

Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen

Tobias Sebastian Schmidt¹, Kristin Paetzold²

¹ *Institut für Innovations- und Technologiemanagement
Universität der Bundeswehr München*

² *Institut für Technische Produktentwicklung
Universität der Bundeswehr München*

Abstract

Product development becomes increasingly uncertain and dynamic. Under these conditions, traditional approaches such as VDI 2221 and VDI 2206 reach their limits as they are too stiff to handle large numbers of changes efficiently. Agile methods, however, are flexible and embrace changes. In software development, they have been proven very beneficial which is why they belong to the standard procedures there. In the development of physical products, crucial challenges (e.g. building prototypes frequently) exist. Considering that, the paper investigates, if agile methods are serious alternatives to traditional approaches for physical product development, too. It turns out that they are not. Nevertheless, maturing technologies such as 3d printing could potentially serve as a game changer soon.

Keywords: Agile Development of Physical Products, VDI 2221, VDI 2206

1 Einleitung

Produktentwicklung als Summe aller Aktivitäten, die mit der Herleitung einer Produktidee und dem Kreieren eines marktreifen Produkts einhergehen, verfolgt das Ziel, einen speziellen Kundenbedarf mit Hilfe einer technischen Lösung möglichst schnell, möglichst hochwertig und möglichst günstig zu befriedigen. Unternehmensseitig spielt dabei die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, um die eigene Wettbewerbsposition zu sichern oder idealerweise zu verbessern. Kundenseitig dominiert der Grad der Zufriedenheit, inwiefern das Produkt das spezielle Problem löst.

In zunehmend mehr Märkten sehen sich Unternehmen dabei herausfordernden Trends konfrontiert, denn die Rahmenbedingungen der Entwicklungsprojekte unterliegen einer steigenden Unsicherheit und Dynamik. Bspw. sind Stakeholder immer weniger in der Lage, ihre Bedürfnisse bzw. Produktanforderungen explizit auszudrücken [1], [2], verfügbare Entwicklungszeiten sinken [3] und der Funktionsumfang und die Abhängigkeiten der Funktionen untereinander nehmen zu [4]. Dies führt dazu, dass Produktanforderungen erst im Laufe der Entwicklung bewusst werden und initiale Annahmen zu revidieren sind. Unter diesen Umständen stoßen bewährte, traditionelle Produktentwicklungsmethoden wie die VDI 2221 oder VDI 2206 immer öfter an ihre Grenzen [4]–[7].

Eine Alternative zu diesen Standardmethoden stellen agile Ansätze dar, die aus der Softwareentwicklung stammen. Sie versprechen mittels kurzen Iterationen einerseits die notwendige Flexibilität, um auf Unvorhersehbares zu reagieren, und andererseits die geforderte Prozesseffizienz, um dabei trotzdem den monetären Anforderungen zu genügen. In der Softwareindustrie gehören agile Methoden mittlerweile zu den Standardvorgehen. Bedingt durch den derzeitigen Hype um agile Entwicklungsmethoden und den beeindruckenden Erfolgsgeschichten aus der Softwareentwicklung sind hohe Erwartungen mit dem Begriff verbunden [7], [8]. Es stellt sich daher die Frage, ob sich Agilität auch außerhalb der Softwareindustrie dazu eignet, obigen Trends zu begegnen:

- Ist Agilität auch in den Non-Softwareindustrien eine ernstzunehmende Alternative zu den bewährten, traditionellen Produktentwicklungsstandards wie VDI 2221 und VDI 2206?
- Wo liegen die Chancen und derzeitige Grenzen der agilen Entwicklung physischer Produkten?

Dazu führt die Untersuchung eine Literaturrecherche durch. Im Fokus stehen dabei aktuelle Anforderungen an die Vorgehensweisen sowie die Chancen und Herausforderungen agiler Produktentwicklung.

2 Produktentwicklungsmodelle im Überblick

Als definitorische Grundlage folgt eine kurze Vorstellung der bewährten, traditionellen Vorgehensmodelle sowie der agilen Entwicklungsmethoden, sodass im Anschluss ein Vergleich stattfinden kann. Da VDI-Richtlinien das Ziel verfolgen, wesentliche Forschungserkenntnisse und Praxiserfahrungen für die angewandte Produktentwicklung zu sammeln und zu verdeutlichen, fungieren VDI 2221 und VDI 2206 als Repräsentanten traditioneller Vorgehensweisen.

2.1 VDI 2221

Die VDI 2221 beinhaltet ein Entwicklungsvorgehen, das produkt- und branchenunabhängig Anwendung findet. Es gliedert sich in die vier Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten und ordnet diesen sieben Arbeitsschritte zu. Sie beginnen mit dem Klären der Problemstellung, führen über das Gliedern und Gestalten von Modulen und enden schließlich mit dem Protokollieren der Ergebnisse. Wiederholungen der Phasen als Ganzes oder als Teil sind zwecks Lösungsoptimierung explizit zugelassen [9].

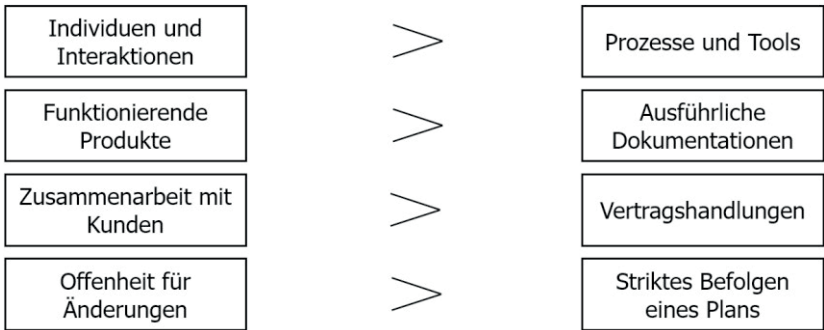
2.2 VDI 2206

Die Produktentwicklung nach VDI 2206 bildet ein Vorgehensmodell speziell für mechatronische Systeme ab und beinhaltet drei fundamentale Wesensmerkmale. Auf der *Mikroebene* beruht das Vorgehen auf einem allgemeinen, iterativen Problemlösungszyklus (Ist-Aufnahme, Zieldefinition, Problemanalyse, Lösungssynthese, Bewertung und Entscheiden). Die *Makroebene* folgt dem V-Modell, das ein domänenübergreifendes Lösungskonzept vom Allgemeinen ins Detail zunächst in Teilfunktionen zerlegt, domänenspezifisch ausarbeitet und anschließend zum Gesamtsystem, sprich vom Detail ins Allgemeine, integriert. Bei der Systemintegration spielt die Eigenschaftsabsicherung, also der Vergleich zwischen beabsichtigtem Zielzustand und vorhandenem Ist-Zustand, eine große Rolle. Diese Makroebene gestaltet sich ebenfalls iterativ, wobei die Produktreife bei jedem Durchgang steigt. Als drittes Wesensmerkmal dienen *Prozessbausteine* für repetitive Aufgabenstellungen, die bspw. die Arbeitsschritte der Eigenschaftsabsicherung konkretisieren und so die Konsistenz und Prozessverlässlichkeit über die gesamte Entwicklung hinweg sicherstellen [10].

2.3 Agile Methoden

Agilität ist „die Fähigkeit, schnell und kooperativ auf Veränderungen in unvorhersehbaren Umwelten (zumeist reaktiv) einzugehen, um Bedarfe effizient und effektiv zu befriedigen.“ [11] Sehr ähnlich definiert Conboy Entwicklungssagilität als die Bereitschaft einer Entwicklungsmethode, Veränderungen zu begrüßen und aus ihnen zu lernen, um Kundenwert zu erzeugen [12]. Agile Produktentwicklung referenziert in dieser Untersuchung somit nicht das Hervorbringen agiler Produkte, sondern eine agile Entwicklungstätigkeit [13].

Agile Ansätze stammen aus der Softwareentwicklung, in der sich 2001 17 Programmierer wegen großer Unzufriedenheit mit zu steifen, bürokratischen und innovationshemmenden Prozessstandards auf vier Werte und zwölf Arbeitsprinzipien geeinigt haben (s. Abbildung) [14]. Dieses Manifest der agilen Softwareentwicklung verkörpert die Art und Weise, wie die 17 Programmierer arbeiten wollen. Da sich herausstellt, dass das Manifest die Meinung von sehr vielen anderen Softwareentwicklern widerspiegelt, reift der Agilitätsgedanke rasant zu einem neuen Standardvorgehen in der Softwareindustrie [15].



Wir erkennen sehr wohl den Wert der Dinge auf der rechten Seite an, wertschätzen jedoch die auf der linken Seite noch mehr.

Abbildung 1: Werte des Manifests für agile Produktentwicklung [14], [16]

Um das werte- und prinzipiengerechte Handeln zu unterstützen, wurden diverse agile Methoden entwickelt. Die bekanntesten heißen Scrum, eXtreme Programming (XP), Crystal, Feature Driven Development (FDD) und Kanban, wobei im Folgenden Scrum exemplarisch näher beleuchtet wird.

Nach der Scrum Methode erarbeitet ein interdisziplinäres und selbstorganisiertes Team (≤ 10 Personen) in Iterationen, bei Scrum Sprints genannt, von

zwei bis vier Wochen einen potentiell auslieferbaren Prototypen, den der Kunde am Ende jedes Sprints evaluiert. Das Kundenfeedback fließt schließlich in den nächsten Sprint ein, sodass von Sprint zu Sprint der Produktreifegrad steigt. Scrum verfolgt die Logik, nur aus Kundensicht essentielle Funktionen in den Prototypen aufzunehmen (Minimum Viable Product) und den Funktionsumfang sukzessive zu erweitern. Mit jedem Inkrement lernt das Team die Kundenbedarfe besser kennen und es kristallisiert sich eine gemeinsame Produktvision heraus. Neben der Prototypenevaluation findet am Ende jedes Sprints eine Retrospektive statt, in der das Team Erfahrungen des letzten Sprints kritisch reflektiert und für zukünftige Sprints lernt. Zusätzlich zum Entwicklungsteam existieren die Rollen Scrum Master, der das Team methodisch unterstützt und für gute Arbeitsbedingungen sorgt, und Product Owner, der als interner Vertreter der Kundeninteressen agiert [16], [17].

2.4 Gegenüberstellung

Traditionelle Produktentwicklung geht davon aus, dass sich die Informationsgrundlage zu Projektbeginn kaum ändern wird. Dazu analysieren sie das Problem profund und erwarten vom Kunden, dass er eine konkrete Vorstellung von seinem Bedarf hat und diesen nur mit geringen Unschärfen beschreiben kann. Diese Genauigkeit ist notwendig, denn traditionelle Vorgehen streben nach einem idealen Ablaufplan, der für einen speziellen Anwendungsfall optimale Maßnahmen vor der Ausführung definiert [5], [18].

Agile Produktentwicklung jedoch geht davon aus, dass sich die anfängliche Informationsgrundlage ohnehin ändern wird, weshalb ein initialer und detaillierter Ablaufplan nicht notwendig ist [18]. Vielmehr akzeptiert Entwicklungsgilität die Präsenz von Unsicherheit [19] und strebt danach, die Konsequenzen von Fehlprognosen möglichst klein zu halten [2]. Statt vom Kunden möglichst konkrete Bedarfsangaben zu erhoffen, erwarten agile Methoden, dass der Kunde zwecks Evaluierung in regelmäßigen Abständen ein Feedback abgibt [18]. Agile Vorgehen verlassen sich auf die Fähigkeiten der Mitarbeiter, die situationsadäquate Maßnahmen selbstständig einleiten und durchführen [18]. „Agile Methoden fokussieren also auf die Adaptionfähigkeit, nicht auf die Vorhersage von spezifischen Ereignissen.“ [4] Weitere Wesensunterschiede fasst Tabelle zusammen.

Tabelle 1: Traditionelle versus agile Entwicklungsansätze (in enger Anlehnung an [5], [18])

Kategorie	Traditionell	Agil
Entwicklungsprozess	Durchdacht und formal, Abfolge von Arbeitsschritten, plan- und regelgetrieben	Emergent, iterativ und explorativ, Wissen und Handlung untrennbar, wertgetrieben
Ziel	Optimierung	Adaptierung, Flexibilität, Reaktionsfreudigkeit
Problemlösung	Auswahl der besten Maßnahmen, planvoll und formalisierte Aktivitäten	Lernen durch Experimentieren, kontinuierliches Reframing der Probleme und Lösungen
Wahrnehmung der Umwelt	Stabil, vorhersehbar	Turbulent, schwierig vorhersehbar
Wesensmerkmale	Command-and-Control Führungsstil Vermeidet Konflikte Formalisierter Innovationsprozess Manager = Kontrolleur Erst Gestaltung, dann Implementierung	Selbstorganisierte Teams, dezentrale Entscheidungen Begrüßt Konflikte und Dialektik Animiert zur Exploration und Kreativität Manager = Vermittler Gestaltung und Implementierung sind untrennbar und entwickeln sich iterativ
Kundenintegration	Wichtig, Kunde am Anfang und am Ende involviert	Erfolgskritisch, Kunde kontinuierlich involviert
Theoretische Verankerung	Logischer Positivismus, wissenschaftliche Methoden	„Learning by Doing“, Dewey's Pragmatismus, Phänomenologie, Cynefin Framework

3 Aktuelle Anforderungen an die Produktentwicklung

Rahmenbedingungen der Produktentwicklung wie Stakeholder-Interessen etc. können nur selten als sicher angenommen werden. In der Regel unterliegt ihnen eine unvorhersehbare Dynamik. Diese Unsicherheit kann technischer (Wird das Produkt funktionieren?), produktionstechnischer (Ist eine wirtschaftliche Produktion möglich?), bedarfs- (Was genau will der Kunde?) oder marktbezogener Natur (Wird sich das Produkt verkaufen?) sein [2].

Unsicherheitstreiber sind zum einen neue Technologie [4], die sich immer schneller ändern. Jede neue Technologie birgt das Risiko, dass Kunden Produkte mit alter Technologie weniger wertschätzen und sich somit die erhofften Margen nicht einstellen. Zum anderen trägt die kundenseitige Schwierigkeit, Produktanforderungen explizit zu spezifizieren, stark zur Präsenz von Unsicherheit in der Produktentwicklung bei [1], [4]. Dies resultiert sowohl daraus, dass die Übermittlung impliziten Wissens kostspielig ist („sticky information“) [1], als auch daraus, dass die Technik existierender Produkte aus Kundensicht oft intransparent ist (Black Box) [4]. Auch der Wettbewerb wird aufgrund zunehmender Globalisierung intensiver, womit wirtschaftliche Unsicherheiten einhergehen [3], [4]. Des Weiteren verursachen der zunehmende Funktionsumfang in Produkten sowie die wachsende Stärke und steigende Zahl von Abhängigkeit zwischen den Funktionen Unsicherheiten, denn mit zunehmender Komplexität erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Entwicklungsfehlern [4].

Wegen steigender Dynamik und Unsicherheit in den Rahmenbedingungen der Produktentwicklung ist es ratsam, Produkte entweder sehr schnell zu entwickeln, um möglichst wenigen Veränderungen ausgesetzt zu sein, oder möglichst flexibel vorzugehen und den Design Freeze sehr spät durchzuführen [20]. Daneben ist es denkbar, entweder eine Strategie der Unsicherheitsvermeidung bzw. -minimierung durch z.B. profunde Analysen und planvoller Voraussicht, oder eine Strategie der Unsicherheitsakzeptanz durch z.B. die Minimierung von Konsequenzen von Prognosefehlern zu verfolgen [2], [19]. Während traditionelle Ansätze auf Ersteres setzen, referenzieren agile Ansätze Letzteres.

4 Chancen der agilen Entwicklung

Der wohl größte Vorteil agiler Methoden gegenüber traditionellen Herangehensweisen ist die Fähigkeit, auf Unvorhersehbares durch kurze Iterationen und enge Kollaboration im Team sowie mit dem Kunden zu reagieren. Da agile Ansätze Testen nicht als reines Verifizierungsinstrument, sondern darüber hinaus als Möglichkeit zum Lernen verstehen [2], wird die steigende Dynamik und Unsicherheit in Entwicklungsrandbedingungen langfristig beherrschbar. Funktionierende Prototypen, die das Ergebnis jeder Iteration darstellen, schärfen zudem mit jeder Wiederholung eine gemeinsame Produktvision, da sie nicht nur explizites, sondern auch implizites Wissen vermitteln [4], [21].

Agile Methoden schöpfen des Weiteren das Potential der Humanressourcen tiefschürfender aus, indem sie (a) Mitarbeitern weite Handlungs- und

Entscheidungsfreiheiten gewähren [22], [23], (b) selbstorganisierte Teams fordern und fördern (dezentrale Entscheidungen – Prinzip: viele Augen sehen mehr als wenige)[22], [23] und (c) eine Leadership-and-Collaboration statt Command-and-Control Strategie verfolgen [18]. Dies resultiert schließlich in einer hohen Motivation und Commitment der Mitarbeiter, fördert kreatives und unkonventionelles Denken und Handeln, und stimuliert somit radikale Innovationen [5].

5 Derzeitige Grenzen der agilen Entwicklung

Den vielseitigen Chancen stehen in der Praxis herausfordernde Probleme gegenüber. Vorliegende Untersuchung nimmt eine Unterteilung zwischen grundsätzlichen Problemen, die unabhängig der Produktgestalt (virtuell oder physisch) auftreten können, und Problemen, die darüber hinaus mit der Entwicklung physischer Produkte einhergehen, vor. Letztere werden als Einschränkungen der Körperlichkeit bezeichnet und sind somit als Grenzen definiert, die eine Minderung der Einsatztauglichkeit agiler Entwicklungsmethoden bedingt durch die physische Produktgestalt implizieren.

5.1 Grundsätzliche Probleme unabhängig der Produktgestalt

Empirische Studien berichten von der mitarbeiterseitigen Angst vor Transparenz, die persönliche Schwächen aufdeckt [24], [25], dem managerseitigen Gefühl von Kontrollverlust, der mit selbstorganisierten Teams einhergeht [24], einer beschränkten Skalierbarkeit auf Großprojekte [25], einer bedingten Tauglichkeit für dezentrale bzw. verteilte Teams [15], [25], [26] und davon, dass das Team agile Praktiken wie Kochrezepte anwendet anstatt die agilen Werte und Prinzipien zu verstehen und zu leben [24], [25]. Ausführliche Erläuterungen dieser und weiterer grundsätzlichen Probleme finden sich in [24]–[26].

Ovesen, der sieben Unternehmen bei der Einführung agiler Methoden in die Entwicklung physischer Produkte über mehrere Jahre begleitet hat, identifiziert sehr ähnliche Probleme [27]. Daher haben sie eine prinzipiell gestaltungsabhängige Bedeutung, auch wenn Sie derzeit hauptsächlich im Kontext der agilen Softwareentwicklung untersucht werden [15], [23].

5.2 Einschränkungen der Körperlichkeit

Um agile Methoden von der Entwicklung von Softwareprodukten in die Entwicklung von Non-Softwareprodukten zu überführen, stellt das Überwinden der Einschränkungen der Körperlichkeit das erfolgskritische Kriterium dar

[27]. In anderen Worten: Sind die Einschränkungen der Körperlichkeit eliminiert, gibt es keinen Grund, in der Problem- bzw. Lösungserforschung eine Kontextunterscheidung zwischen virtuellen und physischen Produkten vorzunehmen.

Zum einen bestehen die Einschränkungen der Körperlichkeit aus Herstellungsproblemen der Prototypen binnen Iterationen von zwei bis vier Wochen. Während sich Software innerhalb weniger Sekunden kompilieren lässt, benötigt die Herstellung von physischen Prototypen je nach Produkt mehrere Tage bis Monate. Damit verbunden gehen Flexibilitätsprobleme einher, denn externe Abhängigkeiten z.B. zu Zulieferern (lange Lieferzeiten, Änderungsmöglichkeiten von aufgegebenen Bestellungen etc.) erschweren die Erzeugung von physischen Prototypen erneut. Außerdem ist es herausfordernd, Iterationsziele festzulegen. Dies begründet sich vor allem darin, dass in physischen Produkten eine Komponente in der Regel mehrere Funktionen abbildet und somit Separierungsprobleme auftreten [27].

Zum anderen bestehen die Einschränkungen der Körperlichkeit aus Organisationsproblemen. Insbesondere die Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme benötigt Expertenwissen von sehr unterschiedlichen Domänen (z.B. Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik). Da agile Methoden nach einer möglichst großen Fähigkeits- und Wissensredundanz zwischen den einzelnen Teammitgliedern streben, ist es schwierig, ein agiles Team zu besetzen. Es dürfen nicht zu viele Personen sein, es erfordert eine große Redundanz und es müssen alle notwendigen Fähigkeiten integriert sein [27].

Nichtsdestotrotz stellt Conforto et al. fest, dass eine Anwendung agiler Werte und Prinzipien theoretisch auch in Non-Softwareindustrien möglich ist [21]. Dies belegen ebenfalls einige Fallbeispiele praktisch, in denen Industrieunternehmen ihre Produktentwicklung – zumindest teilweise – von einer traditionellen zu einer agilen Arbeitsweise umgestellt haben [27]–[30].

6 Diskussion und Fazit

Eine „kanonisierbare Optimalform des Konstruktionsprozesses, der der Entwickler in einem festen Ablaufplan folgen kann“ ([31] zit. nach [10]), existiert nicht. Individuelle Kontextfaktoren machen eine Adaption der Vorgehensmodelle an die spezifischen Einsatzbedingungen unausweichlich. Für eine Adaption traditioneller Ansätze an Einsatzbedingungen mit hohen Unsicherheiten (z.B. radikale Innovationen) sind sie jedoch nicht ausgelegt.

Agile Entwicklungsansätze dagegen sind insbesondere für unsichere und dynamische Einsatzbedingungen konzipiert. Sie begünstigen grundsätzlich eine innovations- und kreativitätsfördernde Arbeitskultur und steigern über das regelmäßige Einholen von Stakeholder-Feedback die Chance, dass das Produkt am Markt Erfolg hat. Im Vordergrund steht die Lösung der tatsächlichen Kundenbedarfe und nicht wie in traditionellen Standards das Erfüllen von Vertragsvereinbarungen. Darüber hinaus stimulieren agile Ansätze das Hervorbringen von radikalen Innovationen, was insbesondere im Hinblick auf die Wettbewerbsposition positive Effekte haben kann. Demnach wecken agile Ansätze Begierden (z.B. nach mehr Flexibilität, selbstorganisierte Teams etc.), die traditionelle Standards aufgrund ihrer Steifigkeit und Plangetriebenheit nicht erfüllen.

Auch wenn agile Entwicklungsansätze prinzipiell gewinnbringend sind, stoßen sie in Non-Softwareindustrien wegen der physischen Produktgestalt derzeit schnell an die Grenze des Machbaren. Bspw. ist die Herstellung von physischen Prototypen in Iterationen von wenigen Wochen eine Herausforderung, ebenso das Besetzen der Teams. Um die agilen Werte und Prinzipien tatsächlich zu leben, ist das Lösen dieser Einschränkungen der Körperlichkeit unverzichtbar.

Zusammengefasst stellen agile Entwicklungsansätze momentan keine ernstzunehmende Alternativen zu bewährten, traditionellen Produktentwicklungsstandards wie der VDI 2221 oder VDI 2206 dar. Solange die Einschränkungen der Körperlichkeit existieren, bleiben sie in der Entwicklung physischer Produkte Gedankenexperimente und Ausdruck nach Begierden. Nichtsdestotrotz können neuartige Technologien wie z.B. additive Fertigungsverfahren sowie Augmented und Virtual Reality, deren technologische Reifegrade mittlerweile eine verlässliche Alltagstauglichkeit aufweisen [32], [33], als potentielle Lösungsansätze fungieren. Zukünftige Forschung sollte daher versuchen, die Einschränkungen der Körperlichkeit z.B. mit Hilfe obiger Technologien zu minimieren. Werden die Einschränkungen der Körperlichkeit auf ein Minimum reduziert, ist es naheliegend, dass die agilen Ansätze, die wie das V-Modell zunächst in der Softwareindustrie hervorgekommen sind, gewinnbringend in Non-Softwareindustrien diffundieren.

Literatur

- [1] E. Von Hippel, "'Sticky information' and the locus of problem solving: implications for innovation.," *Manage. Sci.*, vol. 40, no. 4, pp. 429–439, 1994.
- [2] S. Thomke, "Learning by experimentation: Prototyping and testing," in

-
- Handbook of New Product Development Management*, C. H. Loch and S. Kavadias, Eds. Oxford: Elsevier, 2008, pp. 401–420.
- [3] S. Minderhoud and P. Fraser, "Shifting paradigms of product development in fast and dynamic markets," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 88, no. 2, pp. 127–135, 2005.
- [4] P. Link, "Agile Methoden im Produkt-Lifecycle-Prozess: Mit agilen Methoden die Komplexität im Innovationsprozess handhaben," in *Komplexitätsmanagement in Unternehmen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014, pp. 65–92.
- [5] S. Nerur and V. Balijepally, "Theoretical reflections on agile development methodologies," *Commun. ACM*, vol. 50, no. 3, pp. 79–83, 2007.
- [6] H. Adickes et al., "Lean Innovation – Auf dem Weg zur Systematik," in *AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloqium*, Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Perspektiven, Ed. Aachen: Apprimus, 2008, pp. 473–512.
- [7] M. Laanti, O. Salo, and P. Abrahamsson, "Agile methods rapidly replacing traditional methods at Nokia: A survey of opinions on agile transformation," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 276–290, 2011.
- [8] A. Janes and G. Succi, "The dark side of agile software development," in *Proceedings of the ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming and Software*, 2012, pp. 215–227.
- [9] VDI 2221, "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte." VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [10] VDI 2206, "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme." VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [11] T. S. Schmidt, F. Guaragni, and K. Paetzold, "Demerging agility, leanness, flexibility, reconfigurability and changeability: Towards a clear distinction," in *22th Int. Conf. Eng. Technol. Innov.*, 2016.
- [12] K. Conboy, "Agility from first principles: Reconstructing the concept of agility in information systems development," *Inf. Syst. Res.*, vol. 20, no. 3, pp. 329–354, 2009.
- [13] R. Haberfellner and O. de Weck, "Agile SYSTEMS ENGINEERING versus AGILE SYSTEMS engineering," *INCOSE Int. Symp.*, vol. 17, no. 2, pp. 1–17, 2005.
- [14] K. Beck et al., "Manifesto for Agile Software Development," 2001. [Online]. Available: agilemanifesto.org. [Accessed: 08-Jul-2016].
- [15] T. Dingsøyr et al., "A decade of agile methodologies: Towards explaining agile software development," *J. Syst. Softw.*, vol. 85, no. 6, pp. 1213–1221, 2012.

-
- [16] J. Bahlow et al., "Scrum als Methode für agiles Projektmanagement," in *Agiles Projektmanagement in der Praxis der Produktentwicklung*, G. Kullmann et al., Eds. Chemnitz: aw&I Wissenschaft und Praxis, Technische Universität Chemnitz, 2013, pp. 11–19.
- [17] K. Schwaber and J. Sutherland, "Der Scrum Guide," 2013.
- [18] S. Nerur, R. Mahapatra, and G. Mangalaraj, "Challenges of Migrating to Agile Methodologies," *Commun. ACM*, vol. 48, no. 5, pp. 73–78, 2005.
- [19] C. Ingvarsson Munthe et al., "Dealing with the devil of Deviations: Managing Uncertainty During Product Development Execution," *R&D Manag.*, vol. 44, no. 2, pp. 203–216, 2014.
- [20] S. Thomke and D. Reinertsen, "Agile Product Development: Managing development flexibility in uncertain environments," *Calif. Manage. Rev.*, vol. 41, no. 1, pp. 8–30, 1998.
- [21] E. Conforto et al., "Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other than Software Development?," *Proj. Manag. J.*, vol. 45, no. 3, pp. 21–34, 2014.
- [22] N. B. Moe, T. Dingsøy, and T. Dybå, "Understanding self-organizing teams in agile software development," *Proc. Aust. Softw. Eng. Conf. ASWEC*, no. 3, pp. 76–85, 2008.
- [23] T. Dybå and T. Dingsøy, "Empirical studies of agile software development: A systematic review," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 50, pp. 833–859, 2008.
- [24] K. Conboy et al., "People over process: Key challenges in agile development," *IEEE Softw.*, vol. 28, no. 4, pp. 48–57, 2011.
- [25] P. Gregory et al., "Agile Challenges in Practice: A Thematic Analysis," in *16th Int. Conf. on Agile Processes, in Software Engineering, and Extreme Programming*, 2015, vol. 212, pp. 64–80.
- [26] S. Freudenberg and H. Sharp, "The top 10 burning research questions from practitioners," *IEEE Softw.*, vol. 27, no. 5, pp. 8–9, 2010.
- [27] N. Ovesen, *The Challenges of Becoming Agile: Implementing and Conducting SCRUM in Integrated Product Development*. Aalborg University: Ph.D. Thesis, 2012.
- [28] A. Schröder and R. Müller, "Das 90er-Jahre-Denken passt nicht mehr," *Der F&E Manag. - Für mehr Effizienz der Innov.*, no. 1, pp. 22–28, 2015.
- [29] A. Schröder and A. Schrofner, "Hochleistung ist crossfunktional," *Der F&E Manag. - Für mehr Effizienz der Innov.*, no. 4, pp. 6–13, 2015.
- [30] A. Schröder and H. Erretkamps, "Scrum like it hot! Best Practice Interview mit Heinz Erretkamps," *Der F&E Manag. - Für mehr Effizienz der Innov.*, no. 1, pp. 6–11, 2014.
- [31] D. Dörner, "Gedächtnis und Konstruieren," in *Psychologische und Pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren, Ergebnisse des*

-
- Ladenburger Diskurses*, G. Pahl, Ed. Köln: TÜV Rheinland, 1994.
- [32] S. Richter and S. Wischmann, *Additive Fertigungsverfahren*. Berlin: iit-Berlin, 2016.
- [33] S. Choi, K. Jung, and S. D. Noh, "Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions," *Concurr. Eng. Res. Appl.*, vol. 23, no. 1, pp. 40–63, 2015.