

# Konzept zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit und Zirkularität in der Entwicklung auf Basis einer nachhaltigen PLM-Strategie

*A concept for assessing environmental sustainability and circularity in the development phase on the basis of a sustainable PLM strategy*

Kristin Paetzold-Byhain<sup>1,\*</sup>, Kathrin Greiff<sup>2</sup>, Berfin Bayram<sup>2</sup>, Bernhard Saske<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Machine Elements and Machine Design (IMM), TU Dresden

<sup>2</sup> Institute for Anthropogenic Material Cycles (ANTS), RWTH Aachen University

\* Korrespondierender Autor:

Bernhard Saske  
IMM, TU Dresden  
George-Bähr-Str. 3c  
01069 Dresden  
☎ +49 351 463-34418  
✉ [bernhard.saske@tu-dresden.de](mailto:bernhard.saske@tu-dresden.de)

---

## Abstract

Technological advancements to improve the mechanical behaviour of fiber reinforced plastic (FRP) make sense as a result. In the context of the circular economy and sustainability, however, a holistic view of the entire product life cycle is required due to possible burden shifting in order to be able to take sustainability aspects into account in the use of FRP as part of development decisions. Life cycle assessment (LCA) and material flow analysis (MFA) provide metrics for this, but also require parameters from the manufacturing process in order to be able to derive comparative statements. Assessing the potential environmental impacts and circular economy potential of products in the design phase is essential for the circular economy. To achieve this, the integration of Product lifecycle management (PLM) and LCA is vital. In addition, for macro-level assessment, further integration of MFA and different circular economy indicators becomes crucial for decision-making. By anchoring these in information models for the PLM, they can be made accessible for development decisions.

---

## Keywords

*Lebenszyklusanalyse, PLM-Strategie, Systemmodell*

---

---

## 1. Einleitung und Motivation

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) stellen eine gute Alternative zu herkömmlichen Materialien dar, da sie aufgrund der möglichen Gewichtseinsparungen insbesondere in der Produktions- und Nutzungsphase von Vorteil sind. Der Umgang mit ihnen am End-of-life (EoL) ist jedoch eher problematisch und es gibt bisher nur sehr wenige Forschungsarbeiten, die sich auf den Umgang mit diesen Materialien am EoL konzentrieren. Im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft wird die Umweltbewertung von faserverstärkten Kunststoffen, ähnlich wie in anderen Bereichen, angesichts ihrer zunehmenden Anwendung wichtig. Insbesondere bei FVK ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von entscheidender Bedeutung, denn auch wenn FVK im Vergleich zu konventionellen Produkten (wie z. B. Stahl) in der Produktions- und vor allem in der Nutzungsphase geringere Auswirkungen auf die Umwelt haben können, könnte der EoL gegenteilig sein. Es ist also besonders relevant, die EoL-Behandlung für FVK zu berücksichtigen, die mögliche Recycling- und Wiederverwendungsoptionen betrachtet. Im Hinblick auf die Produktentwicklung, speziell für FVK, ist es von entscheidender Bedeutung, das Produktdesign mit einem „Design for Recycling“ Ansatz zu gestalten. Im Sinne einer konsequenten Umsetzung des Konzeptes der Kreislaufwirtschaft und der nachhaltigen Produktentwicklung ist es notwendig, bereits in der Entwicklung von Produkten und Technologien lebenszyklusweite Umweltbewertungen und Bewertungen der Zirkularität zu integrieren. Damit geht auch einher, die Machbarkeit von EoL-Handlungsoptionen einzubeziehen. Besondere Herausforderungen in diesem Zusammenhang ergeben sich für FVK, die zwar in der Nutzungsphase im Produktlebenszyklus vielfältige Vorteile vor allem in Bezug auf Leichtbau bieten und damit die Grundlage z.B. für den energieeffizienten Einsatz in der Anwendung liefern, in der Entsorgung am EoL aber eine große Herausforderung bezüglich ihrer Umweltauswirkungen darstellen [1, 2]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, bedarf es Ansätze, um EoL-Handlungsoptionen bereits in der Entwicklung zu berücksichtigen. In den Entscheidungen in der Produktentwicklung ist hier letztlich im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit ein Zielkonflikt zu lösen. Für fundierte Entscheidungen braucht es daher einer soliden und validen Datenbasis sowie verlässliche Metriken.

Für die Produktdatenverwaltung aber auch für die Bereitstellung von Daten und Informationen aus dem Produktlebenszyklus finden PLM-Systeme Verwendung. Diese bilden die Grundlage für möglichst ganzheitliche und ausgewogene Entscheidungen in der Produktentwicklung. Um Aspekte von Zirkularität und Nachhaltigkeit im PLM abzubilden, ist es erforderlich, die Parameter die diese Aspekte beschreiben in die Informationsmodelle zu integrieren und mit relevanten Datenbanken zu verknüpfen.

Im Beitrag wird ein Konzept vorgestellt und diskutiert, mit dem Metriken für die Umweltbewertung und die Bewertung von Zirkularität über eine nachhaltigkeitsorientierte PLM-Strategie in die Entwicklungsprozesse integriert werden können. In diesem Sinne sind für die Betrachtungen von FVK-Anwendungen zunächst geeignete Metriken zu erarbeiten und in die Informationsmodelle zu integrieren, die im PLM hinterlegt sind. Die für die Anwendung der Metriken notwendigen Datenbedarfe und die Quellen für diese sind zu identifizieren und in eine PLM-Strategie zu integrieren. Diese Verknüpfung aus Umweltbewertungsmethoden und PLM bildet die Grundlage zur Integration von Aspekten der ökologischen Nachhaltigkeit in die Entscheidungsprozesse der Produktentwicklung. Um dieses Ziel zu erreichen, gilt es folgende Forschungsfragen zu adressieren:

- Welche Methoden stehen für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit und Zirkularität zur Verfügung. Welche Anforderungen ergeben sich daraus für die notwendige Datenbereitstellung bezogen auf den Anwendungsfall FVK-Anwendungen?
- Welche spezifischen Datenanforderungen sind zu erfüllen und welche Implikationen ergeben sich daraus für die Gestaltung von PLM-Strategien?
- Wie können die Ansätze der Umweltbewertung in das PLM integriert werden?

---

## 2. Methodisches Vorgehen

Für die Erarbeitung eines Lösungskonzeptes ist es einerseits erforderlich, einen ganzheitlichen Bewertungsansatz für die Umweltbewertung von FVK-Anwendungen zu entwickeln, der sowohl Aspekte aus der Herstellungs- und Nutzungsphase als auch aus der EoL-Betrachtung inkludiert. Parallel dazu gilt es, Ansätze zu entwickeln, um die den Umweltbewertungen zugrundeliegenden Systemmodelle und die Metriken zu modellieren und in ein Informationsmodell für die Entwicklung von FVK-Bauteilen zu integrieren. Hierauf aufbauend gilt es, eine PLM-Strategie abzuleiten, um die für die Bewertung erforderlichen Datenbedarfe zu erfassen, zu strukturieren und bereitzustellen.

### 2.1. Erarbeitung eines Modells zur Umweltbewertung und Zirkularität

#### 2.1.1. Stand der Technik

Im Bereich der Umweltbewertung gibt es verschiedene etablierte Methoden zur Analyse von Produktsystemen wie z.B. die Lebenszyklusanalyse (LCA). Um systemische Auswirkungen abbilden zu können, ist eine Integration mit weiteren Bewertungsmethoden wie der Materialflussanalyse (MFA) erforderlich und damit einhergehende prospektive Szenarienanalysen [3]. Neben Umweltindikatoren können über eine MFA zudem CE-Indikatoren abgeleitet werden, die für eine Bewertung der Ressourceneffizienz und verschiedener R-Strategien notwendig sind. Die verfügbaren CE-Indikatoren werden im Rahmen der Konzeptentwicklung überprüft und eine Auswahl auf Basis der Eignung für FVK-Anwendungen getroffen.

Aktuelle LCA-Anwendungen im Bereich der FVK konzentrieren sich hauptsächlich auf Umwelteinsparungen in der Produktions- und Nutzungsphase oder werden im Rahmen einer vergleichenden LCA durchgeführt, um FVK mit konventionellen Materialien wie Stahl zu vergleichen. Es gibt nur eine begrenzte Anzahl von Studien, die sich auf die EoL-Behandlung konzentrieren und diese unter Umweltgesichtspunkten bewerten, eine Bewertung verschiedener R-Strategien bzw. Ansätze der CE besteht derzeit nicht. Die Notwendigkeit, das EoL-Handling von FVK in der Ökobilanz zu berücksichtigen wird z.B. in [1, 2] thematisiert. Darüber hinaus ist die Bewertung der Kreislauffähigkeit im Bereich der FVK aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit von wesentlicher Bedeutung. Um die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von Produkten aus FVK bereits in der Entwicklungsphase sicher zu stellen, braucht es geeignete Ansätze zur Sicherung der Datenqualität und -verfügbarkeit [6]. Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit von FVK ist es wichtig, nicht nur die Umweltbelastung in Bezug auf den spezifischen Produktlebenszyklus zu vergleichen und zu bewerten [7], sondern auch die Auswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus, z. B. in Bezug auf das Recycling zu betrachten.

Innerhalb der Ökobilanzierung gibt es verschiedene Ansätze zur Bewertung zukünftiger Entwicklungen und bezüglich des Systemdenkens. Eine wichtige Diskussion wird in Bezug auf die beiden Systemansätze geführt: attributional LCA (ALCA) und consequential LCA (CLCA). Während bei der ALCA das System und damit verbundene Lieferketten so modelliert wird, wie es ist, war oder voraussichtlich sein wird, stehen im CLCA-Ansatz die Folgen einer Entscheidung im Vordergrund. Mit der CLCA werden Umweltauswirkungen auf Basis marktorientierter Auswirkungen analysiert, die sich aus dem Produktlebenszyklus ergeben. Zu berücksichtigende Systemgrenzen gehen über das Produkt hinaus, wobei sogenannte marginale Daten [8] zur Bewertung genutzt werden. Ausgehend von diesen grundlegend unterschiedlichen Ansätzen wurden weitere Verfahren entwickelt, die Systemdenken und prospektive Betrachtungen einbeziehen, wie z.B. die prospektive Ökobilanz, die integrierte Ökobilanz oder die Entscheidungsökobilanz. Diese unterscheiden sich vor allem durch den Analysegegenstand, die in Kombination mit der Hauptmethode verwendeten Methoden/Modelle, die Daten und die gewählten Szenarien [9, 10].

---

Um die Auswirkungen der Integration technologischer Lösungen zu bewerten, sind größere Maßstäbe erforderlich, z. B. sektorale oder wirtschaftsweite Maßstäbe. Ein solcher Systemansatz ist von wesentlicher Bedeutung, insbesondere wenn es darum geht, Kreislaufwirtschaft und Umweltbewertung miteinander zu verbinden. Ein gängiges Beispiel ist das Recycling, das die Modellierung der anthropogenen Vorräte und ihrer Verfügbarkeit am Endverbraucher erfordert. Daher ist es auch wichtig, Recyclingprozesse bereits in der Phase des Materialdesigns zu simulieren (Design for Recycling) und die Auswirkungen früher chemischer und materialwissenschaftlicher Entscheidungen auf die Umweltauswirkungen abzuschätzen [11].

### 2.1.2. Vorgehensweise zum Aufbau der Bewertungsmetriken

Die Designphase der Produkte ist nicht nur entscheidend für die Verringerung der Umweltauswirkungen in der Produktionsphase, sondern auch für die Einschätzung der möglichen Umweltauswirkungen in der Nutzungs- und EOL-Phase. Im Rahmen des Konzepts der Kreislaufwirtschaft ist es daher wichtig, den gesamten Lebenszyklus der Produkte zu berücksichtigen und die Produkte mit den geringstmöglichen Umweltauswirkungen und dem höchsten Kreislaufpotenzial zu entwickeln. In der Praxis kann dies eine Herausforderung sein, da die Entwicklung von in hohem Maße recycelbaren oder wiederverwendbaren Produkten im Vergleich zu konventionellen Produkten mehr Energie im Produktionsprozess erfordern kann. An diesem Punkt ist es wichtig, den gesamten Lebenszyklus und das mögliche Substitutionspotenzial im Rahmen der anwendbaren Kreislaufwirtschaftsstrategie zu berücksichtigen. An dieser Stelle wird die Ökobilanz zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten eingesetzt. Da es innerhalb der LCA verschiedene Ansätze gibt, wird zunächst ein Überblick über relevante LCA-Ansätze gegeben, die für FVK relevant sind. Für die Bewertung der Kreislaufwirtschaft wird die MFA mit der Ökobilanz gekoppelt, um das System zu skalieren und eine Bewertung auf Makroebene durchzuführen und darüber CE Indikatoren zu integrieren und abzuleiten. Darüber hinaus wird eine kritische Diskussion über die möglichen systemweiten Anforderungen zur Erreichung von Kreislaufwirtschaftsmodellen geführt. Dies ist von entscheidender Bedeutung, wenn die Bewertung von der Mikro- auf die Makroebene erweitert wird, da ein Produkt zwar so gestaltet werden kann, dass es am Ende der Lebensdauer recycelbar ist, aber wenn es kein geeignetes Sammelsystem oder keine Recyclinganlagen gibt, ist die Recycelbarkeit in der Praxis nicht realisierbar. Daher ist ein systemweiter Ansatz, der verschiedene Aspekte abdeckt, für eine realistische Einschätzung und die Ermittlung der Hindernisse und Chancen von entscheidender Bedeutung.

Auf Basis dieser Analysen wird ein Bewertungsrahmen aufgebaut. Für diesen ist zunächst die Systemdefinition zu konkretisieren, die sich an den Merkmalen des identifizierten Status quo für die Nachhaltigkeitsbewertung von FVK orientiert. Sie umfasst die Festlegung der Systemgrenzen und die Systematisierung der Wertschöpfungsstufen. Verschiedene Elemente wie Inputs und Outputs, Materialmodelle, Komponenten und Produkte in einem Prozesssystem werden strukturiert und ihre Interdependenzen beschrieben. Grenzen und Rahmenbedingungen müssen geklärt werden. Anschließend wird die Ökobilanz auf Makroebene integriert. Es erfolgt eine Einordnung in Energie- und Ressourcenflüsse, die Identifizierung von Referenzflüssen und die Verbindung zwischen Technosphäre und Ökosphäre sowie die Behandlung von Multifunktionalitäten. Auf Basis der Systemdefinition erfolgt die eigentliche Umweltbewertung. Dazu wird das System mittels Graphen modelliert. Über das entstehende Netzwerk lassen sich die Metriken zur Umweltbewertung einbetten und konkretisieren. Während in dem beschriebenen Systemmodell Energie- und Ressourcenflüsse bereits integriert sind, erfolgt über Materialflussanalysen eine Konkretisierung und Erweiterung der Flussbetrachtungen, da hier zusätzlich zeitliche und räumliche Skalen adressiert sind und damit Einblicke auf einer Makroebene erlaubt. Die Quantifizierung von Bestandsdynamiken

---

und Markteffekten wird ermöglicht, was für eine ganzheitliche Bewertung von Produktsystemen erforderlich ist.

Da der Umweltbewertungsansatz auf deduktive Weise entwickelt wird, ist eine Validierung erforderlich. Um die Eignung und Vollständigkeit des Ansatzes zu hinterfragen und zu bestätigen, werden qualitative Erhebungsmethoden wie Experteninterviews genutzt. Die Gruppe der Experten umfasst Personen aus allen relevanten Interessengruppen. Aufgrund des interdisziplinären Forschungsfeldes gehören z.B. Experten aus den Bereichen Umweltwissenschaft, Verfahrenstechnik, Materialwissenschaft und Produktentwicklung dazu. Die Auswertungen der Interviews werden auch dazu genutzt, den Ansatz zu verfeinern.

## 2.2. Entwicklung einer nachhaltigkeitsorientierten PLM-Strategie

### 2.2.1. Stand der Technik

PLM-Methoden und -Strategien haben sich in der Praxis bewährt, da sie durch konsistente Prozesse und Datenstrukturen ein Datenbackbone für die Produktentwicklung bereitstellen [12]. PLM ist dabei mehr als eine Philosophie zu verstehen, die beschreibt, wie durch die Gestaltung von Produktmodellen und deren Abbildung in Produktdatenmanagement (PDM)-Systemen eine IT-Architektur zur Unterstützung von Entscheidungen in der Produktentwicklung durch ganzheitliche Datenbereitstellung und konsistente Geschäftsprozesse (z.B. Release- und Change-Management) entsteht [13, 14]. Grundlage hierfür sind Produktmodelle, die hierarchisch über Produktstrukturen organisiert sind und das Entwicklungswissen des Unternehmens über Stammdaten und Dokumente abbilden [15].

PLM-Konzepte können sowohl vertikal als auch horizontal betrachtet werden. Vertikale Integration von Daten und Informationen liegt vor, wenn innerhalb einer Entwicklungsorganisation entsprechende Strukturen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung geschaffen werden [15]. Die horizontale Integration bezieht sich auf die Situation, in der PDM-Strukturen über Unternehmensgrenzen hinweg mit Lieferanten und Projektpartnern zur Bereitstellung von Daten und Informationen über den gesamten Lebenszyklus beitragen [16]. Die Design for X-Strategien (DFX) [17] sind ein Beispiel für vertikale Integration. Der Grundgedanke dabei ist, mit Hilfe von PLM-Strategien das für die Entscheidung notwendige Fachwissen über das Produktmodell bereitzustellen oder in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Ein Zielkriterium im Sinne des (DFX) ist z.B. Nachhaltigkeit und Zirkularität, deren Aspekte dem Produktmodell aus dem Entwicklungsprozess zur Erstellung eines Produktpasses zugeordnet werden [18]. Als Herausforderung erweist sich, dass die PLM-Strategien heute durch hierarchische Produktmodelle organisiert sind und zunächst nur auf Strukturdaten basieren. Zwar können Aussagen zum Bauteilverhalten oder beliebige Daten, die während des Entwicklungsprozesses anfallen, als semantische Informationen hinterlegt werden [13], Querverbindungen über die Hierarchie hinaus werden jedoch nicht berücksichtigt.

Zu diesem Zweck werden zunehmend Ansätze verwendet, die den netzwerkartigen Strukturen von Produktmodellen gerecht werden [19]. Dies können graphenbasierte Ansätze sein, die auch Methoden bereitstellen, um dieses Netzwerk zu analysieren [20] oder dynamische Effekte zu beschreiben [21]. Ein weiterer viel beachteter Ansatz sind die Methoden des Model-based Systems Engineering (MBSE) [4]. Diese ermöglichen ebenfalls, den netzwerkartigen Charakter von Zusammenhängen im Produkt resp. Prozess abzubilden. Darüber hinaus erlauben MBSE-Modelle verschiedene Sichten auf das Produkt, so dass nicht nur das Produkt in seiner Struktur und seinem Verhalten modelliert werden kann [22], sondern auch der Entwicklungsprozess von den Anforderungen bis zu den Funktionen und spezifischen Komponenten abgebildet werden kann [22]. Neben den funktionalen Schnittstellen bieten diese Modelle auch organisatorische und prozedurale Schnittstellen, die helfen, die Daten- und Informationsflüsse ganzheitlich zu beschreiben [20].



## 2.2.2. Entwicklung eines nachhaltigkeitsorientierten Informationsmodells

Grundlage für die Entwicklung einer nachhaltigkeitsorientierten PLM-Strategie ist ein Informations- resp. Produktmodell, welches neben den produktbeschreibenden Parametern auch solche umfasst, über die die Umweltbewertung erfolgen kann. Die Herausforderung in der Entwicklung eines solchen Informationsmodells liegt darin, dass die für die Umweltbewertung notwendigen Informationen aus einer Top-Down-Betrachtung abgeleitet werden, denen nun im Sinne einer Bottom-Up-Herangehensweise konkrete Prozess- und Produktparameter zugeordnet werden müssen.

Aus Datenflusssicht ist es zudem notwendig, Wirkketten, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Parametern aus dem Herstellungsprozess für die identifizierten Parameter für die Ökobilanz und deren Zuordnung zu Prozessparametern zu erfassen und abzubilden. Zu diesem Zweck wird eine Ontologie entwickelt und mit Hilfe graphbasierter Ansätze visualisiert. Das im Ergebnis entstehende Informationsmodell ist mit dem Systemmodell für die Nachhaltigkeitsbewertung zu koppeln, um so die Grundlage für ein ganzheitliches Informationsmodell für die PLM-Strategie vorzubereiten. Bei der Erstellung der Datenmodelle werden die unterschiedlichen Hierarchieebenen (Mikro-, Meso- und Makroebene) und die verschiedenen Umweltdimensionen berücksichtigt.

Zur Umsetzung der PLM-Strategie müssen prozess-, physik-, konstruktions- und produktionsbezogene Wechselwirkungen zwischen den für die verschiedenen Bewertungsmetriken benötigten Parametern erfasst und analysiert werden. Gleichzeitig sollen typische IT-Werkzeuge identifiziert werden, die Daten und Informationen für Fertigungsprozesse und Simulationen generieren. Die identifizierten Parameter für LCA und MFA müssen den einzelnen Phasen im Produktlebenszyklus zugeordnet werden. Die für die Bewertung benötigten Informationen sind ebenfalls, aus einer Bottom-up-Sicht heraus, bestimmten Prozess-, Material- und Geometrieparametern zuzuordnen. Bild 1 zeigt schematisch das beschriebene Vorgehen.

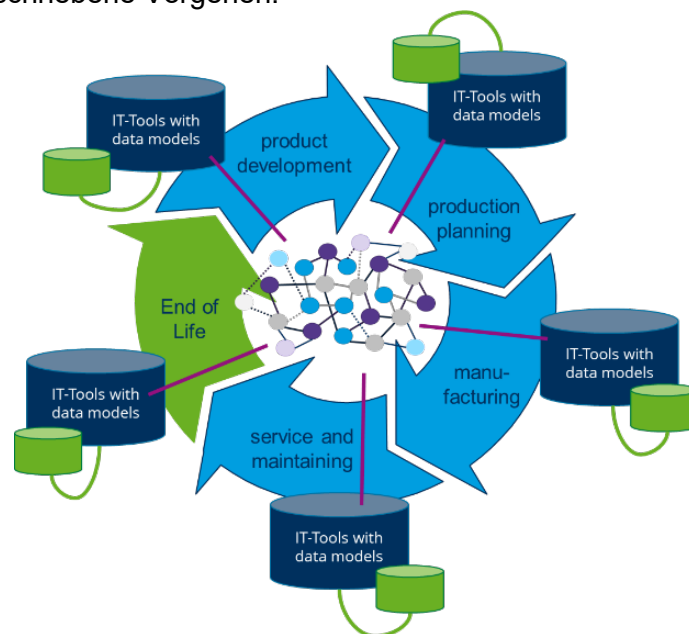


Bild 1: Informationsmodell als Herz der nachhaltigkeitsorientierten PLM-Strategie basierend auf dem Systemmodell für Nachhaltigkeitsbewertung

## 2.2.3. Ansatz zur prototypischen Implementierung der nachhaltigkeitsorientierten PLM-Strategie

Zur Validierung des Konzeptes für die nachhaltigkeitsorientierte PLM-Strategie soll dieses prototypisch umgesetzt und in einem Projekt getestet werden.

---

Zur Modellierung des Informationsmodelles wird auf Methoden des MBSE zurückgegriffen. Diese Modellierung erfolgt mit Sysml im „Enterprise Architect“. Zur Implementierung der PLM-Strategie wird auf ein frei verfügbares PDM-System „Aras Innovator“ zurückgegriffen. Hier gilt es nun, Lösungsansätze zu entwickeln, um das MBSE-Modell als Informationsmodell zu hinterlegen und damit den Informationsbackbone vorzubereiten. Für die konkrete Datenanbindung sind Schnittstellen zu schaffen, um nicht nur auf typische Datenverwaltungssysteme aus der Fertigung (PLC/SPS-, Scada-, MES-Systeme) zurückgreifen zu können, sondern auch weiterführende Informationen aus der Entwicklung z.B. aus Simulations- und Versuchsdatenbanken verfügbar zu machen. Zudem bedarf es der Integration von Daten- und Informationsverwaltungssystemen nicht nur aus dem Unternehmensumfeld, sondern auch zu frei verfügbaren Datenbanken, die Informationen für die Umweltbewertung bereitstellen. Die Verbindung zu den einzelnen Daten- und Informationsverwaltungssystemen erfolgt über Referenzierungen, um doppelte Datenhaltung zu vermeiden. Die Gestaltung eines geeigneten Nutzerinterfaces ist Grundlage dafür, dass die über das Systemmodell hinterlegten Metriken für den Entwickler zugänglich werden und für die Entscheidungsfindung genutzt werden können.

Mit dieser „Sandkastenlösung“ kann die nachhaltigkeitsorientierte PLM-Strategie für FVK-Anwendungen unter Nutzung konkreter Daten aus Fertigungsprozessen getestet werden.

### 3. Diskussion des Lösungsansatzes

Während FVK-Anwendungen aus Nutzungssicht wegen ihres Potentials für die Umsetzung von Leichtbaustrategien durchaus Akzeptanz finden, erweist sich deren Behandlung in der EoL-Phase als sehr schwierig. Mit dem dargestellten Ansatz für eine nachhaltigkeitsorientierte PLM-Strategie auf Basis eines ganzheitlichen Ansatzes zur Umweltbewertung und der Bewertung der Zirkularität wird eine Grundlage geschaffen, um EoL-Betrachtungen bereits in der Entwicklung von FVK-Anwendungen zu berücksichtigen und in die Entscheidungsfindung einfließen zu lassen.

In der Kreislaufwirtschaft werden mit den 9R-Strategien neben dem Recycling und der Reduzierung des Ressourceneinsatzes weitere Strategien diskutiert, um die Kreislaufführung von Materialien zu unterstützen [3]. Der vorgestellte Ansatz fokussiert zunächst auf Aspekte und Auswirkungen des Recyclings und der Reduzierung, bietet aber das Potential, durch entsprechende Anpassungen im Systemmodell und den Bewertungsmetriken auch andere Strategien zu unterstützen und ermöglicht vor allem Ergebnisse aus verschiedenen Strategien miteinander zu vergleichen.

Eine große Herausforderung in der LCA ist immer wieder, dass in der Bewertung mit unsicheren und unvollständigen Informationen umgegangen werden muss. Je früher im Produktentstehungsprozess entsprechende Umweltbewertungen vorgenommen werden, desto größer ist die mit den Daten verbundene Unsicherheit. Hierfür gilt es in der Zukunft Konzepte zu entwickeln, wie damit umgegangen werden kann. Trotzdem wird durch die Kopplung mit den verschiedenen Datenverwaltungssystemen entlang des Produktlebenszyklus die grundsätzliche Voraussetzung geschaffen, auf aktuelle Daten zuzugreifen und damit verfügbare Daten und Informationen stringent einzubinden. Eine zu erwartende kontinuierliche Vervollständigung der Datenbasis ist Voraussetzung für die Reduzierung von Unsicherheiten. Die Integration von zusätzlichen Mechanismen zur Auswertung der Datenbasen im Sinne einer Informationsgenerierung erscheint ein weiterer interessanter Punkt, um die Unsicherheiten zu reduzieren. Hierbei unterstützt das vorliegende Konzept, da es über Ontologien die unterschiedlichen Datenbasen verknüpft, was eine gezielte Analyse und Auswertung dieser unterstützt.

Der vorgeschlagene Ansatz befindet sich noch in der Entwicklung, so dass seine Anwendung im industriellen Maßstab, z.B. in einem Produktionsunternehmen, ein wesentliches Thema ist, das in künftigen Forschungsarbeiten untersucht werden könnte.

## 4. Zusammenfassung

FKV bieten viele Vorteile in der Nutzungsphase, aber die EoL-Behandlung stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Im Rahmen von lebenszyklusweiten Betrachtungen insbesondere bezüglich des EoL werden die Möglichkeiten für den Einsatz von prospektiven Bewertungsansätzen untersucht, sodass bereits in der Technologie- und Produktentwicklung ökologische Auswirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden können. Gleichzeitig sollen Entscheidungen im PLM die geschätzten Auswirkungen in Abhängigkeit vom Produktdesign berücksichtigen. Diese wechselseitige Verknüpfung von PLM und Umweltbewertung über LCA und MFA für ein nachhaltiges zirkuläres Rohstoffmanagement birgt bisher unerforschtes Potenzial.

Zunächst steht die Entwicklung der Metriken und die Identifikation der wesentlichen Parameter für die Bewertungsmethoden im Fokus der Forschungsarbeiten. Parallel erfolgt die Sammlung und Verarbeitung von Informationen, die aus dem PLM bereitgestellt werden können sowie die Definition korrespondierender Informationsmodelle.

In Anbetracht der zunehmenden Bedeutung der Kreislaufwirtschaft und des steigenden Einsatzes von FVK besteht Bedarf an weiteren Forschungsarbeiten zur praktischen Umsetzung auf industrieller Ebene sowie zu automatisierten Implementierungsansätzen für Design- und Produktionsprozesse.

## Literaturverzeichnis

- [1] Tapper, R. J.; Longana, M. L.; Norton, A.; Potter, K. D.; Hamerton, I.: An evaluation of life cycle assessment and its application to the closed-loop recycling of carbon fibre reinforced polymers. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 184(30), 107665. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107665.
- [2] Civancik-Uslu, D.; Ferrer, L.; Puig, R.; Fullana-I-Palmer, P.: Are functional fillers improving environmental behavior of plastics? A review on LCA studies. *The Science of the total environment*, 2018, 626, 927-940. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.149.
- [3] Hagedorn, W.; Greiff, K.; Pauliuk, S.: An environmental assessment framework for circular steel products. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 49, 193–207. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.031>.
- [4] Estefan, J. A.; Weilkiens, T.: MBSE-Methodologien. In: *Handbook of Model-Based Systems Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 1-40.
- [5] Noori, N. S.; Wolbers, J.; Boersma, K.; Vilasís-Cardona, X.: A Dynamic Perspective of Emerging Coordination Clusters in Crisis Response Networks. In *ISCRAM*, 2016.
- [6] La Rosa, A. D.; Cicala, G.: LCA of fibre-reinforced composites. In: Subramanian Senthilkan-nan Muthu (Hg.): *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, 2015, Cambridge: Elsevier Science & Technology, 301-323. DOI: 10.1016/B978-0-08-100169-1.00014-9
- [7] Mannheim, V.: Life Cycle Assessment Model of Plastic Products: Comparing Environmental Impacts for Different Scenarios in the Production Stage. *Polymers* 13, 2021, 777, DOI:10.3390/polym13050777.
- [8] Ekvall, T., & Weidema, B. P. (2004). System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3), 161-171.
- [9] Guinée, J.B.; Cucurachi, S.; Henriksson, P.J.G.; Heijungs, R.: Digesting the alphabet soup of LCA, *Int Journal of Life Cycle Assess* 23, 2018, 1507-1511. DOI: 10.1007/s11367-018-1478-0.
- [10] Europäische Kommission - Gemeinsame Forschungsstelle - Institut für Umwelt und Nachhaltigkeit: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. Erste Ausgabe März 2010. EUR 24708 DE. Luxemburg. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union; 2010. URL: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- [11] Wiprächtiger, M.; Hellweg, S.: Circularity assessment in a chemical company. *Bewertung der massenbezogenen vs. wirkungsbezogenen Kreislaufwirtschaft*. *Ressourcen, Umweltschutz und Recycling*, 2024, 204, 107458. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107458.
- [12] Eigner, M.; Stelzer, R.: *Product Lifecycle Management: Ein Leitfadens für Produktentwicklung und Lebenszyklusmanagement*. Springer Verlag, 2009, DOI: 10.1007/978-3-540-68401-5
- [13] Gerhard, D.: Daten- und Informationsmanagement PDM/PLM: Daten- und Informationsmanagement PDM/PLM. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*, Hanser Verlag München, 2016. S. 215-246. DOI: 10.3139/9783446445819.009
- [14] Herrmann, C.: *Ganzheitliches Life Cycle Management*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-01421-5



- 
- [15] Eigner, M.: System Lifecycle Management: Digitalisierung des Engineering. Deutschland: Springer Berlin Heidelberg, 2021. DOI: 10.1007/978-3-662-62183-7
- [16] Layer, M.; Leidich, J.; Schwach, S.; Saske, B.; Neubert, S.; Robl, P.; Paetzold-Byhain, K.: Data management of process plants as complex systems: systematic literature review and identification of challenges and opportunities. *Reviews in Chemical Engineering*, 2024, 40. Jg., Nr. 3, S. 329-349. DOI: 10.1515/revce-2022-0077
- [17] Wartzack, S.: Auswahl- und Bewertungsmethoden. Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 2021, S. 307-334.
- [18] Belkadi, F.; Bernard, A.; Laroche, F.: Knowledge based and PLM facilities for sustainability perspective in manufacturing: A global approach. *Procedia CIRP*, 2015, 29. Jg., S. 203-208. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.065
- [19] Chahin, A., & Paetzold, K. (2018, Juni). Planung von Validierungs- und Verifikationsschritten entsprechend der Abhängigkeit von Anforderungen und Produktarchitektur. In *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Parraguez, P.; Eppinger, S. D.; Maier, A. M.: Information flow through stages of complex engineering design projects: a dynamic network analysis approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 62(4), 2015, S. 604-617.
- [21] Noori, N. S.; Wolbers, J.; Boersma, K.; Vilasis-Cardona, X.: A Dynamic Perspective of Emerging Coordination Clusters in Crisis Response Networks. In *ISCRAM*, 2016.
- [22] Richter, J.; Dammann, M. P.; Kluge, M.; Saske, B.; Arndt, S.; Hornig, A.; Paetzold-Byhain, K.; Modler, N.: Digitalized Composite Material and Product Development – Strategies And Methods For Multiscale Experimental-Numerical Validation Processes Using PLM And MBSE Approaches. In *Proceedings of the 21st European Conference on Composite Materials (ECCM) Band 3*, Seiten 1576-1583, Nantes, 2024 DOI: 10.60691/yj56-np80