicklung. Nach Abschluss der Validierungsphase erfolgte die Fertigstellung der finalen Version als Grundlage für den Roll-Out.

AP 6 – Validierung

In AP 6 erfolgte die Überprüfung des entwickelten Softwaretools anhand realer Anwendungsfälle. Um die allgemeine Anwendbarkeit zu gewährleisten, wurden Praxisbeispiele herangezogen.

In dieser Phase wird auf die methodische Konsistenz, die normkonforme Berechnung, die Plausibilität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie die branchenübergreifende Einsetzbarkeit geachtet. Nach erfolgreicher Validierung gilt das Tool als einsatzfähig für die Praxis.

AP 7 – Sicherstellung der Verwertung: Roll-Out-Programm

Zur breiten Bekanntmachung des Softwaretools wurde ein strukturiertes Roll-Out-Programm entwickelt. Das Angebotsspektrum umfasste Schulungen für die assoziierten Partner sowie offene Trainingsangebote für weitere Unternehmen. Zusätzlich wurden Webinare, Vor-Ort-Veranstaltungen und Beratungsleistungen angeboten.

Das Roll-Out-Programm zielte darauf ab, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) den Zugang zur Lösung zu erleichtern, eine nachhaltige Verankerung des Tools in der Branche zu ermöglichen und die Anwendersoftware einer breiten Fachöffentlichkeit bekannt zu machen.

AP 8 – Allgemeiner Transfer

Zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Wissenstransfers wurde das Projekt über die gesamte Laufzeit hinweg durch gezielte Kommunikations- und Disseminationsmaßnahmen begleitet. Diese umfassten Pressemitteilungen, Fachartikel, Messeauftritte, Beiträge in sozialen Medien sowie die Bereitstellung von Informationsmaterialien. Durch diese Maßnahmen konnte die Sichtbarkeit des Projekts kontinuierlich gesteigert und eine breite Bekanntmachung innerhalb der Fachöffentlichkeit sowie der relevanten Branchen sichergestellt werden.

Der gewählte Lösungsansatz verknüpfte systematisch die Bedarfsanalyse und Prozessintegration (AP 1–2), die methodische Fundierung (AP 3), den Aufbau einer belastbaren Datenbasis (AP 4), die digitale Implementierung (AP 5), die industrielle Validierung (AP 6) sowie den strukturierten Transfer und die Verwertung (AP 7–8).

Die kontinuierliche Einbindung der Industriepartner gewährleistete eine hohe Praxisrelevanz, während die parallele methodische Ausarbeitung und Validierung die wissenschaftliche Qualität sicherstellten. Die resultierende Anwendungssoftware zeichnet sich durch ihre Integrationsfähigkeit in bestehende Entwicklungsprozesse und Anwendungsnähe aus und bildet somit eine fundierte Grundlage für die nachhaltige Leichtbauentwicklung.

4 Eingehende Darstellungen

4.1 Informationsbedarfe von Kunststoffproduktherstellern

Ziel der Arbeiten in diesem Abschnitt war die Erfassung und Strukturierung praxisrelevanter Informationsbedarfe potenzieller Anwenderinnen und Anwender des zu entwickelnden Softwaretools. Im Mittelpunkt stand die Frage, welche umwelt- und ressourcenbezogenen Informationen Kunststoffprodukthersteller in frühen Phasen der Produktentwicklung benötigen und in welcher Form diese Informationen in einem digitalen Werkzeug bereitgestellt werden sollten.

Hierzu wurden zunächst qualitative Experteninterviews durchgeführt. Die daraus abgeleiteten Anforderungen wurden anschließend durch eine ergänzende Umfrage unter den assoziierten Partnern überprüft und priorisiert. Auf dieser Grundlage wurde ein Lastenheft erstellt, das als zentrale Arbeitsgrundlage für die weitere Konzeption und Umsetzung des Softwaretools diente.

4.1.1 Erhebung der Anforderungen durch Experteninterviews

Zur Ermittlung der Anforderungen potenzieller Anwender wurden im Rahmen des Projekts semistrukturierte Experteninterviews durchgeführt. Insgesamt wurden acht potenzielle Anwender aus produzierenden Unternehmen befragt.

Die Auswahl der Interviewpartner erfolgte mit dem Ziel, unterschiedliche Anwendungskontexte des Kunststoffleichtbaus abzudecken. Berücksichtigt wurden insbesondere Unternehmen aus den Bereichen Fahrzeugbau, Herstellung von Composite-Bauteilen, Transportsysteme, Industrietechnik und Bauwesen.

Die Interviews dienten dazu, bestehende Entwicklungs-, Design- und Konstruktionsprozesse sowie relevante Entscheidungsparameter bei der Material- und Produktentwicklung zu erfassen. Darüber hinaus wurden Anforderungen an ein digitales Werkzeug zur Nachhaltigkeitsbewertung aufgenommen. Schwerpunkte waren unter anderem:

- die Einbindung einer Bewertung in frühe Entwicklungsphasen,
- der Umgang mit unvollständiger Datenlage,
- die Relevanz einzelner Umwelt- und Ressourcenindikatoren,
- Anforderungen an die Ergebnisdarstellung,
- Anforderungen an Schnittstellen, Materialdaten und Erweiterbarkeit des Tools.

Die Interviews wurden protokolliert und anschließend qualitativ ausgewertet. Die daraus abgeleiteten Anforderungen bildeten die Grundlage für die weitere Spezifikation des Softwaretools.

4.1.2 Zentrale Ergebnisse der Experteninterviews

Die Auswertung der Interviews zeigte, dass die befragten Unternehmen einen Bedarf an einer frühzeitig einsetzbaren, verständlich aufgebauten und praxisnahen Unterstützung bei der Bewertung von Umweltwirkungen sehen. Dabei wurde deutlich, dass ein solches Werkzeug vor allem dann als hilfreich eingeschätzt wird, wenn es den Vergleich unterschiedlicher Material- und Produktvarianten bereits in frühen Phasen der Entwicklung ermöglicht.

Aus den Interviews wurden folgende zentrale Anforderungen abgeleitet:

Unterstützung früher Entwicklungsphasen

Die befragten Anwender sahen einen Nutzen darin, Umweltauswirkungen verschiedener Materialalternativen bereits in einer frühen Entwicklungsphase abschätzen zu können. Dies wurde insbesondere für Entwicklerinnen, Entwickler und Designverantwortliche als relevant bewertet.

Akzeptanz von Unsicherheiten bei früher Bewertung

Die Befragten gaben an, dass Unsicherheiten in den Ergebnissen in frühen Entwicklungsphasen grundsätzlich akzeptabel sind, sofern diese nachvollziehbar kommuniziert werden. Hintergrund ist, dass zu diesem Zeitpunkt viele produkt- und prozessspezifische Details noch nicht abschließend festgelegt sind.

Berücksichtigung von Nutzungs- und Verwertungsphase

Die Einbeziehung der Nutzungsphase und der Verwertung wurde als grundsätzlich wichtig bewertet. Gleichzeitig wurde deutlich, dass hierzu in frühen Entwicklungsphasen häufig nur grobe Annahmen vorliegen. Daraus ergibt sich die Anforderung, entsprechende Lebenszyklusphasen im Tool über vereinfachte Szenarien oder Standardannahmen abbilden zu können.

Fokus auf ausgewählte zentrale Indikatoren

Als besonders relevante Bewertungsgrößen wurden in den Interviews der CO₂-Fußabdruck, die Recyclingfähigkeit und der Sekundärmaterialanteil genannt. Weitere Wirkungskategorien, wie sie in vollständigen Ökobilanzen oder Umweltproduktdeklarationen betrachtet werden, wurden von den Befragten für den vorgesehenen Anwendungsfall als nachrangig bewertet.

Adressatengerechte Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse des Tools sollten für interessierte Personen im Unternehmen verständlich und nachvollziehbar sein. Ein direkter Zugang für alle potenziellen Stakeholder wurde nicht als zwingend erforderlich beschrieben. Als relevant wurde jedoch identifiziert, dass die Ergebnisse leicht intern kommuniziert und als Entscheidungsgrundlage genutzt werden können.

Schnittstellen und Erweiterbarkeit

Eine Importfunktion von Produktspezifikationen wurde von den Befragten als wünschenswert bewertet. Darüber hinaus wurde angeregt, perspektivisch auch weitere Materialklassen neben Kunststoffen berücksichtigen zu können.

Abgrenzung zu bestehenden technischen Bewertungsprozessen

Die technischen Performancedaten der Materialien müssen nach Einschätzung der Befragten nicht zwingend vollständig im Tool abgebildet werden, da hierfür in den Unternehmen bereits etablierte Vorgehensweisen bestehen. Daraus ergibt sich die Anforderung, das Tool vorrangig als ökologische bzw. ressourcenbezogene Ergänzung bestehender Entwicklungsprozesse zu konzipieren.

Zusammenfassend ergab die Auswertung der Interviews, dass ein digitales Werkzeug zur Bewertung von Umweltwirkungen im Kunststoffleichtbau insbesondere dann einen praktischen Nutzen bietet, wenn es einfach anwendbar ist, in bestehende Entwicklungsprozesse integrierbar bleibt und auch bei begrenzter Datenlage nachvollziehbare Abschätzungen ermöglicht.

4.1.3 Validierung der Anforderungen und Erstellung des Lastenhefts

Im Anschluss an die qualitative Auswertung der Interviews wurden die abgeleiteten Anforderungen durch eine ergänzende Umfrage unter den assoziierten Partnern überprüft. Ziel dieser Umfrage war es, die Relevanz der identifizierten Anforderungen aus einer breiteren industriellen Perspektive einzuordnen und gegebenenfalls zu ergänzen.

Die assoziierten Partner wurden dabei als potenzielle Anwender bzw. als Vertreter relevanter industrieller Anwendungskontexte einbezogen. Im Fokus standen insbesondere Anforderungen an Funktionalität, Bedienbarkeit, Ergebnisdarstellung, Materialdaten, Bewertungsindikatoren und Erweiterbarkeit des geplanten Softwaretools.

Die Rückmeldungen aus der Umfrage wurden mit den Ergebnissen der Experteninterviews zusammengeführt. Auf dieser Grundlage wurde ein Lastenheft erstellt. Dieses dokumentierte die funktionalen, methodischen und inhaltlichen Anforderungen an das zu entwickelnde Softwaretool und diente im weiteren Projektverlauf als Grundlage für Softwarekonzeption, Datenbankstruktur und Implementierung.

Das Lastenheft enthielt insbesondere Anforderungen zu:

- Zielgruppen und Anwendungsszenarien,
- Eingabeparametern und erforderlichen Materialinformationen,
- zu berücksichtigenden Umwelt- und Ressourcenindikatoren,
- Umgang mit Defaultwerten und Annahmen,
- Ergebnisdarstellung und Variantenvergleich,
- Erweiterbarkeit um zusätzliche Materialien und Datenquellen,
- möglichen Schnittstellen zu bestehenden Entwicklungsprozessen.

Damit wurde die Anforderungserhebung abgeschlossen und in eine strukturierte Spezifikation für die nachfolgenden Entwicklungsarbeiten überführt.

4.2 Entwicklung unternehmensspezifischer Anwendungsszenarien

Ziel der Arbeiten in diesem Abschnitt war die Einordnung des zu entwickelnden SuLiCo-Tools in typische Abläufe der Produktentwicklung sowie die Ableitung eines geeigneten Integrationskonzepts. Dabei wurde untersucht, zu welchen Zeitpunkten im Entwicklungsprozess ökologische Informationen besonders wirksam eingebracht werden können und welche Akteursgruppen innerhalb eines Unternehmens mit dem Tool direkt oder indirekt adressiert werden.

Die Arbeiten bauten auf den in Kapitel 4.1 erhobenen Informationsbedarfen potenzieller Anwenderinnen und Anwender auf. Ergänzend wurde das Tool in bestehende Modelle der Produktkonkretisierung eingeordnet. Als theoretischer Bezugspunkt wurde dabei das Pyramidenmodell der Produktkonkretisierung nach Ehrlenspiel herangezogen. In Abbildung 1 ist dies visualisiert. [10]

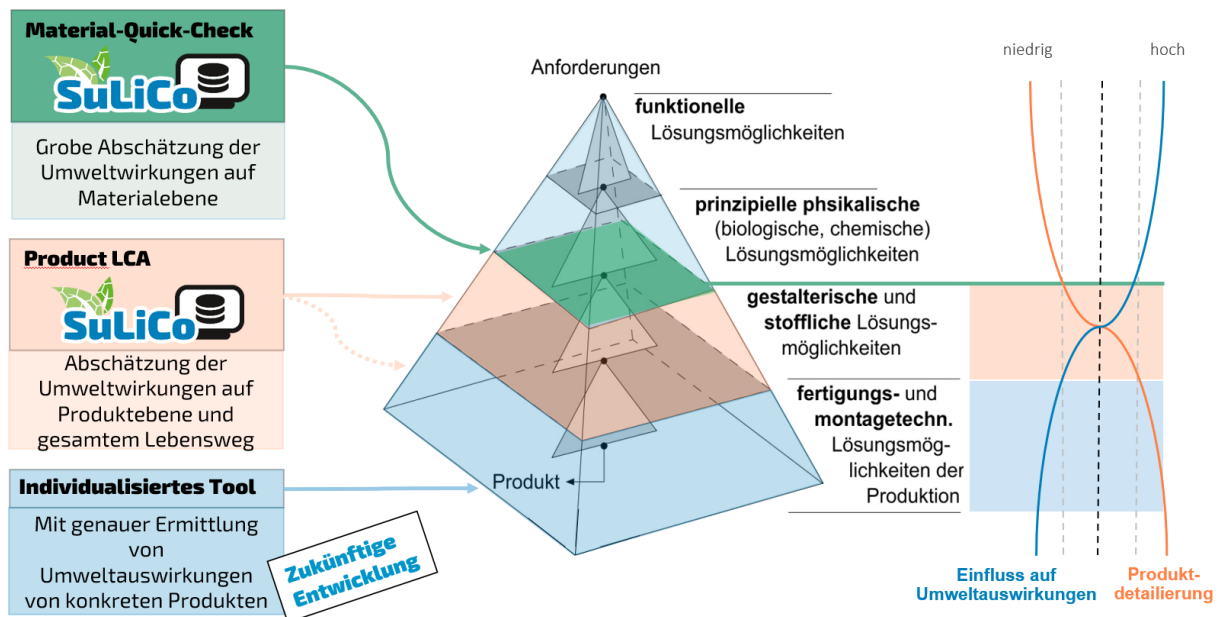


Abbildung 1: Einordnung des SuLiCo-Tools in Bezug auf ein Modell der Produktkonkretisierung

In diesem Modell nimmt der Konkretisierungsgrad eines Produkts im Verlauf des Entwicklungsprozesses zu, während gleichzeitig der Einfluss auf grundlegende Eigenschaften und spätere Umweltwirkungen in frühen Phasen besonders hoch ist. Für SuLiCo wurde daraus abgeleitet, dass das Tool insbesondere in frühen Phasen der Produktentwicklung einen hohen Nutzen entfalten kann. In diesen Phasen sind Material- und Konzeptentscheidungen noch nicht abschließend festgelegt. Gleichzeitig lagen viele produkt- und prozessspezifische Daten noch nicht vollständig vor. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass das Tool mit unvollständigen Informationen umgehen und dennoch eine grobe Wirkungsabschätzung unterschiedlicher Alternativen ermöglichen muss.

4.2.1 Einordnung in Phasen der Produktentwicklung

Zur Strukturierung der Einordnung wurde ein typisches Entwicklungsvorgehen betrachtet. Dieses umfasst unter anderem die Phasen Vorentwicklung, Produktkonkretisierung und Kundenanpassung. Innerhalb dieser Phasen wurden typische Arbeitsschritte wie Suchfeldanalyse, Erarbeitung alternativer Lösungen, Spezifikation, Grundgestaltung, finale Auslegung, Test und Feedback sowie Dokumentation berücksichtigt.

Die Analyse zeigte, dass sich der mögliche Einsatz des SuLiCo-Tools in zwei grundlegende Anwendungsebenen unterteilen lässt:

Basistool für frühe Entwicklungsphasen

Das Basistool dient der groben Wirkungsabschätzung von Material- und Produktalternativen. Es ist insbesondere für Phasen geeignet, in denen noch keine vollständig konkretisierten Produktdaten vorliegen. In dieser Anwendung steht nicht die exakte Bilanzierung eines finalen Produkts im Vordergrund, sondern der relative Vergleich unterschiedlicher Entwicklungsoptionen.

Spezifiziertes Tool für konkretisierte Produktvarianten

Das spezifizierte Tool adressiert spätere Phasen der Produktentwicklung, in denen Produktgeometrie, Materialauswahl, Prozessroute und weitere relevante Parameter bereits genauer festgelegt sind. In dieser Anwendung kann eine detailliertere Ermittlung der Umweltauswirkungen konkreter Produkte erfolgen.

Durch diese Unterscheidung wurde vermieden, Anforderungen an frühe Grobabschätzungen mit Anforderungen an detaillierte Bilanzierungen zu vermischen. Für die weitere Softwareentwicklung war diese Abgrenzung wesentlich, da Eingabeaufwand, Datenbedarf, Genauigkeit und Ergebnisdarstellung je nach Entwicklungsphase unterschiedlich zu bewerten sind.

4.2.2 Zusammenhang zwischen Produktkonkretisierung und Umwelteinfluss

Im Rahmen der konzeptionellen Arbeiten wurde berücksichtigt, dass der Einfluss auf die späteren Umweltauswirkungen eines Produkts in frühen Phasen der Entwicklung besonders hoch ist, während der Produktdetaillierungsgrad zu diesem Zeitpunkt noch gering ist. Mit zunehmender Konkretisierung werden Produktmerkmale, Werkstoffe, Fertigungsrouten und konstruktive Details festgelegt. Gleichzeitig sinkt die Möglichkeit, grundlegende Entscheidungen mit vertretbarem Aufwand zu ändern.

Für das SuLiCo-Tool ergibt sich daraus die Anforderung, ökologische Informationen möglichst frühzeitig bereitzustellen. Da zu diesem Zeitpunkt nur begrenzte Daten verfügbar sind, müssen die Ergebnisse als Abschätzungen verstanden und entsprechend transparent dargestellt werden. Eine scheinbare Genauigkeit wäre in dieser Phase nicht sachgerecht. Stattdessen ist eine nachvollziehbare Darstellung von Annahmen, Datenquellen und Unsicherheiten erforderlich.

Die Einordnung in den Produktentwicklungsprozess bestätigte damit die bereits aus den Interviews abgeleitete Anforderung, dass das Tool nicht ausschließlich für Fachpersonen aus dem Bereich der Ökobilanzierung ausgelegt werden sollte. Vielmehr muss es so gestaltet sein,

dass es in bestehende Entscheidungsprozesse von Entwicklung, Konstruktion, Produktmanagement und gegebenenfalls Umweltmanagement eingebunden werden kann.

4.2.3 Ableitung relevanter Akteursgruppen und Integrationskonzept

Zur weiteren Konkretisierung der Tool-Anwendung wurden relevante Rollen innerhalb eines exemplarischen produzierenden Unternehmens betrachtet. Ziel war es, die unterschiedlichen Interessen, Entscheidungsspielräume und Informationsbedarfe der beteiligten Akteursgruppen sichtbar zu machen und daraus Anforderungen an die Einbindung des SuLiCo-Tools in den Produktentwicklungsprozess abzuleiten.

Hierzu wurde im Projekt mit der Persona-Methode gearbeitet [11]. Diese diente dazu, typische Rollen, Motivationen, Zielkonflikte und Informationsbedarfe innerhalb eines Unternehmens abzubilden. In der vorliegenden Persona-Ausarbeitung wird das Ziel dieser Methode darin beschrieben, Workflowpläne und ein Integrationskonzept für das SuLiCo-Tool abzuleiten, Anforderungen für das Lastenheft zu unterstützen und die Interessen verschiedener Akteure in der Produktentwicklung bewusst zu machen.

Als relevante Rollen wurden unter anderem Designer, Konstrukteure, Entwickler, Kunststofftechnologien, Planer, Programmierer, Einkäufer, Geschäftsführung, Forscher, Projektleiter, Prüfinstitute, Kunden, Vertrieb, Gefahrstoffbeauftragte, Arbeitssicherheit und Umweltmanagementbeauftragte betrachtet. Diese Rollen wurden nicht als verbindliche Organisationsstruktur verstanden, sondern als Hilfsmittel zur Beschreibung möglicher Nutzungskontexte.

Die Persona-Analyse zeigte, dass das SuLiCo-Tool unterschiedliche Informationsbedarfe adressieren muss. Entwicklung und Konstruktion benötigen vor allem Informationen zur Bewertung von Material- und Variantenentscheidungen. Produktmanagement und Vertrieb benötigen nachvollziehbare Kennzahlen zur Kommunikation mit Kunden und zur Bewertung von Marktanforderungen. Umweltmanagement und Geschäftsführung benötigen aggregierte Informationen zur Einordnung von Umweltwirkungen, strategischen Zielsetzungen und Berichtspflichten. Einkauf und materialverantwortliche Personen benötigen belastbare Angaben zu Materialdaten, Sekundäranteilen und verfügbaren Alternativen. Arbeitssicherheit, Gefahrstoffmanagement und Compliance können indirekt betroffen sein, sofern Materialwechsel oder neue Prozessrouten zusätzliche Anforderungen auslösen.

Aus der Betrachtung der Akteursgruppen wurden Anforderungen an die Ausgestaltung des Tools abgeleitet. Die Ergebnisse müssen rollengerecht und verständlich aufbereitet werden, da nicht alle beteiligten Personen dieselbe Detailtiefe benötigen. Gleichzeitig müssen Annahmen, Datenherkunft und Systemgrenzen transparent dargestellt werden, da frühe Bewertun-

gen mit Unsicherheiten verbunden sind. Zudem soll das Tool bestehende technische Bewertungsprozesse nicht ersetzen, sondern ergänzen. Insbesondere technische Performancedaten werden in vielen Unternehmen bereits über etablierte Verfahren bewertet.

Auf Grundlage der Einordnung in den Produktentwicklungsprozess und der Persona-Analyse wurde ein erstes Integrationskonzept für das SuLiCo-Tool abgeleitet. Dieses sieht vor, das Tool insbesondere dort einzusetzen, wo Material- oder Konzeptalternativen miteinander verglichen werden und ökologische Informationen bislang nur eingeschränkt verfügbar sind. Für frühe Entwicklungsphasen ist der Einsatz als Basistool vorgesehen. In dieser Anwendung werden alternative Materialien oder Produktkonzepte anhand weniger Eingabeparameter miteinander verglichen. Ziel ist eine grobe Orientierung hinsichtlich relevanter Umweltwirkungen, nicht die abschließende Bilanzierung eines finalen Produkts.

Für spätere Phasen der Produktkonkretisierung wurde die Möglichkeit eines spezifizierten Tools vorgesehen. Dieses kann detailliertere Produktinformationen berücksichtigen und damit eine genauere Bewertung konkreter Produktvarianten ermöglichen. Die Trennung zwischen Basistool und spezifiziertem Tool erlaubt es, unterschiedliche Genauigkeitsniveaus und Datenanforderungen innerhalb eines gemeinsamen Anwendungskonzepts abzubilden.

Das Integrationskonzept bildete damit eine Grundlage für die weitere Ausarbeitung des Lastenhefts und der Softwarekonzeption.

Als Ergebnis der Arbeiten wurde das SuLiCo-Tool systematisch in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet. Dabei wurde herausgearbeitet, dass der größte Nutzen in der Unterstützung früher Entwicklungsentscheidungen liegt, da hier noch ein hoher Einfluss auf Materialwahl, Produktkonzept und spätere Umweltwirkungen besteht. Gleichzeitig wurde berücksichtigt, dass in diesen Phasen nur begrenzte Daten verfügbar sind und die Bewertung daher als transparente Abschätzung erfolgen muss.

Weiterhin wurden relevante Akteursgruppen und Nutzungskontexte identifiziert. Die Persona-Arbeit unterstützte die Ableitung rollenspezifischer Anforderungen und verdeutlichte, dass das Tool sowohl technische als auch organisatorische Schnittstellen berücksichtigen muss.

Die Ergebnisse flossen in die weitere Spezifikation des Softwaretools ein, insbesondere in Bezug auf:

- Zielgruppen und Anwendungsszenarien,
- Unterscheidung zwischen grober Abschätzung und detaillierter Bewertung,
- Anforderungen an Eingabeaufwand und Defaultwerte,
- Ergebnisdarstellung und Kommunikation,

- Einbindung in bestehende Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse.

Die konkrete Überführung dieser Anforderungen in Softwarefunktionen erfolgte in den nachfolgenden Arbeitsschritten.

4.3 Bewertungsmethode und Bewertungsmodelle

Im AP 3 wurden auf Grundlage der in AP 1 erhobenen Anforderungen eine Bewertungsmethode sowie zugehörige Bewertungsmodelle für die ökologische Bewertung von Leichtbauprodukten entwickelt. Ziel war es, eine methodische Grundlage für ein digital nutzbares Bewertungstool zu schaffen, das insbesondere in frühen Phasen der Produktentwicklung eine vergleichende Bewertung von Material- und Produktvarianten unterstützt.

Die Arbeiten konzentrierten sich auf bewegte Leichtbauprodukte, da bei diesen neben der Materialbereitstellung und Herstellung insbesondere die Nutzungsphase eine relevante Rolle spielen kann. Gleichzeitig wurde berücksichtigt, dass in frühen Entwicklungsphasen häufig nur begrenzte Informationen zu Materialmengen, Fertigungsprozessen, Nutzungsszenarien und End-of-Life-Optionen vorliegen. Die Bewertungsmethode wurde daher so ausgelegt, dass sie sowohl eine orientierende Bewertung bei geringer Datenverfügbarkeit als auch eine detailliertere Bewertung konkretisierter Produktvarianten ermöglichen kann.

Im Rahmen der Methodenentwicklung wurden zunächst relevante Lebenswegabschnitte identifiziert. Anschließend wurden technische und ökologische Kenngrößen abgeleitet, Systemgrenzen festgelegt und methodische Annahmen für die einzelnen Tool-Module definiert. Ergänzend wurden spezifische Anwendungsfälle betrachtet, insbesondere Fahrzeugbauteile und Rotorblätter von Windkraftanlagen, da sich diese hinsichtlich der Nutzungsphase und der funktionellen Einheit deutlich unterscheiden.

4.3.1 Relevante Lebenswegabschnitte und Prozesse

Generische Betrachtung bewegter Leichtbauprodukte

Für bewegte Leichtbauprodukte wurden zunächst die umweltrelevanten Lebenswegabschnitte und die darin enthaltenen wesentlichen Prozesse identifiziert. Betrachtet wurden insbesondere die Rohstoffbereitstellung, die Verarbeitung und Herstellung, die Nutzungsphase, das End-of-Life sowie mögliche Vorteile aus einer Nachnutzung. Eine zusammenfassende Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die Rohstoffbereitstellung ist für viele Leichtbauprodukte ein relevanter Lebenswegabschnitt, da Leichtbaumaterialien teilweise energie- und ressourcenintensive Vorketten aufweisen können. Dies betrifft insbesondere Hochleistungswerkstoffe, Faserverbundmaterialien oder spezielle Kunststoffe. Die Umweltwirkungen der vorgelagerten Prozessketten wurden daher als wesentlich für die Bewertung im Tool eingestuft.

Auch die Verarbeitung der Rohstoffe zu Bauteilen kann relevante Umweltwirkungen verursachen. Dies betrifft insbesondere energieintensive Fertigungsprozesse, thermische Prozesse, Zuschnitt- und Bearbeitungsschritte sowie prozessbedingte Abfälle. Produktionsabfälle können sowohl aus ökologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht relevant sein, insbesondere wenn hochwertige Materialien eingesetzt werden oder eine Rückführung in den Produktionsprozess nur eingeschränkt möglich ist.

Für bewegte Leichtbauprodukte kann die Nutzungsphase eine besondere Bedeutung haben. Gewichtseinsparungen können abhängig vom Anwendungskontext zu einem geringeren Energiebedarf oder zu einer höheren Effizienz während der Nutzung beitragen. Dadurch können erhöhte Umweltwirkungen aus Rohstoffbereitstellung und Herstellung teilweise kompensiert werden. Ob und in welchem Umfang dies der Fall ist, hängt jedoch vom konkreten Produkt, der Anwendung, der Nutzungsdauer und dem Referenzsystem ab.

Im Fahrzeugbau kann ein reduziertes Bauteilgewicht zu einem geringeren Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch während der Nutzung beitragen. Die Höhe dieses Effekts ist jedoch abhängig von Fahrzeugtyp, Antriebsart, Fahrprofil und Lebensdauer.

Bei Rotorblättern von Windkraftanlagen ist die Bewertung stärker an die erzeugte Energiemenge über die Lebensdauer gekoppelt. Eine leichtere oder konstruktiv optimierte Ausführung kann je nach Anlagenkonzept Vorteile ermöglichen, beispielsweise durch angepasste Rotordurchmesser, reduzierte Lasten oder eine verlängerte Lebensdauer. Eine allgemeingültige Aussage zur Effizienzsteigerung allein durch geringere Masse ist jedoch nicht ohne anwendungsspezifische Nachweise möglich.

Die End-of-Life-Phase wurde ebenfalls als relevanter Bestandteil der Bewertung berücksichtigt. Materialzusammensetzung, Fügetechnik, Demontagefähigkeit und verfügbare Verwertungstechnologien beeinflussen, ob eine stoffliche Verwertung, energetische Verwertung oder andere Verwertungswege realistisch sind. Da diese Eigenschaften bereits in der Produktentwicklung wesentlich beeinflusst werden, wurde die Recyclingfähigkeit als eine zentrale Kenngröße in die Bewertungsmethodik aufgenommen.

Tabelle 1: Übersicht umweltrelevanter Prozesse im Lebenszyklus von Leichtbauprodukten

Lebenszyklus-phase	Umweltrelevante Prozesse	Umweltbelastungen durch	Mögliche Umweltentlastungen durch
Vorkette	Rohstoffgewinnung; Verarbeitung zu Vorprodukten	Energieverbrauch; Ressourceneinsatz; rohstoffbedingte Emissionen	Einsatz von Rezyklaten; Einsatz erneuerbarer Energien
Verarbeitung / Herstellung	Umformprozesse; Autoklavprozesse; Wärmebehandlung; mechanische Bearbeitung; Zuschnittprozesse; weitere Fertigungsschritte	Energieverbrauch; Hilfsstoffe; Produktionsabfälle; Ausschuss	Rezyklateinsatz; Einsatz erneuerbarer Energien; Rückführung von Produktionsabfällen
Nutzung	Einsatz bewegter Bauteile; z. B. in Fahrzeugen; Robotik; Luft- und Raumfahrt oder Energieerzeugung	Energieverbrauch während der Nutzung	Mögliche Energieeinsparung; mögliche Effizienzsteigerung; mögliche Lebensdauererlängerung
End-of-Life	Mechanisches Recycling; Pyrolyse; energetische Verwertung; Nutzung als Ersatzbrennstoff; thermische Behandlung	Emissionen; Energieverbrauch; Verluste hochwertiger Materialien	Recycling; Energierückgewinnung; Substitution von Primärrohstoffen
Vorteile in der Nachnutzung	Sekundärrohstoffbereitstellung; Energierückgewinnung	—	Ersatz von Neuware; Ersatz fossiler Energieträger

Spezifische Betrachtung der Anwendungsfälle Fahrzeugbau und Rotorblatt einer Windkraftanlage

Die betrachteten Anwendungsfälle unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Nutzungsphase und der daraus abzuleitenden funktionellen Einheit. Daher wurde für die Bewertungsmethodik eine differenzierte Betrachtung vorgesehen.

Im Fahrzeugbau besteht ein Zusammenhang zwischen Bauteilgewicht und Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch während der Nutzung. Für den Vergleich unterschiedlicher Bauteilvarianten ist daher eine funktionelle Einheit erforderlich, die eine definierte Fahrleistung über eine festgelegte Produkt- bzw. Fahrzeuglebensdauer berücksichtigt. Die konkrete Höhe der Nutzungsphaseneffekte ist abhängig von Antriebsart, Fahrprofil, Fahrzeugklasse und weiteren Randbedingungen.

Bei Rotorblättern von Windkraftanlagen ist die ökologische Bewertung stärker von der erzeugten elektrischen Energie über die Lebensdauer abhängig. Für den Variantenvergleich ist daher eine funktionelle Einheit sinnvoll, die auf die erzeugte Energiemenge bezogen ist. Dadurch können Herstellungsaufwand, Lebensdauer und energetischer Nutzen der Rotorblattvariante in Beziehung gesetzt werden.

Aus der Analyse der Lebenswegabschnitte und Nutzungsszenarien wurden die für die Bewertungsmethode erforderlichen technischen und ökologischen Kenngrößen abgeleitet.

4.3.2 Ermittlung relevanter Kenngrößen

Auf Grundlage der identifizierten Lebenswegabschnitte wurden Kenngrößen definiert, die eine vergleichende ökologische Bewertung von Leichtbauprodukten ermöglichen sollen. Dabei wurde zwischen technischen Kenngrößen, ökologischen Kenngrößen sowie Kenngrößen zur Recyclingfähigkeit und zum End-of-Life unterschieden. Ziel war es, eine methodisch nachvollziehbare und zugleich für frühe Entwicklungsphasen praktikable Bewertungsgrundlage zu schaffen.

Technische Kenngrößen

Technische Kenngrößen sind erforderlich, um die Nutzungsphase und die funktionelle Einheit des jeweiligen Anwendungsfalls abzubilden. Sie bilden damit die Grundlage für den Vergleich unterschiedlicher Varianten.

Für den Anwendungsfall Fahrzeugbau wurden insbesondere folgende technische Kenngrößen berücksichtigt:

- Bauteilgewicht,
- Antriebsart,
- erwartete Lebensdauer bzw. Fahrleistung,
- Zuordnung zu einer Anwendungsgruppe.

Das Bauteilgewicht stellt eine zentrale Einflussgröße dar, da es die potenziellen nutzungsbezogenen Vorteile von Leichtbauvarianten beeinflussen kann. Die Antriebsart ist relevant, da sich die Umweltwirkungen der Nutzungsphase zwischen konventionellen, hybriden und elektrischen Antriebssystemen unterscheiden. Die Lebensdauer bzw. Fahrleistung definiert den Zeitraum, über den sich mögliche Gewichtsvorteile auswirken können.

Für Rotorblätter von Windkraftanlagen wurden insbesondere folgende technische Kenngrößen berücksichtigt:

- Gewicht des Rotorblatts,
- Anzahl der Rotorblätter pro Anlage,
- Lebensdauer in Jahren,
- jährliche Energieerzeugung bzw. erzeugte Energiemenge über die Lebensdauer.

Diese Größen sind relevant, da die ökologische Bewertung von Rotorblättern wesentlich über die erzeugte Energiemenge während der Nutzungsdauer eingeordnet wird. Die technische Auslegung, Lebensdauer und Anlagenkonfiguration beeinflussen die funktionelle Einheit und damit die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Varianten. [12]

Ökologische Kenngrößen

Ergänzend wurden ökologische Kenngrößen definiert, um Umweltwirkungen entlang des Lebenswegs transparent darstellen zu können. Als zentrale Leitgröße wurde der CO₂-Fußabdruck bzw. das Global Warming Potential berücksichtigt, da dieser Indikator in der industriellen Kommunikation und in vielen Bewertungszusammenhängen eine hohe Relevanz besitzt. [13] Darüber hinaus wurden weitere Umweltwirkungsindikatoren berücksichtigt, beispielsweise Versauerungs- und Eutrophierungspotenziale.

Zusätzlich wurden Ressourceneffizienzgrößen und Energiekennzahlen aufgenommen. Hierzu zählen insbesondere Indikatoren zum Einsatz fossiler und nicht fossiler Ressourcen, Flächenbedarf sowie Primärenergiebedarf. Diese Größen sind relevant, um energie- und ressourcenintensive Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse angemessen abzubilden.

Ergänzend wurde der Product Environmental Footprint (PEF) bzw. ein darauf basierender Bewertungsansatz berücksichtigt. Der PEF-Ansatz ermöglicht eine multikriterielle Bewertung von Umweltwirkungen. Die konkrete Umsetzung, Gewichtung und Aggregation im Tool muss jedoch transparent dokumentiert werden, da aggregierte Indikatoren methodische Festlegungen enthalten und nicht ohne Erläuterung interpretiert werden sollten. [14; 15]

Ein weiterer Bestandteil der Methodik ist die Berücksichtigung möglicher ökologischer Vorteile durch die Substitution funktionsgleicher konventioneller Bauteile. Hierdurch können potenzielle Nutzungsvorteile von Leichtbaulösungen sichtbar gemacht werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine klare Definition des Referenzsystems sowie der funktionellen Einheit.

Aufbauend auf den ökologischen Kenngrößen wurde auch der Aspekt der Ökoeffizienz berücksichtigt, um ökologische und ökonomische Größen zueinander in Beziehung zu setzen. Dies kann insbesondere in frühen Entwicklungsphasen relevant sein, da dort häufig Zielkonflikte zwischen Umweltwirkung, Kosten und technischer Funktionalität bestehen.

Recyclingfähigkeit und End-of-Life

Die Recyclingfähigkeit wurde als zentrale Kenngröße aufgenommen, da sie die Bewertung der End-of-Life-Phase und möglicher Entlastungspotenziale beeinflusst. Für Leichtbauprodukte ist dieser Aspekt besonders relevant, da Materialverbunde, Fasern, Additive und Fügetechnologien die stoffliche Verwertung erschweren können.

Ergänzend wurden mögliche Vorteile in der Nachnutzung betrachtet. Je nach Materialzusammensetzung und Verwertungsweg können unterschiedliche Entlastungspotenziale entstehen, beispielsweise durch den Ersatz von Primärmaterialien oder durch Energierückgewinnung. Die Berücksichtigung solcher Gutschriften ist jedoch mit Unsicherheiten verbunden, da sie von zukünftigen Marktbedingungen, Recyclingtechnologien, Substitutionsannahmen und regulatorischen Rahmenbedingungen abhängt. Daher müssen entsprechende Annahmen im Tool transparent ausgewiesen werden.

Die Auswahl der Kenngrößen erfolgte somit mit dem Ziel, eine Balance zwischen wissenschaftlicher Fundierung, Datenverfügbarkeit und praktischer Anwendbarkeit zu erreichen.

4.3.3 Methodische Grundlagen

Aufbauend auf der Definition der Kenngrößen wurden die methodischen Grundlagen für die einzelnen Tool-Module festgelegt. Dabei wurde der Detaillierungsgrad an den jeweiligen Anwendungszweck und die erwartete Datenverfügbarkeit angepasst.

Das Tool wurde, wie in Abschnitt 4.3 erläutert, in drei Module gegliedert:

1. Material-Quick-Check,
2. Product LCA,
3. Benchmark.

Diese Modulstruktur erlaubt es, unterschiedliche Bewertungsziele abzubilden: von einer ersten Materialbewertung über die Bewertung einzelner Bauteile bis hin zum Vergleich zweier Bauteilvarianten unter Berücksichtigung einer funktionellen Einheit. [1]

Recyclingfähigkeit

Ein methodischer Schwerpunkt lag auf der Abbildung der Recyclingfähigkeit. Diese hängt wesentlich von den eingesetzten Materialien, der Materialkombination, der Fügetechnik und der Trennbarkeit der Bauteilbestandteile ab. Metalle, thermoplastische Kunststoffe, duroplastische Kunststoffe und faserverstärkte Kunststoffe weisen unterschiedliche Verwertungsoptionen und Einschränkungen auf.

Zur Unterstützung der Anwender wurden im Tool Informationen zu möglichen bzw. typischen End-of-Life-Szenarien vorgesehen. Diese Informationen sollen eine erste Orientierung zu Verwertungswegen und deren ökologischer Relevanz geben. [16] [17]

Im Rahmen der Methodenentwicklung wurde geprüft, ob eine detaillierte Fügematrix auf Bauteilebene zur Bewertung der Demontierbarkeit eingesetzt werden kann. Dieser Ansatz erlaubt grundsätzlich eine differenzierte Bewertung, wurde jedoch im Rahmen der Tool-Konzeption als zu aufwendig für die vorgesehene Anwendung in frühen Entwicklungsphasen eingestuft.

Stattdessen wurde ein vereinfachter Ansatz vorgesehen, bei dem die relevanten Verbindungen zwischen Materialien bzw. Bauteilbestandteilen erfasst und Verbindungstypen zugeordnet werden. Beispiele für solche Verbindungstypen sind lösbare Verbindungen, nicht lösbare Verbindungen, integrale Materialverbunde oder faserverstärkte Verbundstrukturen. Zu den Verbindungstypen wurden erläuternde Hinweise vorgesehen, die deren Einfluss auf die Recyclingfähigkeit beschreiben.

Dieser Ansatz reduziert den Eingabeaufwand und ermöglicht dennoch eine Berücksichtigung wesentlicher Einflussgrößen auf die Recyclingfähigkeit.

Deklarierte bzw. funktionelle Einheit und Systemgrenzen

Für die drei Tool-Module wurden unterschiedliche Bezugsgrößen und Systemgrenzen festgelegt.

Im **Material-Quick-Check** liegt der Fokus auf der ersten Bewertung und Vorauswahl von Materialien. Als deklarierte Einheit kann ein frei wählbares Materialgewicht verwendet werden. Die Systemgrenze umfasst die Rohstoffbereitstellung, das End-of-Life sowie mögliche Vorteile in der Nachnutzung. Die Berücksichtigung von Nachnutzungsvorteilen erfolgt in diesem Modul

als orientierende Abschätzung, da diese Potenziale mit Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Verwertungstechnologien, Substitutionseffekte und Marktbedingungen verbunden sind.

Im Modul **Product LCA** erfolgt eine detailliertere Bewertung eines Bauteils und seiner Komponenten. Als deklarierte Einheit wird das Bauteilgewicht verwendet. Die Systemgrenze umfasst die Rohstoffbereitstellung, die Herstellung bzw. Verarbeitung sowie das End-of-Life. Die Nutzungsphase wird in diesem Modul nicht berücksichtigt. Ziel dieses Moduls ist die strukturierte Bewertung eines konkreten Bauteilkonzepts auf Basis von Materialzusammensetzung, Herstellungsprozessen und Entsorgungsoptionen.

Im Modul **Benchmark** werden zwei Bauteilvarianten auf Basis einer funktionellen Einheit miteinander verglichen. Die funktionelle Einheit ist abhängig von der jeweiligen Anwendung. Für Fahrzeuganwendungen wurde exemplarisch ein Karosserieteil in einem dieselbetriebenen Fahrzeug mit einer Fahrleistung von 250.000 km betrachtet. Für Rotorblätter von Windkraftanlagen wurde der Vergleich auf die erzeugte elektrische Energie bezogen, beispielsweise 1 GWh.

Die Systemgrenze im Benchmark-Modul umfasst den Lebensweg einschließlich Nutzungsphase. Dadurch können auch nutzungsbezogene Effekte, beispielsweise durch Gewichtsreduktion oder veränderte Energieerzeugung, in den Variantenvergleich einbezogen werden.

Zur Vereinfachung der Modellierung wurden bestimmte Aspekte nicht berücksichtigt. Hierzu zählen Verpackungen, Transporte sowie Maschinen und Infrastruktur. Diese Abgrenzung wurde damit begründet, dass hierzu in frühen Entwicklungsphasen häufig keine belastbaren Informationen vorliegen und der zusätzliche Modellierungsaufwand für den vorgesehenen Anwendungsfall nicht im Verhältnis zum erwarteten Erkenntnisgewinn steht. Diese Annahme wird im Bericht jedoch nur beibehalten, wenn sie projektintern begründet oder dokumentiert wurde. Folgend ist in Tabelle 2 die Gegenüberstellung der drei Tool-Module aufgelistet.

Tabelle 2: Übersicht über Bezugsgrößen und Systemgrenzen der Tool-Module

	Material-Quick-Check	Product LCA	Benchmark
Deklarierte bzw. funktionelle Einheit	Deklarierte Einheit: frei wählbares Materialgewicht	Deklarierte Einheit: Bauteilgewicht	Funktionelle Einheit: abhängig von der Anwendungsgruppe
Systemgrenzen	Rohstoffbereitstellung, End-of-Life und Vorteile in der Nachnutzung	Rohstoffbereitstellung, Herstellung / Verarbeitung und End-of-Life; ohne Nutzungsphase	Lebensweg einschließlich Nutzungsphase

Zielsetzung	Erste Materialbewertung und Vorauswahl	Bewertung eines konkretisierten Bauteilkonzepts	Vergleich zweier Bauteilvarianten
-------------	--	---	-----------------------------------

Allokationen

In den Vordergrunddaten, die im Front-End ersichtlich sind, wurden keine Allokationen vorgenommen. Dadurch sollte eine transparente und konsistente Modellierung der direkt durch die Anwender eingegebenen Prozesse und Materialflüsse gewährleistet werden.

In den verwendeten Hintergrunddatensätzen können hingegen Allokationen enthalten sein, insbesondere bei Prozessen der Energiegewinnung, Rohstoffbereitstellung oder Abfallbehandlung, bei denen mehrere Produkte, Nebenprodukte oder verwertbare Stoffströme entstehen.

Für Prozesse zur Verbrennung von Produktabfällen wurden Hintergrunddatensätze verwendet, bei denen die Modellierung der Emissionen und Stoffflüsse inputabhängig erfolgt. Dabei werden unter anderem Heizwert, Elementzusammensetzung und Transferkoeffizienten berücksichtigt. Relevante inputabhängige Parameter sind beispielsweise die Gehalte an Kohlenstoff, Wasserstoff, Chlor, Fluor, Schwefel, Stickstoff sowie Metallen. Auch Rückstände wie Schlacke, Kessel- und Filterasche werden entsprechend der Materialzusammensetzung modelliert.

Diese methodischen Festlegungen bildeten die Grundlage für eine konsistente Bewertung der betrachteten Tool-Module. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Qualität der Ergebnisse wesentlich von der Qualität der verwendeten Hintergrunddaten und der getroffenen Annahmen abhängt.

4.3.4 Relevante Ein- und Ausgangsgrößen für die Bewertung der Umweltperformance

Für die praktische Umsetzung der Bewertungsmethode wurden die relevanten Ein- und Ausgangsgrößen der einzelnen Tool-Module definiert. Ziel war es, den erforderlichen Datenbedarf, die Nutzerinteraktion und die Ergebnisdarstellung strukturiert festzulegen.

Die Ein- und Ausgangsgrößen unterscheiden sich je nach Modul, da die Module unterschiedliche Bewertungszwecke erfüllen. In folgender Tabelle 3 ist eine diesbezügliche Gegenüberstellung vorgenommen. Während der Material-Quick-Check eine schnelle Materialbewertung ermöglichen soll, dient die Product LCA der detaillierteren Bewertung einzelner Bauteile. Das

Benchmark-Modul ermöglicht schließlich den Vergleich zweier Bauteilvarianten auf Basis einer funktionellen

Tabelle 3: Ein- und Ausgangsgrößen der Tool-Module

	Material-Quick-Check	Product LCA	Benchmark
Input	Auswahl der Rohstoffe mit eingesetzter Menge; Auswahl eines End-of-Life-Szenarios; Auswahl eines Umweltwirkungsinдикators; Materialkosten	Rohstoffe mit eingesetzter Menge; Energieeinsatz; Entsorgungswege von Produktionsabfällen; Verbindungstypen einzelner Bestandteile; Entsorgungswege des Bauteils am Lebenswegende; Anwendungsgruppe des Bauteils; technische Daten für spätere Benchmark-Vergleiche	Auswahl der Anwendungsgruppe; Auswahl von zwei in der Product LCA angelegten Bauteilen
Output	Hinweise zur Auswahl eines End-of-Life-Szenarios abhängig vom Material; grafische Darstellung des ausgewählten Indikators mit Beiträgen; tabellarische Darstellung des PEF-basierten Ergebnisses; Ökoeffizienz	Hinweise zu Entsorgungswegen abhängig von Material und Verbindungstyp; grafische Darstellung der fünf Indikatoren mit dem größten PEF-Beitrag, aufgeschlüsselt nach Bauteilkomponenten; Gesamtbewertung	Tabellarische und grafische Gegenüberstellung der fünf Indikatoren mit dem größten PEF-Beitrag, aufgeschlüsselt nach Lebenswegphasen; Gesamtbewertung der beiden Bauteile
Funktion	Erste schnelle Bewertung von Materialien hinsichtlich Umweltwirkung, Recyclingfähigkeit und ökonomischer Aspekte; Unterstützung früher Entscheidungsprozesse	Detailliertere ökologische Bewertung einzelner Bauteile inklusive Material- und Prozessketten; Grundlage für spätere Benchmark-Vergleiche	Vergleich zweier Bauteilvarianten auf Basis einer funktionellen Einheit unter Berücksichtigung der Nutzungsphase; Unterstützung von Variantenentscheidungen

Aufbauend auf diesen Festlegungen wurde anschließend eine Datenbank mit Hintergrunddaten aufgebaut, die die für die Berechnung erforderlichen Kennwerte enthält. Die Datenbank bildet die Grundlage für die spätere softwareseitige Umsetzung der Bewertungsmethode.

4.4 Erstellung einer Datenbank mit relevanten Kennwerten

4.4.1 Zielsetzung

Für die Umsetzung der Bewertungsmethode im Softwaretool wurde eine strukturierte Datenbasis benötigt. Diese sollte die für die Berechnung erforderlichen technischen, ökologischen und prozessbezogenen Kennwerte enthalten und so aufbereitet sein, dass sie innerhalb der Tool-Module **Material-Quick-Check**, **Product LCA** und **Benchmark** genutzt werden kann.

Ziel der Arbeiten war der Aufbau einer modularen Datenbank, in der relevante Materialien, Prozesse, Energieflüsse, End-of-Life-Szenarien und mögliche Gutschriften hinterlegt werden. Die Datenbank sollte eine konsistente Verknüpfung von Nutzereingaben, Hintergrunddaten und Bewertungsindikatoren ermöglichen. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass Material- und Produktvarianten vergleichbar bewertet und die Ergebnisse nachvollziehbar im Tool dargestellt werden können.

Neben ökobilanziellen Kennwerten wurden auch technische und anwendungsbezogene Informationen berücksichtigt, sofern diese für die Auswahl, Einordnung oder spätere Berechnung in den Tool-Modulen erforderlich waren.

4.4.2 Struktur der Datenbank und Auswahl der Datensatzkategorien

Zu Beginn der Arbeiten wurde festgelegt, welche Datensatzkategorien für die Modellierung erforderlich sind. Die Datenbank wurde modular aufgebaut, damit einzelne Lebenswegabschnitte flexibel miteinander kombiniert werden können.

Folgende Datensatzkategorien wurden definiert:

- Materialien,
- Prozesse,
- Energie,
- Produktionsabfälle,
- End-of-Life-Szenarien,
- Gutschriften bzw. Credits,
- Transport,
- Verpackung.

Die Kategorien Transport und Verpackung wurden im Datenmodell als mögliche Erweiterungs- bzw. Strukturkategorien berücksichtigt. In der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Bewertungsme-

thodik wurden Transporte und Verpackungen jedoch nicht als reguläre Bestandteile der Berechnung einbezogen, da hierzu in frühen Entwicklungsphasen häufig keine belastbaren Informationen vorliegen und der zusätzliche Modellierungsaufwand für den vorgesehenen Anwendungsfall nicht im Vordergrund stand.

Durch die modulare Struktur können Produkte und Bauteile aus einzelnen Datenbausteinen zusammengesetzt werden. Dies ermöglicht es, Materialbereitstellung, Herstellungsprozesse, Produktionsabfälle, End-of-Life-Szenarien und mögliche Entlastungen getrennt abzubilden und je nach Tool-Modul unterschiedlich zu kombinieren.

4.4.3 Auswahl der Materialien, Prozesse und End-of-Life-Datensätze

Die Auswahl der Materialien und Prozesse erfolgte auf Grundlage der im Projekt adressierten Anwendungsfälle sowie der beim SKZ vorhandenen Informationen aus Prüf-, Entwicklungs- und Beratungstätigkeiten. Ziel war es, für den Kunststoffleichtbau relevante Werkstoffgruppen und Prozessrouten abzudecken.

Berücksichtigt wurden insbesondere folgende Materialgruppen:

- Thermoplaste, z. B. PP, PE, PA6, PA66 und PVC,
- Duroplaste, z. B. Epoxidharze,
- faserverstärkte Kunststoffe und deren Bestandteile, z. B. Glasfasern, Carbonfasern, GFK und CFK,
- Metalle, insbesondere Aluminium und Stahl,
- weitere Materialien, z. B. PUR-Systeme und Holz.

Die Aufnahme von Metallen und weiteren Materialien erfolgte, um Referenzsysteme, Materialvergleiche oder hybride Bauteilstrukturen abbilden zu können. Der Schwerpunkt der Datenbank lag jedoch auf Materialien und Prozessketten mit Relevanz für Kunststoff- und Faserverbund-Leichtbauprodukte.

Neben Materialdatensätzen wurden Prozess- und Energiedatensätze ausgewählt, um unterschiedliche Herstellungs- und Versorgungsszenarien abbilden zu können. Dazu zählen insbesondere:

- Strombereitstellung, z. B. konventionelle Strommixe und erneuerbare Varianten,
- Wärmebereitstellung, z. B. auf Basis von Erdgas,
- ausgewählte Verarbeitungs- und Herstellungsprozesse,
- Datensätze für Produktionsabfälle.

Passend zu den ausgewählten Materialien wurden End-of-Life-Datensätze hinterlegt. Dabei wurden unterschiedliche Entsorgungs- und Verwertungsrouten berücksichtigt, unter anderem:

- mechanisches Recycling von Kunststoffen,
- werkstoffliches Recycling von Metallen,
- spezifische Verfahren für Faserverbundwerkstoffe, z. B. Pyrolyse,
- thermische Verwertung bzw. energetische Nutzung.

Zur Abbildung möglicher Substitutionseffekte wurden separate Credit-Datensätze vorgesehen. Diese ermöglichen es, potenzielle Gutschriften aus Sekundärmaterialbereitstellung oder Energierückgewinnung modellhaft abzubilden. Die Nutzung solcher Gutschriften ist jedoch abhängig von den gewählten Systemgrenzen, den Substitutionsannahmen und dem jeweiligen Tool-Modul. Entsprechende Annahmen müssen daher transparent ausgewiesen werden.

4.4.4 Ökobilanzdaten und Wirkungsabschätzung

Für die ökobilanziellen Hintergrunddaten wurde die Datenbank ecoinvent Version 3.12 verwendet. Dabei kam das Systemmodell „Allocation, cut-off, EN15804“ zum Einsatz. Es ist auf die Anforderungen von Umweltproduktdeklarationen ausgerichtet und stellt unter anderem LCI-Indikatoren bereit, die für EPDs erforderlich sind.

Die Wirkungsabschätzung wurde auf Basis der in ecoinvent bereitgestellten LCIA-Datensätze umgesetzt. ecoinvent beschreibt den Ansatz EF EN15804 als Systemmodell zur Unterstützung der Anwendung von EN 15804+A2:2019 und zur Harmonisierung der Berechnung entsprechender Indikatoren [13].

Die entsprechenden Umweltwirkungsindikatoren wurden aus den verfügbaren ecoinvent-Datensätzen übernommen und für die Nutzung im Softwaretool aufbereitet. Dabei wurden die Datensätze so strukturiert, dass sie den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Tool-Modulen zugeordnet und mit den jeweiligen Nutzereingaben kombiniert werden können.

Zu beachten ist, dass die Verwendung des Systemmodells „Allocation, cut-off, EN15804“ spezifische methodische Festlegungen enthält, insbesondere hinsichtlich des Umgangs mit Sekundärmaterialien, Abfallströmen und End-of-Waste-Grenzen. ecoinvent weist darauf hin, dass sich dieses Systemmodell unter anderem durch den Cut-off-Punkt zwischen primärem und sekundärem System sowie durch die Berechnung EPD-relevanter Inventarindikatoren vom klassischen Cut-off-Systemmodell unterscheidet.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist daher zu berücksichtigen, dass die gewählten Hintergrunddaten und das verwendete Systemmodell die Ergebnisstruktur beeinflussen. Die Ergebnisse des Tools sind folglich immer im Zusammenhang mit den gewählten Systemgrenzen, Allokationsregeln und Datenquellen zu bewerten.

4.4.5 Aufbereitung und Integration der Daten in das Softwaretool

Die ausgewählten Datensätze wurden für die Integration in das Softwaretool strukturiert und den jeweiligen Datenbankkategorien zugeordnet. Dabei wurden die relevanten Kennwerte so aufbereitet, dass sie über definierte Eingabegrößen im Tool angesprochen und miteinander kombiniert werden können.

Für Materialdatensätze wurden insbesondere ökologische Kennwerte, Materialbezeichnungen, Materialgruppen und soweit erforderlich weitere beschreibende Informationen hinterlegt. Für Prozess- und Energiedatensätze wurden die für die Berechnung relevanten Umweltwirkungsdaten sowie Zuordnungen zu den jeweiligen Lebenswegabschnitten ergänzt. End-of-Life- und Credit-Datensätze wurden so strukturiert, dass sie mit den jeweiligen Materialien bzw. Verwertungswegen verknüpft werden können.

Die Datenbank bildet damit die Grundlage für:

- die Auswahl von Materialien im Material-Quick-Check,
- die bauteilbezogene Modellierung in der Product LCA,
- die Auswahl und Verknüpfung von End-of-Life-Szenarien,
- die Berechnung von Umweltwirkungsindikatoren,
- die Darstellung potenzieller Gutschriften,
- den Variantenvergleich im Benchmark-Modul.

Im Zuge der Datenaufbereitung wurde darauf geachtet, dass die Datenstruktur erweiterbar bleibt. Dadurch können zukünftig zusätzliche Materialien, Prozessrouten, Datensätze oder Bewertungsindikatoren ergänzt werden, sofern entsprechende Daten verfügbar sind.

4.4.6 Ergebnis der Arbeiten

Als Ergebnis der Arbeiten wurde eine strukturierte Datenbank mit relevanten Kennwerten für die ökologische Bewertung von Kunststoff- und Leichtbauprodukten aufgebaut. Die Datenbank enthält Material-, Prozess-, Energie-, End-of-Life- und Credit-Datensätze und bildet die zentrale Datengrundlage für die Berechnungen innerhalb des Softwaretools.

Durch die modulare Struktur können die Daten in unterschiedlichen Bewertungszusammenhängen genutzt werden. Im Material-Quick-Check unterstützt die Datenbank eine erste materialbezogene Bewertung. In der Product LCA ermöglicht sie die detailliertere Modellierung einzelner Bauteile und Komponenten. Im Benchmark-Modul bildet sie die Grundlage für den Vergleich zweier Produktvarianten unter Berücksichtigung der jeweils definierten funktionellen Einheit.

Die Qualität der Bewertungsergebnisse hängt wesentlich von der Qualität, Aktualität und Vollständigkeit der hinterlegten Datensätze sowie von den getroffenen methodischen Annahmen ab. Daher sind die Pflege und Erweiterung der Datenbank ein wichtiger Bestandteil für die zukünftige Nutzbarkeit und Weiterentwicklung des Tools.

4.5 Digitale Umsetzung der Methode

4.5.1 Allgemeines

Aufbauend auf der entwickelten Bewertungsmethodik und der aufgebauten Datenbank wurde die digitale Umsetzung des SuLiCo-Tools als webbasierte Anwendung realisiert. Die Anwendung besteht aus einer serverseitigen Komponente und einem clientseitigen Frontend. Das Frontend wird dem Anwender über eine vom Server bereitgestellte Webseite zur Verfügung gestellt.

Durch die Umsetzung als Webanwendung kann das Tool grundsätzlich ohne lokale Installation über einen Internetbrowser genutzt werden. Dadurch ist eine niederschwellige Bereitstellung für unterschiedliche Anwendergruppen möglich. Gleichzeitig erlaubt die technische Architektur auch einen Betrieb in einer geschlossenen IT-Umgebung, beispielsweise als firmeninterne Self-Hosting-Lösung. Auf diese Weise kann die Anwendung bei Bedarf so betrieben werden, dass vertrauliche Unternehmens- oder Produktdaten nicht außerhalb der jeweiligen Organisation verarbeitet werden.

Zur Unterstützung der Anwenderführung wurden im Tool zusätzliche Informationsfunktionen integriert. Über Informationsschaltflächen können erläuternde Hinweise eingeblendet werden. Diese betreffen insbesondere die Bedeutung einzelner Kennwerte, die Interpretation von Tabellen und Grafiken sowie Hinweise zu Verwertungswegen und Bewertungsannahmen. Dadurch soll die Anwendung auch für Personen nutzbar sein, die nicht über vertiefte Kenntnisse im Bereich der Ökobilanzierung verfügen.

Die digitale Umsetzung gliedert sich in die drei zentralen Funktionsbereiche:

1. Material-Quick-Check,
2. Product LCA,
3. Benchmark.

Diese Funktionsbereiche bilden die in Abschnitt 4.3 beschriebene Bewertungslogik softwareseitig ab.

4.5.2 Material-Quick-Check

Der Material-Quick-Check wurde als niedrighschwelliger Einstieg in das Tool umgesetzt. Ziel ist es, einen schnellen Vergleich unterschiedlicher Materialien auf Basis ausgewählter Umwelt- und Kostenkennwerte zu ermöglichen.

Material Quick-Check

Info

Here you can compare the environmental impact of individual materials during production and at the end of life. The results refer to the selected material quantity. This part of the tool is intended for initial assessment.

Materials i

Name	End of life	Costs / kg	Quantity		
1 PA6	Mechanical Recycling	1,29 €	1 kg	✎	✖
2 PP	Mechanical Recycling	0,76 €	1 kg	✎	✖

⊕

Environmental impact category i

GWP-total

▼

i

Global Warming Potential - total

Abbildung 2: Ausschnitt aus dem Eingabefeld des Material-Quick-Checks

Die Eingabe erfolgt über eine Eingabemaske. Dort können Anwenderinnen und Anwender Materialien auswählen sowie Menge, Kosten und ein End-of-Life-Szenario angeben. Für die Verwertung wird abhängig vom ausgewählten Material ein geeignetes Szenario vorgeschlagen. Zusätzlich wird ein erläuternder Text zur jeweiligen Verwertungsoption angezeigt. Dieser soll die Auswahl des End-of-Life-Szenarios unterstützen und die zugrunde liegenden Annahmen verständlicher machen.

Nach Bestätigung der Eingaben wird das ausgewählte Material in die Übersicht übernommen. Anschließend ruft die serverseitige Anwendung die zugehörigen Umweltkennwerte aus der

Datenbank ab, berechnet die mengenbezogenen Ergebnisse und stellt diese dem Frontend zur Darstellung bereit.



Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Ausgabefeld des Material-Quick-Checks

Die Ergebnisse werden grafisch und tabellarisch aufbereitet und dem Nutzer dargestellt. Dabei werden insbesondere die Umweltwirkungen der Materialbereitstellung, des gewählten Verwertungsszenarios sowie mögliche Gutschriften aus der Nachnutzung dargestellt. Ergänzend werden verschiedene Verwertungsoptionen gegenübergestellt, um Unterschiede zwischen möglichen End-of-Life-Szenarien sichtbar zu machen. In dieser Gegenüberstellung liegt der Fokus auf der Verwertung; die Herstellung des Materials wird dort nicht erneut berücksichtigt, um die Unterschiede der Verwertungswege klarer darzustellen.

Environmental impact category (i)

GWP-total ▼ ⓘ Global Warming Potential - total

Abbildung 4: Exemplarischer Ausschnitt einer Umweltwirkungskategorie

Standardmäßig wird der Indikator GWP-total angezeigt. Über ein Dropdown-Menü können weitere Umweltwirkungsindikatoren ausgewählt werden. Die Grafiken und Tabellen werden entsprechend aktualisiert. Für die auswählbaren Umweltwirkungsindikatoren werden Bezeichnung und Beschreibung bereitgestellt, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern.

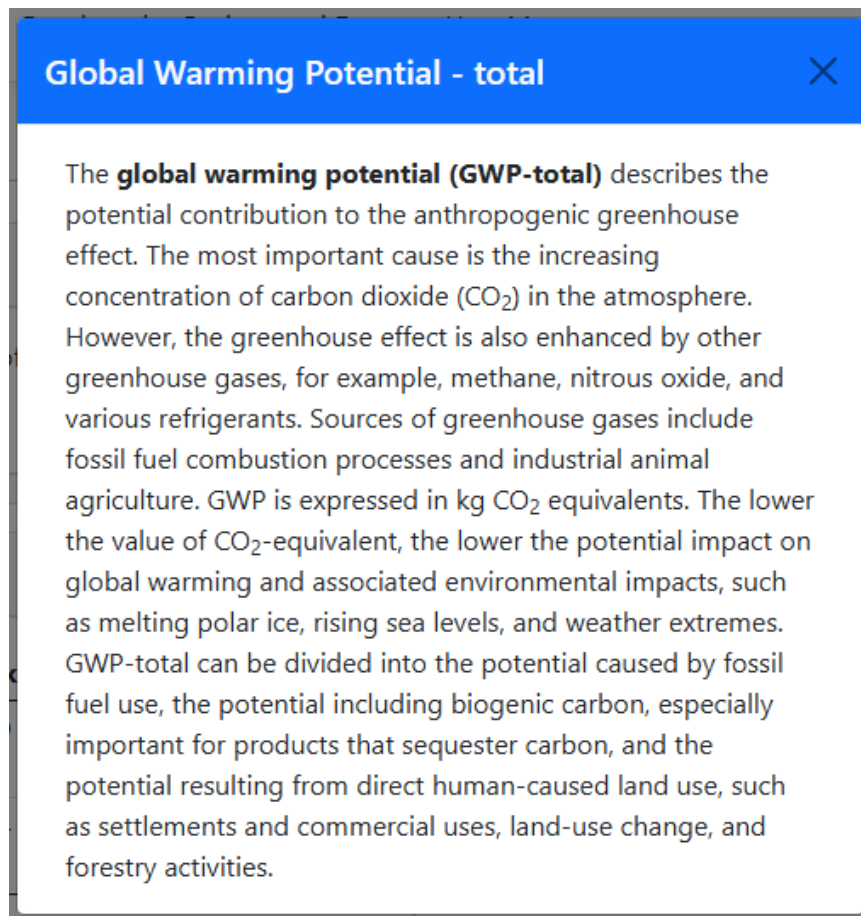


Abbildung 5: Exemplarischer Ausschnitt DER Bezeichnung und Beschreibung einer Umweltwirkungskategorie

Zusätzlich wird eine Summary-Tabelle angezeigt. Diese enthält für die ausgewählten Materialien den Wert der gewählten Umweltwirkungskategorie, den PEF-basierten Gesamtwert sowie die angegebenen Materialkosten. Dadurch können ökologische und ökonomische Aspekte in einer ersten Orientierung gemeinsam betrachtet werden.

4.5.3 Product LCA

Der Funktionsbereich Product LCA dient der modellhaften Abbildung und Bewertung einzelner Bauteile, Baugruppen oder einfacher Produkte. Im Gegensatz zum Material-Quick-Check werden hier nicht nur einzelne Materialien verglichen, sondern Bauteile aus mehreren Materialien, Prozessen, Energieeinsätzen, Produktionsabfällen und End-of-Life-Szenarien zusammengesetzt.

Zu Beginn wird ein neues Projekt angelegt. Dabei werden mindestens ein Projektname und das Bauteilgewicht angegeben. Optional können eine Beschreibung und eine Teilenummer

hinterlegt werden. Zur späteren Vergleichbarkeit wird das Projekt einer Produkt- bzw. Anwendungsgruppe zugeordnet. Diese Gruppenzuordnung ist insbesondere für den späteren Benchmark relevant, da nur Produkte innerhalb derselben Gruppe sinnvoll miteinander verglichen werden können.

Je nach Produktgruppe können zusätzliche Eigenschaften hinterlegt werden. Für eine Fahrzeuganwendung kann beispielsweise eine Fahrleistung erforderlich sein, wenn diese für spätere Nutzungsphasen- oder Benchmark-Berechnungen benötigt wird. Weitere Eigenschaften können ergänzt werden, sofern sie für die Bewertung oder den Vergleich relevant sind.

Für die Modellierung eines Bauteils werden Materialien, Energieeinsätze, Produktionsabfälle und End-of-Life-Szenarien hinzugefügt. Zusätzlich können Verbindungen zwischen den Materialien bzw. Bauteilbestandteilen definiert werden. Dabei wird zwischen unterschiedlichen Verbindungstypen unterschieden, beispielsweise lösbaren Verbindungen, nicht lösbaren Verbindungen oder integralen Materialverbunden.

Add Connection

Name
Verkleidung

AvailableParts
Bolzen
Verkleidung
Verkleidung

Parts
Verkleidung
Verkleidung

Description
Zusammenstellung der Verkleidung

ConnectionTypeld

☐ **detachable connection**
e.g. with screws

☐ **non-detachable connection**
e.g. glued

☒ **Composite**
e.g. Fiber-reinforced material

☐ **FRP**
Fiber reinforced plastics

☐ **Alloy**
e.g. bronze

Add Connection

Abbildung 6: Ausschnitt Beispiel für das Hinzufügen einer produktspezifischen Verbindung

Je nach Materialkombination und Verbindungstyp werden Hinweise zur möglichen Verwertung angezeigt. Diese Hinweise dienen der Orientierung und sollen den Einfluss von Materialwahl und Füge-technik auf die Recyclingfähigkeit verdeutlichen.

Die Auswertung eines Product-LCA-Projekts erfolgt komponenten- und wirkungskategoriebezogen. Die angegebenen Materialien und Energieeinsätze werden nach ihrem Beitrag zum PEF-basierten Ergebnis sortiert. Dadurch können die relevanten Einflussgrößen innerhalb des Bauteils identifiziert werden. Zusätzlich werden die fünf Umweltwirkungskategorien mit dem größten Beitrag dargestellt. Die Ergebnisse werden sowohl tabellarisch als auch grafisch aufbereitet.

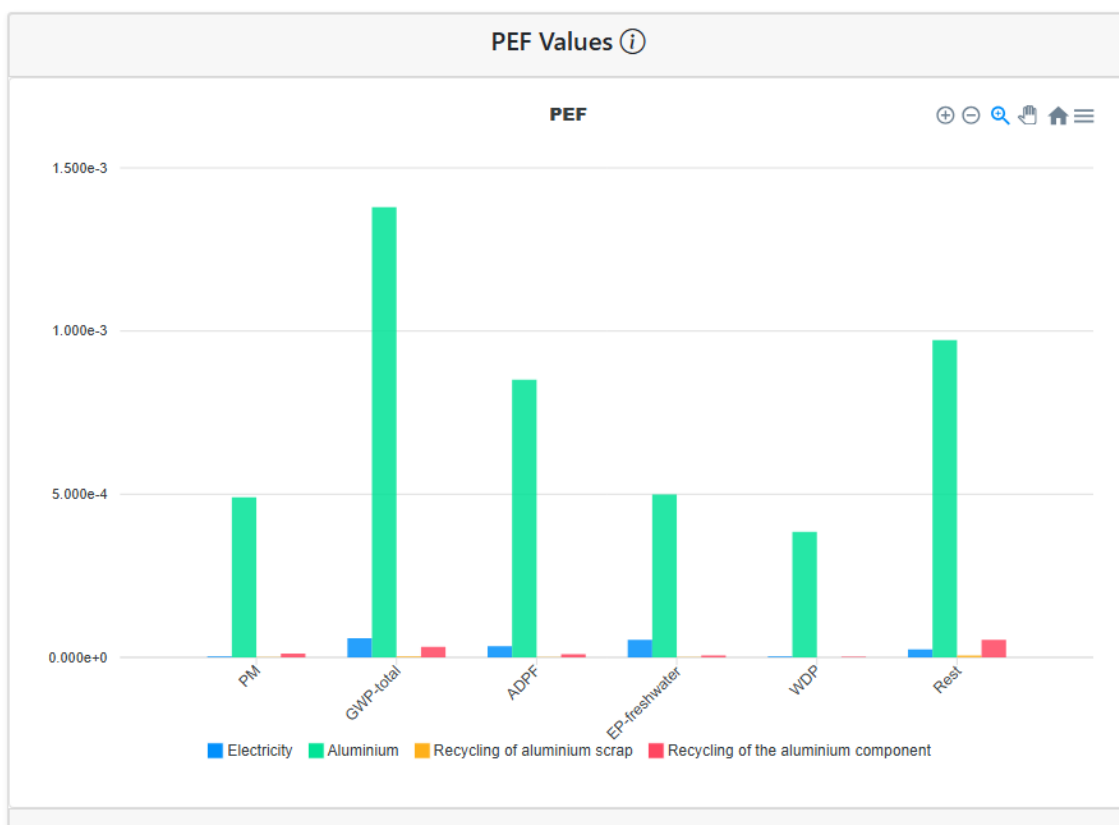


Abbildung 7: Ausschnitt einer beispielhaften Produktbewertung

Der Funktionsbereich Product LCA bildet damit die Grundlage für eine detailliertere Bewertung eines konkretisierten Bauteilkonzepts und stellt zugleich die Datengrundlage für spätere Benchmark-Vergleiche bereit.

4.5.4 Benchmark

Der Benchmark dient dem Vergleich von zwei zuvor angelegten Produkten bzw. Bauteilvarianten innerhalb derselben Produktgruppe. Ziel ist es, eine strukturierte Gegenüberstellung der

Umweltwirkungen zweier Varianten zu ermöglichen und damit Variantenentscheidungen zu unterstützen.

Für den Vergleich werden zwei im Product-LCA-Modul angelegte Projekte ausgewählt. Voraussetzung ist, dass beide Projekte derselben Anwendungsgruppe zugeordnet sind. Dadurch wird sichergestellt, dass die Varianten auf einer vergleichbaren funktionellen Grundlage bewertet werden.

Im Benchmark werden die relevanten Ergebnisse beider Produkte tabellarisch und grafisch gegenübergestellt. Die Darstellung umfasst insbesondere die Umweltwirkungskategorien mit dem größten Beitrag sowie den PEF-basierten Gesamtwert der beiden Varianten. Soweit für die jeweilige Produktgruppe vorgesehen, können auch nutzungsphasenbezogene Effekte berücksichtigt werden.

Der Benchmark ermöglicht damit eine vergleichende Bewertung von Produktvarianten. Die Ergebnisse sind jedoch im Zusammenhang mit den zugrunde liegenden Eingabedaten, Systemgrenzen, funktionellen Einheiten und methodischen Annahmen zu interpretieren.

4.5.5 Technische Umsetzung

Die Anwendung wurde als Webanwendung umgesetzt. Die serverseitige Anwendung verarbeitet Benutzeranfragen, ruft die erforderlichen Daten aus der Datenbank ab, führt Berechnungen durch und stellt die aufbereiteten Ergebnisse dem Frontend zur Verfügung. Auf der Seite der Anwenderinnen und Anwender werden die Ergebnisse im Internetbrowser dargestellt.

Für die serverseitige Umsetzung wurde das .NET-Framework in Version 8 verwendet. Das Frontend wurde unter Verwendung von .NET, HTML und JavaScript umgesetzt, um sowohl serverseitige als auch clientseitige Verarbeitungsschritte zu ermöglichen.

Zur Verbesserung der Bedienbarkeit wurden Eingaben in Form von Popup-Fenstern realisiert. Dadurch kann die aktuelle Ansicht beibehalten werden, während neue Informationen eingegeben oder bearbeitet werden. Die Verarbeitung der Eingaben erfolgt über asynchrone Methoden im Hintergrund. Durch den Einsatz von AJAX können einzelne Bereiche der Webseite aktualisiert werden, ohne dass die gesamte Seite neu geladen werden muss. Dies verbessert die Nutzerführung und reduziert Wartezeiten bei der Interaktion mit dem Tool.

Zur Verkürzung der Antwortzeiten werden ausgewählte Daten temporär zwischengespeichert. Dies betrifft beispielsweise den Produktvergleich im Benchmark-Modul. Bei der Auswahl eines Projekts werden die zugehörigen Daten aus der Datenbank geladen und für die aktuelle Sitzung zwischengespeichert. Die Daten bleiben für einen begrenzten Zeitraum verfügbar, beispielsweise bis zu 30 Minuten oder bis zum Abmelden des Benutzers.

Diese Architektur ermöglicht eine dynamische Nutzung der Anwendung und unterstützt zugleich eine modulare Erweiterung um zusätzliche Funktionen, Datensätze oder Bewertungsindikatoren.

4.5.6 Datenbankanbindung

Für die Datenhaltung wurde eine relationale Datenbankstruktur vorgesehen. Aufgrund der Verwendung des .NET-Frameworks wurde die Nutzung eines MSSQL-Servers umgesetzt.

Die Datenbank gliedert sich in drei zentrale Bereiche:

1. Benutzer- und Anmeldedaten

Dieser Bereich enthält Informationen zur Benutzerverwaltung, Authentifizierung und Sitzungsverwaltung.

2. Hintergrunddaten

In diesem Bereich sind die für die Berechnungen erforderlichen Material-, Prozess-, Energie-, End-of-Life- und Wirkungsabschätzungsdaten hinterlegt.

3. Projektdaten

Dieser Bereich enthält die von Anwenderinnen und Anwendern angelegten Projekte, Bauteilstrukturen, Materialzuordnungen, Prozessverknüpfungen, Verbindungstypen und Benchmark-relevanten Informationen.

Durch diese Trennung können Stammdaten, Bewertungsdaten und nutzerspezifische Projektdaten strukturiert verwaltet werden. Gleichzeitig unterstützt die Datenbankstruktur die Weiterentwicklung des Tools, da neue Datensätze oder zusätzliche Projektinformationen ergänzt werden können, ohne die Grundstruktur der Anwendung vollständig ändern zu müssen.

4.5.7 Ergebnis der Arbeiten

Als Ergebnis der Arbeiten wurde die entwickelte Bewertungsmethode in eine webbasierte Softwareanwendung überführt. Die Anwendung bildet die drei zentralen Funktionsbereiche Material-Quick-Check, Product LCA und Benchmark ab und verknüpft Nutzereingaben mit den hinterlegten Datenbankinformationen.

Der Material-Quick-Check ermöglicht eine schnelle materialbezogene Orientierung. Die Product LCA erlaubt die detailliertere Modellierung und Bewertung einzelner Bauteile oder einfacher Produkte. Der Benchmark unterstützt den Vergleich zweier Varianten innerhalb einer gemeinsamen Anwendungsgruppe.

Durch die Umsetzung als Webanwendung kann das Tool flexibel bereitgestellt werden. Neben einem öffentlich zugänglichen Betrieb ist grundsätzlich auch ein geschlossener Betrieb in einer firmeneigenen IT-Umgebung möglich. Dies ist insbesondere für Unternehmen relevant, die vertrauliche Produkt- oder Entwicklungsdaten nicht extern verarbeiten möchten.

4.6 Validierung der Methode

Zur Überprüfung der entwickelten Bewertungsmethode und ihrer digitalen Umsetzung wurden ausgewählte Fallbeispiele nachmodelliert. Ziel war es, die Rechenlogik, die Umsetzung der funktionellen Einheiten sowie die Ergebnisdarstellung im Tool zu prüfen. Eine externe kritische Prüfung oder normkonforme Verifizierung der erzeugten Ökobilanzergebnisse war nicht Gegenstand dieses Arbeitsschritts.

Als erstes Fallbeispiel wurde eine bestehende vergleichende Umweltbewertung von Rotorblättern für Windkraftanlagen herangezogen. Dabei wurden zwei Varianten betrachtet: ein glasfaserverstärktes Rotorblatt mit einer Masse von 15,3 t und einer Lebensdauer von 20 Jahren sowie ein kohlenstofffaserverstärktes Rotorblatt mit einer Masse von 12,7 t und einer Lebensdauer von 25 Jahren. Als Bezugsgrößen wurden ein Rotorblatt und 1 GWh erzeugter Strom angesetzt. [12]

Die Varianten wurden im Tool nachmodelliert und hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass das Tool die unterschiedlichen Materialvarianten, Massen, Lebensdauern und funktionellen Bezugsgrößen konsistent verarbeitet. Die Ergebnislogik entsprach der herangezogenen vergleichenden Umweltbewertung. Eine exakte quantitative Übereinstimmung sollte nur dann angegeben werden, wenn eine dokumentierte Abweichungsanalyse vorliegt.

Als zweites Fallbeispiel wurde eine Automobilkomponente betrachtet. Verglichen wurden eine Aluminiumvariante mit 6,0 kg und eine Variante aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff mit 2,1 kg. Als Bezugsgröße wurde eine Komponente mit einer Lebensdauer von 250.000 km angesetzt.

Auch dieses Fallbeispiel konnte im Tool abgebildet werden. Die Darstellung der Benchmark-Ergebnisse ist in Abbildung 8 anhand eines Screenshots dokumentiert.

Benchmark



Abbildung 8: Screenshot der Benchmark-Ergebnisse im SuLiCo-Tool.

Der Benchmark ermöglichte die Gegenüberstellung beider Varianten innerhalb derselben Anwendungsgruppe und stellte die Ergebnisse tabellarisch und grafisch dar. Damit wurde gezeigt, dass das Tool auch für eine Produktgruppe mit nutzungsphasenbezogener Bewertung einsetzbar ist.

Insgesamt bestätigten die Fallbeispiele, dass die entwickelte Methode in der Software funktionsfähig umgesetzt wurde. Die Validierung zeigte, dass Materialdaten, Produktmodellierung, funktionelle Einheiten und Benchmark-Vergleiche im Tool konsistent verarbeitet werden. Die Aussagekraft der Validierung ist jedoch auf die betrachteten Fallbeispiele und die zugrunde gelegten Annahmen beschränkt.

4.7 „Roll-Out“ Programm

Beim Roll-Out-Programm standen die Entwicklung und Bereitstellung von Informations- und Trainingspaketen, insbesondere für KMU, Exklusivschulungen für alle beteiligten Unternehmen des Projektkonsortiums, sowie kostenneutrale Schulungen und Inhouse-Seminare im Fokus.

Es fand eine Präsentation des Tools für assoziierte Partner „Umweltbewertung in der frühen Phase der Produktentwicklung“ statt. Im Rahmen der Präsentation wurden die Funktionen, Einsatzmöglichkeiten und Vorteile der Software vorgestellt. Außerdem wurde anhand einer Live-Demo gezeigt, wie die Anwendung zur Umweltbewertung verschiedener Materialien eingesetzt werden kann. Feedback wurde direkt in die Entwicklung eingebunden.

Informationen zum Tool und dessen Handhabung sind in etablierte Kursformate des SKZ eingebunden. Die Kursdozenten der Schulungen „CO₂-Fußabdruck selbst berechnen“ und „Umweltproduktdeklarationen (EPD) verstehen und anwenden“ wurde diesbezüglich weitergebildet. Zudem wurde das Tool SuLiCo bei den Inhalten zur Ökobilanzsoftware mit aufgenommen. Der erste Kurs wurde in Präsenz im Oktober 2025 durchgeführt. Es wurde Schulungsmaterial zu folgenden Themen entwickelt:

Modul 1 – Grundlagen Nachhaltigkeit im Produktdesign

Das Modul vermittelt grundlegende Konzepte der Nachhaltigkeit im Produktdesign und zeigt, warum dieses Thema für Unternehmen zunehmend relevant ist. Es werden zentrale Treiber wie regulatorische Anforderungen (z. B. EU Green Deal), Marktanforderungen und gesellschaftliche Entwicklungen eingeordnet. Die Teilnehmenden lernen, welche Rolle das Produktdesign für Umweltwirkungen spielt und wo die größten Hebel liegen. Ergänzt wird dies durch erste Reflexionsübungen und die Einordnung von Nachhaltigkeit im Unternehmenskontext.

Modul 2 – LCA & Design for Sustainability

Dieses Modul führt in die Methodik der Ökobilanz (LCA) ein und verknüpft diese mit nachhaltigkeitsorientiertem Produktdesign. Neben Grundlagen und Normen werden Aufbau, Zielsetzung und Nutzen von LCAs erläutert. Die Teilnehmenden lernen, wie Umweltwirkungen entlang des Lebenszyklus analysiert und in Designentscheidungen integriert werden können. Zudem wird die Abgrenzung zu verwandten Konzepten wie dem PCF thematisiert und die praktische Anwendung vorbereitet.

Modul 3 – Tool-Training (SuLiCo / LCA-Tools)

In diesem Modul steht die praktische Anwendung von Nachhaltigkeitstools im Mittelpunkt, insbesondere am Beispiel von SuLiCo. Die Teilnehmenden lernen, wie Daten eingegeben, Szenarien erstellt und Ergebnisse ausgewertet werden. Ziel ist es, den Umgang mit digitalen Tools zur Nachhaltigkeitsbewertung im Produktdesign zu verstehen. Durch Übungen wird die eigenständige Anwendung sowie die Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse gefördert.

Modul 4 – Recyclingstrategien & Kreislaufwirtschaft

Das Modul vermittelt Grundlagen der Kreislaufwirtschaft und zeigt, wie lineare Wertschöpfungsmodelle durch zirkuläre Ansätze ersetzt werden können. Zentrale Konzepte wie das Circular-Economy-Modell, die Abfallhierarchie und relevante Treiber werden erläutert. Die Teilnehmenden lernen, welche Strategien zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit und Ressourceneffizienz beitragen können. Der Fokus liegt darauf, wie diese Ansätze in Produktentwicklung und Unternehmenspraxis integriert werden können.

Modul 5 – Kommunikation & Umsetzung

Dieses Modul behandelt die Umsetzung und Kommunikation von Nachhaltigkeit im Unternehmen. Es zeigt, wie unterschiedliche Zielgruppen und Stakeholder angesprochen werden können und welche Erwartungen dabei eine Rolle spielen. Die Teilnehmenden lernen, Nachhaltigkeitsinformationen zielgruppengerecht aufzubereiten und intern wie extern zu kommunizieren. Zudem wird vermittelt, wie Nachhaltigkeit organisatorisch verankert und in Entscheidungsprozesse integriert werden kann.

Auch wurde das SuLiCo-Tool im Rahmen von Vortragsreihen, wie z. B. der SKZ Wissenslounge und dem DGM-Fachausschuss Polymerwerkstoffe, einem interessierten Anwenderkreis vorgestellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Verbundvorhaben SuLiCo – Sustainable Lightweight Construction wurde ein datenbankgestütztes Softwaretool zur Bewertung der Umwelt- und Ressourcenperformance von Kunststoff- und Leichtbauprodukten entwickelt. Ziel war es, ökologische Kennwerte bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung nutzbar zu machen und damit Material- und Variantenentscheidungen zu unterstützen.

Zu Beginn wurden Anforderungen potenzieller Anwenderinnen und Anwender durch Experteninterviews und eine ergänzende Umfrage erhoben. Die Ergebnisse zeigten, dass insbesondere eine einfache, frühzeitig einsetzbare und nachvollziehbare Bewertung von Materialalternativen als relevant eingeschätzt wurde. Als zentrale Kennzahlen wurden vor allem der CO₂-Fußabdruck, die Recyclingfähigkeit und der Sekundärmaterialanteil identifiziert.

Auf Basis dieser Anforderungen wurde das Tool in drei Funktionsbereiche gegliedert: den Material-Quick-Check für eine erste materialbezogene Bewertung, die Product LCA für die detailliertere Modellierung einzelner Bauteile sowie den Benchmark für den Vergleich zweier Produktvarianten auf Basis einer funktionellen Einheit. Methodisch wurden relevante Lebenswegabschnitte, Systemgrenzen, Kenngrößen und End-of-Life-Szenarien definiert. Für bewegte Leichtbauprodukte wurde zusätzlich die Nutzungsphase berücksichtigt, da Gewichtseinsparungen anwendungsabhängig ökologische Vorteile ermöglichen können.

Zur Umsetzung wurde eine strukturierte Datenbank mit Material-, Prozess-, Energie-, End-of-Life- und Credit-Datensätzen aufgebaut. Die Software wurde als webbasierte Anwendung realisiert und verknüpft Nutzereingaben mit den hinterlegten Hintergrunddaten. Informationsschaltflächen und grafische Ergebnisdarstellungen unterstützen die Interpretation der Ergebnisse auch für Anwenderinnen und Anwender ohne vertiefte Ökobilanzkenntnisse.

Die Methode wurde anhand ausgewählter Fallbeispiele plausibilisiert, darunter ein Vergleich von Rotorblattvarianten für Windkraftanlagen sowie ein Beispiel aus dem Automobilbereich. Die Fallbeispiele zeigten, dass die definierte Bewertungslogik softwareseitig umgesetzt wurde und Materialdaten, Produktmodellierung, funktionelle Einheiten und Variantenvergleiche konsistent verarbeitet werden können. Eine externe kritische Prüfung oder normkonforme Verifizierung der erzeugten Ökobilanzergebnisse erfolgte im Rahmen dieser Arbeiten nicht.

Die entwickelte Methodik und Software bilden eine Grundlage für die frühzeitige ökologische Bewertung von Kunststoff- und Leichtbauprodukten. Für eine weiterführende Nutzung sollten insbesondere die Datenbank erweitert, zusätzliche Materialien und Prozessrouten ergänzt und die Methode anhand realer Industrieanwendungen weiter validiert werden. Darüber hinaus

bietet die webbasierte Umsetzung Potenzial für eine spätere Anbindung an bestehende Entwicklungs-, Material- oder Unternehmensdatenbanken. Wichtig bleibt, die Ergebnisse als entwicklungsbegleitende Entscheidungsunterstützung zu verstehen und nicht als Ersatz für eine vollständig normkonforme Ökobilanz.

6 Literaturverzeichnis

- [1] SKZ-Das Kunststoff-Zentrum. "Sulico-Tool-Website." [Online.] Verfügbar: <https://www.sulico.org/>
- [2] Dr. Hermann Achenbach. "SuLiCo - Optimierung der CO2-Bilanz." [Online.] Verfügbar: <https://www.skz.de/forschung/projekt/sulico-sustainable-lightweight-construction>
- [3] Julius Ort. "SKZ develops software tool." [Online.] Verfügbar: <https://www.skz.de/en/newsarticle/software-tool-for-lightweight-plastic-components>
- [4] DIN EN ISO 14040:2021-02, *Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006_ + Amd_1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14040:2006_ + A1:2020*, Berlin.
- [5] DIN EN ISO 14044:2021-02, *Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_ + Amd_1:2017_ + Amd_2:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_ + A1:2018_ + A2:2020*, Berlin.
- [6] DIN EN ISO 14067:2019-02, *Treibhausgase_ - Carbon Footprint von Produkten_ - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14067:2018*, Berlin.
- [7] DIN EN 16485:2014-07, *Rund- und Schnittholz_ - Umweltproduktdeklarationen_ - Produktkategorieeregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN_16485:2014*, Berlin.
- [8] DIN EN ISO 14045:2012-10, *Umweltmanagement_ - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen_ - Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien (ISO_14045:2012); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14045:2012*, Berlin.
- [9] "Richtlinie VDI 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung," *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, Jg. 57, Nr. 6, S. 395, 2002, doi: 10.1515/htm-2002-570609.
- [10] K. Ehrlenspiel und H. Meerkamm, *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 6. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [11] S. Kirchert und J. Waack, *Personas entwickeln für Marketing, Vertrieb und Kommunikation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [12] TPI Composites, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), The International EPD System, Hg. *EPD_RecycleWind_TPI_LowRes*.
- [13] DIN EN 15804:2022-03, *Nachhaltigkeit von Bauwerken_ - Umweltproduktdeklarationen_ - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN_15804:2012+A2:2019_ + AC:2021*, Berlin.
- [14] Matthias Finkbeiner, Vanessa Bach, Annetkatrin Lehmann, *Environmental Footprint Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen*. Ressortforschungsplan des Bundesministerium für, 2018.

- [15] Europäische Kommission, *Empfehlung (EU) 2021/2279 der Kommission vom 15. Dezember 2021 zur Verwendung der Methoden für den Umweltfußabdruck zur Messung und Kommunizierung der Lebenszyklus-Umweltleistung von Produkten und Organisationen: Empfehlung (EU) 2021/2279 (PEF-Methode)*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021H2279>
- [16] Umweltbundesamt. "Fragen und Antworten zu Cradle to Cradle." [Online.] Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/fragen-antworten-zu-cradle-to-cradle#-was-ist-cradle-to-cradle>
- [17] Umweltbundesamt, "Transformation zu einer zirkulären Bauwirtschaft als Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung,"

I Abbildungsverzeichnis/ Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung des Sulico-Tools in Bezug auf ein Modell der Produktkonkretisierung	15
Abbildung 2: Ausschnitt aus dem Eingabefeld des Material-Quick-Checks.....	34
Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Ausgabefeld des Material-Quick-Checks.....	35
Abbildung 4: Exemplarischer Ausschnitt einer Umweltwirkungskategorie.....	35
Abbildung 5: Exemplarischer Ausschnitt einer Umweltwirkungskategorie.....	36
Abbildung 6: Ausschnitt Beispiel für das Hinzufügen einer produktspezifischen Verbindung	37
Abbildung 7: Ausschnitt einer beispielhaften Produktbewertung	38
Abbildung 8: Screenshot der Benchmark-Ergebnisse im SuLiCo-Tool.	42
Tabelle 1: Übersicht umweltrelevanter Prozesse im Lebenszyklus von Leichtbauprodukten	21
Tabelle 2: Übersicht über Bezugsgrößen und Systemgrenzen der Tool-Module	26
Tabelle 3: Ein- und Ausgangsgrößen der Tool-Module.....	28

II Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung / Vorschlag
AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
AP	Arbeitspaket
CAD	Computer-Aided Design
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EoL	End-of-Life
EPD	Environmental Product Declaration / Umweltproduktdeklaration
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GWP	Global Warming Potential / Treibhauspotenzial
HTML	Hypertext Markup Language
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
KFE	Kunststoff-Forschung und -Entwicklung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment / Ökobilanz
LCI	Life Cycle Inventory / Sachbilanz
LCIA	Life Cycle Impact Assessment / Wirkungsabschätzung
MSSQL	Microsoft SQL Server
PA	Polyamid

PCF	Product Carbon Footprint
PE	Polyethylen
PEF	Product Environmental Footprint
PLM	Product Lifecycle Management
PP	Polypropylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
SuLiCo	Sustainable Lightweight Construction
THG	Treibhausgas
TTP-LB	Technologietransfer-Programm Leichtbau