

Potentiale der Integration von MBSE und LCA zur Handhabung von Unsicherheiten und Varianten in der frühen Entwicklung

Potentials of integrating MBSE and LCA to handle uncertainties and variants in early design stages

David Inkermann^{1,*}

¹ Technische Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Integrierte Produktentwicklung

* Korrespondierender Autor:

David Inkermann

Robert-Koch-Straße 32

38678 Clausthal

☎ 05323/722271

✉ inkermann@imw.tu-clausthal.de

Abstract

There is an increasing need to support the evaluation of the environmental impacts of product concepts in early design stages. However, the application of Life Cycle Assessment is challenged by the complexity of modern products and a lack of data consistency. This paper indicates basic potentials of integrating Model-based Systems Engineering and Life Cycle Assessment by systematically reviewing the uncertainties in the first two phases of an LCA as well as challenges in handling of product variants and differing use cases. To ensure more efficient application and data handling a first concept for the methodical integration as well as the integration of data is proposed. Based on the analysis and initial concept fields for further research are derived.

Keywords

Model-based Systems Engineering, Life Cycle Assessment, Uncertainties, SysML, EcoDesign

1. Problemstellung und Hintergrund

Die Life Cycle Assessment (LCA) ist eine etablierte Systemanalyse- und Bewertungsmethodik zur Quantifizierung potentieller Umweltwirkungen von Produktsystemen unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen. Die Notwendigkeit LCA-Studien in frühen Entwicklungsphasen durchzuführen wird durch die Einführung neuer Technologien, bspw. Antriebstechnologien, deutlich verstärkt. Die Komplexität moderner Produktsystemen aufgrund zahlreicher und verschiedenartiger Komponenten, teilweise sehr unterschiedlichen Lebenszyklen der einzelnen Komponenten sowie einer Vielzahl von Anwendungsfällen erschwert die Durchführung von LCA-Studien. Grundsätzlich sind viele unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Produkteigenschaften denkbar, wodurch die sich viele unterschiedliche Produktsystemkonfigurationen und LCA-Ergebnisse ergeben. Zielsetzung dieses Beitrages ist es, die bei der Durchführung einer LCA bestehenden Unsicherheiten zu analysieren und geeignete MBSE-Methoden für die Handhabung der Kontext- und Modellstrukturunsicherheiten vorzuschlagen. Hierzu werden in den nächsten Abschnitten zunächst wichtige Grundlagen der LCA und des Model-Based Systems Engineering eingeführt.

1.1. Life Cycle Assessment in der Produktentwicklung

Life Cycle Assessments (LCA) ist eine systematische, analytische Methodik, um die Umweltwirkungen von Produktsystemen ausgehend von der Rohstoffgewinnung über die Produktherstellung und -nutzung bis zum End-of-Life zu quantifizieren. Hierfür werden Produktszenarien (Aufbau und Nutzung) spezifiziert, Material- und Energieflüsse modelliert, Daten zur Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs und Emissionen ermittelt und die Umweltwirkungen des Produktsystems quantifiziert. Bei der Modellierung wird zwischen *foreground system* und *background system* unterschieden, siehe Bild 1 rechts [1].

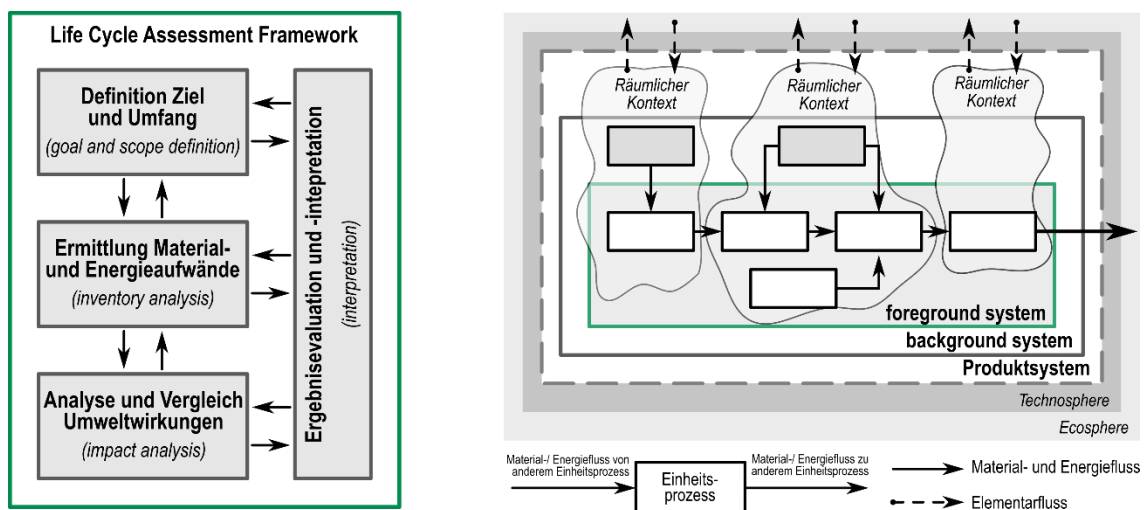


Bild 1: Methodisches Rahmenwerk und Systemgliederung der LCA; links: Hauptaktivitäten der LCA nach [2], rechts: Zusammenhänge zwischen foreground, background system sowie Produktsystem und Einheitsprozessen basierend auf [7]

Das foreground system definiert das zu untersuchende Produkt und die z.B. zur Herstellung und Nutzung erforderlichen Prozesse sowie damit verknüpfte Energie- und Materialaufwände. Das background system bildet alle Prozesse, die mit dem foreground system verbunden sind ab, wie z.B. Energiebereitstellungs- oder Transportprozesse. Die Durchführung der LCA gliedert sich nach ISO 14040 [2] in vier Hauptaktivitäten, siehe Bild 1 links. Anwendungen der

LCA im Rahmen der Produktentwicklung werden nach [3] als micro-Level Entscheidungsunterstützung klassifiziert. Fokussiert werden hierbei z.B. Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Produkte, die Ermittlung der Key Environmental Performance Indicators (KEPI) für eine Produktgruppe oder konkrete Maßnahmen für das EcoDesign. Für die Analyse und Quantifizierung der Umweltwirkungen sind in der Regel umfangreiche Daten (Produktstruktur, Materialaufwände, Fertigungsverfahren) zur Modellierung des foreground systems erforderlich. Daher wird eine LCA meist in späteren Entwicklungsphasen (Produktgestaltung) angewendet [4]. Für die Beurteilung verschiedener Gestaltungsvarianten (Geometrie- und Materialvariation) wurden in verschiedenen Arbeiten Ansätze zu Integration von LCA-Modulen in CAD-Umgebungen vorgeschlagen, z.B. [5, 6]. Fokussiert werden hierbei meist die Umweltwirkungen, die aus der Herstellung resultieren. Gleichzeitig weisen verschiedene Autoren darauf hin, dass die erforderlichen Daten mit hohen Unsicherheiten behaftet und Änderungen der Produktgestalt meist zeitaufwändige Wiederholungen der LCA führen. Cerdas [7] formuliert Anforderungen für eine verbesserte Integration der LCA in die Produktentwicklung. Er stellt fest, dass insbesondere die Flexibilität des Betrachtungsrahmens, kurze Bearbeitungszeiten sowie effiziente Prozesse für die Datenbeschaffung erforderlich sind, um die Sichtweisen von Produktentwicklung und LCA-Experten zu verknüpfen.

1.2. Model-based Systems Engineering

Basierend auf den Prinzipien des Systems Engineerings [8], zielt Model-based Systems Engineering (MBSE) darauf ab die Ergebnisse verschiedener Entwicklungsaktivitäten und -disziplinen in einem Systemmodell zu integrieren. Statt heterogener, dokumentenbasierter Produktmodelle werden semiformale und miteinander verknüpfte Produktmodelle genutzt, um die Konsistenz und Durchgängigkeit von Informationen im Entwicklungsprozess zu verbessern. MBSE Methodiken werden bspw. in [9–12] beschrieben. Dabei können zwei grundsätzliche Ansätze unterschieden werden [13]: die Integration mehrerer Informationen in ein Modell, z.B. Object Process Methodology (OPM) [12] und die Verknüpfung parallel entwickelter Views wie in der System Modeling Language (SysML) [10, 11]. Die verbreitete SysML-Syntax verwendet Struktur-, Verhaltens- und Anforderungsdiagramme, um das zu entwickelnde System aus verschiedenen Sichten und auf unterschiedlichen Detailebenen abzubilden [10]. Innerhalb der Diagramme werden Objekte (z.B. Aktivitäten, Komponenten, Anforderungen) dargestellt und durch Flüsse sowie unterschiedliche Relationen (z.B. *satisfy*, *derive*, *allocate*) verknüpft. Die SysML definiert damit die zu verwendenden Modellelemente und Syntax, während Tools wie SparxSystems Enterprise Architect für die Erstellung und Analyse der Modelle verwendet werden. Diese Werkzeuge unterstützen eine korrekte Anwendung der Sprache und die Erzeugung unterschiedlicher Sichten (Diagramme). MBSE-Methoden werden eingesetzt, um verschiedene Entwicklungsaktivitäten zu unterstützen, darunter Anforderungserhebung [14], Architekturentwurf [13], Konzeptentwicklung und Änderungsauswirkungsanalyse in mechatronischen Systemen [15], Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse [16] oder die Entwicklung rekonfigurierbarer Systeme [17]. Abgesicherte Erkenntnisse über den Nutzen und die Vorteile von MBSE in der industriellen Praxis werden bisher kaum berichtet. Ausgehend von einer Literaturanalyse zeigen Henderson und Salado [18] auf, dass die wesentlichen Vorteile in der Verbesserung der Kommunikation und des Informationsaustausches, der Rückverfolgung und der Reduzierung der Entwicklungszeit zu sehen sind. Ausgewählte Methoden und Modelle aus des MBSE zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses schlagen Husung et al. [19] vor. Erste Ansätze zur Integration von Informationen für die Bewertung von Umweltwirkungen in ein SysML-Modell werden in [20] beschrieben. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie bestehende Methoden des MBSE für die Durchführung von LCA-Studien genutzt werden können.

1.3. Zielsetzung und Forschungsmethodik

Obwohl die LCA großes Potential für die Entwicklung nachhaltigerer Produkte und Prozesse bietet, ergeben sich in den frühen Entwicklungsphasen und bei der Berücksichtigung verschiedener Lebenszyklusoptionen Herausforderungen hinsichtlich der Modellierung des *foreground systems* sowie der Handhabung von Unsicherheiten und Varianten. Ziel des Beitrags ist es, Potentiale des MBSE für die Durchführung von LCA-Studien und die Bereitstellung erforderlicher Daten zu untersuchen. Es wird aufgezeigt, welche Methoden und Modellierungstechniken des MBSE geeignet sind, um Unsicherheiten hinsichtlich der Modellstruktur (Diskrepanz zwischen modellierten Zusammenhängen und realer Struktur des Systems) und des Kontextes (Entscheidungen im Hinblick auf Ziel und Umfang der Studie) sowie Varianten des Produktsystems (Produktarchitektur und Nutzungsprozesse) effizient zu handhaben. Des Weiteren wird untersucht, welche Möglichkeiten zur Integration erforderlicher LCA-Daten in SysML-Modelle bestehen. Im Fokus stehen dabei zwei Forschungsfragen:

- Welche Unsicherheiten bestehen bei der Anwendung der LCA in frühen Entwicklungsphasen und auf welche Ursachen lassen sich diese zurück führen?
- Welche Methoden des MBSE und Modellelemente der SysML eignen sich, um die identifizierten Ursachen von Unsicherheiten zu reduzieren und die Effizienz der LCA in frühen Entwicklungsphasen zu verbessern?

Übergeordnetes Ziel ist es, Forschungsfelder für die Integration von MBSE und LCA zu definieren und hinsichtlich des Nutzens für Produktentwickler:innen zu priorisieren. Im folgenden Kapitel werden hierzu zunächst die Ursachen und Arten von Unsicherheiten und Variabilitäten sowie Ansätze für die Handhabung von Prozess- und Produktvarianten im Life Cycle Assessment beschrieben. Zudem werden bestehende Ansätze für das Computational Life Cycle Engineering aufgezeigt. In Kapitel 3 werden den häufig auftretenden Unsicherheiten in den ersten zwei Phasen einer LCA-Studie MBSE-Methoden gegenübergestellt und die Potentiale der Integration benannt. Des Weiteren wird ein initiales Konzept für die Integration von MBSE und LCA skizziert. Aufbauend hierauf werden in Kapitel 4 Forschungsbedarfe formliert. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion und dem Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten.

2. Handhabung von Unsicherheiten und Varianten im Life Cycle Assessment

Es werden verschiedene Ansätze für die Kategorisierung und Handhabung von Unsicherheiten und Variabilitäten, z.B. [21, 22], sowie den Umgang mit Varianten und Komplexität des Produktsystems, z.B. [23, 24], vorgeschlagen. Für die Klassifikation von Unsicherheiten und Variabilitäten wird in diesem Beitrag das Rahmenwerk von Huijbregts [25] zugrunde gelegt und um den Aspekt der Varianten des Produktsystems (*foreground system*) erweitert, siehe Bild 2. Unsicherheiten sind bspw. auf ungenaue Messungen, fehlende Daten oder Modellannahmen zurückzuführen [25]. Variabilitäten hingegen beruhen auf inhärenten Veränderungen in der realen Welt [25]. Produktarchitekturvarianten sind je nach Betrachtungszeitpunkt als unterschiedliche Produktvarianten (unterschiedliche *foreground systems*) oder zeitliche Veränderungen des *foreground systems* z.B. während der Produktnutzung anzusehen. Hieraus ergeben sich spezifische Anforderungen an die Modellierung des Produktsystems, siehe Abschnitt 3.1.

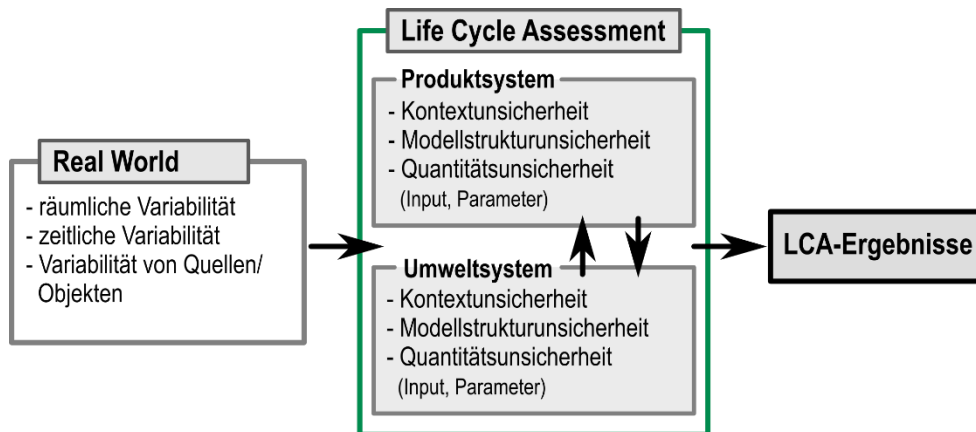


Bild 2: Variabilität und Varianten als Ursachen für Unsicherheiten und Abweichungen sowie verschiedene Arten von Unsicherheiten im Life Cycle Assessment, basierend auf [25] und [21]

2.1. Unsicherheitsarten und -handhabung in der LCA

Um fundierte Entscheidungen treffen zu können ist es erforderlich, Unsicherheiten und Abweichungen der LCA-Ergebnissen für verschiedene Produktsysteme verstehen und nachvollziehen zu können. In der LCA-Literatur werden zahlreiche Ansätze für die Klassifikation, Ermittlung und Handhabung von Unsicherheit bei der Durchführung einer LCA vorgeschlagen und angewendet, z.B. [4, 21, 22, 25, 26]. Für die Unterscheidung und Charakterisierung von Unsicherheiten greifen Igos et al. [21] die allgemeinen Unsicherheitsdimensionen nach Walker et al. [27] auf und unterscheiden zwischen *Lokalität der Unsicherheit (location)*, d.h. die Position der Unsicherheit im LCA Modellierungsprozess, *Grad der Unsicherheit (level)* und *Art der Unsicherheit (nature)*. Die Klassifizierung des Ortes erfolgt in Rahmen dieses Beitrags basierend auf Igos et al. [21], siehe Bild 2, und wird in Kontext, Modellstruktur und Quantität (Inputs und Parameter) unterschieden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Unterscheidung und Beispiele von Unsicherheiten entlang der Phasen einer LCA (Ort der Unsicherheit)

Lokalität der Unsicherheit	Kontextunsicherheit	Modellstrukturunsicherheit	Quantitätsunsicherheit
Erläuterung und Relevanz für LCA-Phasen	Methodische Entscheidungen im Zusammenhang mit Ziel und Umfang der LCA-Studie, z.B. Definition der Funktionseinheit oder Gewichtung von Einflussfaktoren; Spiegeln Annahmen und Zielsetzung des LCA-Anwenders wider	Diskrepanz zwischen modellierten (mathematisch) Beziehungen und realer Struktur des Systems; Modellannahmen oder nicht berücksichtigte Zusammenhänge; Relevant für Modellierung jedes Einheitsprozesses des foreground systems und alle Impaktindikatoren	Abweichungen/Schwankungen von Eingangsgrößen und einzelner Parameter; für alle Daten der Material- und Energieaufwände (inventory analysis) der Quantifizierung der Umweltwirkungen (impact analysis) relevant
Beispiel für Unsicherheit im Rahmen der LCA	Veränderlichkeit der Leistungsmerkmale einer Funktionseinheit; zeitliche Gültigkeit Systemgrenze	Fehlende/ unbekannte Beziehungen (z.B. Emission eines Fahrzeugs unabhängig von Kraftstoffverbrauch)	Gültigkeit der verwendeten Daten für jeden Energiestrom (inventory analysis); Repräsentativität des Beschreibungsfaktors (impact factor)

In [21] und [25] werden für die verschiedenen LCA-Phasen Beispiele für die Unsicherheitsarten genannt, siehe Abschnitt 3.1, und Ansätze für deren Handhabung aufgezeigt. Lloyd und Ries [22] stellen fest, dass in nahezu allen LCA-Studien Quantitätsunsicherheiten z.B. in Form von Datenunsicherheiten der Prozessinputs, Umwelt-emissionen oder Technologieeigenschaften berücksichtigt werden. Gleichzeitig bieten

verschiedene LCA-Softwarelösungen wie OpenLCA oder Brighthouse2 Möglichkeiten, Quantitätsunsicherheiten durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu berücksichtigen. Zudem werden Unsicherheitsausbreitung (in der Regel durch Monte Carlo Methode) und Sensitivitätsanalysen (in der Regel durch Störgrößenanalyse oder one-at-a-time Analyse) durch viele Softwarelösungen unterstützt. Mit dem Ziel LCA-Studien in frühen Entwicklungsphasen mit limitierten Daten [4], auch aufgrund neuer Technologien [28], zu unterstützen, liegt der Fokus in diesem Beitrag auf der Handhabung von Kontext- und Modellstrukturunsicherheiten. Hierfür werden in der Regel Szenarioanalysen durchgeführt und die Umweltwirkungen mithilfe unterschiedlicher Modelle des *foreground* und *background systems* berechnet. Die Zuverlässigkeit der Analysen steigt dabei mit zunehmender Anzahl der Modelle und der Notwendigkeit verschiedene Experten zu beteiligen deutlich an. In Abschnitt 3.1 wird aufgezeigt, durch welche Methoden des MBSE die auftretende Kontext- und Modellstrukturunsicherheiten reduziert werden können.

2.2. Modulare LCA für die Handhabung von Prozess- und Produktvarianten

Die inhärente Komplexität von Produktsystemen resultiert in vielen möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Produkteigenschaften [24]. Dies führt zu einer hohen Anzahl möglicher Kombinationsalternativen im *foreground system* sowie vielen unterschiedlichen Produktsystemkonfigurationen und LCA-Ergebnissen, wodurch der Aufwand einer LCA-Studie stark ansteigt. Modulare LCA sind ein Ansatz für die effiziente Modellierung und den Vergleich alternativer Produktlebenszyklen [29] und Produktvarianten [23]. Dabei wird die Umweltwirkung zunächst für einzelne Module berechnet und anschließend die Summen für jede Alternative der Produktstruktur oder Wertschöpfungskette ermittelt. Module werden daher innerhalb des Produktsystems definiert und beschreiben Gate-to-Gate-Prozesse oder Lebenszyklusphasen, die durch Einheitsprozesse modelliert werden können, z.B. [30], oder fassen die Komponenten des Produktes zusammen, z.B. [23]. In Bild 3 ist eine Gegenüberstellung der möglichen Modularisierung für eine LCA dargestellt.

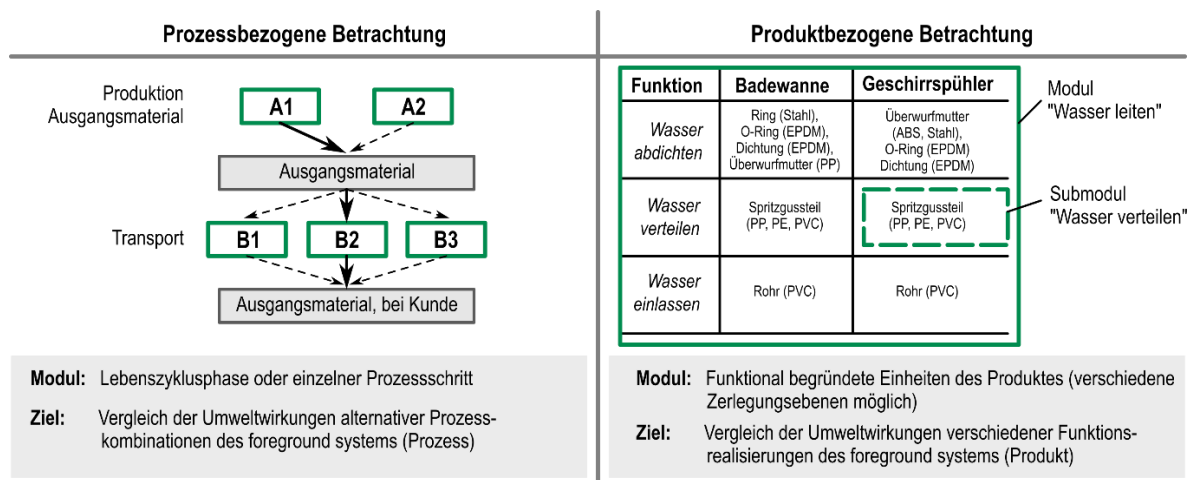


Bild 3: Vergleich der Ziele und Definition von Modulen einer prozess- und produktbezogenen modularen LCA

In [23] wird aufgezeigt, dass ausgehend von der funktionalen Moduldefinition ein direkter Vergleich der Umweltwirkungen von zwei Produktvarianten ermöglicht wird und dabei auch unterschiedliche Lebenszyklen der Module berücksichtigt werden können. Zudem ist es möglich die Umweltwirkung von Alternativen der Funktionserfüllung in frühen Entwicklungsphasen zu evaluieren und damit unterschiedliche Produktstrukturen zu bewerten. Dabei kann der Aufwand für die Durchführung eine LCA reduziert werden, indem vorrangig neue oder alternative Module betrachtet werden und für andere Module auf Ergebnisse bestehender

LCA-Studien zurückgegriffen wird. Gleichzeitig können die Umweltwirkungen bei einer funktionsorientierten Moduldefinition einzelnen Funktionen zugeordnet werden [23]. Modulare LCA geht mit Vereinfachungen, insbesondere Vernachlässigung oder Vereinfachung der Wechselwirkungen zwischen Modulen, einher. Diese Vereinfachungen sind in frühen Entwicklungsphasen in der Regel vertretbar, sollten jedoch als Kontext- oder Modellstrukturunsicherheiten berücksichtigt werden. Für die konsistente Handhabung der Daten aus Produktentwicklung (Moduldefinition) sowie LCA bietet das MBSE besondere Potentiale, siehe Abschnitt 3.1.

2.3. Computational Life Cycle Engineering

Die Modellierung und Analyse der Umweltwirkungen eines Produktsystems über den gesamten Lebenszyklus ist zeitaufwändig. Es sind spezifische Modellierungsfähigkeiten für die LCA und tiefgreifende Kenntnisse des zu analysierenden Produktsystems erforderlich. Verfügbare Softwarelösungen integrieren die erforderlichen Modelle und Sichtweisen unzureichend. In [7, 31] wird daher eine Methodik für das Integrated Computational Life Cycle Engineering (ICLCE) vorgeschlagen. Ziel ist es, die Kopplung und den Austausch multidisziplinärer Modelle für alle Lebenszyklusphasen (Produktarchitektur, Rohmaterialien, Herstellung, Produktnutzung, End-of-Life) eines Produktsystems zu unterstützen und damit eine verbesserte Handhabung von Unsicherheiten und Variabilitäten sowie die Anpassbar- und Erweiterbarkeit des Betrachtungsumfangs der LCA zu gewährleisten. Hierzu werden fünf Schichten (logic layers) definiert, um die verschiedenen Modelle zu verbinden. Die Modellierung des *foreground systems* umfasst die Produktarchitektur, Rohmaterialmodelle, Modelle der Herstellung, Nutzungsmodelle und End-of-Life Modelle. Zentrales Element für die Verknüpfung der verschiedenen Modelle sind Produktobjekte (product objects, PO), die als Datenstruktur, alle relevanten Informationen die bei der foreground system Modellierung erzeugt und verarbeitet werden, speichert. Die Festlegung der PO erfolgt anhand der in der Produktarchitektur definierten Komponenten und kann hierarchisch gegliedert werden, siehe Bild 4 links.

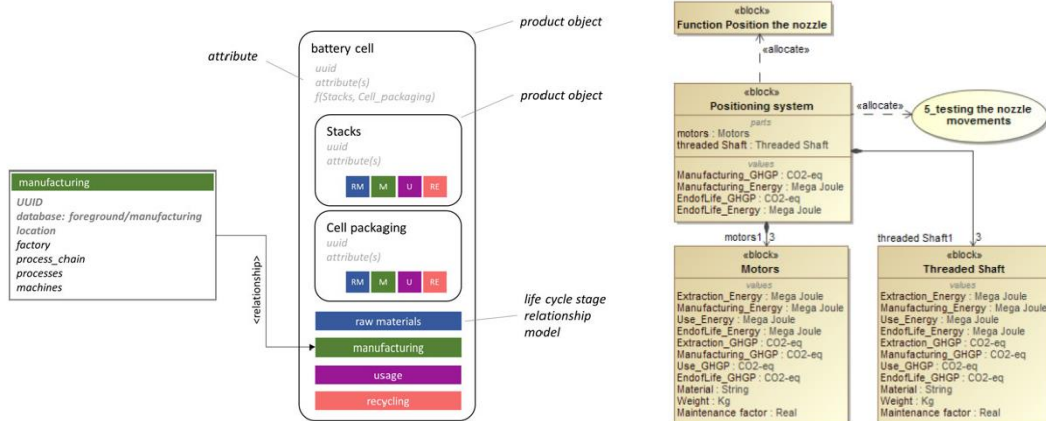


Bild 4: Ansätze zur Verknüpfung und Bereitstellung von Informationen für die LCA; Links: Aggregation von Informationen in ein Produktobjekt nach [7], Rechts: Integration von LCA-Daten in ein SysML-Modell nach [20]

Neben verschiedenen Attributen wie z.B. spezifische Energie oder Gewicht werden in einem PO Verknüpfung zu den Modellen der Lebenszyklusphasen (Rohmaterial, Herstellung, Nutzung, End-of-Life) angegeben, siehe Bild 4 links. Cerdas wendet die Methodik für die Modellierung und Analyse der Umweltwirkungen von Traktionsbatterien an [7], greift dabei jedoch nicht auf Modellelemente der SysML zurück und verwendet eine einfache Produktstruktur, die ausschließlich Komponenten umfasst und keine funktionale Beschreibung beinhaltet. In [20] wird ein Ansatz für die Integration von Umweltwirkungen in ein SysML-Modell

und die Ermittlung relevanter Lebenszyklusphasen für die Umsetzung von EcoDesign Strategien vorgeschlagen. Die Umweltwirkungen werden den einzelnen Systemkomponenten, dargestellt als SysML-Blöcke, zugeordnet, siehe Bild 4 rechts. Für die Ermittlung von Anwendungsfällen mit großen Umweltwirkungen werden Use Cases für das Produkt definiert und der relative zeitliche Anteil der einzelnen Use Cases an der Gesamtnutzungsdauer abgeschätzt [20]. Durch die Verknüpfung von Use Cases und Systemkomponenten kann ermittelt werden, welche Komponenten die größten Umweltwirkungen verursachen und damit die zielgerichtete Anwendung von EcoDesign Strategien unterstützt werden.

3. Unterstützung von LCA-Studien durch MBSE-Methoden

Um die Potentiale der Integration von MBSE und LCA zu untersuchen, werden in diesem Abschnitt bekannte Unsicherheiten in den ersten zwei Hauptaktivitäten einer LCA Modellierungsmethoden des MBSE und konkrete SysML-Diagramme gegenübergestellt. Ziel ist es darzustellen, wie mithilfe der Methoden und Modellelemente wichtige Informationen für die zielgerichtete Durchführung von LCA-Studien bereitgestellt werden können. Diese Informationen können die insbesondere in den ersten Phasen bestehenden Kontext- und Modellstrukturunsicherheiten reduzieren, indem die interdisziplinäre Festlegung von Ziel und Umfang der LCA-Studie sowie deren Analyseschwerpunkte abgesichert werden. Zudem wird aufgezeigt, wie Produktarchitekturvarianten effizienter gehandhabt werden können und Daten für die Durchführung einer LCA-Studie mithilfe von SysML-Modellen bereitgestellt sowie Daten aus LCA-Analysen in die Modellelemente integriert werden können. Der Schwerpunkt liegt auf der Handhabung von Kontextunsicherheiten und Modellstrukturunsicherheiten. Quantitätsunsicherheiten werden in diesem Beitrag nicht betrachtet.

3.1. Reduzierung von Unsicherheiten und Handhabung von Produktvarianten

Igos et al. [21] zeigen auf, dass in den der ersten LCA-Phase ausschließlich Kontextunsicherheiten (KU) auftreten und in der zweiten Phase überwiegend Modellstrukturunsicherheiten (MSU) zu berücksichtigen sind. Aus Sicht der Produktentwicklung ergeben sich diese Unsicherheiten aus der Strukturdefinition (Systemmodellierung) sowie der Planung des Lebenszyklus für einzelne Komponenten [4]. In Tabelle 2 sind wesentliche Kontext- und Modellstrukturunsicherheiten der ersten zwei Phasen der LCA dargestellt und diesen ausgewählte Methoden des MBSE gegenübergestellt. Zudem ist jeweils das Ziel/ Ergebnis der MBSE-Methoden zur Unterstützung der LCA angegeben. Aufgrund des Modellierungsschwerpunktes im MBSE, werden vorwiegend die Nutzungsphase sowie die Bestandteile des Produktes betrachtet. Durch die vorgeschlagenen MBSE Methoden und SysML Elemente können abgesicherte Informationen und Festlegungen für die Durchführung einer LCA-Studie bereitgestellt werden. Die vorgeschlagenen MBSE-Methoden basieren auf etablierten MBSE Modellierungsmethodiken, siehe Abschnitt 1.2. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht können MBSE-Methoden insbesondere die Festlegung des Ziels und des Umfangs einer LCA-Studie unterstützen. Hierfür sind Methoden der Verhaltensmodellierung (z.B. Use Cases in der Nutzungsphase) und Strukturmodellierung (z.B. Systemkontext) anwendbar. Für komplexe Produkte mit zahlreichen Komponenten und vielen unterschiedlichen Anwendungsfällen während der Nutzungsphase bieten MBSE-Methoden die Möglichkeit Schwerpunkte für LCA-Studien zu definieren. Ausgehend von der Nutzungsanalyse können bspw. Produktkomponenten mit einem großen Funktionsbeitrag (Verwendung in vielen Anwendungsfällen) ermittelt werden. Hierdurch wird die erforderliche Modularisierung für eine modulare LCA unterstützt. Die vorgeschlagenen Methoden zeigen auf, wie die MBSE die Vorbereitung zielgerichteter LCA-Studien unterstützen kann und durch welche SysML-Elemente Informationen bereitgestellt werden können.

Tabelle 2: Häufige Unsicherheiten in den ersten Phasen der LCA und vorgeschlagene MBSE Methoden zu deren Handhabung (KU = Kontextunsicherheit; MSU = Modellstrukturunsicherheit)

Aktivität LCA	Unsicherheit	Vorgeschlagene MBSE Methode & SysML-Elemente	Ziel/ Ergebnis MBSE-Methode
Definition Ziel und Umfang der LCA-Studie (Goal and Scope Definition, 1. LCA-Phase)			
Definition foreground und background system	Kohärenz der Wechselwirkungen (KU)	Modellierung Systemkontextes, inkl. Nachbarsystemen [11] [Block Definition Diagram, Actors]	Nachbar-, Umgebungs-systeme und Interaktionen in Nutzungsphase zur Definition des background system
	Zeitliche Veränderlichkeit der Systemgrenze (KU)	Modellierung unterschiedlicher Systemkontexte, inkl. Nachbarsystemen und Interaktionen [17] [Block Definition Diagram, Actors, Flows, Ports]	Variante Nachbar-, Umgebungs-systeme und Interaktionen in Nutzungs-phase zur Abgrenzung des background system
	Technologische Repräsentativität (KU)	Keine spezifischen MBSE Methoden identifiziert	Kein Beitrag
Modellierung des foreground system	Kohärenz Produktstruktur (qualitative & quantitative Angaben) (KU)	Modellierung Systemstruktur (Komponenten & Interaktionen) [11] [Internal Block Diagram, Blocks, Flows, Ports]	Produktkomponenten einschließlich Interaktionen für zweite LCA-Phase (life cycle inventory)
	Kohärenz Lebenszyklusmodelle (Phasen und Bedeutung für Produktkomponenten) (KU)	Modellierung Lebenszyklusphasen (Use Cases) inkl. Stakeholder & Verknüpfung Blöcke und Use Cases [17] [Use Case Diagram, Use Cases, Blocks, Actors]	Konsistentes Lebenszyklusmodell (Phasen) relevante Systemelemente und Stakeholder für Lebenszyklusphasen
	Definition geeigneter Module (produktorientiert) (KU)	Verknüpfung von Use Cases und Produktkomponenten für Moduldefinition [17] [Use Case Diagram, Internal Block Diagram, Blocks, Ports, Use Cases]	Module (aggregierte Produktkomponenten) inkl. zeitlicher Relevanz für modulare LCA
Definition der funktionelle Einheit	Kohärenz mit Ziel und Umfang der Studie (KU)	Vergleich Relevanz und Leistungseigenschaften von Use Cases [Use Case & Internal Block Diagram, Blocks, Flows, Ports, Use Cases]	Primäre Anwendungsfälle (Produktfunktionen) und Produktkomponenten für (modulare) LCA
	Repräsentativität der Leistungseigenschaften (KU)	Identifikation und Modellierung Use Cases für Nutzungsphase [10] [Use Case Diagram, Use Cases, Requirements]	Spezifische Anforderungen (Leistungseigenschaften) aus Stakeholdersicht
	Veränderlichkeit der Leistungseigenschaften (KU)	Identifikation und Modellierung Use Cases für Nutzungsphase [10] [Use Case Diagram, Use Cases, Requirements]	Veränderliche Anforderungen (Leistungseigenschaften) für unterschiedliche Stakeholder
Ermittlung Material- und Energieaufwände (Life Cycle Inventory, 2. LCA-Phase)			
Modellierung Einheitsprozesse foreground systems	Relevanz der Einheitsprozesse (MSU)	Modellierung von Einheitsprozessen mithilfe von Aktivitätsdiagrammen [Activity Diagram, Activities]	Erforderliche Prozesse (Aktivitäten) für Produktherstellung und -nutzung
	Repräsentativität der modellierten Flüsse (MSU)	Modellierung Abhängigkeiten und Prozessen mit Aktivitätsdiagrammen [Activity Diagram, Activities]	Wesentliche Wechselwirkungen zwischen Prozessen für (modulare) LCA
	Heterogenität von Lebenszyklen (MSU)	Verknüpfung Use Cases mit Produktkomponenten und Definition des zeitlichen Umfangs von Use Cases [20] [Use Case Diagram, Block Diagram, Blocks, Use Cases]	Produktkomponenten mit größtem Funktionsbeitrag in der Nutzungsphase für (modulare) LCA

Im nachfolgenden Abschnitt wird exemplarisch aufgezeigt, wie erforderliche LCA-Daten in SysML-Modelle integriert werden können.

3.2. Integration von LCA-Daten in SysML-Modelle

Ziel der Integration von LCA-Daten in SysML-Modelle ist es, die Konsistenz von Informationen zu erhöhen und den Aufwand für die Durchführung von LCA-Studien zu reduzieren. Erforderliche LCA-Daten beziehen sich sowohl auf einzelne Komponenten (z.B. Gewicht, Material) als auch Anwendungsfälle (Use Cases) des Produktes, siehe Tabelle 2. Eine zentrale Anforderung ist dabei die Verknüpfung/ Zuordnung von Daten zu einzelnen Lebenslaufphasen, siehe Bild 4 links. Anhand der Analyse in Tabelle 2 lassen sich zwei grundsätzliche Handlungsfelder für die Integration von LCA-Daten ableiten.

1. Bereitstellung von Informationen über Systemstruktur, Eigenschaften einzelner von Komponenten sowie deren Relevanz für unterschiedliche Lebenslaufphasen und Anwendungsfälle (während der Nutzung) als Grundlage für eine LCA-Studie, siehe Bild 5.
2. Aufnahme von Daten aus zurückliegenden LCA-Studien, wie bspw. relevante Impact-Faktoren für einzelne Komponenten für die vereinfachte Durchführung von LCA-Studien.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben bestehen erste Arbeiten für die Integration dieser Informationen in SysML-Modelle, siehe Bild 4 rechts. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten soll für die Integration ein SysML-Profil entwickelt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Integration der LCA-Daten in *SysML-blocks*, bspw. mithilfe von *properties* sowie der Verknüpfung von Anwendungsfällen und Produktkomponenten (blocks) für die Modularisierung.

3.3. Initiales Konzept für die Integration von MBSE und LCA

In Bild 5 ist ein initiales Konzept für die methodische Integration von Model-Based Systems Engineering und Life Cycle Assessment sowie den Austausch von Informationen dargestellt. Wie in Tabelle 2 dargestellt, ergeben sich insbesondere in der ersten LCA-Phase (Goal & Scope Definition) Potentiale für die methodische Integration.

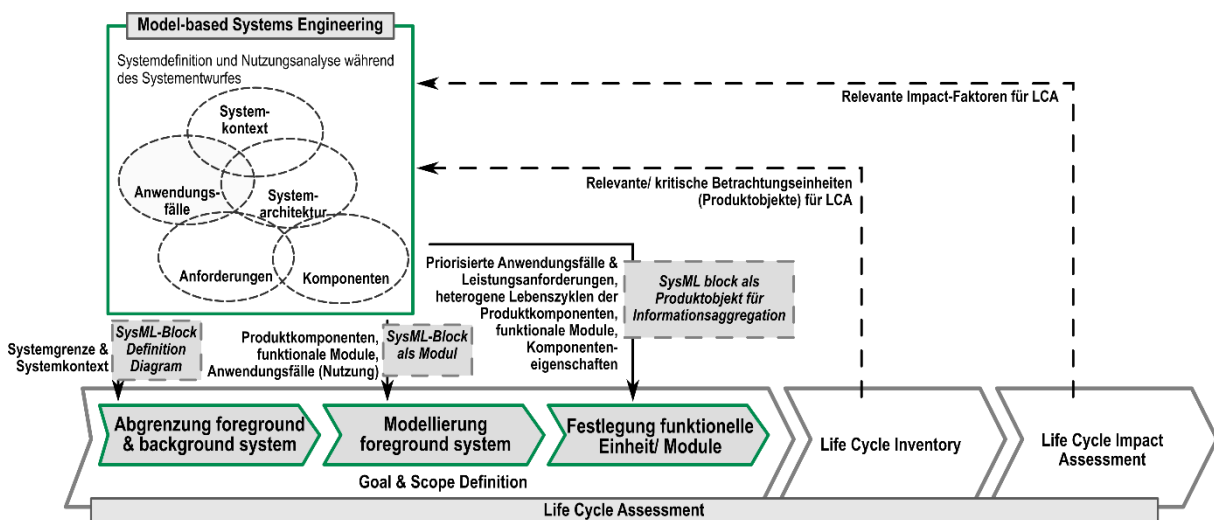


Bild 5: Initiales Konzept für die Integration von MBSE und LCA

Mithilfe bestehende Methoden aus dem MBSE können sowohl die Abgrenzung von foreground und background system als auch die Festlegung von Analyseschwerpunkten für eine modulare LCA identifiziert werden. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit Diagramme und Elemente der SysML als Grundlage für die LCA-Modellierung zu nutzen und damit der Modellierungsaufwand insgesamt zu reduzieren. Insbesondere die Verwendung von SysML-blocks (Systemelemente), nach dem Konzept der Produktobjekte, siehe Abschnitt 2.4, bietet das Potential erforderliche LCA-Daten zu integrieren. Gleichzeitig können ausgehend von durchgeführten LCA-Studien Daten für Produktobjekte bereitgestellt werden und damit eine Wissensbasis innerhalb des SysML-Modells aufgebaut werden. Das skizzierte Konzept zeigt grundsätzliche Integrationsmöglichkeiten der Systemdefinition und Nutzungsanalyse im MBSE und der ersten LCA-Phasen. Für die Umsetzung der methodischen und datentechnischen Integration sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

4. Forschungsbedarf und Diskussion

Die in diesem Beitrag vorgeschlagenen MBSE-Methoden zur Handhabung der Unsicherheiten und Varianten in den ersten zwei Phasen einer LCA-Studie zeigen grundsätzliche Möglichkeiten der Integration der erforderlichen Modellierung sowie der Bereitstellung von Informationen auf. Das initiale Konzept für die Integration von MBSE und LCA stellt keinen validierten Lösungsansatz dar, sondern dient als Grundlage für die Ableitung weiterführender Forschungsthemen. Aus der vorgestellten Analyse von Unsicherheiten in LCA-Studien und Gegenüberstellung mit MBSE-Methoden werden folgende Forschungsbedarfe abgeleitet:

- Analyse und Gegenüberstellung der Modellierungsmethoden für das *foreground system* in LCA-Studien und Untersuchung der Erstellung geeigneter Modelle mithilfe der SysML.
- Unterstützung der Ermittlung und Modellierung heterogener Lebenszyklen von Komponenten in komplexen Systemen sowie der Definition von Analyseschwerpunkten einer produktbezogenen, modularen LCA, bspw. auf Basis von Use Case Analysen.
- Erprobung der Integration von LCA-Daten in SysML-Modelle als Informationsgrundlage (Vorbereitung LCA) und Entwicklung eines LCA-spezifischen Modellierungsprofils (SysML-Profil).
- Berücksichtigung unterschiedlicher Lebenszyklusoptionen für Produktkomponenten in der LCA.

Die skizzierten Forschungsbedarfe sollen in weiteren Arbeiten aufgegriffen werden und anhand unterschiedlicher Produktbeispiele detailliert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt grundsätzliche Potentiale der Integration von MBSE und LCA anhand einer systematischer Gegenüberstellung der Unsicherheiten in den ersten zwei Phasen einer LCA sowie der Handhabung von Produkt- und Nutzungsvarianten und ausgewählten MBSE-Methoden auf. Die erwarteten Vorteile für die effizientere Vorbereitung und Durchführung von LCA-Studien durch verbessertes Datenhandling und konsistentere Modelle in frühen Entwicklungsphasen werden anhand der Integration von LCA relevanten Daten in ein SysML-Modell aufgezeigt und ein initiales Konzept für die methodische Integration von MBSE und LCA skizziert. In weiterführenden Forschungsarbeiten sollen die in Abschnitt 4 beschriebenen Forschungsbedarfe aufgegriffen werden und Lösungsansätze für die modellbasierte LCA

anhand verschiedener Produktbeispiele entwickelt werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Handhabung heterogener Lebenszyklen.

Literaturverzeichnis

- [1] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Life cycle assessment (LCA): A guide to best practice. Weinheim an der Bergstrasse, Germany: Wiley-VCH, 2014.
- [2] Norm DIN ES ISO 14040, 2021. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen
- [3] European Commission: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxembourg, 2010.
- [4] Kota, S.; Chakrabarti, A.: Development of a Method for Estimating Uncertainty in Evaluation of Environmental Impacts During Design. In: Bocquet, J.-C. (Ed.): Proceedings of ICED 2007, Paris, France, 28.-31.07.2007. Glasgow: The Design Society, 2007, DS42_P_9,
- [5] Ostad-Ahmad-Ghorabi, H.; Collado-Ruiz, D.; Wimmer, W.: Towards Integrating LCA into CAD. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Eds.): Proceedings of ICED 2009, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009, Glasgow: The Design Society, 2009, S. 301–310,
- [6] Gaha, R.; Yannou, B.; Benamara, A.: A new eco-design approach on CAD systems. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 15 (2014), Nr. 7, S. 1443–1451.
- [7] Cerdas, F.: Integrated Computational Life Cycle Engineering for Traction Batteries. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [8] Inkermann, D.: Shaping Method Ecosystems - Structured Implementation of Systems Engineering in Industrial Practice. In: Proceedings of the Design Society 1 (2021), S. 2641–2650.
- [9] Estefan, J. A.: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. 2008
- [10] Friedentahl, S.; Moore, A.; Steiner, R.: A practical guide to SysML: The systems modeling language. Third edition. Waltham, MA: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2015.
- [11] Weilkens, T.; Scheithauer, A.; Di Maio, M.; Klusmann, N.: Evaluating and comparing MBSE methodologies for practitioners, In: Proceedings of IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), 2016, S. 1–8.
- [12] Dori, D.: Model-Based Systems Engineering with OPM and SysML. 1st ed. 2016. New York, NY : Springer, 2016.
- [13] Crawley, E. F.; Cameron, B.; Selva, D.: System architecture: Strategy and product development for complex systems. Boston: Pearson, 2016.
- [14] Inkermann, D.; Huth, T.; Vietor, T.; Grewe, A.; Knieke, C.; Rausch, A.: Model-Based Requirement Engineering to Support Development of Complex Systems. In: Procedia CIRP 84 (2019), S. 239–244.
- [15] Kernschmidt, K.; Vogel-Hauser, B.: An interdisciplinary SysML based modeling approach for analyzing change influences in production plants to support the engineering. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), S. 1113–1118.
- [16] Hecht, M.; Dimpfl, E.; Pinchak, J.: Using SysML to Automatically Generate of Failure Modes and Effects Analyses, Bd. 25. In: Proceedings of INCOSE International Symposium 25 2015, S. 1357–1372.
- [17] Schmitt, J.; Inkermann, D.; Stechert, C.; Raatz, A.; Vietor, T.: Requirement Oriented Reconfiguration of Parallel Robotic Systems. In: Dutta, A. (Ed.): Robotic Systems: Applications, Control and Programming. IntechOpen, 2012, S. 259–268.
- [18] Henderson, K.; Salado, A.: Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature. In: Systems Engineering 24 (2021), Nr. 1, S. 51–66.
- [19] Husung, S.; Weber, C.; Mahboob, A.; Kleiner, S.: Using Model-Based Systems Engineering for Need-based and Consistent Support of the Design Process. In: Proceedings of the Design Society 1 (2021), S. 3369–3378.
- [20] Bougain, S.; Gerhard, D.: Integrating Environmental Impacts with SysML in MBSE Methods. In: Procedia CIRP 61 (2017), Nr. 1, S. 715–720.
- [21] Igos, E.; Benetto, E.; Mexer, R.; Baustert, P.; Othoniel, B.: How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? In: International Journal of Life Cycle Assessment 24 (2019), Nr. 4, S. 794–807.
- [22] Lloyd, S. M.; Ries, R.: Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. In: Journal of Industrial Ecology 11 (2007), Nr. 1, S. 161–179.
- [23] Recchioni, M.; Mandorli, F.; Germani, M.; Faraldi, P.; Polverini, D.: Life-Cycle Assessment simplification for modular products, Bd. 7. In: Takata, S.; Umede, Y. (Eds.): Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses : Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, June 11th-13th, 2007. London : Springer London, 2007, S. 53–58.

-
- [24] Gabrisch, C.; Cerdas, F.; Herrmann, C.: Product System Modularization in LCA Towards a Graph Theory Based Optimization for Product Design Alternatives. In: Schebek, L.; Herrmann, C.; Cerdas, F. (Eds.): *Progress in Life Cycle Assessment*. Cham : Springer International Publishing, 2019, S. 37–44.
- [25] Huijbregts, M.: Application of uncertainty and variability in LCA. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (1998), Nr. 5, S. 1152.
- [26] Huijbregts, M.; Heijungs, R.; Hellweg, S.: Complexity and integrated resource management: uncertainty in LCA. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (2004), Nr. 5, S. 341–342.
- [27] Walker, W. E.; Harremoes, P.; Rotmans, J.; Van der Sluijs, J. P.; Van Asselt, M.B.A.; Janssen, P.; Krayen von Krauss, M. P.: Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. In: *Integrated Assessment* 4 (2003), Nr. 1, S. 5–17.
- [28] Van der Giesen, C.; Cucurachi, S.; Guinee, J.; Kramer, G.J.; Tukker, A.: A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. In: *Journal of Cleaner Production* 259 (2020).
- [29] Steubing, B.; Mutel, C.; Suter, F.; Hellweg, S.: Streamlining scenario analysis and optimization of key choices in value chains using a modular LCA approach. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (2016), Nr. 4, S. 510–522.
- [30] Groetsch, T.; Creighton, C.; Varley, R.; Kaluza, A.; Der, A.; Cerdas, F.; Herrmann, C.: A modular LCA/LCC-modelling concept for evaluating material and process innovations in carbon fibre manufacturing. In: *Procedia CIRP* 98 (2021), Nr. 1, S. 529–534.
- [31] Cerdas, F.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrated Computational Life Cycle Engineering — Application to the case of electric vehicles. In: *CIRP Annals* 67 (2018), Nr. 1, S. 25–28.