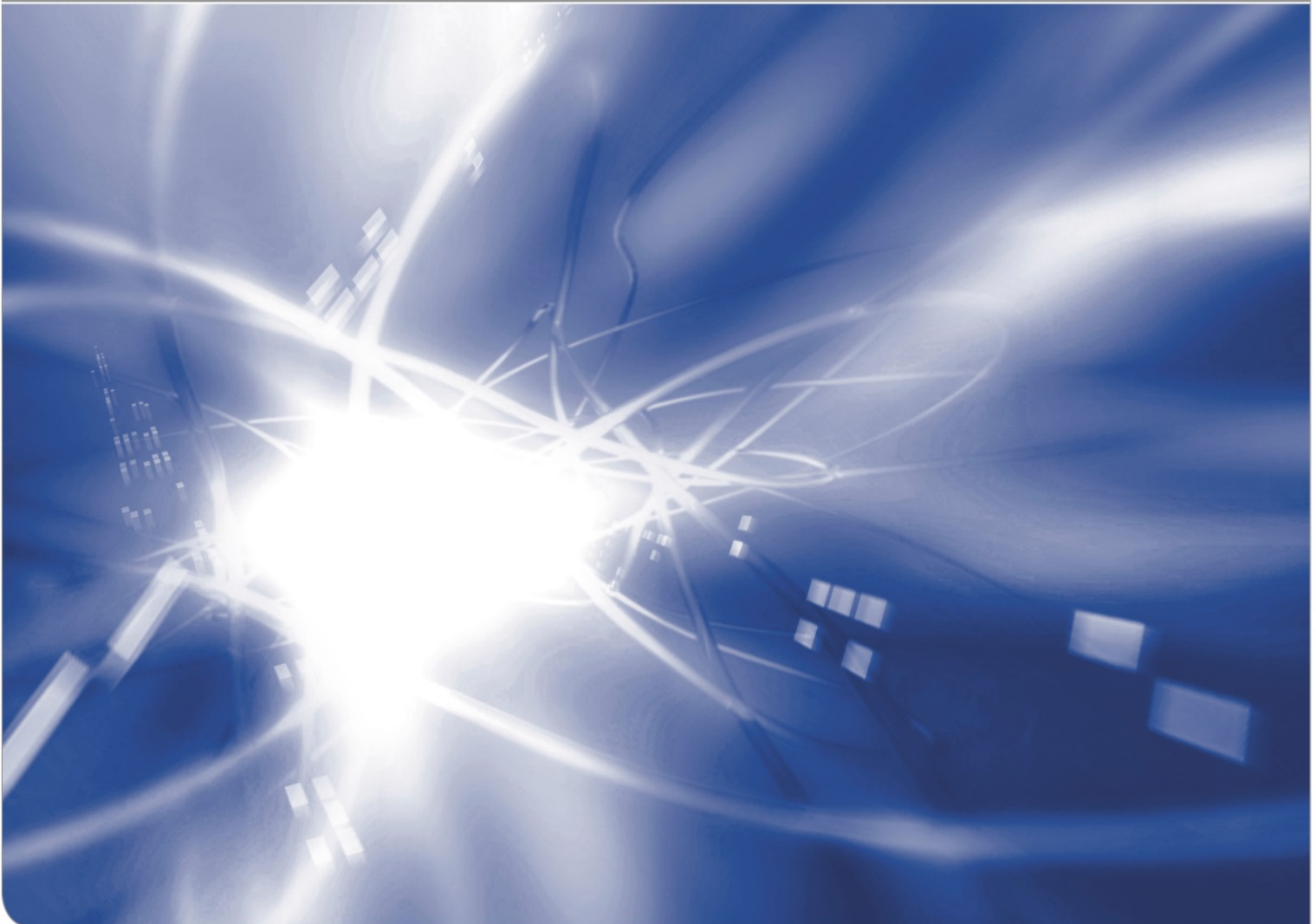


# **Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD - Agile Systems Design**

Albert Albers, Jonas Heimicke, Markus Spadinger, Nicolas Reiß,  
Jan Breitschuh, Thilo Richter, Nikola Bursac, Florian Marthaler

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 113



## **IPEK – Institut für Produktentwicklung**

Kaiserstr. 10, Geb. 10.23  
76131 Karlsruhe

[www.ipek.kit.edu/](http://www.ipek.kit.edu/)

## **Impressum**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
[www.kit.edu](http://www.kit.edu)



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung –  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2019

ISSN: 2194-1629

## **Abstract**

*The process of product development is a problem-solving process characterized by the continuous handling of uncertainties by development teams. For this reason, companies in the field of mechatronic system development implement agile approaches in their development processes in order to deal adequately with these uncertainties, which, however, reach their limitations in individual areas due to different characteristics of physical products. In addition, the development processes contain problems that are of a complicated or simple nature and can therefore be sufficiently planned and solved by plan-driven procedures. For this reason, in the present contribution principles from the literature are derived that support developers in their activities in mechatronic system development. In addition, a model is presented that allows developers to assess the planning stability of individual process elements at different process levels and thereby implement a situation- and demand-oriented degree of agile process elements into the development process.*

### **Keywords:**

Agile product development, ASD - Agile Systems Design, dealing with uncertainties and complexity, mechatronics systems development

Der Prozess der Produktentstehung ist ein Problemlösungsprozess, der durch den kontinuierlichen Umgang von Entwicklerteams mit Unsicherheiten gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund implementieren Unternehmen im Bereich der Mechatroniksystementwicklung agile Ansätze in ihre Entwicklungsprozesse, um mit diesen Unsicherheiten adäquat umzugehen, die jedoch aufgrund unterschiedlicher Charakteristika von physischen Produkten in einzelnen Bereichen an ihre Grenzen stoßen. Zudem existieren innerhalb der Entwicklungsprozesse Problemstellungen, die von komplizierter oder einfacher Natur sind und demnach ausreichend planbar sind und durch plangesteuerte Vorgehensweisen lösbar sind. Aus diesem Grund werden im Vorliegenden Beitrag Prinzipien aus der Literatur hergeleitet, die Entwickler in ihrem Handeln in der Mechatroniksystementwicklung unterstützen. Zudem wird ein Modell vorgestellt, das es Entwicklern erlaubt, die Planungsstabilität einzelner Prozesselemente auf unterschiedlichen Prozessebenen einzuschätzen und hierdurch ein situations- und bedarfsgerechtes Maß an agilen Prozesselementen in den Entwicklungsprozess zu implementieren.

### **Keywords:**

Agile Produktentwicklung, ASD – Agile Systems Design, Umgang mit Unsicherheiten und Komplexität, Mechatroniksystementwicklung

# 1 Motivation

Produktentstehungsprozesse sind seit jeher von Unsicherheiten gekennzeichnet, die eine robuste und langfristige Planung erschweren (Thomke und Reinertsen 1998). Als Unsicherheit wird die Unfähigkeit verstanden, zukünftige Ergebnisse und Ereignisse aufgrund einer Differenz zwischen der erforderlichen Informationsmenge und der tatsächlich vorliegenden Informationsmenge vorherzusagen (Olausson und Berggren 2010). Jedoch ermöglicht eine flexible Ausrichtung von Entwicklerteams eine erhöhte Reaktionsfähigkeit auf unvorhergesehene Ereignisse (Rebentisch et al. 2018). Mit dem Ziel der Flexibilisierung von Entwicklungsvorhaben implementieren Unternehmen zunehmend agile Ansätze, um der mangelnden Reaktionsfähigkeit von plangesteuerten Entwicklungsansätzen entgegenzuwirken. Agile Ansätze haben ihren Ursprung jedoch meist in der Softwareentwicklung und stoßen aufgrund der Herausforderungen im Kontext mechatronischer Systeme in verschiedenen Bereichen an ihre Grenzen. (Schmidt et al. 2017) Insbesondere bei der Lösung komplexer Problemstellungen, die durch unklare Ursache-Wirkungszusammenhänge der involvierten Elemente gekennzeichnet sind, sind jedoch die Stärken flexibler Vorgehensweisen bereits bekannt. Da jedoch in Entwicklungsprozessen nicht ausschließlich komplexe Problemstellungen auftreten, stellt sich die Frage, ob ein rein agiles Vorgehen im Entwicklungsprozess zweckmäßig hinsichtlich der Effektivität und Effizienz von Entwicklerteams ist. (Snowden und Boone 2007) Unabhängig davon, ob Entwickler nach einem agil oder plangesteuert orientierten Vorgehen entwickeln, sind sie durch ihre Synthese- und Analyseaktivitäten für die Gestaltung des Produkts und damit für den späteren Produkterfolg maßgeblich verantwortlich (Albers et al. 2011). Bereits im Jahr 1852 stellte Ferdinand Redtenbacher hierzu fest, dass der Ingenieur nicht nur Wissenschaft und Handwerkskunst verknüpft, sondern vielmehr die Rolle des kreativen Erfinders einnimmt (Redtenbacher 1852). Dies bedeutet im dynamischen Entwicklungskontext, dass Entwickler bei der Wahl der geeigneten Vorgehensweise (agil, hybrid oder sequenziell) flexibel, situations- und bedarfsgerecht unterstützt werden müssen, um den jeweiligen, aus der Situationskomplexität resultierenden Anforderungen an die Durchführung ihrer Aktivitäten gerecht zu werden. Eine Systematik, die Entwicklerteams bei diesen Aktivitäten unterstützt, wird im vorliegenden Beitrag vorgestellt.

## 2 Stand der Forschung

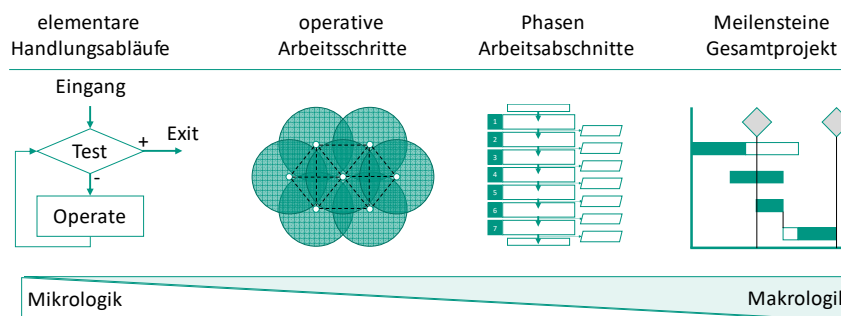
### 2.1 Innovation - die Grundlage des wirtschaftlichen Erfolgs

Innovationen bilden nach Schumpeter (1912) die Grundlage unternehmerischen Erfolgs und grenzen sich von Inventionen durch ihre wirtschaftliche Bedeutung ab (Schumpeter 1912, S. 479). Damit eine Invention am Markt erfolgreich sein kann, muss sie eine Bedarfssituation befriedigen und durch geeignete Aktivitäten des Marketings in den Markt eingeführt werden (Albers et al. 2018). Insbesondere die Identifikation potentieller zukünftiger Kunden- und Anwenderbedarfe, die durch das spätere Produkt befriedigt werden sollen, stellt jedoch kein triviales Unterfangen dar (Chong und Chen 2010). Bereits 1987 definierte Cooper die klare Identifikation von Kundenanforderungen und -wünschen zu Beginn eines Entwicklungsvorhabens als den wichtigsten Faktor hinsichtlich der finanziellen Leistung des späteren Produkts (Cooper und Kleinschmidt 1987). Aus diesem Grund ist eine hohe Kundenintegration in die Produktentstehungsprozesse ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Identifikation einer relevanten Bedarfssituation am Markt (Fadhil Dulaimi 2005). Die Befriedigung von Kundenbedürfnissen durch das spätere Produkt sowie die Absicherung der durch den Kunden empfundenen Produktqualität und des Produktwerts muss kontinuierlich im Produktentstehungsprozess sichergestellt werden (Huber et al. 2007). Zu diesem Zweck eignet sich eine inkrementelle Entwicklung von Produkten. Demnach werden bereits früh im Produktentstehungsprozess Prototypen, die bereits bestimmte Funktionalitäten realisieren, generiert und iterativ erweitert um diese kontinuierlich aus Kunden- und Anwendersicht zu validieren (Heimicke et al., 2018). Hierdurch soll die Befriedigung der jeweiligen Anforderungen durch das spätere Produkt sichergestellt werden. (Tahera et al. 2018) Ein Element im Produktentstehungsprozess, das zum einen die Modellierung von Kunden-, Anwender- und Anbieterbedarfen und

zum anderen die Repräsentation dieser Sichtweisen bei Validierungsaktivitäten unterstützt, ist das Produktprofil. Dieses stellt ein Modell eines Nutzenbündels dar, „das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt“ und hierdurch zur gezielten Validierung beiträgt (Albers et al. 2018).

## 2.2 Modellierung von Produktentstehungsprozessen

Die Produktentstehung beschreibt die Übersetzung von Bedarfen in technische und kommerzielle Lösungen. Dabei ist jeder Produktentstehungsprozess einzigartig, wobei jedoch alle Prozesse ähnliche und wiederkehrende Elemente aufweisen. (Smith und Morrow 1999) Basierend auf diesem Verständnis wurden verschiedene Prozessmodelle mit unterschiedlichen Zwecken generiert, um Produktentwickler bei der Transformation von Bedarfen in Lösungen zu unterstützen (Wynn und Clarkson 2018). Unter dem Verständnis, dass ein Bedarf sich aus einem unbefriedigenden IST-Zustand ergibt, lässt sich der Produktentstehungsprozess als Problemlösungsprozess verstehen (Albers et al. 2016). Dabei wird dieser unerwünschte Ausgangszustand in einen erwünschten Endzustand (die Lösung), SOLL-Zustand genannt, transformiert, wobei der Weg (Prozess) zwischen diesen beiden Zuständen unklar ist (Dörner 1979). Diese Transformation lässt sich im Prozess der Produktentstehung auf unterschiedlichen Prozessebenen identifizieren (siehe Bild 1). So lassen sich beispielsweise elementare Denk- und Handlungsabläufe als Zyklen von kurzen Synthese- und Analyseabläufen auf der Mikroprozessebene identifizieren, inhaltlich zusammenfassen und als operative Arbeitsschritte oder Aktivitäten beschreiben, die wiederum in größere Arbeitsabschnitte (Phasen) eingegliedert werden können. (Lindemann 2009, 38f.) Dies erlaubt beispielsweise eine Kombination von Entwicklungs- und Wissensmanagementmethoden auf verschiedenen Prozessebenen und aus unterschiedlichen Sichten (Laukemann et al. 2017).



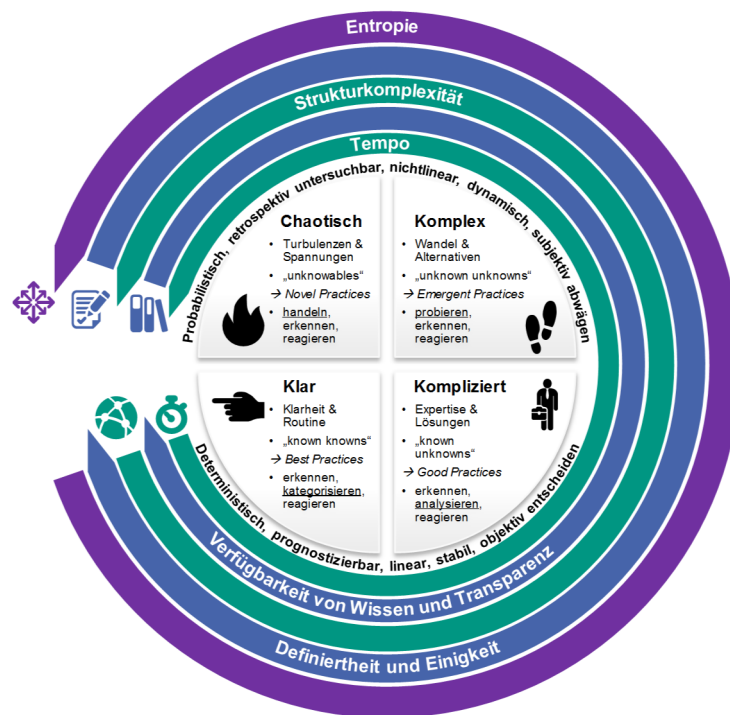
**Bild 1:** Auflösungsgrade des Produktentwicklungsprozess in Anlehnung an Lindemann (2009, S. 38)

Unter dem Verständnis der Produktentstehung als soziotechnisches System, lässt sich der Prozess der Produktentstehung als kontinuierliche Transformation eines Zielsystems in ein Objektsystem durch ein Handlungssystem darstellen (basierend auf Ropohl 1975). Letzteres wird aus Aktivitäten, Methoden und Prozessen sowie Entwicklern und allen weiteren Ressourcen gebildet, die für die Entwicklung des Produkts notwendig sind. Das Zielsystem beinhaltet alle Ziele, deren Begründung und Wechselwirkung sowie Randbedingungen an eine Lösung, nicht aber die Lösung selbst. Auf Basis des Zielsystems entsteht ein Lösungsraum, der eine mentale Repräsentation aller Lösungen darstellt, die das Zielsystem erfüllen. Auf Basis dessen synthetisiert das Entwicklerteam im Produktentstehungsprozess verschiedene Objekte (Prototypen, das finale Produkt), die im Objektsystem zusammengefasst werden. Ein Abgleich des Objektsystems mit dem Zielsystem führt zu einer Erweiterung der Wissensbasis und damit zu der Fähigkeit, das Zielsystem kontinuierlich zu konkretisieren. (Albers et al. 2011)

## 2.3 Komplexität in der Entwicklung

Komplexität als Systemeigenschaft wird im Wesentlichen durch zwei Perspektiven umrissen: Einerseits basierend auf fünf Faktoren (Gerald et al. 2011) und andererseits als allgemeiner Begriff von "VUCA" – Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity (Bennett und Lemoine 2014). Die beiden Perspektiven

auf Komplexität als Systemeigenschaft können zu vier Komplexitätsfaktoren zusammengefasst werden: Strukturkomplexität, mangelndes Wissen und Intransparenz, mangelnde Definition und fehlende Übereinstimmung sowie allgemeines Tempo. Komplexität als operativer Kontext hingegen wird gemäß des Cynefin-Frameworks durch die Rahmenbedingungen definiert, unter denen Aktivitäten der Produktentwicklung durchgeführt werden (Snowden und Boone 2007). Ein komplexer operativer Kontext ist demnach durch häufige und rasche Veränderungen, Emergenz und allgemeine Instabilität gekennzeichnet. In Abgrenzung davon sind komplizierte operative Kontexte stabil, erfordern aber außerordentliches Expertentum bei der Problemlösung. Der Kontext hat dabei massive Auswirkungen auf die Stabilität von Prognosen und Planungen: In komplexen Kontexten müssen Pläne sehr häufig angepasst werden, um bspw. auf veränderte Randbedingungen oder neue Erkenntnisse zu reagieren. In komplizierten Kontexten können Pläne jedoch auf einer langfristigen, stabilen Grundlage aufgebaut werden.



**Bild 2:** Der Entropie-Kompass nach (Breitschuh et al. 2018)

Für komplizierte Kontexte existieren daher elaborierte, plangetriebene Ansätze wie die VDI 2221 (2018). Andererseits bestehen bewährte iterativ-inkrementelle Ansätze für den Umgang mit komplexen Kontexten wie Scrum. Die offene Frage ist folglich, wie mit Übergängen zwischen diesen Kontexten innerhalb von Teilen eines Projektes umzugehen ist – also flexibel zwischen agilen und traditionellen Entwicklungsansätzen gewechselt werden kann. Hierzu muss zuerst die Art des zu lösenden Problems (kompliziert oder komplex) festgestellt werden. Das erfordert es, sowohl den operativen Kontext als auch die Systemeigenschaften zu berücksichtigen. Die Kombination dieser beiden Perspektiven leistet der Entropie-Kompass (Breitschuh et al. 2018). Komplexität wird hier als ein Zustand sozio-technischer Systeme definiert. Ergänzend wird Entropie auf Basis des Verständnisses aus der Thermodynamik als Maß für die Unkenntnis, um vom makroskopischen Zustand eines Systems auf den mikroskopischen Zustand all seiner Elemente zu schließen, eingeführt (Becker 1966). Anders ausgedrückt gehen zunehmende Entropie und verringerte Planungsstabilität einher (Tainter 1996).

## 2.4 Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Klassische Konstruktionsmethodiken unterscheiden Entwicklungsprojekte mithilfe der Kategorien Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion (Pahl et al. 2003). Derartige Methodiken bilden reale

Produktentwicklungsprojekte jedoch nicht ausreichend ab, da eine Neukonstruktion ohne jegliche Referenzen „auf einem weißen Blatt Papier“ praktisch nicht anzutreffen ist. Eine weitere Möglichkeit der Kategorisierung in inkrementelle, architekturelle, modulare und radikale Innovationen hat den Nachteil, dass nur eine rückblickende Klassifizierung von Entwicklungsvorhaben möglich ist (Hauschildt et al. 2016). Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung bildet die zur Beschreibung von Entwicklungsprojekten notwendigen Merkmalen ab und ermöglicht damit eine bedarfsgerechte Unterstützung des Entwicklers durch den zielgerichteten Einsatz von Methoden und Prozessen im Entwicklungsalltag. Im Modell der PGE erfolgt die Produktentwicklung immer basierend auf einem Referenzsystem. Dieses wird aus Referenzelementen gebildet, die sowohl aus Teillösungen des eigenen Unternehmens von Vorgängergenerationen, verwandten Baureihen oder Varianten, aber auch aus Produkten anderer Unternehmen oder aus der Forschung stammen können. Diese gehen durch die Aktivitäten Übernahmevariation sowie Neuentwicklung ihrer Teilsysteme (Gestalt- und Prinzipvariation) in die nächste Produktgeneration ein. Je nach angestrebtem oder zugelassenem Neuentwicklungsanteil ist ein entsprechendes Referenzsystem zu definieren. (Albers et al. 2019)

### **3 Forschungsbedarf**

Unternehmen implementieren zunehmend agile Ansätze in ihre Entwicklungsprozesse, um im von Unsicherheiten beherrschten Entwicklungskontext eine hohe Reaktionsfähigkeit gegenüber Änderungen zu gewährleisten. Da bestehende agile Ansätze ihren Ursprung in der Softwareentwicklung haben, geraten sie aufgrund der abweichenden Konstellation des Kontexts in der Mechatroniksystementwicklung schnell an ihre Grenzen. Zudem existiert weiterhin eine Vielzahl an Problemstellungen, die nach der beschriebenen Klassifikationssystematik kompliziert oder einfach in ihrer Bewerkstelligung sind. Demnach sollte ein Ansatz, der die flexible Entwicklung projektspezifisch sowie situations- und bedarfsgerecht unterstützt, Mechanismen beinhalten, die zum einen die Klassifikation der jeweiligen Entwicklungssituation hinsichtlich ihrer Entropie ermöglichen und zum anderen Praktiken bereitstellen, die den Anforderungen und Bedarfen der Mechatroniksystementwicklung gerecht werden. Zu diesem Zweck werden im vorliegenden Beitrag zunächst Prinzipien aus der Literatur abgeleitet, die ein Zielsystem für derartige Praktiken aufspannen. Daraufhin wird ein Modell generiert, das es Entwicklerteams erlaubt, ihre jeweilige Problemsituation hinsichtlich ihrer Entropie und damit Planungsstabilität einzuschätzen. In Kombination mit den jeweiligen Anforderungen verschiedener technischer Teilsysteme sind sie hierdurch in der Lage, das Vorgehen in der Entwicklung mittels des geeigneten Maßes an Agilität zu gestalten. Hierzu werden die folgenden Forschungsfragen beantwortet:

*Wie gestaltet sich das Zielsystem für einen Ansatz, der Entwickler im situations- und bedarfsgerechten Umgang mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden in der Mechatroniksystementwicklung unterstützt?*

*Wie können Entwickler dabei unterstützt werden, in Abhängigkeit der kontextspezifischen Planungsstabilität, ein situationsadäquates Vorgehen zu wählen?*

## **4 Ergebnis**

### **4.1 Die Grundprinzipien**

Aus Beobachtungen in Literatur und realen Entwicklungsprojekten wurden zunächst neun Grundprinzipien identifiziert, die Entwicklerteams bei der Entwicklung mechatronischer Systeme unterstützen. Diese dienen als Richtschnuren, um das Handeln an ihnen auszurichten sowie der Identifikation, Entwicklung und Anpassung von Praktiken, die Entwickler im Produktentstehungsprozess unterstützen.

Dabei führen die Prinzipien nicht zu einem Standardrezept aus einer definierten Kombination bestimmter Praktiken, die es erlaubt, erfolgreiche Produkte zu entwickeln, sondern dienen der unternehmens- und kontextspezifischen Gestaltung und Anwendung geeigneter Entwicklungspraktiken.

**(1) Der Mensch steht im Zentrum der Produktentstehung:**

Durch sein kreatives Schaffen ist der Entwickler für die Entwicklung erfolgreicher Produkte verantwortlich. Für eine bestmögliche Unterstützung des Entwicklers bei der Durchführung seiner Aktivitäten müssen Prozesse und Methoden an seine Kreativität, Kompetenzen, Bedarfe und kognitiven Fähigkeiten angepasst werden. Zudem muss auch die Methodenauswahl hinsichtlich dieser Kriterien erfolgen. Im Prozess der Produktentstehung wechselwirkt der Entwickler unmittelbar mit seinem Kontext und trägt zu einem kontinuierlichen und zielgerichteten Wissensgewinn bei, der es wiederum erlaubt, relevante Ziele an ein Produkt zu identifizieren und auf Basis dessen für die Zielerfüllung geeignete Objekte zu synthetisieren.

**(2) Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell:**

In der Praxis existieren keine zwei exakt gleichen Produktentwicklungsprojekte, da jedes Projekt innerhalb eines projektcharakteristischen Kontexts durchgeführt wird. Dies führt dazu, dass kein spezifischer Produktentstehungsprozess existent ist, der für zwei oder mehr verschiedene Entwicklungsvorhaben Gültigkeit besitzt. Gleichwohl existieren in unterschiedlichen Prozessen über verschiedene Branchen hinweg wiederkehrende, ähnliche Elemente, wie Phasen (zeitlich wiederkehrend) oder generische Aktivitäten (inhaltlich wiederkehrend), die im Prozess der Produktentstehung durchgeführt werden. Da diese jedoch in unterschiedlichen Projekten auf Basis spezifischer und voneinander abweichender Zielsysteme vollzogen werden, müssen Prozesse und Methoden an die jeweilige Situation angepasst werden.

**(3) Agile, situations- und bedarfsgerechte Kombination strukturierender und flexibler Elemente:**

Strukturierende und standardisierende Elemente helfen Entwicklungsteams bei der Orientierung in komplexen Situationen, die von Instabilität und Unvorhersehbarkeit geprägt sind. Gleichzeitig erfordert ein erfolgreicher Umgang mit komplexen Situationen eine hohe Flexibilität, um das Vorgehen auf Basis gewonnener Erkenntnisse oder veränderter Umgebungsbedingungen anzupassen. Durch ein situations- und bedarfsgerechtes Kombinieren strukturierender und flexibler Prozesselemente kann es Entwicklerteams gelingen, reaktionsfähig gegenüber Änderungen zu sein und zugleich fokussiert auf definierte Entwicklungsziele hin zu arbeiten. Die kontinuierliche und iterative Überprüfung und Anpassung des jeweiligen Vorgehens ist dabei ein entscheidendes Element, um im Kontext der jeweils vorliegenden Entwicklungssituation das geeignetste Vorgehen zu befolgen.

**(4) Jedes Prozesselement lässt sich im ZHO-Modell verorten und jede Aktivität basiert auf den Grundoperatoren Analyse und Synthese:**

Die Produktentstehung lässt sich als ein wiederkehrender Iterationszyklus aus Analyse- und Synthesetätigkeiten modellieren, durch welchen das Handlungssystem (Entwickler, Ressourcen, Wissen, etc.) das Zielsystem kontinuierlich konkretisiert und detailliert und in Objekte eines Objektsystems überführt. Hierbei lassen sich alle Prozesselemente (bspw. Ziele, Randbedingungen, Methoden, Infrastruktur, Modelle, ...) eindeutig einem Element im ZHO-Modell zuordnen. Das klare Bewusstsein über eine treffliche Zuordnung verschiedener Elemente zum Systemtripel unterstützt Entwicklerteams beispielsweise bei der Identifikation des aktuell benötigten Wissens oder dem zielgerichteten Aufbau von Prototypen zu einem bestimmten Projektzeitpunkt.

**(5) Alle Aktivitäten der Produktentwicklung sind als Problemlösungsprozess zu verstehen:**

Der Auslöser für die Durchführung jeder Aktivität der Produktentstehung ist die Abweichung eines IST- von einem SOLL-Zustand. IST, SOLL und der Weg vom IST- zum SOLL-Zustand können hierbei jeweils teilweise oder vollständig unbekannt sein. Die Aktivitäten der Produktentstehung dienen dazu, einen



aktivitätsspezifischen IST- in einen aktivitätsspezifischen SOLL-Zustand durch aktivitätsspezifische Operatoren zu überführen. Aus diesem Grund ist jede Aktivität der Produktentstehung als Problemlösungsprozess modellierbar, um diese systematische Überführung des IST- in den SOLL-Zustand zu unterstützen. Hierdurch wird es möglich, unterschiedlichen Kombinationen aus Produktentstehungs- und Problemlösungsaktivitäten geeignete Entwicklungsmethoden zuzuordnen.

**(6) Jedes Produkt wird auf Basis von Referenzen entwickelt:**

Die Entwicklung von Produkten erfolgt in aufeinanderfolgenden Produktgenerationen, deren Entwicklung in teilweise parallelisierte Entwicklungsgenerationen strukturiert ist. Dabei liegt jeder Entwicklung ein Referenzsystem zu Grunde, dessen Elemente mittels der systematischen Kombination aus den Aktivitäten Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation bezogen auf ihre Teilsysteme in die nächste Generation ( $G_n$ ) eingehen. Dies ist ebenfalls für Produkte der ersten Generation gültig, die basierend auf bestehenden Lösungen bspw. am Markt entwickelt werden. Der Neuentwicklungsanteil neuer Produktgenerationen muss zu Beginn eines Entwicklungsprojektes je nach avisierte Produktstrategie festgelegt werden, wobei die Nutzung der richtigen Referenzsystemelemente entscheidenden Einfluss auf Wettbewerbsvorteile hat.

**(7) Produktprofile, Invention und Markteinführung bilden die notwendigen Bestandteile des Innovationsprozesses:**

Die Grundlage für die Entwicklung eines erfolgreichen Produkts ist die Identifikation der richtigen Bedarfssituation am zukünftigen Markt. Aus dieser leitet sich der potentielle Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen ab und wird mittels des Produktprofils der Entwicklung zugänglich gemacht. Das Produktprofil wird durch die technische Umsetzung von Ideen und Konzepten in eine Invention befriedigt und durch Strategien und Aktivitäten des Marketings in den Markt eingeführt. Ist das identifizierte Produktprofil am Markt relevant, wurde die technische Invention erfolgreich umgesetzt und die Markteinführung optimal durchgeführt, stellt sich Markterfolg ein und das Entwicklungsvorhaben ist retrospektiv betrachtet als Innovation zu bezeichnen.

**(8) Frühe und kontinuierliche Validierung dient dem kontinuierlichen Abgleich zwischen Problem und dessen Lösung:**

Die Validierung gilt als zentrale Aktivität im Produktentwicklungsprozess und stellt insbesondere bei komplexen mechatronischen Systemen eine große Herausforderung dar. Daher ist es wichtig, die Validierung als fortlaufende Aktivität während der Produktentwicklung zu verstehen. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen mit dem entwickelten Produkt erzielt wird. Durch die Validierung anhand von Prototypen – virtuell, physisch, gemischt virtuell-physisch – werden Erweiterungen am Zielsystem vorgenommen, die je nach Validierungsergebnis als Bestätigung, Festlegung, Verfeinerung und/oder Änderung ausgeprägt sind. Daher bestimmen die so erzeugten Erkenntnisse das weitere Vorgehen im Prozess. Je später im Entwicklungsprozess Änderungen am Produkt vorgenommen werden müssen, desto größer sind die dafür aufzuwendenden Ressourcenumfänge – insbesondere Kosten. Aufgrund dessen ist es notwendig, bereits früh im Prozess generierte Objekte hinsichtlich der Erfüllung des Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens zu validieren, um die weitere Entwicklungsrichtung abzusichern und unerwünschte sowie unvorhergesehene Effekte zu vermeiden.

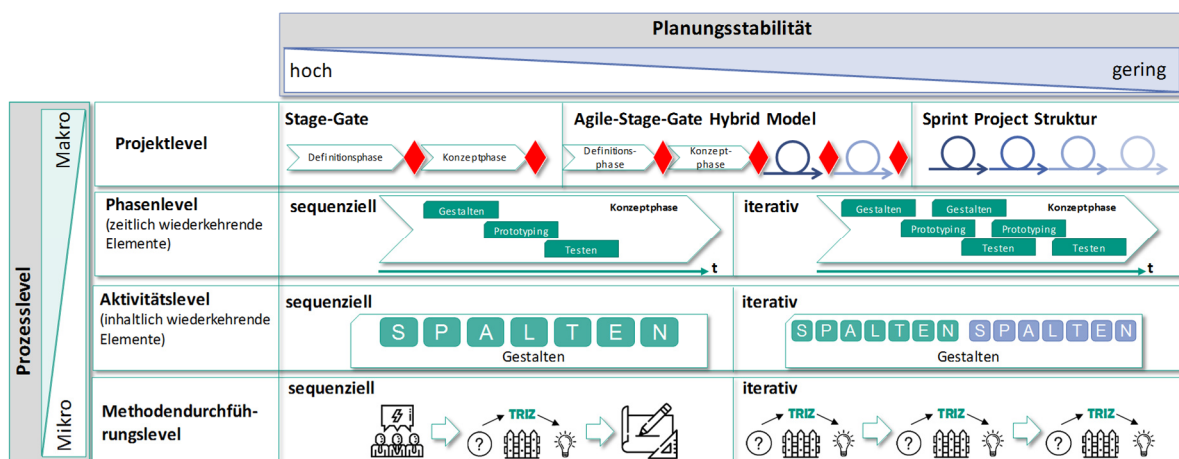
**(9) Für eine situations- und bedarfsgerechte Unterstützung in jedem Entwicklungsvorhaben müssen Denkweisen, Methoden und Prozesse skalierbar sein:**

Im Verlauf von Entwicklungsprojekten treten komplexe und nicht-komplexe Entwicklungsanteile zeitlich variabel auf. Dabei kommt es sowohl zu kohärenten Zuständen (also dem gleichzeitigen Vorliegen komplexer und nicht-komplexer Zustände in verschiedenen Projektteilen) als auch zu Zustandsänderungen des Gesamtprojektes (Identifikation neuer Anforderungen, die eine Neuplanung erforderlich machen). Solche Veränderungen erfordern eine einhergehende Anpassung der Denkweisen, Methoden und Prozesse zur Unterstützung der Produktentwicklung. Darüber hinaus variieren Projekte neben

ihrem zugrundeliegenden Kontext in ihrer Größe, dem Umfang oder der strategischen Bedeutung. Um Entwicklerteams in unterschiedlichen Entwicklungsvorhaben auf allen beschriebenen Projektebenen bestmöglich zu unterstützen, müssen Entwicklungsprozesse hinsichtlich des jeweils vorliegenden Entwicklungskontexts und des angestrebten Entwicklungsziels skaliert werden, um Entwicklern in den verschiedenen Entwicklungssituationen ein situationsadäquates Agieren zu ermöglichen.

#### 4.2 Agile Anpassung flexibler und strukturierender Elemente im ASD – Agile Systems Design

Mit zunehmendem Neuentwicklungsanteil in Entwicklungsvorhaben steigt die Notwendigkeit, situationsrelevantes Wissen aufzubauen sowie die Notwendigkeit Definitionen am technischen System vorzunehmen, um die Eignung der Lösung hinsichtlich des identifizierten Bedarfs kontinuierlich zu prüfen. Demnach steigen Unsicherheiten im Entwicklungsprojekt mit zunehmendem Neuentwicklungsanteil und damit auch die Entropie der vorliegenden Situation wodurch die Planungsstabilität abnimmt. Das Bewusstsein über etwaige Neuentwicklungsanteile im technischen System führt zu dem Bewusstsein, dass aufgrund von Unsicherheiten spätere Änderungen wahrscheinlich sind, was zu einer zunehmenden Dynamik im Entwicklungskontext führt. Dieser Umstand wird genutzt, um auf Basis ausgewählter Prinzipien (2, 3, 5, 6 und 9) ein Modell zu generieren, das die Entwickler bei der Wahl des situations- und bedarfsgerechten Maßes an flexiblen und strukturierenden Prozesselementen auf unterschiedlichen Prozessebenen unterstützt (siehe Bild 3).



**Bild 3:** Unterstützung zur Auswahl des situations- und bedarfsabhängigen Maßes an Flexibilität

Auf allen Prozessebenen kann zwischen sequenziellen und iterativen Vorgehensweisen unterschieden werden. Diese werden unter der Nutzung des Entropiekompasses in Abhängigkeit der im jeweiligen Entwicklungskontext vorliegenden Planungsstabilität zur Lösung der Problemstellung flexibel ausgewählt. Dies ermöglicht die Anpassung des Entwicklungsvorgehens auf unterschiedlichen Prozessebenen. Strebt ein Unternehmen beispielsweise den Vorstoß auf einen ihm bisher unbekanntem Markt mit einem Produkt an, das sich aufgrund eines großen Wettbewerbsdrucks durch neue Alleinstellungsmerkmale abgrenzen muss (ggf. hohe Neuentwicklungsanteile), eignet sich auf Projektebene bspw. ein hybrides Vorgehen. In diesem werden zunächst im Markt bestehende Lösungen analysiert, daraufhin Potentiale abgeleitet und diese inkrementell in Lösungen überführt. Dabei ist eine Feinplanung des Gesamtprojekts aufgrund der Unfähigkeit den Projektverlauf vorherzusehen unmöglich. Aus diesem Grund werden die Aktivitäten in den Phasen zunächst soweit vorausgeplant, wie es der aktuelle Wissensstand zulässt und nach der Durchführung bei Bedarf ein weiterer Iterationszyklus zur Konkretisierung der Ergebnisse durchgeführt. Bei Betrachtung der Aktivitätsebene existieren Aktivitäten, die aufgrund vorhandenen Erfahrungswissens durch einen einmalig durchgeführten Problemlösungsprozess ausgeführt werden können (bspw. die Spezifizierung gesetzlicher Anforderungen im Kontext des ent-

wickelten Systems und Umsetzung durch bestehende Lösungen, wie die Position und Farbe des Fahrzeuglichts). Parallel dazu ergeben sich Aktivitäten, die Iterationen von Problemlösungsprozessen auf der Aktivitätsebene erfordern (bspw. die technische Spezifizierung der Kundenanforderung *sportliches Fahrverhalten*). Diese werden kontinuierlich verfeinert, in technische Systeme umgesetzt und abgesichert. Zur Durchführung der Aktivitäten besteht die Möglichkeit der methodischen Unterstützung. Hierbei kann ebenfalls eine Sequenz verschiedener Methoden durchgeführt werden oder bestimmte Methoden zur Konkretisierung von Ergebnissen iterativ wiederholt werden. Auf allen beschriebenen Ebenen eignet sich der Entropiekompass um Entwicklerteams bei der Planung und Anpassung des Prozesses zu unterstützen. Die Prinzipien und das Modell sind Teil des ASD – Agile Systems Design zur Entwicklung mechatronischer Systeme.

## 5 Diskussion und Ausblick

Agile Vorgehensweisen für ausreichend planbare Entwicklungsvorhaben eignen sich ebenso wenig zur Projektdurchführung wie ein plangesteuertes Vorgehen zur Durchführung komplexer Entwicklungsvorhaben. Mit dem Ziel, Entwicklerteams bei der Identifikation des geeigneten Maßes an Agilität auf unterschiedlichen Projektebenen zu unterstützen, wurden zunächst Prinzipien aus Beobachtungen aus Literatur und realen Entwicklungsprojekten identifiziert, die zur Ausrichtung des Handelns von Entwicklerteams im Kontext der Mechatroniksystementwicklung dienen können. Basierend darauf wurde ein Modell abgeleitet, dass geeignete Entwicklungsvorgehensweisen auf verschiedenen Projektebenen in Einklang mit dem Grad der Planungsstabilität im vorliegenden Entwicklungskontext bringt. Zu diesem Zweck wird der Entropiekompass genutzt. Durch die Anwendung des Modells werden Entwickler in der effizienten und effektiven Prozessgestaltung flexibel unterstützt. Die abgeleiteten Prinzipien erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und werden in weiteren Forschungsarbeiten hinsichtlich ihrer Relevanz und Verständlichkeit evaluiert. Zudem wird das abgeleitete Modell hinsichtlich seiner Anwendbarkeit bewertet und kontinuierlich weiterentwickelt. Die Prinzipien dienen in zukünftigen Arbeiten der gezielten Prozess- und Methodenentwicklung.

## Literatur

- |                    |  |
|--------------------|--|
| Albers et al. 2018 | ALBERS, Albert ; HEIMICKE, Jonas ; WALTER, Benjamin ; BASEDOW, Gustav Nils ; REIB, Nicolas ; HEITGER, Nicolas ; OTT, Sascha ; BURSAC, Nikola: <i>Product Profiles : Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations</i> . In: <i>Procedia CIRP</i> 70, 2018, Nr. 1, S. 253–258  |
| Albers et al. 2011 | ALBERS, Albert ; LOHMEYER, Quentin ; EBEL, Björn: <i>Dimensions of Objectives in Interdisciplinary Product Development Projects</i> . In: <i>Proceedings of ICED11</i> , 2011, Nr. 2, S. 256–265   |
| Albers et al. 2019 | ALBERS, Albert ; RAPP, Simon ; SPADINGER, Markus ; RICHTER, Thilo ; BIRK, Clemens ; MARTHALER, Florian ; HEIMICKE, Jonas ; KURTZ, Viktor ; WESSELS, Holger: <i>The Reference System in PGE - Product Generation Engineering: A generalized Understanding of the Role of Reference Products and their Influence on the Development Process</i> . In: <i>Proceedings of ICED19</i> , 2019, eingereicht |
| Albers et al. 2016 | ALBERS, Albert ; REIB, Nicolas ; BURSAC, Nikola ; BREITSCHUH, Jan: <i>15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development</i> . In: BOKS, Casper (Hrsg.): <i>Proceedings of NordDesign2016</i> , 2016, S. 411–420   |
| Becker 1966        | BECKER, Richard: <i>Theorie der Wärme</i> . Berlin, Heidelberg, s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 1966 (Heidelberger Taschenbücher 10)  |

- Bennett und Lemoine 2014 BENNETT, Nathan ; LEMOINE, G. James: *What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world*. In: *Business Horizons* 57 (2014), Nr. 3, S. 311–317
- Breitschuh et al. 2018 BREITSCHUH, Jan ; ALBERS, Albers ; SEYB, Patrick ; HOHLER, Sophie ; BENZ, Jonathan ; REIß, Nicolas ; BURSAC, Nikola: *Scaling agile practices on different time scopes for complex problem-solving*. In: *Proceedings of NordDesign 2018*, 2018
- Chong und Chen 2010 CHONG, Yih Tng ; CHEN, Chun-Hsien: *Customer needs as moving targets of product development: a review*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 48 (2010), 1-4, S. 395–406
- Cooper und Kleinschmidt 1987 COOPER, Robert G. ; KLEINSCHMIDT, Elko J.: *Success factors in product innovation*. In: *Industrial Marketing Management* 16 (1987), Nr. 3, S. 215–223
- Dörner 1979 DÖRNER, Dietrich: *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. 2. Aufl. Stuttgart : Kohlhammer, 1979 (Kohlhammer-Standards Psychologie Studententext)
- Fadhil Dulaimi 2005 FADHIL DULAIMI, Mohammed: *The challenge of customer orientation in the construction industry*. In: *Construction Innovation* 5 (2005), Nr. 1, S. 3–12
- Geraldi et al. 2011 GERALDI, Joana ; MAYLOR, Harvey ; WILLIAMS, Terry: *Now, let's make it really complex (complicated)*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 31 (2011), Nr. 9, S. 966–990
- Hauschildt et al. 2016 HAUSCHILDT, Jürgen ; SALOMO, Sören ; SCHULTZ, Carsten ; KOCK, Alexander: *Innovationsmanagement*. 6. Aufl. München : Franz Vahlen, 2016
- Heimicke et al. 2018 HEIMICKE, Jonas , REISS, Nicolas , ALBERS, Albert , WALTER, Benjamin , BREITSCHUH, Jan , KNOCHE, Sebastian , BURSAC, Nikola . *Agile Innovative Impulses in the Product Generation Engineering. Creativity by Intentional Forgetting*. In: *Proceedings of 5th International Conference on Design Creativity* (2018), (8), 183-190.
- Huber et al. 2007 HUBER, Frank ; HERRMANN, Andreas ; HENNEBERG, Stephan C.: *Measuring customer value and satisfaction in services transactions, scale development, validation and cross-cultural comparison*. In: *International Journal of Consumer Studies* 31 (2007), Nr. 6, S. 554–564
- Laukemann et al. 2017 LAUKEMANN, Alexander ; BINZ, Hansgeorg ; ROTH, Daniel: *Katalog von Wissensmanagementlösungen für den Produktentwicklungsprozess*. In: BINZ, Hansgeorg; BERTSCHE, Bernd; BAUER, Wilhelm; ROTH, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017*, (2017)
- Lindemann 2009 LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte : Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 (VDI-Buch)
- Olausson und Berggren 2010 OLAUSSON, Daniel ; BERGGREN, Christian: *Managing uncertain, complex product development in high-tech firms: in search of controlled flexibility*. In: *R&D Management* 40 (2010), Nr. 4, S. 383–399
- Pahl et al. 2003 PAHL, Gerhard , BEITZ, Wolfgang , SCHULZ, Hans-Joachim , JARECKI, U.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 5. Aufl. : Springer Berlin Heidelberg, 2003
- Rebentisch et al. 2018 REBENTISCH, Eric ; CONFORTO, Edivandro C. ; SCHUH, Günther ; RIESENER, Michael ; KANTELBERG, Jan ; AMARAL, Daniel C. ; JANUSZEK, Sven: *Agility Factors and their Impact on Product Development Performance*. In: *International Design Conference – Design 2018*, 2018, S. 893–904

- Redtenbacher 1852 REDTENBACHER, Ferdinand: *Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaues*. Mannheim : Bassermann Verlag, 1852
- Ropohl 1975 ROPOHL, Günter: *Einführung in die Systemtechnik. : Systemtechnik—Grundlagen und Anwendungen*. München : Carl Hanser Verlag, 1975
- Schmidt et al. 2017 SCHMIDT, Tobias Stefan ; WEISS, S. ; PAETZOLD, Kristin: *Agile Development of Physical Products : An Empirical Study about Motivations, Potentials and Applicability*. In: *University of the German Federal Armed Forces* (2017)
- Schumpeter 1912 SCHUMPETER, Joseph A.: *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*. 1. Aufl. Leipzig : Verlag von Duncker & Humblot, 1912
- Smith und Morrow 1999 SMITH, Robert P. ; MORROW, Jeffrey A.: *Product development process modeling*. In: *Design Studies* 20 (1999), Nr. 3, S. 237–261
- Snowden und Boone 2007 SNOWDEN, David J. ; BOONE, Mary E.: *A Leader's Framework for Decision Making*. In: *Harvard business review* 85 (2007), Nr. 11, S. 68–77
- Tahera et al. 2018 TAHERA, Khadija ; WYNN, David C. ; EARL, Chris ; ECKERT, Claudia M.: *Testing in the incremental design and development of complex products*. In: *Research in Engineering Design* 47 (2018), Nr. 2, S. 235–261
- Tainter 1996 TAINTER, Joseph A.: *Complexity, problem solving, and sustainable societies*. In: *Getting down to earth: practical applications of ecological economics*. Washington, D.C: Island Press, 1996, S. 61–76
- Thomke und Reinertsen 1998 THOMKE, Stefan ; REINERTSEN, Donald: *Agile Product Development: Managing Development Flexibility in Uncertain Environments*. In: *California Management Review* 41 (1998), Nr. 1, S. 8–30
- VDI 2221 Blatt 1 2018 VDI 2221 (2018) Blatt 1 - *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*
- Wynn und Clarkson 2018 WYNN, David C. ; CLARKSON, P. John: *Process models in design and development*. In: *Research in Engineering Design* 29 (2018), Nr. 2, S. 161–202

KIT Scientific Working Papers  
ISSN 2194-1629

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)