

Product modularization requirements in agile automotive product development

Julian Immanuel Schrof¹, Kristin Paetzold¹

¹ *Institute of Technical Product Development (ITPE),
University of the German Federal Armed Forces Munich, Germany*

Abstract

This study investigates the impact of the product architecture on constraints to agile automotive product development and establishes agile modularization enablers. Derived from basic agile values and principles, a model has been generated to integrate agile development requirements into product modularization. Matching the generated characteristics with published agile constraints of physicality and scale allowed a first indirect validation of the model. This analysis showed an overall constraints limiting effect and therefore proved the connection between product architecture and agile product development. Additionally, the model was conceptually transferred into an adapted modularization method to allow for both technical and organizational drivers in product architecture.

Keywords: Agile, Automotive, Product Architecture, Modularization

1 Einleitung

Interesse und Anwendung agiler Methoden nimmt industriübergreifend beständig zu. Treiber dieser Entwicklung ist eine durch die Digitalisierung getriebene, zunehmend volatilere und unsichere Wirtschaftsumgebung. Das VUCA Akronym [1]–*Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity* umschreibt diese Tendenz durch interne als auch externe Einflussfaktoren und deren zunehmende Dynamik. Entgegen klassischer, plangetriebener Projektmanagementmodelle akzeptieren und integrieren agile Ansätze diese Unsicherheiten [2]. Aufgrund der Produkteigenschaften sowie der Entwicklungsbedingungen hat sich die agile Entwicklungsmethodik in den letzten 20 Jahren zu einem Standard in der Softwareentwicklung durchgesetzt. Obwohl die Entwicklung von Hardware Produkten vergleichbaren Einflussfaktoren ausgesetzt ist, erreichen agile Methoden wie Scrum bei einem direkten Transfer nur einen eingeschränkten Mehrwert [3]. Gerade im Automobilumfeld lässt sich das in der Entwicklung von Software erlebte Potential bisher nicht gleichwertig reproduzieren.

Agile Produktentwicklung definiert sich grundlegend durch Werte, Prinzipien sowie Methoden, die auf Praktiken beruhen, die die Umsetzung der Werte und Prinzipien integrieren und unterstützen [4]. Iterative, inkrementelle Entwicklung, selbstorganisierte und eigenverantwortliche Teams sowie kontinuierliche Kundenintegration sind zentrale Bausteine der Methodik [5]. Der Automobilentwicklungsprozess und die verwendete Produktarchitektur widersprechen diesen Grundbausteinen jedoch in mehrfacher Hinsicht. Weder der Umfang noch die Spezialisierungsbreite oder die Kopplung der Module berücksichtigt die Entwicklung durch unabhängigen Teams in kompakten Entwicklungszyklen. Die Ausprägungen der Reifegradentwicklung der Module entsprechen nicht einer regelmäßigen Kundenintegration. Außerdem reduzieren die fixierte Produktarchitektur sowie die Vergabe großer Umfänge die Flexibilität auf Gesamtproduktebene. Diese Punkte zeigen, dass die Produktarchitektur in der Automobilentwicklung nicht entsprechend der Anforderungen agiler Produktentwicklung strukturiert ist. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, dass bestimmte Restriktionen agiler Produktentwicklung nicht produkt- sondern architekturbedingt sind. Das **Forschungsziel** dieser Studie ist daher die Modellierung alternativer Eigenschaften der Produktarchitektur, die agile Entwicklung befähigen. Daraus ergeben sich folgende **Forschungsfragen**:

Wie werden die Einschränkungen agiler Fahrzeugentwicklung durch die Produktarchitektur beeinflusst? Welche Moduleigenschaften sind dabei relevant? Wie könnte eine alternative Modularisierungsstrategie aussehen?

Trotz der Ansätze agile Methoden in der Automobilentwicklung zu nutzen und der Forschung zu den Vorteilen und Einschränkungen besteht eine **Forschungslücke** inwiefern produktspezifische Einschränkungen durch die Produktarchitektur verstärkt oder sogar bedingt werden. Die **Relevanz für die Industrie** liegt in der Reduktion der Einschränkungen agiler Produktentwicklung, wodurch der reale Mehrwert und die Verwendbarkeit agiler Methoden in der Fahrzeugentwicklung gesteigert werden.

2 Stand der Wissenschaft

Agile Produktentwicklung integriert die real existierende Unsicherheit in Entwicklungsprojekten als Teil der Methodik und reevaluiert die vormalig negative Sichtweise auf Wandel und Planänderungen in Chancen und Wettbewerbsfähigkeit [2]. Dadurch erfolgt eine deutliche Abgrenzung zu klassischen Modellen, die auf der Annahme beruhen, ein sehr umfassendes Bild des Produktes und der Produktentwicklung bereits zu Beginn des Entwicklungsprojektes erstellen zu können, wodurch eine hohe Anfälligkeit für unerwartete Anforderungen und Abweichungen zwischen Plan und Realität entsteht. Agilität dagegen ist die Fähigkeit schnell auf Wandel zu reagieren und sich daran anzupassen. Diese Fähigkeit ist vor allem in komplexen Entwicklungsumfeldern sinnvoll, wo aufgrund von Abhängigkeiten und dynamischen Zusammenhängen keine umfassende Fortschrittsvoraussage und -planung möglich ist [6]. Die Strategie agiler Vorgehensmodelle ist diese Unsicherheit schrittweise durch regelmäßige Inkremente, die neues Wissen erzeugen, zu reduzieren. Dabei fließen gewonnene Erkenntnisse kontinuierlich in die Planung ein, sodass das weitere Vorgehen angepasst werden kann. Im **Manifest für agile Softwareentwicklung** [5] werden die Kernwerte und Grundprinzipien agiler Produktentwicklung zusammengefasst. Diese Basis wird anwendungsfeldabhängig und kontextspezifisch in unterschiedlichen **agilen Methoden** [7] in einfach umsetzbare Praktiken und Vorgehensmodelle umgesetzt. Diese agilen Methoden bieten einen Rahmen, der die Etablierung agiler Entwicklung in der täglichen Entwicklungsarbeit und somit den Systemwandel von klassischen Produktentwicklungsvorgehensmodellen vereinfacht und unterstützt.

Der Transfer der Methodik in die **agile Automobilentwicklung** ist nicht trivial. Die Herangehensweise muss die unterschiedlichen Produktcharakteristika, die sich in Entwicklung, Logistik und Produktion ausprägen [8], aufgreifen und entsprechende Ergänzungen und Lösungen auf Methodik- und Prinzipienebene implementieren. In der Automobilentwicklung wurde bereits gezeigt, dass sowohl Einschränkungen durch die Körperlichkeit des Produkts und die Skalierung des Entwicklungsprozesses bestehen [9]. Die hardwarespezifischen **Einschränkungen der Körperlichkeit** werden durch die zusätzlichen physikalischen Verbindungen zwischen den Komponenten verursacht. *Ovesen* [10]

hat dazu vier Ausprägungscluster im Vergleich zu der Entwicklung von Software definiert: Erstens, die erschwerte Separation des Produkts in Inkremente, die in den Iterationsrhythmus passen. Zweitens, die Aufteilung der Entwicklungsaufgaben vor dem Hintergrund des notwendigen breiten Kompetenzspektrums. Drittens, die Schwierigkeit des Abschätzens von Zeit und Aufwand. Viertens, die fehlende Flexibilität in Produkt und Prozess. Sekitoleko et al. [11] beschreiben welche übergeordneten **Einschränkungen der Skalierung** durch die Verwendung agiler Methoden in konzerntypischen Entwicklungsumgebungen entstehen. Die Entwicklung durch eine Vielzahl agiler paralleler Teams führt demnach zu fünf unterschiedlichen Problembereichen. Erstens, der Planungs- und Koordinationsaufwand insbesondere produktübergreifend und zwischen den Teams. Zweitens, die unübersichtliche Priorisierung der Aufgaben. Drittens, die Verteilung von Erkenntnissen und das projektübergreifende Wissensmanagement. Viertens, die Etablierung einer gleichmäßigen Produktqualität über Teams hinweg. Fünftens, die aufwändigere Integration der Inkremente zu einem Gesamtprodukt. Diese Einschränkungen beruhen auf prozessualen Abhängigkeiten der Komponenten. Da agile Automobilentwicklung sowohl Einschränkungen durch Körperlichkeit als auch Skalierung erfährt, besteht zusätzlich eine gegenseitige Beeinflussung und damit Verstärkung beider Kategorien.

Die **Produktarchitektur** definiert über die Summe der Produkt- und Funktionsstrukturen die Menge der Eigenschaften, Merkmale und Funktionen eines Produktes [12]. Die Produktstruktur wiederum beschreibt die physische, hierarchische Zusammensetzung des Produkts aus Komponenten und deren physikalischen Beziehungen [13]. Äquivalent dazu beschreibt die Funktionsstruktur das Zusammenspiel und die Aufgliederung der wesentlichen Produktfunktionen. In der Automobilindustrie ist die **Modulbauweise** das wesentliche Aufbauprinzip der Produktstruktur. Module definieren sich über intramodulare Kopplung und intermodulare Entkopplung der Komponenten. Diese (Ent-)Kopplung betrifft strukturelle Eigenschaften, den Informationsaustausch, die Materialeigenschaften und den Energieaustausch zwischen Komponenten. Die verbleibenden intermodularen Interaktionen werden in Schnittstellen beschrieben. Diese Schnittstellen definieren die relative Position, den Kraftfluss sowie den Energie- und Informationsaustausch zwischen Modulen. Durch präzise Schnittstellendefinition wird der Koordinations- und Wissensaustauschbedarf aufgrund verbleibender Abhängigkeiten zwischen den Modulen optimiert.

In der **Modularisierung** werden die Anordnungen der Komponenten zu Modulen und die (hierarchischen) Beziehungen sowie die Schnittstellen zwischen den Modulen produktspezifisch definiert. Die gezielte Entwicklung modularer Produktstrukturen erfolgt nach verschiedenen Modultreibern, die unterschiedliche Aspekte des vollständigen Produktlebenszyklus bewerten, sodass

ein Gesamtoptimum der Produktmodularisierung erreicht wird [12]. Die Modularisierung kann sowohl aus technischer als auch funktionaler Perspektive erfolgen. Im Entwicklungsprozess ermöglichen modulare Produktarchitekturen eine unabhängige parallele Bearbeitung einzelner Module, wodurch die Projektkomplexität beispielsweise durch sinkenden Abstimmungsbedarf reduziert wird. Daneben bestehen weitere Potenziale in den anderen Phasen des Produktlebenszyklus. Die Modularisierungen von Produkten erfolgt durch Methoden der Modularisierung anhand ausgewählter Modultreiber [12]. Neben Methoden, die technische oder funktionale Modularisierung anstreben, gibt es auch Ansätze der gemeinsamen Modularisierung von Produkt und Organisation [14], [15]. Dabei werden Produkt und Organisationsstruktur so aneinander angepasst, dass eine ideale Entwicklung der Module ermöglicht wird. Dabei sind die beispielsweise intermodularen Abstimmungen modultreibend, sodass die Prozessaufwände optimiert werden.

3 Modellentwicklung

Bisher besteht im Automobilumfeld ein starker Fokus der Produktarchitektur auf die Produkt- und Funktionsstruktur, wovon die Modularisierung von Funktionen und Komponenten abgeleitet wird. Der Entwicklungsprozess wird dabei nicht gleichwertig berücksichtigt. Göpfert et al. hat einen Ansatz etabliert die Produktentwicklungsorganisation entsprechend der Produktstruktur zu modularisieren und damit gezeigt, dass eine Abbildung des Produkts auf die Organisation ökonomische Vorteile bringt [14]. *Conway's Law* [16] besagt, dass sich die interne Kommunikationsstruktur der Entwicklungsorganisation stets auf die Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts abbildet und belegt damit den Zusammenhang zwischen Struktur- und Organisationsmodularisierung. Um die Einschränkungen agiler Automobilentwicklung zu umgehen, wird die Argumentation von Göpfert in dieser Studie umgekehrt (siehe Bild 1). Dabei wird die Produktstruktur in Form der Modulausprägung so angepasst, dass die Einschränkungen agiler Produktentwicklung minimiert werden. Als Folge dessen wird *Conway's law* mithilfe einer adaptierten Modularisierung durch agile Befähigung als Modultreiber bewusst genutzt und verstärkt.

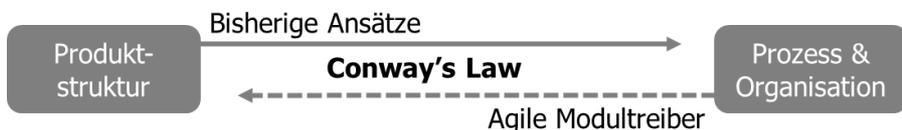


Bild 1: Wirkkreise Produkt und Prozess bezüglich Modularisierung

Grundsätzliches Ziel der Modellentwicklung des Moduleigenschaftstreibers agile Befähigung ist es aktuelle Widersprüche in der Produktentwicklung und der Modularisierung der agilen Automobilentwicklung aufzulösen. Im ersten Teil

werden die Basiswerte agiler Produktentwicklung und daraus resultierende Anforderungen an Moduleigenschaften analysiert. Im zweiten Teil wird eine Integration in bestehende Methoden der Modularisierung diskutiert.

Ein Kernelement agiler Entwicklungsmethoden sind kompakte, selbstorganisierte, eigenverantwortliche, interdisziplinäre **Teams**, die auf gemeinsamer Projektfläche langfristig kollaborieren und Produkte unabhängig entwickeln. Idealerweise bestehen diese Teams aus max. neun Mitarbeitern [5]. Damit Module von einzelnen Teams entwickelt werden können, muss eine Anpassung der Module bezüglich des leistbaren Umfangs stattfinden. Äquivalent muss die Spezialisierungsbreite dem Leistungsvermögen kompakter Teams angepasst werden. Daher müssen bisher umfangreiche Module aufgeteilt und das durch die Multiprojektsituation sehr breite Spezialisierungsspektrum modulspezifisch eingeschränkt werden. Um eine effiziente, selbstbestimmte Arbeitsweise der Teams zu ermöglichen, müssen die Module weitestgehend entkoppelt werden und die verbleibenden Abhängigkeiten durch klar spezifizierte Schnittstellen beschrieben werden, sodass Black- und Whitebox-Bereiche definiert werden.

Um effektiv mit dem Wandel von Anforderungen und mit der bestehenden Unsicherheit im Entwicklungsprozess umgehen zu können, werden in der agilen Produktentwicklung vergleichsweise kurze **iterative Zyklen** verwendet. Das Ziel einer Iteration ist ein kundenrelevantes Produkt, das als **Inkrement** das bestehende Gesamtprodukt ergänzt. Die kompakten Zeitintervalle limitieren das mögliche Ausmaß der Modulumfangs. Ebenso wichtig ist die Entkopplung der Module, um ineffiziente Abhängigkeiten zu reduzieren. Zusätzlich erfordert inkrementelle Entwicklung klar definierte Schnittstellen aufgrund der kontinuierlichen Produktintegration. Dies gilt auch für die Absicherungszyklen, die eine hohe Schnittstellenkompatibilität als auch Automatisierung erfordern, um in den kurzen Zyklen agiler Produktentwicklung zu funktionieren. Sowohl die Integration als auch die Absicherung der weitestgehend unabhängig voneinander zu entwickelnden Module erfordern neben standardisierten Schnittstellen zusätzlich ein **Reifegradsystem der Module**. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass die nun unabhängigeren Module im Verlauf der iterativen Entwicklung die Umsetzung der Schnittstellenentwicklung gewährleisten und somit die fortschreitende Produktreife von Modul- auch auf Gesamtproduktlevel übertragen und verifiziert werden kann. Kontinuierlichere **Kundenvvalidierung** des Entwicklungsfortschritts, um die Marktrelevanz der Entwicklungsinkremente zu gewährleisten, ist ein weiterer zentraler Wert agiler Produktentwicklung. Damit die Inkremente validiert werden können, sollte neben einer (kunden-) funktionalen Ausprägung der Modulstruktur auch ein kundenerlebbarer Reifegradverlauf angestrebt werden.

Der verbesserte Umgang mit **Wandel und Unsicherheit** ist prägend für agile Entwicklung. Durch die Entkopplung der Module und die Reduktion des

Modulumfangs wird die intramodulare Flexibilität der Teams erhöht. Damit kann Wandel in diesem Rahmen effektiv begegnet werden. Da eine höhere Anzahl an Modulen und eine Standardisierung der Schnittstellen die intermodulare Flexibilität reduzieren würde, muss die Systematik der Modularisierung eine dynamische Reorganisation der Module im Verlauf des Entwicklungsprozesses erlauben, um auf äußeren Wandel und interne Impulse auf Systemebene reagieren zu können. Dies beinhaltet die Reduktion und Erweiterung von Modulen aber auch die Anpassung der Schnittstellenstandards. So müssen sich Module dynamisch aufteilen (kombinieren), falls aufgrund neuer Erkenntnisse im Entwicklungsprozess der Modulumfang die Leistbarkeit eines Teams überfordert (unterfordert). Ebenso entstehen oder entfallen aufgrund inhaltlicher Neubewertungen dynamisch Schnittstellen. Wichtig bei diesen Anpassungen ist die gemeinsame Modulstruktursystematik, sodass neue Module oder Schnittstellen dem bestehenden Integrations- und Koordinationssystem entsprechen.

In Summe entstehen durch die agilen Kernwerte folgende Anforderungen an die **Moduleigenschaften**. Aufgrund des Fokus auf kompakte Teams und kurzer, iterativer Zyklen ist der Modulumfang begrenzt. Auch die erforderliche Spezialisierungsbreite wird dadurch eingeschränkt. Wegen der angestrebten Unabhängigkeit der Teams sind eine stärkere Entkopplung der Module und eine Standardisierung der verbleibenden Schnittstellen notwendig, um die Koordination zwischen den Teams zu reduzieren. Weiterhin ist ein gemeinsames Reifegradmodell abgestimmt auf die Schnittstellen notwendig, sodass die kürzeren Integrationszyklen umsetzbar werden. Die Reifegradausprägung berücksichtigt zudem kundenerlebbare Eigenschaften, sodass eine kontinuierliche Kundenvolidierung funktioniert. Zuletzt muss die Modulstrukturierungssystematik dynamische Adaptionen der Modularisierung im Verlauf der Produktentwicklung ermöglichen, um mit Unsicherheit und Wandel auf inter- und intramodularer Ebene umzugehen.

3.1 Modellumsetzung

Entsprechend des breiten Spektrums an Produktstrukturierungsstrategien gibt es in der Literatur diverse Methoden, um diese umzusetzen. Krause et al. stellt eine Auswahl dieser Methoden anhand unterschiedlicher Modularisierungsstrategien vor [12]. Relevant für die Modularisierung nach Entwicklungsorganisatorischen Modultreibern sind die *Integration Analysis Methodology* nach Pimmiller et al. [15] und die *Methodische Unterstützung der Systembildung* nach Göpfert [14]. Im folgenden Abschnitt werden die Methoden kurz skizziert und eine mögliche Integration der Moduleigenschaften *agile Entwicklung* diskutiert.

Die *Integration Analysis Methodology* bewertet die Kopplungen zwischen Komponenten eines Produktes und entwickelt daraus Modularisierungskonzepte, die auch die Aufteilung der Module auf Entwicklungsteams beinhalten. Die bewerteten Verbindungen der Komponenten sind räumliche Anordnung,

Energie, Information und Material. Sie werden mithilfe der *Design Structure Matrix (DSM)* [17] bewertet und dokumentiert. Dabei werden paarweise alle Elemente bezüglich ihrer Verbindung untersucht und die Verbindungskategorien auf einer Skala von -2 (negative Beziehung) über 0 (indifferent) bis +2 (positive Beziehung) bewertet, sodass vier unabhängige Einträge pro Komponentenpaar entstehen. Mithilfe der vollständigen Matrix werden anhand der gewichteten Bewertungen die zu entkoppelnden Module identifiziert und auf Entwicklungsteams aufgeteilt. Die *Methodische Unterstützung der Systembildung* nach Göpfert strebt eine gemeinsame Modularisierung von Produkt und Organisationsstruktur an. Dabei impliziert die technische Modularisierung funktionale und physische Unabhängigkeit. Die organisatorische Modularisierung beruht auf abgeschlossenen Arbeitspaketen, die unabhängige Bearbeitung ermöglichen und somit die Entwicklungskomplexität reduzieren. Organisatorische und technische Modularisierung beeinflussen sich gegenseitig, da beispielsweise die technischen Schnittstellen Koordinationsschnittstellen auf organisatorischer Seite bedingen. Der Ablauf der Methode ist in fünf Schritte gegliedert: Erstens, Definition der Prämissen (Anforderungen, Schnittstellen, Organisationsgestaltung). Zweitens, Bildung technischer Modularisierungsalternativen. Drittes, Bewertung und Auswahl einer technischen Alternative. Viertes, Bildung organisatorischer Modularisierungsalternativen anhand der ausgewählten technischen Modularisierung. Fünftens, Bewertung und Auswahl der Gesamtlösung. Göpfert priorisiert somit die technische vor der organisatorischen Modularisierung durch die Rangfolge der Schritte.

Für die Umsetzung der agilen Moduleigenschaften wird eine ergänzte Kombination der beiden Methoden vorgeschlagen. Die Methodenstrukturierung folgt der Verknüpfung von Organisations- und Produktmodularisierung nach Göpfert, wobei die Verbindungsbewertung der Elemente mithilfe der *Design Structure Matrix* durchgeführt wird. Die Bewertungskategorien der *DSM* werden um die Verbindung *agile Entwicklung* erweitert. In diese Kategorie fließen die Bewertungsaspekte agiler Modularisierung die oben entwickelt wurden. Damit werden die Verbindungen der Komponenten bewertet, die einer agilen Produktentwicklung widersprechen oder diese ermöglichen. Da die agile Entwicklung nur eine Kategorie neben den vier ursprünglichen Bewertungskategorien ist, ergibt sich zudem die Möglichkeit anhand der spezifischen Rahmenbedingungen die Kategorien zu gewichten.

Die Reihenfolge sowie die Inhalte der fünf Grundschritte nach Göpfert werden als Rahmenwerk für die *DSM* angepasst. Dazu wird von einer agilen Grundstruktur der Entwicklungsorganisation ausgegangen, sodass Aspekte der Struktur- und die Aufbausystematik der Organisation bereits vor der technischen Modularisierung vorgegeben werden. Dadurch teilt sich der ursprüngliche Schritt vier auf und wird teilweise vor Schritt zwei gezogen. Damit wird die

technische Modularisierung vorgeprägt und bestimmte Moduleigenschaften unabhängig von Funktion und Technik bereits vordefiniert. Daraufhin folgt die eigentliche technische Modularisierung in Schritt drei und die konkrete Umsetzung der Organisationsmodularisierung auf der bereits gegebenen Grundstruktur in Schritt vier. Die ursprüngliche Reihenfolge, in der die organisatorische Modularisierung der technischen Modularisierung folgt, wird somit aufgelöst.

4 Diskussion

Die Relevanz und der Mehrwert der modellierten Moduleigenschaften werden im folgenden Abschnitt anhand der bestehenden Einschränkungen agiler Fahrzeugentwicklung bewertet. Dies erlaubt es die hergeleiteten Modelleigenschaften anhand empirischer und kontextspezifischer Erkenntnisse aus der Literatur zu validieren und einen Umkehrschluss von der ursprünglichen Motivation der Produktarchitektur auf die Validierung zu vermeiden.

Tabelle 1: Einfluss der Modelleigenschaften (Spalten) auf die Einschränkungen der Körperlichkeit und der Skalierung (Zeilen) agiler Entwicklung

<i>Anforderungen an Moduleigenschaften durch agile Produktentwicklung</i>		Reduktion Modulumfang	Reduktion Spezialisierung	Zunehmende Entkopplung	Schnittstellen Standardisierung	Reifegradmodell	Dynamische Modulstruktur
<i>Einschränkungen der Körperlichkeit</i>	Produktaufteilung	pos.	pos.	pos.		pos.	neg.
	Aufgabenverteilung	pos.	pos.	pos.		pos.	neg.
	Aufwandsschätzung	pos.	pos.	pos.		pos.	neg.
	Fehlende Flexibilität		pos.	pos.	pos.	neg.	pos.
<i>Einschränkungen der Skalierung</i>	Projektplanung			pos.	pos.	pos.	pos.
	Priorisierung	neg.		pos.	pos.	pos.	neg.
	Wissensmanagement	neg.	neg.	neg.	pos.	pos.	pos.
	(Teil-)Produktqualität		neg.		pos.	pos.	pos.
	Produktintegration	neg.		neg.	pos.	pos.	neg.

Bezüglich der Einschränkungen der Körperlichkeit zeigt sich ein deutlicher Mehrwert durch die vorgestellten Moduleigenschaften (siehe Tabelle 1). So profitieren die schwierigere Aufteilung des Produkts in auslieferbare Inkremente,

die Verteilung der Entwicklungsaufgaben bezüglich der Spezialisierungen und damit die Einschätzung von Ressourcen und Aufwänden von den reduzierten Modulumfangen, der eingeschränkten Spezialisierungsbreite, der stärkeren Entkopplung, sowie der Standardisierung der Schnittstellen. Das Reifegradkonzept erleichtert prinzipiell die Aufteilung der Entwicklungsaufgaben, die Priorisierung sowie die Aufwandsschätzung. Jedoch wird die Flexibilität in Produkt und Prozess durch die engeren Vorgaben reduziert. Obwohl die erhöhte Anzahl der Schnittstellen prinzipiell die Flexibilität einschränkt, erzeugt die Standardisierung der Schnittstellen wiederum einen Flexibilitätsgewinn. Der Effekt der dynamischen Modulstruktur auf die Einschränkungen der Körperlichkeit muss differenziert betrachtet werden. Einerseits wird eine Flexibilität auf Gesamtproduktebene erzeugt, andererseits werden durch die eigentliche Reorganisation der Produktstruktur auf Modulebene die übrigen Einschränkungskategorien verstärkt. Nach der Reorganisation greifen zeitnah wiederum die Vorteile der übrigen Modelleigenschaften. Daher ist es entscheidend wie oft die Anpassungen stattfinden. In dynamischen Umgebungen muss der Mehrwert der adaptiven Modulstruktur in der Effektivität auf Gesamtproduktebene liegen. In weniger dynamischen Umgebungen muss der Mehrwert in der Effizienz auf Modulebene liegen.

Hinsichtlich der Einschränkungen durch Skalierung ergibt sich eine ähnlich positive Gesamtbewertung der Modelleigenschaften (siehe Tabelle 1). Die Gesamtprojektkoordination und –priorisierung, der modulübergreifende Produktqualitätsstandard, die Produktintegration und das Wissensmanagement profitieren durchgehend von dem Reifegradmodell und den standardisierten Schnittstellen. Die Entkopplung der Module und die Reduktion des Modulumfangs und der Spezialisierungsbreite befähigen zwar unabhängigere Teams, der intermodulare Wissensaustausch wird jedoch durch die striktere Trennung der Module erschwert. Die standardisierten Schnittstellen hingegen kanalisieren und verteilen Wissen im Entwicklungsprozess und erzeugen daher einen gegensätzlichen Effekt. Die Gesamtproduktintegration profitiert einerseits von der Kombination aus standardisierten Schnittstellen und den Reifegradvorgaben, sodass zu Synchronisationspunkten die Module aufgrund der Vorgaben des Reifegradmodells die richtigen Schnittstellen bedienen. Andererseits entsteht ein negativer Einfluss auf die Gesamtproduktintegration durch die höhere Modulanzahl und die dynamische Modulstruktur. So erzwingen dynamische Änderungen der Modularisierung stets Adaptionen des Integrationssystems. Obwohl die Qualität der Produktinkremente durch das Reifegradmodell, die standardisierten Schnittstellen und die Entkopplung der Module profitiert, besteht durch die Reduzierung der Spezialisierungsbreite die Gefahr qualitätsrelevanten Input einzuschränken.

Insgesamt zeigt sich ein überwiegend positiver Einfluss der erarbeiteten Modelleigenschaften auf die Einschränkungen agiler Produktentwicklung. Die beschriebenen Korrelationen sind bisher jedoch nicht gewichtet, daher lässt sich nicht direkt ableiten, wie genau sich der übergreifende Effekt der Modelleigenschaften ausprägt. Vielmehr werden grundsätzliche Zusammenhänge dargestellt. Weiterhin muss der oben detailliert beschriebene positive Effekt auf die Einschränkungen agiler Fahrzeugentwicklung in Relation zu den Aufwänden der Modularisierungsstrategie betrachtet werden. Diese Studie bewertet weder den gesamten Lebenszyklus, noch die Implikationen für die technische und funktionale Modularisierung. Da deren möglicher Gestaltungsraum durch die agilen Moduleigenschaften eingeschränkt wird, muss davon ausgegangen werden, dass eine Abweichung von deren optimaler Aufteilung erfolgt. Die entscheidende Frage ist, ob der Mehrwert einer agilen Entwicklung in dynamischen Marktumgebungen dies überkompensiert. Weiterhin steht eine empirische Validierung der Effekte der Moduleigenschaften ebenso wie eine praktische Umsetzung der Methodenadaptation aus.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurde untersucht, ob und wie die Einschränkungen agiler Fahrzeugentwicklung von der zugrundeliegenden Produktarchitektur beeinflusst werden. Dazu wurde anhand der Kernwerte agiler Produktentwicklung ein Moduleigenschaftsmodell erstellt, das agile Entwicklung als Modultreiber in der Produktarchitektur berücksichtigt. Dabei wurden Kriterien ermittelt, die die agile Erarbeitung der Module und des Gesamtprodukts erleichtern. Dieses Modell hat in einer ersten indirekten Validierung anhand veröffentlichter Einschränkungen durch Körperlichkeit und Skalierung trotz einzelner Verstärkungen der Einschränkungen insgesamt einen deutlichen Mehrwert gezeigt. Die Ergebnisse erlauben daher die Schlussfolgerung, dass die Einschränkungen agiler Fahrzeugentwicklung durch die Produktarchitektur beeinflusst werden.

Zusätzlich wurde konzeptionell untersucht, inwiefern die definierten Moduleigenschaften in Modularisierungsstrategien und entsprechende Methoden integriert werden könnten. Dazu wurden bestehende Modularisierungskonzepte, die eine Kopplung zwischen produktspezifischer und organisatorischer Modularisierung bereits berücksichtigen kombiniert und adaptiert. Eine algorithmische Umsetzung sowie eine empirische Validierung wurden nicht durchgeführt.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus der fehlenden direkten empirischen Validierung der Modelleigenschaften, einer genauen Spezifikation der methodischen Umsetzung sowie der Einbettung in bestehende Modularisierungsstrategien in der Automobilentwicklung. So muss der Einfluss auf die angrenzenden Produktlebenszyklusabschnitte bewertet werden, da bisher lediglich die Produktentwicklung betrachtet wurde.

6 Quellenverzeichnis

- [1] N. Bennett and G. J. Lemoine, "What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world," *Bus. Horiz.*, p. 8, 2015.
- [2] A. Böhmer, A. Beckmann, and U. Lindemann, "Open Innovation Ecosystem - Makerspaces within an Agile Innovation Process," *ISPIM Innov. Summit*, no. December, 2015.
- [3] T. S. Schmidt, A. Atzberger, C. Gerling, J. Schrof, S. Weiss, and K. Paetzold, "Agile Development of Physical Products: An Empirical Study about Potentials, Transition and Applicability," Munich, 2019.
- [4] K. Conboy, "Agility from First Principles: Reconstructing the Concept of Agility in Information Systems Development Agility from First Principles: Reconstructing the Concept of Agility in Information Systems Development," *Inf. Syst. Res.*, vol. 20(3), no. August 2018, pp. 329–354, 2009.
- [5] K. Beck and M. Beedle, "Manifesto for Agile Software Development," 2001. [Online]. Available: <http://agilemanifesto.org/history.html>.
- [6] E. Stelzmann, "Contextualizing Agile Systems Engineering," no. May, pp. 17–22, 2012.
- [7] A. P. Abrahamsson, O. Salo, and J. Ronkainen, "Agile Software Development Methods: Review and Analysis," *VTT Publ.*, 2002.
- [8] Cprime, "Agile Processes for Hardware Development," *Web*, p. 66, 2015.
- [9] J. I. Schrof, A. Atzberger, K. Paetzold, and P. Efthymios, "Potential of Technological Enablement for Agile Automotive Product Development," in *ICE 2019: 24th International Conference on Engineering, Technology and Innovation*, 2019, pp. 1–8.
- [10] N. Ovesen, "The Challenges of Becoming Agile: Implementing and Conducting SCRUM in Integrated Product Development," p. 200, 2012.
- [11] N. Sekitoleko, F. Evbota, E. Knauss, A. Sandberg, M. Chaudron, and H. H. Olsson, "Technical Dependency in Large-Scale Agile Software Development," *Int. Conf. Agil. Softw. Dev.*, pp. 46–61, 2014.
- [12] D. Krause and N. Gebhardt, *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [13] G. Pahl and W. Beitz, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, 8. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [14] J. Göpfert and M. Steinbrecher, "Modulare Produktentwicklung leistet mehr," *Harv. Bus. Rev.*, vol. 3, no. 089, pp. 1–17, 2000.
- [15] T. U. Pimpler and S. D. Eppinger, "Integration Analysis of Product Decompositions," in *ASME Design Theory and Methodology Conference*, 1994, no. September 1994.
- [16] M. E. Conway, "How do committees invent," *Datamation*, vol. 14, no. 4, pp. 28–31, 1968.
- [17] D. V. Steward, "Design Structure System: a Method for Managing the Design of Complex Systems.," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. EM-28, no. 3, pp. 71–74, 1981.