

# MBSE-basierte Produktkonfiguratoren zur Analyse der Modularisierung bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme

Florian Seiler, Lea-Nadine Schwede und Dieter Krause

## 1 Einleitung

Der im Zuge der Globalisierung immer stärker anwachsende Wettbewerb im Bereich produzierender Unternehmen führt zu einem kontinuierlichen Wettlauf um stetig kürzer werdende Produktionslaufzeiten. Aufgrund dessen ist eine kontinuierliche Spezialisierung mit produktspezifischen Fertigungssystemen der Akteure am Markt zu verzeichnen, die direkt zu einer erhöhten Nachfrage von Sondermaschinen führt (Krause 2018). Diese geforderte Spezialisierung lässt eine interne Standardisierung für die Hersteller kaum zu und führt zu einer extrem hohen Variantenvielfalt, deren Beherrschung eine der Kernaufgaben bei der Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit darstellt. Insbesondere große Produktstrukturen sind aufgrund der anfallenden Datenmenge und dem resultierenden, hohen Grad an Verknüpfungen schwierig zu verwalten (Blees 2011).

Eine Möglichkeit, die interne Vielfalt bei einer gleichbleibenden externen Vielfalt zu reduzieren und somit den enormen Umfang der Produktarchitektur und deren Folgekosten einzuschränken, bietet die Modularisierung (Krause 2018). Die Entwicklung von modularen Produktstrukturen eröffnet mittels entsprechender Standardisierung die Möglichkeit, durch Modul-, Plattform-, und Baukastenentwicklung den Zielkonflikt zwischen Produktkosten und -vielfalt zu lösen (Ehrlenspiel 2009). Ein solcher Baukasten wird als notwendiges Mittel zur Beherrschung der Vielfalt betrachtet. Aufbauend auf diesen Baukasten kann anschließend ein Configurationssystem aufgebaut werden,

mithilfe dessen schnell und präzise auf unterschiedliche Kundenanforderungen reagiert werden kann.

Bei der Entwicklung und vor allem bei der Pflege eines solchen Baukastens sind jedoch einige Herausforderungen vorhanden. Neben der umfangreichen Datenaufnahme und der verwendungsgerechten Sicherung und Verwaltung derselben insbesondere bei komplizierten Produktarchitekturen, ist die Wahrung der Übersichtlichkeit und der Konsistenz meist nicht mehr zuverlässig zu gewährleisten. Als Konsistenz wird hierbei die vertikale Konsistenz, die Konsistenz zwischen Modellen und die zeitliche Konsistenz verstanden (Hanna et al. 2018). Vor allem bei der Versionierung im Zuge der Produktgenerationsentwicklung ist die Gefahr einer Inkonsistenzentwicklung verstärkt gegeben (Herzig et al. 2014). Hier erscheint eine softwarebasierte Lösung unumgänglich.

Ein Ansatz zur Lösung dieser Problemstellung ist in der Literatur durch die Verwendung von PLM(Product-Lifecycle-Management)-Systemen beschrieben.

Ein entsprechendes PLM-System soll die im Unternehmen existierende Daten- und Softwarestruktur verbinden und als *Single-Source of Truth* (Riesener 2017) fungieren, um die Konsistenz der Modelle zu gewährleisten. Allerdings wird gerade bei der Verwendung von Modellen bei der Schaffung und Verwaltung der Produktarchitektur deutlich, dass ein PLM-System hierzu nicht vollumfänglich dazu in der Lage ist, als einheitlicher Datenstamm zu fungieren. Hierbei ist die Ontologie, die Verwendung „einheitlicher Vokabeln“ (Kaufmann et al. 2014) zwischen den Systemen, um z. B. eine Konsistenzprüfung bei der Konfiguration zu implementieren, eine nicht zu unterschätzende Herausforderung bei der Umsetzung auf Basis eines reinen PLM-Systems. Wie in diesem Beitrag beschrieben wird, lässt sich diese Lücke mithilfe des MBSE (Model-Based Systems Engineering) schließen.

Folgende Abbildung 1 zeigt eine graphische Darstellung des Problem-Lösungsansatz Zusammenhangs.

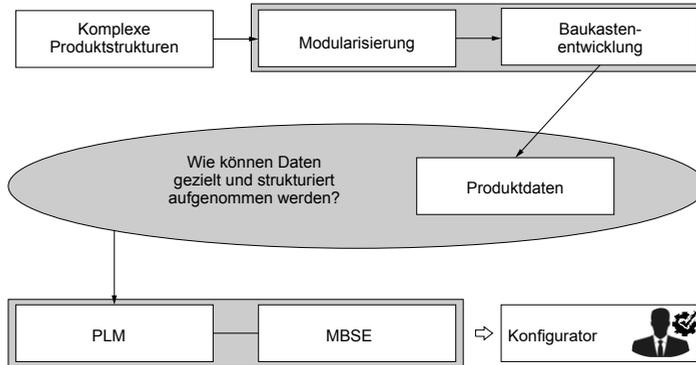


Abbildung 1: Graphische Darstellung der Problemstellung

Dieser Beitrag hat zum Ziel, insbesondere die Möglichkeit einer softwarebasierten Lösung mittels MBSE zur konsistenten Speicherung, Verarbeitung, Nutzung, Veränderung und Analyse der Produktarchitekturdaten aufzuzeigen, um auf dieser Basis ein Produktkonfigurationssystem aufzubauen, welches das Wissen aus der vorangegangenen Modularisierung dem Nutzer intuitiv zugänglich macht. Ebenfalls sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die sich bei der Verwendung eines MBSE basierten Konfigurators hinsichtlich der Analysemöglichkeiten einer modularen Struktur eröffnen.

## 2 Stand der Wissenschaft

In diesem Abschnitt wird der Stand der Wissenschaft zu den Themenbereichen Modularisierung, Baukastenentwicklung, PLM-Systeme, MBSE Engineering und Konfigurationssystemen kurz aufgezeigt.

### 2.1 Modularisierung

Als Modularisierung wird die zielorientierte Entwicklung der Modularität der Produktstruktur beschrieben, wobei die konkrete Festlegung von Modulen und ihren Schnittstellen zueinander im Vordergrund steht. Eine Zerlegung der Produktstruktur in Komponenten (Dekomposition) und der darauffolgenden Analyse unter technisch-funktionalen bzw. produktstrategischen Gesichtspunkten ermöglicht eine Neugruppierung der Komponenten zu Modulen (Krause 2018). Es existieren verschiedene Ansätze zur Entwicklung

modularer Produktstrukturen, wie z.B. ERIXON's MFD (Modular Function Deployment) oder der Integrierte PKT-Ansatz (Erixon 1998, Krause 2018).

Letzterer besteht aus unterschiedlichen Methodenbausteinen, die für die einzelnen Schritte bei der Entwicklung modularer Produktstrukturen verwendet werden. Hierzu zählen die Reduzierung der internen Vielfalt mittels variantengerechter Produktentwicklung sowie die Verringerung varianzinduzierter Komplexität, ohne jedoch die für den Kunden angebotene Produktpalette zu beeinflussen. Darauf aufbauend folgt die Lebensphasenmodularisierung. Dabei ist eine strategisch und produktspezifisch optimale Modulstruktur in allen Produktlebensphasen das Ziel (Krause 2018). Gleichzeitig wird das Ausnutzen von Skaleneffekten sowie die Wiederverwendbarkeit bereits geleisteter Arbeitsaufwendungen ermöglicht, wenn Module beispielsweise kommunal in unterschiedlichen Produktvarianten einer Produktfamilie genutzt werden (Blees 2011). Als Nachteile lassen sich jedoch auch eine eventuell eingeschränkte Produktdifferenzierung sowie eine mögliche Überdimensionierung anführen (Kipp 2012).

## 2.2 Baukastenentwicklung

Modularisierung und die Entwicklung eines Baukastens werden stets als konsekutive Schritte betrachtet (Kopenhagen 2004) Es existieren verschiedene Definitionen zu Baukastensystemen (vgl. Lindemann 2011, Pahl und Beitz 2013, Schuh 2015). Die Definition, auf deren Verständnis dieser Beitrag aufbaut, findet sich bei BURSAC, der einen Baukasten wie folgt beschreibt: „Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können“ (Bursac 2016).

Es wird deutlich, dass ein Baukasten kein gebrauchsfertiges Produkt darstellt, sondern lediglich sämtliche konfigurierbaren Module umfasst. Hierzu muss ein entsprechendes Regelwerk geschaffen werden, welches schlussendlich durch die Produktarchitektur definiert wird. Als Haupttypen werden hierbei in der Literatur Anwender- und Herstellerbaukästen identifiziert.

## 2.3 Konfigurationssysteme

Aufbauend auf einer modularen Struktur sind Konfigurationssysteme zur Beherrschung der immer umfassenderen, variantenreichen Produktarchitekturen unumgänglich (Plietz 2011). LIEBISCH beschreibt einen Konfigurator als Instrument, konkrete Anforderungen eines Kunden optimal auf eine passende Produktvariante abzubilden. Als generelle Einschränkung gilt jedoch, dass die Konfigurationsmöglichkeiten meist nie die vollständige Menge der Kundenwünsche abdecken können (Liebisch 2014). Da Kunden keine kundenrelevanten Eigenschaften kaufen, sondern sich auf Basis derer für variante Ausprägungen entscheiden, kommt einem Konfigurator generell die Aufgabe zu, alle Informationen zwischen Kundenanforderungen und Stückliste zu verarbeiten, was einer Art „Übersetzung“ entspricht. (Kortmann et al. 2009). Hierbei werden Konfiguratoren in drei Hauptklassen unterteilt: Produktkonfiguratoren, Variantenkonfiguratoren und Angebotskonfiguratoren (Erkus 2009) und setzen sich aus einer Interaktionsplattform sowie einem Datenpflegewerkzeug zusammen (Andreas 2009). Die Interaktionsplattform entspricht hierbei dem Frontend, mittels dessen die in die Datenstruktur eingepflegte Produktarchitektur dem Nutzer zugänglich gemacht wird. Das Datenpflegewerkzeug stellt hierbei die Möglichkeit zur Verwaltung jenes Datensatzes dar, wie es in diesem Beitrag durch die Verwendung eines geeigneten MBSE-Tools beschrieben wird (siehe Abschnitt 3).

## 2.4 Product-Lifecycle-Management (PLM)-Systeme

PLM-Systeme (*Product Lifecycle Management*, seltener *Plant Lifecycle Management*), umschreiben die ganzheitliche Gestaltung und Verwaltung des Lebens eines Produkts, wobei alle Einflussgrößen im Zuge dessen Lebens rechtzeitig und angemessen berücksichtigt werden. Die Basis hierfür stellt das *Product-Data-Management-System (PDM)* dar, das als zentrale „Datenbank“ fungiert. (Vajna 2009). Die Software stellt dabei ein Wissensmanagement-System mit mehreren, meist ähnlichen Objekttypen dar. Es ist also ein Konzept, das den Anspruch erhebt, das gesamte Produkt über den kompletten Lebenszyklus hinweg mit unterschiedlichen IT-Systemen zu verwalten (Sendler et al. 2009) und sämtliche Daten, Informationen und Entwicklungen zu speichern (Stjepandic 2015). Gängige PLM-Systeme sind z.B. Teamcenter 8.3 von Siemens Industry Software oder Catia V6 Systems.

## 2.5 Model Based Systems Engineering (MBSE)

Die INCOSE beschreibt das Systems Engineering als interdisziplinären Ansatz, der die systematische Entwicklung von Systemen ermöglichen soll. Hierbei steht das umfassende und kombinierte Verständnis der Anforderungen aller Stakeholder ebenso im Vordergrund wie die Ableitung von Lösungsmöglichkeiten konkreter Probleme sowie deren Verifizierung und Validierung (Incose 2011). Das MBSE ermöglicht ein schnelleres und einfacheres Dokumentenmanagement, indem die erforderlichen Dokumente direkt aus den existierenden Modellen abgeleitet werden. Eine Abbildung des gesamten Systems auf Basis eines einzigen Datenstamms ermöglicht neben einer steten Überprüfung der Modelle hinsichtlich Konsistenz und Kohärenz (God und Hintze 2012; Partsch 2010) auch eine entsprechende Gewährleistung derselben (Hanna & Schwede 2018).

Auf Basis der Unified Modeling Language (UML) der 90er Jahre, die bereits eine graphische Modellierungssprache zur Beschreibung von Objekten leistete und eine Wiederverwendung von abgeschlossenen Einheiten eines Programmcodes ermöglichte (Zingel 2013), wurde 2007 SysML geschaffen, eine durch Tools unterstützte Standardmodellierungssprache für das Systems Engineering (Kaffenberger 2012). Diese Sprache ermöglicht die semantische Beschreibung von Modellen. Deren Mehrwert entsteht darin, dass Entwickler ihre Modelle explizieren und sich auf deren Basis austauschen können (Lamm & Weilkens 2014). Hierzu existieren diverse Tools wie z.B. Cameo Systems Modeler (No Magic) oder Papyrus (The Eclipse Foundation).

## 3 Erweiterung von PLM-Systemen durch MBSE

Einer der Hauptgründe für den Einsatz einer Datenverwaltungssoftware ist deren Einsatz als „*Single-Source-of-Truth*“, d.h. als alleiniger Datenstamm zur konsistenten Datenpflege. Die Wichtigkeit eines solchen Systems zeigt sich mit zunehmendem Umfang der Produkte, v.a. da diese zumeist auch mechanische Anteile aufweisen. Problematisch ist hier allerdings oft, dass die Datenformate der einzelnen Subsysteme nicht immer kompatibel sind, die Ontologie ist demzufolge nicht gewährleistet (Kaufmann et al. 14). Hier kann der Einsatz von MBSE durch den Einsatz der zugrunde liegenden, semantischen Sprache SysML, Abhilfe schaffen.

Durch die Schaffung eines integrierten Metamodells mit interdisziplinärem Charakter kann ein System auf verschiedenen Abstraktionsebenen hinsichtlich dessen Struktur und Verhalten beschrieben werden (Mueggo 2015). EIGNER betrachtet dieses Datengerüst mit dessen modellbasierten Verknüpfungsdarstellung als große Unterstützung für PLM-Systeme (Eigner et al. 2012).

Bisher wurde mittels der Stückliste (BOM) eine physische Itemhierarchie geschaffen, auf deren Basis verschiedene Modelle aus verschiedenen Subsystemen zusammengeführt wurden. Das MBSE eröffnet nun die Möglichkeit, Struktur- und Verhaltensinformationen sowie abstrahierte Verknüpfungen effizient nutzbar zu machen, um einzelne Modelle zu einem zusammenhängenden Metamodell zusammenzuführen (Mueggo 2015). Des Weiteren lassen sich Anforderungen an einzelne Produktarchitekturelemente knüpfen, d.h. Randbedingungen oder Verknüpfungen für Komponenten und Module vorsehen, wie sie z.B. durch den MIG im integrierten PKT-Ansatz vorgegeben werden (Gebhardt et al. 2014).

Des Weiteren lassen sich mittels MBSE individuell angepasste, aber dennoch kompatible Modelle und Methoden in die bestehende Datenstruktur integrieren. EIGNER et al. zeigen auf, dass reine PLM-Systeme hier starke Einschränkungen hinsichtlich der Offenheit und freien Programmierbarkeit aufweisen (Eigner et al. 2012).

Wie bereits unter Kapitel 2.3 beschrieben, hat ein Konfigurator die Aufgabe, die Kundenanforderungen über kundenrelevante Eigenschaften in konkrete Module zu überführen. Dementsprechend muss die Datenbasis eines solchen Konfigurationssystems in der Lage sein, qualitative Daten, wie Anforderungsverknüpfungen und kundenrelevante Eigenschaften etc., abzubilden. Herkömmliche PLM-Systeme haben ihre Stärke hauptsächlich in der Verwaltung von CAD-Daten, für den Einsatz als Datenmodellquelle eines Konfigurators hingegen erscheint der Einsatz eines flexiblen MBSE-Modells als sinnvoll. Dies wird umso deutlicher, wenn man die wichtigsten Anforderungen an Konfigurationssysteme betrachtet: Diese sind auf Basis eines vollständigen Informationssystems eine konsistente Produktkonfiguration sowie die Möglichkeit zur Plausibilitätsprüfung zu ermöglichen (Göbel 2009, Drews 2008). LIEBISCH

zeigt auf, dass dies nur mit dem Einsatz einer geeigneten Modellierungssprache abgebildet werden kann, wie sie durch die Verwendung eines geeigneten MBSE-Tools zur Verfügung gestellt wird (Liebisch 2014).

Als Zwischenfazit lässt sich der Einsatz von MBSE als Erweiterung existierender PLM-Systeme, vor allem aber als Grundlage für ein flexibles, intelligentes Konfigurationssystem deutlich hervorheben. Insbesondere sollen kundenrelevante Eigenschaften in die zu schaffende Modellstruktur als Basis eines Konfigurators integriert werden. SENDLER und WEILKIENS beschreiben die Verknüpfung von PLM und SysML als Grundlage für eine datentechnische Durchgängigkeit, indem nicht nur die Geometrie und Struktur eines Produktes gemanagt werden, sondern auch dessen Logik und Funktionen, welche als Anforderungen hinter diesem System stehen (Sendler, und Weilkien 2013). Vor allem die Vorwärts- und Rückwärtsintegration aller Systeme ist einer der größten Benefits, die mittels MBSE geschaffen werden. Die Aras Corporation bietet hierzu bereits Schnittstellen, um PLM-Systeme mit MBSE-Software zu verknüpfen (aras corp 2016).

#### **4 Ansätze zur Entwicklung eines MBSE basierten Konfigurationssystems**

In diesem Abschnitt werden Ansätze zur Umsetzung eines MBSE basierten Konfigurationssystems aufgezeigt. Nach HERMANN ist die Konfiguration kundenspezifischer Produkte eine der Kernkompetenzen, die ein Unternehmen zu leisten hat. Hierbei wird ein intelligenter, dynamischer Produktkonfigurator als unumgänglich bezeichnet (Hermann 2013). Wie bereits unter Abschnitt 2.3 beschrieben, ist hier ein konsistenter Datenstamm unbedingt nötig.

Hierzu wurde die einschlägige Literatur mit den Keywords zu modularen Produktstrukturen, PLM basierten Baukastensystemen, MBSE und Konfigurationssystemen hinsichtlich der Keyword-Häufungen untersucht. Hierbei wurde die Anzahl der zugrundeliegenden Beiträge anhand deren Abstracts auf 103 reduziert. Folgende Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Analyse.

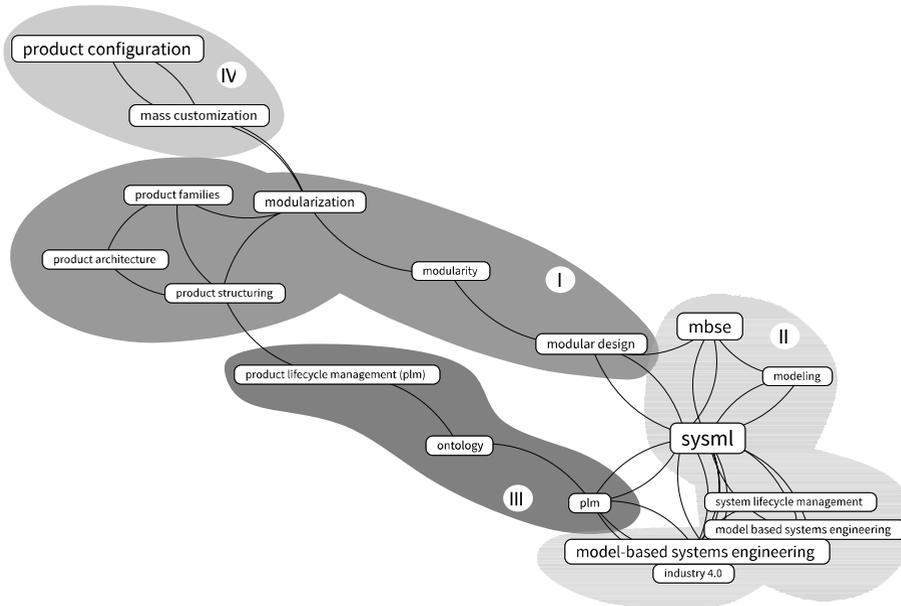


Abbildung 2: Keyword-Analyse

Diese Grafik zeigt deutlich vier einzelne Cluster. Diese sind den Themenbereichen modulare Produktstrukturen (I), MBSE (II), PLM (III) und Produktkonfiguratoren (IV) zuzuordnen. Es wird der aus der Literatur gewonnene Eindruck bestätigt, dass die Verknüpfungen zwischen modularen Produktarchitekturen und MBSE Engineerings sehr ausgeprägt sind. Hierbei ist auch die Erweiterung von PLM-Systemen durch MBSE zur Verwaltung modularer Strukturen deutlich zu erkennen. Diese Datenbasis findet auch Verwendung beim Einsatz von Produktkonfiguratoren.

Es existiert jedoch keine direkte Verknüpfung zwischen Konfigurationssystemen und dem Themenbereich des MBSE. Wie oben bereits aufgezeigt wurde, ist der Einsatz von MBSE zur konsistenten Datenaufnahme und -verwaltung beim Aufbau intelligenter Produktkonfiguratoren jedoch unumgänglich. Des Weiteren eröffnet die Verwendung einer semantischen Sprache zur Abbildung der Produktarchitektur Möglichkeiten zur rechnergestützten Analyse und Optimierung der existierenden Modulstruktur. Hierzu sind in der Literatur keine Beiträge zu finden. Dieser Beitrag soll einen Weg zum Schließen dieser Lücken aufzeigen.

Folgende Abbildung 3 zeigt schematisch das Konzept eines MBSE-basierte Konfigurationssystems. Ebenfalls wird die darauf aufbauende Bewertung der modularen Produktarchitektur als Datenbasis für eine Produktgenerationsentwicklung aufgezeigt.

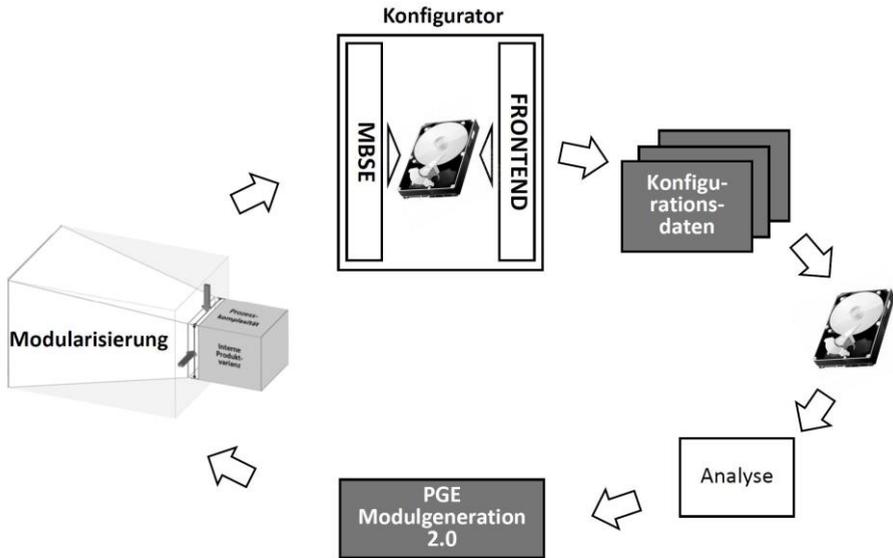


Abbildung 3: Schematischer Aufbau Konfiguration und Analysewerkzeug

Hierbei wird eine methodisch entwickelte, modulare Produktarchitektur, inklusive der Daten, welche bei der methodischen Produktentwicklung generiert werden, in die Softwarestruktur eines geeigneten MBSE-Tools wie z.B. Cameo Systems Modeler überführt. Erste Modelle dazu wurden bereits erstellt (u.a. Bahns et al. 2014, Hanna et al. 2018 und Eichmann et al. 2018). Um ein entsprechendes Konfigurationssystem schnittstellentechnisch unabhängig vom jeweiligen MBSE-Tool zu gestalten, greift das Konfigurationssystem auf eine separate Datenbank zu, die eine Vorwärts- und Rückwärtsintegration des MBSE Tools zulässt. Das Konfigurationstool ermöglicht anschließend die Übersetzung der Kundenanforderungen in kundenrelevante Eigenschaften und lässt somit eine automatisierte Auswahl der zu verwendenden Module zu. Die entsprechende Konfiguration führt zu einer direkten Ausleitung der angebots- und fertigungsrelevanten Unterlagen

(Kostenstruktur, Stückliste, Zeichnungssatz, Verknüpfungsliste etc.) und wird im Nachgang archiviert. Wichtig bei der Gestaltung eines Konfigurators im Bereich des Sondermaschinenbaus ist es, dass das Userinterface und die Auswahl der geeigneten Module kundenspezifische Anpassungen zulässt und diese entsprechend dokumentiert. Im Sondermaschinenbau ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, einen reinen Configure-to-Order (CTO) Prozess, selbst bei einer explizit für diesen Einsatzzweck entwickelten modularen Produktarchitektur, durchlaufen zu können. Infolgedessen muss die Konfigurationssoftware den Prozesspfad des Configure-to-Order-basierten Engineer-to-Order Prozesspfad (Seiler, 2019, eingereicht) ermöglichen. Nach dem Erreichen einer produkt- und unternehmensspezifischen Anzahl an Konfigurationen, kann die modulare Struktur auf Basis der archivierten CTO-ETO-Konfigurationsdatensätze analysiert werden.

Hier sind vor allem diejenigen Punkte interessant, an denen die standardisierte, modulare Struktur kundenindividuell angepasst werden musste. Eine Analyse hinsichtlich Art und Häufigkeit dieser Änderungen können Aufschluss darüber geben, in welchen Aspekten eventuelle Schwachpunkte der existierenden Produktarchitektur existieren. Ebenfalls können die verwendeten Modultreiber, die zum Aufbau der existierenden modularen Struktur definiert wurden, kritisch bewertet werden.

Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die ursprüngliche Modularisierung die tatsächlichen Kundenanforderungen abdecken. Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn kann durch die Analyse der etablierten Kostenstruktur erfolgen. Hierbei können diejenigen Komponenten, die als Hauptkostenträger über die analysierten Konfigurationen auffallen, identifiziert werden. Wichtig dabei ist der Gedanke, nicht die Hauptkostenträger der Produktarchitektur zu identifizieren, sondern diejenigen, die relativ gesehen den größten Einfluss haben, um eine Datenbasis für Design-to-Cost Entwicklungen zu schaffen.

Auf Basis der Erkenntnisse obiger Analyse können Anforderungen an die Produktgenerationsentwicklung abgeleitet werden. Somit ist eine objektivierbare, qualifizierbare und quantitativ belastbare Aussage über die Leistungsfähigkeit des Modulbaukastens sowie den nötigen Änderungen zur Verbesserung des Abdeckungsgrades der Kundenanforderungen durch die

Produktarchitektur möglich. Als einfacher Wert zur Messung der Baukasteneffizienz kann z.B. die Konfigurationstiefe (vgl. Formel 1) herangezogen werden.

$$\text{Konfigurationstiefe} = \frac{\text{Anzahl verwendeter CTO Module}}{\text{Anzahl konfigurierter Module gesamt}}$$

Diese besagt, mit welchem prozentualen Anteil eine Kundenanfrage ohne Änderungen aus dem Baukasten bedient werden kann. Eine Konfigurationstiefe von 100% wäre somit ein reines CTO-Produkt.

Eine solche MBSE-basierte Konfigurationssoftware mit angegliedertem Analysetool kann auch für Simulationszwecke benutzt werden. Dabei kann die Robustheit der existierenden modularen Struktur überprüft werden, indem virtuelle Datensätze generiert werden, in denen sich Änderungen im wirtschaftlichen Umfeld oder im Kundenverhalten widerspiegeln. Somit kann simuliert werden, welchen potentiellen Veränderungen die Produktarchitektur noch gewachsen ist. Bei diesem Ansatz bleibt die modulare Struktur gleich, nur die Umfeldszenarien und somit die Kundenanforderungen ändern sich. Gleichzeitig kann aber auch das Umfeld unverändert sein, während alternative modulare Strukturen getestet werden, um die Optimale unter denselben zu lokalisieren.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein konsistenter, alleiniger Datenstamm als Basis eines (Produkt)-Konfigurators für dessen erfolgreiche Realisierung unabdingbar ist. Hier bietet sich der Einsatz des MBSE als sinnvolle Erweiterung standardmäßig verwendeter PLM-Systeme an, da aufgrund der Möglichkeit, eine Produktstruktur semantisch und modellbasiert abzubilden, eine durchgängige, beidseitige Kommunikation mit allen Datentypen und Systemen eines Unternehmens gewährleistet wird. Auf Basis dessen lässt sich das Ziel formulieren, ein MBSE-basiertes Konfigurationssystem zu schaffen, um das Wissen aus der Modularisierung einem Nutzer intuitiv zugänglich zu machen. Des Weiteren können durch diese neuartige Verknüpfung zwischen Konfigurationssystemen und MBSE Kundenanfragen analysiert werden, um den Abdeckungsgrad der kundenrelevanten Eigenschaften durch

die modulare Struktur zu überprüfen und gegebenenfalls hinsichtlich entsprechender, vorher ausgewählter Kriterien zu verändern. Dies eröffnet auch die Möglichkeit, mittels simulierter Daten oder alternativen modularen Strukturen die Robustheit des Produkt-Markt-Systems zu untersuchen.

Die Entwicklung einer Schnittstelle, die die Umwandlung der MBSE-Datenstruktur in eine vom Konfigurator lesbare umzuwandeln, gilt es demzufolge weiter zu verfolgen. Nach erfolgreicher Umsetzung sollte ein lauffähiges Konfigurationssystem entwickelt werden, um die beschriebenen Analyseroutinen zu entwickeln und zu implementieren. Insgesamt gilt es hierbei, explizit die Herausforderungen aus dem Bereich des Sondermaschinenbaus zu migrieren.

## Literaturverzeichnis

- Andreas, G. (2009): Internationalisierung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen und Konzepte für die Datenhaltung. Diplomarbeit, Jena.
- aras corp (2016): MBSE and the Business of Engineering.
- Bahns, T.; Melzer, S.; God, R.; Krause, D. (2015): Ein modellbasiertes Vorgehen zur variantengerechten Entwicklung modularer Produktfamilien, Tag des Systems Engineering (TdSE), Ulm, pp. 141-150.
- Blees, C. (2011): Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. TuTech Verlag, Hamburg.
- Bursac, N. (2016): Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung, Dissertation. Stolzenberger, Leimen.
- Drews, M. (2008): Interaction Patterns für Produktkonfiguratoren. In: Mensch & Computer 2008: Viel Mehr Interaktion. Lübeck.
- Ehrlenspiel, K. (2009): Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Auflage. Hanser, München.
- Eichmann, O.; Melzer S.; Hanna M.; God R.; Krause D. (2018): A Model-Based Approach for the Development of Modular Product Families Considering Different Life Phases, EMEA Sector Systems Engineering Conference 2018, EMEASEC 2018 / TdSE 2018, Berlin, Germany.
- Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R. (2012): Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development. International Design Conference - Design 2012, Dubrovnik.
- Erixon, G. (1998): Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation. The Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Stockholm.
- Erkus, B.; Jakupovic, D.; Oueslati, K. (2014): ProjINF Konfigurator für Produktanforderungen.

- Gebhardt, N.; Bahns, T., Krause, D. (2014): An example of visually supported design of modular product families. 24rd CIRP Design Conference, Milano.
- Göbel, A (2009): Internationalisierung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen und Konzepte für die Datenhaltung. Diplomarbeit, Jena.
- God, R.; Hintze, H. (2012): Komplexität beherrschen: Methodologie für die modellbasierte Entwicklung von Kabinensystemen. Ingenieurspiegel, Band 1.
- Hanna, M.; Schwede, L-N.; Krause, D. (2018): *Model-Based Consistency for Design for Variety and Modularization*. DSM 2018, Trieste.
- Hermann, M.-O.; Michler, J.; Schönthaler, F. (2013): Wo Kundenwünsche auf technische und wirtschaftliche Notwendigkeiten treffen. Business News 03/2013, abgerufen von <http://bs.doag.org>.
- Herzig, S.; Quamar, A.; Paredis, C. (2014): An approach to Identifying Inconsistencies in Model-Based Systems Engineering. Conference on Systems Engineering Research, CSER 2014.
- IncoSE (2011): Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. Haskins, C.; Krueger, M.; Walden, D.; Forsberg, K.; Hamelin, R. (Hrsg.) San Diego.
- Kaffenberger, R.; Schulze, S. Weber, H. (2012): INCOSE Systems Engineering Handbuch. München.
- Kaufmann, U.; Pfenning, M. (2014): Was die Produkt- von der Softwareentwicklung lernen kann - durchgängige Integration disziplinspezifischer Modelle durch den Einsatz von Modellierungssprachen. Tagungsband des System Engineerings 2014, Bremen.
- Kipp, T. (2012): Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. TuTech Verlag, Hamburg.
- Kopenhagen, F. (2004): Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen. Berichte aus der Konstruktionstechnik, Shaker, Aachen.
- Kortmann, D.; Klink, H.; Wüpping, J. (2009): Strategien zur profitablen Variantenkonfiguration. In International Journal of Interoperability in Business Information Systems, Issue 3 (2), Oldenburg.
- Krause, D., Gebhardt, N. (2018): Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln. Springer, Hamburg.
- Lamm, J.; Weilkens, T. (2014): Method for Deriving Functional Architectures from Use Cases. In: Systems Engineering 17.2.
- Liebisch, M. (2014): Aspektorientierte Datenhaltung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen, Konzepte und Realisierung. Dissertation, Jena.
- Lindemann, U.; Ponn, J. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten. 2. Auflage. Springer, Heidelberg.
- Mueggo, C.; Pfenning, M. (2015): Die Rolle von MBSE und PLM im Industrial Internet. Tag des Systems Engineering 2015.

- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Heusel, J.; Bonnhuber, T.; Hufenbach, W.; Helms, O.; Schlick, C.; Klocke, F.; Dilger, K.; Müller, R. (2013): Gestaltungsrichtlinien. In Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer, Berlin-Heidelberg.
- Partsch, H. (2010): Requirements-Engineering systematisch. Springer, Berlin.
- Plietz, M. (2011): Patterns in der Produktkonfiguration. In: Tagungsband zum 14. Interuniversitären Doktorandenseminar Wirtschaftsinformatik, Chemnitz.
- Riesener, M.; Schuh, G. (2017): Vom Suchen und Warten zu agilen Entwicklungsprozessen - Product Lifecycle Management im Kontext von Industrie 4.0. IT-Matching.Guide, Aachen.
- Salvador, F. (2007): Towards a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. IEEE Transaction and Engineering Management Vol. 54 No. 2.
- Schuh, G. (2015): Leitfaden zur Baukastengestaltung: Ergebnisse des Forschungsprojekts Gestaltung innovativer Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen. VDMA 2015, Frankfurt/Main.
- Sellgren, U.; Törngren, M.; Malvius, D.; Biehl, M. (2009): PLM for Mechatronics integration. International Conference on Product Lifecycle Management.
- Sendler, U.; Weilkiens, T. (2013): Modellbasierte Systementwicklung. Was Sie schon immer über MBSE, PLM und Industrie 4.0 wissen sollten (I). Tag des Systems Engineering 2013.
- Stjepandic, J.; Wognum, N. and Verhagen, W. (Eds.) (2015): Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges. Springer International Publishing, Cham.
- Vajna, S. (2009): Plant Lifecycle Management - CAE Anwendungen im Anlagenbau. In Chemie Ingenieur Technik No.08, Magdeburg.
- Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2014): Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau. McKinsey&Company, Frankfurt/Main.
- Zingel, C. (2013): Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. Dissertation, Karlsruhe.

## **Kontakt**

Florian Seiler, M. Sc.

Lea-Nadine Schwede, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

Technische Universität Hamburg

Lehrstuhl für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Denickestr. 17

D-21073 Hamburg

<https://www.tuhh.de/pkt>