

Modellbasierter Ansatz zur Unterstützung der nachhaltigen und nutzungsorientierten Fahrzeugkonzeption

Model-based approach to supporting sustainable and usage-oriented vehicle development

Maximilian Werner¹, Luca Lanz²

¹Fraunhofer IAO, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 70569 Stuttgart
maximilian-jakob.werner@iao.fraunhofer.de

²Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), 70597 Stuttgart

Abstract (deutsch): Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird ein Ansatz zur Unterstützung der modellbasierten Konzeption von Produkt-Service-Systemen in den frühen Entwicklungsphasen präsentiert, welcher einen speziellen Fokus auf deren Einbettung in eine Kreislaufwirtschaft legt. Vor diesem Hintergrund wird aus dem Stand der Wissenschaft und Praxis folgernd ein Lösungsansatz im Sinne des Model-Based Systems Engineering vorgeschlagen. Trotzdem es bereits vielversprechende Ansätze zur Modellierung von PSS sowie kreislaufwirtschaftlicher Aspekte gibt, scheint deren kombinierte Betrachtung eine bestehende Forschungslücke darzustellen. Die Autoren stellen daher das *PSS-CE-Metamodell* als unterstützendes Modellierungswerkzeug vor, welches die Integration von emergierenden Anforderungen einer Kreislaufstrategie in die Systemarchitektur ermöglicht. Die Anwendung und Evaluierung des Lösungsansatzes erfolgt im Kontext des aktuellen Forschungsprojekts *CYCLOMETRIC* und wird anhand eines Carsharing-Systems als Fallbeispiel beschrieben. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse kritisch reflektiert und mögliche Ansatzpunkte für weiterführenden Forschungsbedarf genannt.

Keywords (deutsch):

Model-Based Systems Engineering, Fahrzeugentwicklung, Produkt-Service-Systeme, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit

Abstract (english): This paper presents an approach to support the model-based conception of product-service-systems in the early development phases with a special focus on their embedding in a circular economy. Against this background, a solution approach in the sense of Model-Based Systems Engineering is proposed based on the state of the art in science and practice. Although there are already promising approaches for modeling PSS as well as circular economy aspects, their combined consideration seems to represent an existing research gap. Therefore, the authors present the *PSS-CE Metamodel* as a supporting modeling tool that enables the integration of emergent requirements of a circular strategy into the system architecture. The application and evaluation of the solution approach is carried out in the context of the current research project *CYCLOMETRIC* and is described using a car sharing system as a case study. Finally, the findings are critically reflected and possible starting points for further research are identified.

Keywords (english):

Model-Based Systems Engineering, Vehicle Development, Product-Service-Systems, Circular Economy, Sustainability

1 Einleitung

Der Klimawandel und andere geopolitische Herausforderungen zeigen deutlich, dass nachhaltiges Handeln und ein schonender Umgang mit unserer Umwelt unausweichlich sind. Für Industrien wie den Automobilsektor ist es daher zwingend, eine stärkere Nachhaltigkeitsorientierung von Produkten und Dienstleistungen im Sinne des *Design-for-Sustainability* sicherzustellen (Ceschin und Gaziulusoy 2020; Mayyas et al. 2012). Der Handlungsspielraum kann dabei sehr breit sein und sollte alle Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch und sozial) in Betracht ziehen (Purvis et al. 2019). Es ist daher eine zentrale Aufgabe der nachhaltigkeitsorientierten Fahrzeugentwicklung, entsprechende Technologien und Lösungen zielführend in die bestehenden Systemarchitekturen zu integrieren.

Seit einiger Zeit werden dazu bereits diverse Lösungen entwickelt, die mitunter über rein technische Aspekte hinausgehen. So lässt sich bspw. durch ergänzende Dienste in physischen Produkten ein effizientes, nachhaltiges *Produkt-Service-System* (PSS) schaffen (Tukker 2004). Noch umfassender wird das gleiche Ziel von aktuellen Ansätzen der sogenannten *Kreislaufwirtschaft* verfolgt. Hierbei soll die Nachhaltigkeit von Produkten und Dienstleistungen gesteigert werden, indem ihre Lebenszyklen durch verschiedene Strategien verlängert und die bisherigen Konzepte zur Außerbetriebsetzung ersetzt oder zumindest zeitlich verzögert werden (Ellen MacArthur Foundation 2013).

Allerdings nimmt die von wachsenden Software- und Servicebestandteilen ohnehin verursachte Komplexität in der Fahrzeugarchitektur durch die zusätzliche Berücksichtigung von Strategien zur Steigerung des Nachhaltigkeitsbeitrags weiter zu und erfordert daher systematische Werkzeuge, um diese besser handhaben zu können (Block et al. 2020). Die Disziplin des *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) verspricht durch konsequentes Systemdenken und modellbasierte Abstraktion der Entwicklungsobjekte genau diese Hilfestellung zu leisten (Huth und Vietor 2020).

Der vorliegende Beitrag setzt sich vor diesem Hintergrund das Ziel, die nachhaltige und nutzerorientierte Entwicklung von Fahrzeugen durch einen modellbasierten Ansatz zu unterstützen. Hierzu wird nachfolgend zunächst der aktuelle Stand der Wissenschaft und Praxis im Bereich der nachhaltigkeitsorientierten Fahrzeugentwicklung sowie des MBSE vorgestellt und in Bezug auf konkrete Ansätze zur modellbasierten Entwicklung von PSS beziehungsweise Integration kreislaufwirtschaftlicher Aspekte analysiert. Anschließend wird die hieraus abgeleitete Forschungslücke charakterisiert und als Lösungsansatz ein konzeptionelles Modell vorgestellt, welches die modellbasierte Entwicklung von PSS unterstützt. Dabei wird speziell die kreislaufwirtschaftliche Gestaltung des PSS verfolgt, um eine entsprechende Ausrichtung bereits frühzeitig im Modell berücksichtigen zu können. Die literaturreduzierte Lösung erweitert existierende Ansätze um mobilitätsspezifische Konstrukte sowie strategische Aspekte der Kreislaufwirtschaft. Abschließend wird die Anwendung und Evaluation des *CE-PSS-Metamodells* im Rahmen des Forschungsprojekts *CYCLOMETRIC* beschrieben und ein Fazit der gewonnenen Erkenntnisse gezogen.

2 Stand der Wissenschaft und Praxis

2.1 Nachhaltigkeitsorientierte Fahrzeugentwicklung durch Kreislaufwirtschaft

Als einer der Hauptemittenten von Treibhausgasen werden der Straßenverkehr und speziell die Automobilindustrie kontinuierlich mit Forderungen nach mehr Nachhaltigkeit konfrontiert (Mayyas et al. 2012). Dem Ökodesign und ähnlichen Entwicklungsansätzen zur frühzeitigen Berücksichtigung von Umweltauswirkungen wird in diesem Kontext zunehmende Relevanz zugeschrieben (McAloone und Pigozzo 2021). Mögliche Ansatzpunkte können dabei auch über rein technische Aspekte hinausgehen, z. B. durch eine nachhaltigere Nutzung von Fahrzeugen als PSS im Rahmen des Carsharings (Meier und Uhlmann 2017). Noch umfassendere Nachhaltigkeitssteigerungen verspricht der *Cradle-to-Cradle*-Ansatz durch komplett geschlossene Material- und Energiekreisläufe (Braungart und McDonough 2021). Eine chancenreiche Option zur Umsetzung dieses Prinzips ist die sogenannte *Kreislaufwirtschaft* oder *Circular Economy* (CE) (Ellen MacArthur Foundation 2013). Potting et al. (2017) liefern eine

prominente Strukturierung möglicher Umsetzungsstrategien, wobei sie sinnvollen Materialeinsatz (*recover, recycle*), verlängerte Produktlebenszyklen (*repurpose, remanufacture, refurbisch, repair, reuse*) sowie intelligente Produktnutzung und -herstellung (*reduce, rethink, refuse*) unterscheiden. Aktuell erfolgt die Nachhaltigkeitsbewertung jedoch aufgrund der Verfügbarkeit quantitativer Daten erst spät im Entwicklungsprozess, obwohl derartige Überlegungen gerade in den frühen Phasen einen erheblichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit haben könnten (Schöggel et al. 2017). Es bedarf daher geeigneter Werkzeuge zur Informationsverwaltung, um kreislaufbezogene Entscheidungen bereits frühzeitig zu ermöglichen (Diaz et al. 2021). Kreislaufwirtschaft erfordert somit die ganzheitliche Berücksichtigung von Anforderungen und Abhängigkeiten einzelner Gestaltungsentscheidungen entlang des gesamten Systemlebenszyklus (Hauschild et al. 2020). MBSE kann vor diesem Hintergrund einen Lösungsansatz bieten, indem die aus diesen vielseitigen Abhängigkeiten resultierende Komplexität besser handhabbar gemacht wird (Block et al. 2023; Halstenberg et al. 2019).

2.2 Ganzheitliches Denken und Komplexitätsreduktion durch MBSE

Das MBSE ist eine Teildisziplin der Systementwicklung und kann als Überbegriff für verschiedene, modellbasierte Ansätze zur Entwicklung technischer Systeme verstanden werden. Den Kern bildet dabei das zentrale *Systemmodell*, welches alle Entwicklungsaktivitäten, von der Anforderungsentwicklung über die Spezifikation und Erprobung bis zur Implementierung des Systems dokumentiert (Friedenthal et al. 2015; Huth und Vietor 2020). Modelle sind grundsätzlich eine abstrakte Repräsentationen realer Entitäten, welche für den Betrachtungsfall irrelevante Aspekte ausblenden und die Komplexität durch eine Reduktion auf das Wesentliche besser handhabbar machen (Friedenthal et al. 2015). Die Modellerstellung selbst dient bereits dem Erkenntnisgewinn und unterstützt eine nachhaltige Systemspezifikation (Kastens und Kleine Büning 2021). Ein Modell hält Informationen konsistent zusammen und ermöglicht die Betrachtung des Systems auf verschiedenen Abstraktionsebenen, sodass Entwickler bei der Beschreibung oder Analyse interner und externer Interdependenzen in Bezug auf dessen Struktur und Verhalten unterstützt werden (Weilkiens 2014). Durch die zentrale Organisation jeglicher Informationen unterstützt das Systemmodell als sogenannte *Single Source of Truth* die Handhabung komplexer Entwicklungsprojekte (Apostolov et al. 2018; Halstenberg et al. 2019). Ein wesentlicher Schwerpunkt des MBSE liegt dabei auf der Entwicklung der *Systemarchitektur* in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses, um die nachfolgende domänenspezifische Entwicklung vorzubereiten und frühzeitig gegen mögliche Risiken abzusichern (Eigner et al. 2019; Schulze 2016). In der Anwendung erfolgt die Modellierung durch den kombinierten Einsatz von *Modellierungsmethodiken, -sprachen* und *-werkzeugen* (Huth und Vietor 2020; Weilkiens 2014).

2.3 PSS-Entwicklungsansätze

Im Gegensatz zur modellbasierten Entwicklung physischer Systeme, lässt sich für die methodische PSS-Entwicklung laut Lüttenberg et al. (2018) weiterhin ein Forschungsbedarf feststellen und es sollte laut Halstenberg et al. (2019) speziell die konzeptionelle Gestaltung sowie Architekturentwicklung von PSS durch neue Forschungsansätze unterstützt werden. Da klassische Ansätze, wie die *VDI 2206*, eine unzureichende Berücksichtigung von Dienstleistungen beinhalten, bedarf es spezieller Ansätze zur integrierten Entwicklung von PSS (Lüttenberg et al. 2018; Spath und Dangelmaier 2016). Boucher et al. (2016) stellen in diesem Kontext eine Methode zur PSS-Modellierung auf Basis eines zweigeteilten Metamodells vor, welches einerseits die strukturelle Beschreibung von Produkt, Service und Organisation sowie andererseits die dynamische Beschreibung des Angebots, der Leistung sowie der Szenarien unterstützen soll. Apostolov et al. (2018) adressieren zusätzliche Betrachtungsgegenstände im Rahmen der integrierten PSS-Entwicklung und präsentieren dazu einen modellbasierten Ansatz auf Basis der SysML und eines zentralen Modells als *Single Source of Truth*, der speziell auf die frühen Phasen von der Anforderungsdefinition bis zu Systemspezifizierung abzielt.

Zudem wird die Entwicklung domänenübergreifender PSS, wie bei einem *System of Systems (SoS)* aus Fahrzeugen und Infrastruktur, noch nicht ausreichend berücksichtigt. Fakhfakh et al. (2020) schlagen

daher ein spezifisches Metamodell vor, welches die wesentlichen Merkmale zur vollständigen Beschreibung von PSS und SoS vereint. Obwohl die Klassifizierung von PSS in der Theorie weitreichend erforscht ist, fehlen nach Auffassung von Maleki et al. (2018) in der Praxis weiterhin Ansätze zur ganzheitlichen Darstellung sowie zur klaren Beschreibung interner und externer Systemgrenzen. Ihr Ansatz soll daher die Modellierung verschiedener Perspektiven im Rahmen der PSS-Architecturentwicklung unterstützen. Der Beitrag von Idrissi et al. (2017) beschreibt die umfassende Analyse bestehender, konzeptioneller Modelle für PSS, auf deren Grundlage die Autoren im Anschluss ein allgemeingültiges Metamodell zur Modellierung von PSS ableiten. Orellano et al. (2019) kritisieren die unzureichende Berücksichtigung strategischer Zielsetzungen in den frühen Phasen der PSS-Entwicklung und stellen vor diesem Hintergrund einen Modellierungsansatz für PSS aus strategischer und operativer Sicht vor.

2.4 Entwicklungsansätze im Kontext der Kreislaufwirtschaft

Wie bereits zuvor erwähnt, erfordert die Einführung nachhaltiger PSS im Sinne der Kreislaufwirtschaft ein ganzheitliches Systemdenken sowie eine vollständige Lebenszyklusbetrachtung. Zur besseren Handhabung der damit einhergehenden Komplexität können MBSE-Ansätze eine vielversprechende Lösung darstellen (Halstenberg et al. 2019; Hauschild et al. 2020). Eine stärkere Nachhaltigkeitsorientierung erfordert demnach konsequentes *Life Cycle Engineering*, um die verschiedenen Wechselwirkungen einer Kreislaufstrategie auf erst zukünftige Sachverhalte entlang des Lebenszyklus berücksichtigen zu können (Hauschild et al. 2020). Block et al. (2023) stellen in diesem Kontext ein Modell zur Berücksichtigung individueller Systemlebenszyklen vor, welches als Metamodell im Zuge eines MBSE-Ansatzes genutzt werden kann. Einen Anknüpfungspunkt hieran stellt der ganzheitliche Modellierungsansatz von Halstenberg et al. (2019) dar, welcher die Implementierung von Kreislaufstrategien in einem PSS zum Ziel hat. Lawrenz et al. (2021) hingegen streben die Motivation zu nachhaltigerem Verhalten von Endnutzern an und schlagen dazu ein Metamodell vor, welches die zusätzliche Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsbeitrags bei der Systemmodellierung ermöglicht. Ruggieri et al. (2016) beschäftigen sich wiederum auf übergeordneter Ebene mit der zwischenbetrieblichen Kooperation im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft und stellen ein Metamodell zur Veranschaulichung der damit einhergehenden Einflussfaktoren vor. Ebenfalls aus einer betrieblichen Perspektive wollen Mboli et al. (2022) die Entscheidungsfindung in kreislaufwirtschaftlichen Geschäftsmodellen durch ein Werkzeug auf Basis semantischer Ontologien erleichtern.

3 Vorstellung des CE-PSS-Metamodells

3.1 Forschungslücke und Anforderungen an den Lösungsansatz

In Anbetracht der analysierten Literatur wird festgehalten, dass bis dato keine Metamodelle bekannt sind, welche die direkte Berücksichtigung von Aspekten der Kreislaufwirtschaft im Rahmen der modellbasierten PSS-Entwicklung ermöglichen. Weitere, den Umfang dieses Beitrags übersteigende Recherchen haben ebenfalls keine Ansätze identifiziert, welche kreislaufwirtschaftlicher Aspekte in die Modellierung der PSS-Architektur einbeziehen. Im domänenspezifischen Kontext der Mobilität und Fahrzeugentwicklung konnten ebenfalls keinerlei Ansätze identifiziert werden. Es zeigt sich die Situation, dass bestehende Modellierungsansätze, von Halstenberg et al. (2019) abgesehen, die PSS-Entwicklung und Kreislaufstrategien voneinander getrennt betrachten. Zudem scheinen Ansätze zur Modellierung kreislaufwirtschaftlicher Aspekte generell nicht weit verbreitet zu sein. Oftmals fokussieren die identifizierten Beiträge auf spezielle Teilbereiche einer konkreten Kreislaufstrategie oder bspw. nur auf die Stoffstrommodellierung. Die Unterstützung der kreislauforientierten PSS-Entwicklung auf Basis dedizierter Metamodelle stellt demnach eine Forschungslücke dar. Jedoch scheint eine Kombination bestehender Ansätze in unterschiedlichen Teilbereichen mit bereits

vielversprechenden Forschungsergebnissen erstrebenswert. Vor diesem Hintergrund werden folgende Anforderungen an einen entsprechenden Lösungsansatz formuliert:

- Modellierung von Mobilitätslösungen als Produkt-Service-Systeme unterstützen
- Modellierung der emergenten Anforderungen von Kreislaufstrategien unterstützen
- Einbindung von Kreislaufstrategien in die PSS-Architektur
- Modularer Ansatz zur einfachen Kombination mit verschiedenen Modellierungsansätzen
- Allgemeingültiger Ansatz mit domänenspezifischer Anpassungsmöglichkeit

3.2 Konzeptionelle Herleitung des modularen PSS-CE-Metamodell

Zur Berücksichtigung der zuvor formulierten Anforderungen in Bezug auf die Kombinationsmöglichkeit mit bestehenden Modellierungsansätzen wird im Rahmen dieses Beitrags eine zweiteilige, literaturdeduzierte Metamodell-Strategie vorgeschlagen. Einerseits soll ein unterstützendes Metamodell für die allgemeingültige Entwicklung von PSS erstellt werden, welches zusätzliche um eine Modell-Bibliothek für domänenspezifische Aspekte im Mobilitätskontext erweitert werden kann. Auf diese Weise wird die rein technische Systemmodellierung durch dienstleistungsbasierte Nutzungskonzepte ergänzt, um Mobilitätslösungen, wie bspw. Carsharing, als PSS beschreiben zu können. Andererseits soll ein zweites Metamodell zur Integration von Kreislaufstrategien in das Systemmodell entworfen werden, welches sich mit dem PSS-Metamodell verknüpfen lässt. Insgesamt ergibt sich damit ein unterstützendes Werkzeug, um PSS unter Berücksichtigung von Kreislaufstrategien ganzheitlich modellieren zu können. In Bild 1 ist der konzeptionelle Aufbau des *PSS-CE-Metamodells* skizziert.

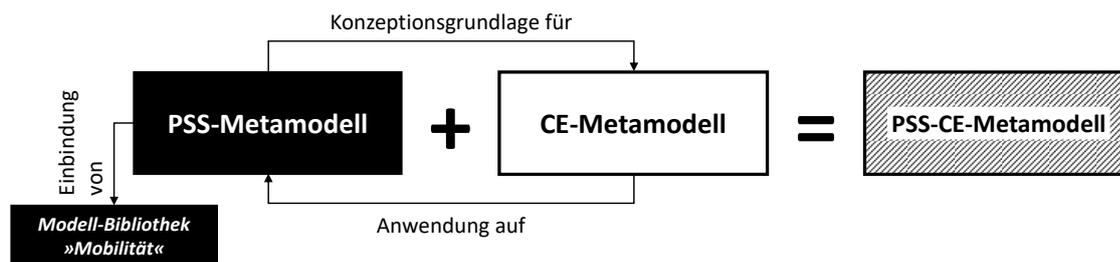


Bild 1: Konzeptioneller Aufbau des *PSS-CE-Metamodells*

Die Umsetzung der nachfolgend vorgestellten Teilbereiche des *PSS-CE-Metamodells* erfolgte unter Verwendung der Modellierungssprache *SysML v2* in einer *Eclipse* Entwicklungsumgebung (SST 2023).

3.2.1 PSS-Metamodell

Das *PSS-Metamodell* basiert in Anlehnung an Idrissi et al. (2017), Orellano et al. (2019) sowie Fakhfakh et al. (2020) auf dem allgemeingültigen Verständnis eines Systems, welches selbst aus beliebig vielen Teilsystemen bestehen kann und grundsätzlich das Subjekt zur Erfüllung von Anforderungen ist. Wie in Bild 2 dargestellt, stellt ein PSS somit eine Spezialisierung des allgemeingültigen Systems dar, das stets aus mindestens einem Produktsystem (*ProductSystem*) und einem Dienstleistungssystem (*ServiceSystem*) besteht. Das Produkt- und Dienstleistungssystem sind ebenfalls Spezialisierungen des allgemeingültigen Systems. Darüber hinaus ist analog zu Idrissi et al. (2017) sowie Maleki et al. (2018) das Betriebskonzept innerhalb des PSS berücksichtigt, welches die operativen Zusammenhänge beider Teilsysteme beschreiben soll. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden im Rahmen dieses Beitrags weitere, relevante Aspekte einer PSS-Architektur in Bezug auf Funktion, Verhalten oder System-Kontext ausgeblendet. Für mögliche Varianten zur Berücksichtigung dieser Sachverhalte wird daher auf die bereits vorgestellte Literatur verwiesen (vgl. bspw. Fakhfakh et al. 2020; Maleki et al. 2018; Orellano et al. 2019).

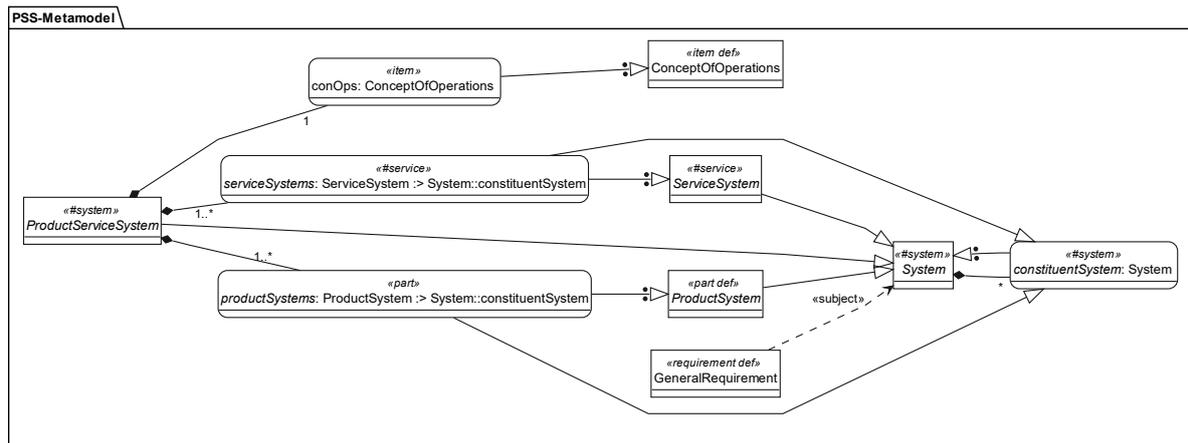


Bild 2: Grafische Darstellung des PSS-Metamodells [skalierbare Vektorgrafik]

Die ergänzende Modell-Bibliothek für domänenspezifische Spezifikationen im Mobilitätskontext baut direkt auf dem PSS-Metamodell auf. Wie in Bild 3 dargestellt, ist eine Mobilitätslösung demnach als eine Spezialisierung des PSS zu verstehen, die sich aus einem physischen Mobilitätsprodukt als Spezialisierung des *ProductSystem* sowie einem immateriellen Mobilitätsdienst als Spezialisierung des *ServiceSystem* zusammensetzt. Mit Mobilitätsprodukt ist hier im weiteren Sinne sowohl ein einzelnes Fahrzeug als auch eine Flotte aus mehreren Fahrzeugen gemeint. Als Ausprägung eines Mobilitätsdienst ist zudem die Buchung eines Fahrzeugs definiert, um die temporäre Bereitstellung eines Fahrzeugs an einen Nutzer modellieren zu können.

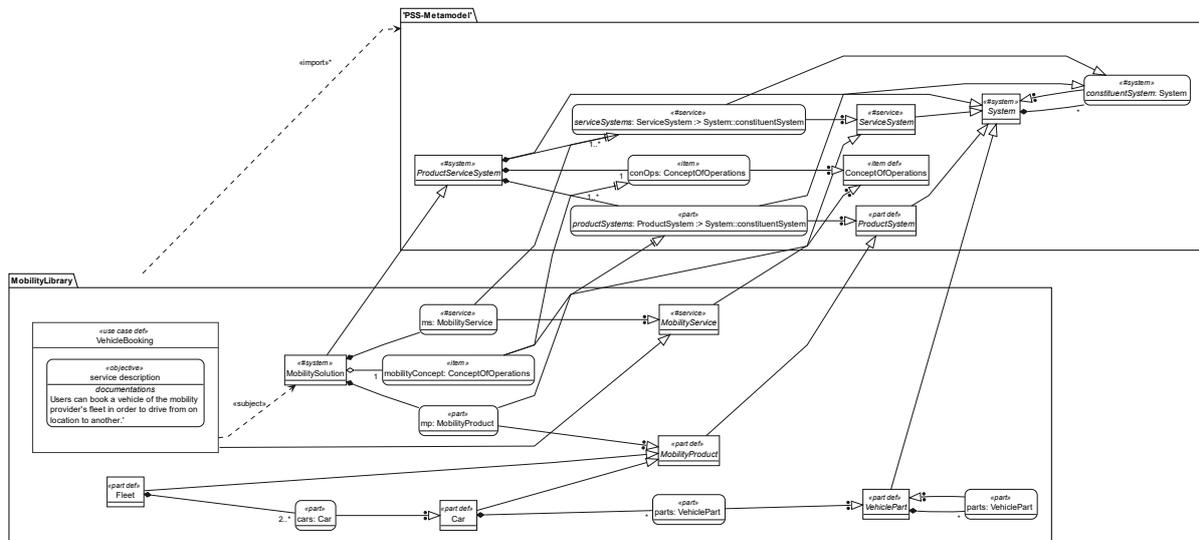


Bild 3: Mobilitätsspezifischen Modell-Bibliothek auf Basis des PSS-Metamodells [skalierbare Vektorgrafik]

3.2.2 CE-Metamodell

Zur generellen Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft wird im Rahmen des *CE-Metamodells* ein *CE Concept* definiert, welches die a priori festgelegten Kreislaufstrategien enthält. An dieser Stelle wurde auf die Kategorisierung nach Potting et al. (2017) zurückgegriffen, grundsätzlich können in der *R-Strategy* jedoch beliebige Konzepte hinterlegt werden. Da sich auf Dienstleistungen nicht alle Kreislaufstrategien abbilden lassen, bspw. Energierückgewinnung durch *recover*, wurde weiterhin eine produkt- und servicespezifische Spezialisierung des *CE Concept* hinzugefügt. Wie Bild 4 zeigt, enthält das *Service CE Concept* demnach nur diejenigen Strategien, die nach Einschätzung der Autoren umsetzbar sind. Diese subjektive Anwendung lässt sich nicht vermeiden, ist jedoch für jeden

Anwendungsfall mit wenig Aufwand adaptierbar. Die zehn Kreislaufstrategien sind importierte Spezialisierung der *R-Strategy* und anhand individueller Attribute differenzierbar. Vom *CE Concept* abhängig ergibt sich wiederum ein *CE Concern* in Bezug auf die PSS-Gestaltung. Dieser ist ferner in eine konkrete Anforderung an das System sowie ein Anliegen bezüglich der Auswirkung des *CE Concept* auf den Systemlebenszyklus aufgeteilt. Die Berücksichtigung verschiedener Lebenszyklusphasen ist aus Platzgründen nicht im Detail abgebildet, stattdessen wird auf die Veröffentlichung von Block et al. (2023) verwiesen, worin eine mögliche Ergänzung des CE-Metamodells um individuelle Lebenszykluspfade vorgeschlagen wird.

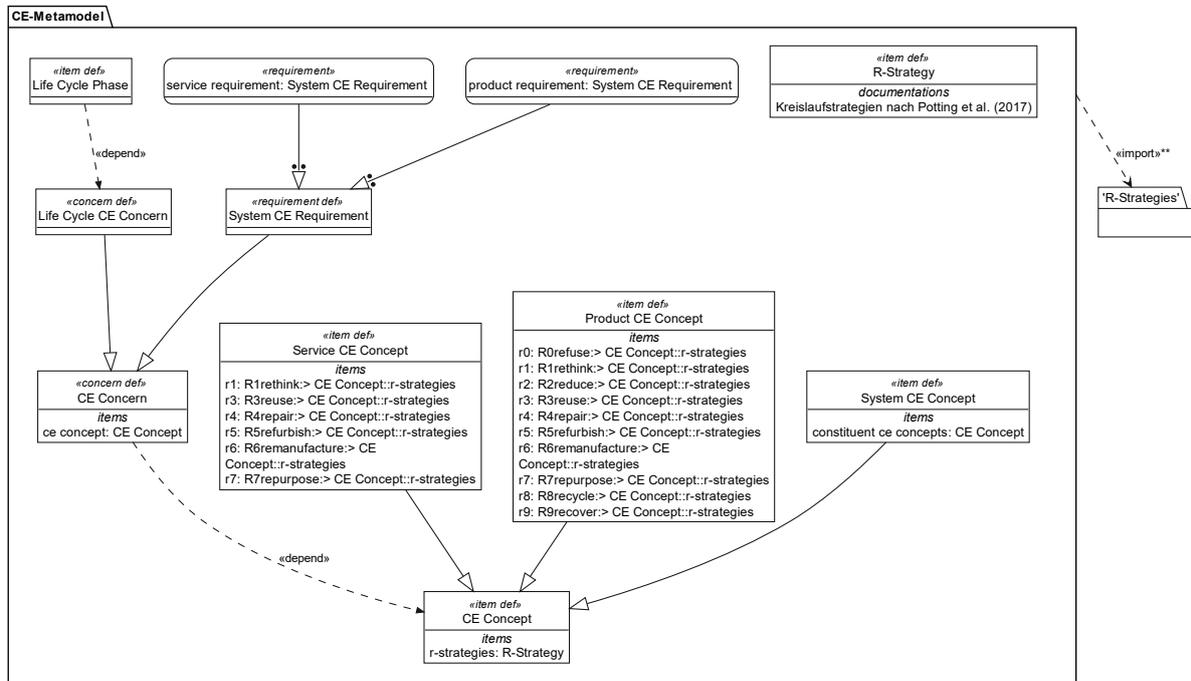


Bild 4: Grafische Darstellung des CE-Metamodells [skalierbare Vektorgrafik]

3.2.3 Synthese des PSS-CE-Modells

Zur Synthese der zuvor vorgestellten Metamodelle im Sinne eines *PSS-CE-Metamodells* erfolgt, wie in Bild 5 beschrieben (aus Platzgründen in textueller Notation), zunächst ein Import des *PSS-Metamodells* und *CE-Metamodells*. Auf diese Weise wird der Anforderung eines modularen Konzepts Genüge getragen, da beide Metamodelle ohne wesentlichen Mehraufwand durch Alternativen ersetzt werden können. Die Synthese selbst findet daraufhin über die Spezialisierung des PSS als *CE-PSS* und ein anschließendes Referenzieren auf das Kreislaufkonzept sowie die daraus emergierenden Anliegen statt.

```

package 'PSS-CE-Metamodell' {
    import 'PSS-Metamodel'::*;
    import 'CE-Metamodel'::*;

    #system def 'CE-PSS' specializes ProductServiceSystem {
        redefines productServiceSystems;
        redefines serviceSystems;
        redefines conOps;

        ref item 'pss ce concept' : 'System CE Concept' {
            item 'product ce concept' : 'Product CE Concept' subsets 'constituent ce concepts';
            item 'service ce concept' : 'Product CE Concept' subsets 'constituent ce concepts'; }

        ref requirement 'ce requirements' : 'System CE Requirement' [*] {
            redefines 'ce concept' = 'pss ce concept'; }
        ref concern 'life cycle concerns' : 'Life Cycle CE Concern' [*] {
            redefines 'ce concept' = 'pss ce concept'; }
    }
}
    
```

Bild 5: Textuelle Beschreibung des PSS-CE-Metamodells in der SysML v2-Notation

4 Anwendung und Evaluation

Die Anwendung und Evaluation des entwickelten *PSS-CE-Metamodells* als Lösungsansatz erfolgt im Rahmen des Projekts *CYCLOMETRIC*, welches das Ziel einer nachhaltigen und kreislaforientierten Fahrzeugentwicklung hat. Dabei wird am Fallbeispiel einer intelligenten Mittelkonsole ein Werkzeug zur Lebenszyklus-gerichteten Entwicklung von Fahrzeugkomponenten erarbeitet, welches Anwendern die Auswirkung einer Gestaltungsentscheidung auf ökonomische und ökologische Nachhaltigkeitsaspekte aufzeigen soll (BMBF 2021). Als Teil der kreislaforientierten Fahrzeuggestaltung wird das vorgestellte *PSS-CE-Metamodell* perspektivisch mit dem *CYCLOMETRIC*-Systemmodell verknüpft, um aus dem Nutzungskontext emergierende Anforderungen an die Mittelkonsole ableiten und bei der Planung individueller Kreislaufstrategien berücksichtigen zu können.

Wie Bild 6 zeigt, wurde für die Evaluation im Rahmen dieses Beitrags von einem Carsharing-Anwendungsfall als übergeordnete *Rethink*-Strategie zur Intensivierung der Produktnutzung ausgegangen (*satisfy intensifyUsage by carsharingService*). Die PSS-Komponenten zur Erfüllung dieser jeweiligen Anforderungen sind mit einer Erfüllungsbeziehung entsprechend verknüpft. Hierin soll die Mittelkonsole im Sinne einer *Reduce*-Strategie als selbsttragendes Leichtbauteil aus Faserverbundmaterial konzipiert werden (*satisfy reduceWeight by fibreComposite*). Zur Realisierung entsprechender Austauschmöglichkeiten von einzelnen Systemelementen als *Refurbish*-Strategie soll die Konsole zudem möglichst modular aufgebaut sein (*satisfy modularDesign by modules*). Als letzte, weitere *Reduce*-Maßnahme des Kreislauf-Konzepts soll durch den Einsatz leitfähiger Garne die direkte Bestückung berührungsempfindlicher Bedienelemente auf textile Oberflächen ermöglicht werden, um dadurch zusätzliche Bauteile einsparen zu können (*satisfy reduceParts by conductiveYarn*).

Es lässt sich festhalten, dass die Anwendung des *PSS-CE-Metamodells* grundsätzlich funktioniert und die aus den Kreislaufstrategien emergierenden Anforderungen mit den entsprechenden Komponenten des Carsharing-Systems verknüpft werden können. Die zu Beginn der Konzeption definierten Anforderungen an den Lösungsansatz (s. 3.1) sind demnach erfüllt. Das *CarsharingSystem* konnte als PSS modelliert werden und die Ableitung emergenter Anforderungen aus dem *pss ce concept* war möglich. Die Einbindung einer CE-Strategie in die PSS-Architektur ist somit als erfolgreich zu bewerten. Trotzdem es im Rahmen dieses Beispiels nicht explizit dargestellt wurde, ist weiterer Handlungsbedarf in Bezug auf das Referenzieren der Lebenszyklusphasen festzuhalten. Kreislaufwirtschaft betrifft verschiedene Phasen, die einerseits Ausgangspunkt zur Implementierung einer konkreten Kreislaufstrategie und andererseits auch direkt davon betroffen sein können, z. B. die geeignete Gestaltung eines *Refurbish*-Produkts in der Entwicklung oder die Umsetzung der eigentlichen Produktüberholung während der Nutzungsphasen. Diese Unterscheidung von Ausgangs- und Bezugspunkt sollte im Metamodell ebenfalls unterschieden werden können.

5 Fazit und Ausblick

In den vorherigen Abschnitten wurde erläutert, wie sich durch die Integration von Dienstleistungen und die Implementierung von Kreislaufstrategien eine nachhaltigkeitsorientierte Fahrzeugentwicklung unterstützen lässt. Die Analyse des Stands der Wissenschaft und Praxis zeigte, dass bereits vielversprechende Ansätze zur getrennten Berücksichtigung dieser Aspekte existieren. Ihre kombinierte Betrachtung, speziell im Mobilitätskontext, stellt jedoch eine Forschungslücke dar. Aus diesem Grund wurde das zweiteilige *PSS-CE-Metamodell* entwickelt, welches die Systemmodellierung einer Mobilitätslösung als PSS unterstützen und dabei eine Verknüpfung mit a priori festgelegten Kreislaufstrategien ermöglichen soll. Dies wird einerseits durch die Definition eines Kreislaufkonzepts auf Basis selektierter Kreislaufstrategien, hier nach Potting et al. (2017), und eine Verknüpfung daraus resultierender Anforderungen im *CE-Metamodell* (s. 3.2.2) realisiert. Andererseits ermöglicht das *PSS-Metamodell* (s. 3.2.1) unter Einbeziehung einer domänenspezifischen Modell-Bibliothek die Beschreibung einer Mobilitätslösung als PSS. Die anschließende Anwendung des Ansatzes am Carsharing-Beispiel (s. 4) zeigte die grundsätzliche Eignung des Metamodells für den festgelegten Zweck.

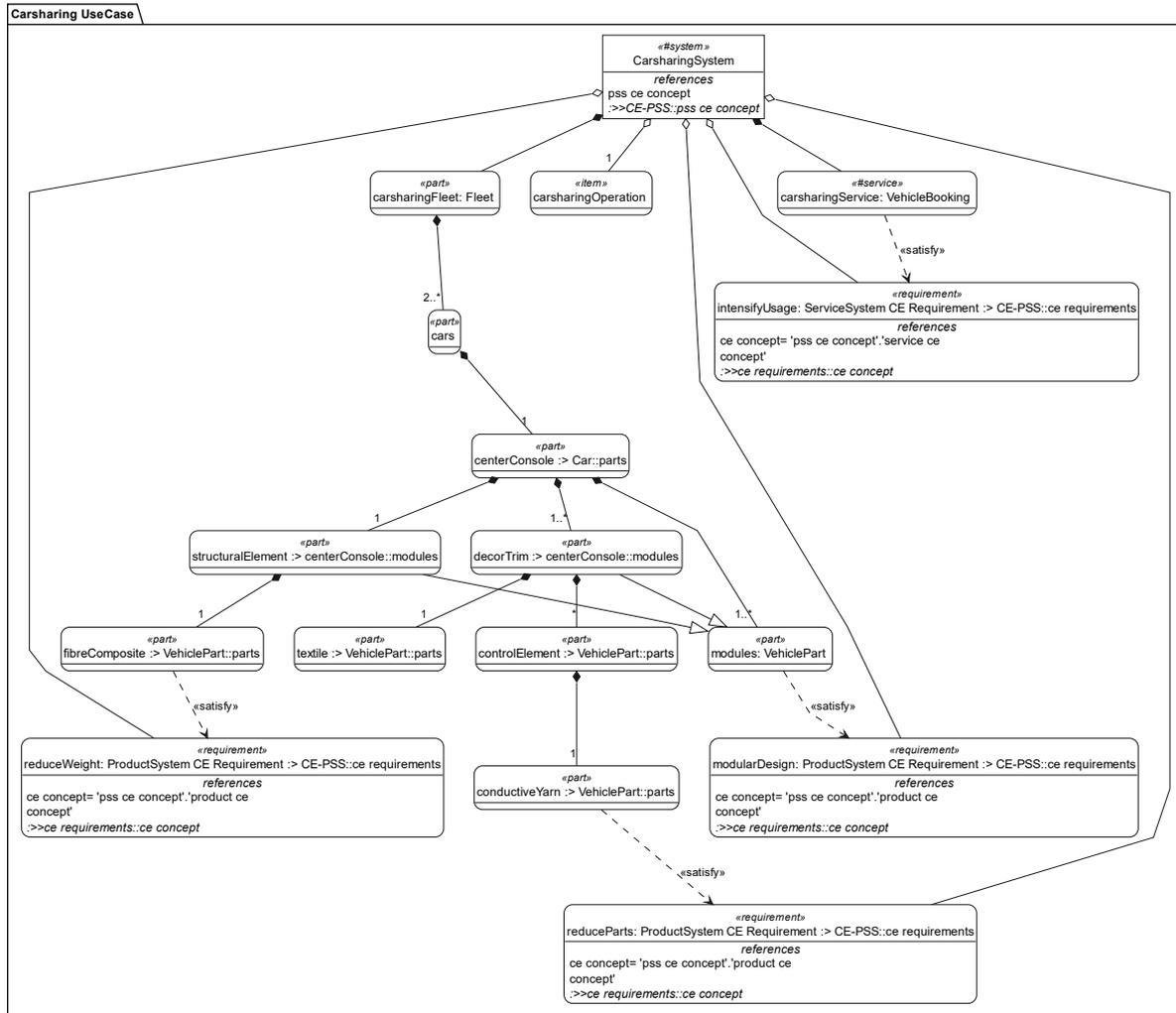


Bild 6: Anwendung des PSS-CE-Metamodells auf ein Carsharing-System [skalierbare Vektorgrafik]

Zukünftig soll das *PSS-CE-Metamodell* weiterentwickelt und mithilfe von Erkenntnissen aus der realen Anwendung optimiert werden. Im Rahmen des Projekts *CYCLOMETRIC* ist unter anderem die Erweiterung auf andere Geschäftsmodelle, wie ein Gebrauchtfahrzeug-Einsatz, geplant. Dennoch wird abschließend als Kritik und gleichzeitig weiteren Forschungsbedarf konstatiert, dass die Betrachtung stark reduziert wurde und bspw. keinerlei Berücksichtigung funktionaler Aspekte beinhaltet. Diese sollten in einer zukünftigen Version des Metamodells ergänzt werden. Gleiches gilt für die Berücksichtigung individueller Lebenszykluspfade, wie es bereits in einem früheren Beitrag vorgeschlagen wurde (Block et al. 2023). Des Weiteren erscheint es im Sinne eines ganzheitlichen MBSE-Ansatzes aus Sprache, Methodik und Werkzeug hilfreich, den Einsatz des Metamodells im Rahmen einer angeleiteten Vorgehensweise umzusetzen (Huth und Vietor 2020). Darüber hinaus könnte die direkte Einbindung dedizierter CE-Methoden, zum Beispiel eines *Life Cycle Assessment*, interessant sein (Ceschin und Gaziulusoy 2020; Diaz et al. 2021).

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung dieses Forschungsbeitrags im Rahmen des Projekts *CYCLOMETRIC* (Förderkennzeichen: 02J21E030 ff.).

Literatur

- Apostolov et al. 2018 APOSTOLOV, Hristo; FISCHER, Matthias; OLIVOTTI, Daniel; DREYER, Sonja; BREITNER, Michael; EIGNER, Martin: *Modeling Framework for Integrated, Model-based Development of Product-Service Systems*. In: *Procedia CIRP* 73 (2018), S. 9–14
- Block et al. 2020 BLOCK, Lukas; WERNER, Maximilian; HERRMANN, Florian; STEGMÜLLER, Sebastian: *Umbruch in der Fahrzeugentwicklung - Systemdenken als Schlüsselfaktor*. In: *ATZechnik* 15 (2020), Nr. 5, S. 40–45
- Block et al. 2023 BLOCK, Lukas; WERNER, Maximilian; SPINDLER, Helge; SCHNEIDER, Benjamin: A Variability Model for Individual Life Cycle Paths in Life Cycle Engineering. In: Dröder, Klaus; Vietor, Thomas (Hrsg.): *Future Automotive Production Conference 2022*. 1st edition 2023. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, 2023, S. 1–10
- BMBF 2021 BMBF: *Modellbasierte Entscheidungsunterstützung zur proaktiven sowie lebenszyklusgerichteten Entwicklung von Fahrzeug-Komponenten (CYCLOMETRIC)*. URL <https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de/projekte/modellbasierte-entscheidungsunterstuetzung-zur-proaktiven-sowie-lebenszyklusgerichteten-entwicklung-von-fahrzeug-komponenten-cyclometric/> – Überprüfungsdatum 18.04.2023
- Boucher et al. 2016 BOUCHER, Xavier; MEDINI, Khaled; FILL, Hans-Georg: Product-Service-System Modeling Method. In: Karagiannis, Dimitris; Mayr, Heinrich C.; Mylopoulos, John (Hrsg.): *Domain-Specific Conceptual Modeling*. Cham : Springer International Publishing, 2016, S. 455–482
- Braungart und McDonough 2021 BRAUNGART, Michael; MCDONOUGH, William: *Cradle to Cradle : Einfach intelligent produzieren*. 7. Auflage, ungekürzte Taschenbuchausgabe. München : Piper, 2021
- Ceschin und Gaziulusoy 2020 CESCHIN, Fabrizio; GAZIULUSOY, İdil: *Design for sustainability : A multi-level framework from products to socio-technical systems*. London, New York, NY : Routledge, 2020
- Diaz et al. 2021 DIAZ, Anna; SCHÖGGL, Josef-Peter; REYES, Tatiana; BAUMGARTNER, Rupert: *Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management*. In: *Sustainable Production and Consumption* 26 (2021), S. 1031–1045
- Eigner et al. 2019 EIGNER, Martin; DICKOPF, Thomas; APOSTOLOV, Hristo: Interdisziplinäre Design Methodik. In: Stelzer, Ralph H.; Krzywinski, Jens (Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019*. Dresden : TUDpress, 2019, S. 415–435
- Ellen MacArthur Foundation 2013 ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: *Towards the Circular Economy : Economic and business rationale for an accelerated transition*. 2013. URL <https://ellenmacarthurfoundation.org/publications> – Überprüfungsdatum 16.01.2023

- Fakhfakh et al. 2020 FAKHFAKH, S.; HEIN, A.; JANKOVIC, M.; CHAZAL, Y.: *A META-MODEL FOR PRODUCT SERVICE SYSTEMS OF SYSTEMS*. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1 (2020)*, S. 1235–1244
- Friedenthal et al. 2015 FRIEDENTHAL, Sanford; MOORE, Alan; STEINER, Rick: *A practical guide to SysML : The systems modeling language*. Third edition. Waltham, MA : Elsevier; Morgan Kaufmann, 2015
- Halstenberg et al. 2019 HALSTENBERG, Friedrich; LINDOW, Kai; STARK, Rainer: *Leveraging Circular Economy through a Methodology for Smart Service Systems Engineering*. In: *Sustainability* 11 (2019), Nr. 13, S. 3517
- Hauschild et al. 2020 HAUSCHILD, Michael; KARA, Sami; RØPKE, Inge: *Absolute sustainability: Challenges to life cycle engineering*. In: *CIRP Annals* 69 (2020), Nr. 2, S. 533–553
- Huth und Vietor 2020 HUTH, Tobias; VIETOR, Thomas: *Systems Engineering in der Produktentwicklung*. In: *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)* 51 (2020), Nr. 1, S. 125–130
- Idrissi et al. 2017 IDRISSE, Nawfal; BOUCHER, Xavier; MEDINI, Khaled: *Generic Conceptual Model to Support PSS Design Processes*. In: *Procedia CIRP* 64 (2017), S. 235–240
- Kastens und Kleine Büning 2021 KASTENS, Uwe; KLEINE BÜNING, Hans: *Modellierung : Grundlagen und formale Methoden*. 5., aktualisierte Auflage. München : Hanser, 2021
- Lawrenz et al. 2021 LAWRENZ, Sebastian; LEIDING, Benjamin; MATHISZIG, Marit; RAUSCH, Andreas; SCHINDLER, Mirco; SHARMA, Priyanka: *Implementing the Circular Economy by Tracing the Sustainable Impact*. In: *International journal of environmental research and public health* 18 (2021), Nr. 21
- Lüttenberg et al. 2018 LÜTTENBERG, Hedda; WOLF, Verena; BEVERUNGEN, Daniel: *Service (Systems) Engineering für die Produktion*, Bd. 12. In: Meyer, Kyrill; Klingner, Stephan; Zinke, Christian (Hrsg.): *Service Engineering*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 31–49
- Maleki et al. 2018 MALEKI, Elaheh; BELKADI, Farouk; BERNARD, Alain: *A Meta-model for Product-Service System based on Systems Engineering approach*. In: *Procedia CIRP* 73 (2018), S. 39–44
- Mayyas et al. 2012 MAYYAS, Ahmad; QATTAWI, Ala; OMAR, Mohammed; SHAN, Dongri: *Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), Nr. 4, S. 1845–1862
- Mboli et al. 2022 MBOLI, Julius; THAKKER, Dhavalkumar; MISHRA, Jyoti: *An Internet of Things-enabled decision support system for circular economy business model*. In: *Software: Practice and Experience* 52 (2022), Nr. 3, S. 772–787
- McAloone und Pigosso 2021 MCALOONE, Tim; PIGOSSO, Daniela: *Ökodesign*. In: Bender, Beate; Gericke, Kilian (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2021, S. 975–1021
- Meier und Uhlmann 2017 MEIER, Horst; UHLMANN, Eckart: *Industrielle Produkt-Service Systeme*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2017

- Orellano et al. 2019 ORELLANO, Martha; MEDINI, Khaled; LAMBHEY-CHECCHIN, Christine; NEUBERT, Gilles: *A system modelling approach to collaborative PSS design*. In: *Procedia CIRP* 83 (2019), S. 218–223
- Potting et al. 2017 POTTING, José; HEKKERT, Marko; WORRELL, Ernst; HANEMAAIJER, Aldert: *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. The Hague, 2017. URL <https://www.pbl.nl/en/publications/circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains> – Überprüfungsdatum 07.11.2022
- Purvis et al. 2019 PURVIS, Ben; MAO, Yong; ROBINSON, Darren: *Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins*. In: *Sustainability Science* 14 (2019), Nr. 3, S. 681–695
- Ruggieri et al. 2016 RUGGIERI, Alessandro; BRACCINI, Alessio; POPONI, Stefano; MOSCONI, Enrico: *A Meta-Model of Inter-Organisational Cooperation for the Transition to a Circular Economy*. In: *Sustainability* 8 (2016), Nr. 11, S. 1153
- Schöggel et al. 2017 SCHÖGGL, Josef-Peter; BAUMGARTNER, Rupert; HOFER, Dietmar: *Improving sustainability performance in early phases of product design: A checklist for sustainable product development tested in the automotive industry*. In: *Journal of Cleaner Production* 140 (2017), S. 1602–1617
- Schulze 2016 SCHULZE, Sven-Olaf: *Systems Engineering*. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2016, S. 153–184
- Spath und Dangelmaier 2016 SPATH, Dieter; DANGELMAIER, Manfred: *Produktentwicklung Quo Vadis*. In: Lindemann, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München : Hanser, 2016, S. 3–7
- SST 2023 SST: *GitHub - Systems-Modeling/SysML-v2-Release : The latest monthly incremental release of SysML v2*. OMG System Modeling Language™ (SysML®) v2 Release. URL <https://github.com/Systems-Modeling/SysML-v2-Release>. – Überprüfungsdatum 17.01.2023
- Tukker 2004 TUKKER, Arnold: *Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet*. In: *Business Strategy and the Environment* 13 (2004), Nr. 4, S. 246–260
- Weilkiens 2014 WEILKIENS, Tim: *Systems engineering mit SysML/UML : Anforderungen, Analyse, Architektur*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Heidelberg : dpunkt.verlag, 2014