

# Simulation modularer Produktarchitekturen durch modellbasierte Konfiguration

Florian M. Dambietz, Dieter Krause

*Im Zuge der Globalisierung sehen sich produzierende Unternehmen mit einem kontinuierlich anwachsenden Wettbewerbsdruck konfrontiert. Aufgrund dessen sehen sich viele Marktakteure zu einer intensivierten Spezialisierung gezwungen, um auf kunden-individuelle Anforderungen eingehen zu können. Einen möglichen Lösungsansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung bietet der Ansatz der Modularisierung. Hier wird allerdings nicht konkret ein Baukasten definiert, vielmehr werden verschiedene Alternativen generiert. Die Entscheidung, welcher Baukasten schlussendlich implementiert wird, fällt meist aufgrund einiger weniger Einflussfaktoren sowie maßgeblich durch Expertenentscheidungen. An dieser Stelle setzt der vorliegende Beitrag an. Um ein quantifizierbares und ganzheitliches Kriterium zur Unterstützung der Auswahl modularer Baukastensysteme zu bieten, wird eine multifaktorielle Simulation eingesetzt. Einer der maßgeblichen Aspekte derer ist die beidseitige Inbezugnahme von sowohl Kunden- als auch Unternehmensperspektive. Dies wird v.a. durch die Verwendung eines dynamischen Produktkonfigurationssystems ermöglicht. Um die zugrundeliegenden, teils komplexen Produktarchitekturen datentechnisch konsistent und pflegbar zu halten, wird zusätzlich der Einsatz einer modellbasierten Datenstruktur aufgezeigt. Die Verwendung des Model-Based Systems-Engineering (MBSE) Ansatzes hilft dabei, die vielschichtigen Zusammenhänge des Modulbaukastens in einer konsistenten und maschinenlesbaren Form auszudrücken. Somit kann das Konfigurationssystem produktunabhängig auf die Ontologie der zugrundeliegenden Datenstruktur zugreifen. Für die Baukastensimulation wird dieses Konfigurationssystem rekursiv für mehrere Kundenanfragen und alternative Baukästen eingesetzt, um anschließend mittels eines geometrisch-mathematischen Algorithmus ein multi-dimensionales Entscheidungskriterium hinsichtlich der Baukasten-performance zu generieren.*

*Keywords: Modulare Produktarchitektur, Produktkonfigurator, Simulation, Produktgenerationsentwicklung, Model-Based Systems Engineering*

## Einleitung und Motivation

---

Im Rahmen moderner Megatrends sehen sich produzierende Unternehmen mit einer immer steigenden Individualisierung und somit der Varianteninduktion konfrontiert. Hier bietet das Konzept der modularen Produktarchitekturen eine mögliche und bewährte Lösung (Krause & Gebhardt 2018). Der allgemeine Prozess der Entwicklung von modularen Produktarchitekturen (MPA) und die sich daraus ergebenden Probleme mit den verschiedenen verfügbaren Optionen werden in Abbildung 1 erläutert.

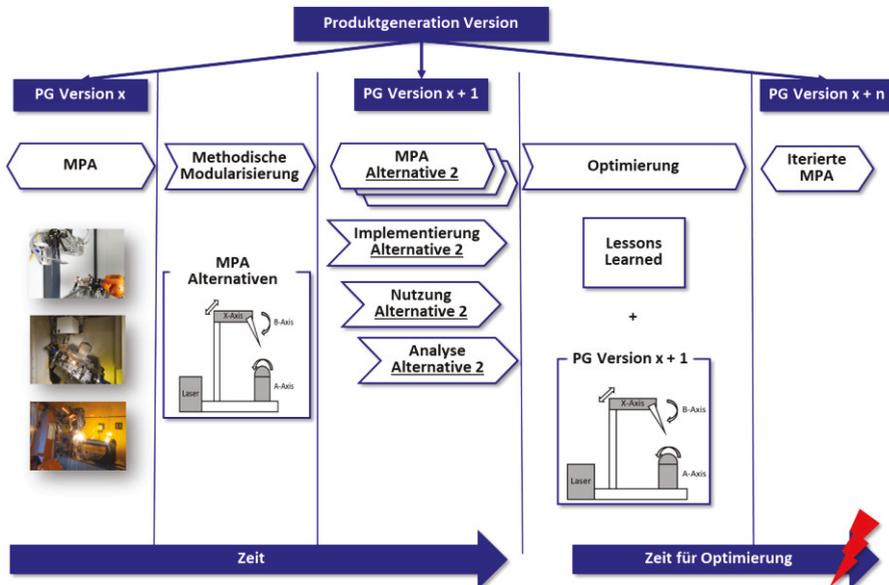


Abbildung 1: Ausgangssituation und Problemstellung der Produktarchitekturalternativen-Auswahl

Ausgehend von einer bestehenden, methodisch unstrukturierten Produktarchitektur wird in einem ersten Schritt eine Modularisierung der Produktarchitektur vorgenommen. Diese Produktarchitektur ist in Abbildung 1 als die Architektur der ursprünglichen Produktgeneration PG x dargestellt. Es können verschiedene methodische Ansätze verwendet werden, die in der einschlägigen Literatur gut beschrieben sind und in den letzten Jahren in Forschung und Praxis gründlich validiert wurden. Da jede Methodik ihre eigenen Vor- und Nachteile hat und oft nicht für eine bestimmte Branche oder Geschäftssituation geeignet ist, können für denselben Fall verschiedene Methoden verwendet werden. Im Allgemeinen ist die angewandte diskrete Methode nicht ausschlaggebend für die Erklärung des Problems der Entscheidungsfindung für Architekturoptionen. Während des Modularisierungsprozesses kann sogar eine einzelne Methode verschiedene alternative Ausgaben erzeugen, je nachdem, welche Gruppe die Methode anwendet. Wenn verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Ausrichtungen, wie z. B. funktionale oder produktstrategische Ausrichtung, verwendet werden, können sich die resultierenden modularen Produktoptionen in hohem Maße unterscheiden.

Sobald der Modularisierungsprozess implementiert ist, besteht die Hauptaufgabe des ausführenden Teams darin, die beste Option aus den vorhandenen Möglichkeiten auszuwählen. Die gewählte Option, von der erwartet wird, dass sie im aktuellen und zukünftigen Geschäftsumfeld am besten funktioniert, muss die Anforderungen sowohl des Unternehmens als auch die seiner Kunden berücksichtigen. Bisher geschah dies in der Regel, indem man der Meinung einzelner Experten folgte, in der Regel auf der Grundlage einer begrenzten Anzahl von Kriterien wie der Anzahl von Modulen, der Anzahl von standardisierten Komponenten oder dem Grad der Gemeinsamkeit, ohne die individuellen Erfahrungen oder die Meinung der Unternehmensleitung zu berücksichtigen. Die schließlich ausgewählte MPA-Option wird dann in die Produkt- und Prozessarchitektur des Unternehmens implementiert. In der obigen Abbildung 1 ist dieses Modell einer zu realisierenden multifunktionalen Fertigungsdienstleistung als Architektur einer sukzessiven Produktgeneration  $PG\ x + 1$  dargestellt.

Diese ersten drei Phasen - die anfängliche Modularisierung, die Auswahl der zu realisierenden endgültigen Produktarchitektur und deren Umsetzung im Allgemeinen - gelten langfristig als sehr ressourcenintensiv und sind zudem durch eine hohe Unsicherheit über die Leistungsfähigkeit des Unternehmens und des Marktes gekennzeichnet. Darüber hinaus ist das Wissen über die Kosten des endgültigen MPA und über eventuell erforderliche neue Prozesse noch sehr begrenzt. Nach der Implementierung der  $PG\ x+1$  MPA wird der nächste Schritt darin bestehen, die neu entwickelte Architektur und den Prozess zu nutzen und zu bewerten. Im Idealfall werden keine Mängel festgestellt, aber es ist sehr wahrscheinlich, dass Änderungen an der Modulstruktur in Bezug auf Standardkomponenten oder Modulabhängigkeiten aufgrund von falsch eingeschätzten Kundenanforderungen oder einer anderen Häufigkeit der Modulverwendung als ursprünglich angenommen vorgenommen werden müssen. Solche Änderungen sind mit zusätzlichem Zeit- und Ressourcenaufwand verbunden und gehören nicht in die frühen Phasen der Produktentwicklung, in denen die Kosten für Änderungen noch gering sind. Da die Änderungen mehrere Jahre nach dem Entwurf der ursprünglichen Architektur vorgenommen werden müssen, sind die Kosten recht hoch. Diese Optimierungsprozesse müssen iterativ mehrmals durchgeführt werden, wobei jedes Mal die neuesten ungelerten Effekte und die neuesten Änderungen an der bestehenden MPA berücksichtigt werden. Nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen wird der implementierte MPA, der in Abbildung 1 als  $PG\ x + n$ -Architektur dargestellt ist, gemäß den anfänglich definierten Anforderungen funktionieren. Da es keine Ideallösung für die Einsatzentscheidung eines MPA und eines Baukastens gibt, müssen

die individuellen Strategien des Unternehmens im Modularisierungsprozess umgesetzt werden. Dies führt zu verschiedenen alternativen Beziehungen zwischen standardisierten und differenzierten Komponenten und Modulen (Seiler et al. 2020)

Kern dieses Beitrags ist die Darstellung der Relevanz eines erweiterten Auswahl- und Bewertungstools zur Sicherstellung der Reduktion dieses initialen Aufwands. Zudem soll v.a. der Stand der Wissenschaft hierzu aufgearbeitet werden.

## **Stand der Wissenschaft**

---

Im Folgenden werden verschiedene bestehende Methoden oder Methodensets zur Bewertung der Leistung von MPAs beschrieben.

### Product Family Platform Selection

Als rein strukturelle Leistungsbewertungsmethode bewertet der von Baylis et al. (Baylis et al., 2018) vorgestellte Ansatz die qualitativen Kompromisse zwischen Modularität und Co-Modularität. Sie ermöglicht die Identifizierung verschiedener Komponentenvariablen entlang einer gegebenen Pareto-Linie. Die Alternativen werden dann auf der Basis ihrer Gemeinsamkeit und Modularität bewertet, was zu den Entscheidungskriterien für die Leistungsanalyse führt.

### Commonality Decisions in Product Family Design

Dieser von (Fellini et al., 2006) vorgestellte strukturelle Bewertungsansatz bestimmt die leistungsfähigste Lösung auf der Grundlage des Leistungsverlustindex, wobei der niedrigste Leistungsverlust die leistungsfähigste verfügbare Lösung bestimmt. Die Basis ist eine mathematisch beschriebene hypothetische optimale Lösung, die aus hypothetischen idealen Anforderungen abgeleitet wird. Abweichungen der tatsächlichen Anforderungen von diesen idealen Anforderungen werden als Kompromisse zwischen alternativen Lösungen betrachtet und erzeugen einen Leistungsverlust. Dieser messbare Wert wird als Entscheidungshilfe-Index verwendet.

### Product Platform Performance (Meyer et al., 1997)

Bei diesem kostenbasierten Ansatz werden Leistungsindikatoren wie Herstellungs- und Vertriebskosten, das Verhältnis der Kosten zu den Preisen der verkauften Produkte, die Zyklus- und Plattformeffizienz sowie das Verhältnis der Entwicklungskosten zum erzielten Umsatz verwendet. All diese Faktoren können aus alternativen Lösungen abgeleitet werden, was zu messbaren, aber nicht zusammenhängenden Entscheidungskriterien führt.

### Balanced Scorecard (Junge, 2005)

Die Balanced Scorecard ist die erste universelle Methode, die sowohl technische und operative Aspekte als auch die Produktstrategie berücksichtigt. Sein Hauptziel ist es, anhand einer Vielzahl von Metriken, wie Entwicklungskosten, Auftragsdurchsatz oder Komplexität, zu überwachen, ob die Modularisierungsbemühungen die vorher festgelegten Ziele erreichen. Diese Kennzahlen werden aus vier Perspektiven analysiert: Produktion, Finanzen, Marketing sowie Vertrieb und Entwicklung.

### Kostenbasierte MPA-Auswahl (Ripperda, 2019)

Diese kostenbasierte Methode besteht aus drei Schritten, den Schritten der Kostenschätzung, einer halbquantitativen Bewertung und der Definition zusätzlicher Methoden zur weiteren Reduzierung der Zusatzkosten, die zur Bestimmung der Kosten der Produktkomplexität verwendet werden. Basierend auf den in diesen drei Schritten ermittelten Werten wird eine kosteninformierte Entscheidung getroffen, welche MPA-Option im Unternehmen implementiert werden soll. Dieser Ansatz wird in der Regel in Unternehmen verwendet, die geringe Mengen, aber sehr unterschiedliche Produkte anbieten.

### Die Komplexität der Variation bei Mass Customization (Blecker, 2007)

Diese Methode zur Leistungsbewertung erweitert den zuvor beschriebenen Ansatz der Produktplattformleistung und soll die Entscheidungsfindung bei der Erwägung eines MPA für die Massen Anpassung unterstützen. Als wesentliche Erweiterung führen die Autoren einen Index für die Anzahl der parallelen Aufgaben ein.

### Produktplattform-Design (Robertson, 1998)

Dieser Ansatz verwendet einen zweidimensionalen Kompromissrahmen, um die Leistung von MPA-Optionen zu bewerten. Diese beiden Dimensionen werden durch technische und strukturelle Maßnahmen auf der einen und produktstrategische Maßnahmen auf der anderen Seite dargestellt. Der Grundgedanke ist, dass die beiden Maßnahmen im Widerspruch zueinanderstehen. Daher beschreibt jedes MPA einen Kompromiss zwischen diesen beiden Maßnahmen, was zu einem binären Vergleich der Optionen führt.

### Kollaborative Entscheidungsfindung bei der Produktfamilienplanung (Windheim, 2019).

Diese Methode bietet Entscheidungshilfe für MPA-Optionen durch die Implementierung eines Entscheidungshilfe-Dashboards. Dieses Dashboard stellt die Analyse des

Entscheidungsproblems, die Sammlung und Aufbereitung der entscheidungsrelevanten Informationen und deren Visualisierung dar. Es ist ein Stakeholder-gesteuerter Ansatz, der eine kollaborative Entscheidungsfindung ermöglicht. Der Hauptnutzen liegt in der Identifikation und Verarbeitung von entscheidungsrelevanten Informationen, was die Transparenz und damit die Kausalität von Entscheidungen erhöht.

#### Extended Product Family Master Plan (PFMP<sup>2</sup>)

Diese umfassende Bewertungsmethode ist eine Erweiterung des Originals von (Harlou et al., 2006) und berücksichtigt sowohl techno-funktionale als auch produktstrategische Aspekte. Da der ursprüngliche PFMP nicht alle Aspekte der relevanten Lebenszyklusstadien berücksichtigt, werden im PFMP<sup>2</sup> weitere Dimensionen wie z. B. Leistungswerte der Lieferkette, Verkaufszahlen oder Konstruktionsrichtlinien miteinbezogen. Das Hauptproblem bei diesem Ansatz ist jedoch die fehlende Verknüpfung zwischen diesen Analysedimensionen, was die Ergebnisse erheblich beeinträchtigt, insbesondere wenn große Datenmengen betrachtet werden.

#### Integrated Approach to Product Family Design (Simpson, 2012).

Dieser Ansatz zielt darauf ab, die fehlende Kombination von Faktoren, die im PFMP erwähnt werden, zu füllen, indem eine Bewertungsmetrik entwickelt wird, die aus einer kombinierten Diversitäts- und Gemeinsamkeitsdimension besteht. Somit kann der Grad der Diversität bzw. der Gemeinsamkeit als Hauptunterscheidungsmerkmal in diesem Ansatz betrachtet werden und bietet einen Ausgangspunkt für die Analyse der funktionalen Bindung von Funktionen an einzelne Module und Komponenten. Die Methode verwendet auch eine hypothetische Ideallösung als Benchmark, die die Identifizierung von Verbesserungselementen innerhalb des zugrunde liegenden MPA ermöglicht.

#### Integrierter PKT-Ansatz (Krause & Gebhardt, 2018).

Der Integrierte PKT-Ansatz besteht aus mehreren Methoden, die zur Bewertung der Leistung eines MPAs verwendet werden können. Durch die Berücksichtigung sowohl der technischen Funktionen als auch der produktstrategischen Aspekte können verschiedene unabhängige Leistungsindizes generiert werden. Beispielsweise kann der Grad der Varietät, der sich aus der Design for Variety-Methode oder der Variety Induced Complexity Costs-Methode ergibt, anhand von semi-quantitativen Daten ermittelt werden. Die Modellierung der Auswirkungen einzelner Aspekte innerhalb eines MPA wird auch durch die Entwicklung eines Wirkungsmodells unterstützt.

# Performancesimulation durch modellbasierte Konfiguration

Die folgende Abbildung 2 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen den beiden Methoden und ihren Ein- und Ausgängen in allgemeiner Form.

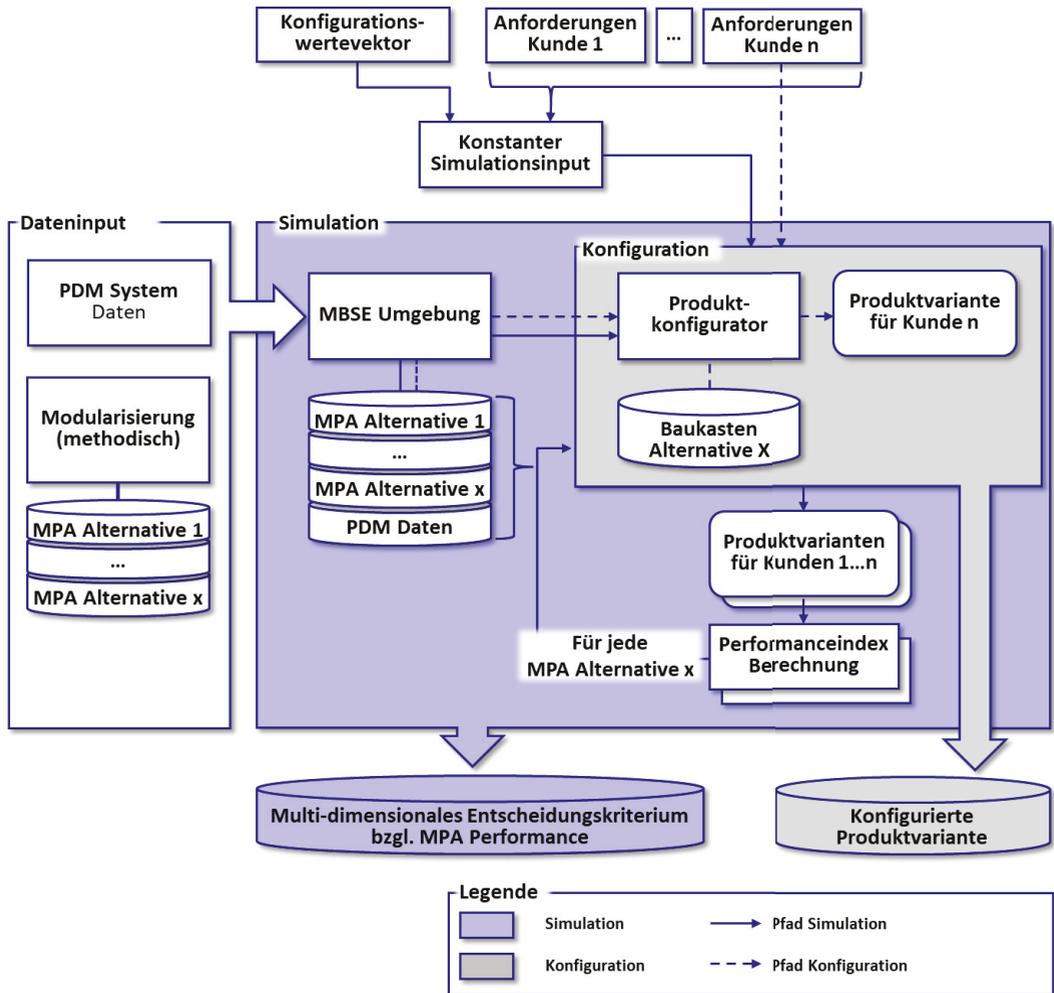


Abbildung 2: schematische Darstellung der konfigurationsbasierten Simulation zur MPA Performancebewertung

Es ist deutlich zu erkennen, dass die MPA-Leistungsanalyse-Simulationsmethode das Konfigurationssystem als methodisches Kernelement der Simulation komplett umschließt

Beide Methoden basieren auf einer modellierten Beschreibung der ursprünglich entwickelten MPAs. Dieser Input, vgl. auch das linke Feld in Abbildung 2, wird in der Regel durch die Anwendung manueller Methoden wie der integrierten PKT-Methode und ihrer workshopbasierten modularen Methoden erzeugt. Darüber hinaus beinhalten diese MPA-Optionen spezifische Datenattribute, die in der Regel in den PDM-Systemen des Unternehmens implementiert sind, wie z. B. separate Artikelnummern, Teilekosten, Fertigungszeit und Auftragsvorlaufzeit. Da diese Daten viele verschiedene Datentypen haben und entsprechend gepflegt und auf ihre Glaubwürdigkeit überprüft werden müssen, ist es sinnvoll, diese einzelnen und nicht zusammenhängenden Daten in eine verknüpfte MPA zu übertragen. Hierfür wird der Ansatz des Model-Based System Engineering angewandt. Weiterführende Erklärungen hierzu sind in (Seiler et al. 2020) zu finden.

Diese MBSE-modellierte MPA-Variante, die in Abbildung 2 - dem linken Kasten der Simulationsmethode - dargestellt ist, dient als Datenbasis für die beiden Methoden. Da das Konfigurationssystem als zentraler Teil von der Simulation vollständig eingebunden ist, wird dieses zuerst erläutert.

Da alle für die Methode des Konfigurationssystems relevanten Pfade in Abbildung 2 mit gestrichelten Linien und Pfeilen dargestellt sind, beginnt der Konfigurationsprozess in Abbildung 2 oben rechts mit den anfänglichen Anforderungen eines einzelnen Kunden. Diese Anforderungen dienen als Input für das Konfigurationssystem und werden genutzt, um geeignete Produktoptionen abzuleiten. In diesem Stadium verwendet das Konfigurationssystem eine bestimmte modellierte MPA-Option als Datenbasis. In diesem Stadium bilden das MPA und die modellierten Randbedingungen das angewandte Modulpaket. Aus diesem Baukasten wird algorithmisch die Produktvariante gemäß den anfänglichen Kundenanforderungen abgeleitet, die auch das Ergebnis des Konfigurationssystems ist, siehe auch Abbildung 2 oben rechts.

Da die Simulation die Leistungsanalyse für MPA-Optionen beschreibt, basiert sie auch auf den durch MBSE modellierten MPA-Optionen.

Die Eingaben für die Simulationsmethode bestehen aus zwei verschiedenen Aspekten, die einen kontinuierlichen Eingabedatensatz bilden. Zum einen bilden mehrere Kundenanforderungen - wie in der rechten oberen Ecke von Abbildung w dargestellt - das erste Eingabeelement. Der zweite Teil besteht aus den Dimensionen, anhand derer die

MPA-Optionen analysiert werden, wie z. B. Varianz, Auftragsdurchlaufzeit oder Kosten. Diese Dimensionen werden in Vektorform durch einen Konfigurationswertvektor (CVV) dargestellt, wie in Abbildung 2, linke obere Leiste, gezeigt. Somit bleiben die Analysedimensionen und der multiple Satz an Kundenanforderungen in allen Simulationsiterationen gleich.

Diese Eingabe wird in die Simulationsmethode übernommen. Diese Methode wendet mehrere iterative Konfigurationsschritte auf der Grundlage verschiedener MPA-Optionen an, indem sie Produktoptionen entsprechend den Kundenanforderungen als Simulationseingabe konfiguriert. Zunächst wird die erste modellierte MPA-Option als Grundlage für die Erstellung des Baukastens des Konfigurationssystems verwendet. Durch Anwendung dieses Baukastens auf die anfänglichen Kundenanforderungen ermittelt das Konfigurationssystem aus dem Eingabedatensatz die Produktoptionen für jeden Kunden, so dass mehrere Kundenanforderungs-Produktoptions-Datensätze auf Basis der ersten MPA-Option entstehen. Durch die Anwendung von CVV-Analysedimensionen auf diese einzelnen Produktoptionen wird die Performance-Index-Berechnung durchgeführt. Die erste Iterationsschleife der Simulation führt also zu einem einzigen Leistungsindex. Der gleiche Prozess wird für jede einzelne MPA-Option durchgeführt, wodurch sich Leistungsindizes für jede einzelne MPA-Option ergeben - siehe auch Abbildung 2 unten rechts (Iterationsschleife). Da diese Indizes auf CVV-Eingabedaten basieren, bilden sie ein mehrdimensionales Entscheidungskriterium, das es dem Modularisierungsteam ermöglicht, eine Entscheidung darüber zu treffen, welche MPA-Alternative unter den ursprünglich entwickelten MPA-Alternativen die beste ist.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

---

Alles in allem wird deutlich, dass ein multi-dimensionales Entscheidungskriterium zur Berücksichtigung der Kunden- und Unternehmensanforderungen bei der Auswahl der geeignetsten MPA Alternative unumgänglich ist. Hierfür bietet die Simulation auf Basis eines Produktkonfigurator die ideale Basis. In Verbindung mit der Datendurchgängigkeit einer MBSE Umgebung können verschiedene Alternativen dynamisch, konsistent und pflegbar mit geringem Ressourcenaufwand durchgespielt werden.

Als Ausblick lässt sich die Integration dieser Simulationsmethodik auf verschiedene andere Bereiche anführen. So kann die Simulation nicht nur im Bereich klassischer Produktarchitekturen angewandt werden, sondern auch für andere Geschäftsmodelle wie z.B. Produkt-Service-Systeme (PSS) angewandt werden. Hierfür gilt es, das Konfigurationsmodul der Simulation dergestalt anzupassen, um die Anforderungen einer PSS-Architektur ebenfalls durch einen Konfigurator abdecken zu können.

## Literaturverzeichnis

---

- Baylis, K.; Zhang, G.; McAdams, D. A. (2018): Product family platform selection using a Pareto front of maximum commonality and strategic modularity, *Research in Engineering Design*, Vol.29 (4), pp. 547-563
- Blecker, T.; Abdelkafi, N. (2007): The Development of a Component Commonality Metric for Mass Customization, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 54 (1)
- Fellini, R.; Kokkolaras, M.; Papalambros, P. (2006): Commonality Decisions in Product Family Design, in: Simpson T.W., Siddique Z., Jiao J. (Eds.): *Product Platform and Product Family Design. Methods and Applications*, Springer, New York, pp. 157-186
- Harlou, U. (2006): Developing product families based on architectures. Contribution to a theory of product families, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Lyngby,
- Junge, M. (2005): Controlling modularer Produktfamilien in der Automobilindustrie, Deutscher Universitäts-Verlag
- Krause, D.; Gebhardt, N. (2018): *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*, Springer, Berlin,
- Meyer, J. A. (1997): *Visualisierung im Management*, Deutscher Universitäts-Verlag
- Ripperda, S. (2019): *Methodische Unterstützung zur kostenbasierten Auswahl modularer Produktstrukturen*, Ph.D. Thesis, *Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*, Vol. 15, Springer Vieweg, Hamburg,
- Robertson, D.; Ulrich, K. (1998): Planning for Product Platforms, *Sloan Management Review*, Vol. 39
- Seiler, F. M.; Kuhl, J.; Krause, D. (2020): *A Simulation-Based Decision Support Method For Modular Product Architecture Alternatives*, (DSM 2020), Cambridge, MA, USA, 2020,
- Simpson, T. W.; Bobuk, A.; Slingerland, L. A.; Brennan, S.; Logan, D.; Reichard, K. (2012): From user requirements to commonality specifications: an integrated approach to product family design, *Research in Engineering Design*, Vol. 23, pp. 141-153
- Windheim, M. (2019): *Cooperative Decision Making in Modular Product Family Design*, Springer Vieweg, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Band 17, Berlin

## Kontakt

---

Dipl.-Wirt.-Ing. Florian M. Dambietz  
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)  
Technische Universität Hamburg (TUHH)  
Denickestraße 17 (L)  
21703 Hamburg